

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

JONES ZAMBONI GRAOSQUE

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO IMAGENS C-SAR E
SRTM , NAS PROVÍNCIAS DE SANTA FE E ENTRE RÍOS - ARGENTINA.**

PORTO ALEGRE
2018

JONES ZAMBONI GRAOSQUE

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO IMAGENS C-SAR E
SRTM, NAS PROVÍNCIAS DE SANTA FE E ENTRE RÍOS - ARGENTINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para obtenção de título de Mestre em Geografia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Laurindo A. Guasselli

Porto Alegre
2018

JONES ZAMBONI GRAOSQUE

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO IMAGENS C-SAR E
SRTM, NAS PROVÍNCIAS DE SANTA FE E ENTRE RÍOS - ARGENTINA**

Orientador: _____

Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli, UFRGS

Banca examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira (PPGSRM/UFRGS)

Prof^a. Dr^a. Kátia Kellem da Rosa (POSGEA/UFRGS)

Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer (POSGEA/UFRGS)

CIP - Catalogação na Publicação

Graosque, Jones Zamboni
MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO
IMAGENS C-SAR E SRTM, NAS PROVÍNCIAS DE SANTA FE E
ENTRE RÍOS - ARGENTINA / Jones Zamboni Graosque. --
2018.

119 f.

Orientador: Laurindo Antônio Guasselli.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre,
BR-RS, 2018.

1. Mapeamento. 2. Sensoriamento remoto. 3.
Inundação. 4. Radar. 5. Sentinel - 1. I. Guasselli,
Laurindo Antônio, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares, que me apoiaram nessa jornada acadêmica, em especial à Clara Zamboni que, além de ser minha mãe, sempre me incentivou e deu suporte necessário para meus estudos.

Ao orientador professor Laurindo Antônio Guasselli, pelo voto de confiança nesta pesquisa e pela valiosa assistência não só através do aprimoramento da dissertação, como também em todos os processos do programa de mestrado.

Ao professor Guilherme Garcia de Oliveira pela ajuda para o desenvolvimento da dissertação.

À comissão do Programa de Pós Graduação em Geografia (POSGEA/UFRGS) pela paciência e atenção nos processos do programa de mestrado e por promover a possibilidade de intercâmbio acadêmico.

Aos professores do POSGEA que em cada disciplina promoveram novas reflexões e ideias.

À CAPES que através da bolsa de estudos possibilitou a dedicação exclusiva às tarefas de pesquisa.

Ao Departamento de Geografia da Universidade de Tübingen, pela oportunidade de intercâmbio e toda estrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos que sempre estiveram do meu lado e que me mantiveram sem muito estresse durante o curso.

À Wiebke Ramm pela parceria e grande ajuda não só na pesquisa, mas também nos trâmites internacionais.

RESUMO

Eventos de inundação são fenômenos geralmente associados a eventos de chuvas intensas. Nesses eventos a cobertura de nuvens, normalmente, prejudica o mapeamento com uso de imagens ópticas. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os resultados de mapeamento de áreas de inundação utilizando imagens SAR e SRTM. Para aplicação dos métodos foram analisadas as áreas de inundação nas cidades de Santa Fe e Parana, na Argentina. Embora a maior inundação registrada tenha sido no ano de 2003, registros de inundação são frequentemente observados nas províncias de Santa Fé e Entre Ríos. Foi utilizado imagens do satélite Sentinel-1, equipado com sensor C-SAR com dupla polarização (VV/VH). As imagens obtidas são do tipo Interferométrico (IW) *Ground Range Detected* (GRDH) com resolução espacial de 10 m. Foram utilizadas imagens em períodos com e sem eventos de inundação entre 2016 e 2017, calibradas e coregistradas. Sobre as imagens foram aplicadas técnicas de limiarização e de análise temporal para mapear a mancha de inundação. Também foi elaborado mapa a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizando como referência estações de medição de nível da água dos rios. A validação de todos os métodos foi totalmente remota, baseando-se em um mapeamento da inundação de abril de 2003 na cidade de Santa Fe. Além disso, imagens publicadas de eventos de inundação complementaram a validação e foi possível comparar os resultados com uma imagem óptica Landsat – 8 com resolução de 15 m do dia 22 de fevereiro de 2016, quando o nível do rio Paraná estava acima do nível de alerta. Os resultados dos três mapeamentos foram somados para formar uma única imagem com a mancha de inundação em comum. Entre as melhores acurácias, o método de análise do MDE atingiu o melhor resultado, 82% da área de inundação, no entanto, considerando os três métodos, a acurácia atinge mais de 91% de precisão. A técnica de limiarização foi mais eficiente em áreas sem alvos verticais, como áreas urbanas por exemplo. O MDE foi eficiente para simular a inundação em todos os alvos, no entanto em modelos de elevação com melhor resolução, o resultado final do mapeamento será mais preciso. A análise temporal mostrou ser uma técnica promissora para mapeamentos de inundação, no entanto um mapa detalhado de uso de solo é fundamental para aprimorar o resultado desta análise. Todos os processos foram feitos remotamente, possibilitando o desenvolvimento no futuro de um sistema automático para detecção de evento de inundação que pode ser aplicado em áreas com características similares.

Palavras-chave: Análise temporal, histograma, modelo digital de elevação, SENTINEL-1.

ABSTRACT

Flood events usually go hand in hand with intensive rainfall during which clouds compromise any mapping attempts with optical imagery. Thus, this thesis aims at evaluate the results of mapping flood areas using SAR and SRTM images. For this purpose, flood areas in the cities Santa Fe and Parana in Argentina were analyzed. While the worst flood was registered in 2003, flood events frequently occur in both provinces Santa Fé and Entre Ríos. The employed Sentinel-1 satellite carrying a C-SAR sensor with dual polarization (VV/VH) provided interferometric (IW) *Ground Range Detected* (GRDH) imagery with a spatial resolution of 10 meters. Images from periods with and without flood events between 2016 and 2017 were calibrated and co-registered. Subsequently on the images were applied threshold and time analysis techniques, as well as a Digital Elevation Model (DEM) analysis with data from stations which measure the rivers' water levels. The validation of all methods was totally remote, based on a flood mapping of April 2003 in the city of Santa Fe. In addition, published images of flood events complemented the validation and it was possible to compare the results with an optical image Landsat - 8 with 15 m resolution of February 22, 2016, when the level of the Paraná River was above the alert level. The three maps were summed to form a single image with the flood spot in common. Among the best accuracy, the MDE analysis method achieved the best result, 82% of the flood area, however, considering all three methods, the accuracy reaches more than 91% accuracy. The thresholding technique was more efficient in areas with no vertical targets, such as urban areas. The DEM was efficient to simulate flooding on all targets, however using elevation models with better resolution, the final result of the mapping will be more accurate. The temporal analysis showed to be a promising technique for flood mapping, however a detailed map of land use is fundamental to improve the results of this analysis. All processes were done remotely, allowing the future development of an automatic flood event detection system that can be applied in areas with similar characteristics.

Key words: time analysis, histogram, digital elevation model, SENTINEL-1.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	15
2. ÁREA DE ESTUDO	16
2.1 Localização da área	16
2.2 Clima	17
2.3 Características hidrológicas	19
2.4 Uso da terra	23
3. REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1 Processos fluviais	24
3.2 Monitoramento de desastres relacionados a eventos extremos	25
3.3 Sistemas SAR orbitais	28
3.3.1 Satélite Sentinel 1	28
3.4 Sistema de imageamento SAR	29
3.4.1 Parâmetros do sensor	32
3.4.2 Parâmetros do alvo	34
3.4.3 Distorções e geometria de imageamento	36
3.4.4 Interpretação visual de imagens SAR	36
3.5 Mapeamento de inundações com imagens SAR e Modelo Digital de Elevação	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1 Imagens SAR e Modelo Digital de Elevação	41
4.2 Métodos e validação	44
4.2.1 Pré-processamento das imagens	48
4.2.1.1 Subset	48
4.2.1.2 Calibragem do sinal (calibragem radiométrica)	48
4.2.1.3 Filtragem <i>speckle</i>	49
4.2.1.4 Correção do terreno e projeção	50
4.2.2 Análise do histograma (limiarização)	50
4.2.3 Análise temporal	52
4.2.3.1 Coregistro	53
4.2.3.1.1 Criar o “empilhamento de imagens” (<i>create stack</i>)	54
4.2.3.1.2 Correlação cruzada	55
4.2.3.1.3 Ferramenta “ <i>Warp</i> ”	55
4.2.3.2 <i>Stack averaging</i>	55
4.2.4 Análise do Modelo Digital de Elevação	57
4.2.5 Mapas agregados	58
4.2.5.1 Máscara de inclinação	58
4.2.6 Validação	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 Análise do histograma (limiarização)	60
5.2 Análise temporal	69
5.3 Análise do Modelo Digital de Elevação	82
5.4 Comparação e Mapas agregados	91

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

Lista de figuras

Figura 1. Localização da área de estudo.	16
Figura 2. Escalas de eventos do El Niño: fraco, moderado, forte e muito forte.	17
Figura 3. Distribuição pluviométrica mensal no município de Cáceres – MT, Brasil, durante o período de 1979 a 2009.	19
Figura 4. Registro de desastres na “Região Litoral”, Argentina, no período de 1970 a 2004 (1). Impactos dos desastres na mesma região (2).	20
Figura 5. Extensão da superfície de inundação (azul escuro) de 2007 em três momentos: no início, meio e no pico da inundação onde a altura das águas atingiu o ponto máximo na cidade de Rosário, Argentina.	22
Figura 6. Representação de uma planície de inundação.	25
Figura 7. Modos de operação Sentinel 1.	29
Figura 8. Imagens sobre a cidade de Parana: 1) Imagem de radar Sentinel – 1; 2) Imagem óptica Landsat 8. Data de ambas imagens: 19/04/2016.	30
Figura 9. Tipos de espalhamento do sinal SAR sobre diferentes superfícies.	32
Figura 10. Representação das características de uma onda eletromagnética: onda com polarização vertical no eixo V; onda com polarização horizontal no eixo H; comprimento de onda (λ); amplitude (A); fase (φ).	33
Figura 11. Geometria do sistema SAR.	34
Figura 12. Caso A: Uma superfície é considerada plana se a variação de altura da superfície do objeto iluminado for muito menor do que o comprimento de onda do radar. A variação de altura é a média das alturas da superfície (uma superfície perfeitamente lisa teria a variação de altura ou média de zero, no entanto, isso não existe na natureza). Neste caso, apenas uma pequena quantidade de energia é devolvida ao sensor, a maior parte da energia é refletida para longe do sensor; Caso B: Se a superfície for rugosa em relação ao tamanho do comprimento de onda, dispersará a energia difusamente e uma porção significativa da energia será retroespalhada para o sensor.	35
Figura 13. Comportamento do retroespalhamento na área urbana e arborizada com e sem inundação.	40
Figura 14. Mapa de localização dos pontos de coleta de nível d’água.	42
Figura 15. Histórico de nível d’água na estação Sistema Setúbal.	43
Figura 16. Histórico de nível d’água a partir do ano de 2016 até início	

de 2017. Estação Sistema Setúbal. As datas de imagens SAR e os níveis da água correspondentes estão destacados.	43
Figura 17. Imagem SAR do dia 10 de outubro de 2016. Em verde estão os pontos de coleta de nível de água.	45
Figura 18. Fluxograma das metodologias aplicadas na pesquisa.	47
Figura 19. Imagem SAR com região de interesse destacada.	51
Figura 20. Amostras de imagens com retroespalhamento mínimo, médio e variação temporal. Em destaque a cidade de Santa Fe.	56
Figura 21. Procedimento para o cálculo do modelo HAND. Os quadrados destacados representam os pontos da grade que pertencem à rede de drenagem. Somente as setas pretas são consideradas fluxo de drenagem	57
Figura 22. Mapa de inundação de abril de 2003	59
Figura 23. Histograma de retroespalhamento da área suscetível à inundação, imagem SAR, de 19 de abril de 2016, da área de interesse (ROI).	61
Figura 24. Imagem binária resultado do processo de limiarização, classe água e não água. As áreas de água de inundação e água permanente estão na mesma classe.	62
Figura 25. Comparação entre a imagem SAR sem mancha de inundação e com máscara de inundação extraída pelo processo de limiarização.	62
Figura 26. Mapa de inundação a partir de limiarização sobre imagem Landsat 8, 03 de outubro de 2016	64
Figura 27. Mancha de inundação entre as cidades de Santa Fe e Parana. Em destaque estão áreas arborizadas, excluídas pelo método de limiarização das áreas de inundação. As réguas de medição do nível d'água estão representadas por pontos em verde.	65
Figura 28. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) da cidade de Santa Fe.	66
Figura 29. Comparação da imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) na área rural ao sul da cidade de Santa Fe.	67
Figura 30. Comparação entre a imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar (direita) da cidade de Parana.	68
Figura 31. Mapa de inundação a partir da análise temporal sobre imagem Landsat 8.	70
Figura 32. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar (direita) da cidade de Santa Fe.	71

Figura 33. Análise do histograma em área urbana. Imagens de abril e fevereiro representam meses com inundação e imagens de outubro e dezembro sem inundação.	72
Figura 34. Retroespalhamento entre imagens com inundação e sem inundação na área urbana. A variável “x” representa a mancha de inundação.	73
Figura 35. Inundação na cidade de Santa Fe – Argentina, em 29 de março de 2016.	74
Figura 36. Retroespalhamento entre imagens com inundação e sem inundação nas áreas úmidas. A variável “x” representa a mancha de inundação.	76
Figura 37. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) em área úmida ao sul das cidades de Santa Fe e Parana.	77
Figura 38. Retroespalhamento entre imagens com inundação e sem inundação na área rural. A variável “x” representa a mancha de inundação.	78
Figura 39. Inundação em área rural com solo parcialmente coberto pela lâmina de água.	79
Figura 40. Pecuária nas ilhas do rio Paraná na província de Santa Fé.	79
Figura 41. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) na área rural ao sul da cidade do Parana.	80
Figura 42. Histogramas comparando a intensidade das áreas arborizadas com e sem inundação.	81
Figura 43. Gráficos comparando as intensidades de retroespalhamento médio entre áreas inundadas e não inundadas.	81
Figura 44. Fotografia do distrito de Colastine durante inundação no mês de janeiro de 2016.	82
Figura 45. Mapa de inundação a partir da análise do MDE sobre imagem Landsat 8.	83
Figura 46. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação e imagem óptica sem máscara de inundação, na cidade de Santa Fe e Santo Tomé.	84
Figura 47. Imagem à direita: Mancha de inundação na cidade de Santa Fe ocorrido na data de 3 de maio de 2003. Imagem à esquerda: Mesmo mapa da direita, porém com a máscara de inundação gerada pela análise do MDE em verde	86
Figura 48. Sistema de diques na cidade de Santa Fe. Diques representados pela linha verde. Identificação das zonas da cidade.	87

Figura 49. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem óptica sem máscara de inundação (direita), área rural do município de Coronda próximo da régua de medição de nível de água Colastiné – Autopista.	88
Figura 50. Cidade de Parana com (esquerda) e sem (direita) a mancha de inundação.	88
Figura 51. Perfil topográfico entre as áreas urbanas de Santa Fe (A) e Parana (B).	89
Figura 52. MDE da área de estudo.	90
Figura 53. Mapa de inundação a partir da soma das áreas obtidas com as metodologias de limiarização, série temporal e MDE, sobre imagem Landsat 8.	92
Figura 54. À esquerda: Mancha de inundação da validação, extraída de Conae, 2017. À direita: Mancha de inundação de todos os resultados agregados e a mancha validada	93
Figura 55. Comparação dos resultados na cidade de Santa Fe.	95
Figura 56. Área urbana do município de Santa Fe no ano de 2012.	96
Figura 57. Inundação no município de Santa Fe.	96
Figura 58. Comparação de resultados em áreas arborizadas.	98
Figura 59. Árvores em meio à área de inundação.	98
Figura 60. Inundação na cidade de Parana no ano de 2007.	99
Figura 61. Comparação de resultados em Coronda.	100
Figura 62. Estrada “Autopista – Rosário Santa Fe AP 01” inundada. Margem do rio em Coronda no ano de 2013.	100
Figura 63. Comparação dos resultados em áreas úmidas.	101
Figura 64. Gado em área de inundação do rio Paraná. Transporte do gado.	102

Lista de quadros

Quadro 1. Agências membros do International Charter e seus satélites.	27
Quadro 2. Características dos modos de operação Sentinel 1.	29
Quadro 3. Comparação por observação de imagem óptica Landsat – 8. ...	91
Quadro 4. Porcentagem de área inundada por método utilizado.	94

Lista de tabelas

Tabela 1. Níveis de alerta e de evacuação nas cidades de Santa Fe, Parana e Santo Tomé, Argentina.	21
---	----

Lista de siglas

σ° - Coeficiente de retroespalhamento

λ - Comprimento de onda

φ - Fase

θ - Ângulo de incidência

A - Amplitude

ALOS – *Advanced Land Observing Satellite*

ASAR/ENVISAT – *Advanced Synthetic Aperture Radar/Environmental Satellite*

CCI – LC – *Climate Change Initiative - Land Cover*

CNES – *Centre National d'études Spatiales*

CPM – *Coregistration Polynomial*

CSA – *Canadian Space Agency*

ESA – *European Space Agency*

ERS – *European Remote Sensing Satellite*

EW – *Extra-wide Swath*

Gb – *Gigabyte*

GCP – *Ground Control Points*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

HAND – *Height Above the Nearest Drainage*

HH – *Horizontal - Horizontal*

INTA – *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária*

IW – *Interferometric Wave Swath*

LUT – *Look Up Tables*

MDT – *Modelo Digital de Terreno*

MDE – *Modelo Digital de Elevação*

PCS – *Ponto de Controle na Superfície*

RM – *Retroespalhamento Mínimo*

RM¹ - *Retroespalhamento Médio*

ROI – *Region of Interest (Região de interesse)*

SAR – *Synthetic Aperture Radar*

SM – *Stripmap*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

Vant – Veículo aéreo não tripulado

VH – Vertical - Horizontal

VT – Variação Temporal

VV – Vertical Vertical

WV – *Wave Mode*

1. INTRODUÇÃO

Entre os desastres naturais, as inundações talvez sejam o tipo de evento mais frequente e o que causa maior destruição em todo o mundo (SANYAL & LU, 2004). Segundo Enomoto (2004), as inundações são o resultado do extravasamento das águas do leito menor de um rio. As áreas mais suscetíveis às inundações estão localizadas em relevos planos e rebaixados, como as planícies fluviais, onde há acumulação de água e sedimentos, causando danos tanto à agricultura quanto à infraestrutura urbana. Além disso, tem sido amplamente aceito que a frequência e a magnitude das inundações fluviais pode aumentar devido às alterações climáticas (MOEL, 2009).

O uso de imagens de sensoriamento remoto é uma forma eficiente de gestão das áreas onde desastres associados a eventos extremos ocorrem através da identificação de áreas suscetíveis, planejamento urbano e causas e efeitos dos eventos. Desenvolver técnicas de sensoriamento remoto proporciona o entendimento de onde e quando um desastre provavelmente irá ocorrer, e isso resulta em um importante impacto socioeconômico (TRALLI *et al.*, 2005).

O monitoramento de áreas suscetíveis e vulneráveis a desastres associados a eventos extremos tem sido agilizado com uso de técnicas de sensoriamento remoto, tanto pelo desenvolvimento tecnológico quanto pela necessidade de monitoramento diante das mudanças climáticas global. A aplicação de imagens de sensoriamento remoto pode ser realizada a partir diversos tipos de imagens, técnicas e abordagens (JOYCE *et al.*, 2009).

O uso de sensores ópticos, que operam no espectro do visível e do infravermelho, pode ser um problema na detecção de imagens em eventos de inundação, pois normalmente a cobertura de nuvens atrapalha a obtenção de imagens.

As imagens de radar de abertura sintética (SAR) são produzidas por sensores ativos que operam no espectro das micro-ondas conhecidas por ondas de rádio, o que possibilita adquirir imagens, independente da cobertura de nuvem ou fumaça, e pode inclusive captar imagens noturnas. O radar imageador é um sensor de

radiofrequência que permite derivar informações sobre características físicas e elétricas dos alvos (PARADELLA *et al.*, 2005). Além disso, com imagens SAR é possível extrair manchas de inundação de forma automatizada (SANTORO *et al.*, 2015), fornecendo maior agilidade e precisão no processo de mapeamento destes eventos. Estas características tornam o SAR uma ferramenta útil para o mapeamento de eventos de inundação principalmente em bacias maiores, tendo em vista que em bacias pequenas os eventos são mais rápidos.

Outra característica que diferencia as imagens de radar das demais é o de permitirem a obtenção de informações do terreno através da cobertura vegetal. A radiação de micro-ondas tem maior poder de penetração nos dosséis de vegetação e no solo quando comparada à radiação visível e infravermelho próximo. Isso é muito importante para o mapeamento de áreas de inundação, pois normalmente áreas inundáveis contam com cobertura vegetal (NOVO, 2006).

Na Argentina, inundação é o evento natural que mais causa perdas tanto econômicas e sociais quanto de vidas humanas. Somente na “Região Litoral” que corresponde as províncias de Formosa, Chaco, Misiones, Corrientes, Santa Fe e Entre Ríos, entre 1970 e 2004 foram 165 mortes e quase 6000 feridos. Quase um milhão de pessoas foram evacuadas e aproximadamente 18.000 residências destruídas (CLIMATE DATA, 2017). Além disso, estimam-se perdas de 1,7 milhão de cabeças de gado, e na agricultura mais de 28 milhões de hectares atingidos (CELIS, 2006).

As províncias de Santa Fe e Entre Ríos, registram com frequência eventos de inundação nas cidades ribeirinhas, entre elas centros importantes como a capital Santa Fé de la Vera Cruz e Parana (CELIS, 2006; BRAKENRIDGE, 2017). Ainda, segundo a mesma fonte, numa das mais graves inundações da história do país ocorrida em abril de 2003, choveu em cinco dias 550 mm na região de Santa Fé, sendo que a média para o mês de abril é 100 mm (CLIMATE DATA, 2017). A inundação mais recente ocorreu entre 17 de dezembro de 2016 e 17 de janeiro de 2017, com volume acumulado de chuvas de aproximadamente 500 mm no período de um mês (SMN, 2017).

Além da descarga do volume de água vindo das nascentes do rio Paraná (por exemplo), as províncias de Entre Ríos e Santa Fé periodicamente enfrentam

grandes volumes de chuva durante o ano. Por estar na área de planície de inundação do Paraná, as cidades de Santa Fe, Parana e outros centros urbanos menores estão próximas às áreas de inundação do rio Paraná e, por consequência, estão sujeitas a sofrer com inundações frequentemente.

Além disso, esta região já sofreu com grandes perdas na agricultura e na pecuária, tendo expressivo prejuízo neste setor (Notícias Agrícolas, 2017; Correio do Brasil, 2017; AGROLINCK, 2017).

Desta forma, esta pesquisa busca avaliar os resultados do mapeamento da área de inundação do rio Paraná e seus afluentes na área que abrange as cidades de Santa Fe e Parana. Tão importante quanto, é entender se a partir de imagens SAR de banda C é possível identificar com precisão as áreas de inundação.

1.1 Objetivos

Objetivo Geral:

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar os resultados de métodos de mapeamento das áreas de inundação utilizando imagens C - SAR e MDE junto com dados de coleta de nível de água obtidas em campo, na província de Santa Fe e Entre Ríos - Argentina.

Objetivos específicos:

- Mapear as áreas de inundação por limiarização;
- Mapear as áreas de inundação pelo método de análise temporal;
- Mapear as áreas de inundação com base no MDE e nas réguas de medições de nível do rio Paraná;
- Agregar as áreas resultantes das três técnicas em um mapa de área suscetível de inundação e avaliar o resultado em um único mapa.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização da área

A localização da área de estudo abrange um trecho do rio Paraná que divide duas províncias argentinas, Santa Fe e Entre Ríos, e faz limite para as cidades de Santa Fe e Parana. Nesta área a planície de inundação se estende além dos limites do rio, com potencial para atingir a área urbana de Santa Fe, por isso o foco da pesquisa é analisar a área que inclui as duas maiores cidades de cada uma destas províncias e seus arredores, Figura 1.

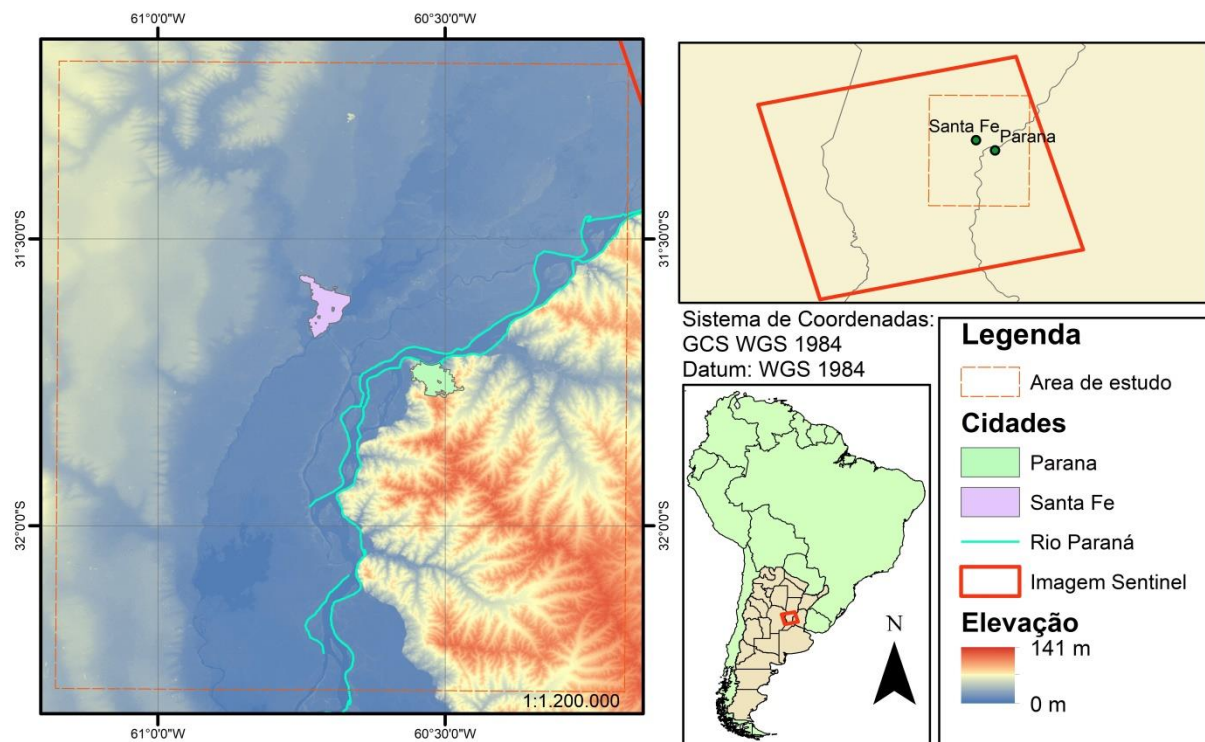


Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Segundo a Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2013) ao longo do rio Paraná existem diversas áreas úmidas que são classificadas por características de clima, solo, geomorfologia, etc. A área deste estudo engloba parte de três destas regiões: Áreas úmidas das bacias fluviais do centro-leste

santafesino; Áreas úmidas do rio Paraná com grandes lagoas e Áreas úmidas dos afluentes entre rios curtos do rio Paraná.

2.2 Clima

A proximidade do rio Paraná e numerosos cursos fluviais que fluem na área de estudo contribuem para uma variação térmica considerável durante o ano. Considerando a série de dados meteorológicos 1961-1990, García (1994) observou que a precipitação média anual fica em torno de 1100 a 1200 mm, com menor concentração de chuvas nos meses de inverno e maior concentração em dois momentos, em março/abril e dezembro/janeiro. As temperaturas médias são de 25°C no verão e 12°C no inverno e com ventos dominantes vindos de nordeste.

No entanto, é importante considerar que as inundações no rio Paraná podem ser causadas por fatores diferentes aos de precipitação na área de estudo. A bacia do rio Paraná abrange uma área de aproximadamente 2 milhões de km² e possui rios tributários com grande volume da água, a exemplo do rio Paraguai e rio Paranaíba (ZAGARE, 2010). Além disso, fatores climáticos a exemplo do El Niño, Figura 2, podem alterar o volume de água no rio Paraná (JAIME, 2002).

El Niño			
Fraco - 10	Moderado - 7	Forte - 5	Muito Forte - 3
1952-53	1951-52*	1957-58	1982-83
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98
1958-59	1968-69*	1972-73	2015-16
1969-70	1986-87	1987-88*	
1976-77	1994-95*	1991-92*	
1977-78	2002-03		
1979-80	2009-10		
2004-05			
2006-07			
2014-15*			

Figura 2. Escalas de eventos do El Niño: fraco, moderado, forte e muito forte. Fonte: GGWEATHER (2017).

As chuvas que atingem a cabeceira da bacia hidrográfica do Paraná estão entre as principais causas das inundações a jusante do rio Paraná na Argentina. A diversidade de características fisiográficas, hidrometeorológicas e hidrográficas presentes ao norte da bacia do Paraná, fazem necessário uma interpretação em separado, de acordo com cada sub-bacia.

A sub-bacia do Alto Paraná abrange os rios Paranaíba, Grande, Tietê e Paranapanema, com superfície de aproximadamente 900.000 km², e tem uma grande influência no volume e duração das inundações. Nesta sub-bacia as precipitações se concentram normalmente no verão e no início do outono, aumentando o nível do rio Paraná nos meses de fevereiro e março (PAOLI, 2014).

A sub-bacia do rio Iguaçu com área de aproximadamente 64.000 km² tem características próprias muito importantes no desenvolvimento das inundações, uma vez que recebe precipitações significativas e com distribuição praticamente uniforme ao longo do ano com escoamento acentuado da bacia. Esta sub-bacia provoca inundações menos intensas do que as originadas no Alto Paraná, mas são muito importantes do ponto de vista da vazão máxima, podendo se sobrepor a outras contribuições importantes da bacia (BAUMGARTNER *et al.*, 2012).

Além destas sub-bacias, é importante destacar a importância que a sub-bacia do rio Paraguai tem nas inundações no baixo curso da bacia do rio Paraná na Argentina. Essa sub-bacia é de grande extensão, aproximadamente 1.115.000 km², e apresenta influência nas inundações de forma diferente em relação às do rio Paraná (Alto Paraná). Grande parte da bacia do rio Paraguai se encontra no Pantanal, que atua como um amortecedor natural da drenagem da bacia (PAOLI, 2014). As precipitações são inferiores às do Alto Paraná, com concentração no verão, mas devido à ação do amortecimento da região, as inundações acontecem com atrasos e se estendem por um longo período. A análise temporal das precipitações no Pantanal, Figura 3, mostra que as chuvas na região acompanham duas estações bem definidas durante o ano, a estação seca de maio a setembro e a chuvosa de outubro a abril, caracterizando o chamado “pulso de inundação” (DALLACORT *et al.*, 2014).

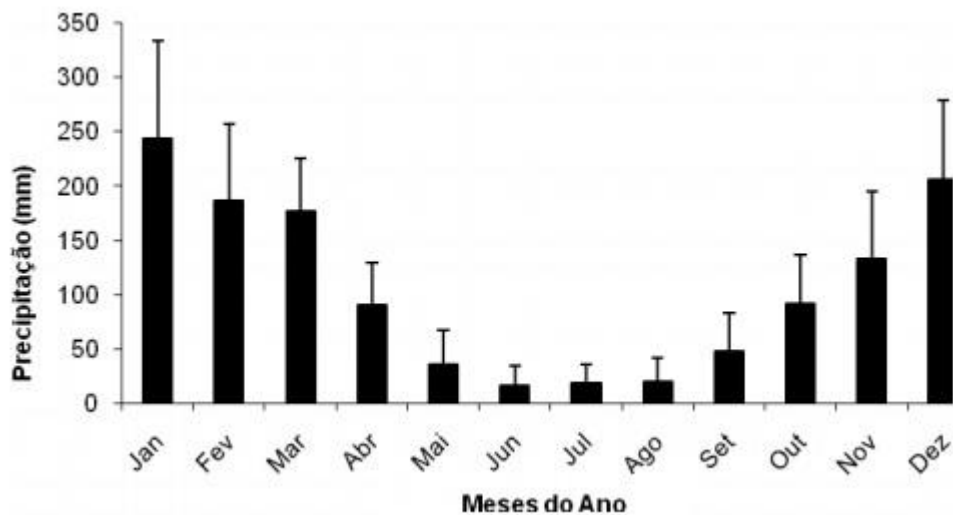


Figura 3. Distribuição pluviométrica mensal no município de Cáceres – MT, Brasil, durante o período de 1979 a 2009. Fonte: DALLACORT et al., 2014.

2.3 Características hidrológicas

De acordo com a *Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación* (2013), a área do curso do rio Paraná é descrita por diferentes tipos de áreas úmidas. No trecho em estudo, são destacadas as principais áreas úmidas como sendo:

a) Áreas úmidas diretamente influenciadas pelo canal principal do sistema: Incluem as zonas úmidas constituintes das ilhas centrais do canal principal e as zonas adjacentes da planície com geformas semelhantes. Além da variedade de tipos de áreas úmidas, outras características são a permanência da água de inundação e a alta taxa de mudança geomorfológica, que se manifesta pela erosão de margens e/ou pela formação de novas áreas insulares a taxas que variam entre dez e algumas centenas de metros por ano;

b) Zonas úmidas no ambiente de importantes canais ligados ao canal principal: São representadas por lagoas e pântanos localizados entre meandros, meandros abandonados e segmentos de canais isolados por avulsão. A altura topográfica atingida por suas geformas, associada à escassez relativa dos canais menores ativos em tal setor da planície faz com que essas áreas úmidas geralmente tenham baixa conectividade com o curso principal local;

c) Zonas úmidas no ambiente de canais importantes sem ligação direta ao canal principal: semelhante à unidade anterior, diferencia-se pela maior atividade morfológica de seus canais, que envolve a formação de novos cursos e o abandono parcial ou total de outros (RAMONELL *et al.*, 2011);

d) Grandes lagoas: São as principais zonas úmidas que distinguem esta parte da planície de inundação do rio Paraná. São corpos lênticos que atingem várias dezenas de km² de superfície. Além de sua extensão, essas áreas úmidas são caracterizadas por sua baixa profundidade (dois a três metros em média) e grande elasticidade. Sua alimentação ocorre principalmente por canais do sistema de diferentes tamanhos cujas características comuns são formar deltas de diferentes dimensões.

Inundação é o evento natural mais recorrente na Argentina e o que mais causa danos (CELIS, 2006). A Figura 4 mostra o registro de impactos causados por eventos naturais. Estão destacados os dois principais eventos: Inundação e tempestade.

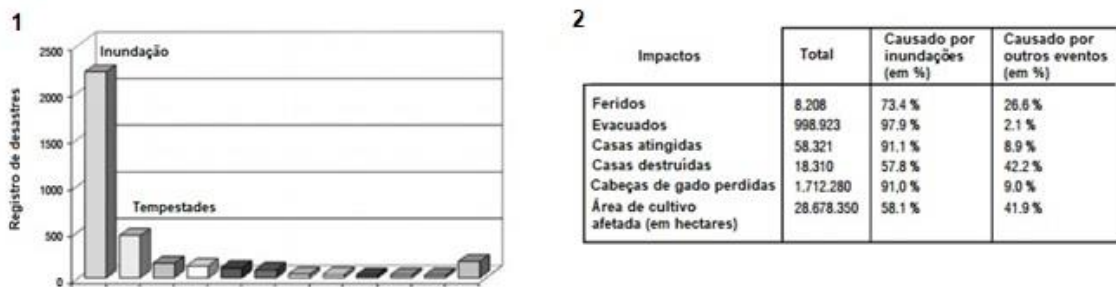


Figura 4. Registro de desastres na “Região Litoral”, Argentina, no período de 1970 a 2004 (1). Impactos dos desastres na mesma região (2). Fonte: Adaptado de Celis (2006).

Ramonell e Amsler (2005) indicaram um aumento na frequência de inundações da planície de inundação desde a década de 1970, concomitante com o aumento da precipitação. Segundo informações do *Centro de Informaciones Meteorológicas* (2017), existe um limite de alerta do nível do rio Paraná e do rio Salado. Estes níveis são monitorados diariamente e estão disponíveis online (<http://fich.unl.edu.ar/cim>).

Tabela 1. Níveis de alerta e de evacuação nas cidades de Santa Fe, Parana e Santo Tomé, Argentina.

Local	Rio	Nível de alerta (m)	Nível de evacuação (m)
Parana	Paraná	4,7	5
Santa Fe	Paraná	5,3	5,7
Santo Tomé	Salado	4,7	não disponível

Fonte: CIM (2017).

Os pulsos de inundação ocorrem de forma periódica provenientes principalmente do rio Paraná, com menores contribuições de precipitação dos afluentes das margens continentais (KANDUS *et al.*, 2011). Esses pulsos hidrossedimentológicos se caracterizam por contribuições cíclicas de água, sedimentos e organismos (JUNK *et al.*, 1989). Ainda segundo Kandus, o regime dos pulsos varia de acordo com os processos climáticos definidos pela circulação geral atmosférica e por anomalias como El Niño – Oscilação do Sul (ENSO).

Nas sub-bacias relacionadas ao alto curso da bacia do rio Paraná é onde se encontram os principais rios responsáveis pelos pulsos de inundação a jusante do rio Paraná. Em Corrientes, a confluência do rio Paraná com o rio Paraguai representa uma média de $17.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, podendo chegar a $60.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (PAOLI, 2014). Segundo Paoli, na Argentina, os afluentes laterais contribuem apenas em 5% da vazão total do rio Paraná.

O comportamento das inundações ocorre em pulsos, e as águas podem demorar semanas até atingir o ponto máximo do evento. Kandus *et al.* (2011) demonstraram em imagens com frequência semanal o desenvolvimento de um evento de inundação no delta do rio Paraná, a partir da cidade de Rosário, Argentina (Figura 5). Esta região está localizada ao sul das cidades de Santa Fe e Parana, no entanto o comportamento das inundações segue o mesmo padrão.

O pulso de inundação nas cidades de Santa Fe e Parana está relacionado ao padrão do pulso de inundação da sub-bacia do rio Paraguai, no entanto com atraso. Enquanto na sub-bacia o período de inundação começa em média em outubro, na altura de Santa Fe e Parana as inundações se intensificam, em média, no mês de

dezembro. A Figura 5 exemplifica a demora do pulso de inundação em atingir seu pico máximo na região da cidade de Rosário, Argentina.

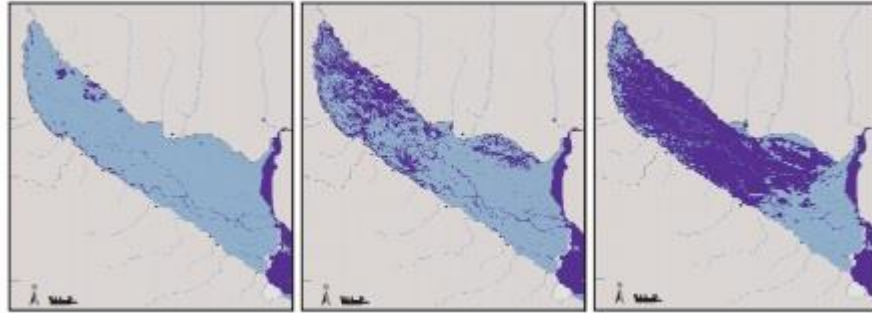


Figura 5. Extensão da superfície de inundação (azul escuro) de 2007 em três momentos: no início, meio e no pico da inundação quando a altura das águas atingiu o ponto máximo na cidade de Rosário, Argentina. Fonte: Kandus *et al.*, 2011.

No lado oeste do rio Paraná, próximo à cidade de Santa Fe a água tem origem principalmente fluvial, pluvial e subterrânea, sendo o rio Salado o principal fluxo de drenagem que deságua no rio Paraná. A planície do rio Salado integra canais permanentes e áreas de planície inundada transitoriamente da planície de inundação. O fluxo médio do rio Salado nos últimos 60 anos foi de $135 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com mínimos e máximos diários de quase $4.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, de acordo com os dados da Subsecretaria de Recursos Hídricos Federal (2012).

No lado leste do rio Paraná, se estende uma rede hidrográfica constituída por diferentes tipos de áreas úmidas, a exemplo de arroios e banhados que drenam o vale aluvial do rio Paraná. A geografia homogênea da área determina que a diversidade e o padrão de distribuição das zonas úmidas presentes seja semelhante em todo o sistema (ACEÑOLAZA *et al.*, 2008). Os cursos de água geram uma rede de córregos permanentes e sazonais. Eles têm um regime associado à precipitação e, na sua porção inferior, podem ser influenciados pela altura do rio Paraná. Ao longo de seus cursos podem encontrar diques parciais, realizados pelos proprietários dos campos, com a finalidade de reter água para o gado. Isso cria ambientes lânticos com superfícies geralmente menores do que um hectare (ACEÑOLAZA, 2013).

2.4 Uso da terra

Os maiores centros urbanos localizados na área de estudo são as cidades de Santa Fe (521.000 habitantes) e Parana (237.000 habitantes), estas impõem uma importante dinâmica no sistema em termos de uso da terra. O uso da terra é principalmente agrícola e de criação de gado. Uma alta porcentagem de estabelecimentos faz rotações anuais de trigo/soja e milho/soja. Há também pastagens implantadas e naturais, cuja localização é geralmente mais distante da costa do rio Paraná. A maioria dos produtores rurais é de pequena a média propriedade (com estabelecimentos variando entre 200 e 400 ha) que aplicam sistemas de agricultura mista (INTA, 1998; TASI, 2009).

Diferentes obras hidráulicas modificaram sua dinâmica local e por causarem efeitos a médio e longo prazo, os impactos ambientais de tais obras ainda são desconhecidos. Devido à sua magnitude, destaca-se o Canal de Acesso ao Porto de Santa Fe (início do século XX) e o próprio porto erguido sobre um meandro da margem do rio que drenava a lagoa de Setúbal. De igual importância são os taludes rodoviários das Rotas Nacionais nº 168 e Provincial nº 1 e os anéis de defesa contra enchentes da cidade de Santa Fe. O túnel subfluvial Hernandarias (que une Santa Fe e Parana) constitui outra estrutura de grande relevância. Além das obras mencionadas, há novos projetos planejados na região: a re-localização completa do Porto de Santa Fe no centro da planície e uma nova conexão rodoviária Santa Fe-Parana (MARCHETTI, 2013).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Processos fluviais

Entre as diferentes definições para bacia hidrográfica, muitas se assemelham ao conceito de Barrella (2001),

"um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formadas nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático". (BARRELLA, 2001, p. 32)

Teodoro *et al.* (2007) acrescentam ao conceito geomorfológico da bacia hidrográfica uma abordagem sistêmica. Para eles

"bacias hidrográficas são sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão. Desta forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico. Qualquer modificação no recebimento ou na liberação de energia, ou modificação na forma do sistema, acarretará em uma mudança compensatória que tende a minimizar o efeito da modificação e restaurar o estado de equilíbrio dinâmico". (TEODORO *et al.*, 2007, p.138).

Planícies de inundação, Figura 6, são originadas pela ação fluvial e podem ser definidas como uma faixa de terreno que acompanha o rio, com uma superfície topograficamente uniforme e que é coberta total ou parcialmente pelas águas durante os períodos de inundação (DRAGO, 1976 apud RIGHI, 2011). Christofolletti (1980) acrescenta que, hidrológicamente, uma planície de inundação é uma superfície sujeita a inundações periódicas. Em eventos de inundação, a água ocupa

principalmente as áreas mais planas e baixas do terreno, e por ocupar uma área maior, o escoamento é mais lento.



Figura 6. Representação de uma planície de inundação. Fonte: MARINHO (2011).

Imagens ópticas em conjunto com Modelo Digital de Elevação (MDE) são muito utilizadas para mapear a mancha de inundação e relacionar a área inundada com aspectos topográficos (SIQUEIRA *et al.*, 2006; HORA e GOMES, 2009).

No entanto, depender de um MDE para delimitar a área de inundação pode ser um problema em áreas muito planas, pois é preciso levar em conta estruturas que bloqueiam o fluxo de inundação, a exemplo de diques, estradas, etc. Com imagens de radar é possível mapear áreas de inundação com base no padrão que a água tem como resposta nas imagens SAR, sem depender do MDE. Normalmente em imagens de alta resolução a água responde de forma homogênea, facilitando a delimitação da área de inundação (ANH & DINH, 2009; GAHLAUT, 2017).

3.2 Monitoramento de desastres relacionados a eventos extremos

Segundo UN (2010) um desastre é a consequência de um perigo natural (inundação, por exemplo) sobre uma população vulnerável, causando danos e prejuízos materiais e perdas de vida. A vulnerabilidade humana, exacerbada pela falta de prevenção e preparação ou falta de sistemas adequados de resposta de

gestão de emergência, leva a perdas humanas, estruturais e financeiras. A perda resultante depende da capacidade da população afetada de suportar ou resistir ao perigo, isto é, sua resiliência.

O sensoriamento remoto atua como uma ferramenta que facilita o mapeamento e análise de áreas afetadas por desastres relacionados a eventos extremos. Com o uso de imagens SAR e ópticas, mapas podem ser elaborados, entre eles podem ser citados os mapas de extensão de inundação, profundidade, histórico e risco (tanto qualitativo quanto quantitativo) (MOEL, 2009). Metternicht *et al.* (2005), indicam que dados de sensoriamento remoto podem ser aplicados para detecção e identificação, monitoramento, análise e na previsão de áreas suscetíveis.

As imagens de sensoriamento remoto têm fundamental importância para a análise e acompanhamento de áreas atingidas por desastres, pois possibilitam o levantamento de dados com alta resolução espacial e temporal. A respeito disto, as agências espaciais do Canadá (CSA), França (CNES) e Europa (ESA) iniciaram o programa *International Charter – Space and Major Disasters*. Este programa teve como objetivo criar um sistema global de aquisição e disponibilização de imagens de sensoriamento remoto adquiridas sobre áreas afetadas por desastres naturais ou desastres causados por atividades antrópicas (THE INTERNATIONAL CHARTER, 2017).

Desde o lançamento deste programa, em março de 2011, os dados obtidos têm funcionado como um mecanismo fundamental para ações sobre áreas afetadas por desastres naturais (VOIGT *et al.*, 2007). Até o ano de 2017, foram realizadas mais de 500 ativações deste programa para a aquisição de material de sensores ópticos e SAR. Com o passar dos anos, muitas outras agências foram aderindo ao programa, Quadro 1.

Agências	Sensor
European Space Agency (ESA)	ERS, Envisat, Sentinel-1A / B, Sentinel-2A, Proba-V
Centre national d'études spatiales (CNES) Airbus Defence and Space	SPOT, Pléiades
Canadian Space Agency (CSA)	RADARSAT
Indian Space Research Organisation (ISRO)	IRS
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	POES, GOES
Argentina's Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)	SAC-C
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	ALOS
United States Geological Survey (USGS)	Landsat
Digital Globe	Quickbird
Geo Eye	GeoEye-1
UK Space Agency & DMC International Imaging (DMCii)	UK-DMC
Centre National des Techniques Spatiales (Algeria)	ALSAT-1
National Space Research and Development (Nigeria)	NigeriaSat
Tübitak-BILTEN (Turkey)	BILSAT-1
China National Space Administration (CNSA)	FY, SJ, ZY satellite series
German Aerospace Center (DLR)	TerraSAR-X, TanDEM-X
Korea Aerospace Research Institute (KARI)	KOMPSAT-2, KOMPSAT-3, KOMPSAT-5
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)	CBERS
European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)	Meteosat and Metop satellite series
The State Space Corporation Roscosmos (Roscosmos)	RESURS-DK1, RESURS-P, METEOR-M №1, KANOPUS-V
Agencia Bolivariana Para Actividades Espaciales (ABAE)	VRSS-1

Quadro 1. Agências membros do *International Charter* e seus satélites. Fonte: THE INTERNATIONAL CHARTER (2017).

3.3 Sistemas SAR orbitais

3.3.1 Satélite Sentinel 1

A missão Sentinel-1 é uma constelação de dois satélites (Sentinel 1A e Sentinel 1B) com os objetivos principais de monitoramento terrestre e oceânico. O objetivo da missão é fornecer continuidade de dados de SAR da banda C após o encerramento do ERS-2 e o fim da missão Envisat. Para isso, os satélites possuem um sensor C-SAR, que oferece imagens de média e alta resolução em todos os condicionamentos climáticos. O C-SAR é capaz de obter imagens noturnas e detectar pequenos movimentos no solo, o que o torna útil para monitoramento terrestre e marítimo (ESA, 2017).

A missão Sentinel-1 inclui imagens em banda C operando em quatro modos de imagem exclusivos com resoluções (até 5 m) e coberturas (até 400 km) diferentes. Oferece capacidade de polarização dupla, tempos de revisão muito curtos e entrega rápida de produtos.

Cada satélite dessa missão possui um único instrumento de radar de abertura sintética em banda C operando a uma frequência central de 5.405 GHz. Inclui uma antena de arrasto em fase ativa, de aparência correta, que fornece digitalização rápida em elevação e azimute, capacidade de armazenamento de dados de 1.410 Gb e capacidade de *downlink* de banda X de 520 Mbit / s. O instrumento C-SAR suporta a operação em polarização dupla (HH + HV, VV + VH) implementada através de uma corrente de transmissão (comutável a H ou V) e duas cadeias de recepção paralelas para polarização H e V. Os dados de polarização dupla são úteis para a classificação da cobertura da terra e aplicações de gelo marinho (ESA, 2007).

O Sentinel-1 opera em quatro diferentes modos: *Stripmap* (SM); *Interferometric Wide Swath* (IW); *Extra-Wide Swath* (EW) e *Wave Mode* (WV) (Figura 7; Quadro 2).

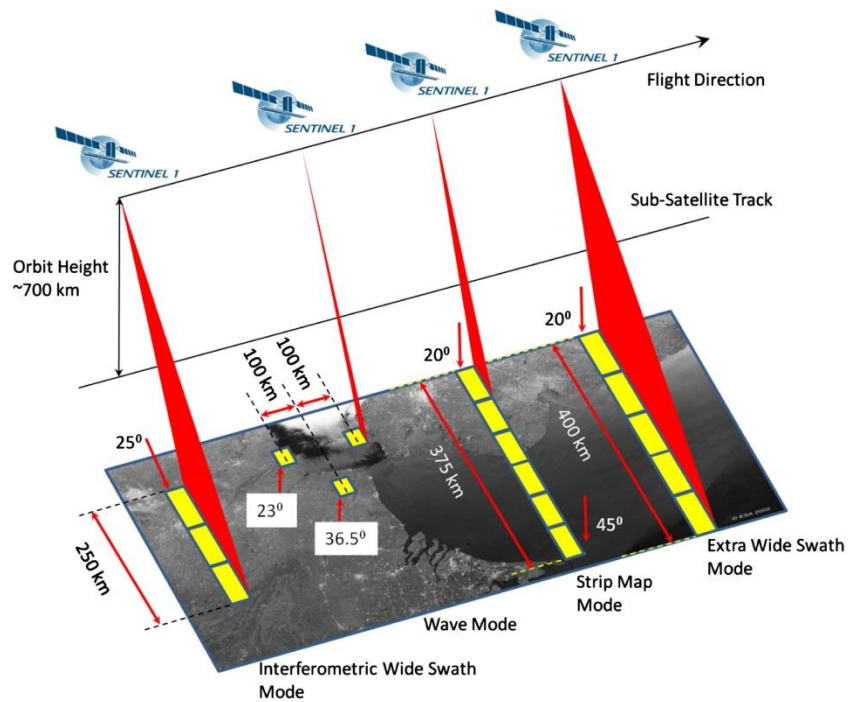


Figura 7. Modos de operação Sentinel-1. Fonte: ESA (2017).

Modo	SM	EW	IW	WV
Faixa imageada mínima	80 km	400 km	250 km	20 km x 20 km
Ângulo de incidência	18.3° - 46.8°	18.9° - 47.0°	29.1° - 46.0°	21.6° - 25.1° e 34.8° - 38.0°
Número de sub-faixas	6	5	3	2
Ângulo de direção do azimute	-	$\pm 0.8^\circ$	$\pm 0.6^\circ$	-
Resolução de azimute	5 m	40 m	20 m	5 m
Resolução no solo	5 m	20 m	5 m	5 m
Polarização	<i>Single</i> (HH ou VV) ou <i>Dual</i> (HH+HV ou VV+VH)	<i>Single</i> (HH ou VV) ou <i>Dual</i> (HH+HV ou VV+VH)	<i>Single</i> (HH ou VV) ou <i>Dual</i> (HH+HV ou VV+VH)	<i>Single</i> (HH ou VV)

Quadro 2. Características dos modos de operação Sentinel 1. Fonte: MDA (2011).

3.4 Sistema de imageamento SAR

A preocupação com a segurança contra danos e prejuízos causados por eventos climáticos extremos reforçam a necessidade de monitoramento preciso do ambiente. O sistema de imageamento SAR proporciona um monitoramento que pode ser feito em qualquer tipo de tempo, independente do tempo ou luz solar, pois diferente do sistema de imageamento ótico, SAR é um sistema ativo (gera sua própria energia) com princípios e instrumentos diferentes dos sistemas passivos,

que trabalham na faixa do visível e infravermelho do espectro eletromagnético, Figura 8.

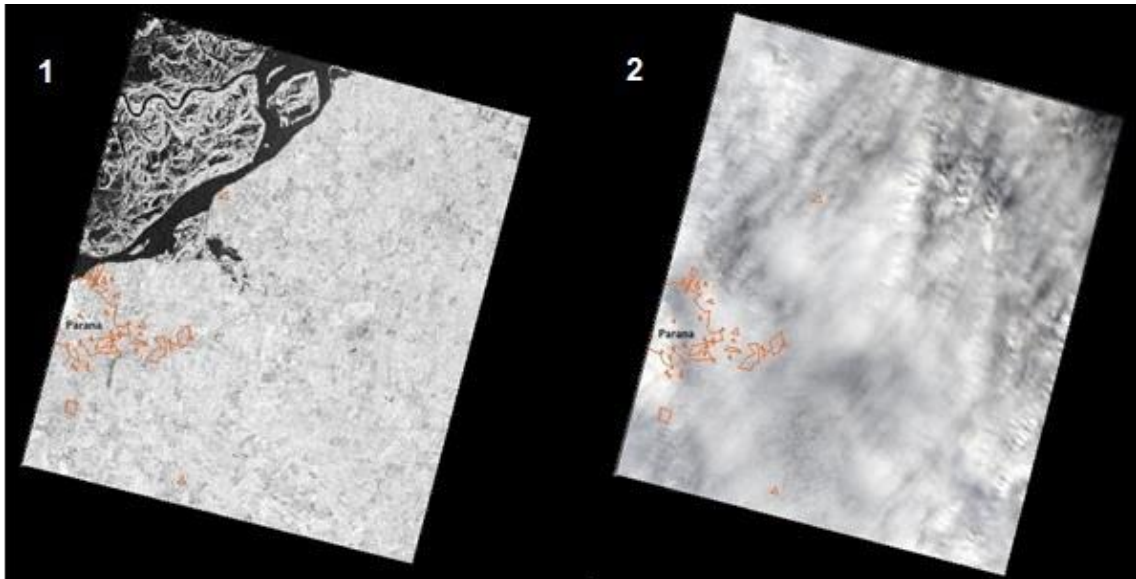


Figura 8. Imagens sobre a cidade de Parana: 1) Imagem de radar Sentinel-1; 2) Imagem óptica Landsat 8. Data de ambas as imagens: 19/04/2016. Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Além da capacidade de obter imagens independentemente da condição meteorológica e horário do dia, uma das características com maior importância é a penetração na cobertura vegetal do terreno (NOVO, 2006). A capacidade de penetração das micro-ondas no dossel de vegetação depende do comprimento de onda do sensor, sendo que comprimentos maiores são mais favoráveis a detectar a água no solo mesmo quando coberta por obstáculos vegetais. Este é um elemento chave principalmente em análise temporal de imagens de radar, pois de acordo com a intensidade do retroespalhamento é possível identificar a presença de água ou não em uma área com cobertura vegetal. O coeficiente de retroespalhamento esperado para a água sem interferência de vegetação ou outros alvos é que seja menor que -20 [db], pois a partir deste valor autores como Santoro et al. (2005) e Martinis & Rieke (2015) delimitaram água permanente em suas pesquisas utilizando imagem de radar com sensor de banda C.

O funcionamento de sistemas de radar de abertura sintética – *Synthetic Aperture Radar (SAR)* - consiste na emissão de um sinal em direção à superfície terrestre e o registro do retorno deste sinal após a interação com os alvos,

denominado de retroespalhamento. A quantidade de energia espalhada pelo alvo em direção ao sensor (retroespalhamento), em relação à quantidade de energia que foi emitida pelo sensor (pulso de microondas) é chamada de coeficiente de retroespalhamento (σ°) (RANEY, 1998). O retroespalhamento varia em função dos parâmetros do sensor (comprimento de onda, polarização, geometria de imageamento) e das propriedades do alvo - forma, tamanho, orientação do alvo em relação ao sensor e constante dielétrica (RANEY, 1998).

Cada material tem uma constante dielétrica diferente, que é a resistência à propagação da onda eletromagnética através de um material quando comparado com o vácuo. A onda eletromagnética possui velocidade constante quando está no vácuo, ou seja, igual a 1 (o mesmo valor que a constante dielétrica do ar). Em outros meios a velocidade da onda eletromagnética é menor do que no vácuo. A água, por exemplo, tem constante dielétrica igual a 64, quando na região de micro-ondas é de 3 cm. Isto significa que nesta região do espectro, a radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas ao trafegar no meio “água” o fará com uma velocidade 64 vezes menor que a do ar ou vácuo (NOVO, 2006).

Devido a esse alto contraste, quando um sinal SAR atinge uma superfície d'água, a maior parte da energia é espalhada a partir da superfície (MARINHO, 2008). Se essa superfície for plana, todos os raios que incidirem com a mesma direção serão refletidos em trajetória oposta e com o mesmo ângulo de incidência (reflexão especular). Quando a superfície for rugosa o sinal terá parte de sua energia refletida em diferentes ângulos e espalhada em várias direções (reflexão difusa), incluindo na direção da antena do SAR. Há também outro tipo de espalhamento, por dupla reflexão (*Double bounce*), este caso pode ocorrer entre duas superfícies dispostas com geometria ortogonal, a exemplo do que pode ocorrer no solo ou vegetação emersa em lâmina d'água (Figura 9).

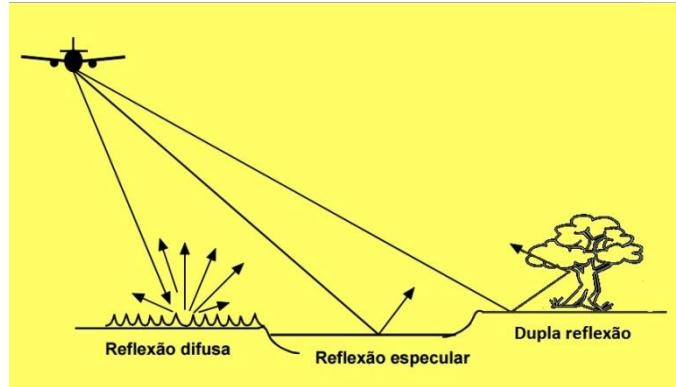


Figura 9. Tipos de espalhamento do sinal SAR sobre diferentes superfícies.

Fonte: Adaptado de Canada Centre for Remote Sensing (1997).

A presença de vários dispersores dentro de cada célula de resolução SAR gera o chamado efeito "speckle" que é comum a todos os sistemas de imagem coerentes. O ruído *speckle* está presente em SAR, mas não em imagens ópticas. O ruído *speckle* tem um impacto na qualidade e utilidade das imagens SAR. Tipicamente, a segmentação de imagem sofre severamente a partir do *speckle*. No entanto, ao captar mais imagens da mesma área em diferentes momentos ou ângulos ligeiramente diferentes, o *speckle* pode ser reduzido. A média de várias imagens tende a anular a variabilidade de amplitude aleatória e deixar o nível de amplitude uniforme inalterado (ESA, 2007a). O ruído *speckle* em uma imagem SAR é expresso em valores de pixels irregulares em áreas efetivamente uniformes. É gerado por interferências positivas e negativas de diferentes mecanismos de fluxo de objetos dentro de um pixel.

3.4.1 Parâmetros do sensor

As características mais importantes do sinal emitido e recebido pelo sensor SAR são: comprimento de onda (λ), amplitude, polarização e fase (VAN DER SANDEN, 1997). O comprimento de onda (λ) corresponde à distância entre dois ápices de uma curva senoidal. Já a amplitude se refere ao desvio máximo da curva, indicando a intensidade do sinal. A polarização se refere à orientação do campo elétrico, indicando em qual plano as ondas eletromagnéticas emitidas pelo sensor oscilam, podendo ser polarização vertical (V) ou horizontal (H), Figura 10. As ondas

verticais e horizontais são perpendiculares entre elas. A informação de fase indica a posição de vibração da onda no senóide, para um dado tempo e varia de 0 a 2π .

O comprimento de onda é uma variável importante por estar relacionada com a profundidade de penetração da radiação dos alvos na superfície, que em conjunto com outros fatores, como solo, cobertura da vegetação e constante dielétrica, controla o retroespalhamento (NOVO & COSTA, 2005). De modo geral, nos comprimentos de onda maiores, a penetração no dossel da vegetação é maior. Os sistemas com a banda X interagem com o topo do dossel de vegetação, já os da banda C interagem também no interior deste dossel. No entanto, a profundidade de penetração depende também de fatores como a polarização e ângulo de incidência.

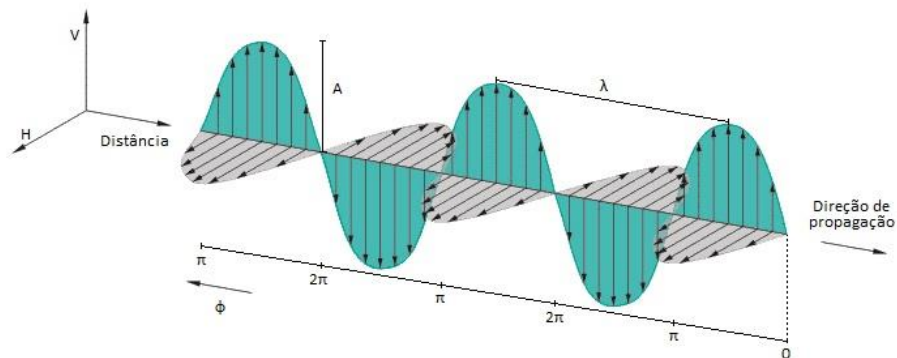


Figura 10. Representação das características de uma onda eletromagnética: onda com polarização vertical no eixo V; onda com polarização horizontal no eixo H; comprimento de onda (λ); amplitude (A); fase (ϕ). Fonte: Adaptado de skyradar.com (2017).

Para delimitar os alvos, a polarização tem grande importância. A polarização HH indica que o sinal é emitido horizontal e recebido também horizontal, sendo mais sensível e melhor para identificar objetos que estejam na horizontal. Assim, a polarização VV indica o envio e recebimento do sinal na vertical, sendo mais sensível e melhor para objetos que estejam na vertical. Henry *et al.* (2006) analisando imagens SAR nas polarizações HH, HV e VV dos sensores ERS-2 e ASAR/ENVISAT, observaram que a polarização HH possui maior capacidade de delimitação de corpos d'água.

Em um sistema de imageamento por radar de abertura sintética, um avião ou satélite (plataforma) se desloca com o sensor a uma velocidade (V) em relação ao solo, apontando o feixe de iluminação do sensor perpendicular à

direção de movimento da plataforma com um ângulo de incidência (θ) em relação ao nadir (Figura 11) (INPE, 2017).

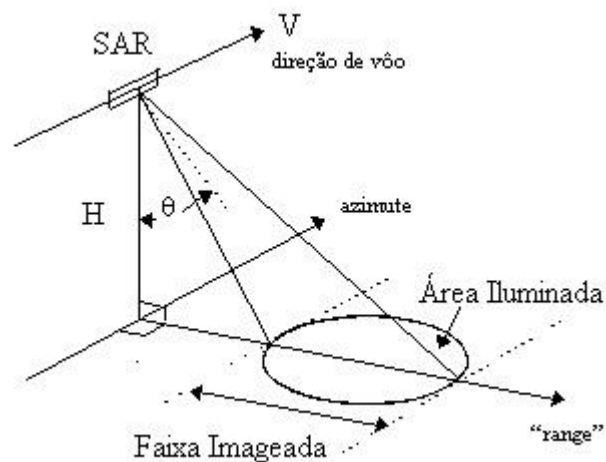


Figura 11. Geometria do sistema SAR. Fonte: INPE (2017).

O formato dos alvos na imagem SAR é influenciado pelo ângulo de incidência e está associado com efeitos de distorções geométricas (LEWIS & HENDERSON, 1998). Para um mapeamento de área de inundação, a distinção da topografia é importante para a caracterização do terreno. Desta forma, o ângulo de incidência é importante devido a sua relação direta com o sombreamento do relevo e inversa com os efeitos de deslocamento e distorção do relevo (SANTOS *et al.*, 2003).

O ângulo de incidência pode ser adaptado para determinados tipos de terrenos para a obtenção de melhor realce do alvo. Em declividades de 0° a 15° um ângulo de incidência de até 59° terá um realce aceitável, no entanto é recomendado que este ângulo esteja entre 10° e 25° para melhor distinção da superfície. Para terrenos com declividade variando entre 15° e 40° o ângulo de incidência pode ser ajustado entre 20° e 35° (SINGHROY & SAINT-JEAN, 1999).

3.4.2 Parâmetros do alvo

Os parâmetros do alvo podem ter alteração da sua forma original por conta de fatores como, rugosidade da superfície, forma geométrica do objeto e a constante

dielétrica. Estes parâmetros formam os padrões de tonalidade e textura das imagens SAR.

A rugosidade superficial em uma imagem SAR define as porções de ondas que serão refletidas, absorvidas e dispersadas. Isto afeta a quantidade de ondas que o sensor irá receber como resposta. Na Figura 12 é observado o comportamento do sinal em uma superfície plana e outra com rugosidades.

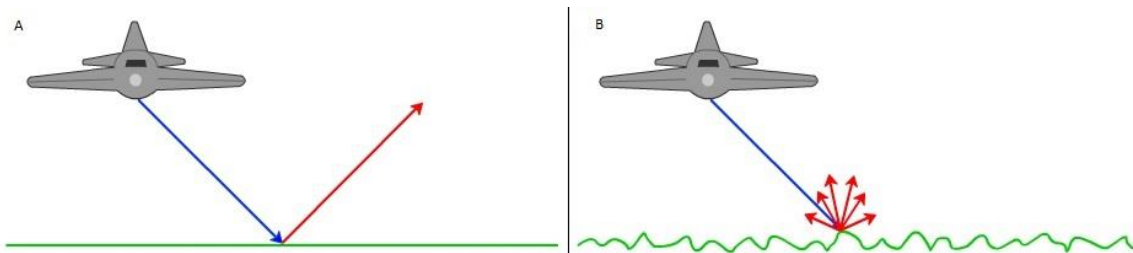


Figura 12. Caso A: Uma superfície é considerada plana se a variação de altura da superfície do objeto iluminado for muito menor do que o comprimento de onda do radar. A variação de altura é a média das alturas da superfície (uma superfície perfeitamente lisa teria a variação de altura ou média de zero, no entanto, isso não existe na natureza). Neste caso, apenas uma pequena quantidade de energia é devolvida ao sensor, a maior parte da energia é refletida para longe do sensor; Caso B: Se a superfície for rugosa em relação ao tamanho do comprimento de onda, dispersará a energia difusamente e uma porção significativa da energia será retroespalhada para o sensor. Fonte: skyradar (2017).

Em uma superfície lisa, como a maior parte da energia é refletida em direção oposta ao sensor, a imagem SAR apresentará alvos mais escuros. Entretanto, quando a superfície é rugosa, a energia incidente é retroespalhada em várias direções, inclusive a do sensor, ocasionando uma resposta em cinza claro nas imagens SAR.

No caso de áreas inundadas, a água afeta a constante dielétrica da superfície e, portanto, seu coeficiente de retroespalhamento. O comportamento da retrodifusão da terra é regulado pelas características geométricas da superfície e pelas propriedades dielétricas do solo, que depende do teor de água (umidade). A constante dielétrica aumenta com o teor de umidade do solo e também influencia o comprimento de onda. Quanto maior o comprimento de onda, maior a sensibilidade

do teor de umidade constante dielétrica no solo. (ELACHI, 1987 apud VILCHES, 2013).

Isto significa que na banda L as imagens SAR tendem a ser mais sensíveis à umidade no solo do que as bandas de menor comprimento de onda (NOVO, 2006). No entanto, Wang *et al.* (1995) mostram que imagens SAR na banda C possuem grande potencial para mapeamento em florestas alagadas. Grings *et al.* (2008) obtiveram bons resultados no mapeamento de diferentes tipos de vegetação em áreas alagadas na Argentina comprovando a possibilidade de utilizar imagens SAR na banda C. Nesta pesquisa os autores distinguiram dois tipos de vegetação (*junco* e *cortadera*) em áreas úmidas detectando a variação de píxel em uma análise temporal.

3.4.3 Distorções e geometria de imageamento

A geometria dos objetos determina o retroespalhamento das ondas eletromagnéticas. Além disso, os sensores SAR possuem a visada lateral, o que podem ocasionar distorções. Estas distorções geométricas em sistemas SAR correspondem ao sombreamento (*shadow*), encurtamento de rampa (*foreshortening*) e inversão de relevo (*layover*) (LEBERL, 1998). Além disso, as distorções implicam na necessidade de correção geométrica rigorosa em imagens SAR, obtida por meio de ortorretificação (MARINHO, 2011).

3.4.4 Interpretação visual de imagens SAR

A interpretação de imagens SAR pode ser feita por uma série de fatores, muitos deles semelhantes aos usados na interpretação de imagens ópticas, a exemplo de tonalidade, formato dos elementos imageados, tamanho, padrão, textura e sombreamento. No entanto, diferente da iluminação solar, que envolve o envio de radiação paralela e contínua de luz sobre uma superfície, o SAR envia séries

descontínuas de pulsos de fótons de uma fonte pontual, que se espalha sobre o terreno como um feixe angular (MENESES, 2004).

Em imagens SAR a variação de tonalidade (tons de cinza) está relacionada à quantidade de resposta que cada alvo reflete de volta para o sensor (retroespalhamento). Quando o sensor recebe muita resposta, a imagem fica mais próxima do branco, quando recebe menos, fica mais escura. Portanto, a identificação de feições nas imagens SAR está relacionada aos mecanismos de espalhamento do sinal emitido pelo sensor (especular, difuso ou *Double bounce*).

A textura em uma imagem SAR é representada pelo grau de rugosidade do local imageado. Atribui-se uma classificação qualitativa das feições com termos como grossa, média, lisa, rugosa ou salpicada, sendo que a textura de uma imagem SAR varia em função do comprimento de onda, resolução espacial, ângulo de incidência e composição e arranjo dos elementos no ambiente (MARINHO, 2011).

O formato dos objetos imageados é um dos principais elementos de interpretação de uma imagem SAR. Esta é influenciada pela geometria de imageamento do sensor e pela resolução espacial. De uma forma geral, as feições naturais têm traços menos regulares, enquanto feições antrópicas terão traços e geometria mais definidos, com linhas retas.

O sombreamento também é útil na interpretação, pois pode fornecer uma ideia do perfil e altura relativa de um alvo, e assim facilitar a identificação do mesmo. No entanto, as sombras também podem reduzir ou eliminar a interpretação na sua área de influência, uma vez que os alvos dentro das sombras são muito menos (às vezes não) discerníveis a partir de seus arredores. Ainda, o sombreamento melhora a identificação da topografia e relevo, particularmente em imagens de radar (NATURAL RESOURCES CANADA, 2015).

Tamanho de objetos em uma imagem SAR se refere mais a uma função de escala. É importante avaliar o tamanho de um alvo em relação a outros objetos em uma cena, bem como o tamanho absoluto, para auxiliar na interpretação desse alvo, por exemplo, se um intérprete tivesse de distinguir zonas de uso da terra e tivesse identificado uma área com vários edifícios, grandes edifícios, como fábricas ou

armazéns, sugeririam imóveis comerciais, enquanto que pequenos edifícios indicariam uso residencial (NATURAL RESOURCES CANADA, 2015).

O padrão está associado ao arranjo espacial de objetos visivelmente discerníveis. Tipicamente, uma repetição ordenada de tons e texturas semelhantes produzirá um padrão distintivo e, em última instância, reconhecível. Ruas urbanas com casas regularmente espaçadas são bons exemplos de padrão. De modo geral, o significado atribuído a este e outros elementos de interpretação depende principalmente da configuração da imagem analisada (NOVO, 2008).

3.5 Mapeamento de inundações com imagens SAR e Modelo Digital de Elevação

As inundações são fenômenos hidrológicos extremos, de frequência variável, naturais ou induzidos pela ação humana, que consistem na submersão de uma área usualmente emersa (RAMOS, 2013). Segundo COBRADE (2012) inundações (*floods*) podem ser definidas como "Submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície", e enxurradas (*flash floods*) como "Escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracterizada pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. Apresenta grande poder destrutivo".

Os corpos d'água como rios, lagos e áreas úmidas são destacados nas imagens SAR devido ao grande contraste entre a água e o solo. Normalmente a água tem uma resposta bastante escura nas imagens de radar, fazendo bastante contraste com outros alvos. Alguns estudos demonstram que sensores SAR oferecem melhores resultados para detectar inundações quando comparados com sensores ópticos (HESS & MELACK, 1994; TOWNSEND & WALSH, 1998; TRALLI *et al.*, 2005).

Uma das técnicas mais utilizadas é a limiarização (*threshold*) do histograma. De acordo com Din (2012), um histograma é uma representação gráfica ou tabular que mostra quantas vezes os valores de cinza individuais ocorrem em uma imagem digital. A técnica de limiarização é um método tradicional para mapeamento em áreas não florestadas, pois o contraste entre a água e terra se diferenciam suficientemente a ponto de extrair a inundação via histograma (BRIVIO *et al.*, 2002; MALNES *et al.*, 2002; SOLBØ & SOLHEIM, 2004).

Em um mapeamento de inundação, a separação entre água e terra pode fornecer informações úteis. No entanto, o resultado desta definição entre água e solo pode ser diferente do que é na realidade, considerando alvos planos como sendo água, quando na verdade podem ser uma estrada, por exemplo. Alguns trabalhos utilizaram esta técnica como, por exemplo, Zhou *et al.* (2000), Anh & Dinh (2009), Martinis *et al.* (2009), Gahlaut (2017).

Gahlaut (2017) elaborou um mapeamento utilizando o método de limiarização adaptável local utilizando imagem SAR do sensor ENVISAT com uma resolução de 70 metros, com uma precisão entre 85 – 90% na classificação dos corpos d'água. Anh e Dinh (2009) mapearam inundação em uma área de planície utilizando limiarização com base em imagens do sensor ALOS com resolução de 12,5 metros, com imagens de antes e depois de um evento de inundação, sendo que alguns pontos em campo foram analisados para dar veracidade ao resultado do mapeamento.

A análise temporal de píxeis é uma técnica promissora para detecção de água em imagens de radar. Nesta técnica são extraídas as respostas dos píxeis de água e não água a partir de várias imagens de uma mesma área para em seguida separar o que é água e o que é terra na imagem (SANTORO *et al.*, 2015). Por exigir mais imagens para realizar a análise e o processamento ser mais complexo, o nível do mapeamento pode ser mais preciso principalmente em alvos arborizados (TOWNSEND, 2001 e 2002; KANDUS *et al.*, 2001; SOLBØ & SOLHEIM, 2004).

Para alagamentos em áreas urbanas Solbø e Solheim (2004) defendem ser pouco provável que técnicas com uso de imagens SAR sejam satisfatórias para o mapeamento de água, pois o retroespalhamento tende a ser muito semelhante na imagem com e sem ação da água. A análise temporal de alagamentos em área

urbana poderia ser promissora com técnica de coerência interferométrica, no entanto os sensores do satélite Sentinel 1 (A e B) não são bi – estáticos (*tandem*) e atualmente não há sensores assim disponíveis, inviabilizando este método, Figura 13.

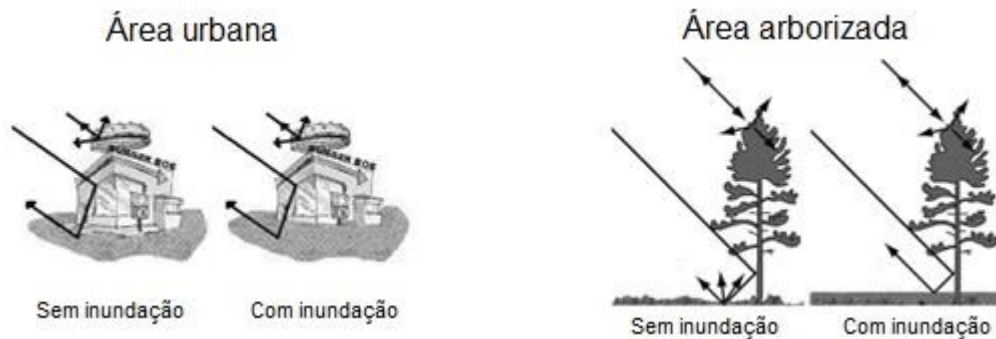


Figura 13. Comportamento do retroespalhamento na área urbana e arborizada com e sem inundação. Fonte: Adaptado de Solbø e Solheim (2004).

Além disso, manchas de inundação podem ser determinadas com o uso de Modelo Digital de Elevação (MDE). É importante ressaltar que, a modelagem de áreas de inundação é uma tentativa de identificar um sistema complexo, que depende e interage com diversas variáveis e condições, sendo que os resultados serão estimativas cuja precisão depende da quantidade e qualidade dos dados de entrada. Segundo Nascimento (2017), o modelo digital de elevação é uma das primeiras fontes de informação a ser levada em consideração quando se deseja realizar a modelagem hidráulica, pois a partir dele é possível obter informações de declividade, redes de drenagem, dentre outros.

Nos trabalhos de Goerl (2017) e Nascimento (2017), arquivos MDE foram usados para delimitar áreas de inundação. O primeiro autor testou a aplicabilidade do modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND). Já o segundo utilizou três fontes de MDE (SRTM, GNSS e Vant) para extrair a mancha de inundação com base em réguas de medição. Para esta pesquisa a aplicação de um modelo de interpolação de pontos conhecidos, a exemplo do método HAND, é o ideal para elaborar uma mancha de inundação, pois abrange uma área onde há um fluxo de um grande rio e conseqüentemente podem haver diferenças no nivelamento topográfico entre os diferentes pontos de medida de nível da água.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir das imagens SAR foram executados dois diferentes processos para extrair a mancha de inundação e um processo utilizando o modelo digital de elevação, sendo eles: processo de limiarização, análise temporal de imagens de radar e análise do MDE da área de estudo. Os três resultados foram sobrepostos, com a ajuda do software SNAP, para assim formar um único mapa de inundação levando em conta as respostas em comum nas três metodologias.

Alguns programas de monitoramento do meio ambiente mantêm notícias e listas dos principais eventos de inundação mundial (FLOOD LIST, 2017). Estas datas dos principais eventos foram utilizadas para buscar imagens em datas específicas em que a área de estudo esteve com evento de inundação.

O processamento das imagens foi feito usando o software SNAP 5.0, desenvolvido principalmente para o processamento de imagens Sentinel, no entanto, é possível trabalhar também com imagens de outros sensores, como por exemplo ALOS, RADARSAT, etc.

O ArcGIS também foi utilizado para elaborar mapas de inundação usando as imagens já processadas pelo SNAP.

4.1 Imagens SAR e Modelo Digital de Elevação

As imagens utilizadas para análise foram obtidas no website da Agência Espacial Europeia (ESA). Como o programa Sentinel-1 entrou em funcionamento em 2014, o período da análise foi de 2016 a 2017, período que apresentou imagens com expressiva inundação.

As imagens adquiridas são do tipo GRD (*Ground Range Detected*), disponibilizadas com pré-processamento (com a faixa de inclinação do terreno corrigida, por exemplo) e para os propósitos da pesquisa são mais fáceis de trabalhar.

Quanto mais imagens utilizadas melhor a acurácia da mancha de inundação. Porém, foram utilizadas cinco imagens de períodos antes, durante e depois de um evento de inundação, com intervalo pouco maior que um ano entre a primeira imagem e a última: 07 de fevereiro de 2016, 19 de abril de 2016, 10 de outubro de 2016, 09 de dezembro de 2016 e 14 de janeiro de 2017.

Além disso, foi utilizada uma imagem óptica do sensor Landsat 8 datada de 03 de outubro de 2016 e com resolução espacial de 30 metros. A imagem óptica não foi utilizada como ferramenta para extrair a mancha de inundação. As máscaras de inundação extraídas pelos métodos citados anteriormente foram sobrepostas sobre esta imagem óptica para melhorar a representação e visualização da área em que a inundação atinge.

As imagens SRTM para o MDE (Modelo Digital de Elevação) foram adquiridas no *website* do Instituto Geográfico Nacional da República Argentina e tem resolução de 30 metros (IGN, 2017).

Para elaborar o mapa de inundação com o uso do MDE, também foram utilizados dados de medição do nível da água. Estes dados estão disponíveis no *website* da Secretaria de Recursos Hídricos da Argentina (BDHI, 2017). As localizações das réguas estão apresentadas na Figura 14.

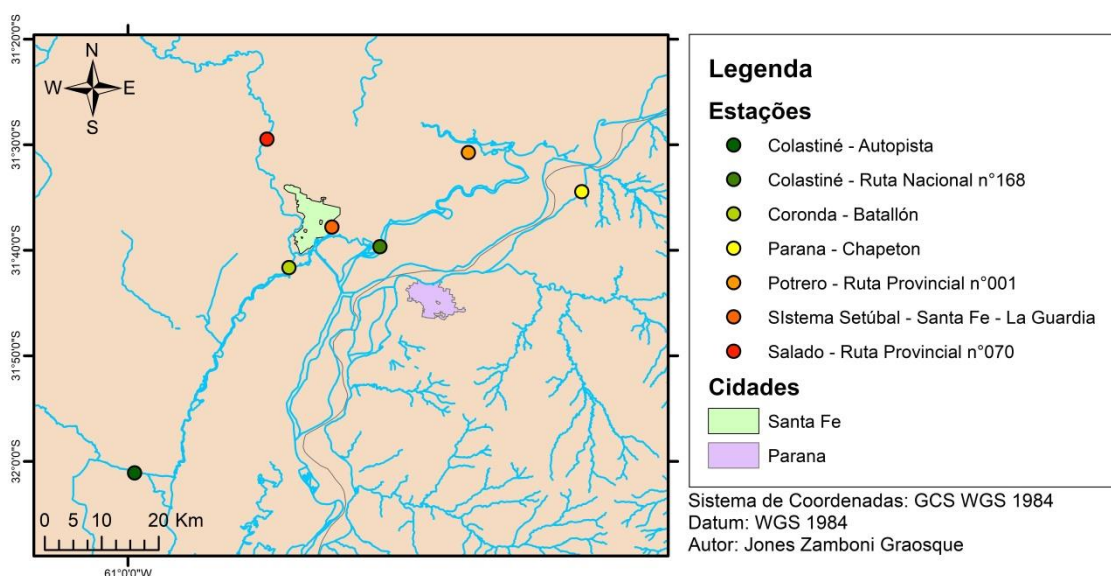


Figura 14. Mapa de localização das réguas de coleta de nível d'água. Fonte: BDHI, (2017).

Com base na régua da estação da cidade de Santa Fe (Sistema Setúbal) foi possível elaborar um gráfico com as medições diárias desde o dia primeiro de janeiro de 1997 até dia 29 de junho de 2017. Nesta estação, estão disponíveis dados desde 1992, no entanto para o gráfico na Figura 15 foram considerados dados a partir de 1997 para facilitar a visualização.

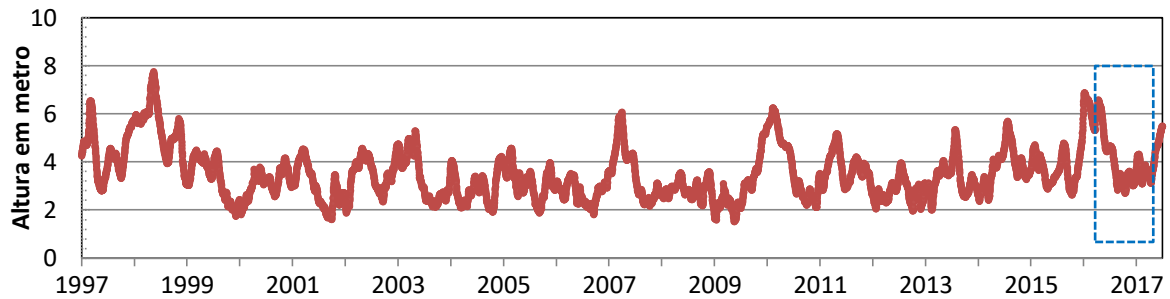


Figura 15. Histórico de nível d'água na estação Sistema Setúbal. Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Foram utilizadas imagens do ano 2016 e 2017, portanto no gráfico foi destacada somente o período analisado. No gráfico da Figura 16 foi ampliada a área tracejada da Figura 15 e destacadas as imagens adquiridas.

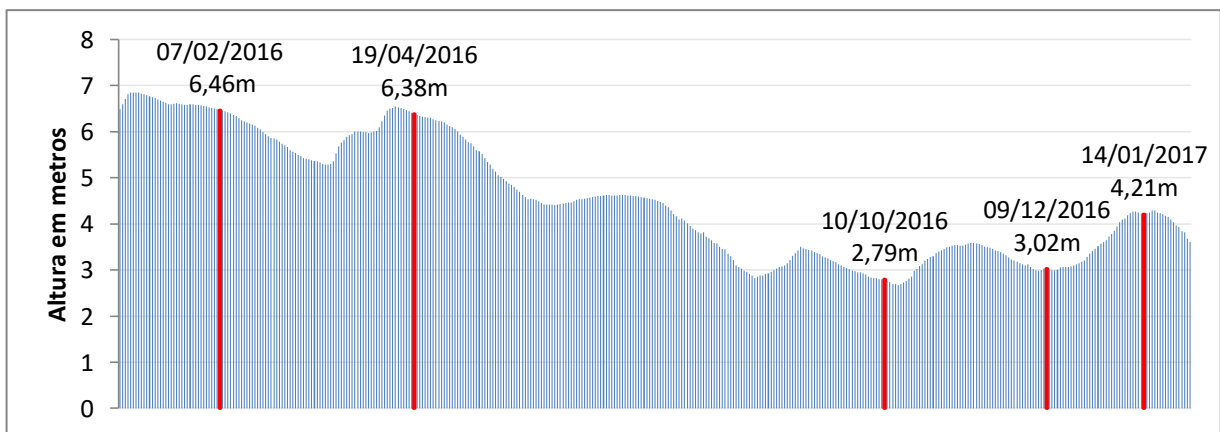


Figura 16: Histórico de nível d'água a partir do ano de 2016 até início de 2017. Estação Sistema Setúbal. As datas de imagens SAR e os níveis da água correspondentes estão destacados. Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O mapa de cobertura do solo foi obtido junto ao projeto Land Cover CCI (CCI-LC, 2017). Este projeto consiste em um mapeamento de cobertura de solo em escala global, com levantamento de imagens desde 1992 até 2015 em escala

espacial de 300 m. Foi adquirido o mapa de cobertura do solo de 2015 e extraído os polígonos dos alvos de área urbana, rural, floresta e área úmida. Com base nestes polígonos foi possível analisar a intensidade de retroespalhamento dos píxeis das imagens de radar em cada um dos alvos, criando limiares para cada alvo e elaborando a mancha de inundação separadamente. Logo, as máscaras de inundação adquiridas em cada um dos alvos foram organizadas juntas para formar a área de inundação de toda a área de estudo.

4.2 Métodos e validação

Para os processos de limiarização e análise temporal, as imagens de radar precisaram passar por procedimentos de calibragem e filtragem do ruído *speckle*. Além disso, foi criada uma máscara de água permanente, que foi usada para que os resultados de inundação não considerassem o alvo de água permanente. Para modelar esta máscara, foram extraídas as respostas de água de uma imagem sem inundação medida pelos pontos de coleta de nível d'água. Em função do baixo nível da água, a imagem de radar do dia 10 de outubro de 2016 foi utilizada como base para a máscara de água permanente, Figura 17.

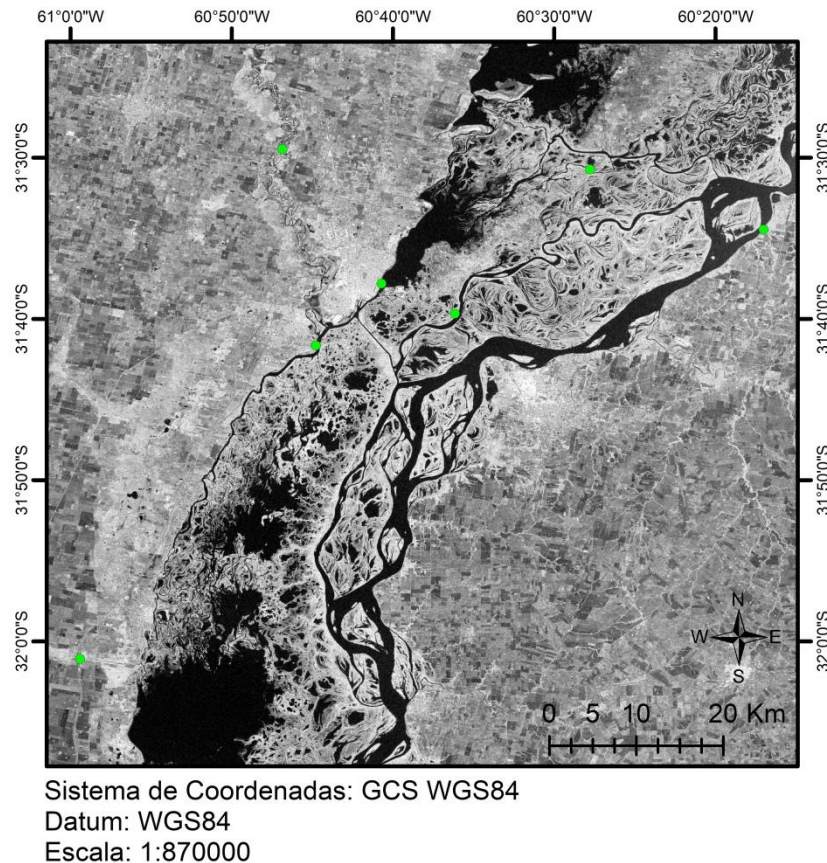


Figura 17. Imagem SAR do dia 10 de outubro de 2016. Em verde estão os pontos de coleta de nível de água. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a impossibilidade de realizar trabalho de campo e a falta de mapeamentos do mesmo tema, a validação da mancha de inundação ficou restrita a um único mapeamento de inundação feita na cidade de Santa Fé no ano de 2003 (CONAE, 2017). No entanto, para fins de comparação, seguindo o exemplo de SILVA *et al.* (2011), foram analisados visualmente pontos aleatórios da área de estudo utilizando uma imagem óptica do satélite Landsat-8 com resolução de 15 m datada no dia 22 de fevereiro de 2016. Os pontos foram definidos aleatoriamente com a condição de ter somente 1 ponto a cada 5 km². Essa observação foi feita somente para comparar as máscaras de inundação obtidas com imagens SAR e MDE com uma imagem óptica com inundação.

Desta observação na imagem óptica, foram extraídos aleatoriamente 350 pontos, no entanto somente 313 foram aproveitados. Os pontos localizados em área de água permanente foram excluídos, pois estes não correspondem a resultado de inundação. Das localizações comparadas, 103 correspondem a pontos inundados e 210 não inundados.

Todo processo foi organizado no fluxograma da Figura 18 para melhor visualização dos procedimentos metodológicos. No processo de limiarização foi utilizado somente uma das imagens SAR (abril 2016). O procedimento “agregar resultados dos mapas de inundação 1, 2 e 3” refere-se a somar as três máscaras de inundação extraídas em cada uma das técnicas utilizadas. Como estas máscaras de inundação são compostas por valores de 0 (zero) ou 1 (sendo 1 representando água), quando somadas a imagem gerada terá três camadas de 1 a 3, sendo a camada 3 aquela onde todos os métodos apontam como área de inundação.

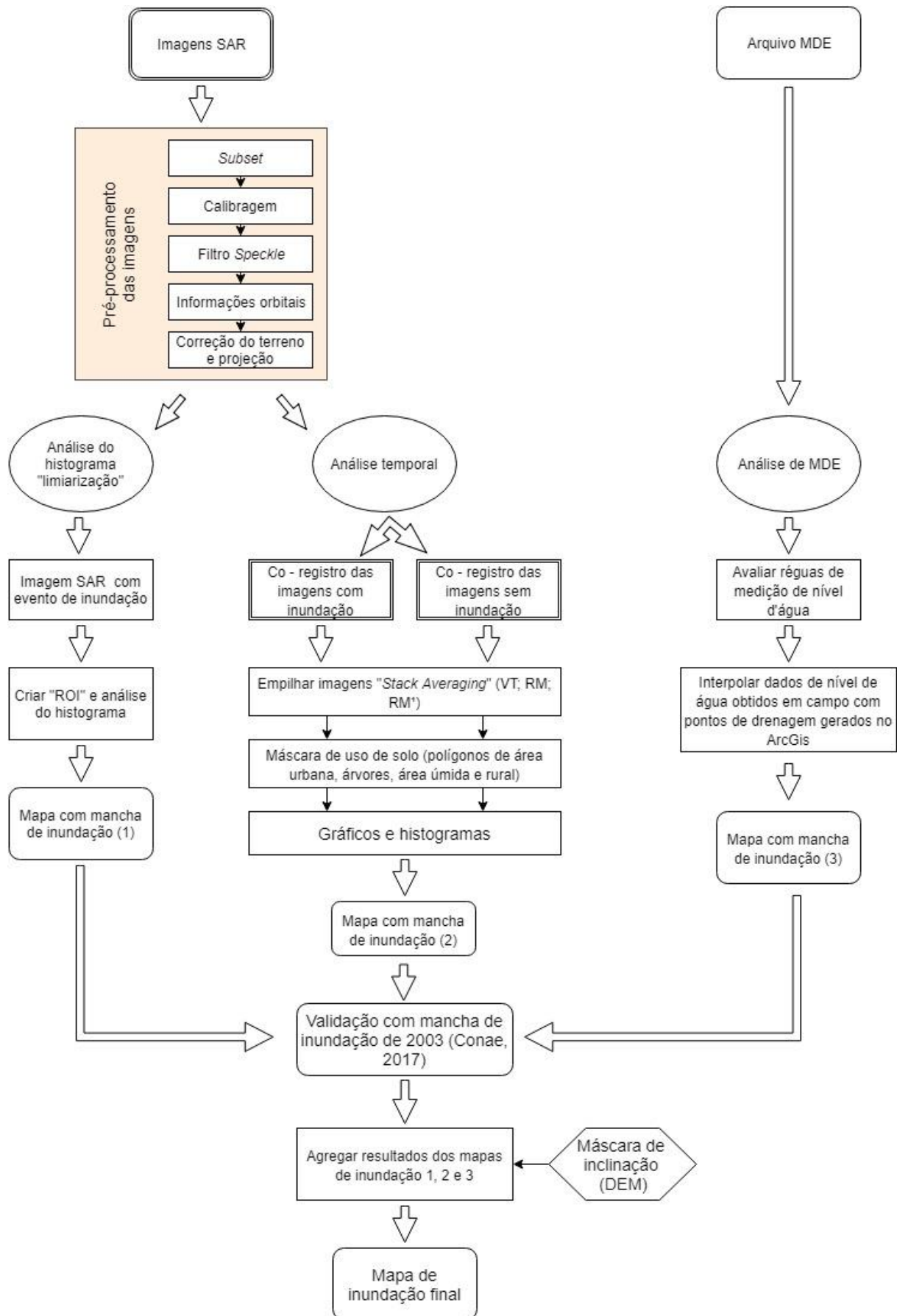


Figura 18. Fluxograma das metodologias aplicadas na pesquisa.

4.2.1 Pré processamento das imagens

4.2.1.1 Subset

As imagens SAR abrangem uma área muito maior do que a área de estudo. Para isso foi necessário usar a ferramenta “subset” do software SNAP para recortar a imagem para a região de interesse.

4.2.1.2 Calibragem do sinal (calibragem radiométrica)

O objetivo da calibragem do sinal SAR é proporcionar imagens em que os valores de pixel possam estar diretamente relacionados com a retroespalhamento da imagem. Embora as imagens SAR não calibradas sejam suficientes para o uso qualitativo, as imagens SAR calibradas são essenciais para a utilização quantitativa.

Os dados de radar inicialmente detectam a amplitude ou intensidade com que um ponto atingido pelo sinal é disperso. Este processo é influenciado pelo ângulo de incidência, pelo tamanho do pixel e pelos procedimentos de gravação específicos do sensor. Para comparar dados de sobrevoos e sensores diferentes, eles devem ser convertidos em um formato comum. Esse processo é chamado de calibragem radiométrica.

A correção radiométrica é necessária para a comparação de imagens SAR obtidas com diferentes sensores, ou adquiridas a partir do mesmo sensor, mas em datas diferentes. Após este processo é criado um novo registro que tem sigma zero em vez de valores de intensidade.

A calibragem radiométrica pode ser feita através da equação:

$$value(i) = \frac{|DN_i|^2}{A_i^2} \quad (1)$$

Dependendo do tipo de coeficiente de retrodispersão que se pretende obter, $value(i)$ pode ser beta naught βi° , sigma naught σi° ou gamma naught γi° . A informação necessária (A_i) para efetuar a conversão de DN numa das três convenções, encontra-se nas LUTs (Look Up Tables) de calibração dos produtos de Nível-1. O comando para realizar a calibragem usando o software SNAP pode ser seguido da seguinte forma:

Menu > Radar > Radiometric > Calibrate

4.2.1.3 Filtragem *speckle*

Para uma sequência de N imagens multitemporais registradas, com intensidade na posição (x, y) na “k-ésima” imagem denotada por $I_k(x, y)$, as imagens temporais filtradas são dadas por:

$$J_k(x, y) = \frac{E[I_k]}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i(x, y)}{E[I_i]} \quad (2)$$

Para $k = 1, \dots, N$, em que: $E[I]$ é o valor médio local de pixels em uma janela centrada em (x, y) na imagem I.

Buscando minimizar o efeito *speckle* para análises subsequentes, a filtragem é realizada antes de todas as outras etapas de trabalho. Usando o SNAP, este procedimento pode ser executado seguindo os seguintes passos e configurando da seguinte forma:

Menu > Radar > Speckle Filtering > Multi-temporal Speckle Filtering

Filter: Lee Sigma
Number of looks: 1
Window size: 5x5
Sigma: 0.9
Target window size: 3x3

4.2.1.4 Correção do terreno e projeção

Devido às variações topográficas de uma cena e à inclinação do sensor de satélite, as distâncias podem ser distorcidas nas imagens SAR. Para posicionar os dados, os efeitos causados pelo imageamento lateral do sensor SAR (encurtamento, sobreposição, sombra) devem primeiro ser reduzidos e isso é feito usando um modelo de elevação digital. Neste caso, a função Doppler sob a qual o sinal foi processado é utilizada para compensar as distorções causadas pela gravação.

Em alguns lugares, a imagem é comprimida e esticada, nestes casos a informação de pixel só pode ser avaliada de uma maneira restrita, mas pelo menos a densidade de armazenamento é assegurada. Ao mesmo tempo, a imagem é adaptada para a projeção desejada. Correções de terreno destinam-se a compensar essas distorções de modo que a representação geométrica da imagem será tão próxima quanto possível do mundo real.

Menu > Radar > Geometric > Terrain Corretion > Range Doppler Terrain Corretion

4.2.2 Análise do histograma (limiarização)

A análise do histograma é importante para definir os pixels com maior e menor intensidade. No software SNAP foi possível fazer um vetor de uma área onde contenha água e terra clicando no comando *Rectangle drawing tool*.

A imagem escolhida para esta análise foi a do dia 19 de abril, pois esta é uma das imagens com ocorrência de evento de inundação. Logo após o vetor ter sido definido, a ferramenta *Histogram* foi acionada e o ícone "ROI" (*Region of Interest*) selecionado para que o histograma fosse baseado somente no retângulo, ou região de interesse (ROI), feito previamente.

O histograma pode ser gerado sem o uso da ferramenta “ROI”, Figura 19, no entanto todos os píxeis são analisados e isso misturaria os vários alvos em um mesmo histograma, dificultando a identificação da água.

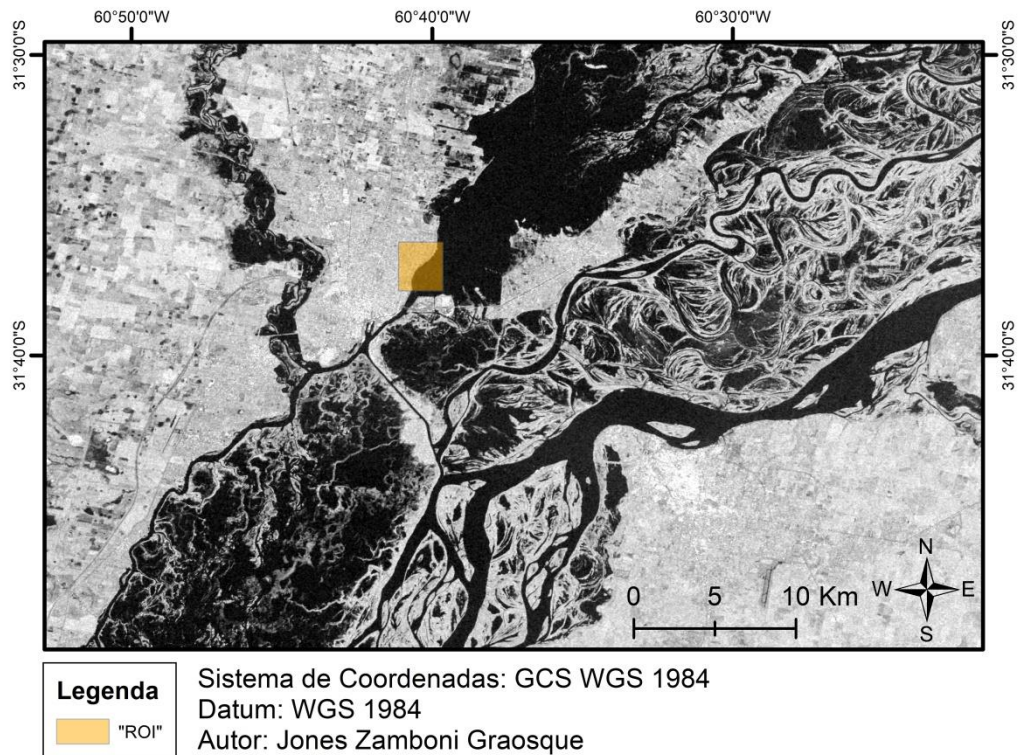


Figura 19. Imagem SAR com região de interesse destacada. Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Matematicamente a limiarização pode ser definida como:

$$g(x, y) = \begin{cases} \text{objeto se } f(x, y) > T \\ \text{fundo se } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (3)$$

Em que: $f(x,y)$ é a imagem de entrada, T é o valor do limiar e $g(x,y)$ é a imagem de saída (limiarizada).

Foi observado que no histograma dois picos de frequência, um representando o corpo d'água e o outro representando a terra (a água é o pico de menor intensidade). O ponto de menor frequência entre estes dois picos foi considerado o limite entre água e solo. Em seguida a ferramenta *Band Maths* foi usada para

adicionar à expressão em que fará a limiarização, sendo assim necessário adicionar no campo *Band maths expression* a fórmula:

$$Intensity < x \quad (4)$$

X é o limite entre os dois picos encontrados no histograma.

Após este processo, a imagem teve sua diferenciação entre o que é água e o que não é, sendo estas definidas por 0 (preto, terra) ou 1 (branco, água). O resultado de água (máscara de número 1) foi extraído como máscara de inundação do método de análise de histograma. A máscara de água permanente extraído na imagem de 03 de outubro, utilizando este mesmo método, foi utilizada para subtrair a área de água permanente da mancha de inundação obtida na imagem do dia 19 de abril de 2016, assim, toda a área mapeada pôde ser considerada unicamente inundação.

4.2.3 Análise temporal

Na análise temporal, as cinco imagens de radar adquiridas foram utilizadas. O processo de correção foi feito inicialmente, e logo após foi necessária a correção do terreno e projeção, em seguida foram extraídas imagens com o retroespalhamento mínimo, médio e variação temporal e por fim a análise temporal.

As cinco imagens foram corrigidas em um único empilhamento, no entanto são conhecidas as imagens em que contêm e as que não contêm inundação, por isso as imagens com retroespalhamento mínimo, médio e variação temporal foram também feitas separadamente, um contendo as imagens com inundação e outra com imagens sem inundação. Desta forma foi possível modelar gráficos com melhor visualização das diferenças da área de estudo com e sem o efeito da água.

Além disso, o mapa de ocupação do solo é fundamental para analisar a intensidade de retroespalhamento de acordo com cada alvo. Com o mapa de ocupação, foram separados os polígonos dos respectivos alvos: urbano, áreas

úmidas, rural e áreas arborizadas. Essencialmente, o método de análise temporal segue o mesmo princípio do método de limiarização, pois aqui também o objetivo é encontrar o limiar entre o que é ou não inundação. No entanto, enquanto que na análise do histograma foi extraído um limiar para toda a área de estudo, na análise temporal o processo é mais detalhado, pois cada alvo contém um limiar diferente e com a variação temporal de intensidade de retroespalhamento dos píxeis é possível identificar o efeito que a inundação tem em cada alvo separadamente.

4.2.3.1 Corregistro

O software SNAP referenciou com precisão as imagens secundárias em relação a uma imagem de referência. O procedimento de *coregistration* é totalmente automático. Este procedimento foi feito duas vezes, uma com as imagens de inundação e outra com imagens sem inundação. Para tanto, o caminho é o seguinte:

Menu > Radar > Coregistration > coregistration

Esta ferramenta inclui os processos de empilhamento de imagem (*stack*), correlação cruzada (*cross-correlation*) e “*warp*”. Todas as imagens foram carregadas e no empilhamento de imagens o ideal é usar uma imagem sem eventos de inundação como sendo a imagem de referência. Para criar o empilhamento de imagens a configuração foi a seguinte:

Resampling type: NONE
Initial offset method: Orbit
Output extents: Master

Para a correlação cruzada, foi usado 2000 pontos de controle de terreno - *Ground Control Points* (GCP).

Para a ferramenta “*warp*” a configuração foi mantida como padrão, pois todas as imagens são do mesmo sensor. Sendo assim a configuração foi mantida da seguinte forma:

RMS threshold: 0.05
Warp polynomial order: 1

Interpolation method: cubic (6 points)

Este procedimento de referenciar as imagens secundárias com base em uma imagem de referência (*coregistration*) baseia-se na técnica de correlação cruzada. Para tornar o processo mais ágil, o procedimento é normalmente separado em duas etapas principais: referenciamento grosseiro e fino. No referenciamento grosseiro, os deslocamentos são aproximados ou usando as órbitas de satélite e o tempo como uma referência, ou definindo pontos comuns aproximados em imagens de referência/secundárias e executando a correlação correspondente. O referenciamento fino aplica técnica de correlação de automação para obter precisão de alinhamento sub-píxel. Depois de computados os deslocamentos de referenciamento, são realizados a estimativa do polinômio de registro (CPM - *coregistration polynomial*) e reamostragem interferométrica de imagens secundárias para a geometria de referência.

4.2.3.1.1 Criar o “empilhamento de imagens” (*create stack*)

O operador *Create Stack* coloca a imagem de referência e as imagens secundárias com base em uma única geometria de referência (mestre). De forma geral, os dados de imagem secundária são subconjuntos em geometria da imagem de referência. Com a realização desta operação, as imagens de referência e secundárias compartilham as mesmas informações de posicionamento geográfico e têm dimensões semelhantes. Para o cálculo de sobreposição e de geometria, podem ser utilizados dados orbitais ou grades de ponto de controle na superfície (PCS). Em outras palavras, o referenciamento grosseiro é realizado usando informações orbitais ou PCSs anotadas.

4.2.3.1.2 Correlação cruzada

O operador de correlação cruzada cria um alinhamento entre as imagens de referência e as secundárias ao combinar janelas de otimização de correlação distribuídas automaticamente com suas janelas secundárias correspondentes. Há duas etapas: registro grosseiro e fino. Os deslocamentos entre imagens de referência e secundárias são calculados maximizando a correlação cruzada entre imagens mestre e escrava em uma série de imagens definidas nas imagens. Primeiro em nível grosseiro, com grandes janelas e menores fatores de sobreamostragem, e depois em nível fino, com janelas menores e maiores fatores de superamostragem.

4.2.3.1.3 Ferramenta “*Warp*”

Com os desfasamentos das imagens de referência-secundárias calculados, um polinômio de registro (CPM) foi estimado pela ferramenta *Warp*, que mudou os píxeis das imagens secundárias em píxeis da imagem de referência. Basicamente, nesta etapa cada imagem secundária se adaptou à imagem de referência para que todas as imagens estivessem alinhadas com mesmo tamanho e orientação.

4.2.3.2 *Stack Averaging*

Na ferramenta de corregristo, opção *stack averaging*, é possível processar imagens considerando o retroespalhamento mínimo (RM), médio (RM¹) e variação temporal ou desvio padrão - *standard deviation* (VT). Este procedimento é feito separadamente para as imagens com e sem inundação, Figura 20.

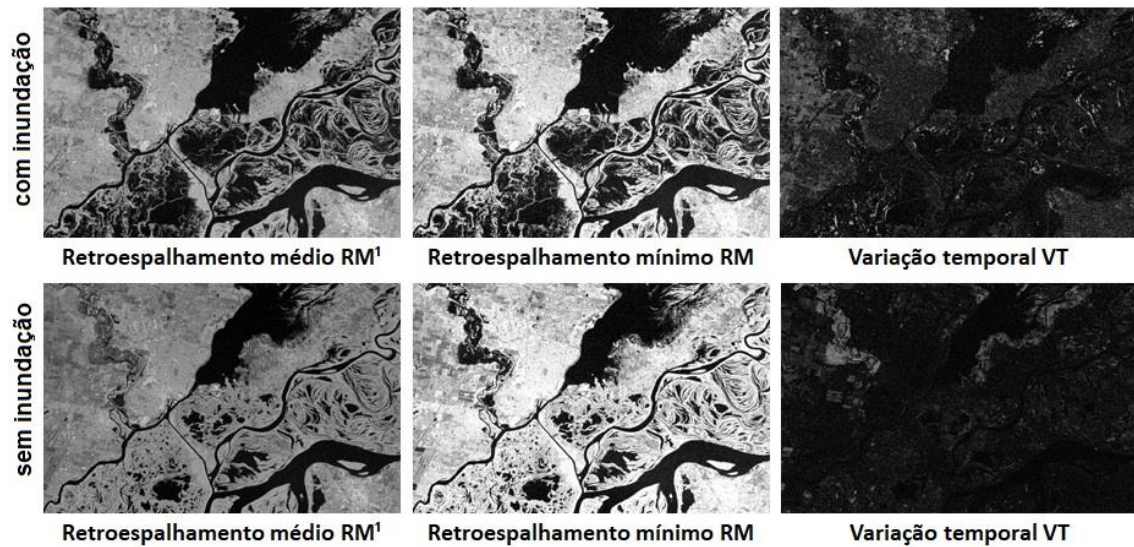


Figura 20. Amostras de imagens com retroespalhamento mínimo, médio e variação temporal. Em destaque a cidade de Santa Fe. Fonte: Imagens SAR.

Com estas imagens foi possível moldar a relação entre a intensidade (mínima ou média) do retroespalhamento e variação temporal, sendo possível identificar padrões de intensidade de retroespalhamento de cada alvo. Após extrair estas imagens, os polígonos (urbano, área rural, área úmida e área arborizada) foram utilizados para a análise individual de cada alvo. Cada alvo tem um modo de indicar a presença de água de acordo com a intensidade do retroespalhamento. Para a análise destas intensidades, foram elaborados histogramas e gráficos da relação entre o retroespalhamento e a variação temporal de cada píxel.

Assim que identificados os limiares para cada alvo, estes foram usados para criar a máscara de água (com resultados 1) e não água (com resultados 0). As máscaras de água de todos os alvos foram organizadas em um único mapa e, assim, gerado a mancha de inundação de toda a área de estudo.

Como a análise foi feita individualmente em cada alvo, a máscara de água permanente da imagem de 10 de outubro não precisaria ser usada para evitar que alvos de água permanente estivessem marcados como inundação, no entanto, para garantir um resultado preciso, a máscara de água permanente foi usada para subtrair qualquer possível mancha de inundação sobre o alvo de água permanente.

4.2.4 Análise do Modelo Digital de Elevação

Nesta análise além do uso do arquivo MDE também foram necessárias medições de nível do rio. O modelo utilizado para a elaboração da mancha de inundação foi a interpolação da altura da água em pontos conhecidos com pontos gerados no Arcgis sobre os vetores de drenagem. Este é um procedimento que segue os mesmos princípios do modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), porém sem o uso do software *TerraHidro*.

Com base no SRTM da área estudada, os fluxos de drenagem foram identificados e vetorizados utilizando as ferramentas *fill*, *flow direction* e *flow accumulation* encontradas no ArcToolbox.

Com os fluxos de drenagem vetorizados, o desnível do terreno foi ajustado com os pontos de drenagem mais próximos, sendo que os valores de inundação foram definidos com base nas réguas de medição em campo. O nível “normal” do rio Paraná foi definido pela média de todas as medições diárias nas réguas desde o ano de 1997 até 2016.

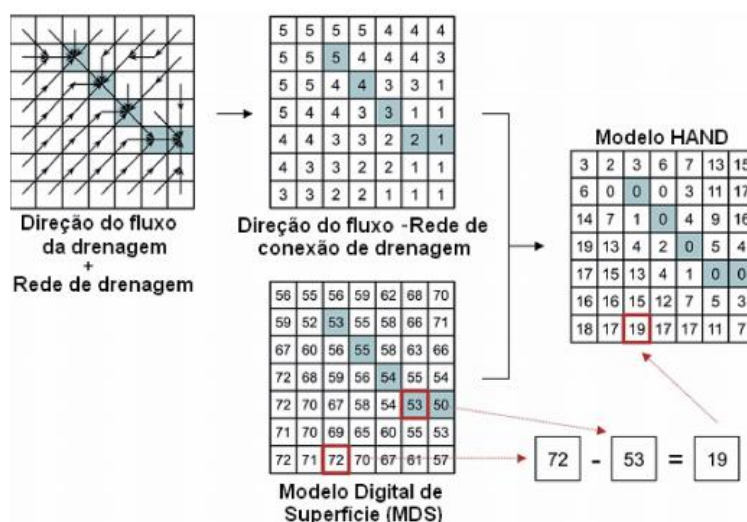


Figura 21. Procedimento para o cálculo do modelo HAND. Os quadrados destacados representam os pontos da grade que pertencem à rede de drenagem. Somente as setas pretas são consideradas fluxo de drenagem (adaptado de Rennó *et al.*, 2008).

A interpolação dos níveis de água das réguas de medição em campo foi feita com a ferramenta IDW (*Inverse Distance Weighted*) também no ArcToolbox. O resultado deste processo foi subtraído pelo SRTM original, indicando um mapa com valores positivos e negativos, sendo os valores abaixo de zero interpretados como área inundada.

4.2.5 Mapas agregados

Assim que obtidos os resultados nas três metodologias para extrair a mancha de inundação, estes são somados para gerar um único mapeamento. Em cada mapeamento, a mancha de inundação é quantificada por valor de 1 e 0, sendo 1 representando água e zero é não água. Quando somados, os resultados em comum entre as imagens apresentam resultado 3. Portanto, se nas três imagens um píxel for 1, na imagem agregada este píxel se mantém com o mesmo valor, dando maior acurácia às áreas mapeadas, já que estas foram apontadas como área de inundação por três técnicas distintas. A camada de resultado 2 indica a similiaridade dos resultados de dois dos métodos utilizados e quando a camada for 1 indica que somente um dos métodos é representado nesta legenda.

4.2.5.1 Máscara de inclinação

Com base no modelo digital de elevação foi feito um mapa de inclinação com o software ArcGis. A partir deste *software* a ferramenta utilizada foi *Spatial Analyst Tools > Surface > Slope*. A partir deste mapa, uma máscara de inclinação foi gerada para que no mapa final de inundação os resultados com inclinação maior que 10° não fossem considerados área de inundação.

4.2.6 Validação

Para a validação das técnicas adotadas, foi utilizado o mapa de inundação de 2003 (CONAE, 2017). Este mapa abrange 10% do total da área de estudo e mostra a inundação principalmente na área urbana da cidade de Santa Fe. Para a validação, a mancha de inundação do mapa elaborado por Conae (2017), Figura 22, foi comparada com as manchas obtidas pelas técnicas adotadas neste estudo. Algumas imagens retiradas de artigos e notícias online também foram utilizadas para mostrar áreas atingidas por inundação na área de estudo.

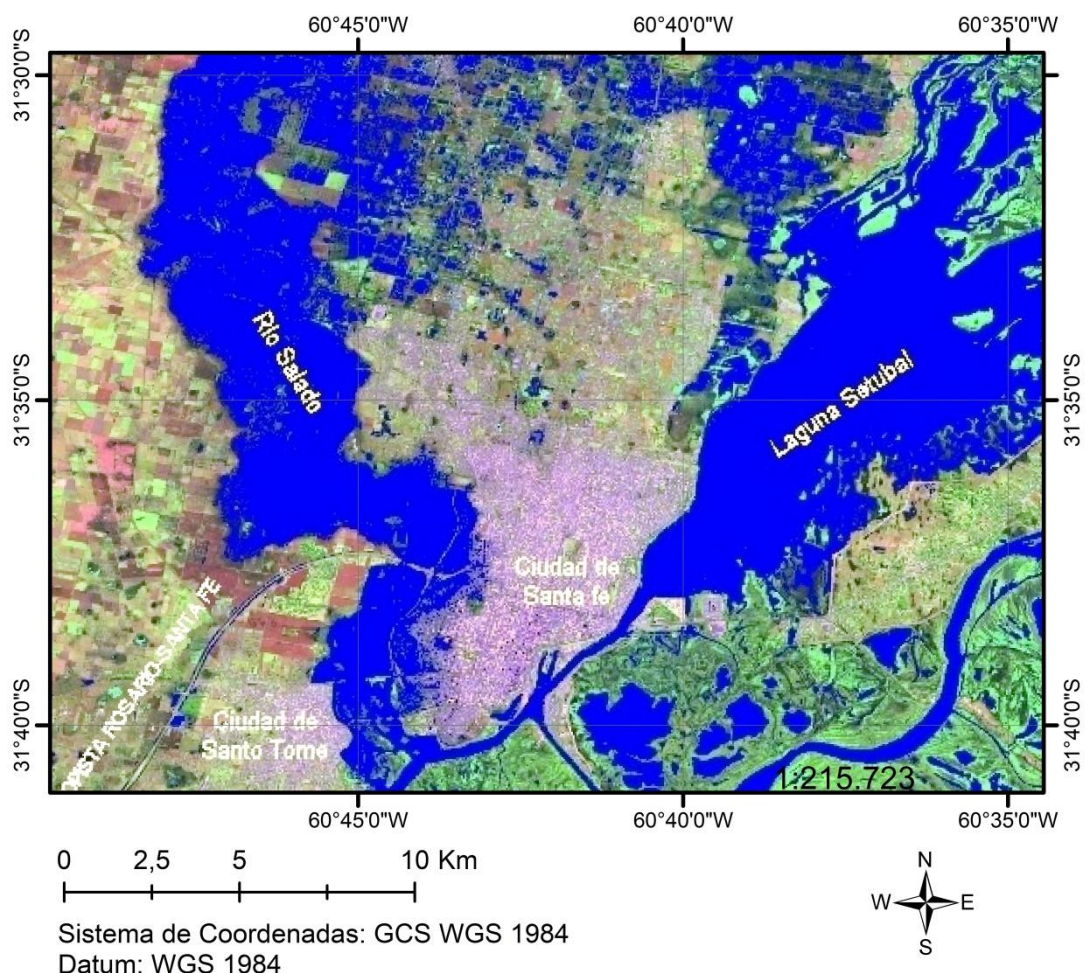


Figura 22. Mapa de inundação de abril de 2003. Fonte: Conae (2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados organizando e discutindo os três produtos elaborados pelos métodos de limiarização, série temporal e MDE. No capítulo do mapa agregado, além dos resultados e discussões também foram incluídos dados e imagens para validação dos três métodos.

5.1 Análise do histograma (limiarização)

A análise do histograma das áreas suscetíveis a inundação, a partir do processo de limiarização do histograma de retroespalhamento, Figura 23, mostra dois picos bem distintos de valores de intensidade dos píxeis. Como os alvos analisados foram água e não água, cada pico no gráfico representa um destes alvos.

Com este método alvos com características horizontais foram mapeados com boa precisão, enquanto alvos verticais são praticamente desconsiderados do mapeamento de inundação. A mancha de inundação foi mapeada principalmente nas áreas em que predominam os alvos de úmidas e área rural. Dificilmente a água é mapeada entre alvos como florestas e área urbana, pois o limiar neste método diferencia a intensidade de retroespalhamento da água dos demais alvos em geral, não distinguindo um limiar específico para cada alvo (GAHLAUT, 2017).

Conforme já abordado na Figura 8, o retroespalhamento em superfícies planas será menor do que em superfícies com rugosidade. Assim, água é representada pelo pico com retroespalhamento menor, Figura 23, à esquerda no eixo horizontal. No eixo vertical é observada a frequência em píxel dos alvos analisados pela área de interesse (ROI).

Entre um pico e outro, existe um intervalo com baixa intensidade de píxel, com valores de -22 até -17,5. No mapa de áreas suscetíveis de inundação, estes píxeis representam as áreas de margem, transição entre o solo e água. Por ser uma baixa frequência de píxeis, estes valores podem ser desconsiderados, considerando o ponto de inundação a partir do valor -22. Sendo assim, neste caso:

$$x = i < -22 \text{ [db]}$$

Em que: x representa a mancha de inundação; i a intensidade de retroespalhamento no eixo horizontal.

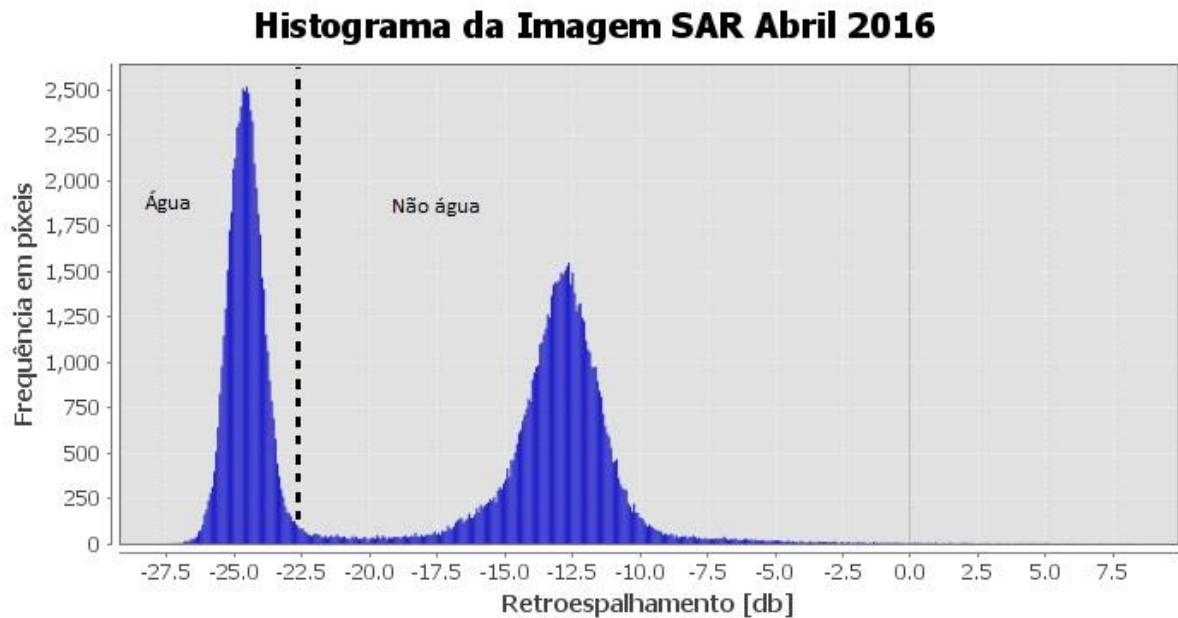


Figura 23. Histograma de retroespalhamento da área suscetível a inundação, imagem SAR, de 19 de abril de 2016, da área de interesse (ROI). Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste processo, a maior preocupação foi distinguir com maior exatidão o que é a área de inundação e diferenciá-la dos outros alvos. A área de aplicação da metodologia pode ser basicamente classificada a partir de cinco classes: área livre (podendo ser solo exposto ou com vegetação), área rural, área urbana (inclui estradas e aeroportos), água permanente e água de inundação. Por este motivo, neste método foi utilizada uma área de interesse (ROI) onde ocorrem somente dois alvos conhecidos na análise do histograma, Figura 24. A água permanente e água de inundação tiveram o mesmo padrão de resposta.

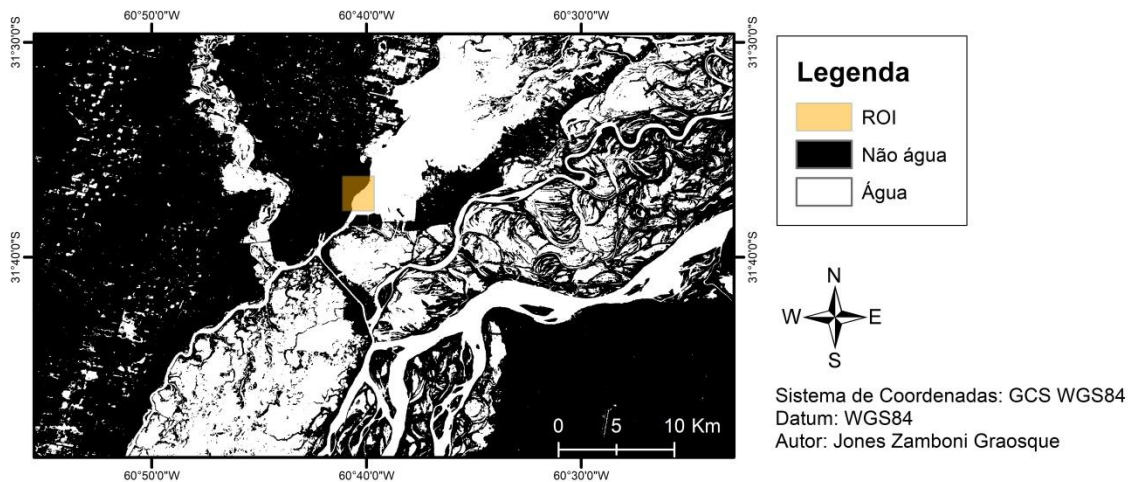


Figura 24. Imagem binária resultado do processo de limiarização, classe água e não água. As áreas de água de inundação e água permanente estão na mesma classe.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, a água permanente foi excluída no resultado final, destacando assim somente o resultado de água de inundação, Figura 25. Quando comparadas as imagens de antes e depois de extrair a mancha de inundação, é possível delimitar a mancha de inundação somente por observação do contraste da intensidade do retroespalhamento, Figura 25. No caso, a água com intensidade de retroespalhamento baixa e os demais alvos com intensidade alta. Na imagem do dia 19 de abril de 2016 a régua “Sistema Setúbal – Santa Fe” estava com nível da água em 6,38m.

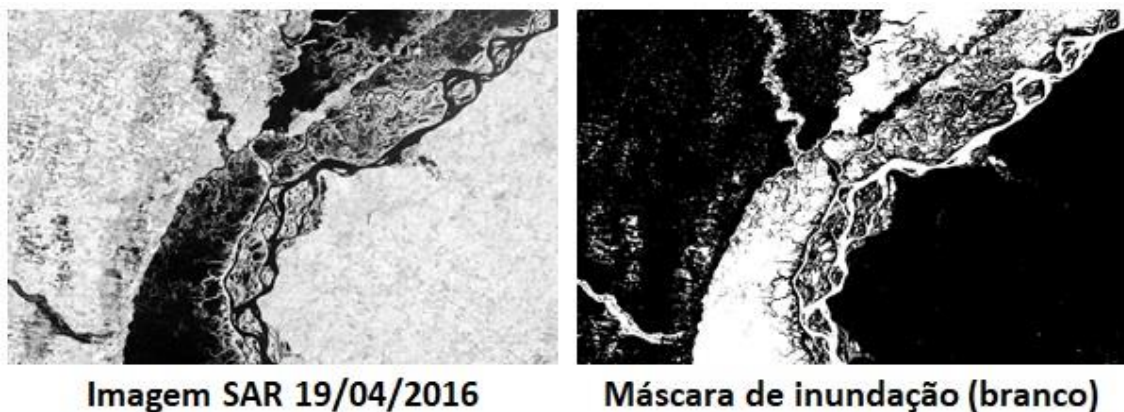


Figura 25. Comparação entre a imagem SAR sem mancha de inundação e com máscara de inundação extraída pelo processo de limiarização. Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na mesma figura, na máscara de inundação, destaca-se a ausência da classe água no lado direito da imagem, correspondente à província de Entre Ríos. Essa informação confere com o mapa de elevação da área, pois a província de Entre Ríos situa-se em elevação superior às demais zonas, não se caracterizando como área suscetível de inundação. Essa área caracteriza-se pela antiga superfície estrutural dissecada constituída por áreas de relevo plano a suavemente ondulado, que constituem o divisor de águas dos sistemas fluviais que tributam ao rio Paraná (ACEÑOLAZA & SAYAGO, 1980 apud FILÍ, 2001).

A mesma técnica foi utilizada para extrair a máscara de corpos hídricos permanentes. Neste caso foi utilizada a imagem do dia 10 de outubro de 2016, quando o nível dos rios foi o mais baixo registrado, considerando as imagens analisadas (2,79m na estação Setúbal – Santa Fe). Para a extração de água permanente os valores de intensidade do retroespalhamento foram:

$$Ap = i < -24$$

Em que: Ap é a máscara de água permanente; i a intensidade de retroespalhamento.

A máscara de água permanente foi usada para excluir da máscara de inundação os resultados correspondentes à água permanente. Na Figura 26 as áreas do fluxo principal do rio Paraná não estão marcadas como inundação.

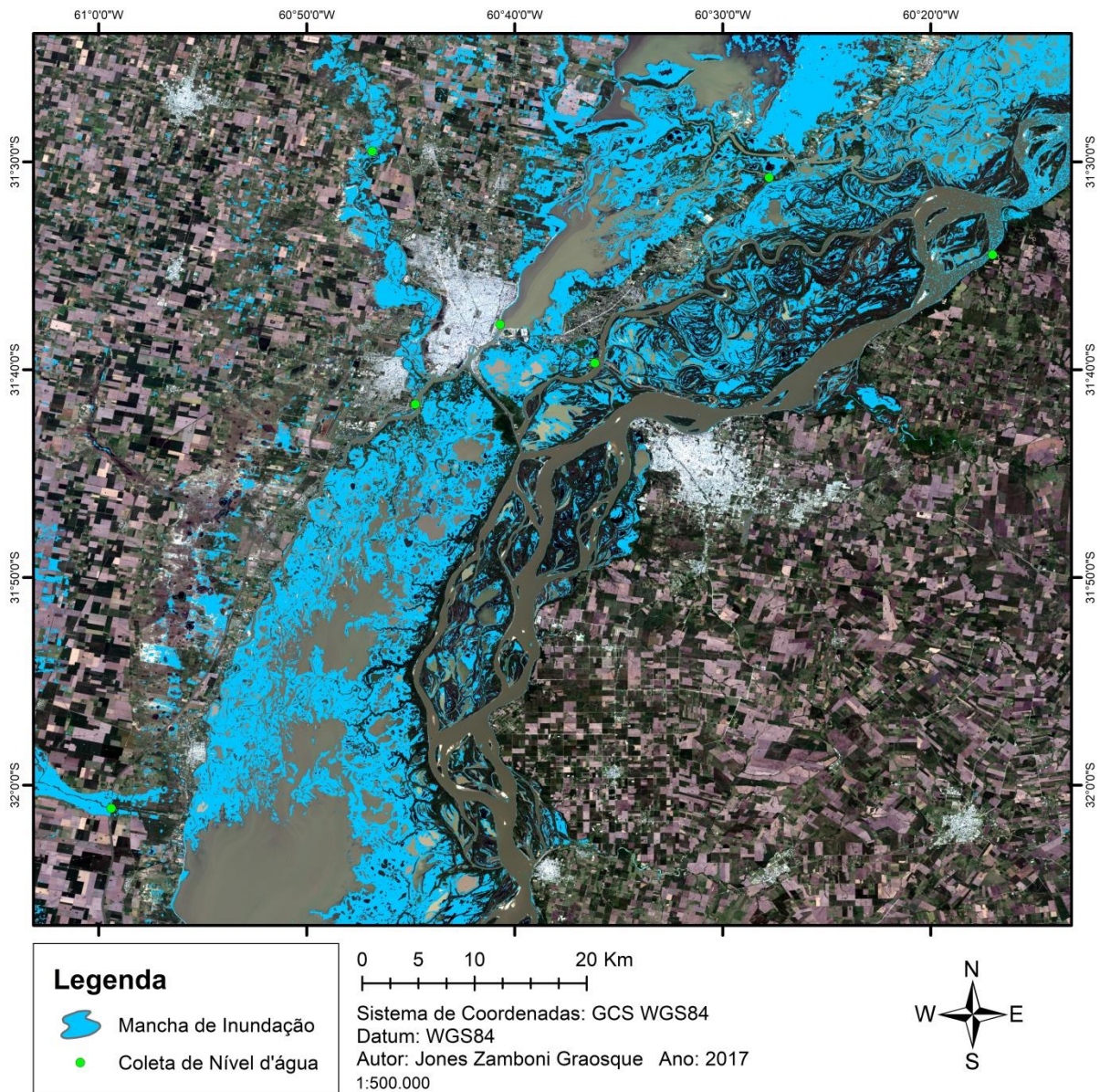


Figura 26. Mapa de inundação a partir de limiarização sobre imagem Landsat 8, 03 de outubro de 2016. Fonte: Imagem SAR, 19 de abril de 2016.

A mancha de inundação obtida a partir de limiarização sobre imagem Landsat 8, se concentra nas áreas próximas aos corpos hídricos. Estas planícies de inundação são caracterizadas por áreas em que, em eventos de inundação, a lâmina de água cobre o solo, sendo detectável por imagens de radar. A partir do método de limiarização, a mancha de inundação ocupa 14,69% da área total da imagem, o que equivale a aproximadamente 1585 km².

A diferença de intensidade de retroespalhamento entre um alvo de água, neste caso, é em média 15% menor do que em alvos não água, ou 5 [db] de

intensidade a menos. A frequência de píxeis vai variar de acordo com a área de interesse selecionada.

As áreas arborizadas aparecem em sua maioria junto às áreas úmidas e, como esperado, não foram identificadas como área de inundação, Figura 27. As micro-ondas do sensor de banda C não conseguem identificar a água entre alvos verticais (VAN DER SANDEN, 1997; SOLBØ & SOLHEIM, 2004; GAHLAUT, 2017).

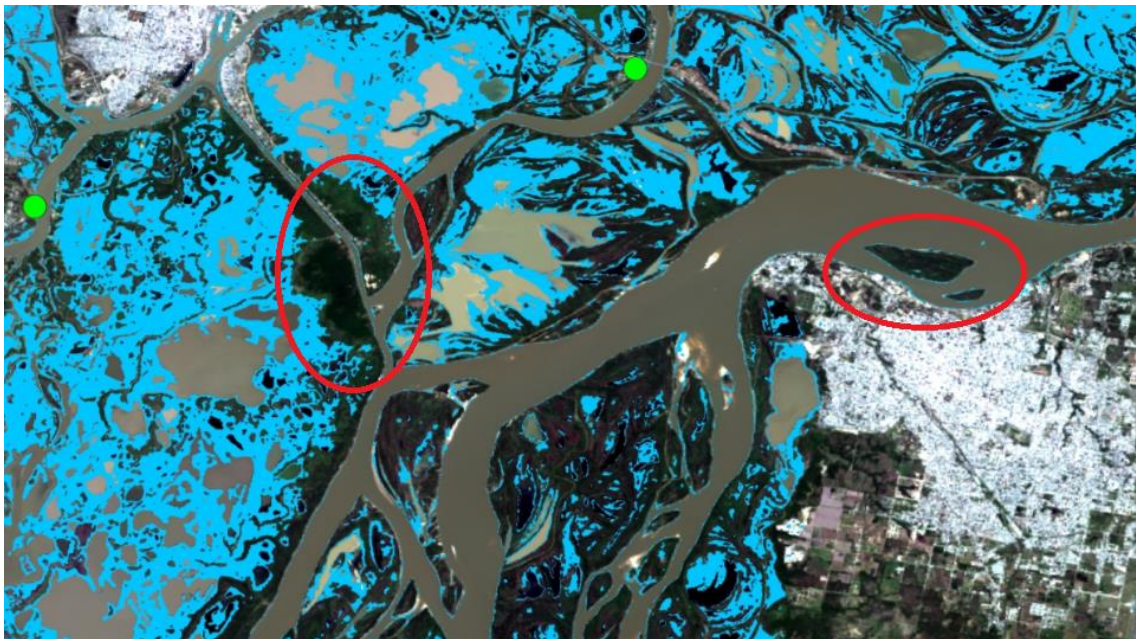


Figura 27. Mancha de inundação entre as cidades de Santa Fe e Parana. Em destaque estão áreas arborizadas, excluídas pelo método de limiarização das áreas de inundação. As réguas de medição do nível d'água estão representadas por pontos em verde Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação entre uma imagem óptica e outra de radar da área urbana de Santa Fe em período de inundação, Figura 28, mostra que não há pontos de água na área urbana. É possível, entretanto, que na data desta imagem de radar (19 de abril de 2016) não houvesse focos de alagamentos na área urbana. Nos grandes parques na cidade, a exemplo do *Parque Juan de Garay*, que contém um lago, poderia ser detectado pelo sensor de banda C, no entanto, o ambiente urbano em torno do lago torna mínima a captura desse corpo hídrico. Estes alvos na cidade de Santa Fe não foram removidos pela máscara de água permanente.

O ambiente urbano observado no Distrito La Costa e na cidade de San Jose del Rincón, localizados no lado leste da cidade de Santa Fe, do outro lado da Laguna Setúbal, apresenta manchas de inundação (Figura 28).

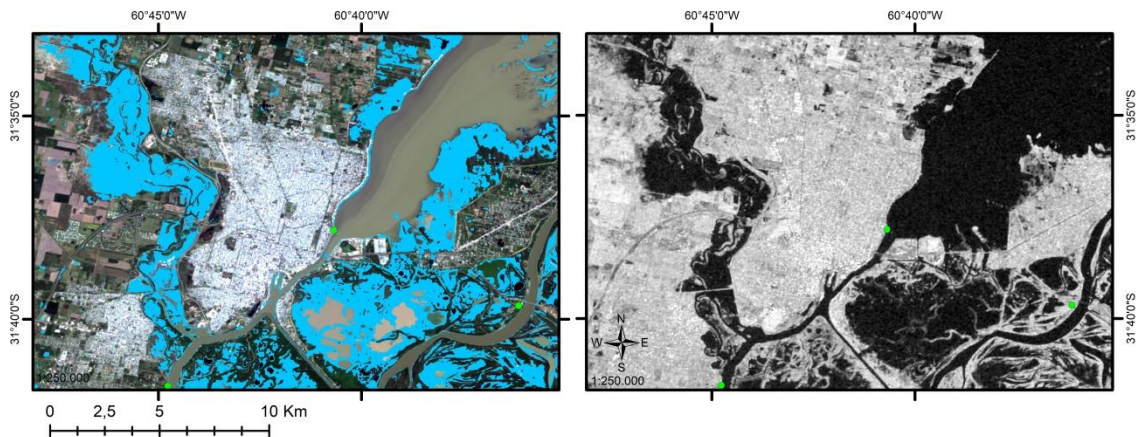


Figura 28. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) da cidade de Santa Fe.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Áreas rurais são caracterizadas pela sazonalidade, o que causa variações na intensidade do retroespalhamento. Por isso, as informações de inundação neste alvo podem variar quando utilizado este método de mapeamento. É preciso levar em conta os períodos de cultivo e a data em que a imagem de radar foi obtida. Se o solo estiver exposto e com baixa verticalidade, será possível com este método definir se há água ou não. No entanto, se o cultivo estiver verticalizado o suficiente para que a água não o cubra por completo, a intensidade de retroespalhamento se manterá alta.

A área rural apresentou manchas de acúmulo de água longe de corpos hídricos. Área rural é um alvo que pode ser rugoso (com alvos verticalizados) e com muita intensidade de retroespalhamento, dificultando a detecção de água por meio de limiarização. No entanto, é possível observar acúmulo de água no canto superior esquerdo da imagem (Figura 29). Por ser uma área plana, nesta área a limiarização atingiu resultados satisfatórios, permitindo identificar áreas com água relativas a eventos de inundação.

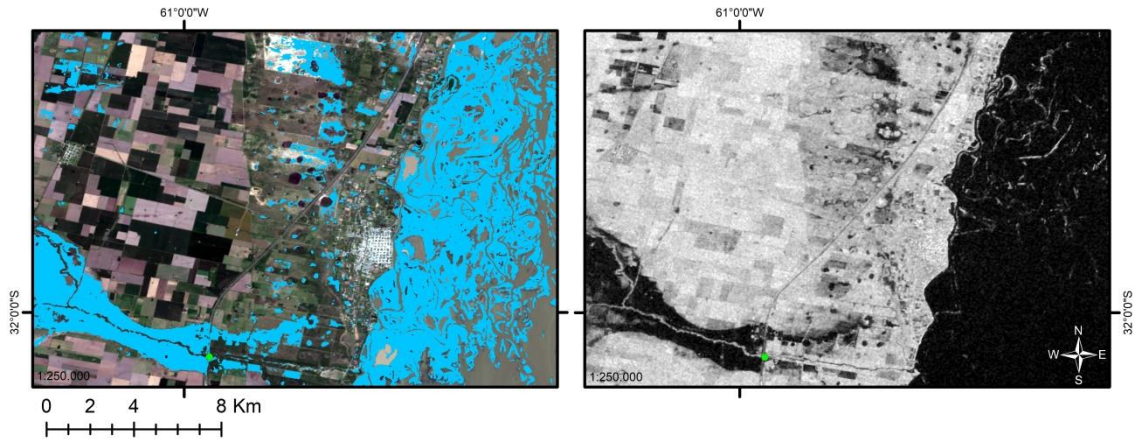


Figura 29. Comparação da imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) na área rural ao sul da cidade de Santa Fe. Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na mesma figura, a imagem de radar mostra a mancha que a água ocupa em eventos de inundação. A área de inundação do rio Paraná, à direita na imagem, fica quase que completamente submersa pela água se compararmos com a Figura 17, onde não há inundação.

A exemplo da análise na área urbana de Santa Fe, na área urbana de Parana não foram detectadas áreas de inundação. A Figura 30 mostra uma das falhas do uso do método de limiarização, na parte inferior de ambas as imagens na área do aeroporto regional da cidade do Parana (Aeroporto General Justo José de Urquiza). Na imagem óptica (que contém a máscara de inundação) o aeroporto foi considerado área inundada, no entanto isso não necessariamente é correto. Na imagem de radar a pista do aeroporto aparece na cor escura, muito semelhante à água e isso se deve ao fato de que a pista é uma superfície estreita e plana, ocasionando menor retroespalhamento no sensor do radar.

Nas margens do rio Paraná observa-se que o método não considerou área de inundação. Apesar disso, a imagem óptica mostra que essas áreas próximas ao rio são compostas de vegetação, possivelmente árvores que, neste caso, cobririam a lâmina d'água, caso fosse uma área de inundação.

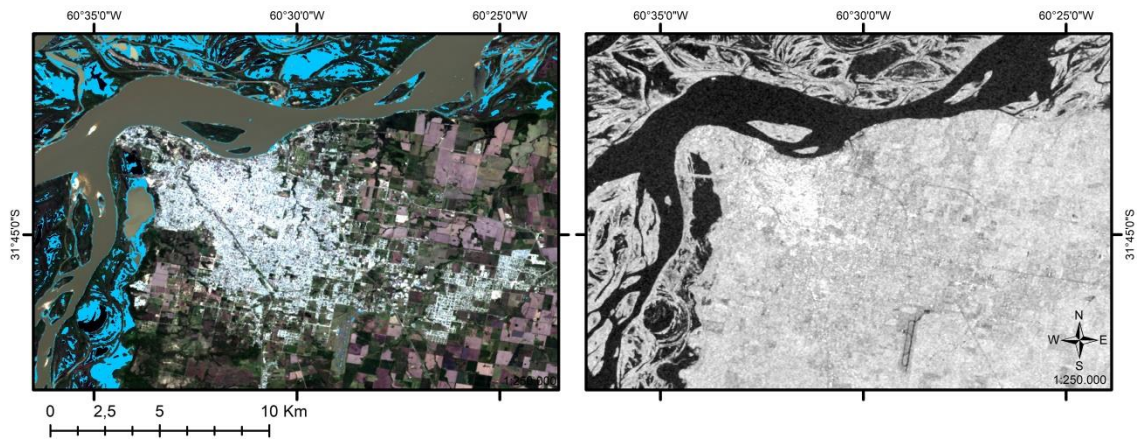


Figura 30. Comparação entre a imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar (direita) da cidade de Parana. Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos no mapeamento por limiarização, a área da mancha mapeada foi de 1585 km². Levando em conta a comparação com a imagem óptica, a área inundada é compatível com 75,73% da inundação observada na imagem Landsat – 8. No entanto, na área de validação, apesar de ter mapeado 238,61 km² de área inundada (frente aos 292,93 km² da mancha de inundação do mapa de Conae (2017)), 49,24% da área elaborada por limiarização é compatível com a mancha de validação.

A técnica de limiarização foi utilizada por outros pesquisadores obtendo mapeamento de áreas de inundação com boa qualidade (MARTINIS, TWELE & VOIGT, 2009; MARINHO, 2011; GAHLAUT, 2017). Marinho (2011) considerou o mapeamento por limiarização (ou fatiamento) adequado para áreas com relevo plano ou levemente ondulado, obtendo acurácia global de 90 a 95% da área de inundação no Vale do Itajaí – Brasil.

Adotando o mesmo método, Gahlaut (2017) elaborou mapas de inundação com acurácia de 85 a 90%. Uma diferença foi que Gahlaut (2017) utilizou mais áreas de interesse (ROI) nas imagens SAR, para conseguir diferentes limiares para cada alvo, considerando assim, que os resultados da análise do histograma são satisfatórios ao mapear áreas planas com solo sem alvos verticais (urbanização e áreas arborizadas).

A partir dos resultados satisfatórios obtidos no mapeamento por limiarização, nas referências pesquisadas, o mapeamento por limiarização pode ser considerado

confiável na identificação de água de inundação e permanente. Nesta pesquisa, a acurácia não atingiu índices tão altos quanto nas referências, entretanto deve-se levar em consideração que o mapa de inundação utilizado para validação foi elaborado principalmente em área urbana, ou seja, em área onde a técnica de limiarização não é eficiente, o que pode ser considerado o principal indício da baixa acurácia encontrada. Problemas no uso desta técnica estão relacionados à imprecisão em mapear água em alvos de grande rugosidade vertical.

Dependendo da área de análise, diferentes cuidados precisam ser levados em consideração. Segundo Marinho (2011) é necessário integrar este método com a análise de um modelo de elevação, pois a sombra da variação altimétrica do relevo, por exemplo, na imagem de radar pode ser confundido com mancha de inundação. Martinis (2009) conclui que, da mesma forma que Gahlaut (2017) elaborou seus mapas de inundação, o uso deste método é mais efetivo quando combinado com uma abordagem temporal de análise de imagens para adquirir diferentes limiares conforme variação dos alvos. Além disso, Gahlaut (2017) defende o uso de imagens ópticas junto com imagens de radar para aprimoramento dos resultados.

5.2 Análise Temporal

A análise temporal foi realizada com a identificação do retroespalhamento dos alvos em situações de inundação e sem inundação. Imagens de radar com polarização HV foram usadas nessa análise, visto que a polarização horizontal é mais indicada para o mapeamento de água (VAN DER SANDEN, 1997). Na análise temporal de Santoro *et al.* (2015), foi identificado o retroespalhamento de cada alvo, como água, áreas úmidas, florestas e área rural.

Por existirem alvos em comum com essa pesquisa, foi possível comparar os retroespalhamentos dos alvos analisados. No entanto era previsto uma variação do resultado, pois os ambientes e as ferramentas para mapeamento foram diferentes.

Na análise temporal foi necessário o uso de polígonos de cada alvo para estabelecer o comportamento da intensidade de retroespalhamento em eventos de inundação. Na Figura 31 as áreas destacadas como inundação estão

predominantemente na planície de inundação do rio Paraná. Nas áreas urbanas e rurais aparecem algumas manchas de inundação, porém não são de grande extensão. Com este método, 8,78% da área total foi considerada área suscetível de inundação, o que equivale a aproximadamente 947 km².

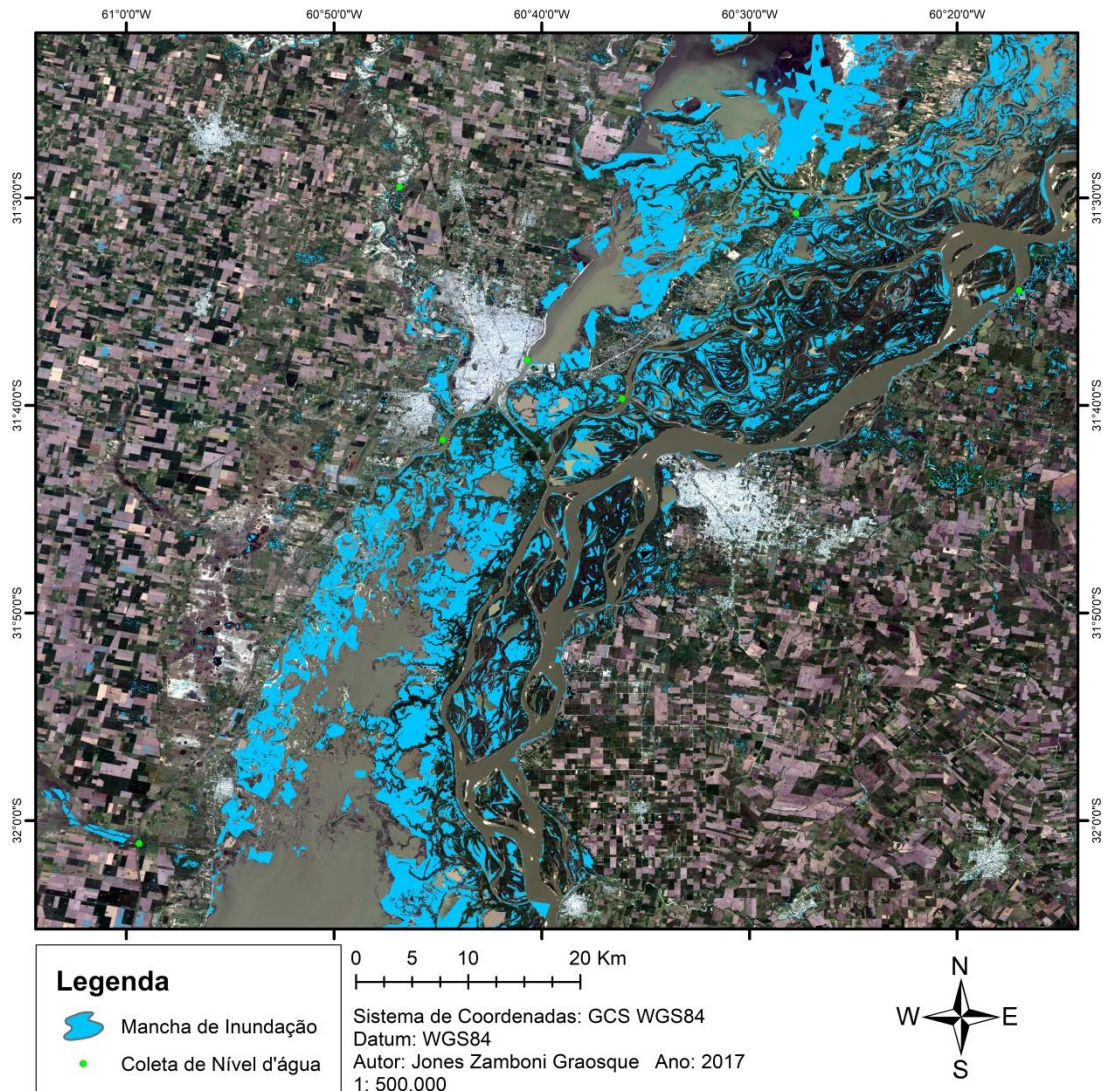


Figura 31. Mapa de inundação a partir da análise temporal sobre imagem Landsat 8. Fonte: Coregistro das 5 imagens SAR, 2016 (07 de fevereiro, 19 de abril, 10 de outubro, 09 de dezembro) e 2017 (14 de janeiro).

Somente 0,002% da área de inundação foram mapeados em áreas urbanas. Este fato influenciou diretamente a validação da mancha de inundação, pois boa parte da área de validação encontra-se em área urbana. Além disso, na área de validação encontram-se alvos rurais, que também são alvos onde a análise temporal pode ser bastante imprecisa. Por estes motivos, na área de validação a técnica de análise

temporal com imagens de radar mapeou 149,37 km² de área inundada, frente aos 292,93 km² do mapa de validação (Conae, 2017). No entanto, aproximadamente 41 km² são compatíveis com a validação. Com a observação em imagem óptica, o índice de compatibilidade sobre para 73%.

Na área urbana de Santa Fe são destacados alguns pontos de inundação, entretanto eles podem ser de alagamento. Abrangem uma área pouco extensa, sendo quase imperceptíveis na imagem óptica e mesmo na imagem de radar, Figura 32. Já na área urbana menos densa na parte superior direita da Figura 30, os pontos de inundação são mais concentrados.

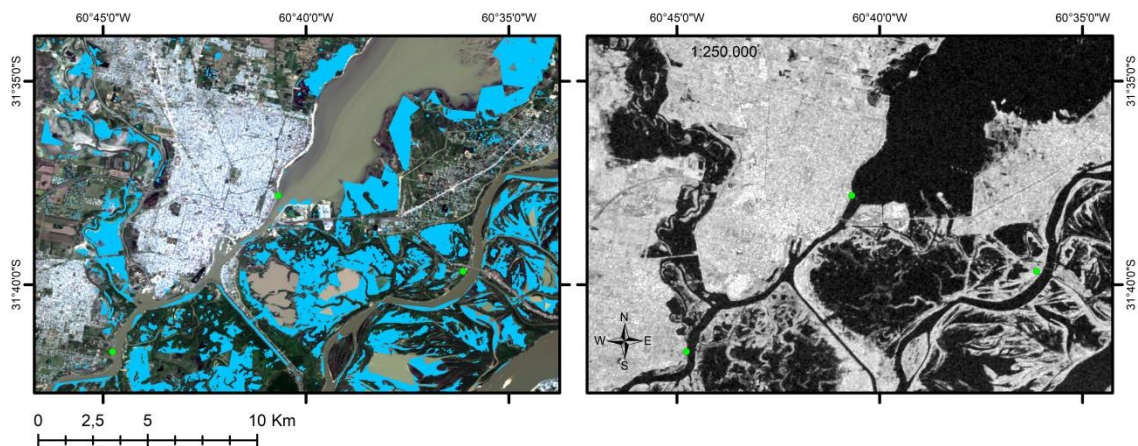


Figura 32. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar (direita) da cidade de Santa Fe. Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora o mapeamento de inundação em áreas urbanas com sensor de banda C – com polarização HV não seja recomendável (VAN DER SANDEN, 1997; SOLBØ & SOLHEIM, 2004; HENRY *et al.*, 2006), foi observado diferença entre o retroespalhamento das imagens com inundação e sem inundação. O retroespalhamento é mais intenso quando em eventos de inundação, Figura 33. As imagens de abril e fevereiro correspondem às datas quando ocorreu inundação, e as imagens de outubro e dezembro apresentam meses sem inundação, com nível baixo dos rios.

No histograma do mês de fevereiro a intensidade do retroespalhamento é menor do que de abril, e até muito semelhante com os meses de seca. A diferença no volume de chuva de 125mm nestas duas datas pode explicar tal resultado.

Segundo INTA (2017), em abril (19/04/2016) e os dias que a antecederam esta data foram marcados por volume de chuva concentrado que atingiu entre 150 a 200mm especialmente entre os dias 18 e 19 de abril, diferente do mês de fevereiro, quando o concentrado de chuva nos dias anteriores foi entre 15 a 25mm. Porém, segundo a mesma fonte, o volume mais expressivo de chuva ocorreu à noite de 07 de fevereiro, enquanto a imagem SAR foi captada por volta das 9 horas da manhã desta mesma data.

As manchas de água que aparecem no ambiente urbano não podem ser consideradas inundação, mas sim alagamento, que é o acúmulo de água no meio urbano causado pela chuva (CENAD, 2017). Portanto, apesar de mapeadas, as áreas urbanas precisam ser desconsideradas no mapeamento de inundação. Além da dificuldade em mapear alagamentos em área urbana, a validação destes dados torna-se difícil sem trabalho de campo (GRAOSQUE, 2015).

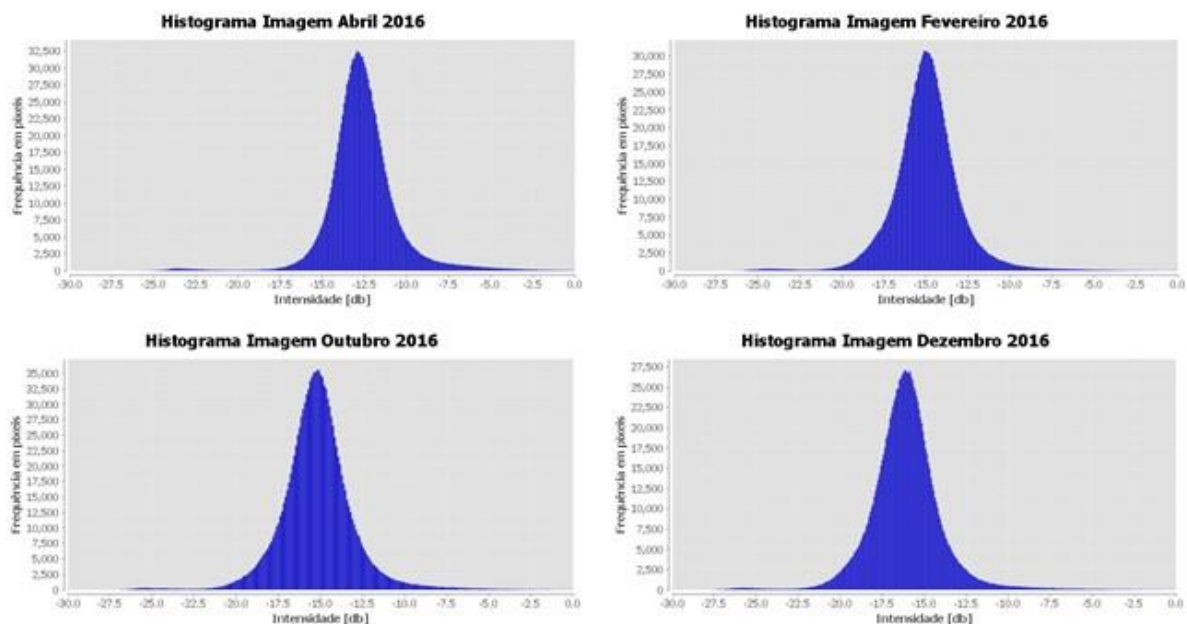


Figura 33. Análise do histograma em área urbana. Imagens de abril e fevereiro representam meses com inundação e imagens de outubro e dezembro sem inundação. Fonte: Elaborado pelo autor.

O retroespalhamento médio aumenta a intensidade quando o alvo está exposto a eventos de inundação. Comparando o padrão com e sem inundação, foi

estimado valores de píxel que representam o alagamento no meio urbano. O deslocamento do pico de intensidade de retroespalhamento para a direita (Figura 34) é explicado pelo *stack* destes dados obtido com imagens dos meses de fevereiro e abril de 2016, sendo que, uma das imagens teve maior intensidade de retroespalhamento do que a outra.

No entanto, estas intensidades de retroespalhamento na área urbana podem representar diversos outros fatores contrários ao acúmulo de água, como por exemplo, mudanças na estrutura da cidade (construção de novos edifícios) ou pelo fato da composição (concreto, aço, etc.) e geometria dos prédios não favorecer uma intensidade de retroespalhamento homogênea (SOLBØ & SOLHEIM, 2004).

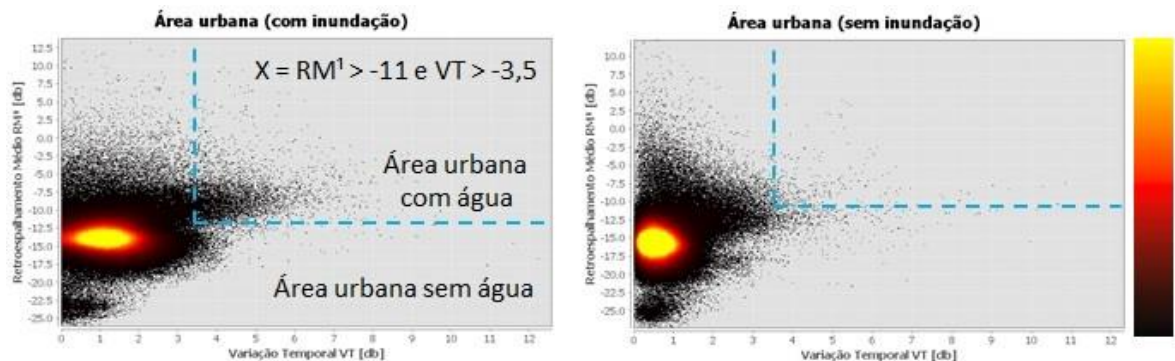


Figura 34. Retroespalhamento entre imagens com inundação e sem inundação na área urbana. A variável “x” representa a mancha de inundação. Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora as manchas de alagamentos no ambiente urbano possam conter imprecisões, é possível comprovar que eventos de alagamentos e inundações afetam algumas destas áreas, Figura 35.



Figura 35. Inundação na cidade de Santa Fe – Argentina, em 29 de março de 2016.
Fonte: La Verdad Oculta (2017).

Nas áreas úmidas e nas áreas arborizadas, as inundações são mais extensas. Nestes alvos, 7,90% e 0,55% respectivamente foram considerados áreas de inundação. Se considerar somente nos polígonos de área úmida, a mancha de inundação ocupa 44,23% e nos polígonos de área arborizada 7,91% é considerada área suscetível à inundação.

A intensidade de retroespalhamento da água de inundação muda de acordo com o tipo de alvo que está sendo analisado. Em áreas úmidas a intensidade do retroespalhamento em eventos de inundação apresentou valores abaixo de -24 [db] (diferença de aproximadamente -2 [db] em relação ao retroespalhamento nas imagens não inundadas). Em áreas arborizadas o valor foi maior que -13 [db] (diferença de aproximadamente 2 [db] em relação ao retroespalhamento sem inundação).

A alteração de aproximadamente 2 [db] em relação às imagens com e sem inundação é a metade da observada em Martinis & Rieke (2015) que reportam uma diferença de 4 [db]. O que pode ser explicado pelas diferenças no ambiente analisado e do sensor utilizado, no entanto a variação do retroespalhamento em alvos com áreas de floresta segue o mesmo padrão nos dois estudos, ou seja, aumentando a intensidade do retroespalhamento em eventos de inundação.

As áreas úmidas representam o alvo de maior área mapeada como inundação entre todos os alvos. Este alvo tem importância significativa no ciclo hidrológico, pois

ampliam a capacidade de retenção de água, promovendo o múltiplo uso das águas pela biota e também pelos seres humanos (SIMIONI & GUASSELLI, 2017). A intensidade de retroespalhamento nas áreas úmidas segue um padrão homogêneo em eventos de inundação. Como a lâmina de água praticamente cobre a área, a intensidade é muito semelhante ao retroespalhamento da água permanente, com valores menores que -24 [db]. Os sensores de radar com polarização horizontal e vertical combinados conseguem mapear e diferenciar estas áreas de outros alvos, inclusive diferenciar tipos de vegetação (KARSZENBAUM *et al.*, 2004).

Diferentemente dos eventos de inundação, nos eventos de baixa dos rios as áreas úmidas apresentam intensidade de retroespalhamento heterogêneo, variando de intensidade por conta de diferentes tipos de vegetação e solo. O uso destas áreas para pecuária também pode alterar este sistema e comprometê-lo, agravando as inundações na região (IHU, 2017). Nas imagens sem eventos de inundação, as áreas úmidas variam a intensidade do retroespalhamento entre -16 [db] até -23,5 [db], bem diferentes dos resultados de intensidade da água, podendo assim distinguir os dois alvos.

Os valores de intensidade de retroespalhamento encontrados são semelhantes aos trabalhos que aplicaram a técnica de análise temporal com imagens SAR (TEIXEIRA & FILHO, 2007; SANTORO & WEGMÜLLER, 2013; MARTINIS & RIEKE, 2015). A Figura 36 distingue as áreas úmidas com e sem eventos de inundação. Na imagem da esquerda grande parte da intensidade de píxeis corresponde à resposta semelhante à água, logicamente esta área fica abaixo do nível alcançado na inundação.

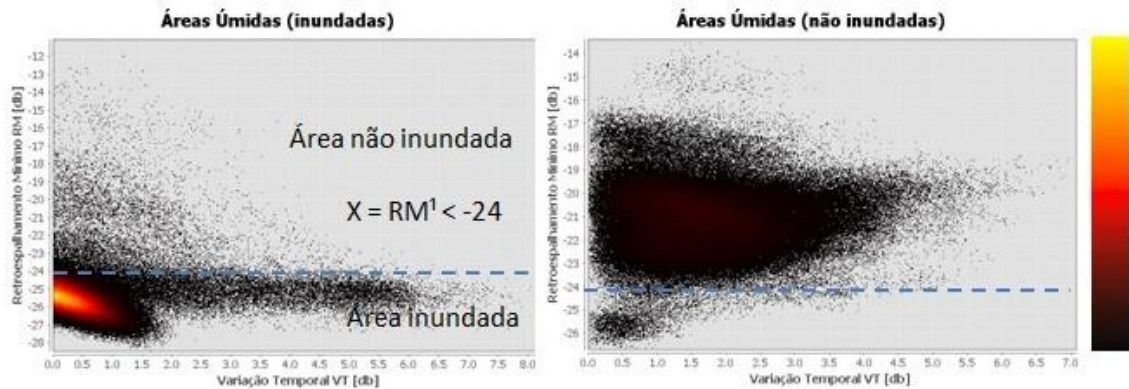


Figura 36. Retroespalhamento entre imagens com inundação e sem inundação nas áreas úmidas. A variável “x” representa a mancha de inundação. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que em eventos de inundação as áreas úmidas ficam cobertas pela água, seria plausível que o mapeamento seguisse os resultados de intensidade de retroespalhamento encontrados por Santoro *et al.* (2015) para a intensidade da água permanente. A diferença é que no caso desse autor, o objetivo foi mapear corpos de água permanente enquanto a presente pesquisa mapeou inundação. A intensidade de retroespalhamento foi condizente com outras pesquisas, sendo considerado água a intensidade de píxel menores que -24 [db], semelhantes aos -20 [db] (SANTORO *et al.*, 2015), -25 [db] (MARTINIS & RIEKE, 2015) ou do valor médio de retroespalhamento para lago intermitente em período de chuvas -16,6 [db] (TEIXEIRA & FILHO, 2007).

Ao sul das cidades de Santa Fe e Parana, Figura 37, se destaca uma grande área úmida. Em tempos de baixa do rio Paraná (em torno de 3m), formam-se ilhas que facilmente são cobertas pela água quando o nível do rio ultrapassa os 5m. Na imagem de radar, inclusive, destaca-se a dimensão da área que a água ocupa em eventos de cheia dos rios (área escura da imagem). A extensão da área úmida inundada é de aproximadamente 852 km².

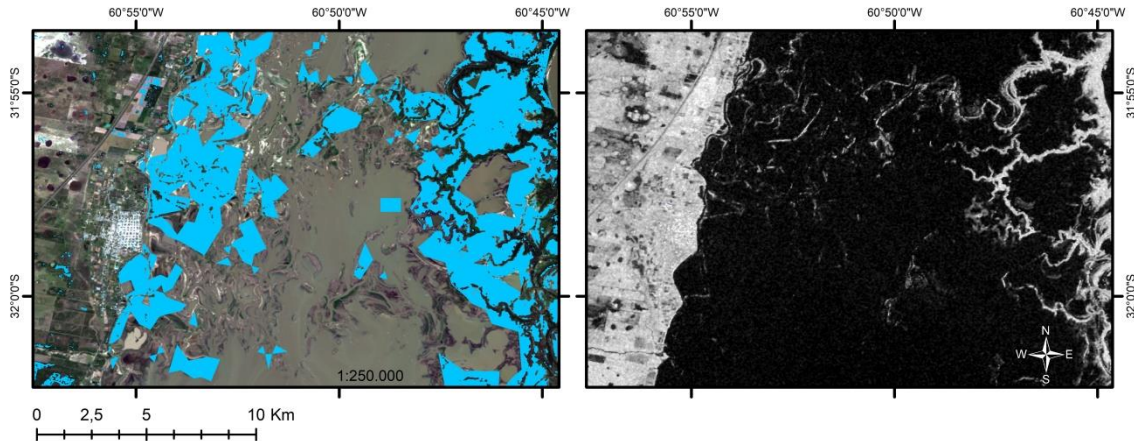


Figura 37. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) em área úmida ao sul das cidades de Santa Fe e Parana. Fonte: Elaborado pelo autor.

A intensidade de retroespalhamento na área rural é muito semelhante em períodos com e sem inundação, Figura 38. Na análise temporal é fundamental saber se o alvo tem verticalidades ou não. Essa informação é dificultada nos alvos rurais, pois o solo apresenta cobertura diferente conforme o cultivo e época do ano. Quando o período de observação é longo, é comum que imagens sejam capturas em períodos pré e pós-colheita, fazendo com que na análise temporal estes alvos tenham intensidade do retroespalhamento baixo, próximos da intensidade da água, e com variação temporal alta (SANTORO & WEGMÜLLER, 2013).

A intensidade da maioria dos píxeis de área rural tem um retroespalhamento médio entre -10 [db] até -20 [db], coerente com Santoro & Wegmüller (2013) e Martinis & Rieke (2015), que obtiveram retroespalhamento entre -19 [db] até -5 [db] e -17 [db] até -6 [db] respectivamente. Por ser um alvo com alta variação da intensidade de retroespalhamento, Martinis & Rieke (2015) defendem que para identificar inundação entre estes alvos, seria necessária intensidade de retroespalhamento superiores a -5 [db]. Além disso, o retroespalhamento varia de acordo com o cultivo, em plantações de milho, por exemplo, a intensidade de retroespalhamento será sempre alta independente se for pré ou pós-colheita devido à estrutura deste cultivo (O'GRADY; LEBLANC; BASS, 2014).

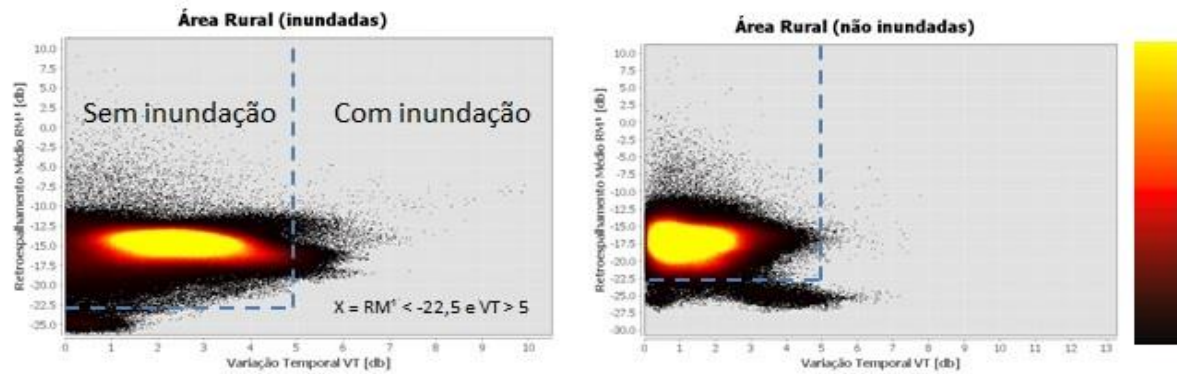


Figura 38. Retroespalhamento entre imagens com inundação e sem inundação na área rural. A variável “x” representa a mancha de inundação. Fonte: Elaborado pelo autor.

No eixo RM¹ é considerada água os píxeis com intensidade menor que -22.5 [db], pois há redução na intensidade dos píxeis, criando um limiar entre os dois alvos. A intensidade de retroespalhamento da água permanente varia entre -24 [db] até -27 [db], levando a concluir que no intervalo de -22,5 [db] até -24 [db] o alvo se confunde em água e solo (Figura 39).

As áreas úmidas são as que mais são ocupadas pela água em épocas de alta dos rios, pois são áreas de baixa elevação e estão próximas aos cursos hídricos (KUNDUS *et al.*, 2001). Percebe-se que nestas áreas há poucas estruturas antrópicas, no entanto, no curso do rio Paraná as ilhas são usualmente ocupadas pela pecuária. A expansão da agricultura, principalmente da soja, forçou os produtores a deslocar o gado para estas áreas úmidas, Figura 39, e conseqüentemente, esta atividade corre um alto risco de perdas na medida em que o nível da água sobe (IHU, 2017).



Figura 39. Inundação em área rural com solo parcialmente coberto pela lâmina de água. Fonte: Cronista (2017).



Figura 40. Pecuária nas ilhas do rio Paraná na província de Santa Fé. Fonte: Agritotal (2017).

Apenas 0,33% da mancha de inundação está sobre áreas rurais. A Figura 41 mostra uma parte das 69,53% de área rural mapeada. No entanto, a mancha de inundação só ocupa 0,58% do total deste alvo.

Algumas áreas arborizadas, destacadas na parte esquerda da imagem próxima ao rio e nas ilhas, estão sinalizadas como sendo atingida pelas inundações do rio Paraná. O percentual de área arborizada inundada é baixo, porém representa uma área pouco maior que 59 km² sendo quase equivalente à área urbana total da cidade de Santa Fe.

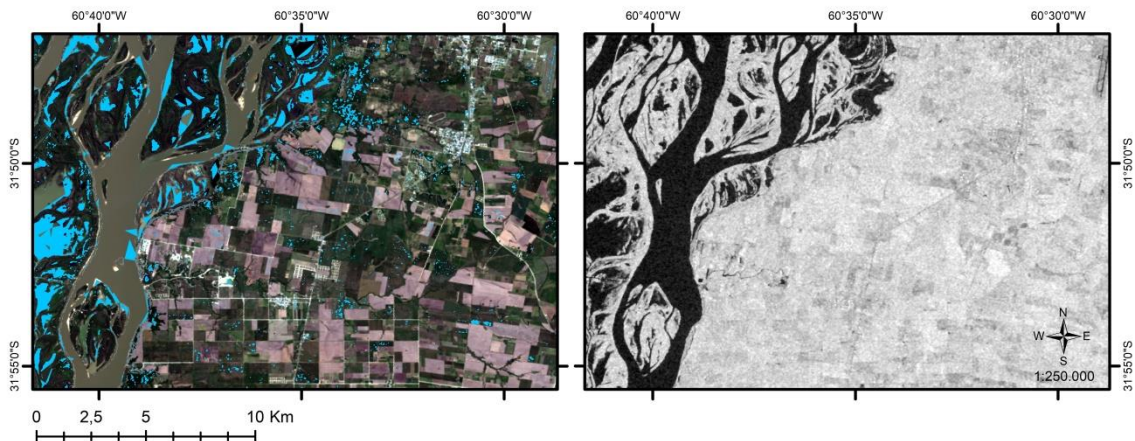


Figura 41. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem de radar com inundação (direita) na área rural ao sul da cidade do Parana. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as áreas arborizadas, os resultados tiveram comportamento semelhante aos de Solbø e Solheim (2004), com maiores intensidades nos eventos de inundação. No histograma sem inundação o pico de intensidade é formado por mais píxeis do que na imagem com inundação. Isso indica maior homogeneidade do alvo, enquanto na imagem sobre efeito da inundação a intensidade é mais espaçada, pois além das árvores, existe água como alvo.

A máscara de área arborizada inundada foi definida como:

Área arborizada inundada > -13 (RM¹)

RM¹ = Retroespalhamento Médio

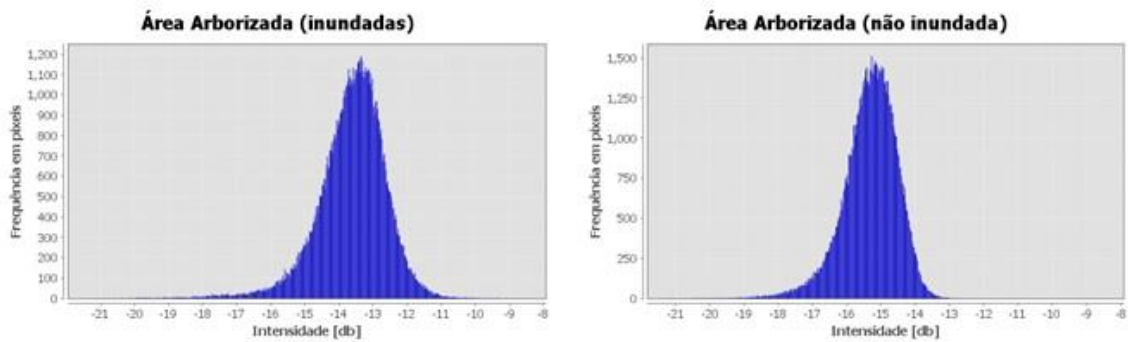


Figura 42. Histogramas comparando a intensidade das áreas arborizadas com e sem inundações. Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora a área de estudo não seja caracterizada por amplas áreas de floresta, junto às áreas úmidas existem áreas com alta densidade de árvores. Apesar da baixa intensidade de pixels, Figura 43, é perceptível a diferença entre os pixels com e sem inundações. Essa diferença entre pixels de áreas arborizadas com e sem efeito de inundações também foi observada em pesquisas que utilizaram a análise temporal como método principal (VAN DER SANDEN, 1997; SOLBØ & SOLHEIM, 2004; SANTORO *et al.*, 2015; MARTINIS & RIEKE, 2015; LIU, 2016).

O mapeamento de ocupação do solo precisa ser o mais detalhado possível, pois em áreas arborizadas, diferentes alvos podem prejudicar a identificação de água de inundações entre as árvores. O mapeamento de cobertura de solo foi realizado com imagens com resolução espacial de 300 metros, perdendo precisão nos limites entre áreas arborizadas e outros alvos.

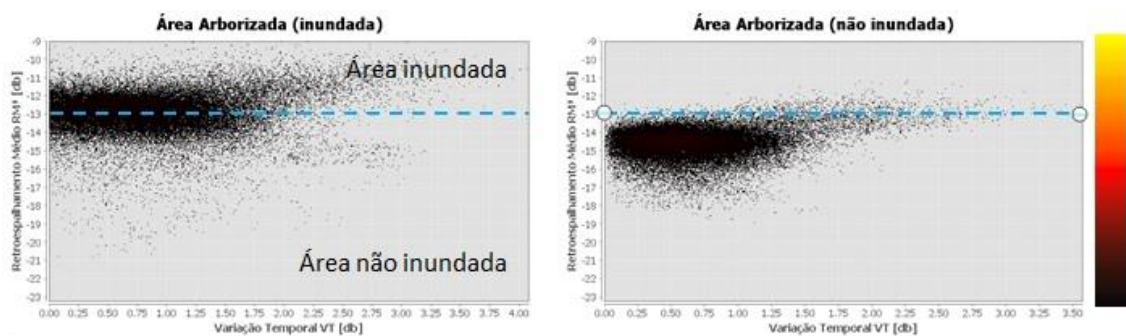


Figura 43. Gráficos comparando as intensidades de retroespalhamento médio entre áreas inundadas e não inundadas. Fonte: Elaborado pelo autor.

As áreas arborizadas são de pequena extensão, e boa parte está dentro da área de inundação do rio Paraná. Na Figura 44 é possível ver a copa das árvores emersas no meio da área inundada. As micro-ondas do sensor de banda C não conseguem captar a lâmina de água coberta pelas árvores, no entanto a maior intensidade do retroespalhamento nas datas de imagens com inundação indica a presença de água.



Figura 44. Fotografia do distrito de Colastine durante inundação no mês de janeiro de 2016. Fonte: La Nacion (2017).

5.3 Análise do Modelo Digital de Elevação

A precisão da área de inundação baseada no modelo digital de elevação foi avaliada com base nas medições das réguas de nível d'água.

Na análise do MDE foram obtidos resultados com maior acurácia entre os métodos utilizados, 87,57% da área de inundação mapeada é compatível com a inundação da imagem de validação. Também, 82% da área de inundação mapeada é condizente com a inundação observada na imagem Landsat – 8 com 15 m de resolução espacial. No mapa de inundação, Figura 45, a maior parte das áreas inundadas está nas áreas úmidas, entre as cidades de Santa Fe e Parana. Também,

é possível verificar inundações nas margens do rio Salado e a nordeste da cidade do Paraná, onde não há um ponto de drenagem para o rio Paraná.

Este método apresenta resultados considerados adequados em diversos mapeamentos de inundações em áreas com topografia distinta (COLLISCHON & RAUBER, 2004; SILVA & AFONSO, 2006; GUIMARÃES & PENHA, 2009; DIEDRICH *et al.* 2010; OLIVEIRA, 2010; GUASSELLI *et al.*, 2016). Além da qualidade do mapeamento ser satisfatória, com esta técnica é possível simular inundações com cotas arbitradas pelo usuário (COLLISCHON & RAUBER, 2004; OLIVEIRA, 2010).

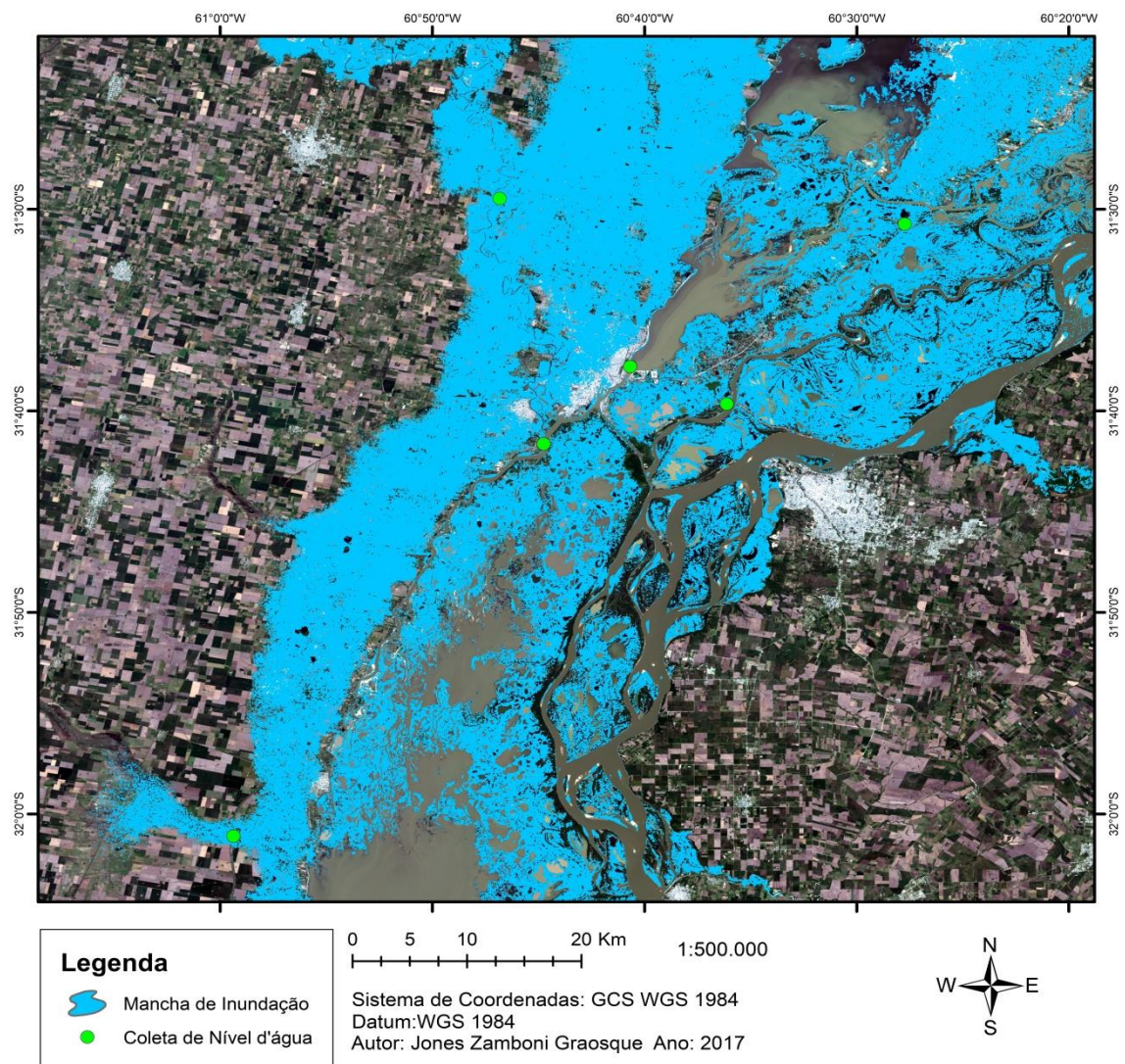


Figura 45. Mapa de inundação a partir da análise do MDE sobre imagem Landsat 8.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por ser uma área predominantemente plana, essa técnica pôde ser aplicada apresentando áreas inundadas correspondentes com inundações observadas em imagens ópticas e de radar em épocas que as águas estavam em níveis superiores a 6 m. Na Figura 46 o mapa geral de inundação mostra os pontos de coleta de nível d'água sobre uma imagem óptica. Considerando toda a área de estudo, 21,66% da área total foram consideradas área de inundação.

Utilizando esta técnica para mapear área de inundação, alguns alvos podem ser confundidos com o que não é água. Na Figura 46 verificar-se que a *Ponte Ing Candioti* (ao sul da régua de medição de nível de água Sistema Setubal – La Guardia) está mapeada como área de inundação, no entanto, não foram encontrados registros em que o nível da Laguna Setúbal ficou acima do nível da ponte.

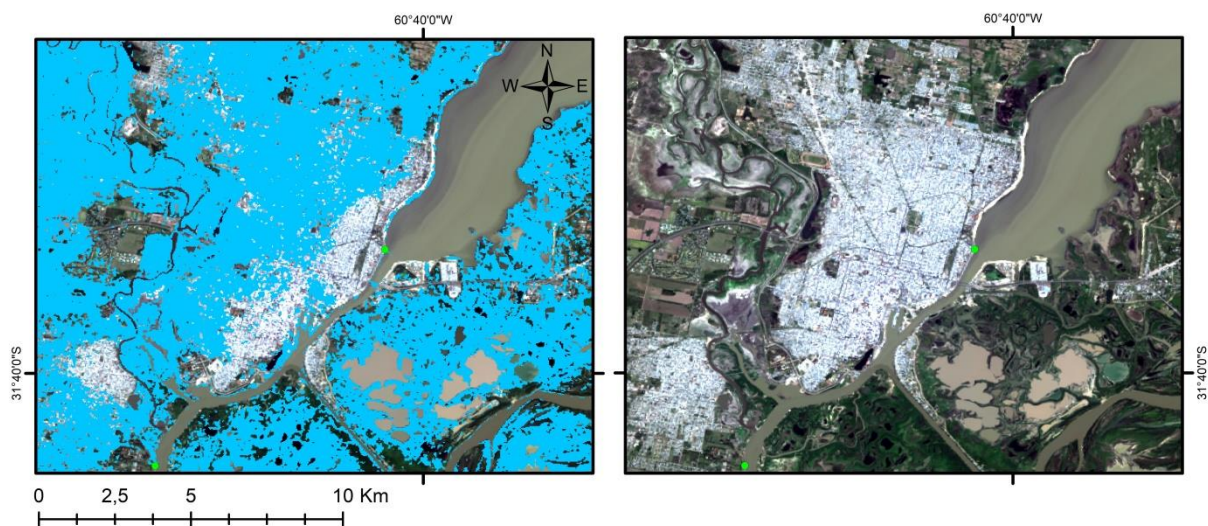


Figura 46. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação e imagem óptica sem máscara de inundação, na cidade de Santa Fe e Santo Tomé.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na área urbana de Santa Fe e Santo Tomé, há muitas áreas atingidas pela inundação. Principalmente na parte sul de Santa Fe, a mancha de inundação é bem expressiva, semelhante à inundação ocorrida em 2003 quando ainda não estavam concluídos os diques de proteção da cidade (VALLEJOS; MATHARÁN; MARICHAL, 2014). Como a análise não considera estas estruturas de drenagem, muitas áreas foram mapeadas como suscetíveis à inundação.

A área inundada mapeada pelo método de análise do MDE, considerando o nível médio das medições do ano de 2016, é satisfatória quando comparada com a inundação de 2003. Mesmo na imagem usada para validação, a mancha de inundação é semelhante às encontradas nas cidades de Santa Fe e Santo Tomé, além da planície de inundação do rio Salado. Sendo assim, os resultados são satisfatórios quando aplicada a técnica de análise do MDE.

Praticamente toda área urbana do distrito La Costa, localizado ao leste de Santa Fe, está mapeada como área de inundação. Parte da área oeste da cidade de Santa Fe também aparece como local onde a água pode inundar, assim como regiões na área urbana de Santo Tomé. Estas manchas de inundação são coerentes com os registros de eventos de inundação (portal PAGINA 12, 2017 e TELÂM, 2017).

Considerando a área destacada na Figura 47 como uma amostra para validação, pode-se assumir que toda a área de estudo seguirá o mesmo padrão. Na margem leste do rio Paraná não se observam áreas atingidas por inundação na parte urbana de Parana. Isto é coerente considerando que topograficamente esta região é expressivamente mais elevada do que a região a oeste do rio Paraná. A diferença altimétrica da cidade de Santa Fe para a cidade de Parana é de aproximadamente 40m, e não se caracteriza como uma área suscetível a inundações.

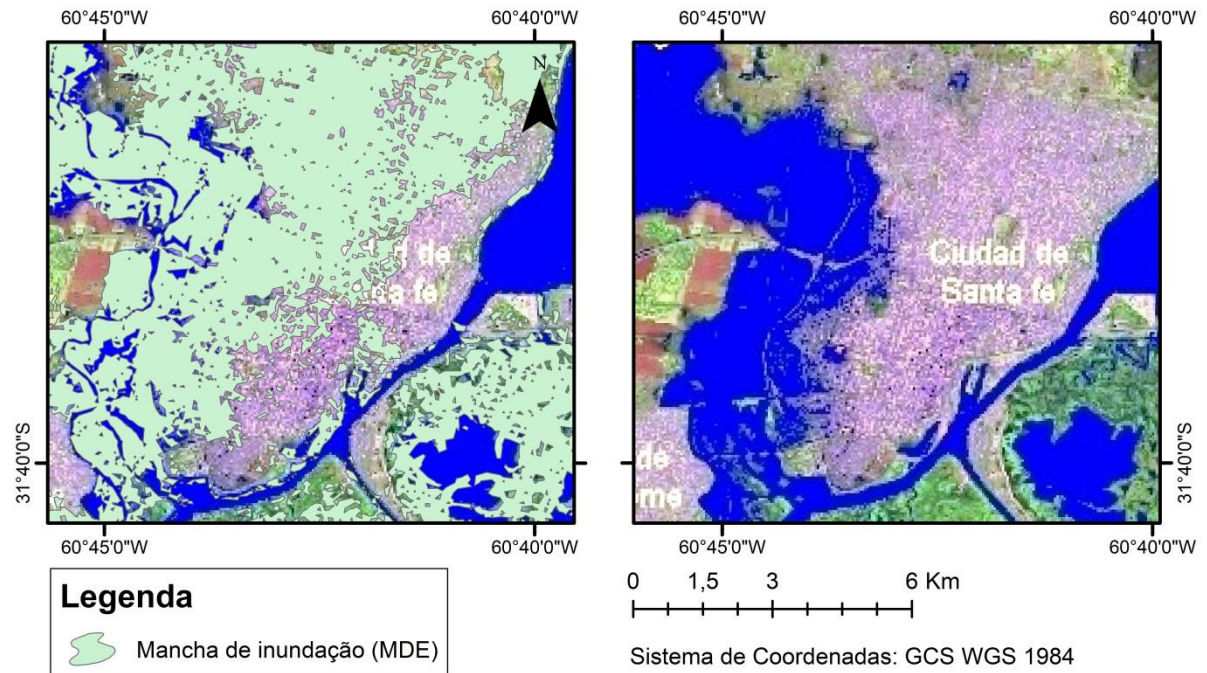


Figura 47. Imagem à direita: Mancha de inundação na cidade de Santa Fe ocorrido na data de 3 de maio de 2003. Imagem à esquerda: Mesmo mapa da direita, porém com a máscara de inundação gerada pela análise do MDE em verde. Fonte: Conae (2017); IGN (2017).

Como já citado, a análise pelo MDE e os níveis de rio não consideram estruturas de drenagem e proteção contra inundação. Na cidade de Santa Fe, por exemplo, existe um sistema de diques que cerca quase toda cidade, evitando que eventos de inundação atinjam o perímetro urbano (Figura 48). Destaque também para o Distrito La Costa e a cidade de San Jose del Rincon, ao leste de Santa Fe no lado leste da Laguna Setúbal. Praticamente toda área urbana aparece inundada, porém com os diques de proteção estas áreas não inundam de forma tão intensa.

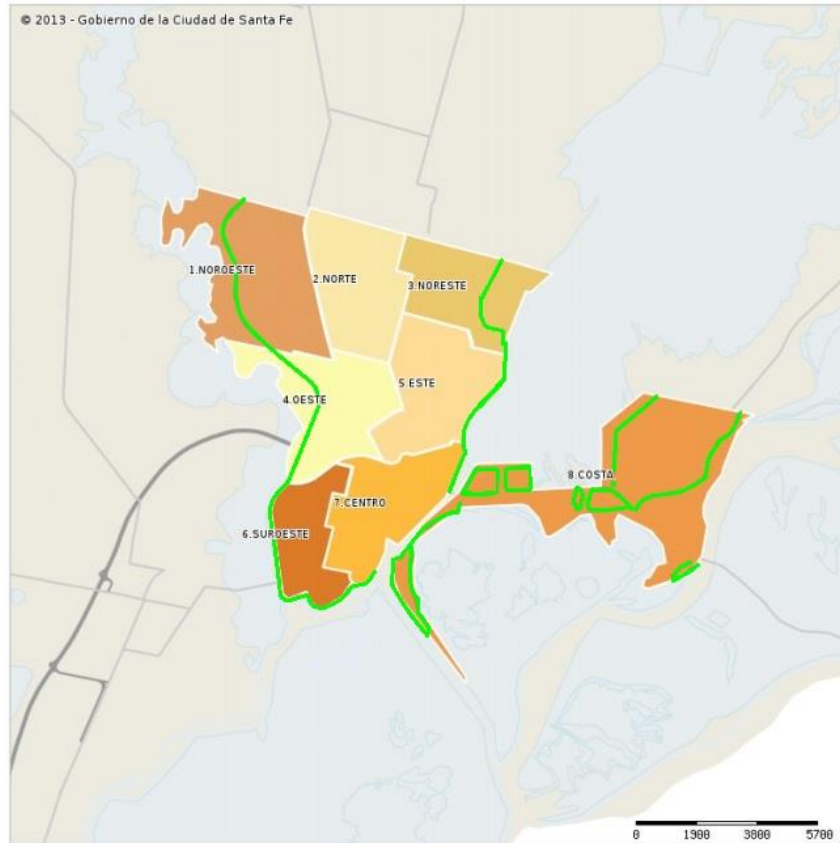


Figura 48. Sistema de diques na cidade de Santa Fe. Diques representados pela linha verde. Identificação das zonas da cidade. Fonte: Santa Fe Ciudad (2017).

O entorno da cidade de Coronda, com base no MDE, foi delimitado como uma área suscetível de inundação. A régua de medição de nível d'água "Colastiné – Autopista" marcou o nível em 3,89m no dia 19 de abril de 2016. Esta data foi considerada base para as medições nas réguas e análise do MDE. Na Figura 49 a área inundada não parece ser uma zona rural uniforme, dando indícios de que naquele local as inundações são bastante ativas. Nesta área passam duas importantes rodovias argentinas, a *Autopista Rosario – Santa Fe* (AP 01) e a *Ruta Nacional 11* (RN 11), ambas em áreas suscetíveis a inundação (La Capital, 2017).

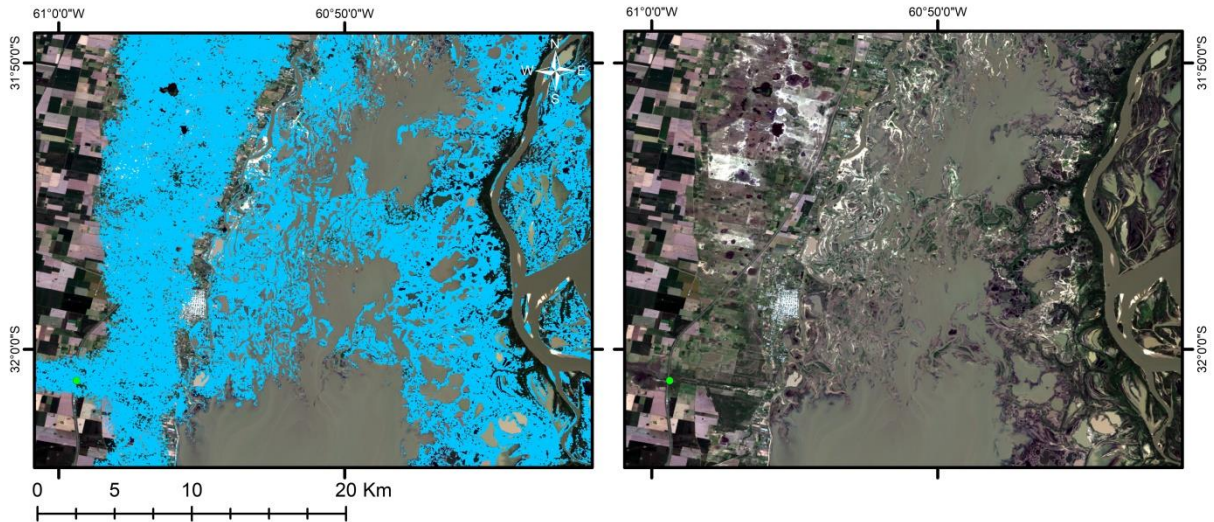


Figura 49. Comparação entre uma imagem óptica com máscara de inundação (esquerda) e imagem óptica sem máscara de inundação (direita), área rural do município de Coronda próximo da régua de medição de nível de água Colastiné – Autopista. Fonte: Elaborado pelo autor.

A região nordeste da cidade de Parana apresenta suscetibilidade à inundação, porém nenhum tipo de construção ou área agrícola ocupa este espaço (Figura 50). O ponto de medição de nível d'água Colastiné – Ruta Nacional nº168, destacado próximo ao distrito La Costa marcou na régua o nível do rio em 6,15 m. Nesta área existe um túnel por baixo do rio Paraná, por onde passa a *Ruta Nacional 168* (RN 168), outra importante rodovia do país e que sofre inundações.

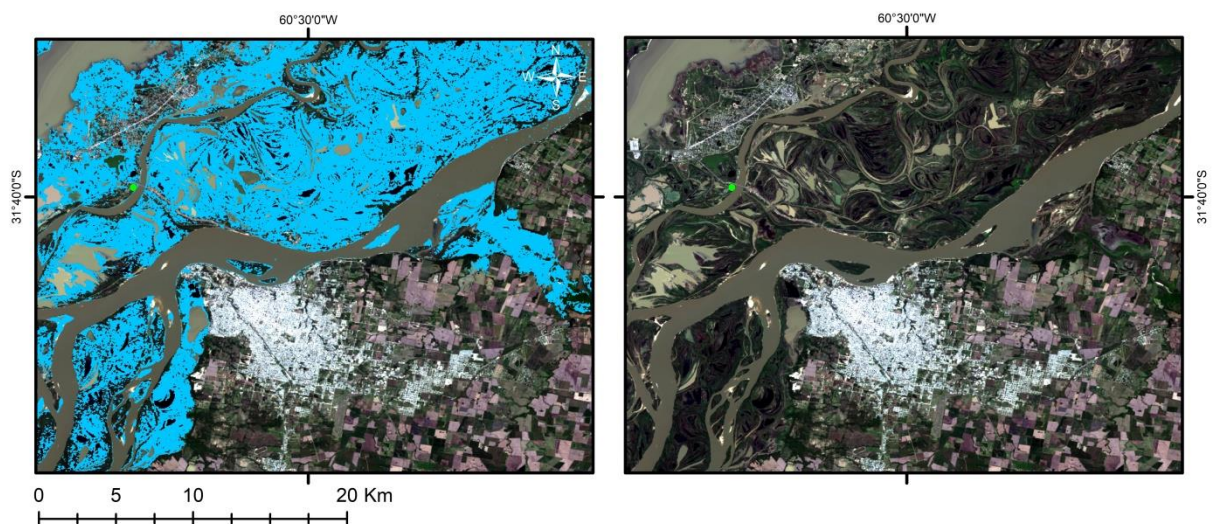


Figura 50. Cidade de Parana com (esquerda) e sem (direita) a mancha de inundação. Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do MDE foi elaborado um perfil topográfico entre as duas principais áreas urbanas, Parana e Santa Fe. O perfil, Figura 51, mostra que há uma diferença de pelo menos 40 metros. Apesar da maior distância, em relação ao canal principal do rio Parana, a área urbana de Santa Fe encontra-se poucos metros acima, caracterizando-se uma área suscetível às inundações.

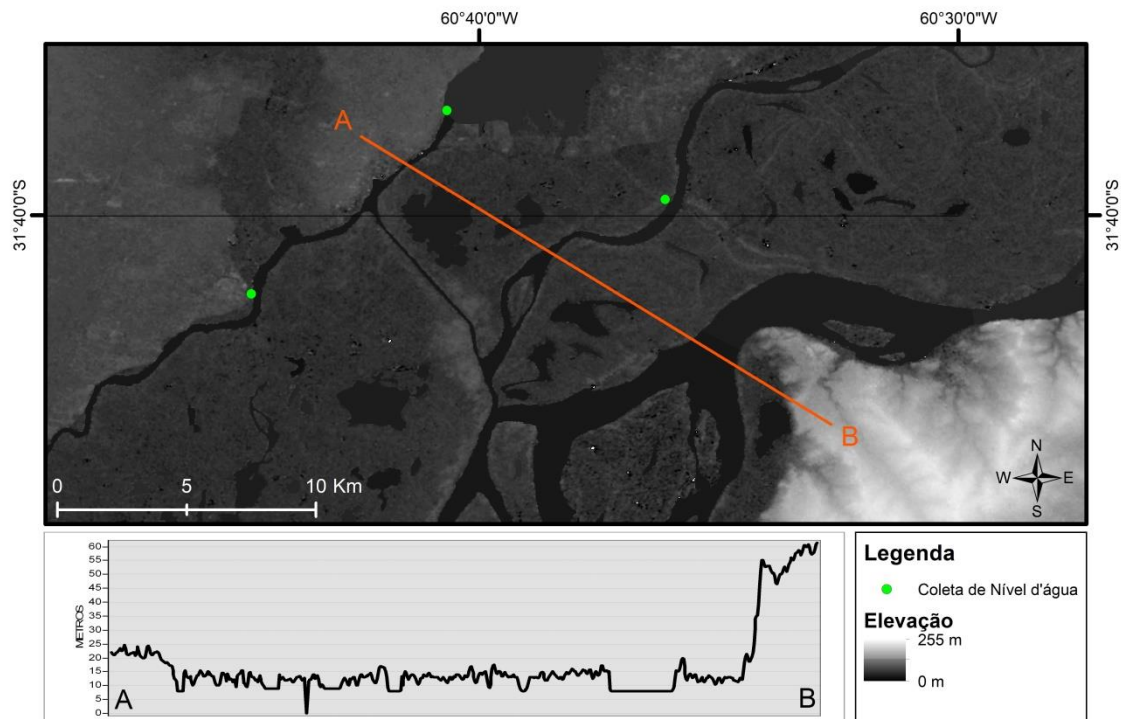


Figura 51. Perfil topográfico entre as áreas urbanas de Santa Fe (A) e Parana (B).
Fonte: SRTM com resolução de 30 m.

A importância de um modelo de elevação confiável para aplicar este método é evidente nas referências utilizadas. Diedrich *et al.* (2010) e Oliveira (2010) utilizaram modelos altimétricos com curvas de nível com equidistância de 1m.

Nesta pesquisa foram utilizadas imagens SRTM com resolução espacial de 30m em uma escala de 1:50.000, não sendo possível gerar um mapa de altimetria com precisão de 1m. Desta forma, o modelo de elevação mostrou resultados incoerentes em algumas partes.

O modelo altimétrico utilizado é adequado para avaliação em escalas menores. Observa-se no MDE que o rio Paraná é bem encaixado no relevo (Figura 52), o que reduz a planície de inundação. Na província de Santa Fé, o relevo

caracteriza-se por cotas mais baixas, entre 10m e 40m, incluindo a cidade de Santa Fe, tornando essa área mais suscetível aos processos de inundação dos rios Paraná e Salado.

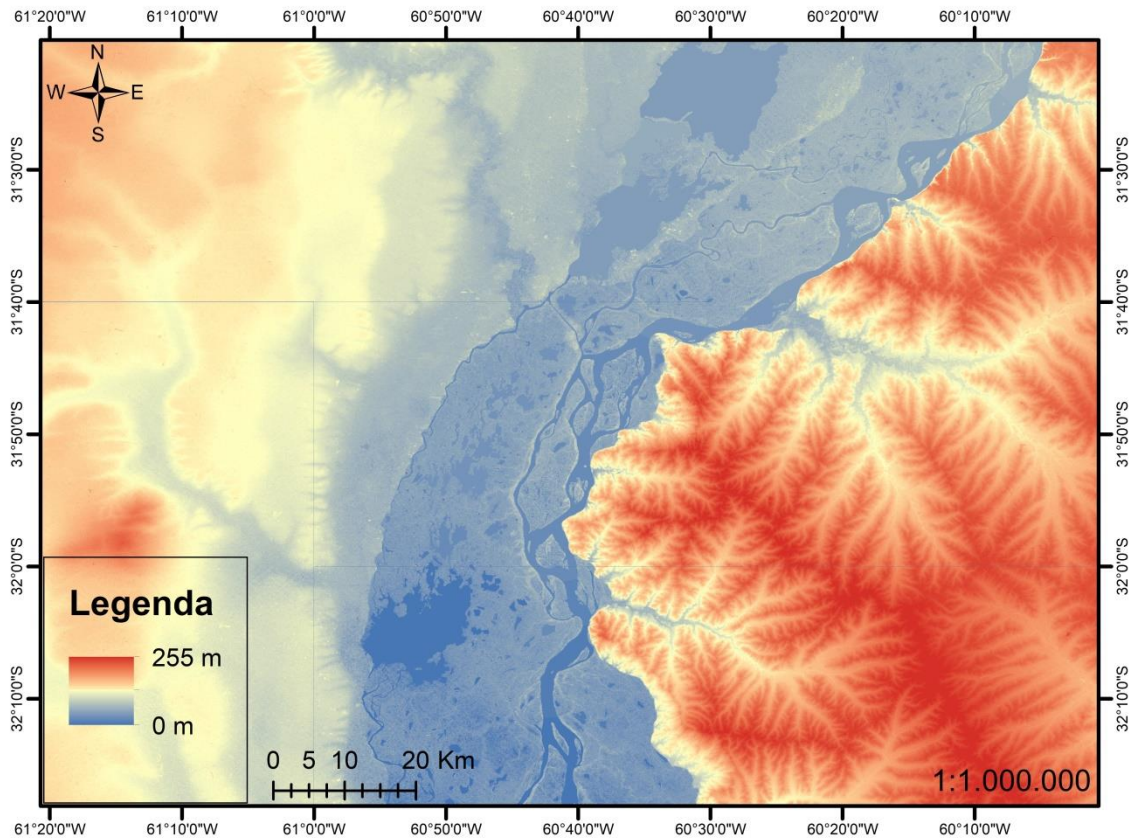


Figura 52. MDE da área de estudo. Fonte: SRTM com resolução de 30 m.

Embora o modelo de elevação não tenha resolução suficiente, os dados SRTM disponíveis com 30 m de resolução trazem resultados satisfatórios para o mapeamento de inundação em grandes áreas. Com ferramentas complementares, o SRTM com resolução de 90 m também traz resultados adequados para mapeamento de inundação (COELHO, 2010). De modo geral a mancha de inundação gerada ficou maior do que a área que a inundação real realmente atinge. Com um MDE com maior resolução, a exemplo de um levantamento aerofotogramétrico, poderia ampliar a qualidade final do mapeamento de inundação usando o método de análise do MDE.

5.4 Comparação e Mapas agregados

Segundo Stabel & Löffler (2004), quando se faz uma análise de inundação usando imagens SAR, é importante utilizar mais de uma técnica para que uma corrija possíveis erros da outra e assim atingir resultados mais precisos.

Nesta pesquisa foram elaborados mapas de inundação com três técnicas distintas. Para atingir um resultado final, foram somados os resultados dessas três técnicas, resultando em um único mapa (Figura 53). A soma dos resultados foi escolhida como método, pois assim se obteve as respostas de todas as técnicas em três categorias, incluindo a categoria 3, que significa resultado em comum entre todas as metodologias e, assim, comprova que nestas áreas são mais suscetíveis à inundação. Assim, em toda a área de estudo, foram identificados como área de inundação em comum entre todas as técnicas usadas aproximadamente 3.100 km².

Algumas imagens foram utilizadas para comparar com os resultados encontrados. No entanto, a observação em imagem óptica ajuda apenas para a compreensão e observação da eficácia de cada um dos métodos. Todas as técnicas utilizadas nesta pesquisa obtiveram precisão entre 70 a 80%, Quadro 3.

	Com água (%)	Sem água (%)
Imagem Landsat - 8 15m	100	100
Análise Temporal	73,79	94,76
Análise do MDE	82,52	96,19
Limiarização	75,73	97,62

Quadro 3: Comparação por observação de imagem óptica Landsat – 8. Fonte: Elaborado pelo autor.

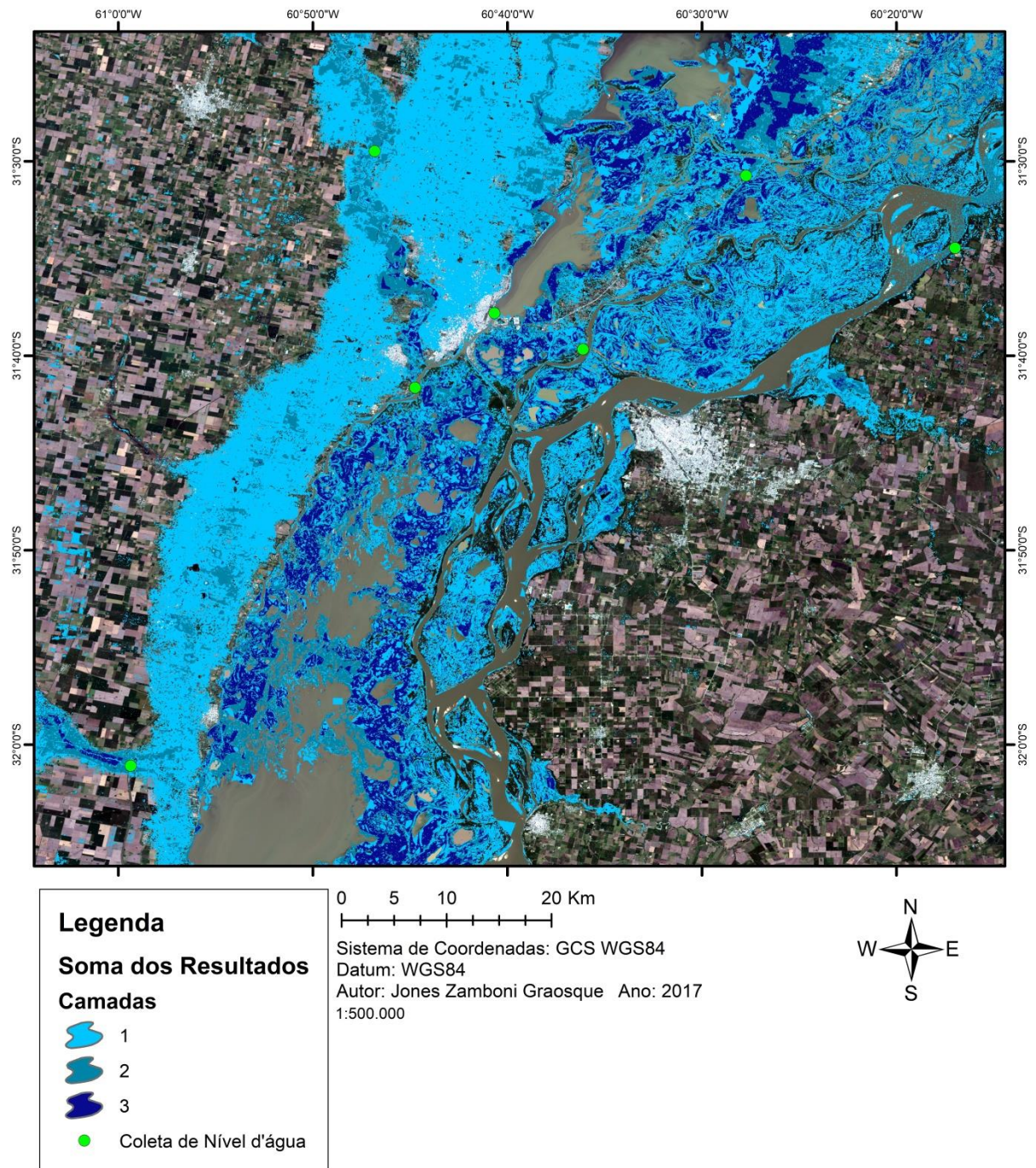


Figura 53. Mapa de inundação a partir da soma das áreas obtidas com as metodologias de limiarização, série temporal e MDE, sobre imagem Landsat 8.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos de validação, a acurácia da mancha de inundação a partir da soma de todos os resultados foi de 91,76%. Enquanto a mancha de inundação no mapa Conae (2017) foi de 292,93 km² a área obtida no mapa agregado apresentou 268,80 km² de área compatível com o mapa de validação, Figura 54.

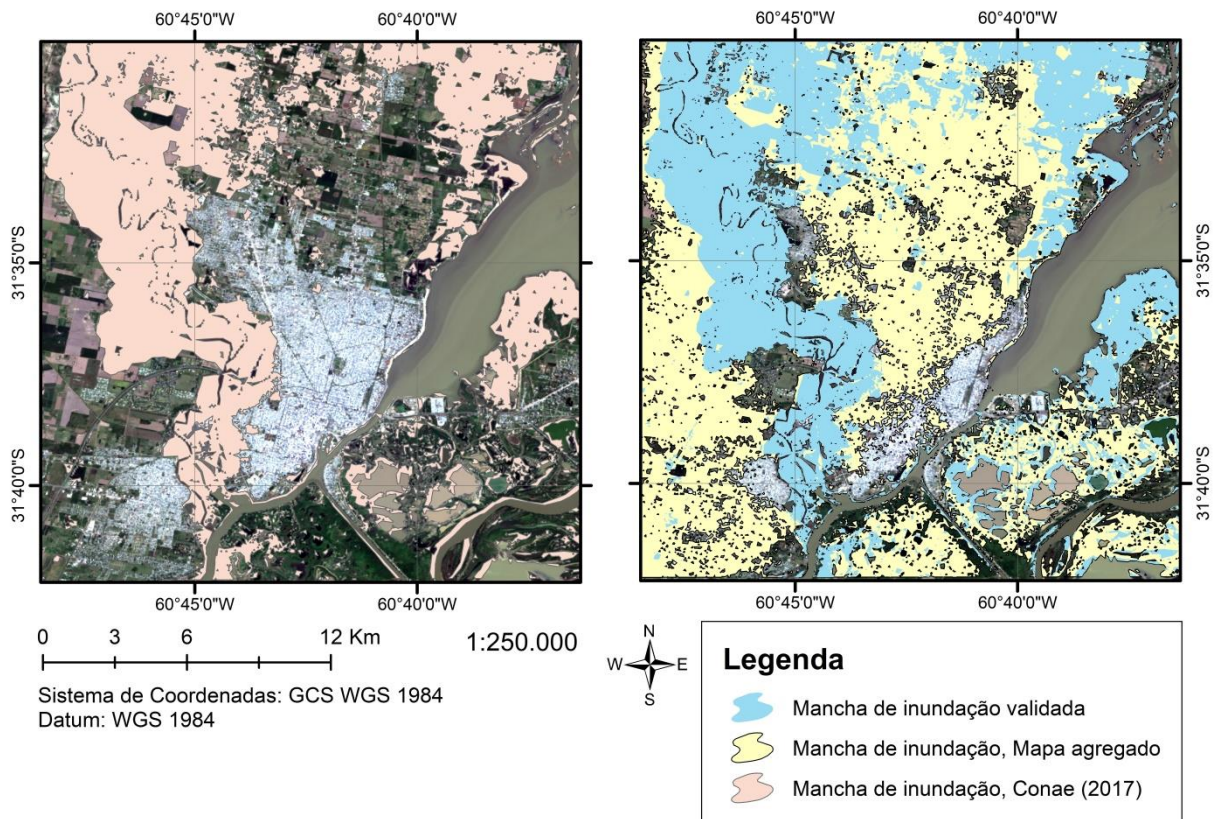


Figura 54. À esquerda: Mancha de inundação da validação, extraída de Conae, 2017. À direita: Mancha de inundação de todos os resultados agregados e a mancha validada. Fonte: Conae (2017); Elaborado pelo autor.

Embora o método de análise temporal apareça com menor acurácia, é preciso considerar um possível erro referente à inundação coberta pela vegetação. No método de limiarização não ocorre este problema, pois este não identifica inundação em áreas arborizadas. A análise do MDE a exemplo da análise temporal possivelmente aumentaria a acurácia caso a validação da inundação por baixo do dossel de vegetação pudesse ser mais precisa.

Também foi estimada a porcentagem que cada método considerou área de alagamento, Quadro 4. Neste caso, a área da água permanente foi desconsiderada. No método da análise do histograma e análise do MDE não foram estimados a área em alvos separados (área urbana, rural, etc.), pois com estes métodos não se distinguiu os alvos.

Como o mapa gerado por limiarização não capta a água em área urbana nem em área de floresta, a porcentagem de área inundada no mapa agregado ficou em zero por cento nestes dois alvos. As áreas rurais também tiveram baixo percentual de mapeamento no mapa geral, talvez pela análise do MDE, que não atinge muitas

zonas distantes das margens dos rios e pela dificuldade em definir um padrão de intensidade de retroespalhamento sobre este alvo.

	Análise do histograma	Análise do MDE	Análise temporal	Mapa agregado	Análise temporal	Mapa agregado	*somente nos polígonos
Área urbana	x	x	0,00%	0,46%	0,16%	1,84%	
Área rural	x	x	0,33%	8,87%	0,58%	35,24%	
Área arborizada	x	x	0,55%	1,64%	7,91%	6,55%	
Área úmida	x	x	7,90%	14,18%	44,23%	56,35%	
Área total	14,69%	21,66%	8,78%	25,16%			

Quadro 4. Porcentagem de área inundada por método utilizado. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados de cada técnica e o mapa agregado, a comparação destes quatro mapas, Figura 55. Para facilitar a visualização, foi dado um zoom em cada imagem para análise dos alvos principais. Nesta figura, estão em destaque as cidades de Santa Fe e Santo Tomé. O único método que mostra resultados expressivos em área urbana é o da análise do MDE. No entanto esse método não leva em conta as estruturas urbanas de proteção, como diques por exemplo. Além disso, com o método de análise temporal foi possível mapear alguns pontos em área urbana, porém quase não aparecem no mapa.

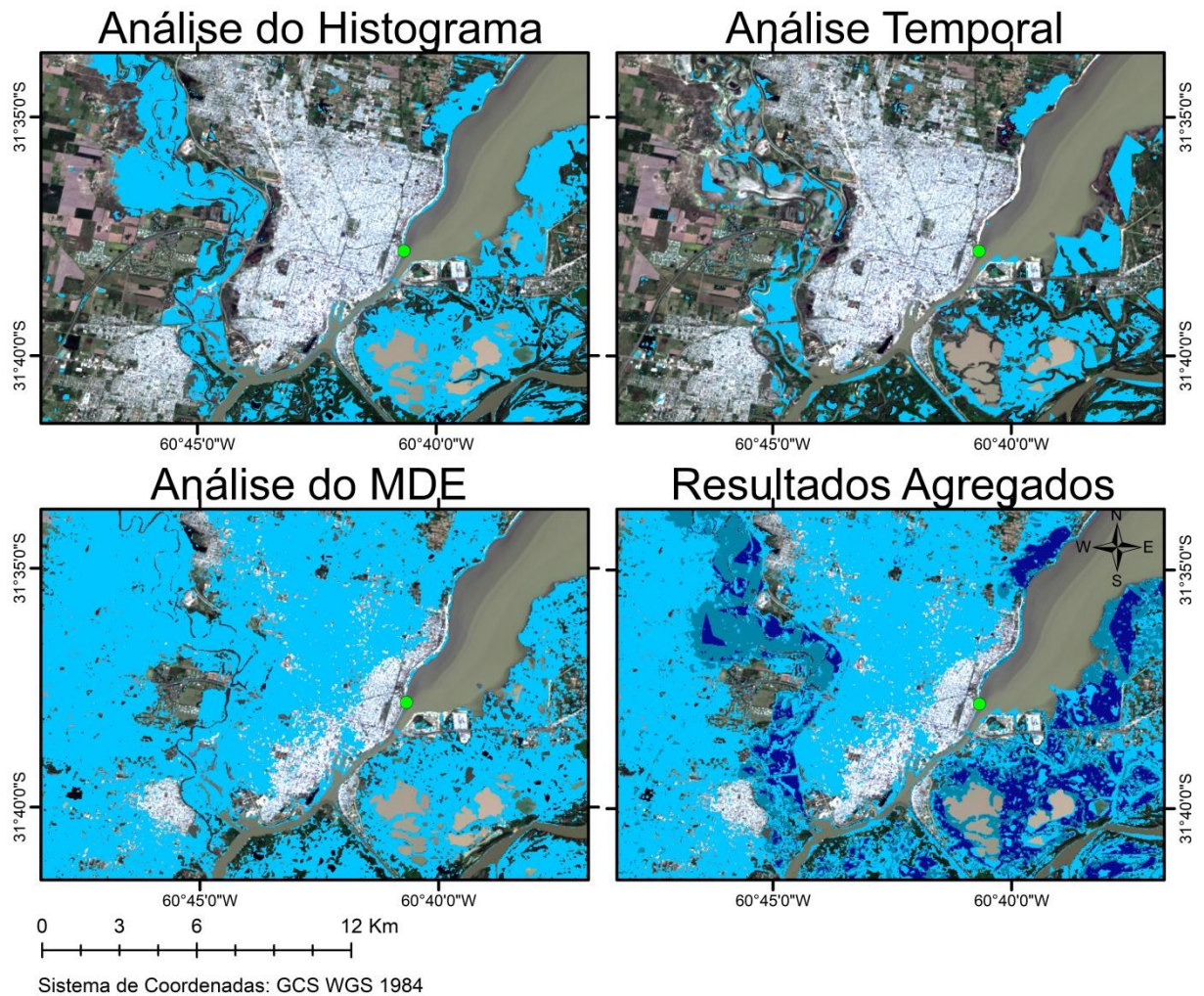


Figura 55. Comparação dos resultados na cidade de Santa Fe. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os métodos utilizados para mapeamento não são indicados para extração de mancha de inundação ou alagamento em área urbana. No entanto é fato que estes eventos atingem a cidade de Santa Fe e Colastiné. As imagens registradas por pessoas na área de estudo e que estavam no momento dos eventos estão expostas a seguir.



Figura 56. Área urbana do município de Santa Fe no ano de 2012. Fonte: liluchi/Panoramio, (2017).



Figura 57. Inundação no município de Santa Fe. Fonte: Karinakarla/Panoramio (2017).

Nesses eventos de inundação, centenas de pessoas precisam sair de suas casas e as perdas e danos são desde materiais até de vidas humanas. A inundação de 2003 durou 13 dias e o rio Salado atingiu seu maior nível desde o surgimento da cidade de Santa Fe em 1573 chegando a 7,19 m acima do nível normal. Com isso,

estima-se que a cidade de Santa Fe ficou em até 75% de sua área coberta pelas águas e 1/3 de toda província de Santa Fe ficou debaixo d'água, causando prejuízo de 1,5 bilhão de dólares. No final de 2016 e início de 2017 foram inundados mais de 445 mil Km² entre as províncias de Santa Fe e Buenos Aires (BRAKENRIDGE, 2017).

Na Figura 58 algumas áreas arborizadas foram destacadas com um círculo. Na análise do histograma estas áreas aparecem sem inundação, o que fez com que no mapa agregado não acusasse água nessas zonas. No entanto, por meio de imagens e das análises nestes alvos individualmente, é provável que estas áreas arborizadas tenham algum traço de inundação.

Destaca-se também a dificuldade em determinar as áreas arborizadas. Estas são muito próximas aos limites dos rios e áreas úmidas, necessitando de alto grau de detalhamento para identificação dessas “ilhas” arbóreas.

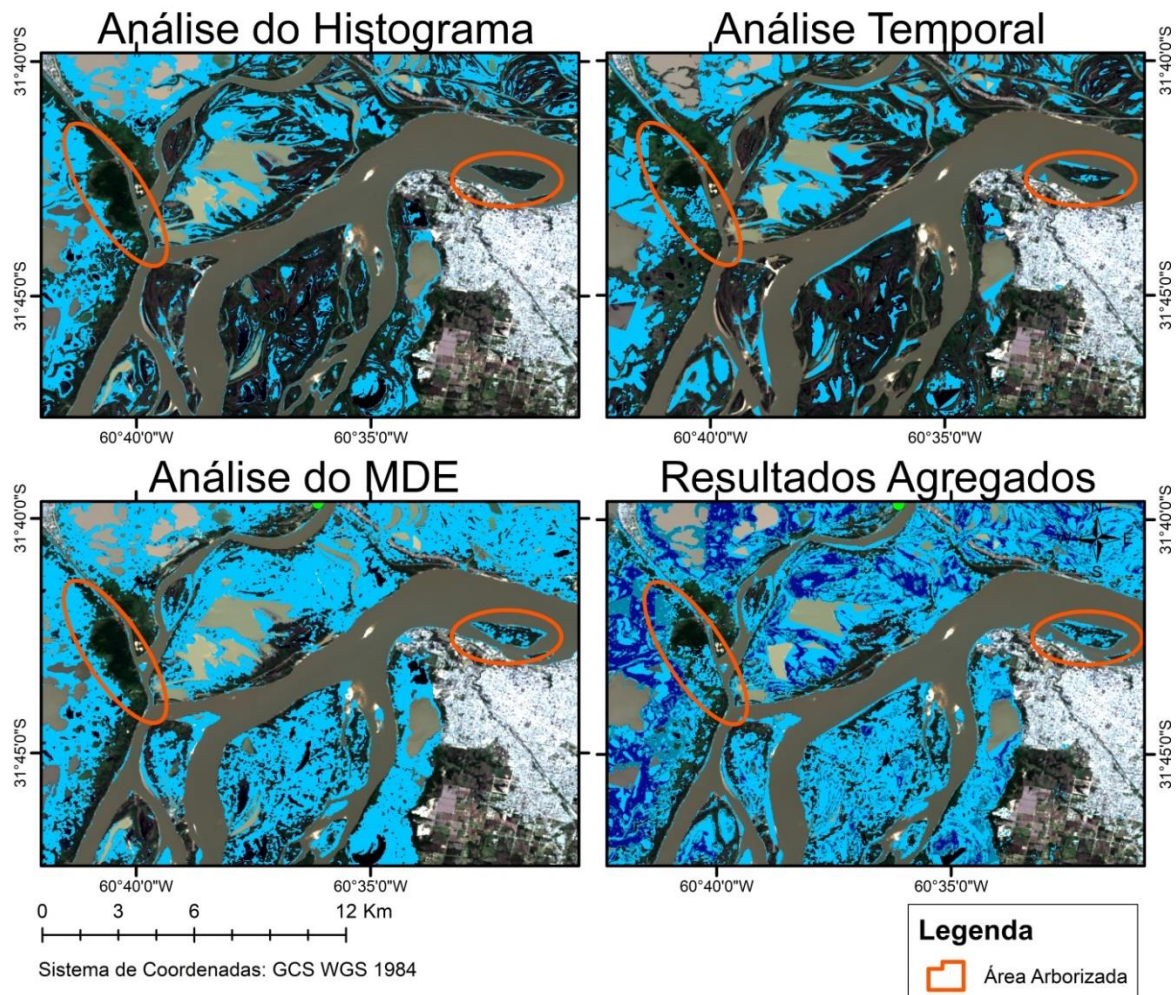


Figura 58. Comparação de resultados em áreas arborizadas. Fonte: Elaborado pelo autor.

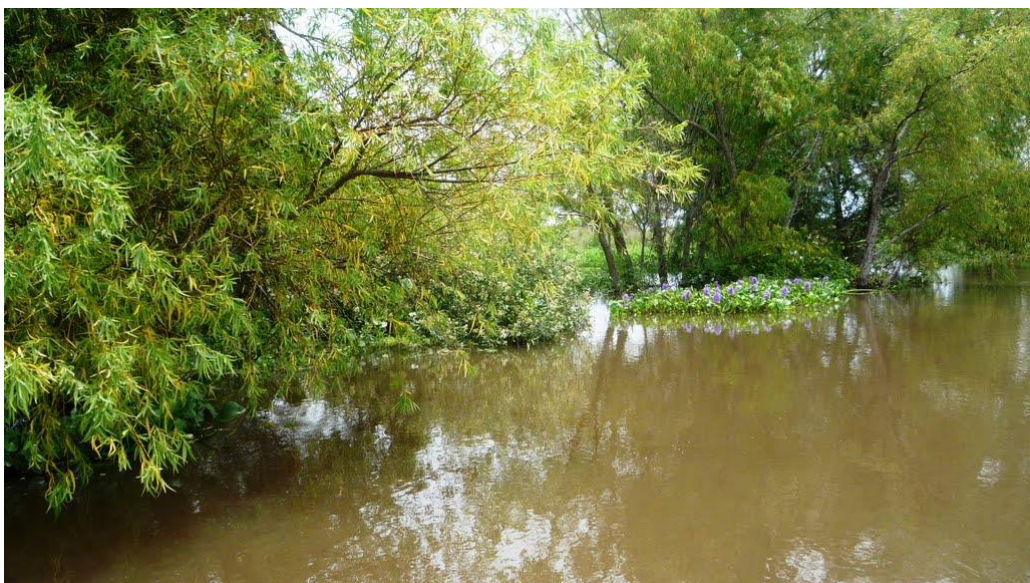


Figura 59. Árvores em meio à área de inundação. Fonte: Benigno kloster/Panoramio (2017).



Figura 60. Inundação na cidade de Parana no ano de 2007. Fonte: Colo/Panoramio (2017).

O que mais causa perdas e danos na região da província de Santa Fé são os eventos de inundação. Em um levantamento sobre os desastres na província de Santa Fé, realizado por CENTRO (2004), entre os anos de 1971 e 2003 inundações estão presentes em 59% dos registros. Destes, 40% dos casos estão relacionados com as precipitações e 57% estão relacionados com o extravasamento do rio Paraná e seus afluentes.

Nos canais de escoamento, todas as imagens têm resultados em comum, sendo considerada área de inundação próxima às margens. O ponto de coleta de nível de água, Figura 61, representado pela cor verde, é onde passa a estrada que liga a cidade de Coronda a Santa Fe. Neste ponto o mapeamento identificou inundação e este resultado pôde ser validado com imagens. Além disso, as áreas próximas ao rio na cidade de Coronda também estão suscetíveis à inundação.

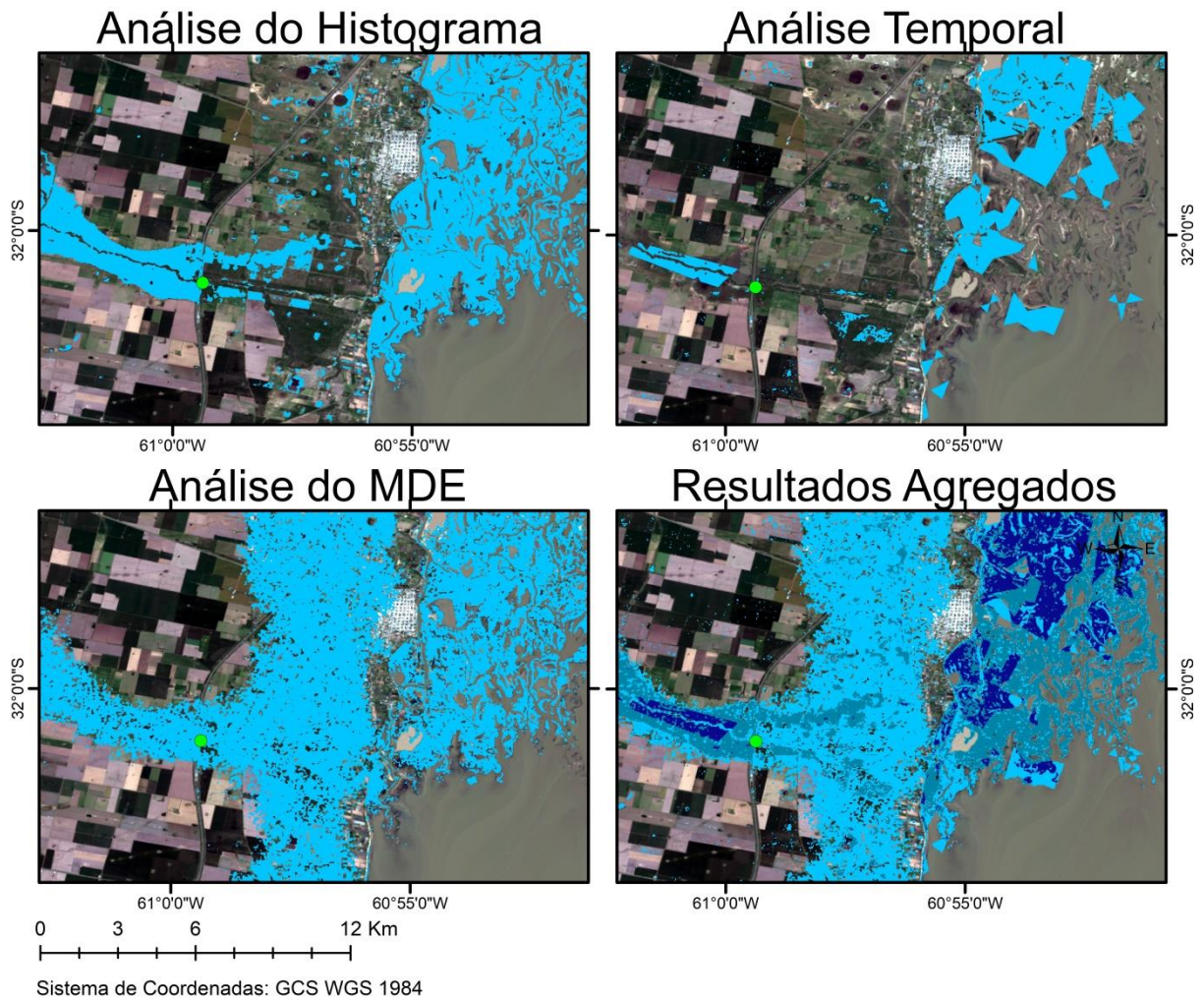


Figura 61. Comparação de resultados em Coronda. Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 62. Estrada “Autopista – Rosário Santa Fe AP 01” inundada. Margem do rio em Coronda no ano de 2013. Fonte: Fabian seia/Panoramio (2017); Francho/Panoramio (2017).

Nas áreas úmidas os resultados foram semelhantes em todos os métodos. Nessas regiões, algumas áreas são bastante arborizadas, dificultando e deixando

mais complexo o mapeamento de inundação. Algumas pessoas possuem ranchos e também há atividade de pecuária, sendo que quando as águas sobem, o gado precisa ser retirado às pressas antes de morrer afogado.

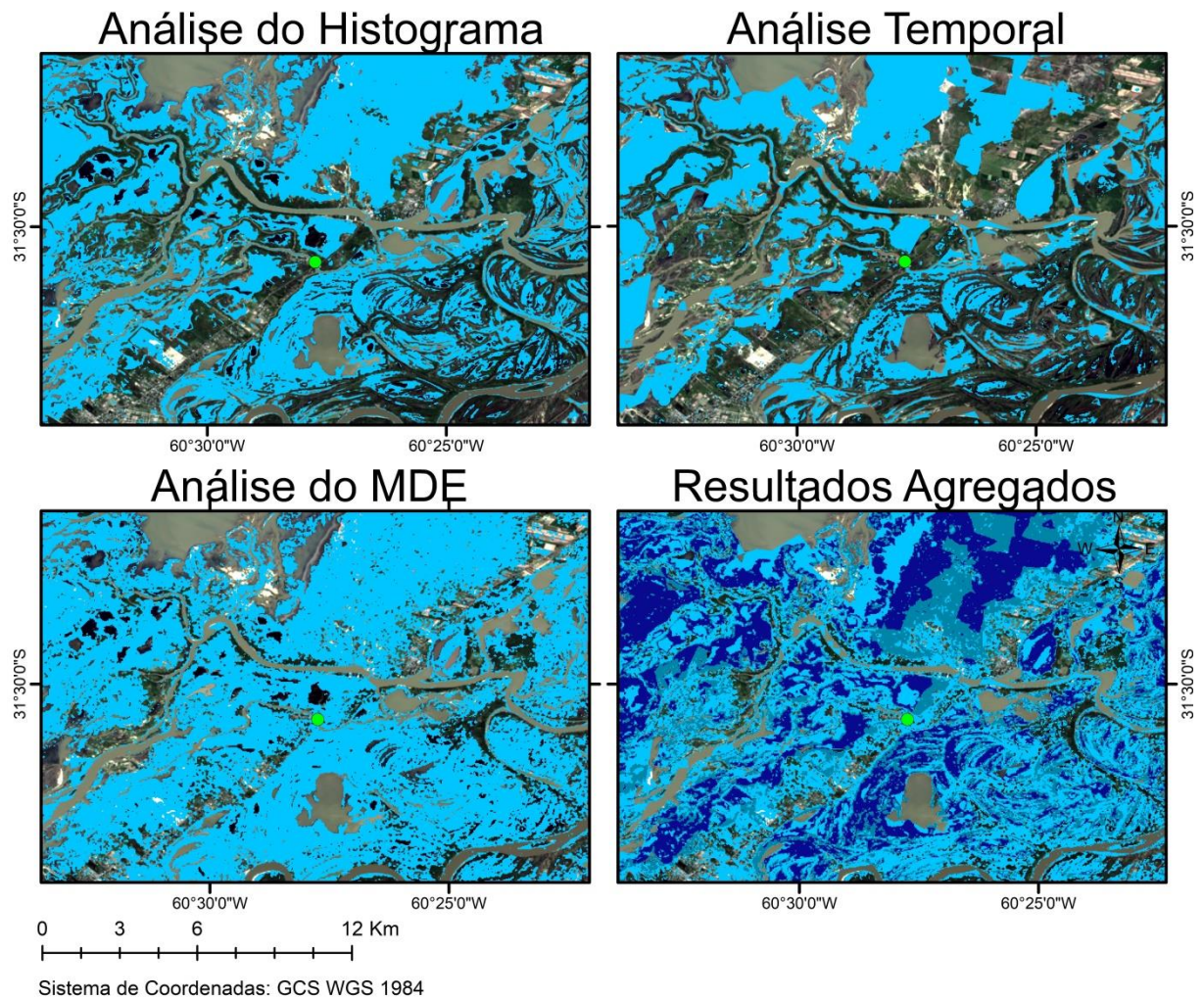


Figura 63. Comparação dos resultados em áreas úmidas. Fonte: Elaborado pelo autor (2017).



Figura 64. Gado em área de inundação do rio Paraná. Transporte do gado. Fonte: REGIONALISMO EM LINEA (2017); APF DIGITAL (2017).

Quando o nível dos rios sobe nos grandes pulsos de inundação, as perdas de cabeças de gado são tão sérias que o governo da província de Santa Fe criou mecanismos para evitar perdas tão severas (SANTA FE, 2017). Entre as alternativas colocadas em operação, foi a criação de um registro de campos para aluguel e abrigos, bem como barcaças para serem usadas na transferência de animais. Existe uma lista de fornecedores de alimentos para gado que tem como objetivo racionalizar tarefas. Além disso, o Ministério da Produção disponibiliza um certificado provisório de trânsito animal para os distritos que sofrem com inundação (SANTA FE¹, 2017).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo desta pesquisa, é notável o quão complexo pode ser um mapeamento de inundação. Muitos fatores precisam ser considerados, e fica evidente que a utilização de uma única técnica pode não ser suficiente para um resultado preciso. Ainda, mesmo com a utilização de três técnicas distintas este estudo pode conter divergências com o que acontece na realidade. No entanto, a partir dos resultados dessa pesquisa é possível estimar a área de suscetibilidade a inundação.

A acurácia do mapeamento por limiarização surpreendeu pela baixa porcentagem atingida, onde aproximadamente 50% da área inundada é compatível com a mancha de validação. Ao mesmo tempo, na comparação com imagem óptica, 86,5% da área total (incluindo pontos sem inundação) foram mapeados de forma correta, no entanto uma imagem óptica não deve ser considerada forma de validação neste caso. Para alvos planos e sem área urbana ou floresta, é um método rápido e eficiente para mapeamento de inundação, porém neste caso, a imagem de validação esta principalmente sobre uma área urbana, alvo cujo método de limiarização não funciona de forma satisfatória, o que pode explicar o baixo desempenho da acurácia.

O uso da técnica de delimitar a mancha de inundação baseando-se pelo MDE e medições das réguas de nível dos rios favorece para trazer uma noção da dimensão da área inundada. Nesta técnica não se leva em conta estruturas que possam de alguma forma bloquear o avanço das águas, e deste modo foi o método com maior área de inundação mapeada e com maior acurácia. Portanto essa mostrou ser um método confiável para mapear inundação, mas é importante salientar que, neste método a necessidade de um modelo digital de elevação de alta resolução é fundamental para aprimorar e dar maior veracidade à mancha de inundação simulada em comparação com a inundação real. Além disso, quanto mais pontos de coleta em campo, melhor será os resultados da mancha de inundação com este método.

Na literatura relativa a metodologias de mapeamento de áreas de inundação, é notória a busca e necessidade por sistemas rápidos e confiáveis para mapear

eventos naturais. A fácil disponibilidade de imagens SAR de alta qualidade dos sensores Sentinel – 1, somados às técnicas de extração de mancha de inundação, como a análise temporal, permitem o desenvolvimento de sistemas automáticos de detecção de inundação. O avanço deste tipo de tecnologia é importante não só pela agilidade em que se obtém resultados, mas também por permitir que resultados tão precisos sejam atingidos totalmente à distância, sem necessidade de trabalho de campo.

Com o método de análise temporal, áreas com cobertura de árvores já não são problema para mapeamento da presença de água proveniente de inundação. É bom lembrar que, neste trabalho, foi usado um sensor com banda C, e com o uso de um sensor com bandas de comprimento de onda maior possibilitam que o resultado final seja de melhor precisão. Contudo, a disponibilidade destas ferramentas é menor para uso livre. Nesta pesquisa, a mancha de inundação proveniente do método de análise ambiental foi a menor entre todas as técnicas. Por ser um método mais complexo que avalia a intensidade de retroespalhamento de cada alvo individualmente, esperava-se uma melhor acurácia. Caso o mapa de uso de solo fosse de melhor resolução espacial e a validação *in situ* pudesse ter sido realizada, os resultados desta análise poderiam ser aprimorados.

À medida que se desenvolve tecnologias aprimorando as imagens SAR, os sistemas ficam mais complexos e, conseqüentemente, exigem maior poder dos softwares e hardwares. Neste sentido, softwares como o SNAP se destacam pela praticidade do seu uso e também por ser um software livre. A questão de hardware talvez seja um dos principais empecilhos no desenvolvimento de projetos de sensoriamento remoto, justificando assim a necessidade de recursos para o andamento de projetos como este.

É importante destacar a importância de um mapeamento preciso de cobertura de solo. Nos mapas obtidos pela análise temporal, são perceptíveis linhas retas e às vezes quadráticas nos limites entre um alvo e outro, não condizendo com total realidade do que é a região. Este pode ser considerado o principal motivo pela baixa acurácia no método de análise temporal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEÑOLAZA, P.G.; ZAMBONI, L.P.; SIONE, W.F.; KALESNIK, F. Caracterización de la región superior del complejo litoral del Río Paraná: grandes unidades de ambiente. En Aceñolaza, F.G. (coord.-ed.): Temas de la Biodiversidad del Litoral fluvial argentino III. Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO). Universidad Nacional de Tucumán, Miscelánea, v. 17 (2), p.293-308, 2008.

ACEÑOLAZA, P.G.; RODRÍGUEZ, E.E. Humedales de los tributarios enterrianos cortos del río Paraná. Inventario de los humedales de Argentina: sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná Paraguay. 1a ed. - Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2013.

AGRITOTAL. Santa Fe: retiran el 80 % de la hacienda en zona de islás. Disponível em: <<http://www.agritotal.com/nota/29656-santa-fe-retiran-el-80-de-la-hacienda-en-zona-de-islas/#galleryzoomv68721v14>>. Acesso em: 11/12/2017

AGROLINK. Argentina pode perder 10% da safra de soja com incêndios e inundações. Disponível em:<https://www.agrolink.com.br/agrotempo/noticia/argentina-pode-perder-10--da-safra-de-soja-com-incendios-e-inundacoes_368135.html>. Acesso em: 02/12/2017.

ANH, T. T.; DINH, D. N. Flood Monitoring Using ALOS/PALSAR Imagery. In: FIG REGIONAL CONFERENCE, 7. Hanoi, Vietnam, 2009. Disponível em: <https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/vietnam/papers/ts03e/ts03e_tuan_duong_3720.pdf > Acesso em: 03 fev. 2017.

APF DIGITAL. Por la crecida del Río Paraná, comenzó el traslado de hacienda a tierra firme. Disponível em: <http://www.apfdigital.com.ar/despachos.asp?cod_des=290746&ID_Seccion=21&fecemi=31/05/2017>. Acesso em: 18 dez. 2017.

BARRELLA, W. *et al.* As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p. 31–49, 2001.

BAUMGARTNER, G.; PAVANELLI, C. S.; BAUMGARTNER, D.; BIFI, A. G.; DEBONA, T.; FRANA, V. A. Peixes do baixo rio Iguaçu [online]. Maringá, p. 1–14, 2012.

BDHI. Base de Datos Hidrológica Integrada. Secretaría de Recursos Hídricos, Argentina. Disponível em: <<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>>. Acesso em: 19 nov. 2017.

BENIGNO KLOSTER/PANORAMIO. Verde y río. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/31292639?source=wapi&referrer=kh.google.com>> . Acesso em: 18 dez. 2017.

BRIVIO, P. A.; COLOMBO, R.; MAGGI, M.; TOMASONI, R. Integration of Remote Sensing Data and GIS for Accurate Mapping of Flooded Areas. *Int. J. Remote Sensing*, v. 23(3), p.429-441, 2002.

BRAKENRIDGE, G.R. Global Active Archive of Large Flood Events. Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado. Disponível em: <<http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>> Acesso em: 23 jan. 2017.

BOSCHETTI, N.G; QUINTERO, C.E. Suelos de la Cuenca del río Paraná, Entre Ríos, Argentina. Principales aptitudes y limitaciones. En Paz González, A. (ed.): Bases para la conservación de suelos y aguas en la cuenca del Río Paraná: 17-29. Junta de Galicia. Universidad Nacional de Entre Ríos. Santa Fe, 2006, 161 p.

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING Globesar 2: processamento e extração de informação de imagens de radar. Ottawa, on: CCRS, 1997.

CASTRO, A.L.C. Manual de Desastres – Volume I: Desastres Naturais. Brasília: Secretário Nacional de Defesa Civil, 2003.

CENAD (Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres) - Codificação Brasileira de Desastres, 2012. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/web/guest/defesa-civil/cenad/entenda-os-desastres?inheritRedirect=true>> Acesso em: 22 jan. 2017.

CLIMATE CHANGE INITIATIVE – LAND COVER (CCI – LC). ESA Climate Change Initiative - Land Cover led by UCLouvain (2017). Disponível em: <<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>>. Acesso em: 18 mai.2017.

CELIS, A. Desastres en la Región Litoral de Argentina: 1970- 2004. Pampa. Revista Interuniversitaria de Estudios Territoriales, año 2, n° 2, Santa Fe, Argentina, UNL, p. 85-109, 2006.

CENTRO. Estudios sociales y ambientales. Informe Final IAI – ENSO, ARGENTINA, 2004.

CIM - Centro de Informaciones Meteorológicas. Altura de los ríos. Disponível em: <<http://fich.unl.edu.ar/cim/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2a ed. Sao Paulo, SP: Editora Blucher, 1980.

CLIMATE DATA. Clima: Santa Fe. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/1918/>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

COELHO, A.L.N. Uso de produtos de sensoriamento remoto para delimitação de área efetivamente inundável: Estudo de caso do baixo curso do rio Benevente Anchieta – ES. Revista Geografia Acadêmica, vol. 4, n° 2, 2010. p. 53 – 63.

COLLISCHONN, E.; RAUBER, A. Inundação x Crescimento urbano – Estudo de caso na cidade de Venâncio Aires – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, p. 288-296, 2004. (CD-ROM)

COLO/PANORAMIO. Arroyo rebalsado. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/2070277?source=wapi&referrer=kh.google.com>>. Acesso em: 18 dez. 2017.

CONAE. Monitoreo Satelital de la Ciudad de Santa Fe. Disponível em: <http://www.conae.gov.ar/WEB_Emergencias/Links_de_la_Izquierda/Inundaciones/Galeria_de_Imagenes/Inundaciones_Santa_Fe_2003/Monitoreo_hidrico_3_Mayo_SPOT-4/Monitoreo_hidrico_3_Mayo_SPOT-4.htm>. Acesso em: 09 dez. 2017.

CORREIO DO BRASIL. Argentina pede créditos para reconstruir cidade inundada. Disponível em: <<https://www.correiodobrasil.com.br/argentina-pede-creditos-para-reconstruir-cidade-inundada/>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

CRONISTA. Por las inundaciones, Santa Fe estima pérdidas de al menos u\$ 780 millones. Disponível em: <<https://www.cronista.com/economiapolitica/Por-las-inundaciones-Santa-Fe-estima-perdidas-de-al-menos-us-780-millones-20170110-0043.html>>. Acesso em: 11 dez. 2017.

DALLACORT, R.; NEVES, S.M.A.S.; NUNES, M. C. M. Variabilidade da temperature e das chuvas de Cáceres/Pantanal Mato-Grossense – Brasil. Geografia (Londrina) v. 23, n. 1, p.21–33, 2014.

DIEDRICH, V. L.; ECKHARDT, R. R.; FERREIRA, E. R.; HAETINGER, C. Mapeamento e previsão das áreas urbanas inundáveis na cidade de Lajeado – RS – Brasil. XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia – Aracaju – SE – Brasil, 2010.

DIN 18716 (Deutsches Institut für Normung), 2012 – Photogrammetry and remote sensing, Terms and definitions. Disponível em: <<http://www.din.de>> Acesso em: 01 fev. 2017.

DRAGO, E. “Origen y clasificación de ambientes leníticos em llanuras aluviales”. Revista Asociación Ciencias Naturales Litoral, v. 7, p.123-137, 1976.

ELACHI, C.; VAN ZYL, J. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. 2nd Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.

ELACHI, C. Introduction to Physics and Techniques of Remote Sensing. Wiley & Sons, New York, 1987.

ENOMOTO, C.F. Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19, 2007a.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel-1: The radar mission for GMES operational land and sea services. ESA bulletin 131, 2007b.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel online – Instrument payload. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>> Acesso em: 01 mar. 2017

FABIAN SEIA/PANORAMIO. Autopista inundada. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/12985227?source=wapi&referrer=kh.google.com>> . Acesso em: 18 dez. 2017.

FILÍ, M.F. Síntesis Geológica e Hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos – República Argentina. Boletín Geológico y Minero, v. 112, núm. Especial, p.25-36, 2001.

FLOOD LIST – Floods in Santa Fe and Buenos Aires Force Hundreds to Evacuate. Disponível em: <<http://floodlist.com/america/argentina-floods-santa-fe-buenos-aires-december-2016>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

FRANCHO/PANORAMIO. Camping punta de este, 5.21 altura del rio. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/94608485?source=wapi&referrer=kh.google.com>> . Acesso em: 18 dez. 2017.

GAHLAUT, S. Determination of surfasse water área using multitemporal SAR imagery. Institute of Geodesy, University of Stuttgart. Disponível em: <http://www.geoengine.uni-stuttgart.de/forum/master/Shakti_Gahlaut/MasterThesisResume.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2017.

GARCÍA, N.O. Elementos de climatología. Colección de Ciencia y Técnica 6, Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 1994.

GGWEATHER. El Niño and La Niña Years and Intensities. Disponível em: <<http://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acesso em: 17 dez. 2017.

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P. E KOBAYAMA, M. Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Inundação com o Modelo Hand e Análise do seu Desempenho em Diferentes Resoluções Espaciais. Revista Brasileira de Cartografia, nº 69/1, Edição especial Geotecnologias e Desastres Naturais, p.61–69, 2017.

GRAOSQUE, J.Z. Mapeamento de Áreas de Alagamento no Bairro Santa Maria Goretti, Porto Alegre- RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências – Porto Alegre, 2015.

GRINGS, F.M.; FERRAZZOLI, P.; KARSZENBAUM, H.; SALVIA, M.; KANDUS, P.; JACOBO-BERLLES, J.C.; PERNA, P. Model investigation about the potential of C

band SAR in herbaceous wetlands flood monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, p.17-18, 2008.

GUASSELLI, L.A.; OLIVEIRA, G.G.; QUEVEDO, R.P.; BRUBACHER, J.P. Modelagem hidrológica e espacialização de áreas suscetíveis às inundações no município de Igrejinha, RS. *Geo UERJ*, Rio de Janeiro, n. 28, p. 353-380, 2016.

GUIMARÃES, N.A.; PENHA, J.W. Mapeamento das áreas de risco de inundações no município de Muriaé – MG, com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, p. 3875 – 3882, 2009.

HENRY, J.; CHASTANET, P.; FELLAH, K.; DESNOS, Y. Envisat multipolarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing*. v. 27, n. 10, p. 1921-1929, 2006.

HESS, L.; MELACK, J.M. Mapping wetland hydrology and vegetation with Synthetic Aperture Radar. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*. v. 20, p. 197–205, 1994.

HORA, S.B; GOMES, R.L. Mapeamento e avaliação do risco a inundações do rio cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA. Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2009.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL DE LA REPÚBLICA ARGENTINA (IGN). Documentación técnica. Disponível em: <<http://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Documentacion>>. Acesso em: 19 jan. 2017.

INSTITUTO HUMANITAS UNISINOS (IHU). O avanço da soja sobre as áreas úmidas é um perigo. Disponível em: <<http://www.ihu.unisinos.br/169-noticias/noticias-2015/545878-o-avanco-da-soja-sobre-as-areas-umidas-e-um-perigo>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), Teoria: Sistemas de radar. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/radar/radar.html>>. Acesso em: 06 jan. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUÁRIA (INTA). Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos. Acuerdo Complementario del Convenio INTA - Gobierno de Entre Ríos, Estación Experimental Agropecuaria Paraná - Serie Relevamiento de Recursos Naturales, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUÁRIA (INTA). Red de Radares Meteorológicos – Disponível em: <<http://radar.inta.gov.ar/v3/#>>. Acesso em: 19 nov. 2017.

JAIME, P.R.; MENÉNDEZ, A.N. Análisis del Regimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay. Instituto Nacional del Agua, Subsecretaria de Recursos Hídricos, Argentina, 2002.

JOYCE, K.E.; BELLIS, S.E.; SAMSONOV, V.S.; MCNEILL, S.J.; GLASSEY, P.J. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography* v. 33, n. 2, p. 183-207, 2009.

JUNK, W.J.; BAYLEY P.B.; SPARKS, R.E. The flood pulse concept in river floodplain systems. En: Dodge, D.P. (Ed.). *Proc. of the Internat. Large River. Symp. Canad. Spec. Publ. Fish Aquatic. Sci.*, p. 101-127, 1989.

KANDUS, P.; MINOTTI, P.; BORRO, M. Contribuciones al conocimiento de los humedales del Delta del Río Paraná: herramientas para la evaluación de la sustentabilidad ambiental. 1a ed. - San Martín: Universidad Nacional de Gral. San Martín - UNSAM Edita, 2011.

KANDUS, P.; KARSZENBAUM, H.; PULTZ, T.; PARMUCHI, G.; BRAVA, J. Influence of flood conditions and vegetation status on the radar backscatter of wetland ecosystems. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 27(6), p.651-662, 2001.

KARSZENBAUM, H.; GRINGS, F.; FERRAZZOLI, P.; TIFFENBERG, J.; JACOBO, J.; KANDUS, P.; PRATOLONGO, P.; PARMUCHI, G. ASAR multitemporal and dual polarization observations of wetland marshes. *Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572)*. Salzburg, Austria, 2004. Publicado em CD-ROM, #262.1

KARINAKARLA/PANORAMIO. Inundacion. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/6304969?source=wapi&referrer=kh.google.com#>>. Acesso em: 18 dez. 2017.

LA CAPITAL. El agua provoco cortes y desvios em la autopista Rosario – Santa Fe y em la Ruta 9. Disponível em: <<https://www.lacapital.com.ar/la-region/el-agua-provoco-cortes-y-desvios-la-autopista-rosario-santa-fe-y-la-ruta-9-n1315201.html#fotogaleria-id-1586769>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

LA NACION. En Santa Fe, el río Paraná no da trégu. Disponível em: <<http://www.lanacion.com.ar/1859039-santa-fe-parana-rio-lluvias-inundaciones>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

LA VERDAD OCULTA. Argentina: Más de mil evacuados em Santa Fe por inundaciones. Disponível em: <<http://www.laverdadoculta.com.ar/2016/03/argentina-mas-de-mil-evacuados-en-santa.html>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

LEWIS, A.J.; HENDERSON, P.M. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A. J. *Manual of remote sensing v2- principles and applications of imaging radar*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1998.

LEBERL, F.W. Radargrammetry. In: HENDERSON, F.; LEWIS, A. Principles & applications of imaging radar, manual of remote sensing, 3. ed. New York: John Wiley & Sons, cap. 4, p. 183-269, 1998.

LILUCHI/PANORAMIO. Calle Las Heras en 30 minutos de lluvia. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/79142131>>. Acesso em: 18 dez. 2017.

LIMA, W.P.; ZAKIA M.J.B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p.33-43, 2000.

LIU, C. Analysis of Sentinel – 1 SAR data for mapping standing water in the Twente region. Thesis submitted to the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, Netherlands, 2016.

MALNES, E.; GUNERIUSSEN, T.; HØGDA, K. A. Mapping of Flood-area by Radarsat in Vannsjø, Norway. In Proc. International Symposium on Remote Sensing of Environment, Buenos Aires, 2002.

MARCHETTI, Z.Y.; GIRAUDO, A.R.; RAMONELL, C.G.; BARBERIS, I.M. Humedales del río Paraná con grandes lagunas. Inventario de los humedales de Argentina: sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 1ª ed. - Buenos Aires, 2013.

MARINHO, R.R. Uso de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento de inundações e deslizamentos de terra ocorridos em novembro de 2008 no Vale do Itajaí-SC. INPE, São José dos Campos, 2011.

MARTINIS, S.; TWELE, A.; VOIGT, S. Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data. Natural Hazards and earth System Sciences, German Aerospace Center (DLR), Germany, 2009.

MARTINIS, S.; RIEKE, C. Backscatter analysis using multi-temporal and multi-frequency SAR data in the contexto of flood mapping at river Saale, Germany, ISSN 2072-4292, p. 7732–7752, 2015.

MDA (MacDONALD DETTWILER AND ASSOCIATES LTD), Sentinel-1 Product Definition. Canada, 2011

MENESES, P. R. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. Universidade de Brasília. Brasília – DF - Departamento de Geociências. Brasília, Texto Universitário, 2004.

MOEL, H.D.; ALPHEN, J.V.; AERTS, J. H. Flood maps in Europe – methods , availability and use. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 9, p. 289-301, 2009.

NASCIMENTO, S.H.A.S. Análise de Modelos Digitais de Terreno por Meio da Modelagem Hidráulica na Definição de Áreas de Risco de Inundação. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2017

NATURAL RESOURCES CANADA. Elements of Visual Interpretation. 2015. Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/node/9291>>. Acesso em: 01 mar. 2017.

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. Quase 3,5 milhões de hectares estão afetados pelas inundações. Disponível em: <<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/soja/185742-quase-35-milhoes-de-hectares-estao-afetados-pelas-inundacoes-na-argentina-saiba-o-que-aconteceu-ate.html#.Wiw-It-nHIU>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

NOVO, E.M.L.M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. Edgard Blucher, 3a ed, São Paulo, v. 1, p. 363, 2008a.

NOVO, E.M.L.M.; COSTA, M.P.F. Fundamentos e aplicações de radar no estudo de áreas alagáveis. In: SOUZA, Ronald Buss (Ed.). Oceanografia por satélites. São José dos Campos: Oficina de Textos, cap. 16, p. 236-258, 2005.

NOVO, E.M.L.M. Bases teóricas para o uso de imagens SAR no estudo de áreas alagadas. Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal - Embrapa Informática Agropecuária/INPE, Campo Grande, Brasil, p.883-894, 2006.

O'GRADY, D.; LEBLANC, M.; BASS, A. The use of radar satellite data from multiple incidence angles improves surface water mapping. Remote Sensing Environment, p. 652–664, 2014.

OLIVEIRA, G.G. Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí, RS. Dissertação de emstrado do programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – UFRGS, Porto Alegre – RS, 2010.

ONU (Organização das Nações Unidas). Como construir cidades mais resilientes. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/img/2014/01/guiagestorespublicosweb.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2017.

PÁGINA 12. La costa de la emergencia. Disponível em: <www.pagina12.com.ar/diario/sociedad/3-297754-2016-04-25.html>. Acesso em: 11 jul. 2017.

PAOLI, C.U. Inundaciones ribereñas em el tramo del Paraná médio. In: BORTONI, J. Inundaciones urbanas em Argentina. Córdoba, Argentina, cap. 4, 2004.

PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E.S. Radares Imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspectivas. Revista Brasileira de Cartografia, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.

RAMONELL, C.G.; AMSLER, M.L. Avulsión y rectificación de meandros en planicies de bajo gradiente: consideraciones para su predicción. *Revista Ingeniería del Agua*, 2005.

RAMONELL, C.G.; SZUPIANY, R.N.; LATRUBESSE, E.M.; GARCÍA, M.; PEREIRA, M.S.; GALLEGO, M.G.; MARCHETTI, Z.Y.; CAFARO, E.D.; PAIRA, A.R.; LATOSINSK, F.; BOSISIO, A.C.; TORRES, G. Procesos de formación del río Paraná Medio. Nuevos paradigmas para su estudio - Memorias del Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Santiago del Estero, 2011. (CD ROOM)

RAMOS, C. Perigos Naturais Devidos a Causas Meteorológicas: O Caso das Cheias e Inundações. Instituto de geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, 2013.

REGIONALISMO EM LINEA. Agrupación de produtores lecheros. Disponível em: <<http://regionalisimoenlinea.blogspot.com.br/2015/03/agrupacion-de-productores-lecheros.html>>. Acesso em: 18 dez. 2017.

Rennó, C., Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Soares, J.V., Hodnett, M.G. & Tomasella, J., Waterloo, M. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112: 3469-3481.

RIGHI, E. Risco a inundação em médio curso do rio Uruguai: um estudo de caso nos municípios de Porto Lucena e São Borja. *UFRGS/POSGea – Porto Alegre*, p. 53, 2011.

SANTA FE. Recomendaciones ante la crecida del Paraná. Disponível em: <[https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/112062/\(subtema\)/93794](https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/112062/(subtema)/93794)>. Acesso em: 09 dez. 2017.

SANTA FE¹. Translado de animales por la Emergencia Hídrica. <[https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/159155/\(subtema\)/93794](https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/159155/(subtema)/93794)>. Acesso em: 09 dez. 2017.

SANTA FE CIUDAD. Gobierno de la ciudad de Santa Fe. Disponível em: <<http://muniweb1.santafeciudad.gov.ar/santafemapas/#>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

SANTORO, M.; WEGMÜLLER, U.; LAMARCHE, C.; BONTEMPS, S.; DEFOURNY, P.; ARINO, O. Strengths and weaknesses of multi-year Envisat ASAR backscatter measurements to map permanent open water bodies at global scale. *Remote Sensing of Environment*, v. 171, p. 185-201, 2015.

SANTORO, M.; WEGMÜLLER, U. Multi-temporal synthetic aperture radar metrics applied to map open water bodies. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, p. 3225–3238, 2013.

SANTOS, A.R.; PARADELLA, W.R.; VENEZIANI, P. Avaliação da estereoscopia SAR (RADARSAT-1) e híbrida (RADARSAT-1 & TM-Landsat-5) em mapeamento

geológico na Província Mineral de Carajás. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 33, p. 153-160, 2003.

SANYAL, J. & LU, X.X. Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: A Review. Natural Hazards, v. 33, p. 283-301, 2004.

SECRETARÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA NACIÓN. Inventario de los humedales de Argentina: sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná Paraguay / edición literaria a cargo de Laura Benzaquén ... [et.al.]. - 1a ed., Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2013.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN). Monitoreo Diario y Mensual. Disponível em: <<http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/?mod=vigilancia&id=13&var=entrerios#javascript>>. Acesso em: 18 jan. 2017

SILVA, C.S.; AFONSO, S. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas inundáveis em zonas urbanas. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis – SC, 2006

SILVA, T.S.F.; COSTA, M.P.F.; MELACK, J.; NOVO, E.M.L.M. Influência de variações na intensidade do pulso de inundação sobre a cobertura e crescimento da vegetação herbácea aquática na Amazônia. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brasil, p. 3205, 2011.

SIMIONI, J.P.D.; GUASSELLI, L.A. Banhados: abordagem conceitual. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, n. 30, p. 33-47, set. 2017.

SINGHROY, V.; SAINT-JEAN, R. Effects of Relief on the Selection of RADARSAT-1 Incidence Angle for Geological Applications. Canadian Journal of Remote Sensing. v. 25, p. 211-217, 1999.

SIQUEIRA, M.R.A., BATISTA, G.T., TARGA, M.S.; CATELANI, C.S. Mapeamento das áreas de inundações das planícies aluviais de Guaratinguetá através de técnicas de geoprocessamento. Anais GEOVAP 2006 - Primeiro Seminário de Geoprocessamento do Vale do Paraíba, Taubaté, Brasil, UNITAU, P.54-64, dez. 2006.

SKY RADAR. SAR Basics. Disponível em: <www.skyradar.com> Acesso em: 25 fev. 2017

SOLBØ, S.; SOLHEIM, I. Towards Operational Flood Mapping with Satellite SAR. Norut Information Technology AS. Tromsø Science Park, N-9291 Tromsø, Norway. Proc. of the 2004 Envisat & ERS Symposium, Salzburg, Austria, 2004.

SOMALIA WATER AND LAND INFORMATION MANAGEMENT (SWALIM). Detailed characteristics of the Shabelle River. Disponível em:

<http://sddr.faoswalim.org/River_atlas/atlas/River_Atlas_Som_Belad%20Weyne_28-37.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2016.

STABEL, E.; LÖFFLER, E. Optimised mapping of flood extend and floodplain structures by radar EO-methods. Department of Physical Geography, Saarland University - Saarbrücken, Alemanha, 2004.

SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA NACIÓN. Sistema Nacional de Información Hídrica / Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI): Disponível em: <<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>> Acessado em: 26 jan. 2017.

TASI, H. Aplicación de las cartas de suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar índices de productividad específicos para los principales cultivos agrícolas. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña, p. 618, 2009.

TEIXEIRA, S.G.; FILHO, P.W.M.S. Análise de coeficientes de retroespalhamento de imagens multitemporais RADARSAT-1 na discriminação de ambientes costeiros tropicais da região da Baixada Maranhense. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, p. 5019–5026, 2007.

TÉLAM. La costa santafesina está em emergência por la crecida del Paraná y las lluvias. Disponível em: <<http://www.telam.com.ar/notas/201604/144699-santa-fe-emergencia-inundaciones-lluvia-crecida-rio-parana.html>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

TEODORO, V.L.I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D.J.L.; FULLER, B.B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. Revista UNIARA, n.20, p.138, 2007.

THE INTERNATIONAL CHARTER, “Space and Major Disasters,” Disponível em: <<http://www.disasterscharter.org>>. Acesso em: 18 mar. 2011.

TOWNSEND, P.A.; WALSH, S.J. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology*, v. 21, 1998.

TOWNSEND, P.A. Mapping seasonal flooding in forested wetlands using multi-temporal Radarsat SAR. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*, v. 67(7), p.857-864, 2001.

TOWNSEND, P.A. Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forest wetlands using C-band SAR. *Int. J. Remote Sensing*, v. 23(3), p. 443-460, 2002.

TRALLI, D.M.; BLOM, R.G.; ZLOTNICKI, V.; DONNELLAN, A.; EVANS, D.L. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 59, p.185-198, 2005.

UN - Land and Natural Disasters: Guidance for Practitioners. United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT), 2010.

VALLEJOS, O.; MATHARÁN, G.; MARICHAL, M.E. Las inundaciones en la ciudad de Santa Fe, Argentina, vistas desde una perspectiva CTS. Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad, nº 25, vol. 9, p. 147-180, 2014.

VAN DER SANDEN, J.J. Radar remote sensing to support tropical forest management. Georgetown, Guyana - Tropenbos-Guyana Series, p.330, 1997.

VILCHES, J.P. Detection of areas affected by flooding river using SAR images. Universidad Nacional de Cordoba, 2013.

VOIGT, S.; KEMPER, T.; RIEDLINGER, T.; KIEFL, R.; SCHOLTE, K.; MEHL, H. Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. v. 45, n. 6, 2007.

WANG, Y.; HESS, L.L.; FILOSO, S.; MELACK, J.M. Understanding the radar backscattering from flooded and nonflooded Amazonian forests: Results from canopy backscatter modelling. Remote Sensing of Environment, 1995.

ZAGARE, V. Natural territory, urban growth and climate change in the Parana River Delta and Rio de la Plata estuarine system. Department of Urbanism, Delft University of Technology, 2010.

ZHOU, C.; LUO, J.; YANG, C.; LI, B.; WANG, S. Flood monitoring using multi-temporal AVHRR and RADARSAT imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 66, 2000.