

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

GABRIELLE FERNANDES GARRAFIEL

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES URBANAS A PARTIR DE IMAGENS DE
RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA DO PROGRAMA SENTINEL

Porto Alegre, RS

2018

GABRIELLE FERNANDES GARRAFIEL

MAPEAMENTO DE INUNDACOES URBANAS A PARTIR DE IMAGENS DE
RADAR DE ABERTURA SINTETICA DO PROGRAMA SENTINEL

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Ambiental

Orientador: Dr. Anderson Ruhoff

Porto Alegre, RS

2018

GABRIELLE FERNANDES GARRAFIEL

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES URBANAS A PARTIR DE IMAGENS DE
RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA DO PROGRAMA SENTINEL

Aprovada em: ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Alice César Fassoni de Andrade, UFRGS

Fernando Mainardi Fan, UFRGS

Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, UFRGS

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Inserir aqui a ficha gerada a partir do Sistema de Geração Automática de Fichas Catalográficas, disponível no endereço

<http://www.ufrgs.br/bibliotecas/ferramentas-de-producao/ficha-catalografica>.

“A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar..”

(Fernando Birri)

RESUMO

Inundações urbanas correspondem a um dos desastres ambientais mais frequente em áreas urbanas. O mapeamento das inundações apresenta-se como um importante instrumento na prevenção, gestão e controle de inundações urbanas, através dele é possível definir as áreas de risco, bem como as áreas afetadas após os eventos. Para tanto, o uso de sensores remotos apresenta-se como ferramenta útil na elaboração destes mapeamentos. No entanto, diversas dificuldades ainda são encontradas para a utilização dessas ferramentas, que normalmente utiliza sensores óticos passivos, fortemente influenciados pela cobertura de nuvens no local. A missão Sentinel-1, lançada em 2015 pela Agência Espacial Européia (ESA), apresenta um sensor ativo de micro-ondas, na Banda C, que não interage com a atmosfera e que possui resolução espacial e temporal que permitem análises detalhadas em áreas urbanas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar o potencial qualitativo das imagens Sentinel-1 para o mapeamento de áreas inundadas após eventos extremos de precipitação. Assim, o presente estudo de caso teve por objeto a passagem do furacão Harvey em Houston, nos Estados Unidos da América, onde as áreas afetadas por inundações urbanas foram mapeadas. Com resultados qualitativos satisfatórios, mostrando a incidência de manchas de inundação, tanto em áreas densamente urbanizadas quanto em áreas naturais. Os resultados indicam o grande potencial de utilização de imagens do programa Sentinel, entretanto eles demonstram que os resultados são sensivelmente afetados pelos limiares adotados como limite para a separação da classe de água do restante da imagem, tornando os resultados subjetivos.

Palavras-chave: furacão Harvey; inundação urbana; sensoriamento remoto; Sentinel-1; radar de abertura sintética.

ABSTRACT

Urban flooding is one of the most frequent environmental disasters in urban areas. Flood mapping is an important tool in the prevention, management and control of urban floods, through which it is possible to define the areas of risk as well as the areas affected after the events. Therefore, the use of remote sensors is a useful tool in the elaboration of these mappings. However, several difficulties are still encountered for the use of these tools, which normally uses passive optical sensors, heavily influenced by the cloud cover in place. The Sentinel-1 mission, launched in 2015 by the European Space Agency (ESA), features a non-atmospheric active microwave C-band sensor with spatial and temporal resolution that allows for detailed analysis in urban areas. In this context, the objective of this work is to evaluate the qualitative potential of Sentinel-1 images for the mapping of flooded areas after extreme precipitation events. Thus, the present case study aimed at the passage of Hurricane Harvey in Houston, in the United States of America, where areas affected by urban flooding were mapped. With satisfactory qualitative results, showing the incidence of flood spots, both in densely urbanized areas and in natural areas. The results indicate the great potential of using images from the Sentinel program, however they show that the results are significantly affected by the thresholds adopted as a limit for the separation of the water class from the rest of the image, making the results subjective.

Keywords: urban flood; remote sensing; Sentinel-1; Harvey Hurricane.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã, que ofereceram suporte incondicional nesta decisão.

Às incríveis mulheres que cruzaram meu caminho, me ensinando amor próprio, confiança, sororidade e empatia. Seja na forma de fortes exemplos profissionais, sejam como amigas de longa data, serão sempre minha inspiração.

À ti, Paulo Alberto Haag Junior, por ser meu companheiro em todas situações.

Meu mais sincero obrigada aos mestres que fizeram parte desta graduação, especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson Ruhoff, que foi paciente, solícito e me proporcionou um grande aprendizado.

E, finalmente, aos meus amigos, e agora colegas de profissão, que propiciarem meu crescimento pessoal e profissional ao longo desta trilha (que nunca acaba).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da cidade de Houston nos Estados Unidos da América (EUA).....	19
Figura 2. Trajetória do furacão Harvey entre os dias 13 e 31 de agosto de 2017. Fonte: <i>National Hurricane Center</i> (2017)	21
Figura 3. Trajetória do furacão Harvey na Costa Texana entre os dias 25 e 31 de agosto de 2017. Fonte: <i>National Hurricane Center</i> (2017).....	22
Figura 4. Médias mensais de precipitação na região de Houston para o período compreendido entre janeiro de 1998 e dezembro de 2016, obtidos a partir do produto TRMM 3B43. Fonte: Giovanni (NASA 2017)	23
Figura 5. Precipitação acumulada durante o Harvey, entre os dias 25 e 30 de agosto de 2017. Fonte: NOAA 2017, adaptado	24
Figura 6. Estimativa média da precipitação acumulada (combinação com micro-ondas IR) entre os dias 24/08/2017 e 29/08/2017 na região de Houston, obtidos a partir do produto GPM 3IMERGGDL Versão 04. Fonte: Giovanni (NASA, 2017)	25
Figura 7. Precipitação registrada entre os dias 24/08/2017 e 29/08/2017 na estação pluviométrica no Aeroporto de Houston. Fonte: NWS (2017).	25
Figura 8. Espectro Eletromagnético. Fonte: Instituto de Física - UFRGS. 2003, adaptado.....	30
Figura 9. Bandas contidas na região do micro-ondas. Fonte: DUTRA, 2003....	30
Figura 10. A geometria básica SAR. Fonte: INPE, 2006.....	33
Figura 11. Retroespalhamento pela rugosidade superficial do terreno. Fonte: JENSEN & EPIPHANIO, 2011.....	34
Figura 12. Imagem de radar da banda C, do satélite europeu Sentinel-1 e polarização HV, mostrando alvos especulares. 1) Edificações; 2) corpo d'água. Fonte: Elaboração própria.	35
Figura 13. Sombreamento. Fonte: Beneditti, 2010.	38
Figura 14. Encurtamento de Rampa. Fonte: Beneditti, 2010.	38
Figura 15. Inversão. Fonte: Beneditti, 2010.	38
Figura 17. Informações nome do arquivo. Fonte: ESA 2015a	43
Figura 18. Modos do produto Sentinel-1. Fonte: ESA 2015a, adaptado.	44

Figura 19. Amostra da Imagem 1N na polarização VH antes e depois da calibração radiométrica Fonte: Elaboração própria	55
Figura 20. Histograma da imagem 1N antes e depois da calibração. Fonte: Elaboração própria	56
Figura 21. Exemplo de imagens com diferentes polarizações (vertical-horizontal e vertical-vertical) antes e depois da aplicação do filtro Lee sigma com janela de 5x5 pixels. Fonte: Elaboração própria	56
Figura 22. Histograma na imagem 1S na polarização VH e polarização VV. Fonte: Elaboração própria	57
Figura 23. Histograma na imagem 1N na polarização VH e na polarização VV. Fonte: Elaboração própria	57
Figura 24. Escolha dos limiares para a imagem 1S. Fonte: Elaboração própria.....	59
Figura 25. Imagem 1S após a binarização, adotando o limiar 0,022.Áreas brancas classificadas como água e pretas como “não-água”. Fonte: Elaboração própria.....	60
Figura 26. Imagem 1N antes e depois da Correção Geométrica. Fonte: Elaboração própria	61
Figura 27. Exemplo da superestimação da máscara de água NDWI e Imagem do local sem a sobreposição da máscara d'água.	62
Figura 28. Exemplo da superestiva da máscara de água MNDWI e Imagem do local sem a sobreposição da máscara d'água.	63
Figura 29. Exemplo da diferença entre as máscaras MNDWI (azul) e da NDWI (rosa) e imagem do local sem a sobreposição das máscaras d'água.....	63
Figura 30. Máscara de água gerada a partir das imagens Sentinel -2. Fonte Elaboração Própria.....	64
Figura 31 . Pedidos de resgate no <i>Google Crisis</i> . Fonte: Elaboração própria ..	67
Figura 32. Foto 1. Fonte: USGS 2017.....	68
Figura 33. Foto 2. Fonte: USGS 2017.....	68
Figura 34. Foto 3. Fonte: USGS 2017.....	68
Figura 35. Foto 4. Fonte: USGS 2017.....	68
Figura 36. Foto 5. Fonte: USGS 2017.....	68
Figura 37. Foto 6. Fonte: USGS 2017.....	68
Figura 38. Foto 7. Fonte: USGS 2017.....	69

Figura 39. Foto 8. Fonte: USGS 2017.....	69
Figura 40. Foto 9. Fonte: USGS 2017.....	69
Figura 41. Localização dos registros fotográficos. Fonte: Elaboração Própria.	69
Figura 42. Amostra da comparação entre a máscara de inundação gerada (liminar 0,0116) e a máscara de água. Fonte: Elaboração própria.....	70
Figura 43. Amostra da comparação entre a máscara de inundação gerada (liminar 0,013) e a máscara de água. Fonte: Elaboração própria.....	71
Figura 44. Amostra da comparação entre a máscara de inundação gerada (liminar 0,022) e a máscara de água. Fonte: Elaboração própria.....	72
Figura 45. Localização das fotos 1, 2 e 3 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.....	73
Figura 46. Localização das fotos 4, 5 e 6 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.....	73
Figura 47. Localização das fotos 7 e 8 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.....	74
Figura 48. Localização das fotos 9 e 10 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.....	74
Figura 49. Exemplos de pedidos de resgate que coincidiram com a máscara de inundação e de pontos que não coincidiram. Fonte: Elaboração própria.....	76
Figura 50. Exemplos de pedidos de resgate que coincidiram com a máscara de inundação. Fonte: Elaboração própria.....	77
Figura 51. Zona de inundação para um tempo de retorno de 500 anos na cidade de Houston sobreposta a máscara de inundação gerada. Fonte: Elaboração própria.....	78
Figura 52. Cruzamentos dos dados e da máscara de inundação gerada. Fonte: Elaboração própria.....	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	ÁREA DE ESTUDO E EVENTO	17
2.1	HOUSTON.....	17
2.2	FURACÃO HARVEY.....	20
2.3	PRECIPITAÇÃO DURANTE A PASSAGEM DO FURACÃO HARVEY ..	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1	PROBLEMÁTICAS RECORRENTES RELACIONADAS A INUNDAÇÕES.....	26
3.2	FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	29
3.3	SENSORIAMENTO REMOTO DE MICROONDAS ATIVAS	31
3.4	RETROESPALHAMENTO DO ALVO	33
3.5	PROCESSAMENTO DE IMAGENS SAR	35
3.6	PROGRAMA SENTINEL – ESA.....	39
4	METODOLOGIA	42
4.1	OBTENÇÃO DA IMAGEM	42
4.2	CALIBRAÇÃO	45
4.3	FILTRO DE <i>SPECKLE</i>	47
4.4	ESCOLHA DA POLARIZAÇÃO ADEQUADA.....	48
4.5	BINARIZAÇÃO DA IMAGEM.....	48
4.6	CORREÇÃO GEOMÉTRICA.....	49
4.7	ANÁLISE DA MÁSCARA GERADA	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	OBTENÇÃO DAS IMAGENS.....	54
5.2	CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA.....	54

5.3	FILTRAGEM E ANÁLISE DAS POLARIZAÇÕES	56
5.4	OBTENÇÃO DOS LIMIARES	58
5.5	CORREÇÃO GEOMÉTRICA.....	60
5.6	VERIFICAÇÃO DAS MÁSCARAS GERADAS	61
6	CONCLUSÕES	80
7	BIBLIOGRAFIA	82

1 INTRODUÇÃO

As inundações urbanas figuram como um problema desde as primeiras civilizações, seja por causas naturais ou antrópicas. Esses fenômenos são potencializados pelo crescimento e desenvolvimento dos núcleos urbanos, que impermeabiliza grandes áreas e contribui para o aumento do escoamento superficial (TUCCI, 2003). A impermeabilização das áreas, além de contribuir para o incremento do escoamento superficial, usualmente ocorre em zonas naturais de inundação.

A urbanização impacta diretamente no agravamento das cheias, gerando além de prejuízos econômicos, decorrentes dos danos a infraestruturas e habitações, impactos no ambiente natural, desvalorização do ambiente construído, aumento na propagação de doenças de veiculação hídrica entre outros (MIGUEZ, REZENDE, VERÓL, 2015).

O processo de urbanização acelerado brasileiro ocorreu depois da década de 60, gerando uma população urbana praticamente sem infraestrutura. O Censo de 1960 registrava que 44% da população brasileira ocupavam as áreas urbanas, nos anos 70 já eram 55%. Nos 10 anos que separaram os dois censos foram acrescentados em média 2.300.000 habitantes nas áreas urbanas. (DE BRITO, 2012). Um exemplo da falta de estrutura ainda existente nos municípios brasileiros, são os dados de saneamento básico. Apenas 68% dos domicílios em áreas urbanas são atendidos por rede coletora de esgoto, sendo que 0,5% não apresentam nenhuma solução sanitária (fossa rudimentar, séptica, entre outros) (IBGE, 2015).

A consequência pode ser observada através dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que mostra que entre os anos de 2003 e 2008, 40,9% das cidades brasileiras registraram inundações e alagamentos urbanos. Estes desastres impactaram diretamente mais de 1,4 milhão de pessoas no país (IBGE, 2008).

No Brasil, não existe nenhum programa sistemático de controle de cheias e inundações urbanas que envolva seus diferentes aspectos. No entanto, existem medidas em diferentes níveis (municipais, estaduais e federal), como planos diretores municipais que incluem a problemática da drenagem urbana no

seu planejamento. Além disso, a problemática foi incluída no Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres desenvolvido pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) de 2012. Na esfera estadual pode-se citar a Política Estadual de Gestão de Riscos de Desastres no estado do Rio Grande do Sul (2017). Entretanto, esta ainda é uma preocupação muito recente na realidade brasileira.

O Programa de Redução de Riscos do Ministério das Cidades (BRASIL, 2007) sugere uma metodologia para a o mapeamento das áreas de risco de enchentes e inundações baseada na identificação preliminar das áreas de risco em levantamentos aerofotogramétricos, imagens de satélite, mapas, guias de ruas, ou outro material disponível compatível com a escala de trabalho. No entanto, para esse mapeamento preliminar usualmente os planos diretores baseiam-se em eventos históricos e os dados por vezes são fruto de entrevistas com moradores locais, a exemplo pode-se citar o Plano de Saneamento Básico da Cidade de Rio Grande/RS (SMMA Rio Grande 2013) e o Plano Diretor de Rio Negrinho (SECRETARIA MUNICIPAL DO PLANEJAMENTO, 2006; SCHOEFFEL, 2009). Tal metodologia, além de trabalhosa, é frágil pois depende fortemente da memória dos moradores locais.

Outras metodologias vêm sendo adotadas, como por exemplo a utilização de modelos hidrológicos e modelos digitais de terreno obtidos por sensoriamento remoto e posteriormente geoprocessados, como fez PAULA (2013), para a cidade de Coimbra, em Portugal.

Nos Estados Unidos da América, o mapeamento das áreas urbanas já é uma preocupação antiga. Em 1936, foi aprovada uma legislação federal sobre controle de enchentes. Tal legislação previa a redução de enchentes por meio de medidas físicas ou estruturais como um meio de reduzir esses danos. A medida acelerou a ocupação das várzeas naturais de inundação, causando aumento dos danos ocasionados pelas enchentes (TUCCI, 2005). Em 1966 reconheceu-se que as medidas eram inadequadas e a partir daí o enfoque norte-americano foi em medidas não estruturais, principalmente no programa de seguros federal. Este programa exige aquisição de um seguro de enchentes para

as edificações construídas em áreas de inundação (*NATIONAL RESEARCH COUNCIL et al.*, 2015).

No entanto, é preciso saber que tais medidas atuam na minimização dos impactos, muitas vezes não sendo possível mitigá-los completamente. No caso específico do furacão Harvey em Houston, a tempestade, de aproximadamente 900 mm entre os dias 25 e 29 de agosto de 2017, desabrigou cerca de 30.000 pessoas e fez 31 vítimas fatais confirmadas. Além das perdas de vidas humanas, os dados quanto ao prejuízo financeiro seguem incógnitos, segundo algumas análises podem chegar a marca de 100 bilhões de dólares.¹

A partir desta problemática, é clara a necessidade de ferramentas que detectem áreas de risco em eventos extremos, bem como quantifiquem as áreas afetadas após esses eventos a fim de efetuar a gestão e planejamento que possibilite a minimização e reparação dos danos causados.

Para tanto, ferramentas que incluem dados obtidos por sensores remotos ativos e passivos vem sendo desenvolvidas como auxílio a gestão de risco de desastres naturais. Nesse contexto pode-se citar o programa Sentinel da Agência Espacial Europeia (ESA) como uma importante ferramenta de suporte para a obtenção de dados em curtos espaços de tempo e de alta confiabilidade.

O programa Sentinel é composto por diferentes missões. A missão Sentinel-1 apresenta como objetivo o monitoramento de desastres terrestres e oceânicos. Essa missão é composta por dois satélites em órbitas polares que operam dia e noite para obtenção de imagens da superfície a partir do espectro de micro-ondas (radar de abertura sintética), permitindo assim adquirir imagens independentemente das condições meteorológicas (ESA 2013). O primeiro satélite Sentinel-1 (Sentinel-1A) foi lançado em abril de 2014 e o segundo (Sentinel-1B) em 25 de abril de 2016. As imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar* ou Radar de Abertura Sintética) consistem em imagens de radar de alta

¹ “Total Harvey cost could be as high as \$100bn, says insurance expert”. The Guardian, 29 Ago 2017. Disponível em: < <https://www.theguardian.com/us-news/2017/aug/29/total-harvey-cost-insurance-texas-tropical-storm-hurricane-sandy>> Acesso em 16 de agosto 2017.

resolução obtidas a grandes distâncias, para isso utilizam uma técnica de radar especial, que permite aos utilizadores obterem essas imagens (ESA, 2013).

Como objeto de estudo para a avaliação das imagens de imagens SAR do Programa Sentinel, utilizou-se como estudo de caso as inundações e alagamentos ocorridos em virtude da passagem do furacão Harvey em Houston, sudeste dos Estados Unidos da América. Para tanto as áreas da imagem foram classificadas como “água” ou “não-água”, essa classificação binária é realizada escolhendo um valor de restroespalhamento do alvo como o limiar de separação das feições.

1.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral, buscou-se avaliar a utilização de imagens SAR do Programa Sentinel-1 como ferramenta de mapeamento de inundações urbanas. Para analisar a aplicabilidade dessas imagens, utilizou-se como estudo de caso as áreas de inundação relacionadas ao evento extremo ocorrido na cidade de Houston (Texas, Estados Unidos), entre os dias 25 e 28 de agosto de 2017, em consequência da passagem do furacão Harvey.

1.2 Objetivos Específicos

Como Objetivos específicos estabeleceu-se:

- 1) testar diferentes limiares para detecção das manchas de inundação;
- 2) analisar as áreas de inundação em decorrência do evento extremo de precipitação;
- 3) validar a exatidão das manchas de inundação geradas a partir de registros divulgados por moradores locais e pela imprensa na internet.

2 ÁREA DE ESTUDO E EVENTO

2.1 Houston

Houston é localizada no sudeste dos Estados Unidos da América. A cidade está em uma zona de planície costeira, com altitude média de 32 m acima do nível do mar. Situada nas coordenadas 29 ° 45'46 "N 95 ° 22'59" O, está a cerca de 80 km do Golfo do México e próxima a Baía de Galveston, conforme **Figura 1**.

A temperatura média de Houston é de 20,6°C, com precipitação média anual de 1150 mm (*NATIONAL WEATHER SERVICE FORECAST OFFICE*, 2017), bem distribuída ao longo do ano, com pequeno incremento nos meses quentes, caracterizando o clima, segundo a classificação de Köppen, como subtropical úmido (cfa).

A economia de Houston é diversificada e se baseia em um amplo parque industrial nos setores de energia, manufatura, aeronáutica, transportes e saúde. Houston é cidade mais populosa do Texas e a 4ª cidade mais populosa dos Estados Unidos da América, segundo o censo norte-americano de 2010, onde a população total cidade era de 2.099.451 de habitantes (*US Bureau of Census*, 2010). A cidade, que é sede do Condado de Harris, possui aproximadamente 1.550 km² distribuídos em 3 condados estadunidenses, o condado de Harris, Fort Bend e Montgomery.

Ainda que possua mais de 2 milhões de habitantes, a cidade apresenta densidade populacional de aproximadamente 1.351 hab/km² apenas, devido sua forte expansão urbana horizontal, incentivada por suas políticas de planejamento urbano, que não se dão de forma convencional (GREY, 2016). O zoneamento da cidade não se dá pelo uso único e sim por mercado de usos compatíveis, não há regulação quanto as densidades, entretanto outras medidas contribuem para a forte expansão horizontal da zona urbana e redução da densidade populacional. A regulação municipal exige a construção de estacionamentos fora da rua para quase todas as formas de desenvolvimento, isto é, exige a construção de garagens e estacionamentos para os estabelecimentos comerciais, o que

incentiva os investidores a comprarem terrenos cada vez mais afastados do centro urbano, expandido a cidade para o subúrbio. Outra exigência municipal é a largura mínima das ruas, que são entre 15 e 18 m (LEWYN, 2005).

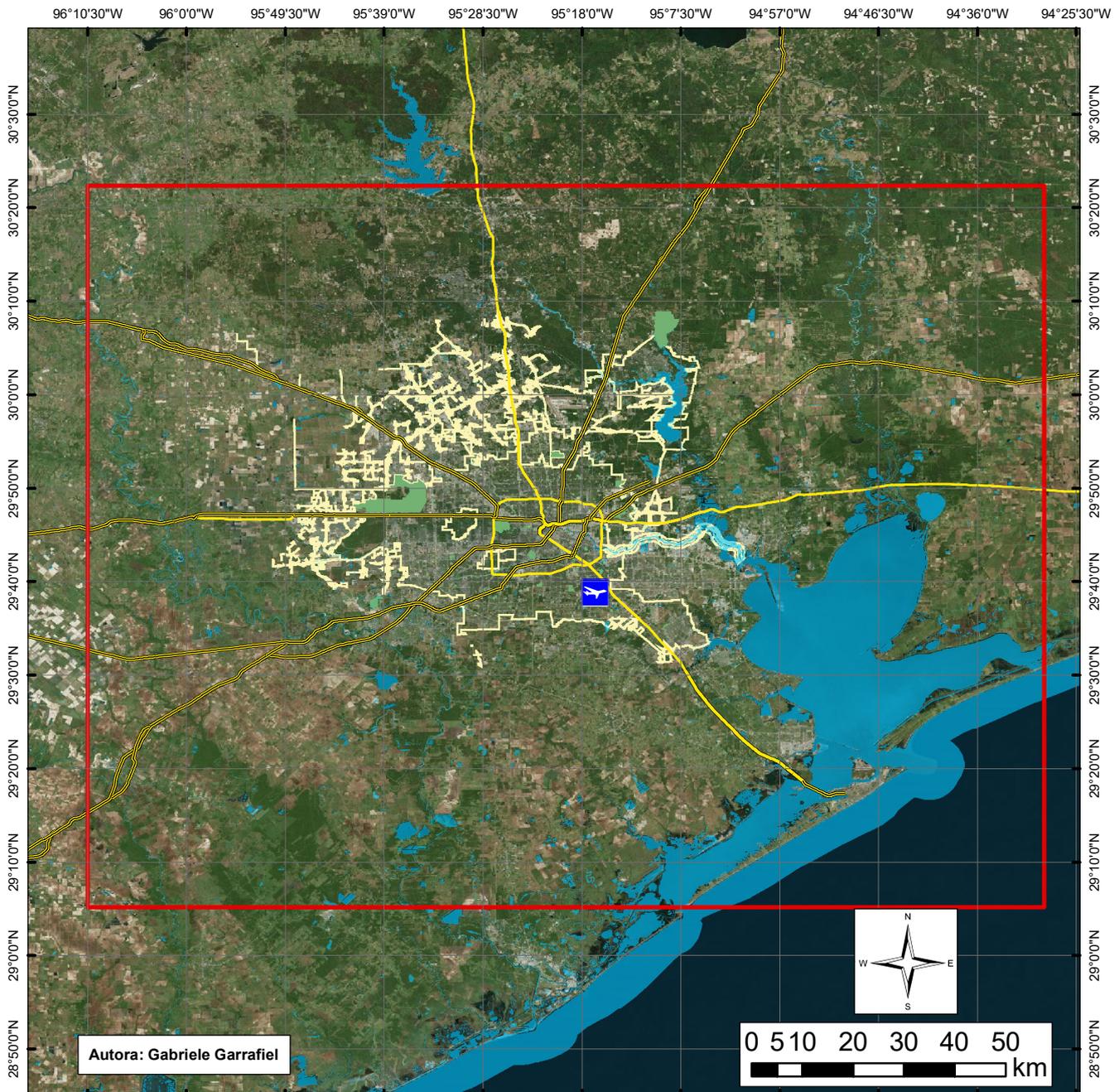
O alto índice pluviométrico, aliado à topografia extremamente plana e aos solos típicos da pradaria de argila e silte, favorecem os eventos de inundação. Segundo Gray (2016)², a forma de ocupação e expansão da cidade contribui para o incremento de significativos eventos de inundação urbana, uma vez que sua expansão impermeabiliza planícies naturais de inundação dos corpos hídricos locais. Tal discussão foi reavivada com a passagem do furacão Harvey e em função dos danos causados. O evento provocou novas discussões^{3, 4} sobre a forma de planejamento da cidade, as consequências da expansão urbana, do aumento de áreas impermeabilizadas e consequente diminuição das áreas de pradarias, consideradas esponjas naturais para absorção da precipitação incidente na região.

² “How Houston Regulates Land Use” MARKET URBANISM. Disponível em: < <http://marketurbanism.com/2016/09/19/how-houston-regulates-land-use/> > Acesso em 14 de out 2017.

³ “After the storm, Houston land use gets a bad rap again” USA TODAY. Disponível em: < <https://www.usatoday.com/story/opinion/2017/09/06/houston-land-use-gets-bad-rap-editorials-debates/105336658> > Acesso em 14 de out 2017.

⁴ “What Houston's Critics Get Wron” Emily Hamilton, US NEWS. Disponível em: < <https://www.usnews.com/opinion/economic-intelligence/articles/2017-09-18/land-use-wasnt-to-blame-for-houstons-hurricane-harvey-destruction> > Acesso em 14 de out de 2017.

Localização de Houston-EUA



Legenda

-  Aeroporto William P. Hobby
-  Rodovia Nacional
-  Rodovia Interestadual
-  Corpos d'água
-  Parques Municipais
-  Limite da Área Urbana
-  Limites utilizados para a avaliação da precipitação



Sistemas de Coordenadas Geográficas.
Datum: WGS 84

Fonte:
Malha Viária: US Bureau Census (2017);
Limite de Houston e Parques Municipais:
City of Houston Open Data Portal (2017);
Corpos d'água: H-GAC. (2017);
Limite Estadual: US Bureau Census (2017).

Figura 1. Mapa de localização da cidade de Houston nos Estados Unidos da América (EUA).

2.2 Furacão Harvey

O furacão Harvey se formou no dia 13 de agosto de 2017, quando uma depressão tropical se fundiu a uma zona de baixa pressão perto das ilhas de Cabo Verde (costa oeste do continente Africano) formando, inicialmente, um ciclone tropical (NOAA, 2017 a). O ciclone encaminhou-se em direção a costa Caribenha, onde atingiu as Ilhas do Caribe no dia 18 de agosto e perdeu força. No entanto, com as águas quentes na Baía do Campeche e no oeste do Golfo do México, o *National Hurricane Center* (NHC) emitiu alerta para a formação de um furacão de categoria 1. Com o cisalhamento do vento no oeste do Golfo do México enfraquecendo, a tempestade tropical Harvey se intensificou rapidamente. Assim, o furacão de categoria 1 se tornou um furacão da categoria 3 em menos de 24 horas (na sexta-feira, dia 25 de agosto), com ventos atingindo 193 km/h. E no mesmo dia o furacão Harvey foi reclassificado para furacão de categoria 4 (com ventos superiores a 209 km/h) no início da noite de sexta-feira (NOAA 2017 a).

Como consequência do furacão, houve aumento expressivo do nível da água e maré meteorológica na costa Texana, causando tempestades históricas, sendo as maiores tempestades observadas no Refúgio de Vida Selvagem de Aransas, onde os níveis da tempestade alcançaram mais de 3,65 m acima do nível do solo (NOAA 2017 a).

Em vez de se mudar para o interior e mais longe da costa, Harvey ficou estacionário sobre o sul e sudeste do Texas entre os dias 25 e 29 de agosto, produzindo catastróficas devastações e inundações. Harvey fez sua parada final perto de Cameron, Louisiana, na noite de quarta-feira, 30 agosto (NOAA 2017 a), conforme demonstrado nas **Figuras 2 e 3**.

O furacão Harvey foi o furacão mais intenso a atingir os EUA desde 2005 e o mais intenso a atingir o Texas desde o furacão Carla em 1961 (NOAA 2017b).

Segundo os portais de notícias^{5,6}, os prejuízos estimados na costa Texana são da ordem de 100 bilhões de dólares, além dos danos materiais são estimados os prejuízos causados pela interrupção de atividades econômicas, como por exemplo em Houston, onde refinarias de petróleo tiveram que suspender temporariamente as atividades. Embora os custos econômicos, de saúde pública e ambientais ainda sejam incertos, é provável que o Harvey tenha sido um dos piores desastres climáticos da história dos EUA (NOAA 2017 b).



Figura 2. Trajetória do furacão Harvey entre os dias 13 e 31 de agosto de 2017. Fonte: *National Hurricane Center* (2017).

⁵ “Total Harvey cost could be as high as \$100bn, says insurance expert”. The Guardian, 29 Ago 2017. Disponível em: < <https://www.theguardian.com/us-news/2017/aug/29/total-harvey-cost-insurance-texas-tropical-storm-hurricane-sandy>> Acesso em 16 de agosto 2017.

⁶ “Hurricane Harvey Facts, Damage and Cost”- The Balance, 30 Set 2017. Disponível em: < <https://www.thebalance.com/hurricane-harvey-facts-damage-costs-4150087>> Acesso em 16 de agosto 2017.

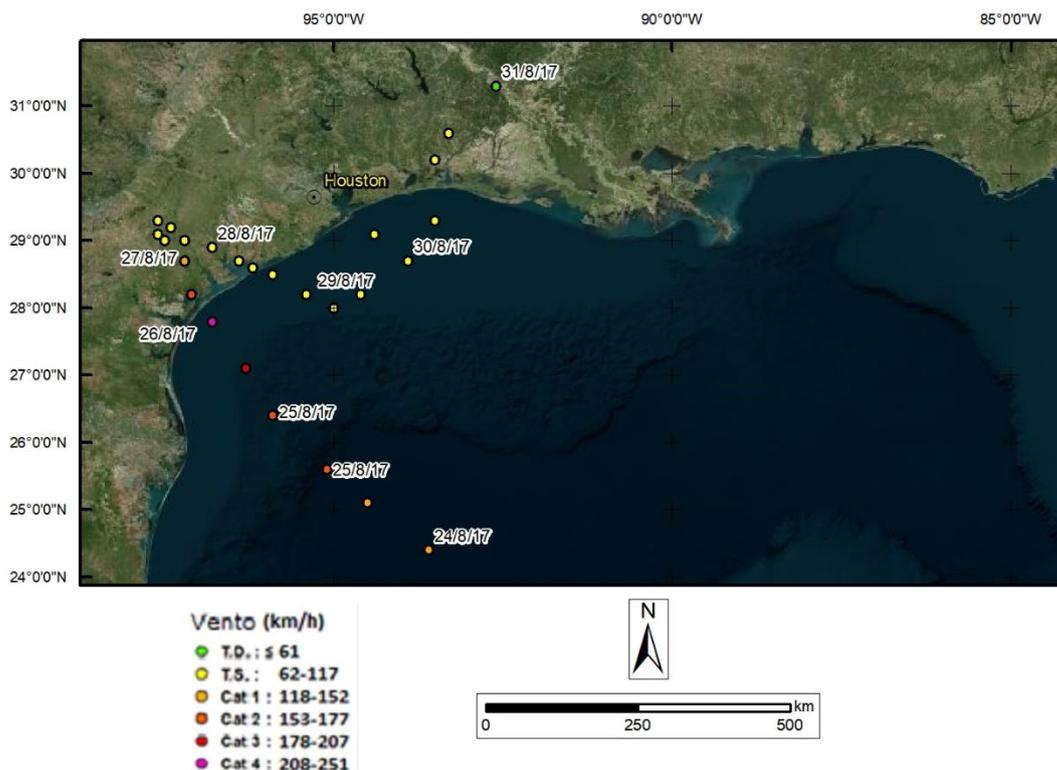


Figura 3. Trajetória do furacão Harvey na Costa Texana entre os dias 25 e 31 de agosto de 2017. Fonte: *National Hurricane Center* (2017).

2.3 Precipitação durante a passagem do Furacão Harvey

Conforme classificação climática anteriormente definida, Houston possui verão e outono chuvosos (NWS 2017). Para análise da precipitação média mensal na região de Houston, utilizou-se os limites geográficos descritos na Tabela 1, o polígono é apresentado na **Figura 1**.

Tabela 1. Limites geográficos considerados para análise pluviométrica na região de Houston..

Limite	Coordenadas
Oeste	-95.9 O
Sul	29.4 N
Leste	-94.7 O
Norte	30.2 N

Os dados “quase-normais” de precipitação na área de análise foram obtidos a partir do portal NASA Giovanni, que fornece dados de diferentes bases climáticas. Para tanto, utilizou-se das informações fornecidas pelo satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), no período entre janeiro de 1998 e dezembro de 2016 – quando o TRMM foi descontinuado. O TRMM era uma missão conjunta da NASA e da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão,

foi lançada em 1997 para estudar as chuvas para pesquisa meteorológica e climática.

A média pluviométrica da região nos últimos 17 anos é de 1417 mm/ano. Houston possui verão e outono mais chuvosos, como é possível observar na **Figura 4**, que mostra as médias mensais da precipitação nos últimos 19 anos.

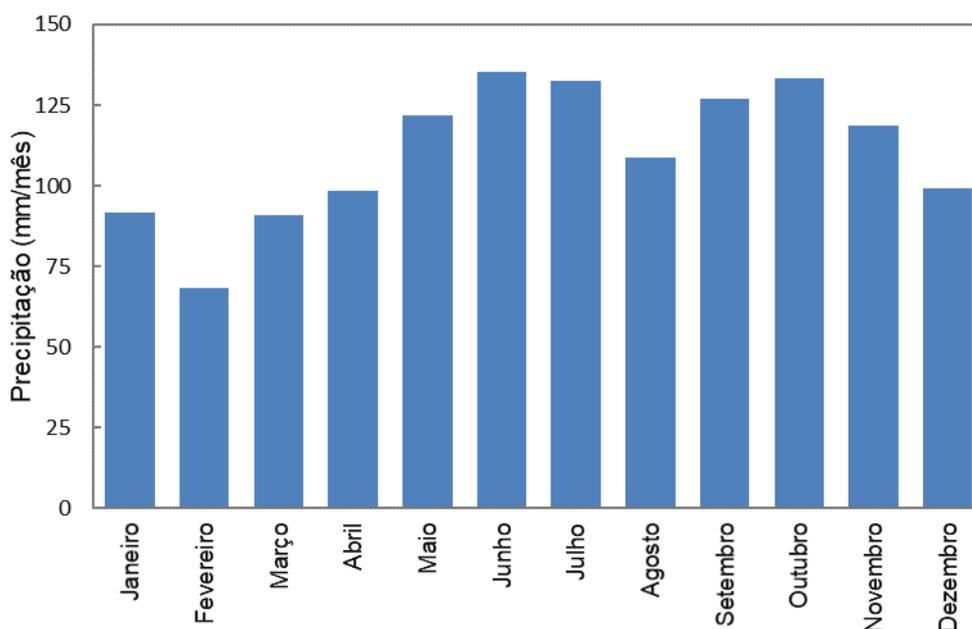


Figura 4. Médias mensais de precipitação na região de Houston para o período compreendido entre janeiro de 1998 e dezembro de 2016, obtidos a partir do produto TRMM 3B43. Fonte: Giovanni (NASA 2017)

É possível perceber um pequeno decréscimo da precipitação nos meses de inverno (dezembro – fevereiro). O mês de agosto, outono em Houston, apresentou uma média de 100 mm/mês ao longo do período analisado.

Entretanto, durante o evento extremo Harvey, os valores de precipitação registrados foram semelhantes à média anual, em apenas 4 dias. Os registros da localização do Aeroporto William P. Hobby registram 930 mm apenas nos 4 dias de evento. A maior quantidade de precipitação totalizou 1224,28 mm em um pluviômetro de *Clear Creek* e I-45 perto de Houston, Texas. Foi a maior quantidade de chuva em uma única tempestade para qualquer lugar nos Estados Unidos da América. (NOAA, 2017 b).

A Figura 5 a seguir mostra a precipitação acumulada na área atingida pelo Harvey no período entre 25 e 30 de agosto de 2017.

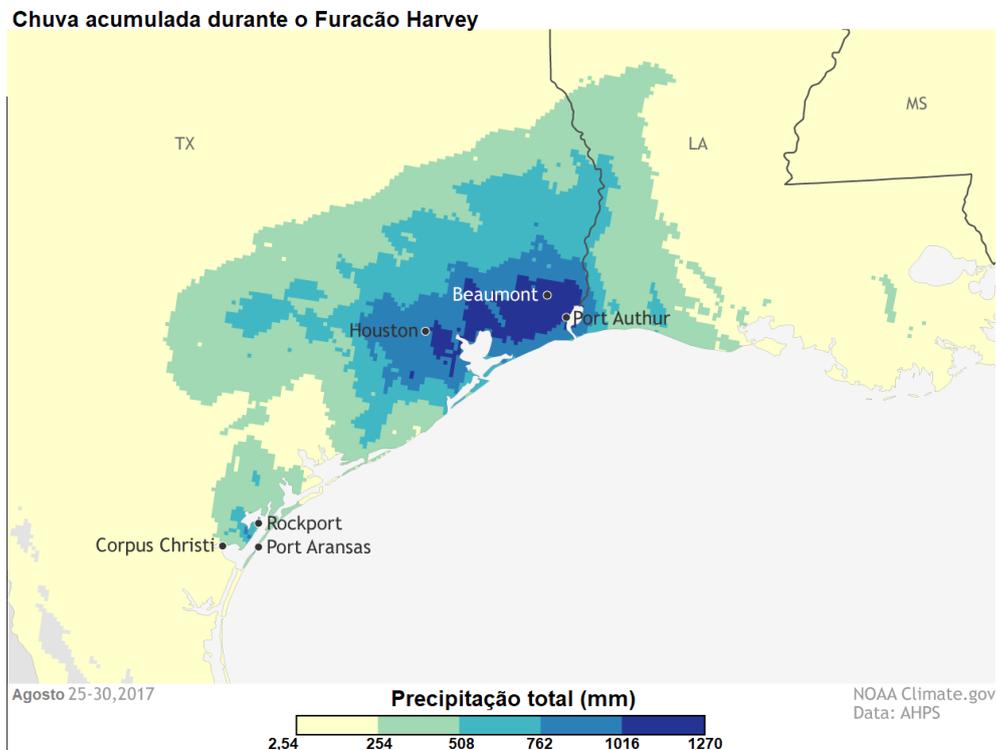


Figura 5. Precipitação acumulada durante o Harvey, entre os dias 25 e 30 de agosto de 2017. Fonte: NOAA 2017, adaptado.

A **Figura 6** apresenta a média da precipitação acumulada no período entre os dias 24 e 29 de agosto de 2017 na área anteriormente delimitada (conforme **Tabela 1**). Os dados, obtidos a partir da plataforma Giovanni (NASA), são oriundos do *Global Precipitation Measurement* (GPM) em resolução espacial de $0,1^\circ$. O conjunto de dados é produzido no Centro de Serviços de Informação e Dados (DISC) da NASA *Goddard Earth Sciences* (GES). A média dos valores corresponde a uma área de $2.444,75 \text{ km}^2$. Assim, a precipitação média acumulada na área foi de 480 mm ao longo de 5 dias.

A **Figura 7** apresenta os registros de chuva na estação pluviométrica localizada no Aeroporto de William P. Hobby, quando comparamos as duas imagens é perceptível como em locais próximos pode ocorrer uma grande variação da precipitação.

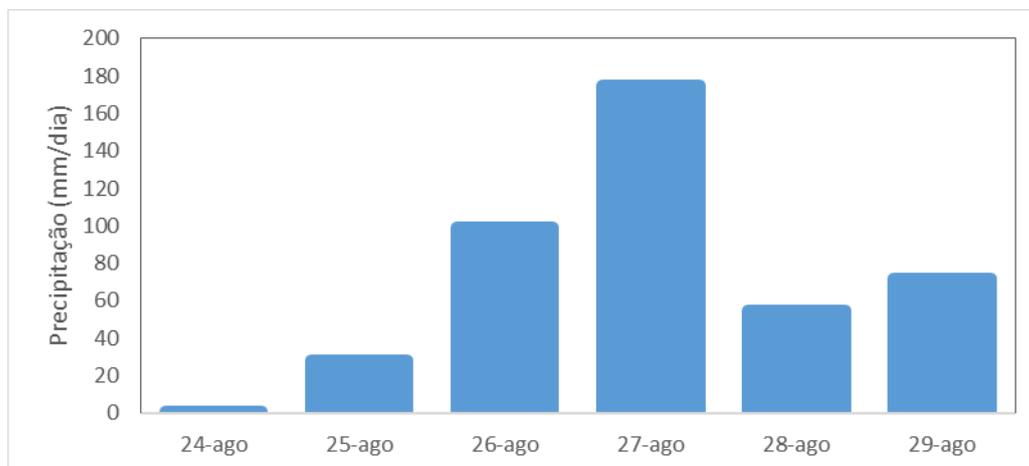


Figura 6. Estimativa média da precipitação acumulada (combinação com micro-ondas IR) entre os dias 24/08/2017 e 29/08/2017 na região de Houston, obtidos a partir do produto GPM 3IMERGGDL Versão 04. Fonte: Giovanni (NASA, 2017)

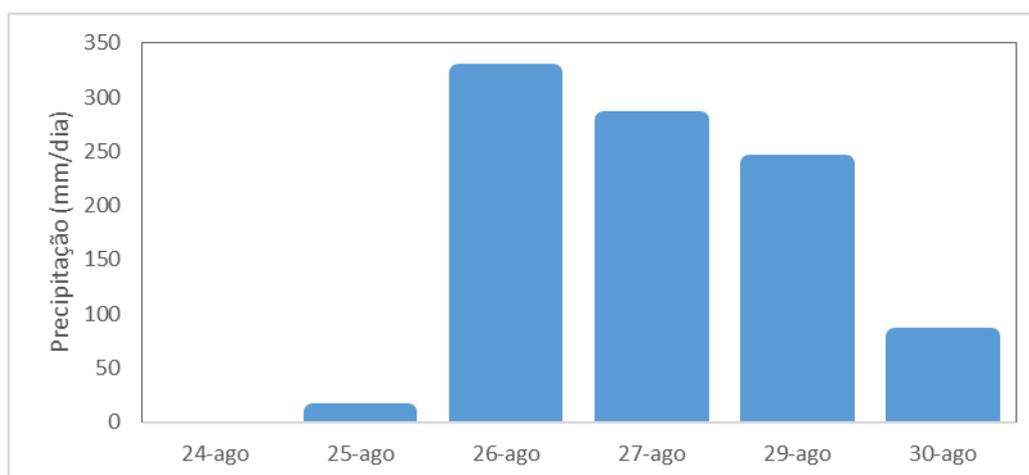


Figura 7. Precipitação registrada entre os dias 24/08/2017 e 29/08/2017 na estação pluviométrica no Aeroporto de Houston. Fonte: NWS (2017).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Problemáticas Recorrentes Relacionadas a Inundações

As enchentes são caracterizadas pelas águas de chuva, que ao alcançar um curso d'água, causam o aumento na vazão por certo período de tempo (TUCCI 2005). Este acréscimo na descarga d'água tem o nome de cheia ou enchente é um processo natural. Já a inundação é o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundação, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio. (BRASIL, 2007).

Nas áreas urbanas comumente os conceitos de inundações e alagamentos se confundem, no entanto, a principal diferença entre os dois é a causa. As inundações ocorrem quando a população ocupa as áreas naturais de extravasamento do rio. Já o alagamento é decorrente dos processos de urbanização como a remoção da cobertura vegetal e impermeabilização do solo. (BRASIL, 2007). Outra diferença fundamental entre os 2 processos é a forma de ocorrência. As inundações ocorrem de forma mais previsível associadas ao leito do rio, criando planícies de áreas contínuas. Já os alagamentos ocorrem de forma pontual e não necessariamente estão associados a um corpo d'água específico, mas a um sistema de drenagem. (BRASIL, 2007).

Historicamente, o ser humano convive com as inundações justamente em função da ocupação destas áreas inundáveis localizadas nas margens de corpos hídricos e seu estabelecimento a margens de rios com vistas ao desenvolvimento econômico-social, seja para o estabelecimento de centros urbanos ou ainda para o aproveitamento dos recursos hídricos na agricultura (RIGHI 2011). Entretanto, o desenvolvimento urbano sem o devido planejamento resulta em um aumento significativo na frequência das inundações, devido a ocupação das áreas ribeirinhas. Além disso, processos de produção de sedimentos e deterioração da qualidade da água são consequências deste processo (TUCCI 2005). As inundações geram grandes prejuízos

socioeconômicos, tanto para a população quanto para o poder público (FATMA, 1999). Tal forma de ocupação é comum na realidade brasileira, principalmente em áreas periféricas onde a ocupação de áreas de risco é comum, além do crescimento exponencial e desordenados dos centros urbanos, que acarretam na ocupação excessiva e sobrecarregam os sistemas de drenagem urbanos (BRASIL 2007).

Para a realização de mapeamentos e zoneamentos das áreas com risco de inundação, atualmente a metodologia proposta pelo Programa de Redução de Riscos do Ministério das Cidades (BRASIL, 2007), consiste em:

1. Primeiramente na identificação e delimitação das áreas de risco em fotos aéreas de levantamentos aerofotogramétricos, imagens de satélite, mapas, guias de ruas, ou outro material disponível compatível com a escala de trabalho;
2. A identificação de área de risco e de setores de risco (setorização preliminar) em fotos aéreas de baixa altitude (quando existir);
3. Os levantamentos de campo para setorização (ou confirmação, quando existir a pré-setorização),
4. O preenchimento da ficha de cadastro e uso de fotos de campo.
5. E por fim, o zoneamento de áreas de risco a inundação, resultando em diagnósticos e prognósticos locais das áreas com risco de inundação

No entanto a principal dificuldade consiste justamente nessa identificação preliminar das áreas sujeitas a eventos de inundação, e quando se trata de alagamentos, em função da sua efemeridade, a dificuldade se acentua. Uma das metodologias usuais para essa identificação consiste em simulações hidrológicas aliadas a modelos digitais de elevação, como proposto por Paula (2013) que utilizou dados históricos de precipitação e um modelo digital de terreno obtido através do modelo LIDAR, feito, a partir do modelo digital de terreno, o desenho automático da rede de escoamento superficial através da metodologia de Delineação Automática do Escoamento Superficial (AOFD – Automatic Overland Flow Delineation). (PAULA 2013). Uma metodologia

parecida foi adotada por Dos Santos e Da Rocha (2014) que realizou o mapeamento das inundações urbanas em Belém utilizando um modelo hidrológico, dados históricos com registros de alagamento e um MDE gerado a partir das cotas altimétricas do terreno correspondente a um voo aerofotogramétrico.

Entretanto, no Brasil, ainda é usual o mapeamento dos riscos de inundação e alagamento com bases em eventos anteriores, a exemplo do zoneamento das áreas inundáveis realizado no Plano Municipal de Saneamento Básico de Rio Grande/RS (SMMA/Rio Grande 2013). Em Rio Grande, o mapeamento dessas áreas foi realizado a partir de reuniões feitas com a população local, registros perante a prefeitura e informações de profissionais da prefeitura (SMMA Rio Grande 2013). Tal processo, ainda que seja usualmente empregado, depende ainda da fragilidade e imprecisão da memória dos moradores.

Uma metodologia mais simplificada foi adotada no município de Rio Negrinho/SC, onde o Plano Diretor do município estabeleceu como áreas com risco a inundação todas aquelas situadas em cota inferior a 792m (SMC Rio Negrinho, 2006) para o estabelecimento dessa cota foi utilizado como referência em dois grandes eventos de precipitação, ocorridos em 1983 e 1992 (SMC Rio Negrinho, 2006).

Giustarini et al (2013) já utilizaram imagens SAR para a realização desse mapeamento em áreas urbanas com imagens do TERRASAR-X. No entanto, a menor resolução temporal desse satélite dificulta a realização desse mapeamento, uma vez que para que seja possível mapear, o satélite deve realizar o sensoriamento da área enquanto as áreas urbanas encontram-se alagadas.

Assim, fica clara a necessidade dos mapeamentos, e o uso das imagens Sentinel-1, em função da sua periodicidade, mostra-se como uma potencial ferramenta para o mapeamento desses eventos. Além disso, no presente trabalho, foram utilizadas também informações oriundas da população local para a validação da máscara gerada. Uma metodologia semelhante a utilização das

entrevistas para identificar as áreas de inundações, através do mapeamento de pedidos de resgate no evento (GOOGLE 2017).

Em Houston, Khan (2005) estimou a relação da urbanização, precipitação e escoamento para a cidade. A expansão da área urbana foi avaliada através de mapas de uso de solo, o escoamento superficial e a precipitação foram obtidos a partir das bases de dados nacionais do clima. A análise mostrou a alta correlação histórica entre o aumento da urbanização e do escoamento superficial, e conseqüentemente alagamentos, na cidade.

Houston é o centro urbano que mais cresce nos EUA, atualmente é a 4ª maior cidade do país (US BUREAU OF CENSUS, 2010). Dessa forma, os eventos de inundação nestes grandes centros impactam significativamente grandes números de pessoas, causando além dos danos materiais às famílias afetadas, prejuízos a economia local, às diferentes esferas governamentais. O mapeamento das áreas afetadas mostra-se como uma saída o dimensionamento desses danos, além de ferramenta para prevenção de impactos futuros.

3.2 Fundamentos de sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto pode ser definido como “a coleta de informações, transportadas por radiação eletromagnética, sobre a superfície ou a atmosfera da Terra.” (REES, 2013 pág. 5) e também como ferramenta “para medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas na terra” (JENSEN e EPIPHANIO, 2011, pág. xxiii).

O imageamento remoto das áreas, que originalmente era realizado por câmeras montadas em aeronaves, permitiu uma nova forma de obter dados. (JENSEN & EPIPHANIO, 2011). O sensoriamento remoto é hoje uma das ferramentas que viabiliza de forma sistemática e com intervalo de tempo regular a obtenção de informações da superfície terrestre.

A coleta de dados é feita por sistemas passivos ou ativos, sendo a diferença entre eles a fonte da energia eletromagnética. Nos sensores passivos, a fonte de energia eletromagnética é o sol, nos ativos é o próprio equipamento (JENSEN & EPIPHANIO, 2011). Os sensores registram a energia que é refletida

ou emitida pelo objeto (MORAES, 2010). Os sensores operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético (REM), conforme demonstrado na **Figura 8**. O presente trabalho terá como foco um sensor operante na região do micro-ondas.

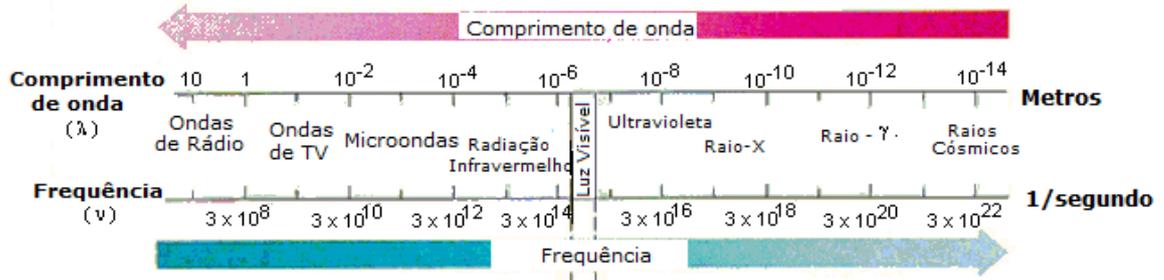


Figura 8. Espectro Eletromagnético. Fonte: Instituto de Física - UFRGS. 2003, adaptado.

Os sensores remotos ativos transmitem a energia para a superfície do terreno. Esta energia interage com o terreno e produz o retroespalhamento da energia e é este retroespalhamento que é medido e registrado pelo receptor do sensor remoto (MORAES, 2010)

Os sistemas de RADAR (*Radio Detection And Ranging*) estão compreendidos dentro da faixa das micro-ondas (BENEDETTI 2010). As micro-ondas podem ser divididas em bandas (**Figura 9**), sendo as mais comuns as bandas X, C e L. (DUTRA *et al*, 2003)

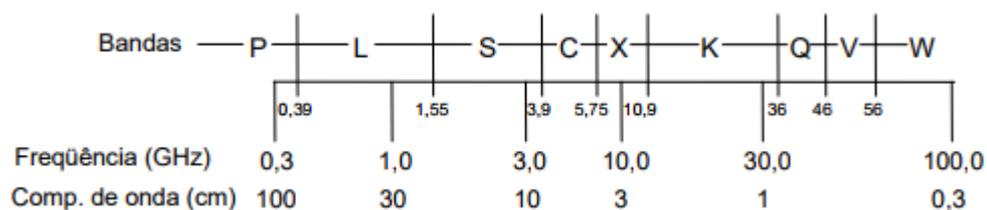


Figura 9. Bandas contidas na região do micro-ondas. Fonte: DUTRA *et al*, 2003.

As bandas L e C, sendo a banda C utilizada neste trabalho, apresentam a importante característica de não interagir com a água na atmosfera e por isso vêm sendo empregadas no mapeamento de áreas inundadas. (REES, 2013).

3.3 Sensoriamento Remoto de Micro-ondas Ativas

Diversas características diferenciam os sensores remotos e satélites. A fonte de energia, o tipo de órbita, a técnica de medição e suas resoluções.

As resoluções de um sensor são: espectral, espacial, azimutal, radiométrica e temporal. Brevemente pode-se definir resolução espectral como a sensibilidade de detecção remota dentro de um intervalo de comprimento de onda, ou seja, quanto mais fino (menor intervalo de comprimento de onda interceptado pelo sensor), melhor a diferenciação da superfície no comprimento de onda determinado. Em contrapartida, em razão das propriedades eletromagnéticas da superfície, cada superfície tem sua “assinatura” interagindo com comprimentos de onda específicos (MORAES, 2010).

A resolução espacial é definida como o “tamanho do pixel” – a menor unidade medida pelo sensor -, isto é, quão detalhada uma imagem pode ser. Em contrapartida, sensores com altas resoluções espaciais apresentam baixa cobertura da superfície, suas imagens cobrem uma área menor. (JENSEN & EPIPHANIO, 2011).

Já a resolução azimutal é a largura angular do feixe do pulso enviado pela antena (MENESES, 2012).

A resolução radiométrica corresponde ao número máximo de brilho disponível, que depende do número de bits utilizados na representação da energia registrada. Quanto maior a resolução, maior a distância radiométrica e mais nítida a imagem. Em sistemas de radar, a resolução radiométrica depende diretamente do tamanho da antena. (MORAES, 2010)

Por fim, a resolução temporal é o tempo de revisita do satélite, isto é, para um satélite não-geoestacionário, quanto tempo ele leva para registrar um mesmo ponto do globo (MORAES, 2010).

Os sistemas de RADAR são sistemas ativos e operam na região das micro-ondas. Os sistemas de radar são, geralmente, compostos por um transmissor, que fornece a radiação, um receptor, um modulador, um processador e uma antena (MORAES 2010)

A principal vantagem desse tipo de sensoriamento de imagem é a que os sensores radar (nas bandas L e C) permitem o sensoriamento dos alvos em qualquer condição meteorológica, pois o pulso de energia emitido penetra as nuvens e por emitirem sua própria energia (LIU CHANG, 2016). Esta característica é particularmente interessante para regiões tropicais, onde sensores ópticos sofrem grande restrição devido à alta probabilidade de ocorrência de nuvens (DUTRA *et al.*, 2003).

Os SLAR-RAR (Radares de Visada Lateral de Abertura Real) foram os primeiros sistemas imageadores por micro-ondas, desenvolvidos ainda na II Guerra Mundial para auxiliar os bombardeiros noturnos (JENSEN & EPIPHANIO, 2011). O SLAR é constituído de uma antena que emite radiação lateralmente para a superfície. A imagem é gerada durante a varredura sobre a área a ser recoberta. Entretanto, a resolução azimutal deste radar é diretamente proporcional à distância entre a antena e o alvo imageado, e inversamente proporcional ao comprimento de onda da antena utilizada no imageamento. Desta forma, para se obter uma melhor resolução azimutal, ou se diminuía a distância entre o radar e o alvo, ou se aumentava o comprimento da antena. (JENSEN & EPIPHANIO, 2011).

Para resolver este problema, foi desenvolvido o Radar de Abertura Sintética (SAR), na década de 50, que resolve os problemas do SLAR, uma vez que a resolução azimutal deste sistema independe da distância entre o radar e o alvo. Isto porque o SAR sintetiza em um processador de sinal uma antena com um tamanho extremamente grande (MORAES 2010), O sistema soluciona o problema anteriormente encontrado nos sistemas SLAR através da síntese de uma antena virtual, efetuando o registro acumulado dos sinais de retorno (**Figura 9**). Assim, o “sistema SAR permite o aumento da resolução espacial da imagem obtida do terreno independentemente da altitude da plataforma” (MORAES 2010 pág. 121).

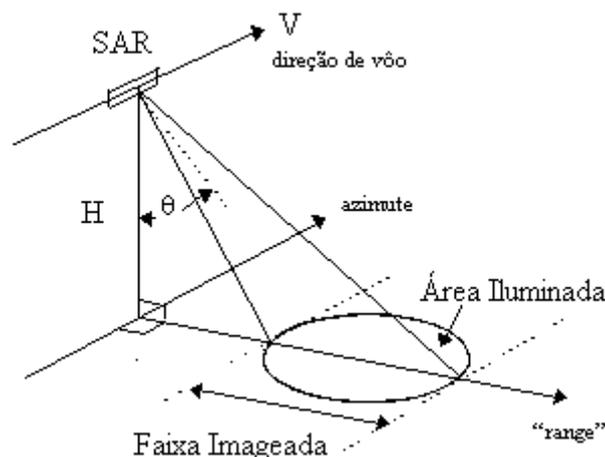


Figura 10. A geometria básica SAR. Fonte: INPE, 2006.

3.4 Retroespalhamento do alvo

Toda radiação recebida pela matéria é processada por ela de três formas: absorvida, transmitida ou refletida. O comportamento do retroespalhamento é afetado por dois conjuntos de variáveis: as relacionadas ao sistema radar (frequência, polarização, ângulo de incidência e resolução) e as ligadas ao alvo (rugosidade, constante dielétrica e geometria). (BENEDETTI, 2010)

O modo que as diferentes superfícies interagem com a radiação depende do comprimento de onda da energia emitida, assim a radiação refletida/retroespalhada (ou seja, a parcela medida pelos sensores remotos) é função do comprimento de onda. (MORAES, 2010). Essa interação característica é chamada de retroespalhamento do alvo.

Em função dos grandes comprimentos de onda de radar, a energia é baixa. Assim:

“A quantidade de energia dessas ondas é insuficiente para provocar uma mudança nos níveis energéticos dos átomos ou moléculas e, conseqüentemente, pouquíssima quantidade de energia incidente é absorvida pela matéria” (MENESES, 2012, pg. 70).)

A forma de interação da energia, no caso dos radares, depende muito mais da textura da superfície do que da composição do alvo. A rugosidade da superfície define o retroespalhamento do alvo. Superfícies mais rugosas retroespalham o sinal em todas as direções, enquanto superfícies lisas – com rugosidade menor que o comprimento de onda emitido - não retornam o sinal retroespalhado em direção à antena (JENSEN & EIPHANIO, 2011). O fenômeno é exemplificado pela **Figura 11**.

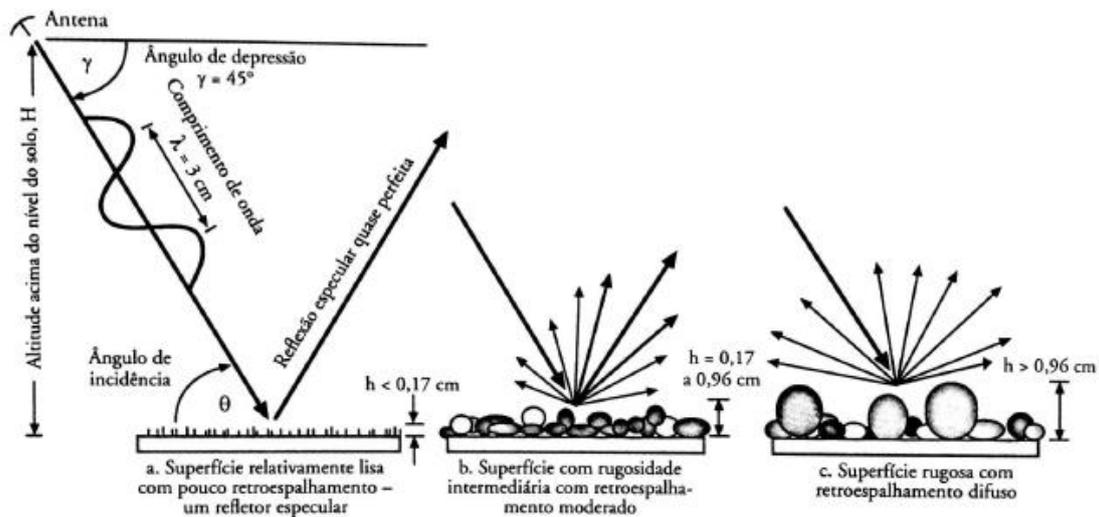


Figura 11. Retroespalhamento pela rugosidade superficial do terreno. Fonte: JENSEN & EIPHANIO, 2011.

A informação do alvo é transportada através das ondas eletromagnéticas que são definidas pela direção de propagação, amplitude, comprimento de onda (λ), polarização e fase (BENEDETTI, 2010).

Assim, nas áreas urbanas é possível realizar a separação dos alvos, na banda C, em consequência da sua diferença de rugosidade. (MENESES, 2012). Prédios, vegetações, monumentos e demais elementos típicos do cenário urbano apresentam alta rugosidade em relação aos corpos d'água que, por terem rugosidade menor que a o comprimento de ondas do radar, apresentam comportamento de uma superfície lisa. A clara diferenciação dos alvos é visível na **Figura 12**.

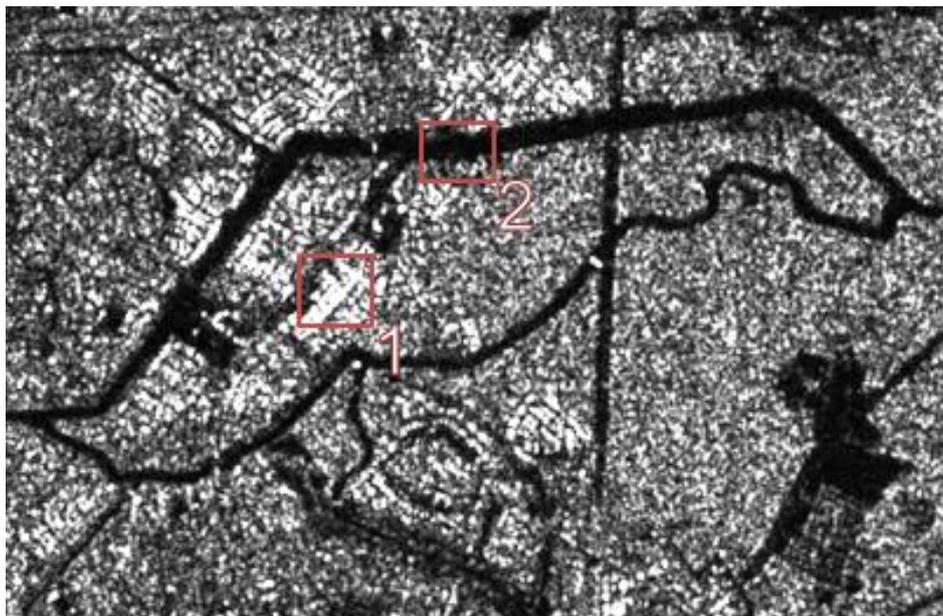


Figura 12. Imagem de radar da banda C, do satélite europeu Sentinel-1 e polarização HV, mostrando alvos especulares. 1) Edificações; 2) corpo d'água. Fonte: Elaboração própria.

3.5 Processamento de Imagens SAR

Talvez a maior desvantagem das imagens SAR sejam sua dificuldade de processamento (NASA 2017 B). Isto em razão de algumas distorções que acontecem durante o processo de obtenção de imagens SAR, tais distorções necessitam de correções prévias para a correta utilização das imagens obtidas. Elas podem ser divididas em radiométricas ou geométricas (DUTRA *et al*, 2003).

3.5.1 Distorções Radiométricas

Ocorrem por fatores inerentes ao instrumento e a geometria de iluminação. Essas distorções podem ser classificadas como: o ruído "speckle" e o efeito do padrão da antena. (BENEDETTI, 2010).

O ruídos das imagens de RADAR atribuem um aspecto granular a imagem, é um efeito de ruído multiplicativo proporcional a intensidade do sinal recebido, o (INPE, 2006) explica o fenômeno como:

“Considera-se que em uma célula de resolução de uma cena imageada, existam um número muito grande de elementos difusores, aleatoriamente distribuídos, de tal forma que esses elementos podem interferir uns aos

outros construtivamente e destrutivamente, fazendo aparecer variações súbitas na intensidade da imagem, caracterizando o ruído Speckle.”.

A correção desta distorção pode se dar por dois meios: processamento *multilooking* ou aplicação de filtros. O processamento *multilooking* divide o feixe do radar em vários sub-feixes, cada feixe gera um “olhar” na imagem, que estão sujeitos ao ruído, ao somar e calcular a média desses diferentes olhares ao mesmo tempo reduz-se o ruído da imagem final. Para a remoção do ruído também foram desenvolvidos filtros, que visam a melhoria da segregação entre os alvos da superfície com a menor perda da informação possível. Os filtros “analisam” a imagem pixel a pixel através de uma “janela” que se movimenta de forma ordenada – nos eixos x e y –, em cada pixel aplica um cálculo matemático (que varia de acordo com o tipo de filtro) e então substitui o valor do pixel central pelo valor calculado, promovendo um efeito de suavização (NASA 2017 B).

O efeito do padrão da antena causa variações de baixa frequência no brilho das imagens na direção de "range" que são causados pela perda de potência relacionada com a geometria de visada lateral, que decai com a razão $1/R^3$, onde R é a distância entre a antena e um dado ponto na imagem. Esta distorção é corrigida ainda pelo sensor, antes da obtenção da imagem pelo usuário final, através do STC (*Sensitivity Time Control*), visando a correção do decaimento da potência, ainda assim permanece alguma variação residual na imagem em função de imperfeições no sistema STC ou a perturbação na eletrônica do radar. (BENEDETTI, 2010)

Para a correção destas imperfeições residuais o algoritmo consiste em gerar um padrão da média das colunas da imagem, que pode ser gerado tanto por filtros como os explicados anteriormente como por ajuste por polinômio.

Após a filtragem do Padrão, a imagem pode ser corrigida. Um dos métodos de correção é o multiplicativo, que consiste em multiplicar o valor do pixel sendo processado, por um fator dado pela razão entre o valor médio do Padrão e o valor do Padrão ajustado.

$$V_c(i,j) = V(i,j) * \frac{\bar{P}}{P(j)} \quad (1)$$

Onde:

\bar{P} = valor médio do Padrão do retroespalhamento do alvo;

$P(j)$ = valor do Padrão ajustado;

$V(i,j)$ = valor do pixel sendo processado;

j = índice de coluna da imagem (direção do range).

3.5.2 Distorções Geométricas

As distorções geométricas se dão pelo processo de imageamento que se dá em visada lateral e são induzidas pelas mudanças de altitude do terreno ou ainda por fatores como a velocidade e direção da plataforma. As distorções podem ser classificadas como: sombra, encurtamento de rampa (*foreshortening*) e inversão (*layover*). (BENEDETTI, 2010)

O efeito mais simples de entender é o de sombra, que acontece quando parte da imagem não é iluminada pelo radar devido a geometria de visada e ao relevo.. Essa distorção é comumente encontrada em terrenos íngremes que são imageados com grandes ângulos de incidência, em detrimento disso, não há sinal retroespalhado recebido e as áreas são imageadas em tons escuros (BENEDITTI, 2010). A

Figura 13, a seguir, exemplifica o fenômeno.

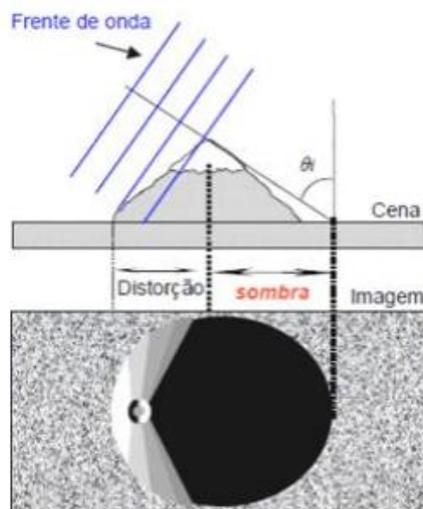


Figura 13. Sombreamento. Fonte: Beneditti, 2010.

O *foreshortening*, também chamado encurtamento de rampa, acontece quando a distância entre a encosta e o RADAR é menor em relação ao que seria se o mesmo terreno fosse plano, ou seja, quando a “rampa”, ou encosta, está de frente para a iluminação do RADAR de visada lateral (MORAES, 2010). Uma ilustração do efeito é mostrada na **Figura 14**.

O caso extremo do encurtamento é o *layover* (inversão) e ocorre quando o ângulo de incidência é menor do que a inclinação da rampa, então o topo de um alvo é imageado antes da base, causando inversão do terreno (BENEDITTI 2010). O efeito pode ser visualizado na **Figura 15**.

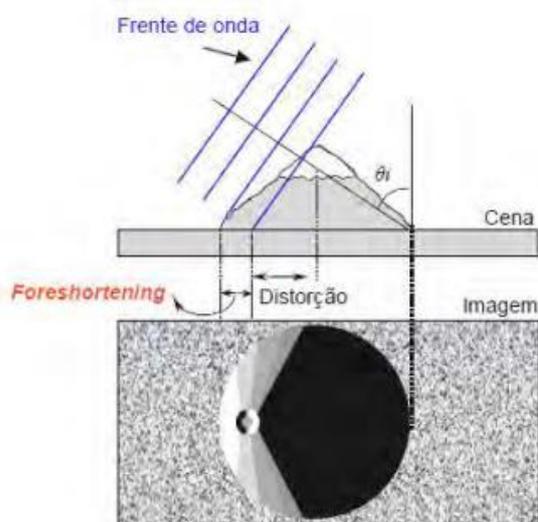


Figura 14. Encurtamento de Rampa. Fonte: Beneditti, 2010.

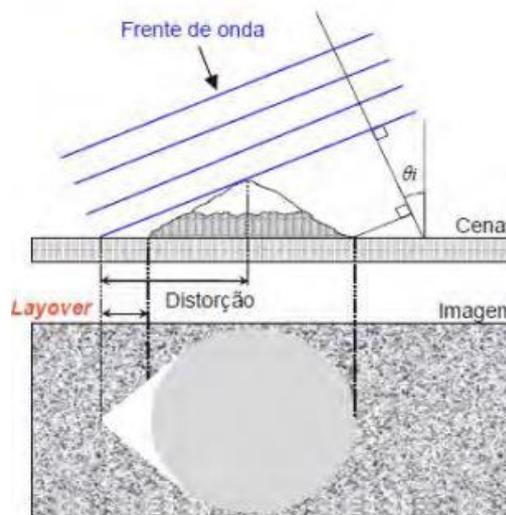


Figura 15. Inversão. Fonte: Beneditti, 2010.

Para a realização da correção das distorções geométricas são utilizados modelos digitais de elevação (MDE).

3.6 Programa Sentinel – ESA

Os Satélites Sentinel foram desenvolvidos pela ESA – European Space Agency – como integrantes do programa Copernicus, cujo objetivo é proporcionar produtos de alta confiabilidade, tempo de revisita melhorado – maior resolução temporal -, cobertura geográfica e rápida disseminação de dados para apoiar aplicações operacionais nas áreas prioritárias de monitoramento marinho, monitoramento de terras e serviços de emergência. Estes satélites constituem diferentes missões a fim de prover um banco de dados robusto para os Serviços Copernicus. Cada missão Sentinel é constituída de 2 satélites que operam em conjunto (ESA 2015a).

Cada missão possui diferentes tecnologias e atendem finalidades de mapeamento e monitoramento diferentes, entre imagens de radar e multi-espectrais para monitoramento terrestre, oceânico e atmosférico. As missões Sentinel são divididas da seguinte forma (ESA 2015a):

- **Sentinel-1** é uma missão de imagem de radar em órbita polar, para serviços terrestres e marítimos. O Sentinel 1A foi lançado em 3 de abril de 2014 e o Sentinel-1B em 25 de abril de 2016.
- **O Sentinel-2** é uma missão de imagens de alta resolução multiespectral de órbitas polares para o monitoramento da terra, por exemplo, imagens de vegetação, cobertura de solo e água, vias navegáveis e áreas costeiras. O Sentinel-2 também pode fornecer informações para serviços de emergência. Sentinel-2A foi lançado em 23 de junho de 2015 e Sentinel-2B seguido em 7 de março de 2017.
- **Sentinel-3** é uma missão multi-instrumento para medir a topografia da superfície do mar, a temperatura da superfície do mar e da terra, a cor do oceano e a cor da terra, com precisão e confiabilidade de ponta. A missão apoia os sistemas de previsão do oceano, bem como o monitoramento

ambiental e climático. O Sentinel-3A foi lançado em 16 de fevereiro de 2016.

O programa prevê, ainda, o lançamento de mais missões: Sentinel-4; Sentinel-5; Sentinel-5P; e Sentinel-6.

O presente trabalho utiliza as imagens obtidas pela primeira missão do programa, o Sentinel-1. As imagens do Sentinel-1 possuem resolução temporal de, em média, 6 dias e podem ser adquiridas gratuitamente pelo portal Copernicus da ESA. O instrumento de radar de abertura sintética (SAR) Sentinel-1 pode adquirir dados em quatro modos exclusivos:

- *Stripmap* (SM) - Um modo padrão de imagem de stripmap SAR, onde a faixa do solo é iluminada com uma seqüência contínua de pulsos, enquanto o feixe da antena está apontando para um ângulo de elevação e azimute fixo.
- *Interferometric Wide Wath* (IW) - Os dados são adquiridos em três faixas usando a técnica de imagem de Observação de Terreno com *Progressive Scan* (SAR) (TOPSAR). No modo IW, os feixes são sincronizados para garantir o alinhamento de pares interferométricos. IW é o principal modo operacional do Sentinel-1 sobre a terra.
- *Extra Wide swath* (EW) - Os dados são adquiridos em cinco faixas usando a técnica de imagem TOPSAR. O modo EW oferece uma cobertura de faixa muito grande à custa de resolução espacial menor.
- *Wave* (WV) - Os dados são adquiridos em faixas de *stripmap* pequenas chamadas "vinhetas", situadas a intervalos regulares de 100 km.. As vinhetas são adquiridas alternadas, adquirindo uma vinheta em um ângulo de incidência de alcance próximo, enquanto a próxima vinheta é adquirida em um ângulo de incidência de grande alcance. WV é o modo operacional do Sentinel-1 no oceano aberto.

Os produtos de dados Sentinel-1 distribuídos pela ESA incluem:

- Dados Raw Level-0 (para uso específico da ESA);

- Dados Complementares Processados de Nível Único (SLC) que compõem imagens complexas com amplitude e fase (distribuição sistemática limitada a áreas relevantes específicas);
- Fator de terra detectado (GRD) Dados de nível 1 com intensidade multifacetada somente (sistematicamente distribuído);
- Dados de Oceano de Nível 2 (OCN) para parâmetros geofísicos recuperados do oceano (distribuídos sistematicamente).

O Sentinel-1 opera na Banca C (com frequência de 5.405 GHz), suas resoluções espaciais dos produtos variam de 5 a 40m e a cobertura de 80 km a 400 km de largura (ESA 2015 A).

4 METODOLOGIA

O processamento da imagem se deu em 3 etapas, após sua obtenção no portal SCI-HUB, da ESA, é necessário o pré-processamento e a binarização da imagem para que seja possível separar a máscara de água do restante da imagem, e finalmente é realizada a correção geométrica. O processamento das imagens é realizado com o software SNAP[®]. Após esse processamento foi realizada a validação das máscaras de água. O fluxograma do processamento é apresentado na **Figura 16**.

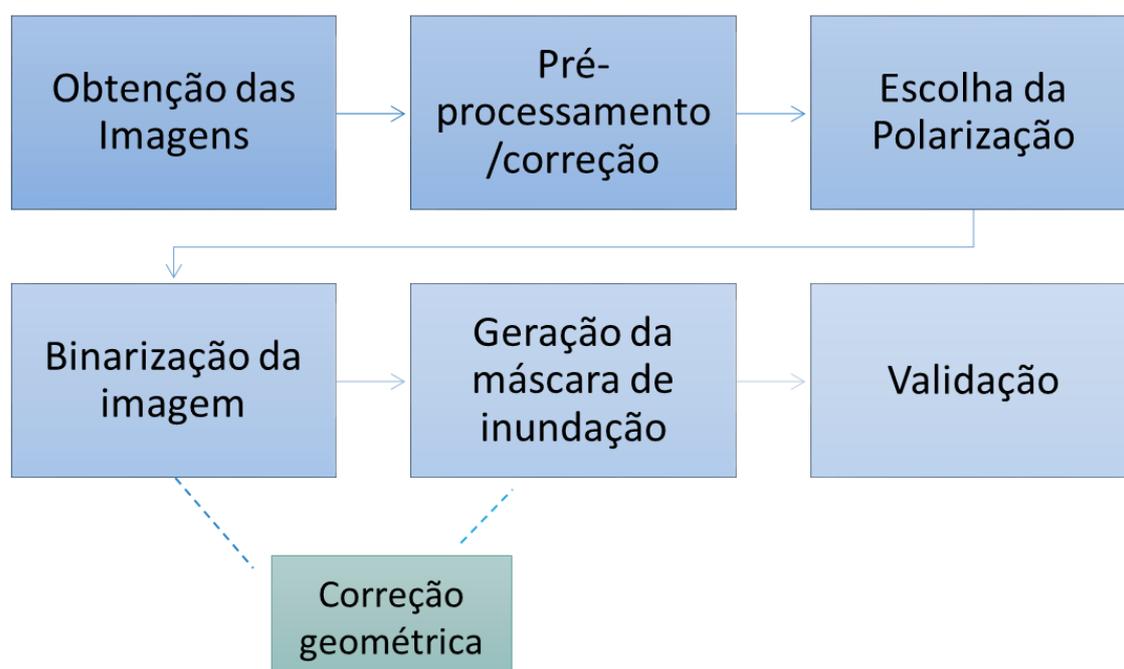


Figura 16. Fluxograma da metodologia adotada. Fonte: Elaboração Própria.

4.1 Obtenção da imagem

As imagens do programa Sentinel estão disponíveis no site <https://scihub.copernicus.eu/>, da Agência Espacial Européia. Para efetuar a pesquisa da imagem de interesse estão disponíveis diversos parâmetros, como a data de disponibilização da imagem na plataforma, a data de obtenção, o sensor. Para efetuar o *download* é necessário efetuar cadastro na plataforma.

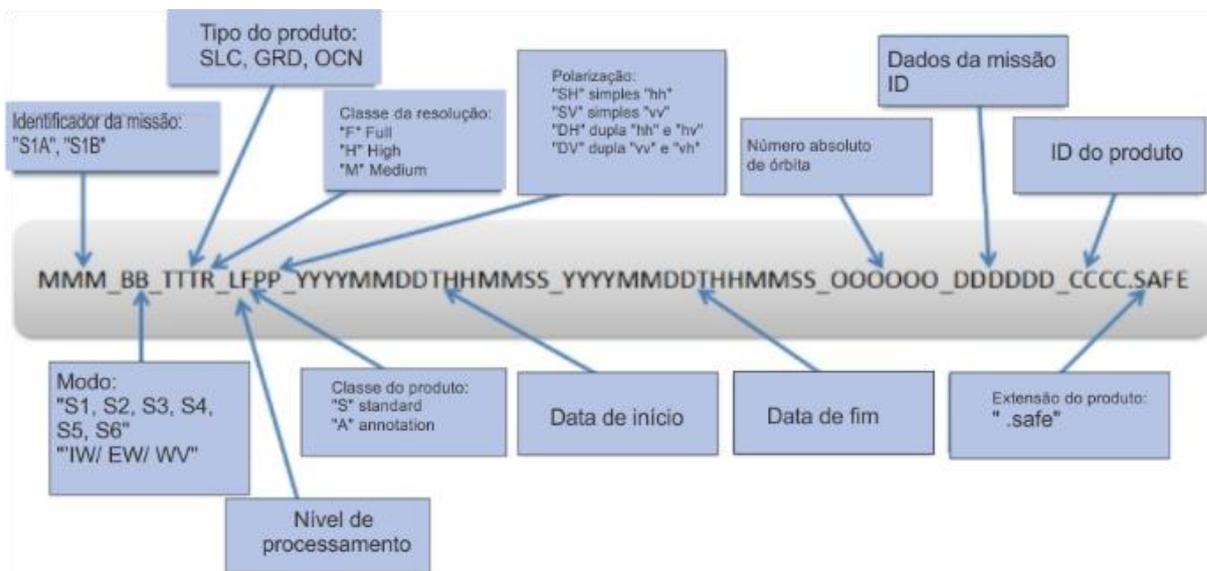


Figura 17. Informações nome do arquivo. Fonte: ESA 2015a

As principais informações sobre as imagens são disponíveis no nome do arquivo (Figura 17). As nomenclaturas dos arquivos obtidos mostram as seguintes características, de acordo com o manual de uso das imagens Sentinel (ESA, 2015):

S1A – Oriundos do primeiro sensor Sentinel 1 lançado (Sentinel 1-A).

IW –O modo *Interferometric Wide swath* é o principal modo de aquisição em terra. Ele adquire dados com uma faixa de 250 km a uma resolução espacial de 5 m por 20 m. Durante o processo de imagem de aquisição da imagem o feixe é dirigido em alcance como scanner (Figura 18) e também é eletronicamente dirigido de trás para frente na direção do azimute resultando em qualidade de imagem homogênea em toda a faixa.

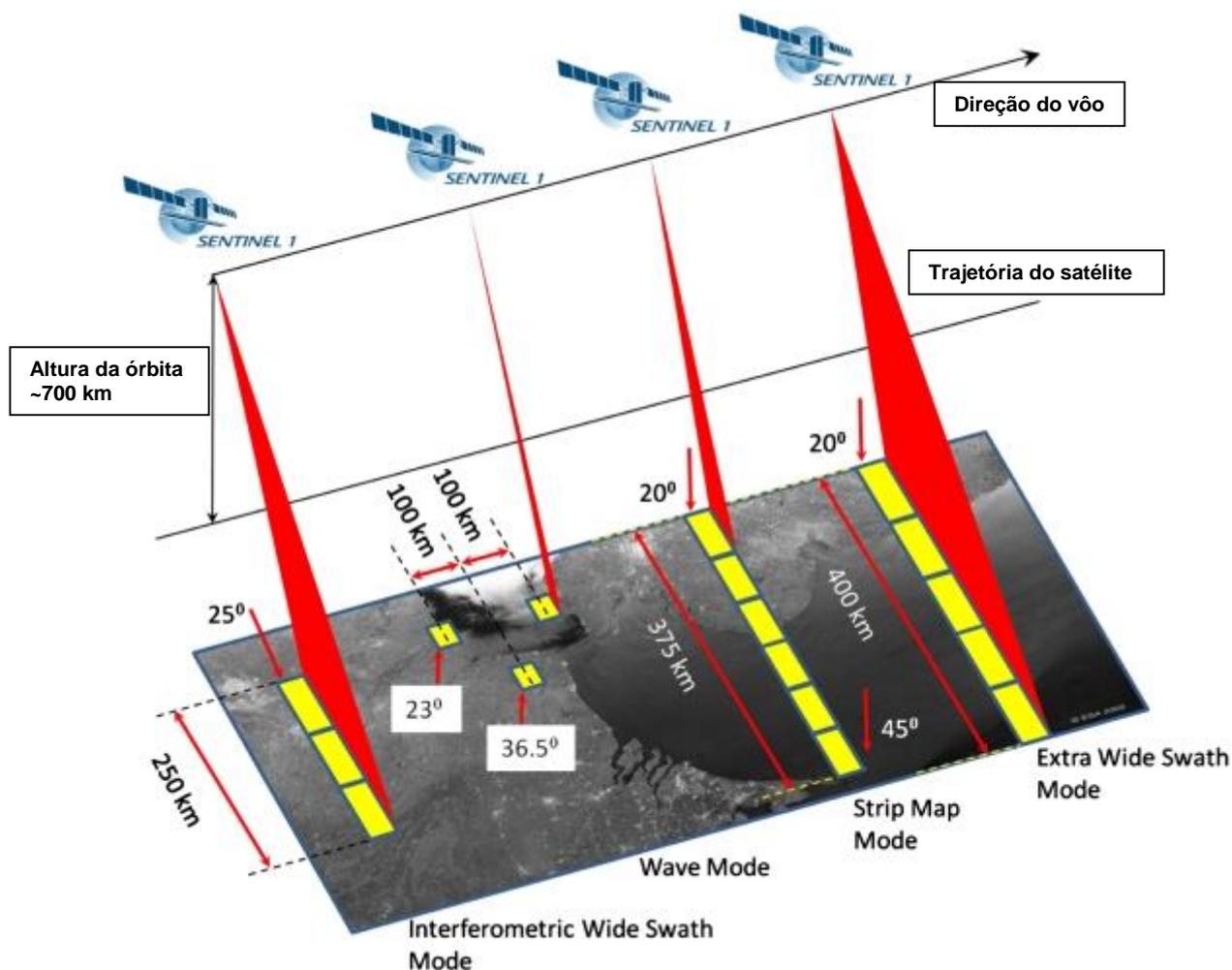


Figura 18. Modos do produto Sentinel-1. Fonte: ESA 2015a, adaptado.

GRD - Os produtos de nível 1 detectados (GRD) do nível 1 consistem em dados SAR focalizados que foram detectados, com “*multilook*” e projetados para o nível do solo utilizando um modelo de elipsoide da Terra, como o WGS84. A projeção do elipsoide dos produtos GRD é corrigida usando a altura do terreno especificada na anotação geral do produto. A altura do terreno utilizada varia em azimute, mas é constante no alcance. A principal diferença entre os dados *Single Look Complex* (SLC) e *Ground Range Detected* (GRD) é que os arquivos GRD não mantêm a informação de fase. O produto resultante tem pixels de resolução quadrada e espaçamento de pixels quadrados com *speckle* reduzido a um custo de resolução espacial reduzida. A preferência por este modo de aquisição se

deu justamente em função da redução de ruído em relação ao modo SLC, já que este é um fator importante a ser considerado principalmente em áreas urbanas.

H – Resolução alta, resolução espacial de 10 m. Número de *looks* 5x1, número relativo de looks 4,9 e resolução azimutal de 20 x 22 m. A resolução para um produto GRD corresponde ao valor de intervalo médio em altitude de órbita média, em média em todas as faixas. O número equivalente de looks (ENL) para produtos IW e EW GRD corresponde a uma média em todas as faixas.

SDV – dupla polarização na vertical, Vertical-Horizontal (VH) e Vertical-Vertical (VV). A polarização é referente a polarização de emissão e recepção do sinal do sensor, neste caso a polarização VH emite o sinal na vertical e recebe na horizontal, já a polarização VV emite e recebe na vertical.

018131 e 018065 - número de orbitas.

4.2 Calibração

A calibração é necessária pois o processo de obtenção da imagem em visada lateral juntamente com as características da antena utilizada apresenta um resultado radiometricamente descalibrado, de maneira que a imagem apresenta variações de intensidade (DA SILVA ROSA, 2009)

A imagem obtida, tipo 1, não inclui correções radiométricas e permanece a inclinação oblíqua do processo de visada lateral. Assim, é necessário aplicar a correção radiométrica às imagens SAR, de modo que os valores de pixel das imagens SAR representem verdadeiramente o retroespalhamento do radar da superfície. Este processo torna a comparação entre imagens SAR viáveis, sejam elas adquiridas de diferentes sensores ou do mesmo sensor, mas em datas diferentes (ESA 2015b).

O sinal emitido pelo sensor é estruturado na forma de um dado complexo, decomposto em duas partes: sinal em fase (I: FASE) e sinal em quadratura de fase (Q: Quadratura). A partir desse dado podem ser obtidos em amplitude (equação 1) e em intensidade (amplitude ao quadrado). (BENEDETTI, 2010).

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2)$$

Onde:

A é a amplitude;

I é a fase; e

Q é a quadratura.

Quando normalizados essa refletividade média, obtemos o coeficiente de retroespalhamento, dado por sigma zero (σ_0) (ULABY et al., 1981). Essa normalização é importante para que os dados possam ser comparados e utilizados como referência para outras pesquisas.

Os produtos de nível 1 fornecem quatro tabelas de pesquisa de calibração (*Look Up Tables* - LUTs) para produzir as bandas gama, sigma e beta ou para retornar ao número digital (DN). Para os produtos GRD (*Ground Range Detected*) o DN é o nível de cinza (Digital Number) da imagem em amplitude, que corresponde à razão entre o fluxo radiante (energia total radiada em todas as direções por unidade de tempo) retroespalhada e a incidente (NASA, 2017a).

Os LUTs são característicos para cada modo de obtenção de imagem. Para os produtos GRD também é aplicado um deslocamento constante. Para as imagens GRD o LUT aplicado gera uma banda denominada de Sigma 0. A banda Sigma 0 é o produto da equação (3) abaixo.

$$\sigma_0 = \frac{DN^2}{A_{dn}^2 \cdot K} \cdot \frac{1}{G_{eap}^2} \cdot \left(\frac{R}{R_{ref}}\right)^3 \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (3)$$

Onde:

$\frac{1}{G_{eap}^2}$ é a correção do padrão de antena de elevação (EAP),

$\left(\frac{R}{R_{ref}}\right)^3$ é a correção de perda de espalhamento de faixa (*Range Spreading Loss RSL*),

A_{dn} é a escala final do produto do SLC interno ao final SLC ou GRD,

α é o ângulo de incidência local.

No entanto, a correção RSL e EAP é aplicada nos produtos Sentinel-1 anteriormente a obtenção do usuário final, assim a calibração feita pelo usuário é expressa pela equação (4) (ESA 2015b).

$$\sigma_0 = \frac{DN^2}{A_{dn}^2 \cdot K} \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (4)$$

Assim, ao final da calibração radiométrica da imagem, ela possui valores “normalizados”, tornando imagens obtidas por diferentes sensores, ou pelo mesmo sendo, mas em períodos diferentes, comparáveis (ESA 2015b)

4.3 Filtro de *Speckle*

A redução do ruído *speckle* em imagens SAR é realizada pelo processamento *multilooking* ou através de filtragem espacial. O *speckle* é causado pela interferência construtiva e destrutiva, que ocorre de forma aleatória, para a redução desse ruído os filtros convencionais utilizam uma janela móvel, que percorre a imagem. Esta janela tem forma quadrada e tamanho ímpar (3x3, 5x5, 7x7).

Em função do efeito multiplicativo do ruído, os filtros baseiam-se na premissa que o valor de um pixel da imagem é uma variável aleatória (Y), sendo Y produto de duas outras variáveis aleatórias: o ruído *speckle* (N) e o retroespalhamento da cena imageada (X). (Sant’anna *et al.*, 2001).

$$Y = X \cdot N. \quad (5)$$

A filtragem realiza a substituição do valor do pixel central da janela de processamento (Y) por algum atributo estimado a partir dos valores dos pixels desta janela. Para tanto é considerado que o ruído possui média unitária e variância σ^2_N , não correlacionado com o sinal emitido. Para a aplicação do filtro foi usada a janela 5x5 e o processo de seu em ambiente do software SNAP. A janela 5X5 é a menor disponível no software para o filtro escolhido, optou-se por esse tamanho uma vez que janelas maiores geram maiores suavizações, podendo interferir nas bordas das feições.

4.3.1 Filtro Lee Sigma

Este filtro substitui o valor do pixel central da janela de filtragem pela média aritmética dos pixels que se encontram dentro do intervalo de dois desvios padrões em torno do valor do pixel central, para isso considera-se que o ruído possui distribuição Gaussiana e é aditivo ao sinal emitido pelo sensor (LEE,1981).

4.4 Escolha da polarização adequada

As imagens foram obtidas em duas polarizações Horizontal-Vertical (HV) e Vertical-Vertical (VV). O critério para a escolha da polarização se deu através da análise do histograma das imagens, percebendo qual polarização apresentava maior separação das classes de água e não-água através da distribuição dos valores.

4.5 Binarização da imagem

O processo de separação da imagem se deu após a avaliação do resultado da análise nas duas polarizações disponíveis das imagens.

Para a realização da binarização é observada a distribuição dos valores dos *pixels* em um histograma do coeficiente de retroespalhamento da imagem filtrada. Para a melhor visualização e compreensão dos dados é aplicada a escala logarítmica. Assim, o histograma mostra picos de diferentes grandezas. Os menores valores de retroespalhamento são classificados como água e os mais elevados como “não-água”, para essa separação é escolhido um limiar.

Após a escolha desse limiar foi criada uma nova banda virtual na imagem através da regra de decisão:

$$255 * (\textit{intensidade} < \textit{limiar}) \quad (6)$$

A aplicação da equação (6) gera uma imagem binária, onde os as áreas consideradas como água (valores menores que o limiar), são multiplicados por 255 (próximo ao valor máximo de retroespalhamento possível em razão da resolução radiométrica) e os valores considerados como “não-água”, então, passam a ter valores muito inferiores. O resultado é uma imagem visualmente

binária, em que as áreas consideradas água ficam com os maiores valores (brancas, mais brilhantes) e o restante da imagem preta (valores muito inferiores).

4.6 Correção Geométrica

Após o processamento das imagens, as mesmas foram geometricamente corrigidas usando a correção de terreno do tipo *range-doppler*. O modelo digital de elevação utilizado para a correção foi o SRTM com espaçamento entre pixels de 90m, com reamostragem para 10m, de forma a se tornar compatível com a resolução da imagem Sentinel 1A-GRD. O sistema de coordenadas usado foi o WGS84.

Devido às variações topográficas da cena e à inclinação do sensor de satélite, as distâncias podem ser distorcidas nas imagens SAR. Os dados da imagem não diretamente na localização do sensor terão alguma distorção. As correções do terreno destinam-se a compensar essas distorções para que a representação geométrica da imagem seja a mais próxima possível do mundo real (ESA, 2015a).

4.6.1 Ortoretificação

O Operador de Correção de Terreno Doppler de alcance implementa o método de ortoretificação *range-doppler* para geocodificar imagens SAR a partir de uma única geometria de radar 2D *raster*. Ele usa informações vetoriais de estado da órbita disponíveis nos metadados, as anotações de tempo de radar, os parâmetros de conversão de inclinação para terra e os dados de referência de MDE para obter informações de geolocalização precisas (ESA 2015a).

4.7 Análise da máscara gerada

Uma vez que a separação entre água e não água se dá através da escolha de um limiar, foram atribuídos 3 limiares e após isso a escolha destes foram observados segundo os seguintes critérios:

1. Limiar capaz de realizar a separação correta dos corpos d'água conhecidos, como as baías e represas;

2. Limiar que não apresentasse interrupção dos trechos de água conhecidos ou que apresentassem menos interrupções, haja vista que os cursos d'água na região são perenes e contínuos.

Conjuntamente a estes pontos, também foram consideradas critérios para a validação da máscara gerada e sobrepostas informações de pontos conhecidos de inundação.

4.7.1 Validação da imagem gerada

Para validação das imagens do dia 29 de agosto de 2017, foram utilizadas 4 diferentes fontes de informações que pudessem validar a máscara de inundação gerada:

1. Máscara d'água NDWI (Índice de diferença normalizada da água ou *Normalized Difference Water Index*) gerada a partir de imagem Sentinel 2 do dia 31 de julho de 2017.
2. As feições de manchas de inundação disponibilizadas pelo *US National Flood Insurance Program* (NFIP);
3. Fotos áreas dos locais alagados, obtidas a partir da Patrulha Civil Aérea (USGS, 2017);
4. Pedidos de Resgate geolocalizados pelo *Google Crisis*

4.7.1.1 Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) e Índice de Diferença Normalizada da Água Modificado (MNDWI)

O intuito do NDWI é delimitar feições de água superficiais, criando um limiar automático entre água e terra. O processo é baseado na maximização da refletância típica da água, utilizando o comprimento de onda do verde e minimizar a refletância da mesma feição no infravermelho próximo (NIR). Assim, a diferença de contraste é realçada entre água e cobertura vegetal no NIR (MCFEETERS, 1996)

$$NDWI = \frac{VERDE - NIR}{VERDE + NIR} \quad (7)$$

Onde:

NDWI é o índice normalizado de diferença de água;

VERDE é a banda verde correspondente de cor verde (490 – 580 nm); e

NIR é a banda do infravermelho próximo (750 – 910 nm).

No entanto, segundo Xu (2006), em áreas urbanas sugere-se a adaptação da fórmula acima, usando a banda MIR (infravermelho médio) invés da NIR. A modificação do NDWI usando uma banda MIR em vez de uma banda NIR pode melhorar consideravelmente o aprimoramento de recursos de águas abertas, principalmente em áreas urbanas, onde ocorre uma superestimação das áreas consideradas como feições de água pelo modelo NDWI (XU 2006)

$$MNDWI = \frac{VERDE - MIR}{VERDE + MIR} \quad (8)$$

Onde:

MNDWI é o índice normalizado de diferença de água modificado;

VERDE é a banda verde correspondente de cor verde (490 – 580 nm); e

MIR é a banda do infravermelho médio (1550 – 1690 nm).

Os produtos da missão Sentinel 2 apresentam características de obtenção diferentes em relação a primeira missão Sentinel, por se tratar de sensores passivos, as imagens só são obtidas em períodos diurnos sem cobertura de nuvens, suas bandas interagem com a atmosfera, assim, as imagens estão sujeitas as condições climáticas uma vez que seu sinal interage com obstáculos entre o sensor e os alvos. Buscou-se imagens para o ano de 2017 e anteriores ao Harvey que apresentassem cobertura de nuvens inferiores a 10%. O produto do Sentinel-2 possui 13 bandas multiespectrais conforme a **Tabela 2.**

Tabela 2. Bandas espectrais para os sensores Sentinel-2 (S2A e S2B). Fonte: ESA (2015)

Número da Banda	S2A		S2B		Resolução Espacial (m)
	Comprimento de onda central (nm)	Largura da banda (nm)	Comprimento de onda central (nm)	Largura da banda (nm)	
1	443.9	27	442.3	45	60
2	496.6	98	492.1	98	10
3	560.0	45	559	46	10
4	664.5	38	665	39	10
5	703.9	19	703.8	20	20
6	740.2	18	739.1	18	20
7	782.5	28	779.7	28	20

Número da Banda	S2A		S2B		Resolução Espacial (m)
	Comprimento de onda central (nm)	Largura da banda (nm)	Comprimento de onda central (nm)	Largura da banda (nm)	
8	835.1	145	833	133	10
8a	864.8	33	864	32	20
9	945.0	26	943.2	27	60
10	1373.5	75	1376.9	76	60
11	1613.7	143	1610.4	141	20
12	2202.4	242	2185.7	238	20

Em virtude da diferença da resolução espacial das bandas Verde e MIR nos produtos Sentinel 2, fez-se necessário a reamostragem da imagem anteriormente ao processo de geração da máscara MNDWI.

Para tanto, definiu-se a nova resolução espacial para todas as bandas e então foi aplicado o “método vizinho” de interpolação espacial, onde cada valor de pixel no produto de saída é configurado para o valor de pixel de entrada mais próximo.

As máscaras geradas serviram como base para a identificação das feições de água permanentes, como rios, córregos, reservatórios e a própria Baía de Galveston.LL

4.7.1.2 US National Flood Insurance Program –Programa Nacional de Segurança Contra Inundações

A Agência Federal de Gestão de Emergências (*Federal Emergency Management Agency – FEMA*) fornece informações quanto aos riscos de inundação como parte do Programa Nacional de Segurança contra as Inundações. O programa é uma compilação de bases de dados e estudos usados, entre outras coisas, como base para taxas de seguro de inundações. Os mapas estão disponíveis por condados da federação e apresentam zonas de classificação quanto ao risco de inundação. Para o presente trabalho foi considerada a zona identificada como 0,2% de chance de inundação anual.

4.7.1.3 Fotos áreas

No dia 01 de setembro de 2017 a Patrulha Civil realizou sobrevoo em diferentes áreas do município de Houston e registrou imagens áreas de diversas áreas. As imagens foram disponibilizadas em um mapa interativo no portal *United*

States Geological Survey (USGS) com a finalidade de suporte ao evento extremo. Algumas dessas imagens foram selecionadas para realizar a comparação entre as máscaras de d'água geradas e os registros feitos.

4.7.1.4 Pedidos de Resgate pelo Google Crisis

A ferramenta de suporte a emergências lançada pelo Google, tem por objetivo tornar a informação crítica mais acessível em torno de catástrofes naturais e crises humanitárias (GOOGLE 2017). Assim, em grandes eventos a plataforma online disponibiliza um mapa de resgate, onde pessoas na área podem pedir ajuda informando dados básicos, além da localização.

O mapa de resgate durante a passagem do furacão Harvey teve mais de 300 registros. A fim de selecionar os pontos de maior confiança foram escolhidas palavras chaves como critério de seleção. Entende-se que isso se faz necessário, pois nem todos os pedidos de resgate nesse evento estavam relacionados com áreas de inundação. A exemplo disso são os alertas de mulheres em trabalho de parto. As palavras chaves selecionadas são apresentadas na **Tabela 4**.

Tabela 3. Palavras-chave selecionadas para identificação dos pedidos de resgate através do sistema *Gogle Crisis*.

Palavra-chave	Tradução
"Flood"	Inundação
"Flooded"	"Inundado"
" <i>Water rising up</i> "	"Água subindo"
" <i>High water level</i> "	"Alto nível da água"
" <i>water level</i> "	"nível da água"
" <i>water in home</i> "	"água em casa"
" <i>water in garage</i> "	"água na garagem"
" <i>water up</i> "	"água subindo"

Foi realizado download dos dados em formato *Keyhole Markup Language* (kml), posteriormente eles foram importados no software ArcMAP e então realizada a filtragem acima descrita.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Obtenção das imagens

As duas imagens analisadas foram obtidas a partir da plataforma Copernicus Sci-Hub, referentes ao dia 29 de agosto de 2017, isto porque a área urbana da cidade de Houston foi dividida entre essas duas imagens. A **Tabela 4** apresenta os limites geográficos de cada imagem.

Tabela 4. Limites geográficos das duas imagens Sentinel 1 processadas para obtenção das áreas de inundação urbana em Houston.

Data	Código da imagem	Arquivo	Coordenadas dos Limites	
29 de agosto de 2017	S1A_IW_GRDH_1SDV_20170829T002620_20170829T002645_018131_01E74D_D734.SAFE	Imagem 1S	Oeste	-97.288635
			Norte	29.954920
			Leste	-94.382553
			Sul	28.034847
	S1A_IW_GRDH_1SDV_20170829T002645_20170829T002710_018131_01E74D_3220.SAFE	Imagem 1N	Oeste	-97.457542
			Norte	31.041809,
			Leste	-94.514175
			Sul	28.842278,

5.2 Calibração Radiométrica

As imagens obtidas possuem as bandas de Amplitude e Intensidade para ambas as polarizações disponíveis neste produto, sendo a banda de Intensidade uma banda virtual que consiste na banda de Amplitude elevada ao quadrado, tendo, assim, maior contraste. O processamento das imagens foi realizado a partir da banda de Intensidade.

O processo de calibração foi realizado no ambiente do software SNAP, o processo resulta em duas novas bandas, uma para cada polarização. O arquivo de saída pode ser 3 diferentes tipos de bandas: sigma, gama e beta. A diferença entre as bandas de saída se dá em função do LUT específico para cada uma delas. Utilizou-se a calibração sigma, padrão para imagens GRD.

A **Figura 19** apresenta um recorte da imagem 1S com e sem a calibração radiométrica.

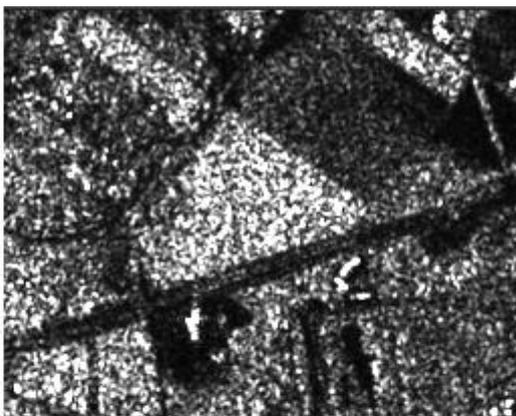
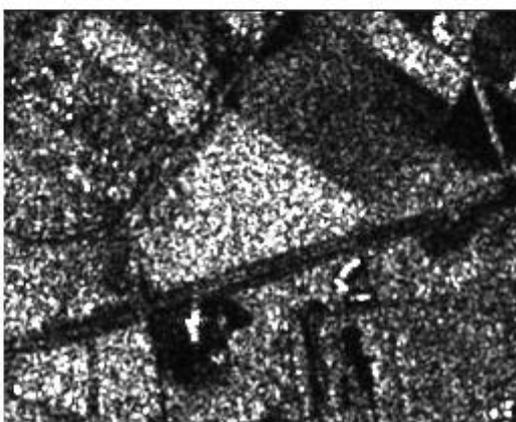
Antes**Depois**

Figura 19. Amostra da Imagem 1N na polarização VH antes e depois da calibração radiométrica. Fonte: Elaboração própria

Visualmente a calibração não apresenta diferenças significativas, porém quando observamos o histograma dos dados é perceptível a mudança dos valores dos pixels. A **Figura 19** mostra o histograma da imagem antes e depois da calibração onde percebemos a mudança na ordem de grandeza dos valores. Essa diferença nos valores, porém mantendo as características, é o que torna as imagens compatíveis para análise tornando a comparação entre imagens SAR viáveis, sejam elas adquiridas de diferentes sensores ou do mesmo sensor, mas em datas diferentes.

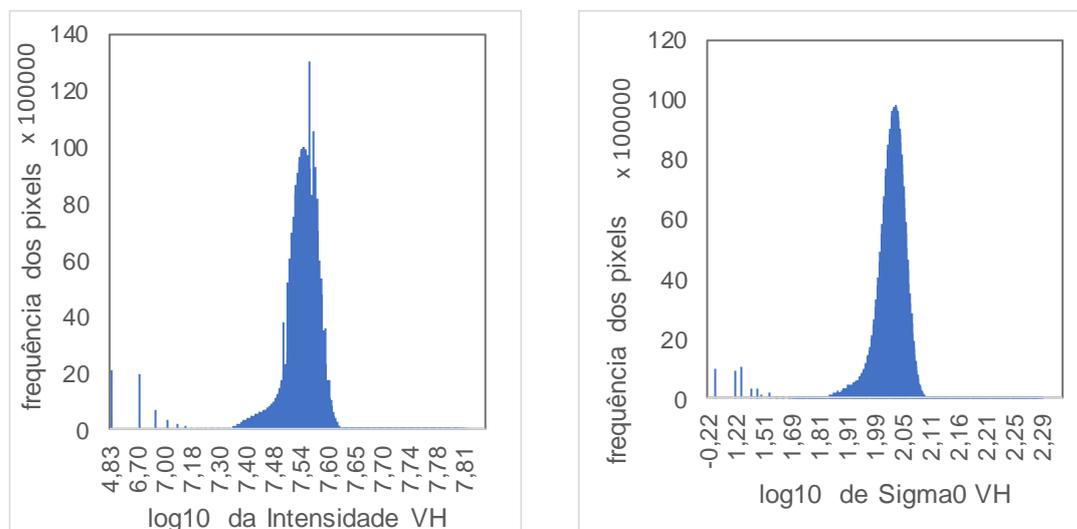


Figura 20. Histograma da imagem 1N antes e depois da calibração. Fonte: Elaboração própria

Os histogramas apresentados acima são o resultado dos intervalos de valores dos dados da imagem geofísica dividido uniformemente em “caixas”. O histograma mostra quantos pixels da imagem caem em cada uma das caixas, para os histogramas foram adotadas 512 caixas (padrão do software).

5.3 Filtragem e Análise das Polarizações

Após a calibração foi aplicado o filtro *Lee Sigma*, com uma janela de 5X5 nas duas imagens e em ambas as polarizações para a redução do ruído *speckle*. A exemplo a **Figura 21** mostra a comparação do filtro em uma mesma área.

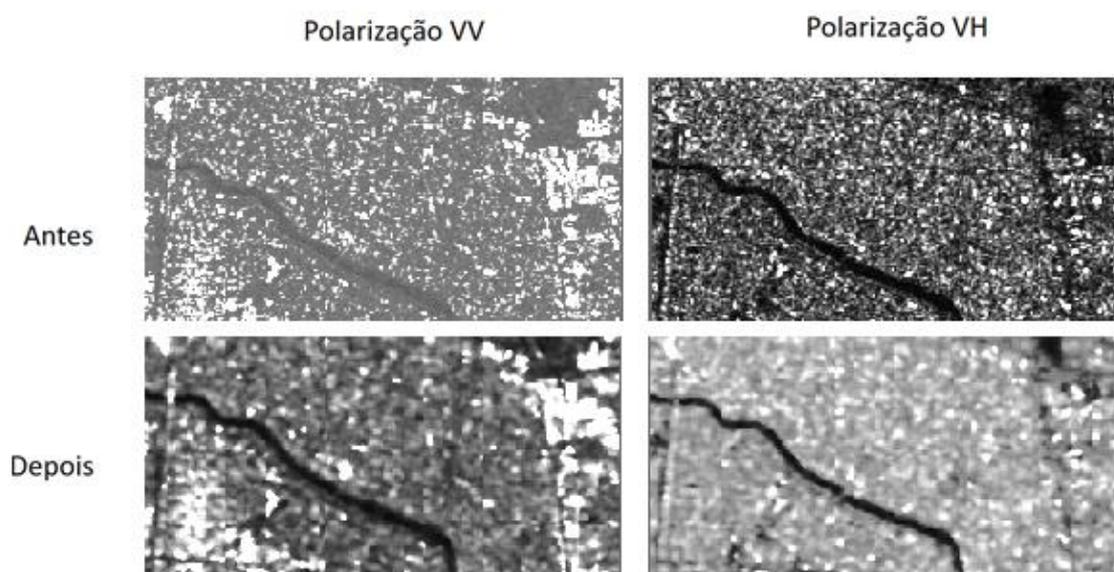


Figura 21. Exemplo de imagens com diferentes polarizações (vertical-horizontal e vertical-vertical) antes e depois da aplicação do filtro Lee sigma com janela de 5x5 pixels. Fonte: Elaboração própria

Percebe-se uma suavização das feições depois da aplicação dos filtros, porém as bordas das feições são mantidas e principalmente a redução do efeito “granulado” da imagem. Também se percebe que a polarização VH apresenta um contraste levemente maior entre as feições, isto é mais perceptível quando analisamos os histogramas – em escala logarítmica - de ambas polarizações após a filtragem na **Figura 22**.

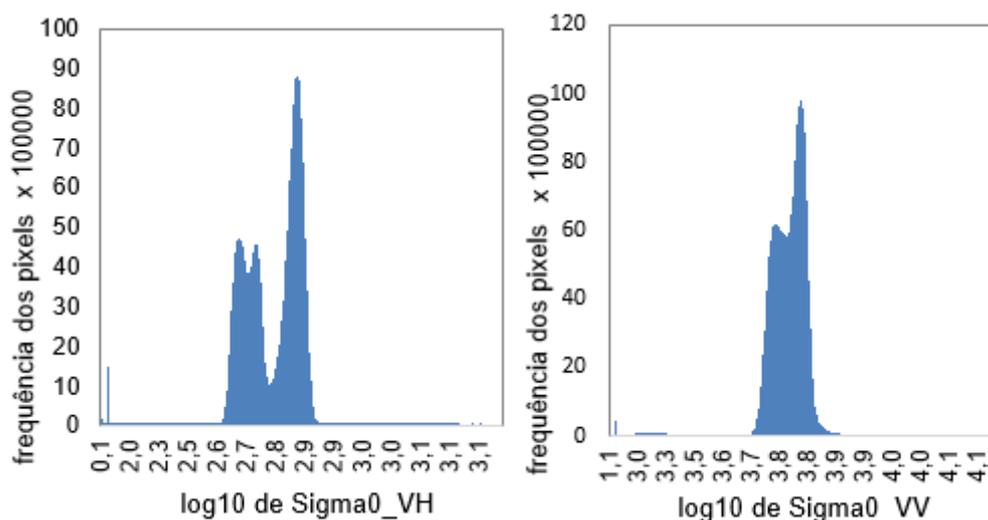


Figura 22. Histograma na imagem 1S na polarização VH e polarização VV. Fonte: Elaboração própria

O mesmo não acontece para a imagem 1N que não apresenta essa separação nítida em nenhuma das duas polarizações. Como observa-se na **Figura 23**.

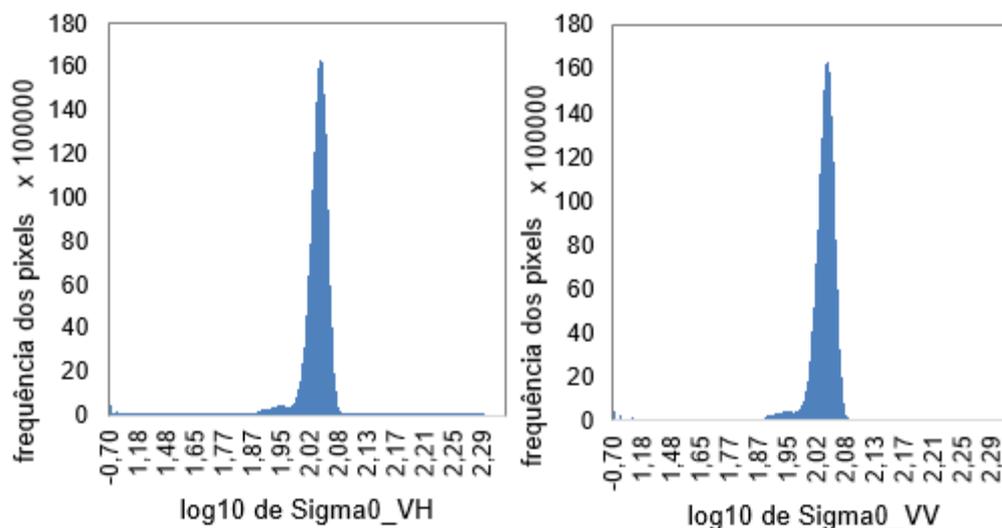


Figura 23. Histograma na imagem 1N na polarização VH e na polarização VV. Fonte: Elaboração própria

O porquê desta diferença da distribuição é claro quando observamos que a imagem 1S possui corpos de água significativamente maiores, tendo assim um número de pixels classificados como água proporcionalmente maior em relação ao total de pixels da imagem. Além disso, na análise da precipitação ocorrida (item 2.3, **Figura 5**) pode-se perceber que as áreas mais próximas ao litoral, correspondentes a imagem 1S, receberam volumes de precipitação maior.

A distribuição dos valores dos pixels na polarização VH na imagem 1S apresenta 2 picos visualmente distinguíveis evidenciando a existência de um maior contraste das feições nesta polarização. Os valores inferiores representam a classe de água, onde o retroespalhamento é menor.

Assim, nas etapas seguintes do processamento foram realizadas apenas as operações para imagens na polarização VH.

5.4 Obtenção dos limiares

Para a escolha dos limiares os valores considerados foram escolhidos utilizando a ferramenta “Color Manipulation” que mostra a distribuição dos pixels por valor de retroespalhamento. A ferramenta de histograma não pode ser utilizada para a escolha dos limiares, pois não é possível separar os valores de intensidade em “caixas” suficientes para avaliar bem a separação dos picos. As classes apresentam apenas os valores centrais da classe. Foram escolhidos valores que representassem a separação entre os picos, como pode-se observar na **Figura 24**.

Para a melhor visualização a imagem foi ajustada para mostrar 95% dos pixels.

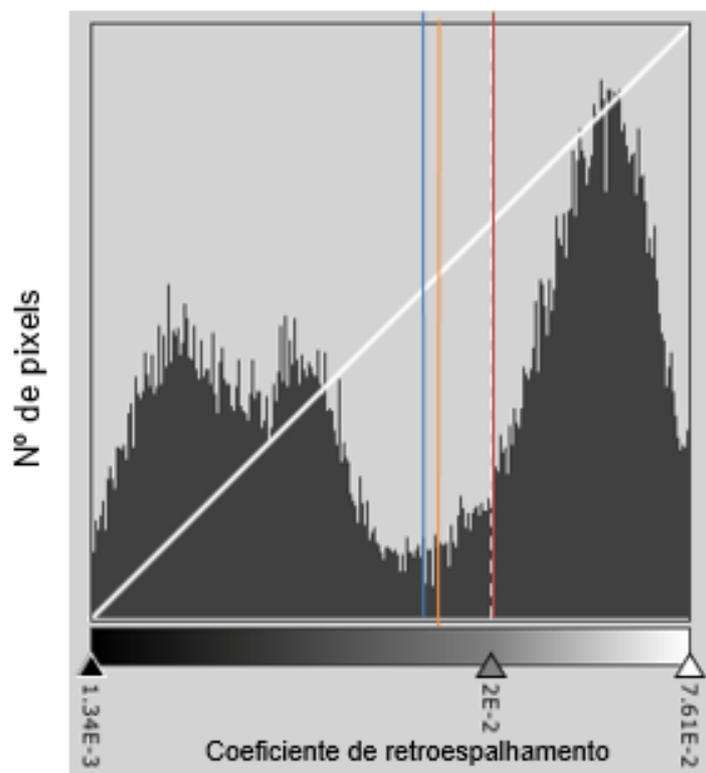


Figura 24. Escolha dos limiares para a imagem 1S. Fonte: Elaboração própria

Cada linha vertical na imagem acima corresponde a um dos limiares adotados, eles são apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5. Limiares escolhidos para cada imagem

Limiares adotados (unidades de retroespalhamento)	
Azul	0,0116
Laranja	0,013
Vermelho	0,022

Para a imagem 1N foram adotados os mesmos limiares que para a imagem 1S, isto foi necessário pois a divisão dos pixels não é tão clara, porém tal medida é possível uma vez que as imagens foram obtidas nas mesmas condições. Assim, os limiares adotados são apresentados na **Tabela 5**.

Assim, depois da escolha dos limiares foram feitas as novas bandas de valores que geraram imagens binárias, como mostra a **Figura 25**.



Figura 25. Imagem 1S após a binarização, adotando o limiar 0,022. Áreas brancas classificadas como água e pretas como “não-água”. Fonte: Elaboração própria

5.5 Correção Geométrica

Quando as imagens são obtidas elas, ainda que tenham as informações geográficas, estão espelhadas. A correção geométrica é realizada somente no final do processamento pois depende de modelos de terreno que podem estar em resoluções espaciais diferentes da imagem, causando a perda de informações. No presente caso o MDE utilizado tem resolução inferior à da imagem de radar (resolução espacial de 90m). A **Figura 26** mostra uma visão geral da imagem 1N antes e depois da correção geométrica, o processo foi aplicado para cada uma das novas bandas binárias geradas e para as bandas VH originais de cada imagem. A imagem pode ter sofrido uma pequena distorção quando foi reduzida para ser adicionada ao texto.

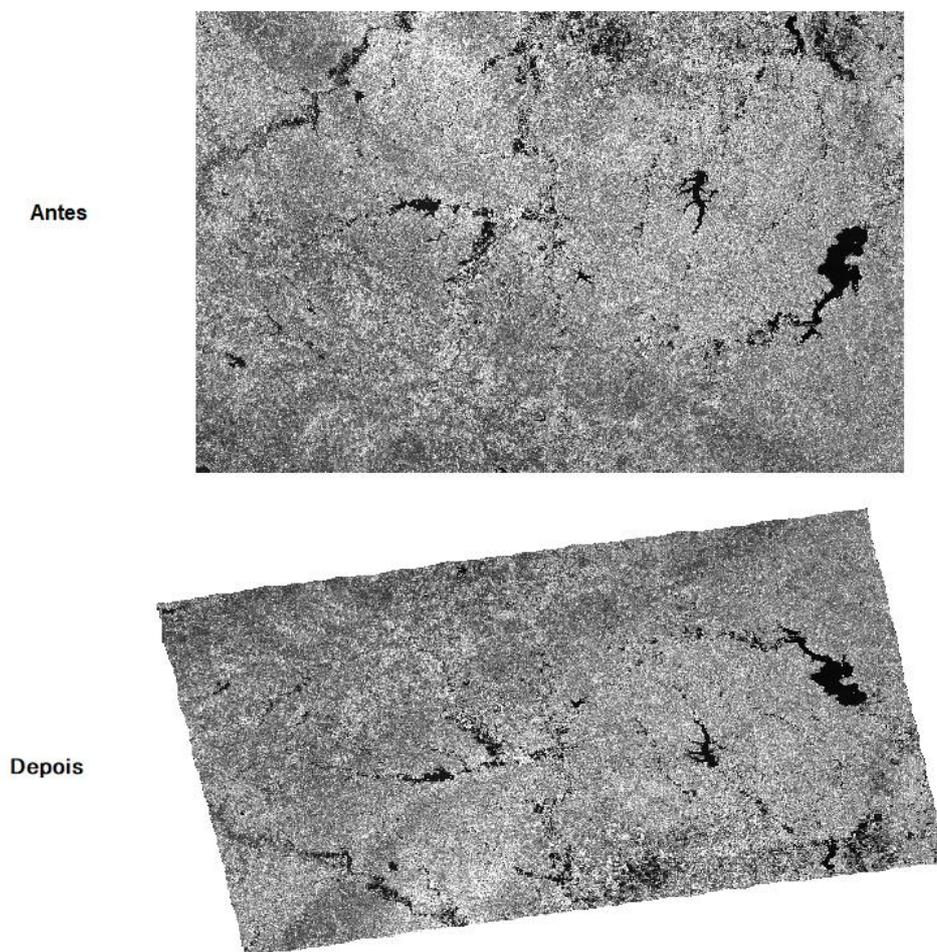


Figura 26. Imagem 1N antes e depois da Correção Geométrica. Fonte: Elaboração própria

A imagem acima pode ter sofrido uma pequena distorção quando foi reduzida para ser adicionada ao texto.

5.6 Verificação das Máscaras Geradas

As imagens do dia 29 (Imagem 1N e 1S), foram processadas separadamente em função da sua obtenção. Optou-se por esse procedimento pois as imagens menores possibilitam o processamento mais rápido e com menor sujeição a erros decorrentes da capacidade de processamento da máquina. Assim, para o mesmo dia – 29 de agosto de 2017 – as máscaras de água geradas cobrem diferentes parte da área de Houston. Para a verificação de ambas áreas foram usados os mesmos critérios, a máscara foi sobreposta a máscara NDWI, também foram plotados pontos conhecidos de inundação, através das fotos aéreas realizadas pela Patrulha Civil de Houston e dos pedidos

de resgate realizados através da ferramenta *Google Crisis*. Considerou-se assertivo os limiares que coincidiram com os pontos plotados e que tivesse maior área inserida nas zonas de inundação conhecida, através dos dados disponibilizados pela FEMA que mostra as áreas de inundação com 0,2% de chance de ocorrência.

Para fins de padronização a máscara gerada é chamada de “máscara de inundação” ainda que apresente resultados para inundação e alagamento.

5.6.1 MNDWI e NDWI

Para a verificação das feições de água foi gerada, a partir de uma imagem Sentinel 2, uma máscara de água usando o modelo NDWI e outra usando o modelo MNDWI.

A máscara NDWI gerou uma superestimava já esperada na área urbana, considerando áreas sombreadas como água. Quando comparamos a máscara de água gerada com imagens online disponíveis (**Figura 27**) algumas áreas sombreadas pelos prédios foram erroneamente classificadas como feições de água.



Figura 27. Exemplo da superestimação da máscara de água NDWI e Imagem do local sem a sobreposição da máscara d'água.

O Modelo MNDWI necessitou de uma reamostragem da imagem prévia a criação da máscara. Reamostrou-se a imagem para resolução espacial de 10m e depois procedeu-se a execução da máscara. Porém mesmo a máscara MNDWI gerou uma superestimava das feições de água, como é possível perceber na **Figura 28**.



Figura 28. Exemplo da superestima da máscara de água MNDWI e Imagem do local sem a sobreposição da máscara d'água.

Ainda assim, a máscara MNDWI resultados menos superestimados que a máscara NDWI. Como é perceptível na figura **Figura 29**.



Figura 29. Exemplo da diferença entre as máscaras MNDWI (azul) e da NDWI (rosa) e imagem do local sem a sobreposição das máscaras d'água..

Foi procedida a remoção manual das áreas superestimadas do modelo MNDWI, comparando a máscara de água com o mapa de base disponível no software ArcMap. Após a remoção manual dessas áreas classificadas erroneamente obteve-se a máscara de água. Uma visão geral da máscara de água gerada pelas imagens é apresentada na **Figura 30**.

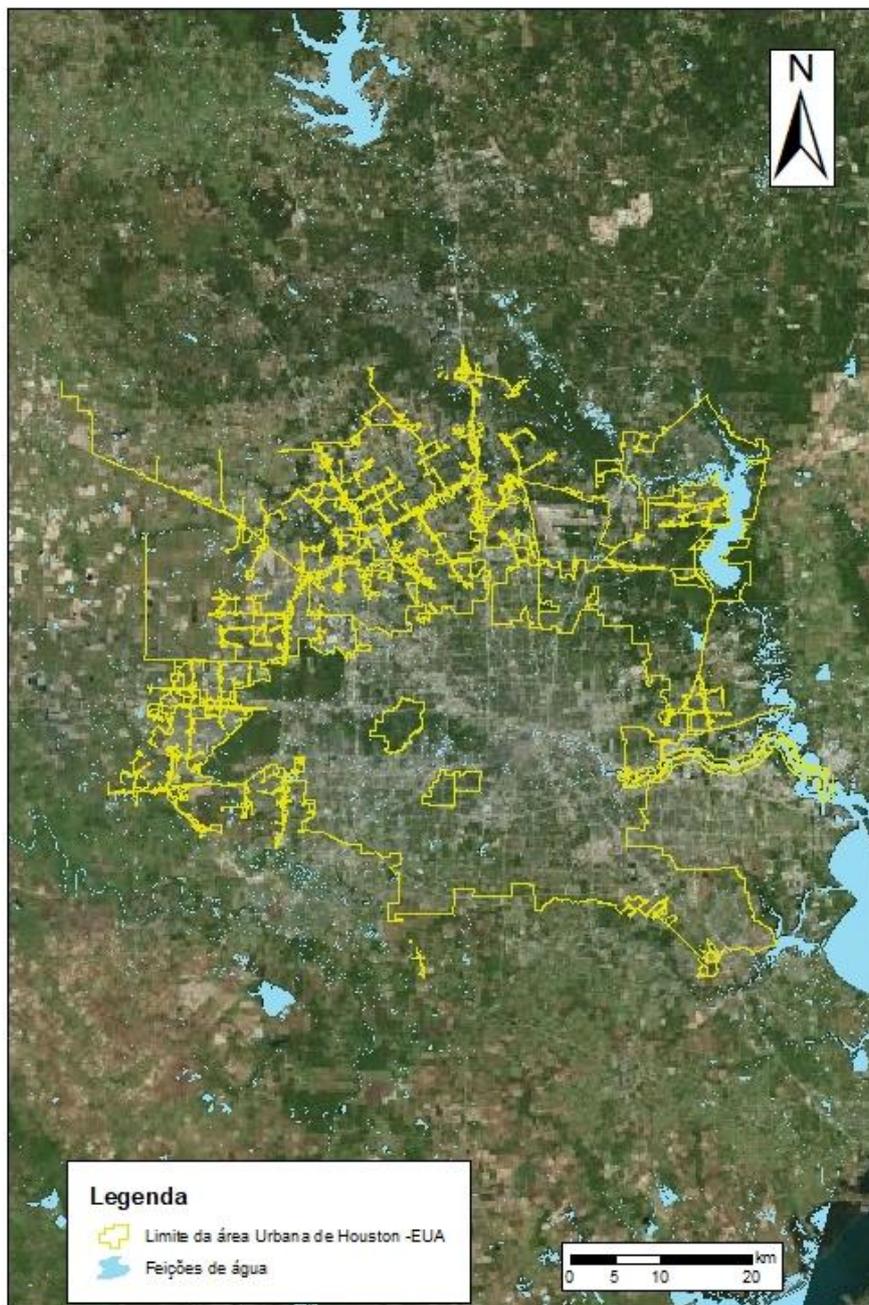


Figura 30. Máscara de água gerada a partir das imagens Sentinel -2. Fonte Elaboração Própria.

5.6.2 Pedidos de resgate pelo Google Crisis

Foram identificados mais de 200 pedidos de resgate através da ferramenta Google Crisis entre os dias 25 e 29 de agosto de 2017. Entretanto os motivos dos pedidos não eram todos relacionados a inundações, alguns pedidos eram relacionados a problemas de saúde, dificuldade de locomoção em virtude das vias bloqueadas e motivos diversos que não podem ser relacionados

diretamente com as áreas alagadas. Por isso, com base na descrição do pedido dada pelos usuários, foram filtrados os pedidos que se referiam a inundação. Muitos pedidos não possuíam descrição alguma e por este motivo foram desconsiderados. A **Tabela 6** mostra os pedidos originais (em inglês), a tradução livre dos pedidos. Os números de telefone foram ocultados (substituídos por X).

Tabela 6. Pedidos de resgate pelo Google Crisis. Fonte: Google 2017

	Endereço	Descrição (em inglês)	Tradução
1	4042 Tartan Ln	in mobile home behind house. Water is waist deep	Água na altura da cintura no trailer atrás da casa.
2	9119 Shagbar k Dr	family need help in the northeast Area water is filling up to the roof	Família precisa de ajuda na área nordeste. A água subiu até o telhado
3	24115 Scrivener Ln	a female friend in Katy. Her and 5 kids are trapped and the water keeps rising. She can't get through on any emergency #'s.	Uma amiga Katy. Ela e 5 crianças estão presas e a água continua subindo. Ela não pode passar por qualquer emergência.
4	1807 Cobble Creek Dr	We have a friend in Houston that is stuck in his house due to flood waters coming in his house. He is 28 years old and there alone with 4 dogs.	Nós temos um amigo em Houston que está preso em sua casa devido a inundações que chegam em sua casa. Ele tem 28 anos e está sozinho com 4 cães.
5	22427 Highland Point Ln	2 adults, 3 children. Water in first floor almost to power outlets. People advising her to shut off breaker box, but it's dangerous doing it in the water.	2 adultos, 3 crianças. Água no primeiro andar quase nas tomadas de energia. Pessoas aconselhando-a a desligar a caixa do disjuntor, mas é perigoso fazê-lo na água.
6	4205 Little York Rd	My mother is at 4205 little York. She needs to get to north villa inn to her kids. She's 25 minutes away driving but a good 4 hours walking. She's at a Valero and her car is flooded out. She's been walking for a while and needs a ride asap	Minha mãe está em Little York 4205. Ela precisa chegar à pousada para seus filhos. Ela está a 25 minutos de carro, mas está a uma boa caminhada de 4 horas. Ela está em um Valero e seu carro está inundado. Ela está andando por um tempo e precisa de uma carona o mais rápido possível.
7	6830 Oakleaf Trail Ln.	High water flooding in front and back of house. Family of 4 inside. 4.5 feet inside house. Creek behind house overflowing. Water reaching window level. (xxxxxxx)	Alta inundação de água na frente e na parte de trás da casa. Família de 4 dentro. 1,4 m dentro da casa. Riachos atrás da casa transbordando. Água atingindo o nível da janela.
8	22442 Highfield Ridge Ln	(xxx)xxx-xxxx. She has been in the water all night!!	Ela esteve na água toda a noite!!
9	11800 Grant Rd	Up to 15 people needing help. Water up to 2nd story. Unit 6406 also has 1adult and 6 kids	Até 15 pessoas que precisam de ajuda. Água até o 2ª andar. A unidade 6406 também possui 1 adulto e 6 filhos

		Unit 6303 has people in it xxxxxxxxxxx Arren Bunch	A Unidade 6303 tem pessoas nele
10	#4 Bayou Shadows	85 yr old man stuck on 2nd floor of his home and water is rising!	85 anos de idade, preso no 2º andar de sua casa e a água está aumentando!
11	8934 Oak Knoll Ln	Water is rising quickly. Her name is Liz xxx-xxx-xxxx or Contact info: Rosie xxx-xxx-xxxx	A água está aumentando rapidamente. O nome dela é Liz xxx- xxx-xxxx ou Informações de contato: Rosie xxx- xxx-xxxx
12	12219 Haraldso n Forest Dr	Family of 4, 3 children under age of 3yrs. Water high also neighbors are in need of help also	Família de 4, 3 crianças menores de 3 anos. Água alta, também os vizinhos precisam de ajuda também
13	9230 Monterre y St	Older Male in need of rescue high water in his attic waiting for help	Homem mais velho precisa de resgate, água alta. Está no seu sótão à espera de ajuda.
14	505 Cypress Station Dr	xxx-xxx-xxxx High water calling for help since last night. Number of people needing help is not available	Alta água, pedindo ajuda desde a noite passada. Número de pessoas que precisam de ajuda não estão disponíveis
15	8934 Oak Knoll Ln	3 adults, Jesse & Liz Carrizales xxx-xxx-xxxx House is taking in more water & husband is diabetic, suffers with anxiety.	3 adultos, Jesse & Liz Carrizales Está entrando mais água e o marido é diabético, sofre com ansiedade
16	12711 Oakfield Dr	Shelly Johnson 2 Adults 3 dogs no medical issues, water is 5 ft deep 1 story home	Shelly Johnson 2 adultos 3 cães sem problemas médicos, a água é de 1,52 m de profundidade no primeiro andar da casa.
17	Plover Crest Court	MULTIPLE FAMILIES STRANDED: 3 people with water in their home, 1 adult 2 kids Saman xxx-xxx-xxx. 1 adult 2 kids Red Help sign in the window of the second story	MÚLTIPLAS FAMÍLIAS ABANDONADAS: 3 pessoas com água em sua casa, 1 adulto 2 crianças Saman xxx-xxx-xxx. 1 adulto 2 crianças com pedido de ajuda vermelho na
18	2619 Broomse dge Dr	URGENT: MULTIPLE STRANDED FAMILIES, WATER IS CURRENTLY AT KNEE LEVEL AND RISING	URGENTE: FAMÍLIAS MÚLTIPLAS, A ÁGUA ESTÁ ATUALMENTE NO NÍVEL DO JOELHO E AUMENTANDO
19	17211 Verde Park Lane	Special Needs Group Home: 1 adult caretaker, 3 special needs adults. Water is up to garage.	Casa de grupo de necessidades especiais: 1 adulto cuidador, 3 adultos com necessidades especiais. Água está até garagem
20	20714 Raven Mist Ct	2 adults, water level knee high, 1 adult cannot swim	2 adultos, água no nível do joelho, 1 adulto não pode nadar
21	7734 Charles mont St	2 adults 6 kids 3 days without power water ls chest level	2 adultos 6 crianças há 3 dias sem água potável. O nível da água está peito
22	9831 Shadow Villa Ln	Father on crutches, mom and daughter and dog. White towel on porch. Water high and unable to get to roof due to father	Pai em muletas, mãe e filha e cachorro. Toalha branca na varanda. Água alta e incapaz de chegar ao telhado devido ao pai

23	7610 Northfork Hollow Ln	family trapped, elderly woman needing medical assistance. high water level	família presa, mulher idosa que necessita de assistência médica. alto nível de água
24	18107 Flower Grove Ct	There is an elderly diabetic man, his daughter and granddaughter located at 18107 flower grove court richmond tx 77407 that needs to be saved His daughters name is Delight and the number is XXXXXXXX! Please help this family!	Há um homem diabético idoso, sua filha e sua neta localizadas em 18107 flower Grove Court Richmond TX 77407 que precisa ser salvos O nome de suas filhas é Delight e o número é XXXXXXXX! Ajude essa família

Após esta seleção os pontos foram plotados para verificar que se ocorriam dentro dos limites municipais de Houston. Assim a distribuição dos pedidos é apresentada na **Figura 31** .

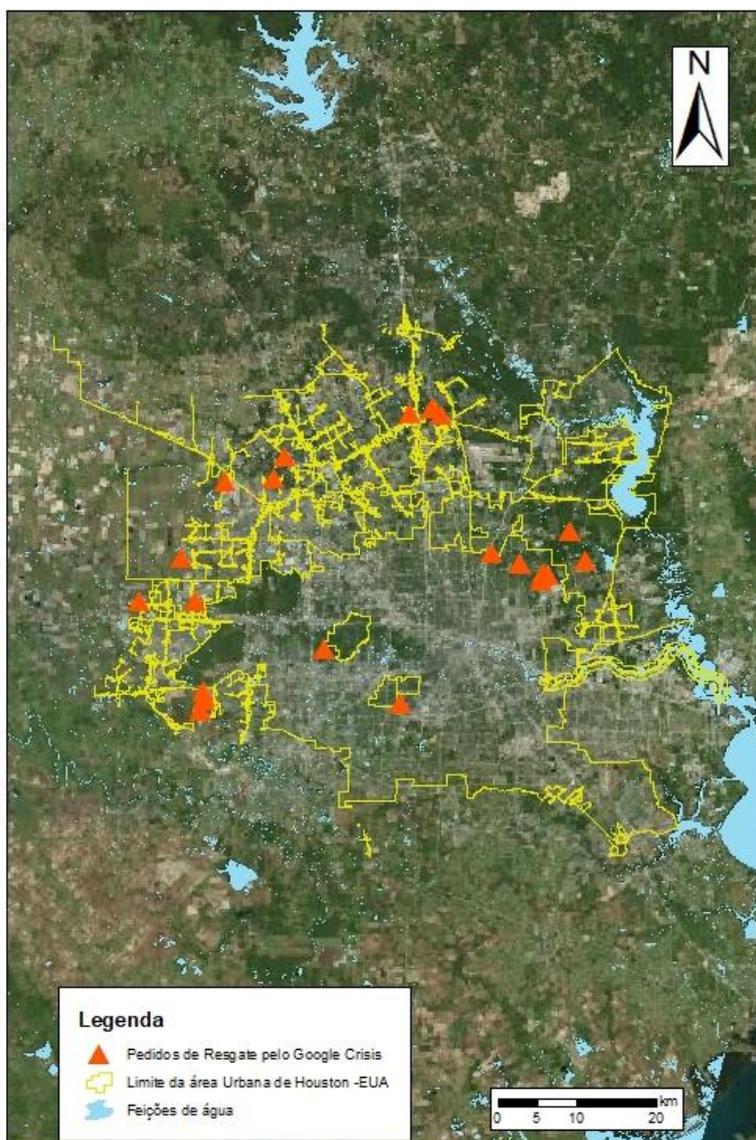


Figura 31 . Pedidos de resgate no *Google Crisis*. Fonte: Elaboração própria

5.6.3 Registros fotográficos

A Patrulha Civil Estadunidense realizou diversos sobrevoos nas cidades atingidas pelo furacão Harvey, o sobrevoio sobre a cidade de Houston ocorreu no dia 31 de agosto de 2017. Foram selecionadas algumas fotos relativas a este sobrevoio e copiadas as coordenadas destas localidades para que se pudesse formar um arquivo vetorial a ser sobreposto a máscara de água. As informações não estão em formato que possibilite o download direto das informações. Inicialmente foram selecionadas 9 fotos (em 12 de novembro de 2017), em virtude da qualidade dos dados optou-se pela seleção de mais fotos e pontos de inundação para a validação da máscara de água, entretanto ao consultar novamente a plataforma de dados verificou-se que os dados não estavam mais disponíveis ao público (em 23 de dezembro de 2017). Portanto, se restringirá apenas aos dados obtidos durante a primeira consulta. As fotos 7 e 8 não apresentam áreas inundadas, no entanto, correspondem a uma importante área da cidade: a planta de refinaria, outro motivo para manter essas imagens se deu para avaliar se não houve superestimação das áreas alagadas. As **Figura 32** a **Figura 40** mostram as fotos áreas.



Figura 32. Foto 1. Fonte: USGS 2017.



Figura 33. Foto 2. Fonte: USGS 2017



Figura 34. Foto 3. Fonte: USGS 2017



Figura 35. Foto 4. Fonte: USGS 2017



Figura 36. Foto 5. Fonte: USGS 2017



Figura 37. Foto 6. Fonte: USGS 2017



Figura 38. Foto 7. Fonte: USGS 2017



Figura 39. Foto 8. Fonte: USGS 2017



Figura 40. Foto 9. Fonte: USGS 2017

A **Figura 41** apresenta a espacialização dos pontos de registro fotográficos.

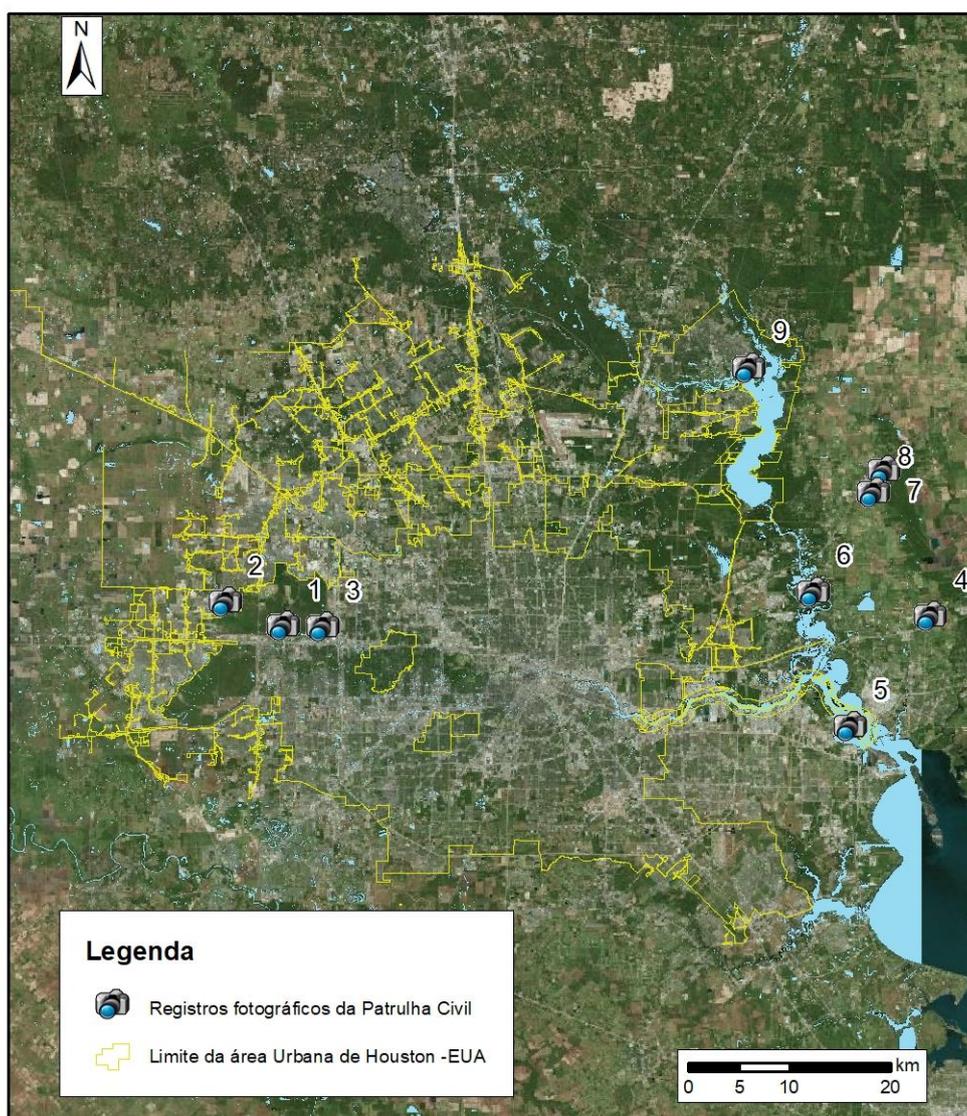


Figura 41. Localização dos registros fotográficos. Fonte: Elaboração Própria.

5.6.4 Cruzamento dos dados

As informações relativas ao evento e as zonas de inundação locais foram sobrepostas a máscara gerada. Primeiramente as máscaras de cada limiar foram analisadas em comparação com a máscara de água gerada pelo modelo MNDWI.

Já nesta etapa a máscara gerada para o limiar de 0,0116 foi descartada, uma vez que representou uma subestimação das áreas com feições de água conhecidas, como pode ser observado na Figura 42.



Figura 42. Amostra da comparação entre a máscara de inundação gerada (limiar 0,0116) e a máscara de água. Fonte: Elaboração própria.

As manchas em rosa representam a máscara de inundação gerada para o limiar mais baixo e as feições em azul constituem a máscara de água gerada pelo modelo NDWI.

O limiar de 0,013, a princípio, parecia ser o que melhor realizaria a correta separação das feições de água, isto porque o valor está no ponto mais baixo do vale formado entre os picos do histograma. No entanto, este quando

comparado a máscara de água MNDWI também apresentou subestimação das áreas, conforme **Figura 43**.

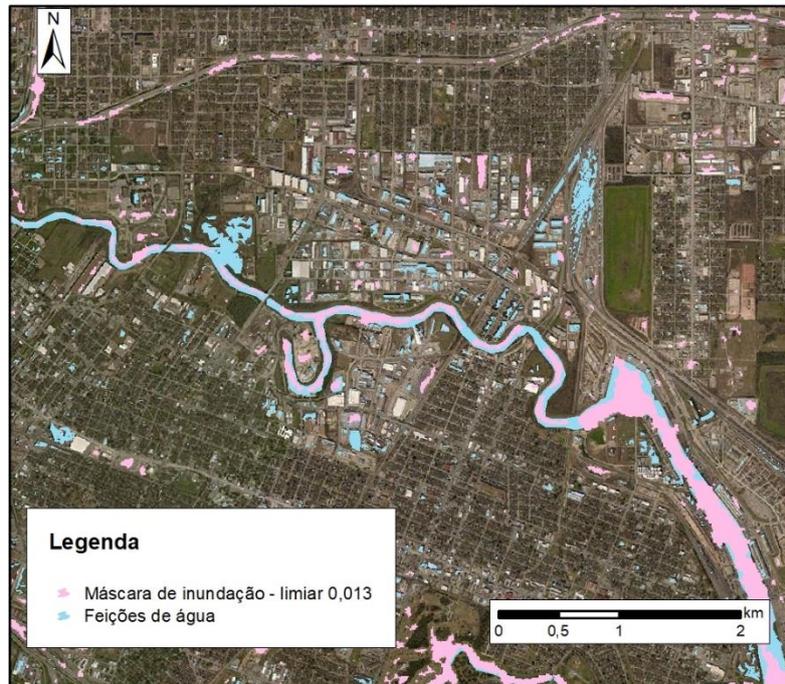


Figura 43. Amostra da comparação entre a máscara de inundação gerada (limiar 0,013) e a máscara de água. Fonte: Elaboração própria.

Por este motivo também foi descartada. Os cruzamentos de informações seguintes foram realizados apenas para o limiar 0,022 (**Figura 44**).



Figura 44. Amostra da comparação entre a máscara de inundação gerada (limiar 0,022) e a máscara de água. Fonte: Elaboração própria.

O maior limiar adotado foi o que mostrou melhor relação com a máscara de água conhecida (**Figura 44**), e então foram procedidas as sobreposições das áreas conhecidas de inundação/alagamento.

Primeiro foram comparados com a máscara de inundação os pontos onde foram realizados os registros fotográficos pela Patrulha Civil. Nas imagens a seguir, são apresentadas amostras da máscara de inundação nos locais dos registros fotográficos.

Pode se observar que as correspondências são satisfeitas para as fotos 1, 2 e 3 (**Figura 45**) apresentando áreas classificadas como água em locais de registro de alagamentos. Na sequência, as **Figura 46**, **Figura 47** e **Figura 48** apresentam as sobreposição dos pontos conhecidos de alagamentos sobre a máscara de inundação gerada.

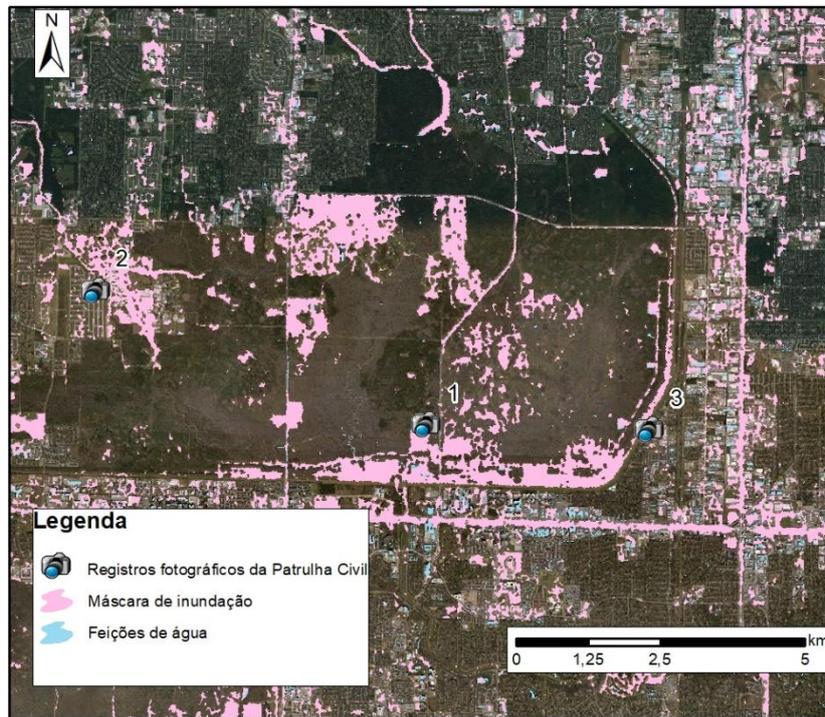


Figura 45. Localização das fotos 1, 2 e 3 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.

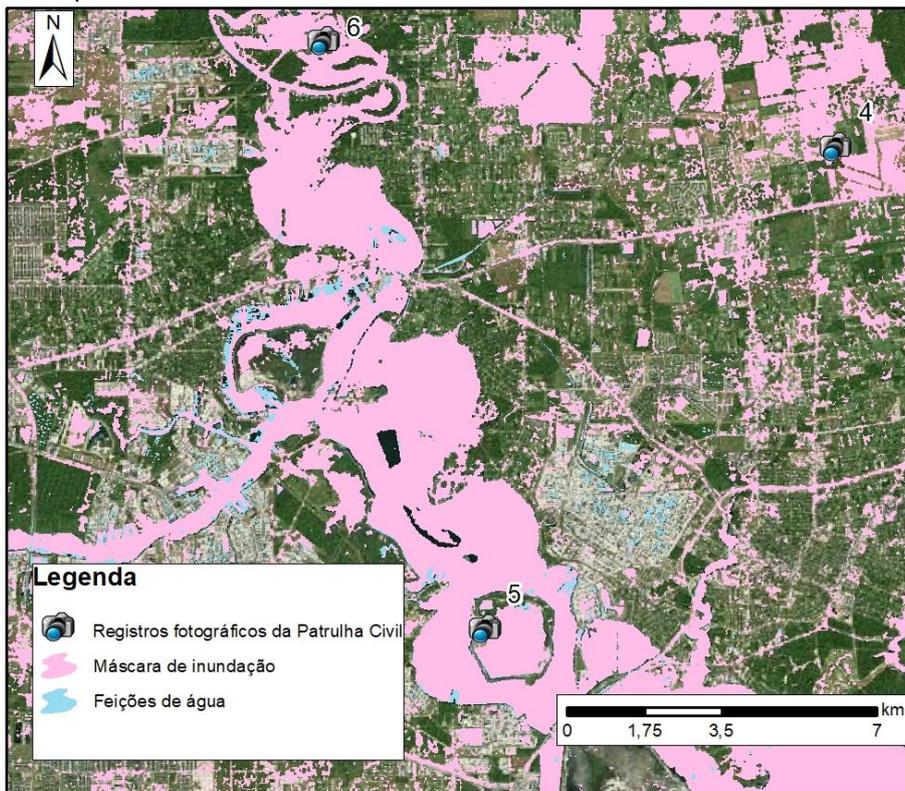


Figura 46. Localização das fotos 4, 5 e 6 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.

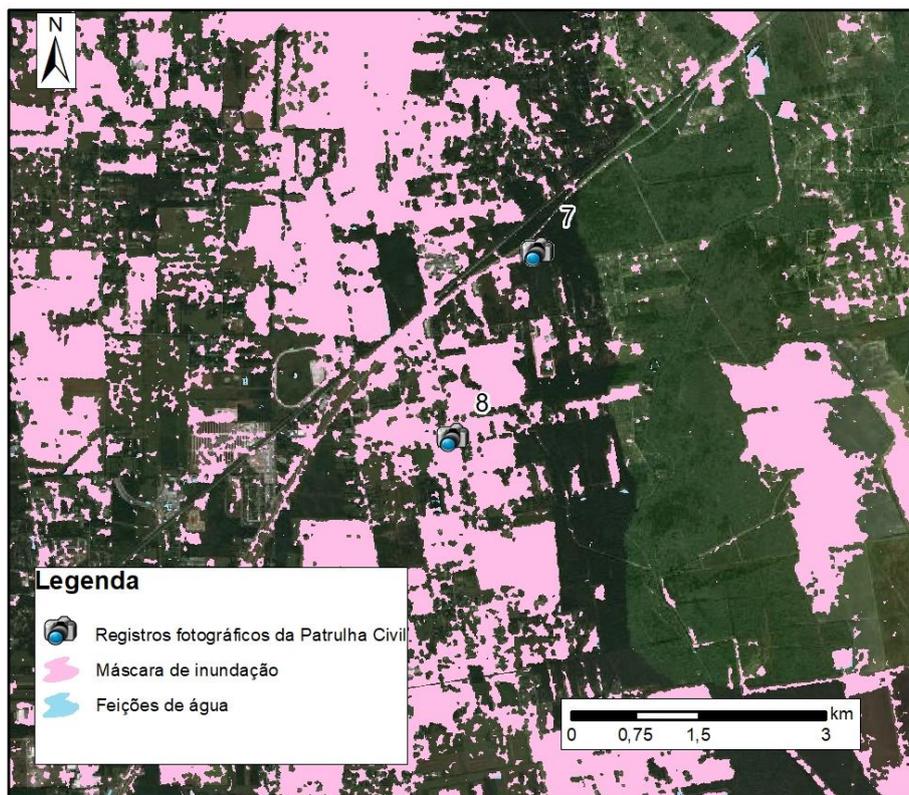


Figura 47. Localização das fotos 7 e 8 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.

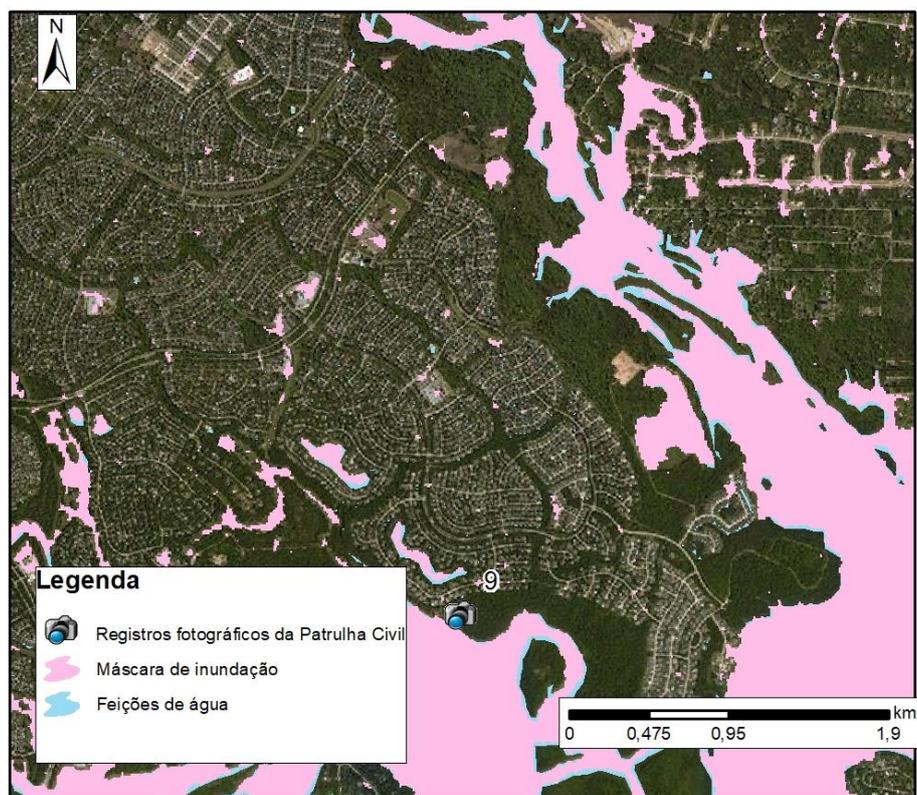


Figura 48. Localização das fotos 9 e 10 em relação a mancha de inundação. Fonte: Elaboração Própria.

Dos 9 pontos percebe-se que 8 tem suas correspondências satisfeitas. A divergência ocorre para a foto 8 (**Figura 47**) na qual não deveria haver mancha de inundação, segundo o registro fotográfico.

O passo seguinte foi verificar os pontos referentes aos pedidos de resgate, aos quais se admite uma tolerância entre a distância do ponto e a da mancha de inundação e também os pontos dos registros fotográficos.

A tolerância é admitida em função da imprecisão da ferramenta, que aceita endereços para a criação do mapa, invés de coordenadas geográficas, o que pode acarretar em um pequeno deslocamento. As **Figura 49 e Figura 50** apresentam exemplos da sobreposição dos pedidos de resgate e a máscara de inundação.

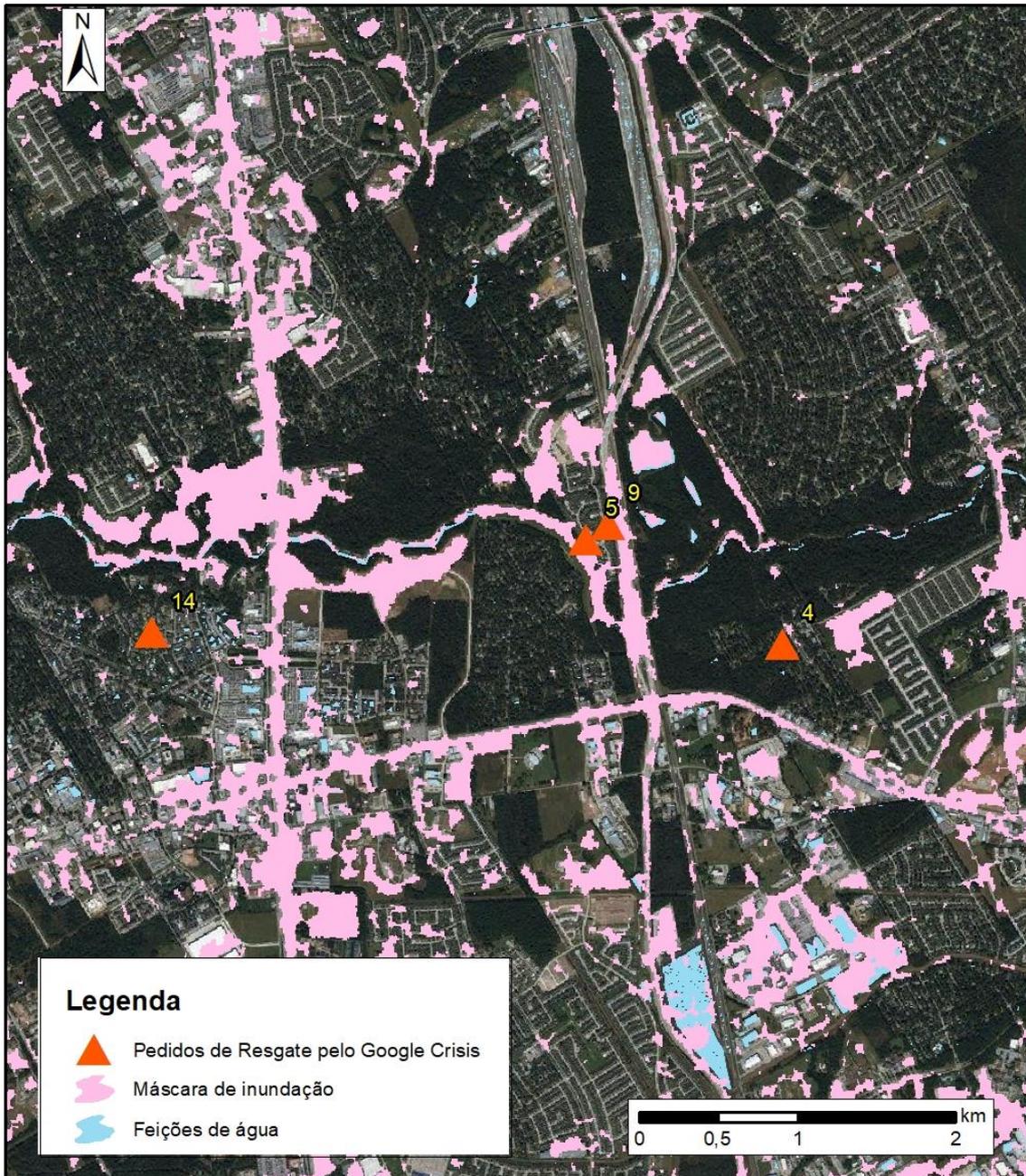


Figura 49. Exemplos de pedidos de resgate que coincidiram com a máscara de inundação e de pontos que não coincidiram. Fonte: Elaboração própria

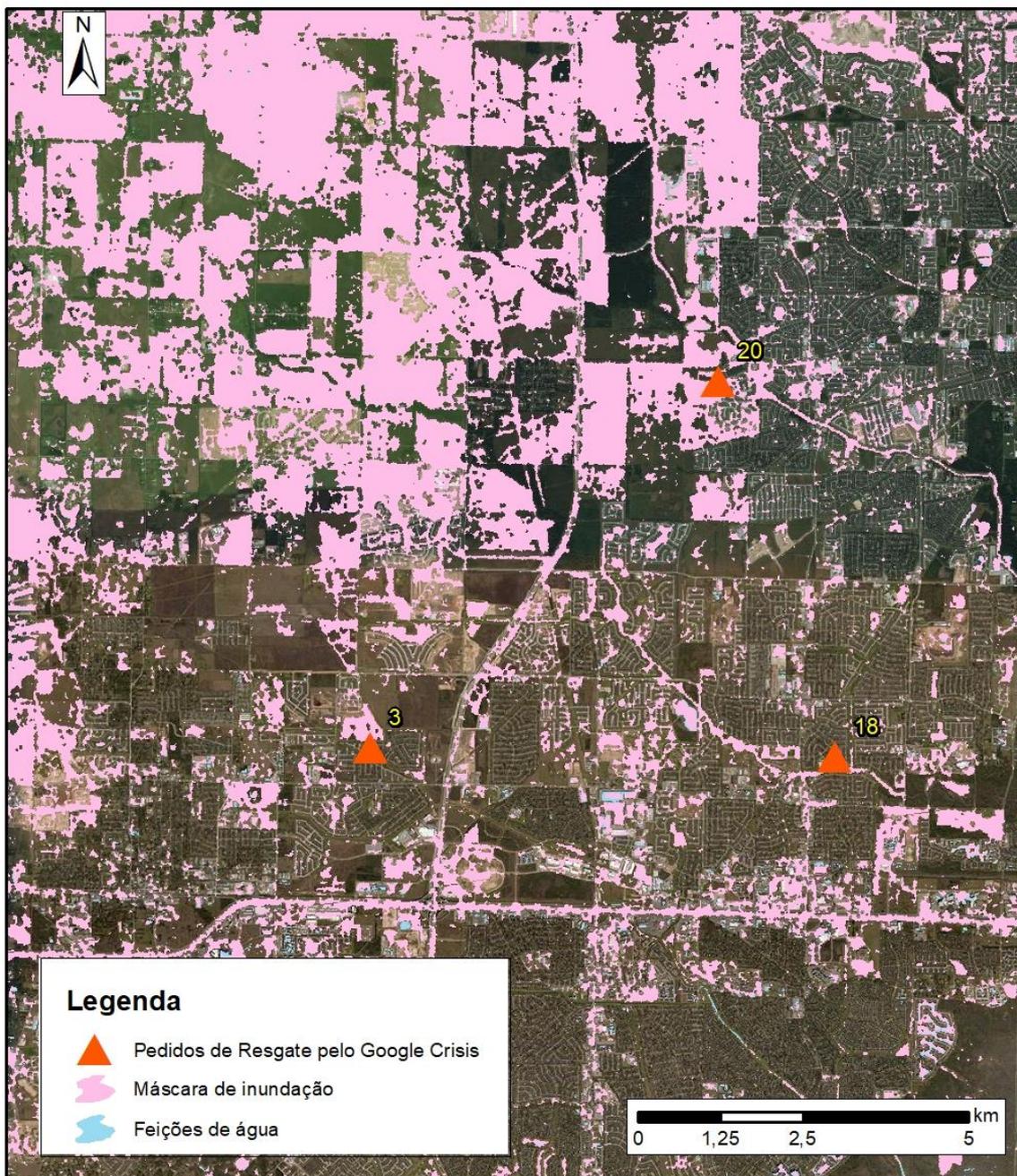


Figura 50. Exemplos de pedidos de resgate que coincidiram com a máscara de inundação. Fonte: Elaboração própria

Dos 24 pontos de pedidos de resgate, 9 não estavam em local classificado como áreas inundadas. A menor correlação entre estes dados e a máscara era esperada e pode ser devido a imprecisão dos dados, que são fornecidos pelos usuários e não recebem nenhuma forma de verificação.

A comparação da máscara de inundação gerada com os dados da FEMA (**Figura 51**) obteve resultados pouco relacionáveis. Isto pode ser explicado uma

vez que as áreas alagadas pelo furacão podem não estar diretamente relacionadas somente a planícies de inundação de corpos d'água, mas a extrapolação da capacidade de drenagem. Isto pode ser considerado pois percebe-se que a mancha gerada nas regiões adensadas esta locada, principalmente, nas vias e ruas da cidade.

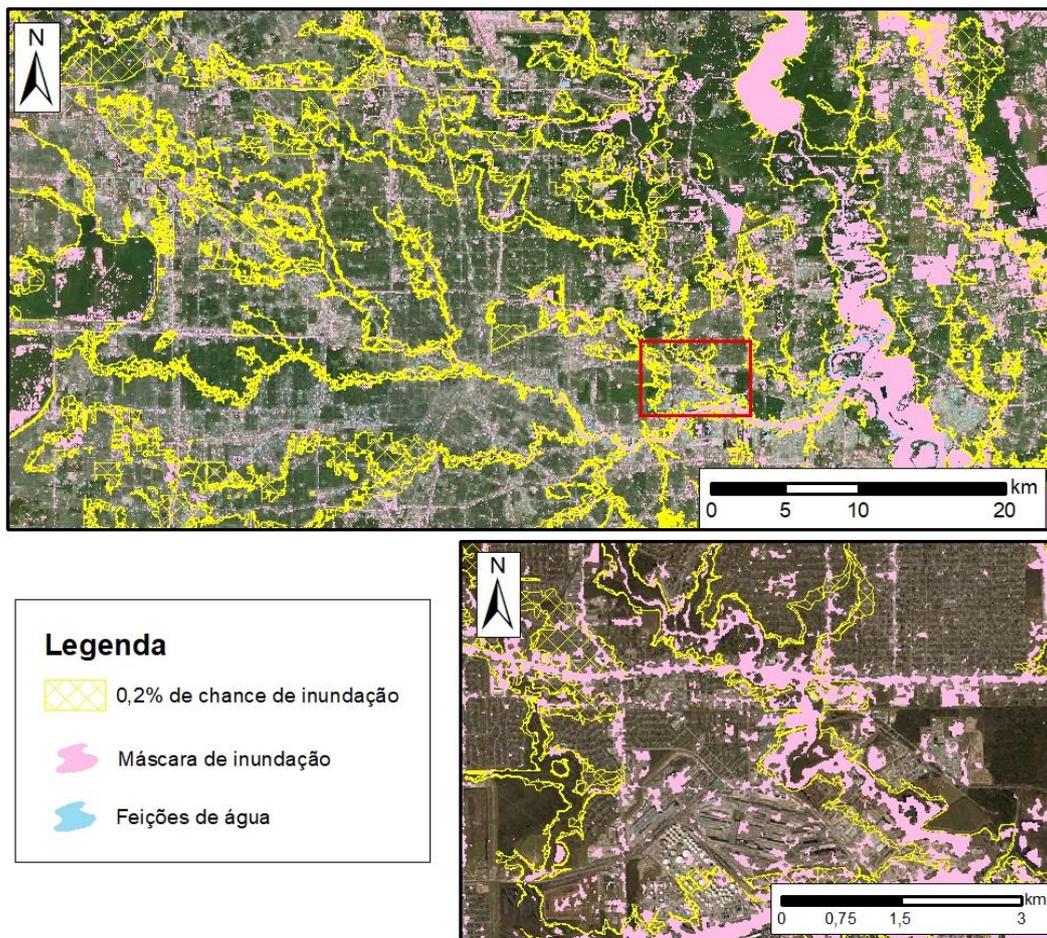
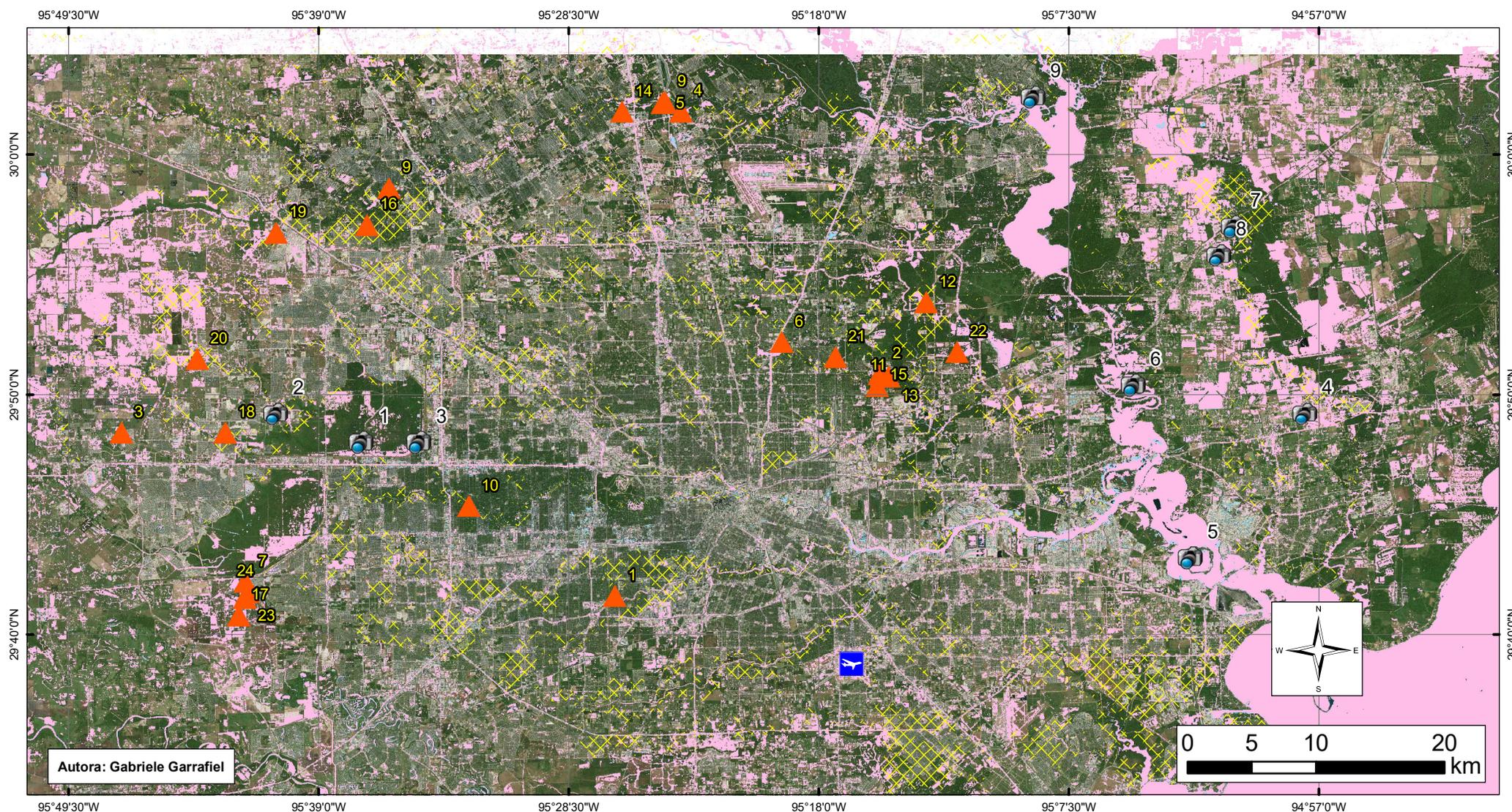
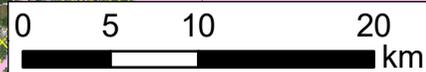


Figura 51. Zona de inundação para um tempo de retorno de 500 anos na cidade de Houston sobreposta a máscara de inundação gerada. Fonte: Elaboração própria

A sobreposição de todas essas informações é apresentada na **Figura 52.**



Autora: Gabriele Garrafiel

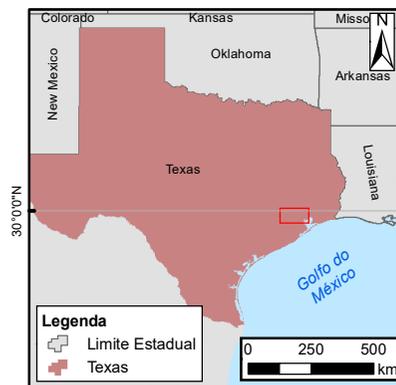
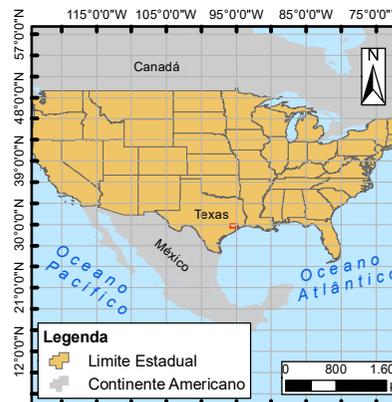


Legenda

-  Aeroporto William P. Hobby
-  Registros fotográficos da Patrulha Civil
-  Pedidos de Resgate pelo Google Crisis
-  0,2% de chance de inundação
-  Máscara de Inundação
-  Feições de água

Sistemas de Coordenadas Geográficas.
Datum: WGS 84

Fonte:
Registros Fotográficos: USGS (2017);
Pedidos de Resgate: Google Crisis (2017);
0,2% de chance de inundação: FEMA (2017)
Máscara de Inundação: Elaboração Própria (2017);
Limites Estaduais: US Bureau Census (2017).



6 CONCLUSÕES

Para o mapeamento das inundações urbanas utilizando as imagens SAR, percebe-se uma grande dificuldade quanto ao correto processamento dessas imagens, isto principalmente em função da presença do ruído *speckle* que não é completamente eliminado pelo filtro. A aparência granular da imagem pode gerar pontos considerados como inundação/alagamento que não passam de ruído. Mesmo assim, as imagens de radar apresentam uma boa saída para o mapeamento das áreas alagadas e inundadas dentro da zona urbana. Especialmente porque mesmo as imagens no comprimento de ondas da luz visível apresentam falsos positivos em função do sombreamento gerados pelos prédios.

Além do ruído uma grande dificuldade de interpretação da máscara se deu quanto a resposta similar entre corpos d'água e as vias urbanas. Isto, dentro da área urbana, pode ser uma consequência da baixa rugosidade das duas feições quando comparadas ao seu entorno (edificações, parques, etc). Muitas das principais vias de tráfego da cidade foram sobrepostas pela máscara de inundação, intuitivamente este resultado apresenta coerência, uma vez esses locais, por serem impermeabilizados, comumente formam lâminas d'água. No entanto, são necessárias mais informações locais que pudessem confirmar essa resposta na máscara de inundação.

A escolha do limiar talvez pudesse apresentar critérios mais definidos após uma análise temporal exaustiva de imagens locais, isso pois pequenas variações adotadas acarretam em grandes diferenças de áreas consideradas, ou não, alagadas. Além da análise de diferentes filtros para redução de ruído.

A máscara de inundação gerada não pode ser considerada uma análise quantitativa das áreas inundadas, uma vez que para isso seriam necessárias mais informações locais, além de comparações mais exaustivas acerca do limiar de água adotado. Porém, o método adotado apresenta uma boa resposta qualitativa onde se pode verificar os lugares de maior ou menor incidência de alagamentos. No presente caso, notou-se que as áreas mais adensadas da cidade apresentaram maior resposta, mais áreas alagadas.

Ainda com todas as dificuldades as imagens Sentinel-1 em função da sua resolução espacial e temporal apresentam grande potencial para esta lacuna que é o monitoramento remoto das áreas de inundação urbana. Os quais vem sendo feitos, em sua maioria, por imagens multiespectrais no visível, infravermelho próximo e médio. A grande dificuldade da forma atual é a cobertura de nuvens, uma vez que eventos de inundação normalmente estão associados a grandes precipitações e conseqüentemente a uma densa cobertura de nuvens, além disso, em função de sistemas de drenagem planejados, as lâminas de água formadas são muito mais efêmeras do que as inundações em planícies naturais de inundação. Essa efemeridade implica no desaparecimento das lâminas de água antes da revisita dos sensores em um dia com menor cobertura de nuvens.

Sugere-se a continuação da investigação do correto uso das imagens SAR do programa Sentinel 1 como ferramenta para o mapeamento das inundações/alagamentos urbanos. Através de análise de para escolha de limiares de separação da classe de água em unidades comparáveis para diferentes imagens, afim de padronizar o método, como dB. A validação das máscaras com maior número de correspondências, oriundas de dados de moradores em diferentes redes sociais, por exemplo. Além da análise da influência da resposta das vias urbanas na superestimativa das áreas consideradas como inundadas.

7 BIBLIOGRAFIA

BENEDITTI, Cristina Aparecida. **Imagens Multitemporais ALOS/PALSAR Baseada em Orientação a Objeto na Discriminação da Cobertura da Terra.** Presidente Prudente: Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2010.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios** / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007

DA SILVA ROSA, Rafael Antonio *et al.* **Correção Radiométrica de Imagens de Radar de Abertura Sintética Aerotransportado.** 2009.

DE BRITO, Fausto Alves *et al.* **A dinâmica do processo de urbanização no Brasil, 1940-2010.** Cedeplar, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

DOS SANTOS, Flávio Augusto Altieri; DA ROCHA, Edson José Paulino. **Alagamento e inundação em áreas urbanas. Estudo de caso: cidade de Belém.** Revista GeoAmazônia, v. 2, n. 01, p. 33-55, 2014.

DUTRA, Luciano Vieira *et al.* **Processamento de imagens de radar de abertura sintética–princípios e aplicações.** In: Anais do IV Workshop em Tratamento de Imagens, NPDI/DCC/ICEx/UFMG. 2003.

ESA, European Space Agency. **Sentinel-1 User Handbook**”. Disponível em: < https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook/06fa0b55-9eca-47ff-a45f242012951564>. Acesso em 23 set de 2017. 2013.

ESA, European Space Agency.. **Sentinel-1 Toolbox: SAR Basics Tutorial**, disponível em: < <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20SAR%20Basics%20Tutorial.pdf>> . Acesso em 23 set de 2017. 2015a.

ESA European Space Agency. **Application of Radiometric Calibration LUT**. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>> Acesso em 25 set de 2017. 2015b.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS**. Sistema de Informação Geográfica para área de trabalho de computador, versão 10.1. 2013. Disponível em: <<https://www.arcgis.com/features/>>. Acesso em: 09 out. 2017.

FATMA, Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina, Brasil. **Obras de Proteção Contra Enchentes em Torrentes e Rios**. Florianópolis. 1999.

FEMA, *Federal Emergency Management Agency of United States*. **National Flood Insurance Program: Flood Hazard Mapping**. Disponível em: <<https://www.fema.gov/national-flood-insurance-program-flood-hazard-mapping>> Acesso em 18 de nov de 2017.

GIUSTARINI, Laura et al. A change detection approach to flood mapping in urban areas using TerraSAR-X. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 4, p. 2417-2430, 2013.

GIOVANNI, N. A. S. A. **Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center**.

GOOGLE CRISIS 2017. **Rescue Houston**. Disponível em : < [https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=15Zevlh0kwqYvAQnEebVidjZ0Vlo&hl=en&ll=35.911684 648175 11%2C-94.536046 725&z=5](https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=15Zevlh0kwqYvAQnEebVidjZ0Vlo&hl=en&ll=35.911684%2C-94.536046725&z=5)> . Acesso em 18 nov de 2017.

GREY, N. **How Houston Regulates Land Use**. Fonte: Market Urbanism: Disponível em: <<http://marketurbanism.com/2016/09/19/how-houston-regulates-land-use/>>. Acesso em 5 de out de 2017. 19 de setembro de 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. 2015.

INPE. **Tutoriais de Geoprocessamento**. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/radar.html>>. Acesso em 10 set de 2017. 2006

JENSEN, John R.; EPIPHANIO, José Carlos Neves. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Parêntese, 2011.

KHAN, Shuhab D. **Urban development and flooding in Houston Texas, inferences from remote sensing data using neural network technique**. Environmental Geology, v. 47, n. 8, p. 1120-1127, 2005.

LEE, Jong-Sen. **A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, n. 1, p. 85-89, 1983.

LEWYN, Michael E. **How overregulation creates sprawl (Even in a city without zoning)**. Wayne L. Rev., v. 50, p. 1171, 2004.

LIU, CHANG. **Analysis of Sentinel-1 SAR Data for Mapping Standing Water in the Twente Region..** Tese de Doutorado. Master Thesis on Science in Geo-information Science and Earth Observation, University of Twente, Twente, The Netherlands. 2016

MCFEETERS, Stuart K. **The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features**. International journal of remote sensing, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MELLER, Adalberto. **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. 2012.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Embrapa Cerrados-Livros técnicos (INFOTECA-E), 2012.

MIGUEZ, Marcelo; REZENDE, Osvaldo; VERÓL, Aline. **Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade**. Elsevier Brasil, 2015.

MORAES, EML de. **Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 4ªed, 2010

NASA. (2017 a). **Fundamentals of Remote Sensing**. Fonte: ARSET - Applied Remote Sensing Training: <https://arset.gsfc.nasa.gov/webinars/fundamentals-remote-sensing>

NASA. (2017 b). **SAR Processing and Data Analysis**. Acesso em 15 de Agosto de 2017, disponível em Applied Remote Sensing Training - ARSET : <https://arset.gsfc.nasa.gov/>

NATIONAL RESEARCH COUNCIL *et al.* **Affordability of national flood insurance program premiums: Report 1**. National Academies Press, 2015.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration (2017A). **Reviewing Hurricane Harvey's catastrophic rain and flooding**. Climate.gov. Disponível em < <https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/reviewing-hurricane-harveys-catastrophic-rain-and-flooding>> Acesso em 25 de nov de 2017.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration,. (2017b). . **Major Hurricane Harvey - August 25-29**. Disponível em < http://www.weather.gov/crp/hurricane_harvey > Acesso em 25 de nov de 2017. 2017.

NWS, National Weather Service Forecast Office. **Monthly Climate Normals (1981-2010) - Houston Area, TX**. Disponível em < http://w2.weather.gov/climate/xma_cis.php?wfo=hgx > Acesso em 25 de nov de 2017.

PAULA, Telmo José Alves Gomes de. **Zonas inundáveis e quantificação do risco de inundação em meios urbanos**. 2013. Dissertação de Mestrado

REES, William Gareth. **Physical principles of remote sensing**. Cambridge university press, 2012.

RIGHI, Eléia. **Risco a inundação em médio curso do rio Uruguai: um estudo de caso nos municípios de Porto Lucena e São Borja**. 2011.

SANT'ANNA, S. J. S.; FERNANDES, D.; LACAVA, JC da S. **Análise comparativa do desempenho de filtros redutores de "speckle" em imagens SAR**. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT), v. 9, 2001.

SMC, Secretaria Municipal do Planejamento de Rio Negrinho/SC. Prefeitura Municipal de Rio Negrinho/SC. **Plano Diretor de Desenvolvimento Ambiental – Urbano e Rural do Município de Rio Negrinho**. Rio Negrinho, 2006.

SMMA, SECRETARIA DE MUNICÍPIO DE MEIO AMBIENTE de Rio Grande. **Prefeitura Municipal de Rio Grande. Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do Município de Rio Grande**. Diagnóstico do Saneamento Básico. Subproduto 2.2 TOMO III. Rio Grande, 2013.

SEOM. Scientific Exploitation of Operational Missions. **SNAP - Sentinel Application Platform**. Versão 5.0.0. Disponível em : <<http://step.esa.int/main/download/>> Acesso em 09 de set 2017.

TUCCI, Carlos EM *et al.* **Inundações urbanas na América do Sul**. Ed. dos Autores, Porto Alegre, 2003.

TUCCI, Carlos EM. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, 2005.

TUCCI, Carlos EM. **Gestão da drenagem urbana**. 2012.

ULABY, F. T., MOORE, R. K., & FUNG, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive. From theory to applications**, Vol. 3. Boston, London: Artech House 1098 pp. 1986 União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA). Dados e Cotações – Estatísticas, Produção Brasil. 2009.

US Bureau of Census **United States Census Bureau**., disponível em <<https://www.census.gov/quickfacts/fact/dashboard/houstoncitytexas/LND110210>> . Acesso em 14 de Outubro de 2017. 2010

USGS. United States Geological Survey. **Event Support Map. - Science for a changing world**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/special-topic/hurricane-harvey>> Acesso em 12 nov de 2017).

XU, Hanqiu. **Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery**. International journal of remote sensing, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.