

SISTEMA DE ALERTA AO FENÔMENO DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO UM RADAR OBRITAL EM VILLAHERMOSA, MÉXICO

Isabela H. C. Silva^a, Carlos H. Beisl^a, Fernando P. Miranda^b e Luiz Landau^c

^aLabSAR. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Centro de Tecnologia, Bloco I 114. Cidade Universitária. Ilha do Fundão. CEP: 2194900. Rio de Janeiro, Brasil, isabela@labsar.coppe.ufrj.br; beils@labsar.com.br

^bPETROBRAS. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (PETROBRAS/CENPES). Avenida Horácio Macedo 950, Cidade Universitária, Ilha do Fundão. CEP: 21941-915, Rio de Janeiro, Brasil, fmiranda@petrobras.com.br

^cLAMCE. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Centro de Tecnologia, Bloco I 214. Cidade Universitária. Ilha do Fundão. CEP: 2194900. Rio de Janeiro, Brasil, Landau@lamce.com.br

Palavras Chave: Imagens RADARSAT, Fenômeno de Inundação, Sistema de alerta, México.

Resumo. O presente estudo propõe uma metodologia para caracterização espaço-temporal de inundações. Trata-se de uma abordagem inovadora no uso de imagens orbitais de radar, visando ao desenvolvimento de um método de alerta para desastres naturais relacionados a alagamentos. Foram utilizadas imagens dos satélites RADARSAT-1 e 2, dados de altimetria e pluviometria. A área de estudo abrange o entorno da cidade de Villahermosa, México, onde ocorreu uma grande inundação em 2008. O algoritmo USTC (*Unsupervised Semivariogram Textural Classifier*) foi inicialmente utilizado para individualizar as classes de cobertura representativas de água, floresta seca e floresta inundada ou edificações. Com este resultado foi possível quantificar a extensão da inundação. Para definir a área de influência da precipitação, foi delimitada a bacia hidrográfica na qual a cidade está inserida. Os dados de precipitação provenientes de estações climatológicas foram então associados à evolução da distribuição das áreas alagadas, o que permitiu identificar a duração da inundação. Foi também possível determinar um limiar de alerta para a quantidade cumulativa de precipitação e para a área inundada correspondente em 2008. As séries históricas de precipitação indicam que é possível que aconteçam futuras

inundações em Villahermosa, o que ressalta a importância da metodologia proposta.

1 INTRODUÇÃO

Na natureza, acontecem diversos fenômenos que fazem parte da dinâmica terrestre e são responsáveis pela estruturação da paisagem. Quando estes ocorrem ou se deslocam sobre um sistema social, podem constituir perigo potencial a pessoas e bens. Nesta situação, passam a ser considerados desastres. (Marcelino, 2007).

De acordo com Zonensein (2007), os impactos sobre a população são mais evidentes em áreas urbanas, onde existe a ocupação irregular de encostas e de áreas naturalmente alagáveis. O presente trabalho aborda o fenômeno de inundações, que tem afetado o meio ambiente e ameaçado a vida humana. Trata-se de um dos desastres naturais de maior impacto na superfície terrestre, causando danos sociais, ambientais e econômicos.

Assim, é de extrema importância o desenvolvimento de modelos para a formulação de planos de emergência voltados para o risco de inundação. Neste contexto, as geotecnologias, principalmente o sensoriamento remoto, tornam-se importantes ferramentas de suporte ao estudo das inundações, uma vez que permitem o rápido e preciso imageamento de extensas regiões.

Os satélites RADARSAT-1 e 2 permitem o eficiente monitoramento de regiões cobertas por nuvens, uma vez que a aquisição dos dados de radar independe de condições atmosféricas. Além disso, sob certas condições, o pulso do radar é capaz de penetrar o dossel vegetal e detectar alagamento em terrenos florestados (Paradella *et al.* 2005). Verifica-se, portanto, que é grande o potencial de uso desses sistemas, para os quais a nebulosidade é praticamente transparente, em aplicações relacionadas ao fenômeno de inundação, uma vez que a relação das chuvas com a cobertura de nuvens é direta.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Delimitação e aspectos gerais

A área de estudo, inserida em território mexicano, corresponde ao entorno da cidade de Villahermosa, capital do estado de Tabasco (Figura 1). Tal unidade federativa ocupa a porção meridional do Golfo do México, limitando-se a leste com o Estado de Campeche e com a República da Guatemala, a oeste com o Estado de Veracruz, a sul com o Estado de Chiapas e a norte com o mar.

Sua distribuição na superfície é definida pela interseção das áreas recobertas pelas imagens RADARSAT – 2 utilizadas no presente trabalho, adquiridas em 09/10/2008, 21/10/2008, 02/11/2008 e 26/11/2008, abrangendo cerca de 2.332,78 km² (Figura 1). A Tabela 1 mostra as coordenadas geográficas do vértice do polígono que envolve a região investigada.

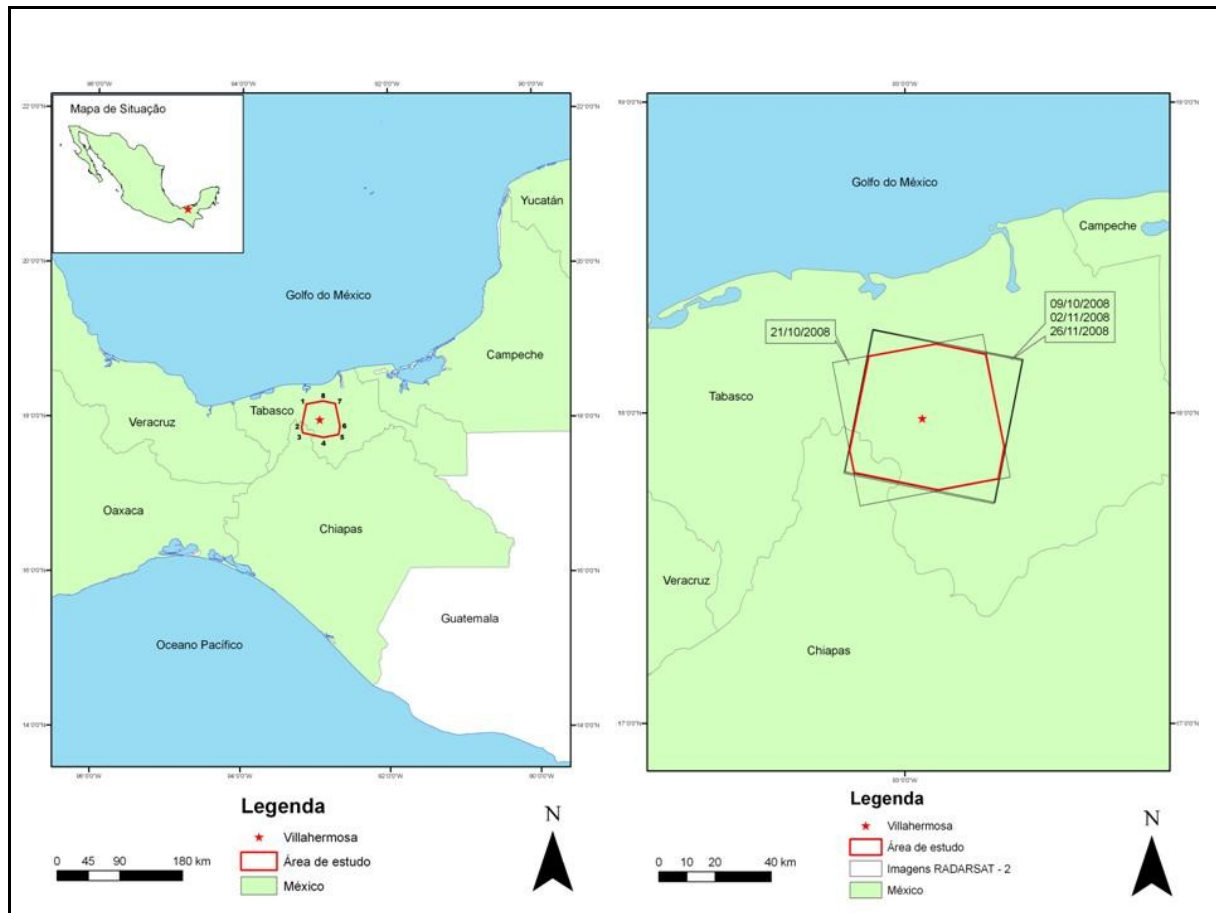


Figura 1 – Mapas de localização da área de estudo. Os números referem-se aos vértices do polígono cujas coordenadas geográficas estão na Tabela 1.

VÉRTICE	LATITUDE	LONGITUDE
1	18° 11' 05" N	93° 07' 19" W
2	17° 52' 52" N	93° 11' 10" W
3	17° 48' 35" N	93° 10' 15" W
4	17° 45' 24" N	92° 53' 24" W
5	17° 47' 22" N	92° 41' 11" W
6	17° 53' 30" N	92° 39' 57" W
7	18° 11' 25" N	92° 43' 40" W
8	18° 13' 29" N	92° 53' 40" W

Tabela 1 - Coordenadas geográficas dos vértices do polígono que envolve a região investigada.

3 SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR

Existem no sensoriamento remoto dois tipos de sistemas sensores: os ativos e os passivos. Os sistemas ativos de radar possuem sua própria fonte de energia e geram imagens a partir do registro da energia eletromagnética retroespalhada pelos objetos na superfície terrestre. Tais sensores utilizam a faixa de microondas, cujos comprimentos de onda variam de 1 mm a 1 m (Figura 2 e Tabela 2). Assim, não dependem da luz solar para sua operação e, por isso, podem adquirir dados durante o dia e a noite, o que traz a vantagem de diminuir o período de revisita à área de interesse. O termo radar deriva da expressão em inglês *Radio Detection and Ranging*. Paradella *et al.* (2005) definem o radar imageador como um sensor que permite derivar informações sobre características físicas (geometria, forma, rugosidade) e elétricas dos alvos.

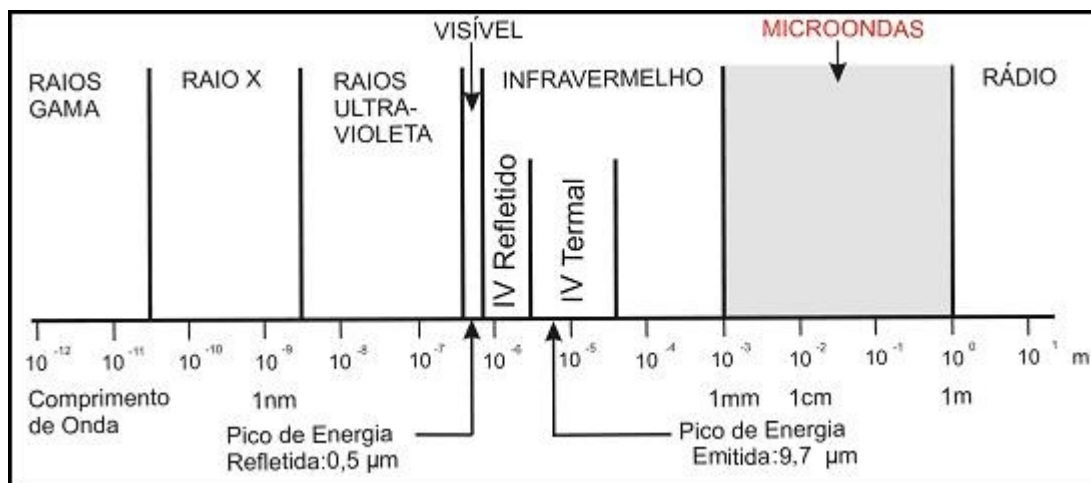


Figura 2 - Espectro eletromagnético. Modificado de Sabins (1997).

Bandas	Comprimento de onda (λ), cm	Frequência (ν), GHz
K	0,8 - 2,4	40,0 - 12,5
X	2,4 - 3,8	12,5 - 8,0
C	3,8 - 7,5	8,0 - 4,0
S	7,5 - 15,0	4,0 - 2,0
L	15,0 - 30,0	2,0 - 1,0
P	30,0 - 100,0	1,0 - 0,3

Tabela 2 - Comprimento de onda e frequência de cada uma das bandas dos sistemas de radar. A

designação das bandas de radar com letras do alfabeto foi definida por razões militares na Segunda Guerra Mundial. Modificado de Sabins,1997.

Outra importante vantagem oferecida pelos sistemas de radar é a independência do imageamento em relação às condições atmosféricas e de poluição, uma vez que as microondas são capazes de penetrar nas nuvens, fumaça e poeira. Isto é particularmente relevante em regiões como o entorno de Villahermosa, onde a presença de nuvens é constante na época das enchentes.

Além disso, o radar é o único sensor remoto com capacidade de penetração no dossel vegetal. Segundo Lang et al. (2008), esta característica torna o sensoriamento remoto por radar uma ótima alternativa para o monitoramento de inundações em áreas cobertas por florestas.

3.1 O sistema RADARSAT

O Satélite RADARSAT foi desenvolvido sob a coordenação da CSA (*Canadian Space Agency*). O primeiro representante da série, RADARSAT-1, foi lançado em 1995, com a finalidade de monitorar mudanças ambientais e mapear os recursos naturais do planeta. Em 2007, foi lançado o segundo satélite da série, apresentando importantes melhorias em relação ao anterior. O sistema possui a bordo um radar de abertura sintética (SAR).

O RADARSAT-1 opera na banda C, com frequência de 5,3 GHz e comprimento de onda de 5,6 cm. Possui polarização HH, opera a uma altitude de 798 km e utiliza uma antena com dimensões de 15 m x 1,5 m. Sua órbita é circular, sol-síncrona, com inclinação de 98,6°. A resolução temporal é de 24 dias para um mesmo modo de operação. O sensor opera em diferentes modos: Fine, Standard, Wide, ScanSAR Narrow, Scansar Wide, Extended Low e Extended High. A faixa por ele imageada varia entre 50 km x 50 km e 500 km x 500 km, com resolução espacial entre 8 e 100 m. A direção de visada é sempre à direita do satélite.

O RADARSAT-2 apresenta basicamente as mesmas configurações do RADARSAT-1 e incorpora algumas melhorias tecnológicas como a múltipla polarização, maior resolução espacial e possibilidades diferentes para a direção de visada (aquisição tanto à direita como à esquerda do satélite), o que possibilita o aumento da frequência de revisita, uma capacidade importante para fins de monitoramento (Sandem, 2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados

No decorrer do trabalho, foram manipulados os seguintes produtos:

- Cinco imagens SAR dos satélites da série RADARSAT, sendo uma do

RADARSAT-1 e quatro do RADARSAT-2;

- MDE (Modelo Digital de Elevação) gerado a partir da versão 4 do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission);
- Dados de precipitação fornecidos pela UNAM (Universidade Nacional Autónoma de México).

A área investigada encontra-se freqüentemente coberta por nuvens, o que justificou o uso das imagens de radar de abertura sintética (SAR) na banda C, obtidas pelos satélites RADARSAT-1 e RADARSAT-2, conforme descrito a seguir: RADARSAT-1 *Standard 4*, adquirida em 30/04/00; RADARSAT- 2 *Multi Look Fine 1 N*, adquirida em 09/10/08; RADARSAT- 2 *Multi Look Fine 5 N*, adquirida em 21/10/08; RADARSAT- 2 *Multi Look Fine 1 N*, adquirida em 02/11/08; RADARSAT- 2 *Multi Look Fine 1 N*, adquirida em 26/11/08. A Tabela 3 apresenta as principais características dos citados produtos. A imagem RADARSAT-1 corresponde à estação seca, enquanto que as imagens RADARSAT-2 foram adquiridas durante o fenômeno de inundação associado a um período de chuva intensa.

DATA DE AQUISIÇÃO (Período Hidrológico)	HORA DE AQUISIÇÃO (UTC)*	MODO DE OPERAÇÃO	ÓRBITA	SATÉLITE
30/04/2000 (seca)	12:03:12	<i>Standard 4</i>	Descendente	RADARSAT-1
09/10/2008 (inundação)	0:03:20	<i>Multi Look Fine 1N</i>	Descendente	RADARSAT-2
21/10/2008 (inundação)	0:27:35	<i>Multi Look Fine 5N</i>	Ascendente	RADARSAT-2
02/11/2008 (inundação)	0:03:20	<i>Multi Look Fine 1N</i>	Descendente	RADARSAT-2
26/11/2008 (inundação)	0:03:20	<i>Multi Look Fine 1N</i>	Descendente	RADARSAT-2

*UTC – *Coordinated Universal Time*

Tabela 3: Características das imagens RADARSAT – 1 e 2 utilizadas na pesquisa.

O MDE adotado foi a versão 4 do SRTM, baixado gratuitamente do *website* <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdataprocessingmethodology.asp>, no formato HGT compactado e com resolução espacial de 90 m. Tal produto pode ser visto na Figura 3, onde foi efetuado um recorte para a Bacia Villahermosa, com o intuito de evidenciar a amplitude de seus valores altimétricos.

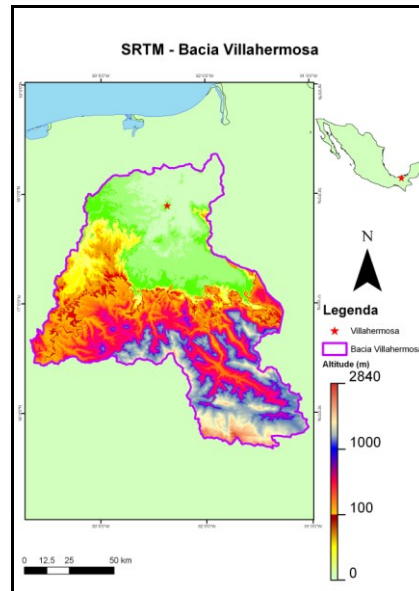


Figura 3 – Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido com dados da SRTM na área referente à Bacia Villahermosa.

Os dados de precipitação utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela UNAM. A instituição disponibilizou séries históricas mensais, no período de 1958 e 2008, obtidas por 10 estações climatológicas localizadas no interior da Bacia Villahermosa (Figura 4). Para o ano de 2008, foram cedidos dados diários de 13 estações climatológicas (Figura 5).

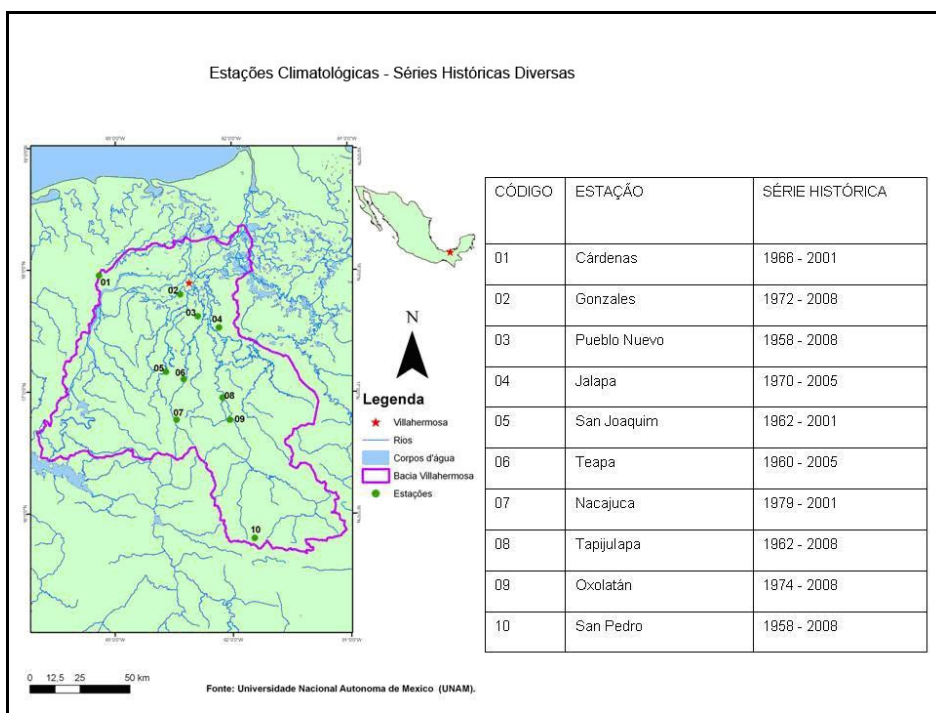


Figura 4– Estações climatológicas e séries históricas disponibilizadas pela UNAM (período de 1958-2008).

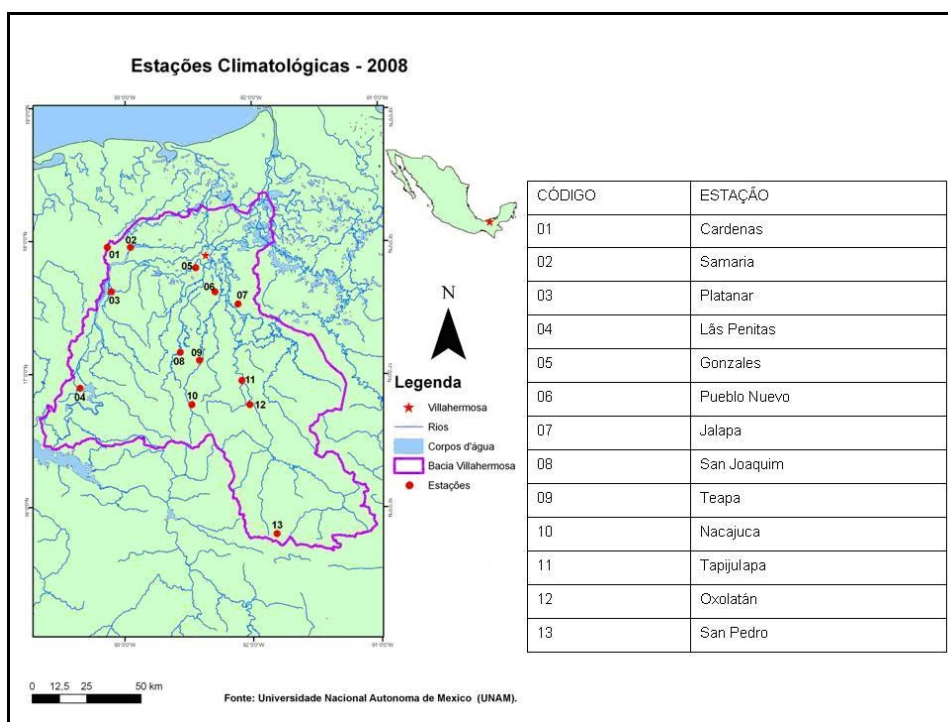


Figura 5 – Estações climatológicas cujos dados diários obtidos em 2008 foram disponibilizados pela UNAM.

4.2 Processamento digital das imagens RADARSAT -1 e 2

A fase operacional da pesquisa se iniciou com o processamento digital dos produtos RADARSAT e do MDE. As imagens orbitais classificadas possibilitaram a delimitação dos corpos d'água. A partir do MDE, foram extraídas as curvas de nível e a rede de drenagem, elementos essenciais para a delimitação da bacia hidrográfica. Este resultado, juntamente com os dados de precipitação, permitiu a identificação e quantificação do fenômeno de inundação.

Durante a fase de processamento dos dados SAR, foi usado um filtro para a redução do ruído *speckle*. De acordo com Gonçalves e Souza Filho (2005), Gonçalves *et al.* 2009 e Teixeira e Souza Filho 2009 o filtro Frost é o que apresenta melhores resultados com dados RADARSAT- 1, uma vez que preserva as características texturais e as feições de borda presentes na imagem original.

Em seguida, as imagens foram ortorretificadas, de modo a promover a correção geométrica e o georreferenciamento dos dados. Para realizar o georreferenciamento, foi utilizado o datum de referência WGS (*World Geodetic System*) 1984, para o fuso 15 N; o sistema de projeção foi o UTM (*Universal Transverse Mercator*).

As imagens RADARSAT-1 e 2 foram submetidas à classificação textural por semivariogramas (USTC – *Unsupervised Semivariogram Textural Classifier*), que considera informações texturais e radiométricas. O algoritmo emprega a função semivariograma como um descritor de textura, considerando o valor do pixel no contexto de seus vizinhos (Miranda *et al.*, 1997).

A informação textural é descrita pela forma e pelo valor da função semivariograma circular, como também pelo valor da variância dos DNs (*digital numbers*) em uma vizinhança circular. Já a informação radiométrica é representada pelos DNs das imagens após a eliminação do ruído *speckle*.

Há vários exemplos na literatura da utilização de semivariogramas para a classificação de imagens de radar: mapeamento de vegetação em regiões de floresta tropical úmida com dados SIR-B e JERS-1 SAR (Miranda e Beisl, 1999); identificação de padrões de uso do solo em áreas urbanas com dados do SIR-C (Carr e Miranda, 1998); detecção de exsudações de óleo utilizando imagens RADARSAT-1 no Golfo do México (Miranda *et al.*, 2004).

A partir da classificação USTC, foram individualizadas três classes (Figura 6), considerando o tipo de espalhamento (*scattering*) predominante na interação alvo-pulso do radar. Corpos d'água (reflexão especular); floresta seca (espalhamento difuso); vegetação inundada e edificações (reflexão de canto).

A classe 1 (corpos d'água) está associada a superfícies lisas para o radar, ou seja, que refletem a energia transmitida pelo radar em sentido oposto ao da antena, não retornando praticamente nenhuma energia ao sistema sensor. Nas imagens em questão, esta classe corresponde às regiões completamente inundadas.

A classe 2 (floresta seca) está associada a superfícies rugosas ao radar, ou seja, que espalham a energia transmitida pelo radar de forma difusa, em todas as direções, inclusive na direção da antena. Na área de estudo, esta classe corresponde às regiões

de vegetação seca.

A classe 3 (vegetação inundada e edificações) está associada a superfícies que provocam a reflexão de canto, com forte sinal de retorno para o sistema sensor, o que gera ambigüidades, pois podem corresponder tanto a alvos antrópicos como naturais.



Figura 6 – Classificação USTC de imagem SAR em relação aos mecanismos de interação alvo-pulso do radar.

4.3 Tratamento dos dados de precipitação

Como pode ser visto na Figura 4, nem todas as séries históricas de precipitação iniciam e terminam na mesma data. Embora estejam situadas no período de 1958 até 2008, apenas duas séries estão completas: Pueblo Nuevo (03) e San Pedro (10). Sendo assim, foi necessário definir um núcleo comum temporal para sua manipulação. Após detalhada observação das séries, adotou-se o período de 1970 até 2001 como núcleo comum entre as 10 estações. Mesmo assim, Gonzales (02) e Nacajuca (07) apresentaram ausência de dados no início da série e as outras apresentaram lacunas no período núcleo. Para solucionar esta questão, foi feito o preenchimento de falhas com base na posição geográfica e no perfil ao longo do período de cada estação, utilizando o software SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*).

Exclusivamente para o ano de 2008, foram disponibilizados os dados diários das 13 estações climatológicas da Figura 5. Para tornar mais prático o processamento,

esses dados diários foram totalizados em dados mensais.

4.4 Caracterização espaço-temporal do fenômeno de inundação

Após a análise dos dados de precipitação, os mesmos foram integrados à informação de área inundada, com o objetivo de proceder à caracterização espaço-temporal do fenômeno de inundação. Nesta etapa da pesquisa, consideraram-se apenas os dados de 2008, devido à disponibilidade de imagens SAR no período de inundação e de dados diários de precipitação.

O fluxograma da Figura 7 indica como foi gerado o gráfico de variação no tempo da precipitação e da área inundada em 2008, essencial para que se obtivesse o gráfico de alerta à inundação na cidade de Villahermosa.

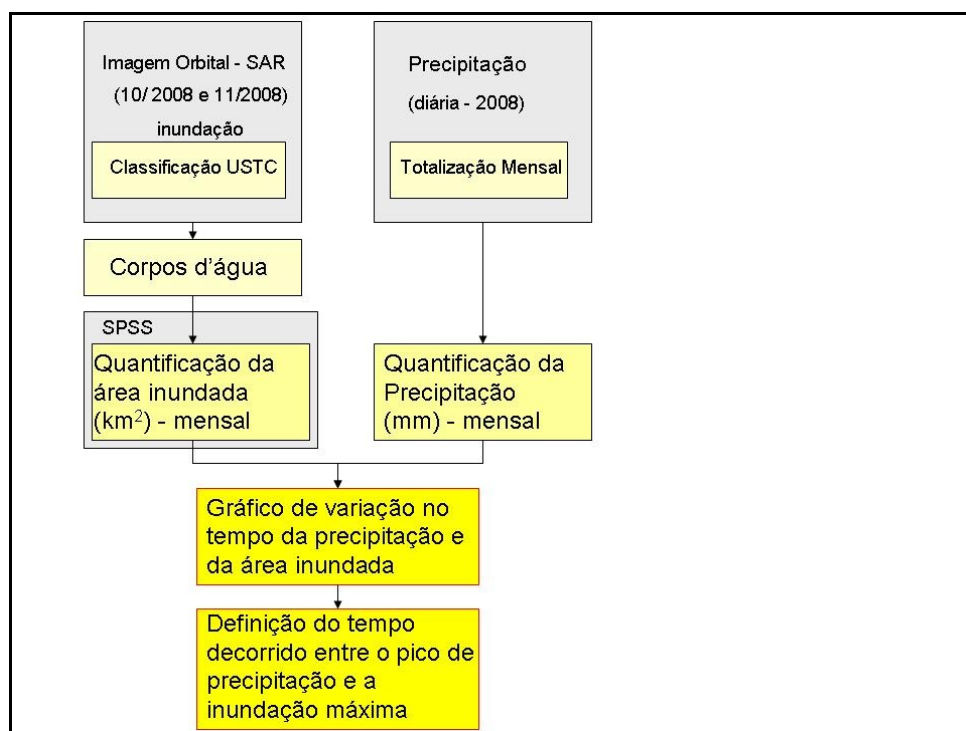


Figura 7 – Fluxograma de procedimentos para a obtenção do gráfico de variação no tempo da precipitação e área inundada em 2008.

Na interseção das imagens RADARSAT 2, foi determinada para trabalho uma área de 2.332,78 km²(Figura 1). A classificação USTC das citadas imagens permitiu o cálculo da área inundada. Como visto anteriormente, a imagem RADARSAT-1 (30/04/2000) corresponde ao nível de referência da água na estação seca, enquanto que as imagens RADARSAT-2 foram adquiridas durante a inundação.

Assim, para cada imagem, foi calculada a área inundada, a saber: um valor para o mês de abril (110,16 km²); dois valores para o mês de outubro (347,85 km² no dia 09 e 272,84 km² no dia 21); dois valores para o mês de novembro (265,01 km² no dia 02 e 148,36 km² no dia 26).

Como a escala de observação adotada é mensal, foi necessário calcular a média

para os dois valores dos meses de outubro e novembro, respectivamente, de modo a caracterizar o valor correspondente a cada mês. Assim, outubro obteve 310,34 km² enquanto que para novembro, 206,68 km². Tendo três valores, o de abril para o nível de referência da água, o de outubro correspondendo à máxima inundação e o de novembro referente à inundação intermediária, os valores dos outros meses do ano foram interpolados com o software SPSS.

Para o ano de 2008, os dados de precipitação fornecidos pela UNAM são diários para as 13 estações. Como discutido anteriormente, foi efetuada a totalização mensal de todas as estações da Bacia Villahermosa.

Cabe mencionar que se optou por trabalhar em escala mensal para homogeneizar a base de dados e facilitar o processamento dos mesmos, visto que as séries históricas de precipitação são mensais. Quanto à área inundada, julgou-se mais conveniente usar três valores mensais para interpolar doze do que usar cinco valores diários para interpolar trezentos e sessenta e cinco.

A etapa seguinte do trabalho consistiu na geração de um gráfico de alerta ao fenômeno de inundação na cidade de Villahermosa. O fluxograma da Figura 8 apresenta os procedimentos empregados na confecção do gráfico.

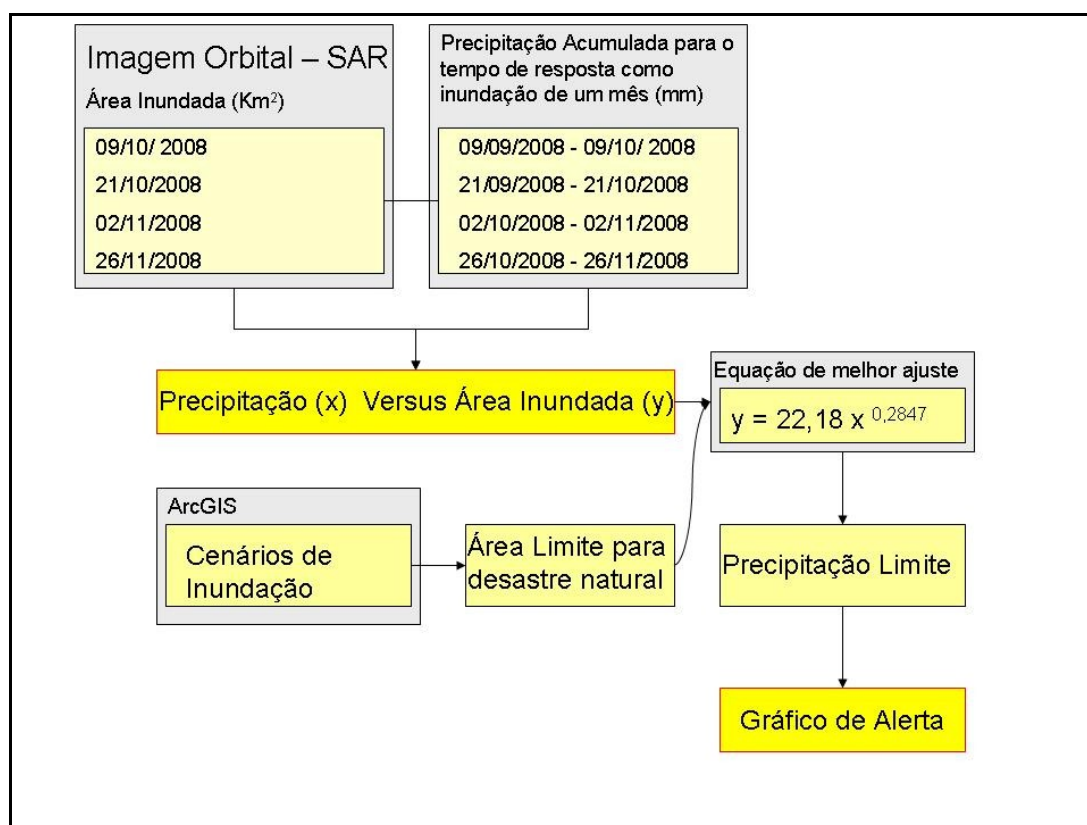


Figura 8 – Fluxograma de procedimentos para a obtenção do gráfico de alerta ao fenômeno de inundação em Villahermosa.

Adotando o tempo de inundação de um mês, para cada imagem RADARSAT-2 foi calculada a precipitação acumulada neste período. Para a imagem de 09/10/2008, a

precipitação acumulada corresponde a 9.699,6 mm (09/09/2008 – 09/10/2008); para a imagem de 21/10/2008, a precipitação acumulada corresponde a 11.081,7 mm (21/09/2008 – 21/10/2008); para a imagem de 02/11/2008, a precipitação acumulada corresponde a 5.801,1 mm (02/10/2008 – 02/11/2008); para a imagem de 26/11/2008, a precipitação acumulada corresponde a 821,9 mm (26/10/2008 – 26/11/2008). Assim, pode-se relacionar a precipitação acumulada com a área inundada correspondente.

A partir desta relação, foi possível plotar quatro pontos e, em seguida, encontrar a equação que melhor se ajustasse aos mesmos. Foram testados alguns modelos: linear, logarítmico, polinomial, potência e exponencial. A equação adotada foi a potência, pois apresentou o maior valor de R-quadrado (0,8987). A função que define esta equação é $Y = 22,18 X^{0,2847}$, como será apresentado no capítulo a seguir.

Definida esta relação, a etapa seguinte consistiu na determinação de uma sistemática de alerta. Para descobrir a quantidade de precipitação acumulada em um mês necessária para provocar uma inundação com as proporções de um desastre natural, primeiramente foi necessário definir um limiar de perigo para a área inundada no entorno de Villahermosa. Em seguida, com a equação da Figura 8, foi obtido o limiar de perigo para a precipitação.

No software ArcGis, foram gerados cenários de inundação para a área de estudo. Para tal procedimento, a base utilizada foi o SRTM e o incremento do nível d'água de um em um metro. A referência geográfica de perigo foi a área urbana de Villahermosa. Para cada cenário de inundação, foi calculada a área inundada. O valor encontrado, aplicado na equação de melhor ajuste aos pontos plotados, possibilitou a geração do gráfico de alerta para a cidade de Villahermosa.

5 RESULTADOS

5.1 Classificação das imagens RADARSAT-1 e 2

A classificação USTC individualizou três tipos de cobertura, tentativamente associados a distintas modalidades de interação do pulso do radar com alvos na superfície. As Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 mostram as imagens originais e as classificadas. A classe azul corresponde aos corpos d'água; a amarela às áreas urbanas e florestas inundadas; a verde às florestas secas.

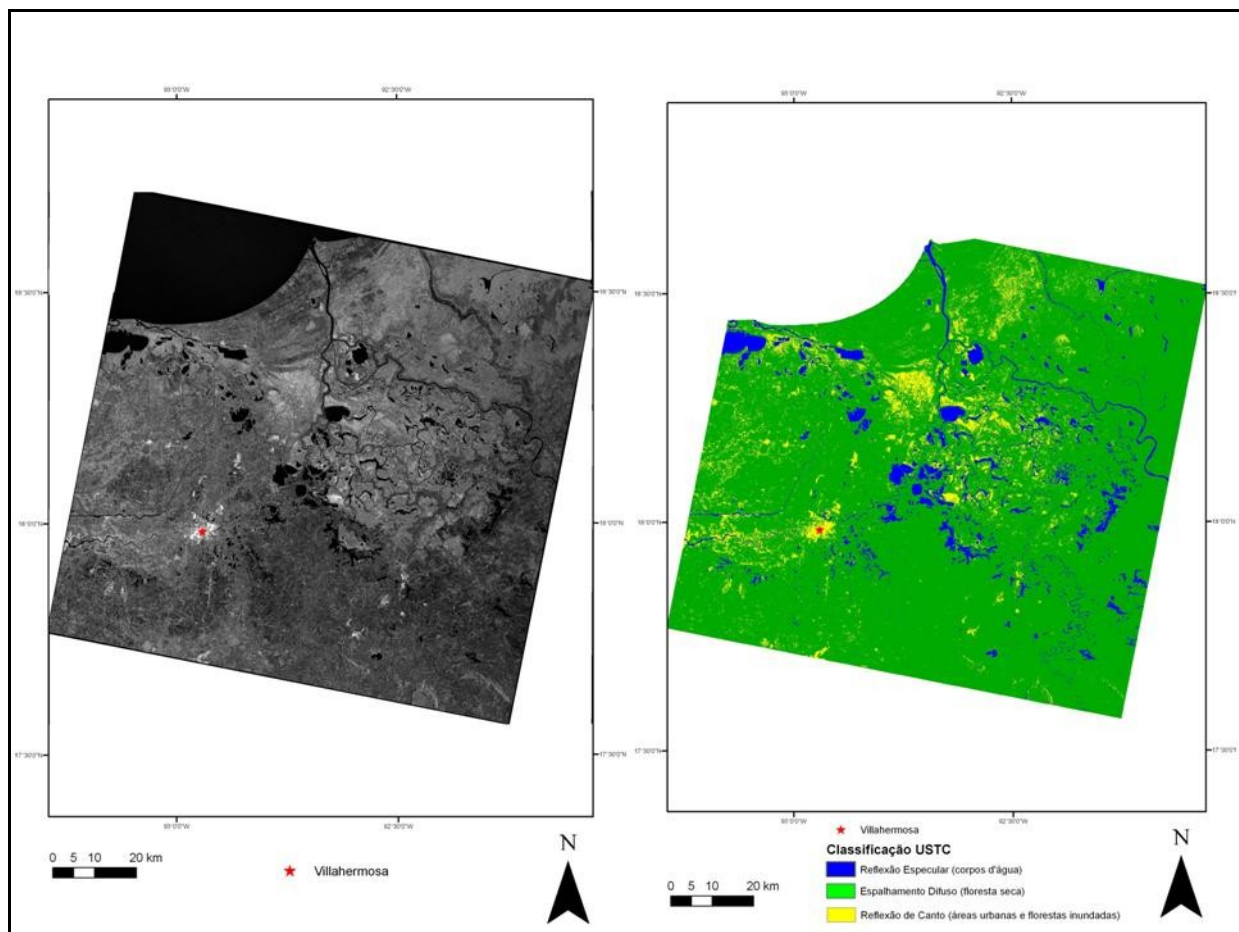


Figura 9 - Classificação USTC da imagem RADARSAT-1 S4 (30/04/2000).

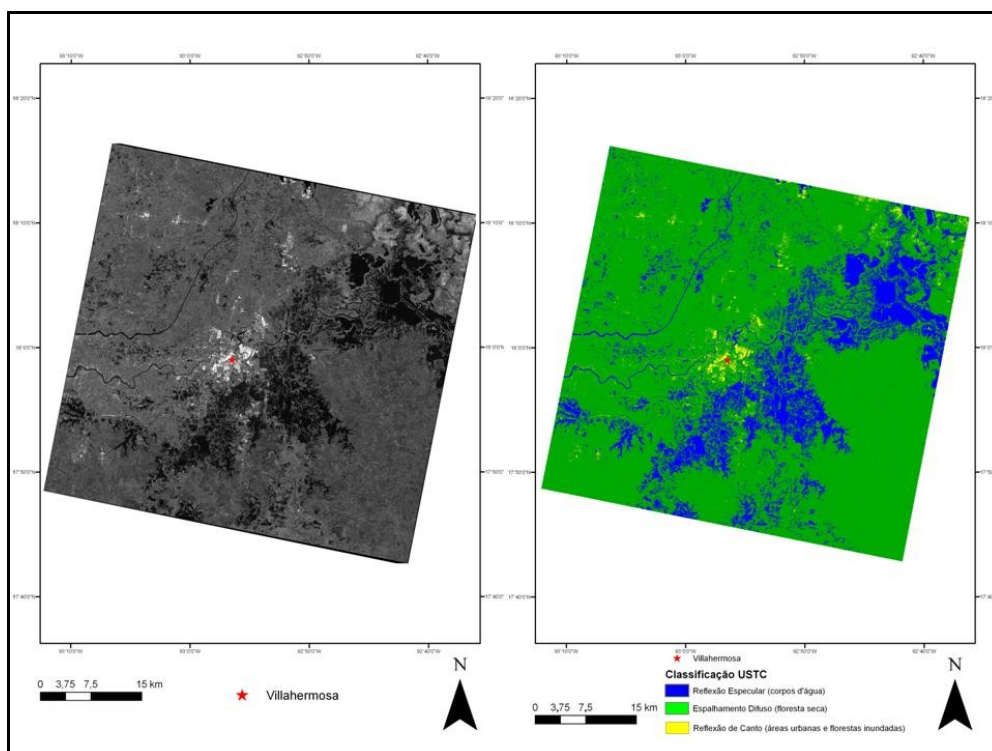


Figura 10 - Classificação USTC da imagem RADARSAT-2 MLF 1N (09/10/2008).

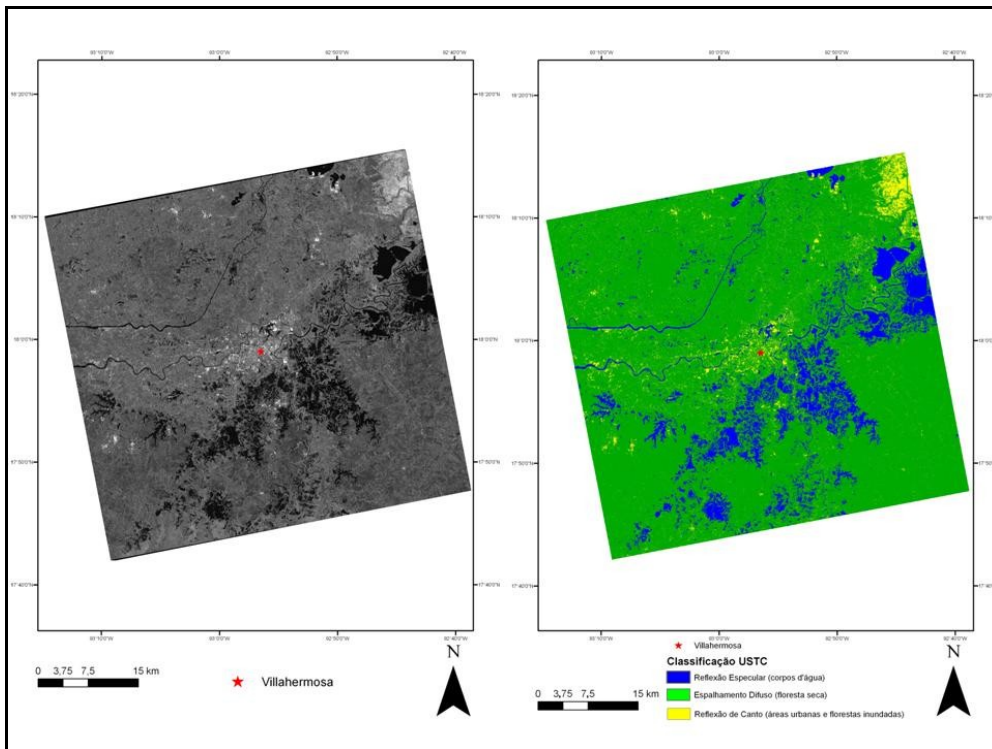


Figura 11 - Classificação USTC da imagem RADARSAT-2 MLF 5 N (21/10/2008).

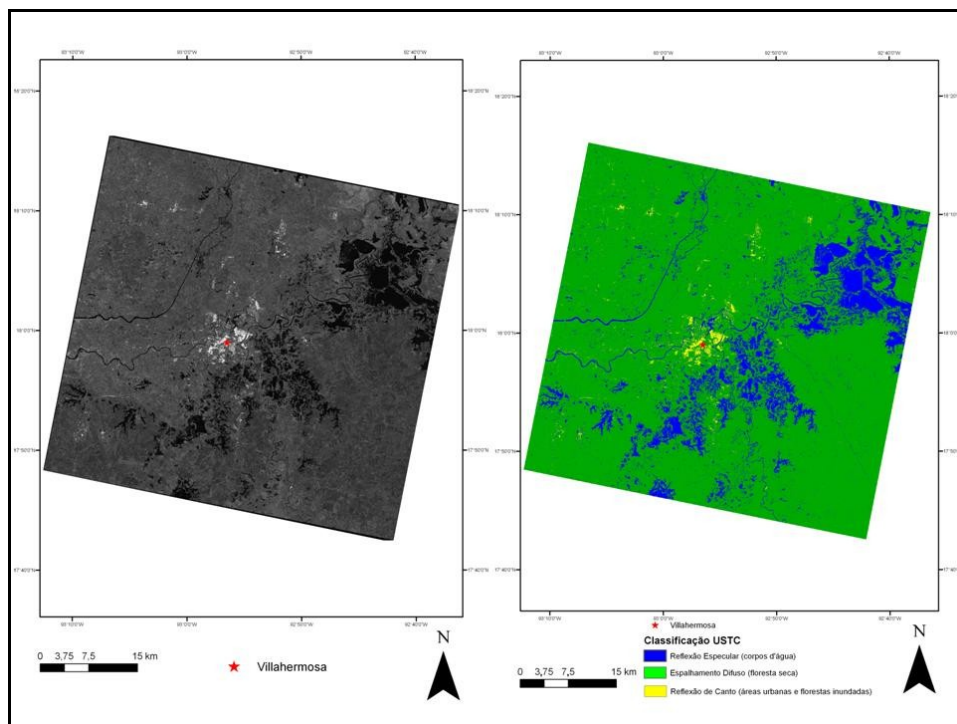


Figura 12 - Classificação USTC da imagem RADARSAT-2 MLF 1 N (02/11/2008).

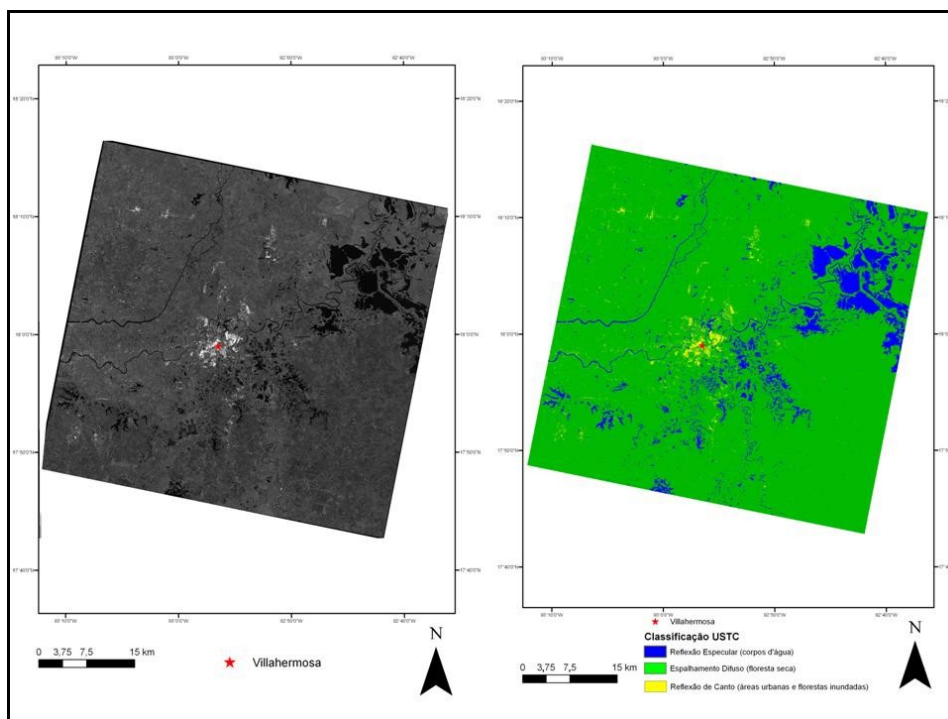


Figura 13 - Classificação USTC da imagem RADARSAT-2 MLF 1 N (26/11/2008).

A Tabela 4 quantifica a extensão de corpos d'água em km², de acordo com a classificação USTC das imagens RADARSAT-2, bem como o correspondente valor porcentual em relação à área de estudo.

DATA DE AQUISIÇÃO	SUPERFÍCIE COBERTA POR ÁGUA NA ÁREA DE ESTUDO (km ²)	PORCENTAGEM DE ÁREA INUNDADA EM RELAÇÃO À ÁREA TOTAL (%)
09/10/ 2008	347,85	14,91
21/10/ 2008	272,84	11,69
02/11/ 2008	265,01	11,36
26/11/ 2008	148,36	6,36

Tabela 4 - Quantificação de áreas inundadas de acordo com a classificação USTC das imagens RADARSAT-2.

5.2 Análise da precipitação

O gráfico da Figura 14 mostra a soma dos valores por mês, em cada ano, onde é possível perceber que os maiores índices ocorrem principalmente no mês de setembro. O traço na cor vermelha representa a média mensal para todas as estações, no período 1970 – 2001.

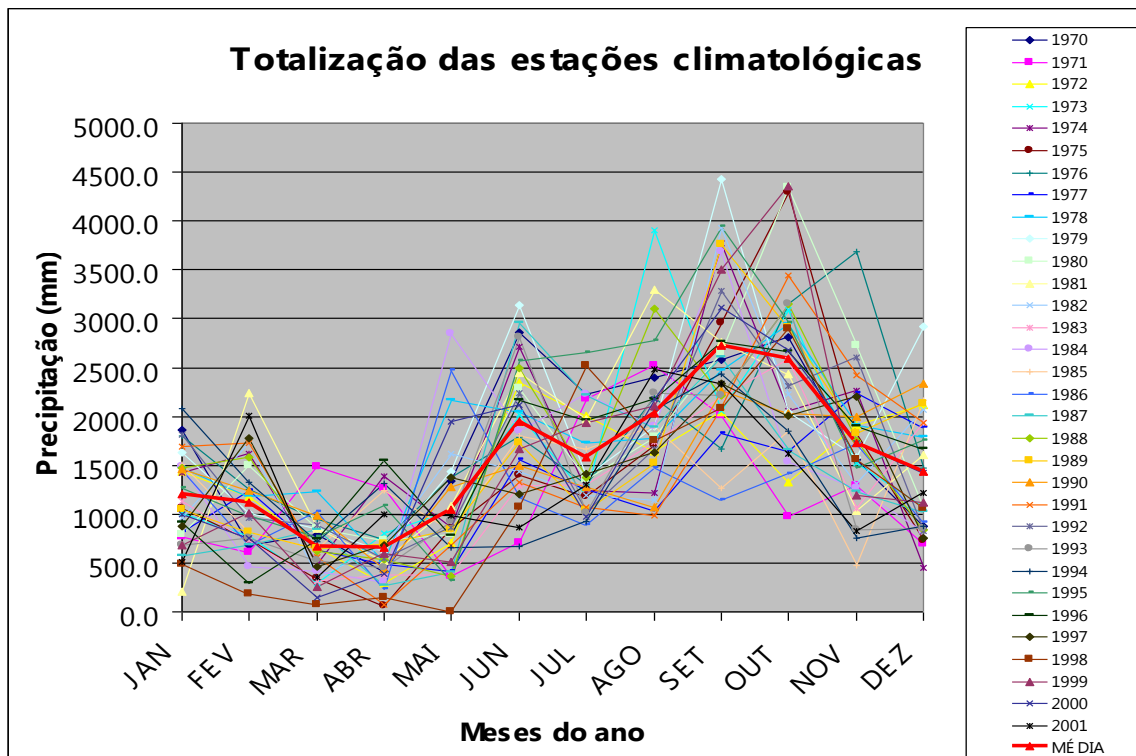


Figura 14 – Soma dos valores de precipitação (mm) por mês, em cada ano considerado, para todas as estações climatológicas.

Os dados de precipitação do ano de 2008 foram manipulados utilizando uma abordagem diferente. Primeiramente, foi realizada a análise do perfil das estações (Figura 15), com referência às séries históricas. Em seguida, os dados foram comparados com as imagens RADARSAT-2 que registraram o fenômeno de inundação. O resultado de tal comparação pode ser visualizado na Figura 16.

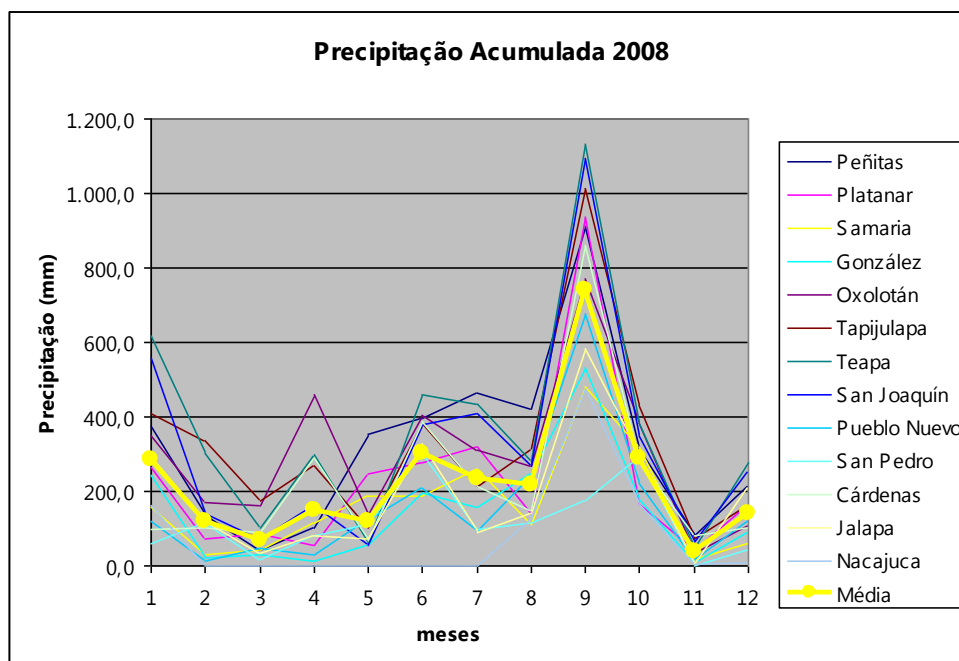


Figura 15 – Precipitação acumulada (mm) por estação em 2008.

5.3 Resultados da caracterização espaço-temporal do fenômeno de inundação

A Tabela 5 apresenta os valores mensais de precipitação e de área inundada, gerados a partir dos procedimentos apresentados na Figura 7. A partir destes valores, foi gerado o gráfico de variação no tempo da precipitação e da área inundada em 2008. (Figura 16).

Mês (2008)	Precipitação	
	(mm)	Inundação (km ²)
Janeiro	3.701,7	128,06
Fevereiro	1.557,5	121,53
Março	899,7	119,2
Abril	1.950,2	110,16
Mai	1.569,3	121,53
Junho	3.907,0	110,16
Julho	3.059,9	119,2
Agosto	2.815,0	123,63
Setembro	9.638,3	128,06

Outubro	3.784,1	310,34
Novembro	477,2	206,68
Dezembro	1.827,8	138,1

Tabela 5 – Valores mensais de precipitação e área inundada.

O gráfico contendo valores de precipitação e de área inundada (Figura 16) foi o primeiro produto desta análise a ser gerado, desempenhando papel fundamental para a obtenção do produto final: o gráfico de alerta. Isto porque, a partir do gráfico de variação no tempo da precipitação e da área inundada em 2008, foi possível definir o tempo decorrido entre o pico de precipitação e a inundação máxima.

Observando a Figura 16, nota-se que a precipitação fica abaixo de 4.000 mm durante quase todo ano, com exceção notável ao mês de setembro, que apresenta um pico pronunciado com precipitação maior que 9.000 mm. A média mensal para área inundada apresenta-se em torno de 120 km² durante todo o ano, com exceção dos meses de outubro (310,34 km²) e novembro (206,68 km²).

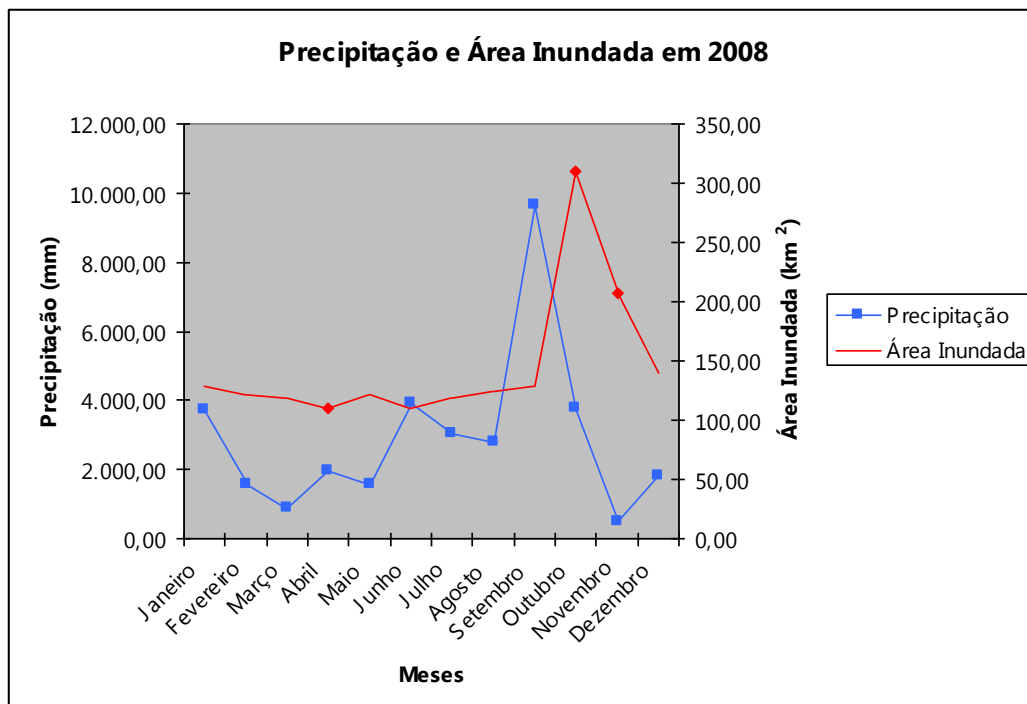


Figura 16 – Gráfico de variação no tempo da precipitação e da área inundada em 2008.

Em suma, o pico de precipitação ocorreu no mês de setembro e a inundação máxima no mês de outubro. Logo, o tempo de resposta à precipitação como inundação é de um mês. A precipitação acumulada no período de um mês, conforme mensurada nas treze estações climatológicas distribuídas na Bacia Villahermosa, pode eventualmente provocar uma inundação na cidade de Villahermosa.

Em seguida, foi feita a relação da precipitação acumulada no período de um mês (X) com a área inundada (Y) (Tabela 6 e Figura 17).

Precipitação (mm) - X	Área Inundada (km²) - Y
9.699,6	347,85
11.081,7	272,84
5.801,1	265,01
821,9	148,36

Tabela 6 – Precipitação acumulada no período de um mês e área inundada correspondente.

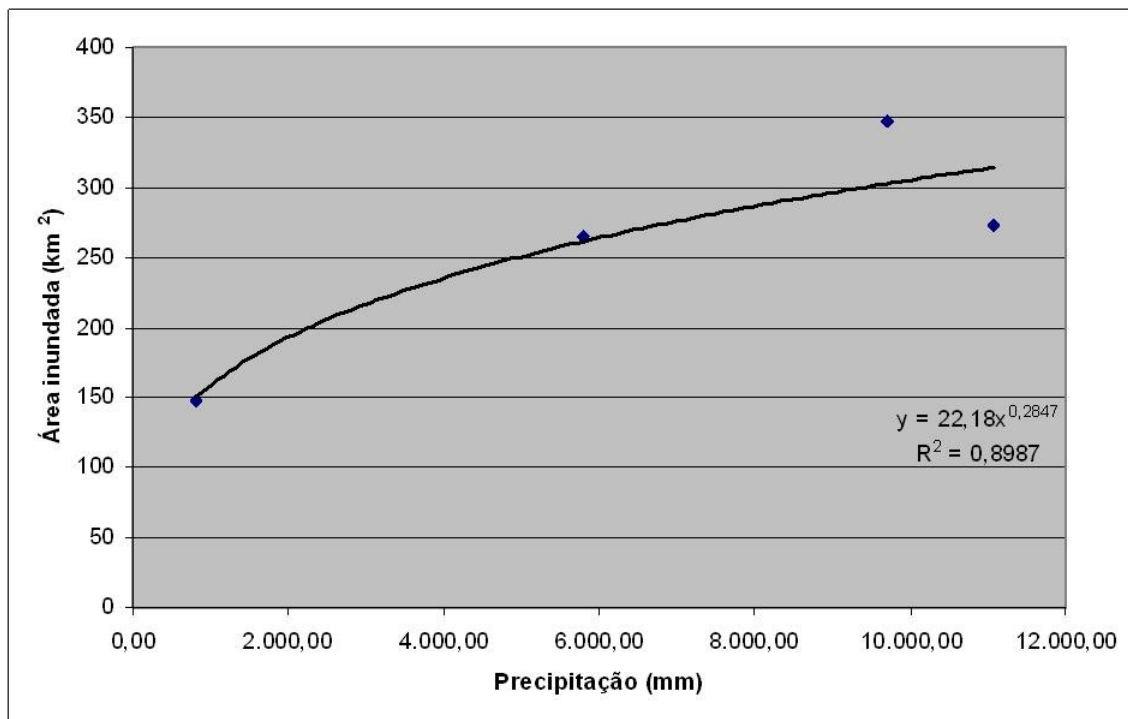


Figura 17 – Relação entre a área inundada e a precipitação acumulada no período de um mês.

O próximo resultado refere-se ao cenário de inundação, necessário para que se obtivesse o valor limite de área inundada (Figura 18). A Tabela 7 apresenta o nível d'água dos cenários e a área inundada correspondente.

Nível de água (m)	Área Inundada (km²)
1	72,39
2	133,69

3	242,45
---	---------------

Tabela 7 – Incremento do nível d'água nos dados SRTM e área inundada correspondente no entorno de Villahermosa.

No cenário de inundação de 3 m acima do nível altimétrico da SRTM, a área inundada foi de 242,45 km². Nesse caso, a inundação começa a interceptar mais claramente o polígono urbano de Villahermosa, representando perigo. Com efeito, vários pontos de contato são destacados com elipses na Figura 18. Assim, foi assumido na presente pesquisa o valor de 242,45 km² como o limiar inferior da área de inundação representativa da ocorrência de um desastre natural. Em outras palavras, aumentando-se a área inundada acima desse limiar, a área urbana de Villahermosa pode ter sua integridade ameaçada por alagamento.

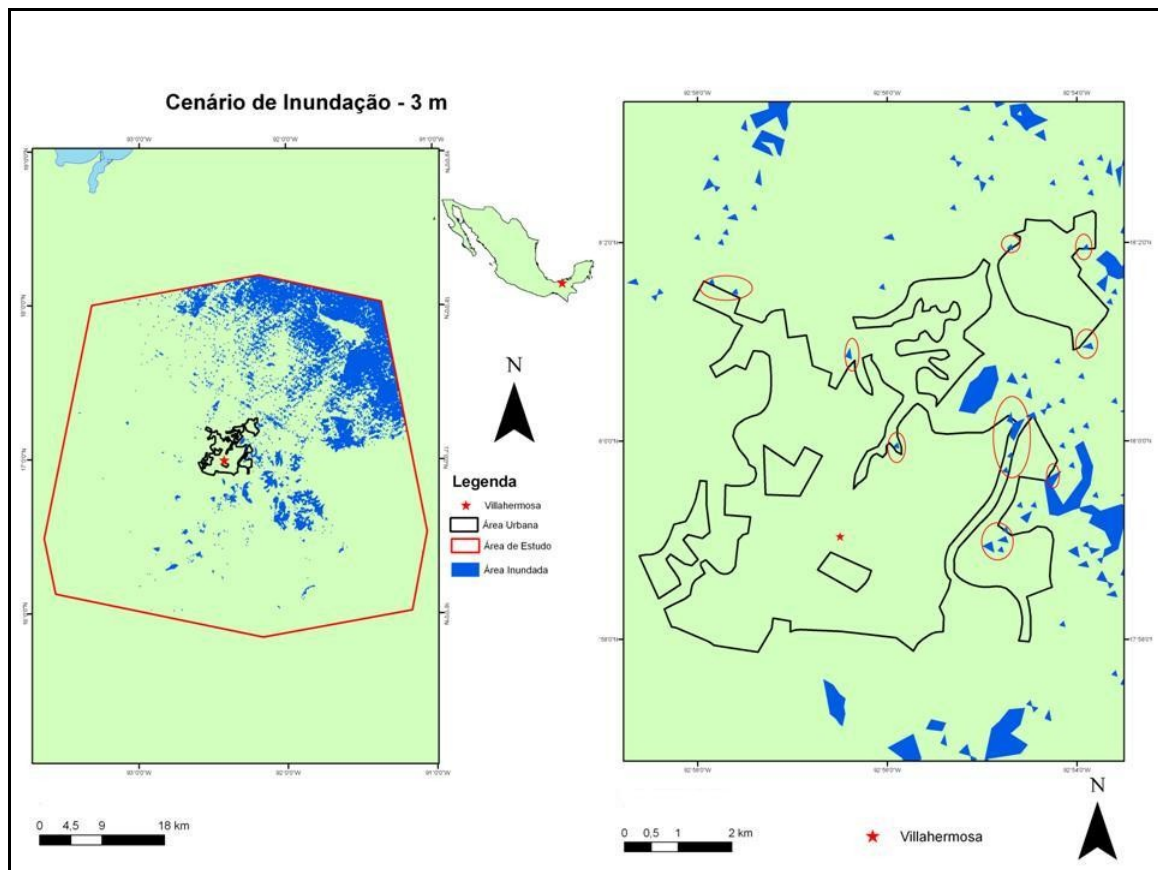


Figura 18 - Cenário de Inundação (3 m acima do nível altimétrico SRTM). Elipses representam pontos de contato da inundação com o polígono da área urbana de Villahermosa.

Plotando-se a área inundada de 242,45 km² no gráfico da Figura 19, o valor de alerta para a precipitação encontrado foi 4.449,0 mm. Tal resultado significa que, se no período de um mês a precipitação acumulada nas treze estações da Figura 5 for igual ou superior a este limiar, a cidade de Villahermosa deve estar em alerta, pois há

perigo de inundação (Figura 18). Na Figura 18 foi possível ainda identificar os locais mais suscetíveis à inundação num primeiro momento. Estes locais são definidos pelos pontos de contato da inundação com o polígono da área urbana de Villahermosa, marcados com elipses nessa figura.

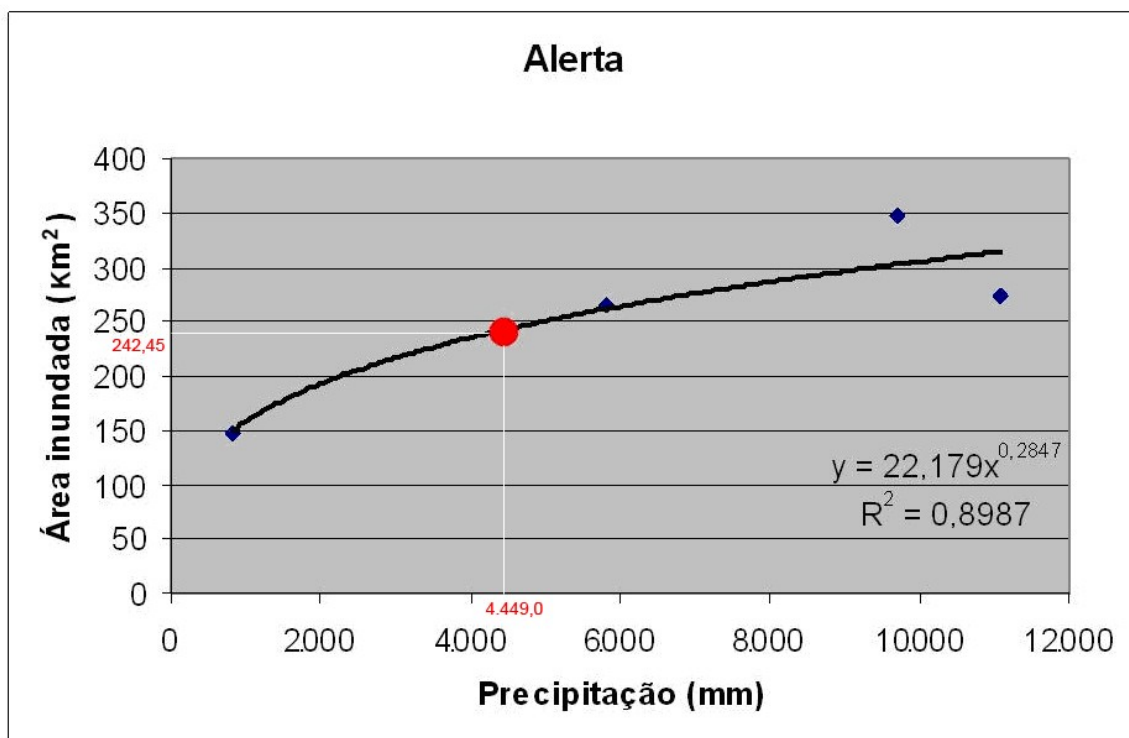


Figura 19 – Gráfico de alerta à inundação para a cidade de Villahermosa.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou uma abordagem inovadora no uso de imagens de sensoriamento remoto na faixa de microondas, visando ao desenvolvimento de uma metodologia de caracterização espaço-temporal de dinâmica de inundações em áreas costeiras tropicais.

No ambiente de alta complexidade da região de estudo, o entorno de Villahermosa, devido à intensa cobertura de nuvens, o monitoramento do fenômeno de inundações com os satélites RADARSAT-1 e 2 mostrou-se uma eficiente ferramenta para a detecção de mudanças em relação ao nível d'água.

Para a caracterização espaço-temporal do tempo de resposta à precipitação como fenômeno de inundação, adotou-se a escala mensal após se constatar que sua duração é de trinta dias. Os dados diários de precipitação de 2008 foram totalizados em dados mensais. Além disso, a área inundada, extraída das cinco imagens SAR, foi interpolada para que se obtivesse um valor de superfície alagada para cada mês de

2008. O valor de área inundada no mês de abril de 2000 corresponde ao nível de referência da época seca. Os demais, extraídos das imagens de outubro e novembro, referem-se ao período de inundação. A relação entre precipitação e área inundada seria certamente melhor caracterizada se existissem imagens disponíveis para os períodos entre abril e outubro e entre novembro e abril. Na verdade, o ideal seria a aquisição de, no mínimo, uma imagem para cada mês. Por isso, para o aprimoramento da metodologia aqui proposta, é fundamental que se obtenham mais imagens, com a melhor resolução temporal possível.

O estudo aqui realizado foi capaz de propor uma metodologia de alerta para ocorrência de inundações em Villahermosa. Assim, se, no intervalo de tempo de um mês, o total de precipitação cumulativa das estações climatológicas analisadas ultrapassar 4.449 mm, a zona metropolitana de Villahermosa encontra-se sob risco de desastre natural. Para planos de contingência a futuras inundações nessa cidade, recomenda-se a incorporação desta metodologia com a finalidade de monitorar a quantidade de precipitação e, paralelamente, a área inundada. Mediante a disponibilidade de dados, a mesma abordagem pode ser aplicada em outras áreas costeiras nos trópicos.

REFERENCIAS

- Carr, J.R., Miranda, F.P. The semivariogram in comparison to the co-occurrence matrix for classification of image texture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, p.1945-1952, 1998.
- Gonçalves, F. D; Souza Filho, P. W. M. Integração digital de imagens Radarsat-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará (Belém- PA). *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, pp 1789-1796, 2005.
- Gonçalves, F. D; Souza Filho, P. W. M; Paradella, W. R; Miranda, F. P. Fusão de dados multisensor para a identificação e o mapeamento de ambientes flúvio-estuarinos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27, supl.1, pp 57 – 67, 2009.
- Lang, M. W; Townsend, P. A; Kasischke, E. S. Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment*. v. 112, pp. 3898-3907, 2008.
- Marcelino, E. V. Desastres naturais e geotecnologias: Conceitos Básicos. *INPE*, Santa Maria, 2007.
- Miranda, F.P., Fonseca, L.E.N., Beisl, C.H, Rosenovist, A., Figueiredo, M.D.M.A.M. Seasonal mapping of flooding extent in the vicinities of the Balbina Dam (Central Amazonia) using RADARSAT-1 and JERS-1 SAR data. *Proceedings of the International Symposium Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)*, 1997.
- Miranda, F.P., Beisl, C.H. Seasonal delineation of flooded areas for pipeline management in Amazonia using spaceborne radar data. *Proceedings of the 8th International GIS for the Oil & Gas Industry Conference*, Houston, Texas, September 1999.

- Miranda, F.P., Marmol, A.M.Q., Pedroso, E.C., Beisl, C.H., Welgan. P., Morales, L.M. Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC). *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 30, nº 3, p. 424-436, 2004.
- Paradela, W. R; Santos, A. R; Veneziani, P. Cunha, E. S. P. Radares imageadores nas geociências: Status e perspectivas. *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, pp. 1847-1854, 2005.
- Sabins, F. F. *Remote sensing principles and interpretation*. 3º ed. W. H. Freeman and Company. New York, USA, 1997.
- Sandem, J. J. V. Anticipated applications of RADARSAT-2 data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 30, nº 3, p. 369-379, 2004.
- Teixeira, S. G; Souza Filho, P. W. M. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27, supl.1, pp 69 – 82, 2009.
- Zonensein, J. Índice de risco de cheia como ferramenta de gestão de enchentes. *Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, COPPE - UFRJ*. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.