

Análise de coeficientes de retroespalhamento de imagens multitemporais RADARSAT-1 na discriminação de ambientes costeiros tropicais da região da Baixada Maranhense

Sheila Gatinho Teixeira^{1,2}
Pedro Walfir Martins e Souza Filho^{1,2}

¹ Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica - CG/ UFPA

² Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido – LAIT, CG/ UFPA
Caixa Postal 86075, CEP: 66075-110, Belém, Pará
{shesal, walfir}@ufpa.br

Abstract. This study presents an analysis to the relationship between multitemporal Radarsat-1 backscattering coefficients and environmental conditions for four different wetlands (mangroves, salt marshes, fresh marshes and intermittent lakes) already mapped in “Baixada Maranhense” (Northern Maranhão State). The environments were analysed from four multitemporal images RADARSAT-1 (January 16, 2003, February 09, 2003, September 07, 2004 and October 01, 2004), with Wide-1 mode and descending orbit. The images were acquired in different seasons, tide conditions and precipitation regime. The backscattering coefficients of wetlands were predominantly influenced by following factors: (1) mangroves - volume scattering with contribution of precipitation; (2) salt marshes - precipitation regime (rainy season) e salinity (dry season) both secondarily influenced by tide conditions; (3) fresh marshes – surface roughness with contribution of precipitation and (4) intermittent lakes – specular scattering influenced by precipitation.

Palavras-chave: remote sensing, backscattering coefficients, SAR, coastal environments, sensoriamento remoto, coeficiente de retroespalhamento, SAR, ambientes costeiros.

1. Introdução

A quantidade de energia espalhada pelo alvo em direção ao sensor (retroespalhamento), em relação à quantidade de energia que foi emitida pelo sensor, (pulso de microondas) é chamada de coeficiente de retroespalhamento (σ°) (Raney, 1998). A potência recebida pela antena de radar resume as características do sistema de radar, do objeto imageado e do sinal espalhado pelo objeto. Este sinal é uma função de dois tipos de variáveis didaticamente classificadas em variáveis do sensor e variáveis dos alvos. As variáveis do sistema sensor que controlam as interações entre a radiação de microondas e a superfície terrestre são: comprimento de onda, ângulo de incidência, direção de imageamento, polarização e resolução espacial. Enquanto que as variáveis do alvo imageado são: forma geométrica, rugosidade da superfície, constante dielétrica e mecanismo de retroespalhamento (Novo e Costa, 2005).

Desta maneira, estes coeficientes possibilitam a compreensão dos processos de retroespalhamento dos alvos e, conseqüentemente, a comparação entre imagens de datas e passagens distintas. Dentro deste contexto, o presente trabalho apresenta uma discussão sobre as assinaturas radiométricas de ambientes alagáveis, previamente mapeados na região da Baixada Maranhense (MA). No qual, os ambientes foram analisados em quatro imagens multitemporais RADARSAT, banda C (modo Wide-1, descendente) adquiridas em estações climáticas, condições de precipitação e amplitudes de marés distintas.

2. Área de Estudo

A área de estudo localiza-se a oeste da Ilha de São Luís, no extremo norte do Estado do Maranhão (**Figura 1**). A área está inserida na unidade morfoestrutural Planície Flúvio-Marinha do Golfão Maranhense (Barbosa e Pinto, 1973; Rodrigues et al. 1994), abrangendo dois sistemas naturais: as Planícies Litorâneas e a Baixada Maranhense (Montes, 1997).

As Planícies Litorâneas estão representadas pela Ilha do Caranguejo e são caracterizadas por áreas planas, com cotas altimétricas que não ultrapassam os 20 m, resultantes da

acumulação flúvio-marinha. Essas áreas acham-se muito recortadas por canais, formando ilhas, constituídas por sedimentos quaternários inconsolidados onde dominam os Solos de Mangue. Neste sistema há o domínio da vegetação de mangue (Montes, 1997).

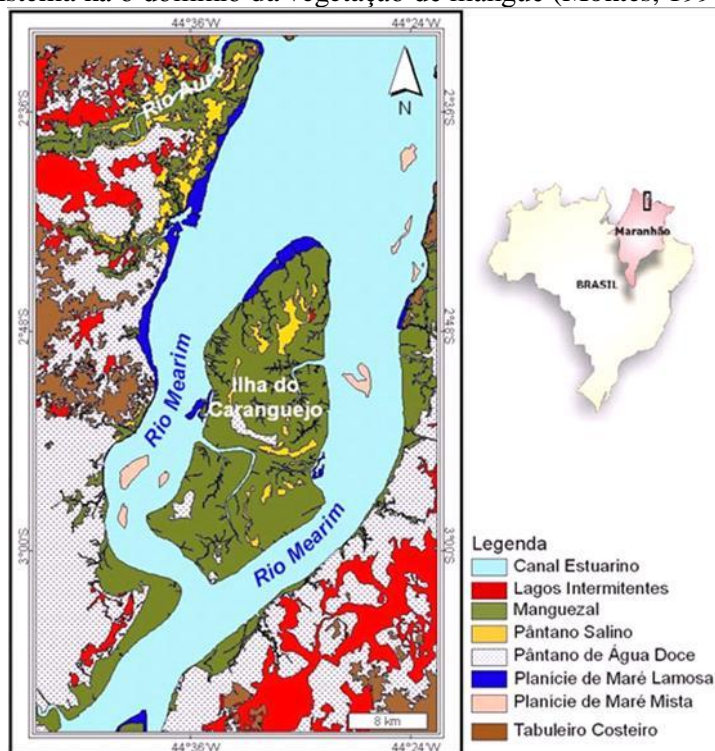


Figura 1 – Mapa de ambientes costeiros da área em estudo. Fonte: Teixeira (2006).

As outras regiões da área em estudo estão inseridas no sistema natural da Baixada Maranhense. Esta é caracterizada por áreas inundadas e/ou sujeitas a inundações, em cotas altimétricas variando de 20 a 55 m, constituídas por depósitos flúvio-marinhos holocênicos, onde dominam os Gleissolos e Solos Aluviais, recobertos pela vegetação de Formações Pioneiras Aluviais. Nas proximidades do litoral ocorrem a planície flúvio-marinha com Solos de Mangue e nos planos interfluviais, os solos dominantes são os Plintossolos e a cobertura vegetal é a vegetação secundária da Floresta mais vegetação aluvial (Montes, 1997).

Esta área é formada pelas bacias hidrográficas dos rios Mearim e Aurá, além de outras menores. O pico das enchentes ocorre em abril e maio, enquanto que o nível mínimo d'água se registra em novembro e dezembro (GEMA, 2003). O clima é tropical úmido, com estação seca (julho a dezembro) e chuvosa (janeiro a junho) bem definidas, com temperatura média em torno de 26° C, com uma pluviosidade anual variando de 1.700 a 2.000 mm. A evaporação, no período de janeiro a julho, é sempre inferior à pluviometria, verificando-se o inverso no período de agosto a dezembro (Rodrigues et al. 1994).

Além destas características, a área de estudo sofre influências de um sistema de macromaré semidiurna, com variações médias de 4 m e máxima superior a 7 m, e correntes de marés máximas superiores a 4 m/s (Rebello-Mochel, 1997).

3. Materiais e Métodos

Foram utilizados neste trabalho, quatro imagens Wide 1 do satélite Radarsat-1 (banda C-HH), órbita descendente, duas cenas SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), correspondentes aos arquivos *hgt* S03W045 e S04W045, do período de 11 de fevereiro à 22 de fevereiro de

2000 adquiridas pelo ônibus espacial *Endeavour*, e uma cena TM do LANDSAT-4 (órbita/ponto 221/062, que se refere a data de passagem 13/09/1992) adquirida no acervo da Universidade de Maryland. As características das imagens RADARSAT-1 são descritas na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Características das imagens RADARSAT-1 Wide 1 utilizadas.

<i>Plataforma</i>	<i>Data de Aquisição</i>	<i>Angulo de incidência (near/far)</i>	<i>Resolução Nominal (range x azimuth) (m)</i>	<i>Tamanho do pixel (m)</i>	<i>Swath (km)</i>	<i>Condição de maré</i>	<i>Pluviometria (dia da aquisição)</i>
RADARSAT	16.01.03	20° - 31°	35.5 x 27	12,5	165	Alta	0,5 mm
RADARSAT	09.02.03	20° - 31°	35.5 x 27	12,5	165	Baixa	140 mm
RADARSAT	07.09.04	20° - 31°	35.5 x 27	12,5	165	Baixa	0,5 mm
RADARSAT	01.10.04	20° - 31°	35.5 x 27	12,5	165	Alta	0,0 mm

Além destes dados foi utilizado também o mapa de ambientes costeiros da Região do Golfão Maranhense (**Figura 1**), em escala de 1: 50.000, obtido através da interpretação visual de imagens de sensores ópticos e radar, elaborado por Teixeira (2006).

Os dados foram processados no Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), da UFPA. E os softwares utilizados foram PCI Geomatics 9.1 e Global Mapper 6.

3.1. Processamento das imagens TM e SRTM

A imagem TM foi processada software PCI 9.1, onde primeiramente foi realizada correção atmosférica, através do método de ajuste do histograma (Jensen, 1996). Posteriormente, foi feita a escolha do melhor triplete de bandas TM (1, 4 e 5) através do cálculo OIF (*Optimum Index factor*) (Chavez Jr. et al., 1982). E por fim, foi aplicado o aumento do contraste linear. Nesta imagem não foi realizada correção geométrica, pois esta já foi adquirida ortorretificada.

As imagens SRTM foram processadas primeiramente no software Global Mapper 6, onde foram recortadas e mosaicadas. Posteriormente, as imagens foram processadas no PCI 9.1, no qual foi feita a extração automática do DEM.

3.2. Processamento das imagens SAR

Para o cálculo do σ° nas imagens RADARSAT, inicialmente foram extraídas as informações de efemérides fornecidas no cabeçalho das imagens (*header*). Posteriormente foi utilizada a função *SARINCD* do programa *XPace* do PCI, para a geração de uma tabela com os ângulos de incidência para cada coluna das imagens, usada pela função *SARSIGM* na conversão para *backscatter* (σ°). E na última etapa da calibração radiométrica foi utilizada a função *SARSIGM*, que gerou uma imagem de 32 bits, calibrada, ou seja, uma imagem coeficiente de retroespalhamento. Por fim, as imagens calibradas foram ortorretificadas (Cheng et al., 2000) na função *GCP/TP Collection* do programa *OrthoEngine* do PCI, usando o modelo digital de elevação adquirido automaticamente das imagens SRTM. e pontos de controle obtidos a partir da imagem ortorretificada do LANDSAT-4 TM. O método de reamostragem utilizado foi o vizinho mais próximo, que mantém a integridade radiométrica da imagem, sendo desnecessário o uso de filtro para redução de *Speckle*.

3.3. Análise Estatística do Retroespalhamento

As imagens SAR ortorretificadas foram sobrepostas ao mapa de ambientes costeiros para a extração dos valores digitais de cada um dos ambientes alagáveis presentes na área: manguezal, pântanos salinos, pântanos de água doce e lagos intermitentes. Na coleta de amostras (*pixel*), tentou-se extrair aleatoriamente, o maior número de *pixels* representativos das áreas de distribuição espacial de cada uma dos ambientes analisados. Assim, foram coletadas para as áreas de manguezal 52.730 amostras, 6.488 para os pântanos salinos, 53.322 para os pântanos de água doce e 32.178 para os lagos intermitentes. O objetivo da amostragem aleatória realizada é dar representatividade estatística dos valores de coeficientes de retroespalhamento para uma determinada população específica, no caso o ambiente costeiro, o que possibilita inferir o mecanismo de retroespalhamento dominante, como também o processo de interação microonda-alvo e suas inter-relações.

4. Resultados e Discussões

Os quatro diferentes ambientes alagáveis presentes na área de estudo serão caracterizados e analisados separadamente sob a ótica da variação temporal do coeficiente de retroespalhamento (σ°) nas quatro datas de imageamento do RADARSAT-1 e os efeitos que as diferentes condições ambientais proporcionaram nos valores de σ° .

Manguezal

Este ambiente é caracterizado por sedimentos areno-argilosos e apresenta uma cobertura vegetal em que há o predomínio de espécies de *Rhizophora* e *Avicenia* (Lebigre, 1994). Ocorrem em áreas baixas com cotas variando de 0 a 5 m, periodicamente inundadas pela maré alta, com árvores de 30 m de altura em média.

Analisando os gráficos dos valores máximos, médios e mínimos de retroespalhamento das quatro imagens (**Figura 2**) e as condições ambientais em que estas foram adquiridas, observa-se que na estação seca (W1-07 de setembro de 2004 e W1- 01 de outubro de 2004) as assinaturas radiométricas dos manguezais são semelhantes. Estas apresentam o mesmo valor médio de coeficiente de retroespalhamento (-4,6dB), mesmo sob diferentes condições de maré. Isto permite inferir que a inundação da floresta de mangue durante a preamar não influencia no sinal que retorna ao sensor, corroborando com a idéia de que se tem predomínio de espalhamento volumétrico na banda C em áreas de manguezal (**Figuras 3 e 4**). No entanto, quando as imagens da estação chuvosa são analisadas percebe-se que além do predomínio do espalhamento volumétrico, há contribuição da precipitação pluviométrica nos valores de retroespalhamento dos manguezais. Pois, como mostrado na **Figuras 2A**, para a imagem W1 de 16 de janeiro de 2003, os valores de retroespalhamento são menores, decorrente da influencia, da baixa precipitação pluvial registrada (em torno de 0,5 mm), tanto para os dias de aquisição, quanto para os três dias anteriores. Com a baixa precipitação, o teor de umidade da área também diminui, havendo assim uma absorção maior de energia das microondas pelo alvo. Para a imagem W1 de 09 de fevereiro de 2003, os valores de retroespalhamento são maiores, decorrente da influencia da alta precipitação pluvial registrada, em torno de 140 mm, que levou ao aumento do teor de umidade do terreno.

4.2. Pântanos Salinos

São ambientes que se desenvolvem ao lado dos manguezais, e como estes, também apresentam uma topografia baixa, que varia de 0 a 5 m. São recobertos por campos gramados, com presença de arbustos nos sedimentos aluviais que margeiam os corpos d'água, cujos níveis d'água flutuam em função das chuvas ou das marés. Os pântanos salinos facilitam a

sedimentação por reduzirem a velocidade das águas locais e por reterem muitas partículas em suspensão. Assim, durante a estação seca, onde há uma alta taxa de evaporação é possível observar extensas áreas recobertas por sal.

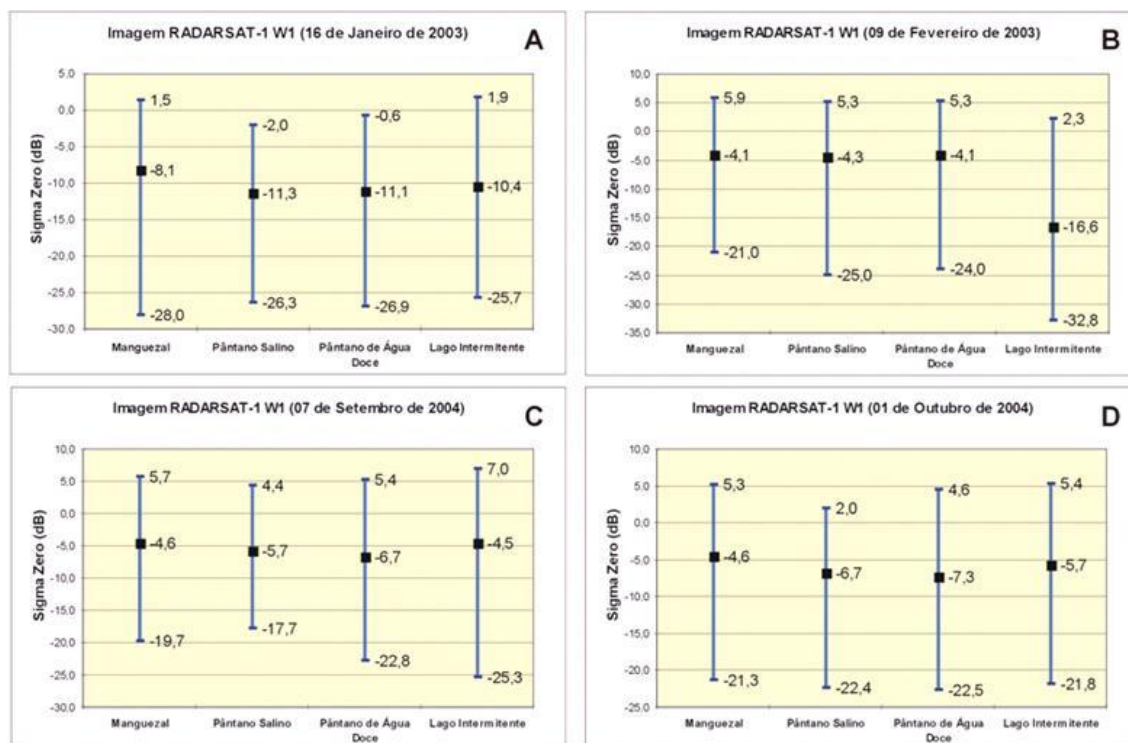


Figura 2 –Valores máximos, médios e mínimos de σ° para: **A**- W1- 16 de janeiro de 2003; **B** - W1- 09 de fevereiro de 2003; **C** - W1- 07 de setembro de 2004 e **D** - W1- 01 de outubro de 2004.

A partir da análise das assinaturas radiométricas dos pântanos salinos nas quatro imagens, pode-se fazer as seguintes observações. O retroespalhamento destas áreas é influenciado pelas variações sazonais, com a contribuição das variações diárias de maré. Na estação chuvosa são observados dois comportamentos. Na imagem W1-16 de janeiro de 2003, os pântanos salinos são observados em tons de cinza escuro (**Figura 3**), mesmo levando em consideração que a salinidade e a umidade aumentam a constante dielétrica e conseqüentemente aumentam o retroespalhamento. No entanto, neste caso o baixo valor médio de σ° (-11,3 dB) é influenciado pela absorção das microondas pelo solo saturado em água, condição características destas áreas durante o período chuvoso. Além disso, há também a contribuição das condições de maré, que no momento da aquisição da imagem era de preamar. Esta contribuição é registrada no gráfico da **Figura 2A** pelo valor mínimo de retroespalhamento (-26,3 dB), que é decorrente do mecanismo de retroespalhamento especular, em função da presença da inundação deste ambiente. Na imagem W1-09 de fevereiro de 2003, os pântanos salinos são observados em tons mais claros (**Figura 3**), em função da alta precipitação pluviométrica, que aumentou a umidade e conseqüentemente aumentou o retroespalhamento do sinal, como pode ser visto no gráfico apresentado na **Figura 2B**, onde o valor médio de σ° (-4,3 dB) foi o maior registrado para este ambiente, quando comparadas as quatro imagens.

Na estação seca, as assinaturas radiométricas dos pântanos salinos são muito semelhantes como observado nas **Figuras 2C e 2D**. Os valores médios de σ° (-5,7 e -6,7 dB, para as datas de aquisição no período seco) demonstram a influência da salinidade no retroespalhamento, com contribuição da umidade pela variação da maré. Segundo GEMA (2003), neste período é

comum o desenvolvimento do processo de eflorescência nestas áreas, que é a cristalização de sais na superfície do solo a partir da forte evaporação, que permite um processo de ascensão capilar da água do solo, promovendo o afloramento de sais nela dissolvidos. Este processo leva à formação de manchas no terreno naturalmente desnudas, como observado na **Figura 4**, havendo assim um mecanismo de retroespalhamento de superfície influenciado pela salinidade.

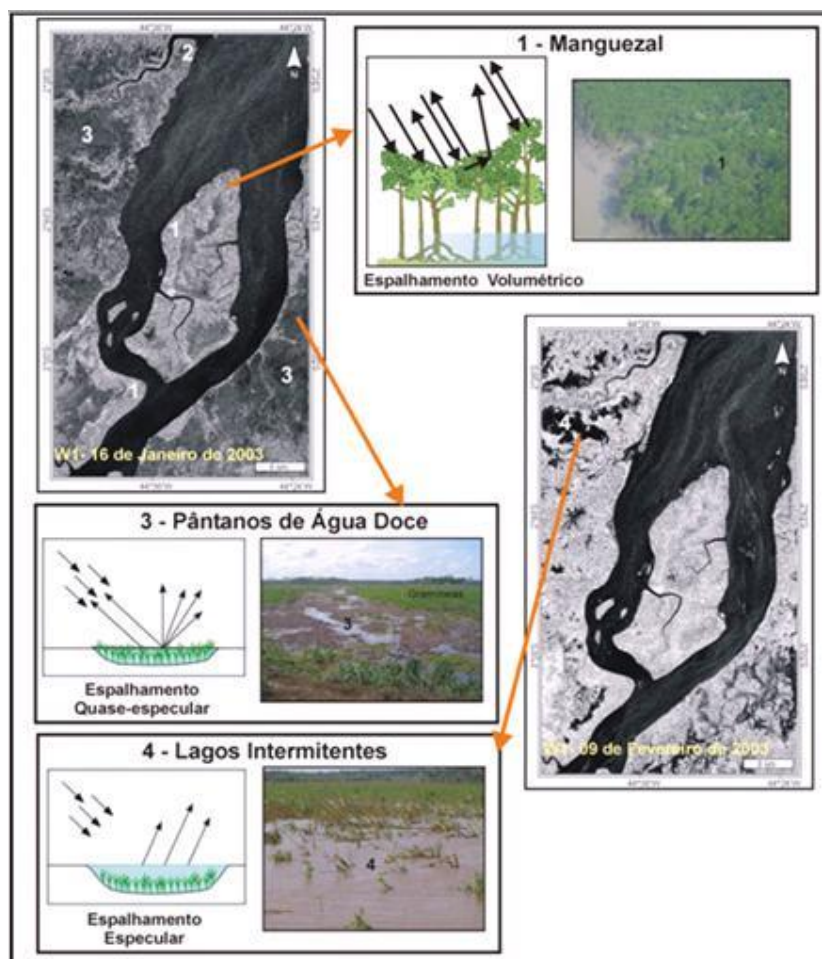


Figura 3 – Imagens SAR da estação chuvosa, com indicação dos ambientes e dos mecanismos de espalhamento dominante. 1 – Manguezal; 2 – Pântano Salino; 3 – Pântano de Água Doce e 4 – Lagos Intermitentes.

4.3. Pântanos de Água Doce

Corresponde a região rebaixada e alagadiça dos estuários afogados do Rio Mearim. A planície apresenta numerosas lagoas fluviais, extensas várzeas inundáveis e áreas comaltadas, sendo recobertas por palmeiras de *Mauritia flexuosa* e *Euterpe edulis* (Lebigre, 1994), além de vegetação rasteira do tipo gramínea. No geral apresenta cotas em torno de 0 a 10 m e são bordejadas pelo planalto costeiro.

Na imagem W1-16 de janeiro de 2003 as áreas de pântanos de água doce encontram-se com tonalidades escuras (**Figura 3**), na qual o valor médio do coeficiente de retroespalhamento foi de $-11,3\text{dB}$ (**Figura 2A**). O baixo retorno do sinal é função da pequena rugosidade superficial da vegetação de campo inundado criando um mecanismo de retroespalhamento quase-especular. Este valor também é influenciado pela presença de solo

saturado em água, que em oposição aos pântanos salinos provocam uma maior absorção da microonda pelo ambiente.

Na imagem W1- 09 de fevereiro de 2003, o valor médio de σ° foi de $-4,1$ dB (**Figura 2B**), o valor mais alto comparado com as outras imagens, sendo decorrente da influencia da alta precipitação pluvial registrada, em torno de 140 mm, que levou ao aumento do teor de umidade do terreno.

A partir da análise das **Figuras 2C e 2D** e das imagens (**Figura 3**), pode-se inferir que durante a estação seca o sinal que retorna ao sensor das áreas de pântanos de água doce é influenciado pela rugosidade superficial da vegetação de campo (vegetação do tipo gramínea), criando um mecanismo de espalhamento difuso, uma vez que a presença de água no ambiente é menor.

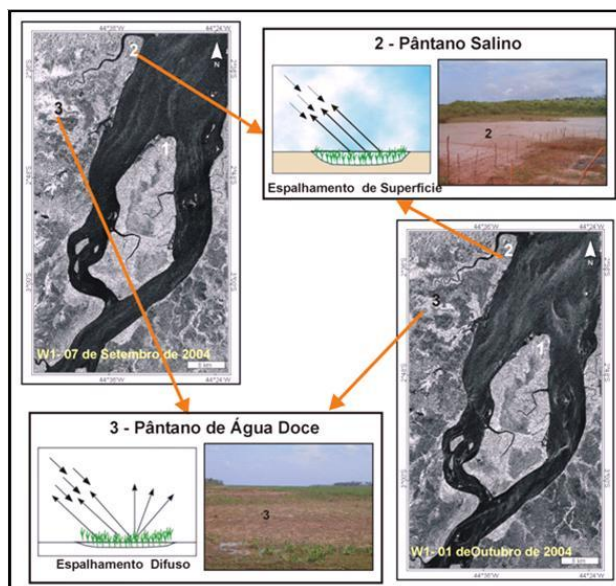


Figura 4 – Imagens SAR da estação seca, com indicação dos ambientes e dos mecanismos de espalhamento dominante. 1 – Manguezal; 2 – Pântano Salino; 3 – Pântano de Água Doce e 4 – Lagos Intermitentes.

4.4. Lagos Intermitentes

Ocorrem associados às áreas de pântanos de água doce, correspondem a corpos hídricos rasos, com aproximadamente 2 m de profundidade e são abastecidos principalmente por águas pluviais, secando totalmente durante o período mais seco.

Os lagos foram identificados apenas na imagem W1-09 de fevereiro de 2003 (**Figura 3**), pois como dito anteriormente para o dia da aquisição e para os cinco dias que os antecederam, o valor de precipitação pluvial foi de aproximadamente 140 mm, assim, o baixo retorno do sinal (**Figura 3B**) é função da completa inundação da vegetação de campo, gerando um mecanismo de retroespalhamento especular.

5. Conclusões

A avaliação dos valores médios dos coeficientes de retroespalhamento obtidos para as quatro imagens SAR analisadas permitiu fazer as seguintes considerações. Para as áreas de manguezais o fator predominante nos valores de σ° é o espalhamento volumétrico, na banda C, havendo contribuição da precipitação pluvial. Para os pântanos salinos, na estação chuvosa o fator que influencia no retroespalhamento é a precipitação pluvial com contribuição das variações diárias de maré, enquanto na estação seca o fator que influencia é a salinidade com contribuição também das variações de maré. Os valores de retroespalhamento dos pântanos de

água doce são influenciados pela rugosidade superficial da vegetação de campo, com contribuição da precipitação, que irá determinar a quantidade de água no ambiente, potencializando assim o tipo de mecanismo dominante, no caso espalhamento difuso ou quase-especular. Para os lagos intermitentes, o fator predominante nos valores de σ° é a precipitação pluvial, que permite o acúmulo de água, gerando o mecanismo de espalhamento especular.

Assim, a análise das imagens multitemporais do RADARSAT-1 W1 (modo Wide-1, descendente) mostrou que estas imagens podem ser úteis para o monitoramento e a discriminação de ambientes alagáveis em clima tropical úmido. Permitindo assim, a avaliação multi-temporal dos ambientes costeiros em função da interação entre a radiação de microondas e os alvos imageados.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto PIATAM mar, com apoio da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras). Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio à pesquisa através da concessão da bolsa de mestrado (Proc. # 130599/2004-2) e de produtividade em pesquisa (Proc. # 303238/2002-0) durante esta investigação.

Referências

- Barbosa, G. V.; Pinto, M. N. **Geomorfologia.- Projeto RADAM. Folha SA.23 São Luís e parte da Folha SA.24 Fortaleza.** Rio de Janeiro, DNPM. 1973. (Levantamento de Recursos Naturais, 3).
- Chavez JR., P. S.; Berlin, G. L.; Sowers, L. B. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. **Journal of Applied Photographic Engineering**, n. 8, p. 23-31, 1982.
- Cheng, P.; Toutin, T.; Tom, V. **Orthorectification and data fusion of Landsat v7 data.** 2000. Disponível em: <www.pcigeomatics.com/support_center/tech_papers/ASPRS_2000_land7.pdf> Acesso em: 12 maio 2005.
- Gerencia de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais (GEMA) – Governo do Estado do Maranhão. **Execução do plano de gerenciamento participativo dos recursos hídricos da área de Proteção Ambiental (APA) da Baixada Maranhense – Relatório Final.** São Luís: GEMA, 2003. 38p. [CD-ROM].
- Jensen, J. R.. **Introductory digital image processing - A remote sensing perspective.** 2rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 318p.
- Lebigre, J. M. Les marais maritimes de la baie de São Marcos (Maranhão-Brésil). **Trav. Lab.Geo. Phys. Appl.**, Bordeaux, n.12, p. 21-35. 1994.
- Montes, M. L. **Zoneamento geoambiental do Estado do Maranhão – Diretrizes gerais para a ordenação territorial.** Salvador: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1997. 44p.
- Novo, E. M. L. M.; Costa, M. P. F. Fundamentos e aplicações de RADAR no estudo de áreas alagáveis. In: Souza, R.B. **Oceanografia por Satélite.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p. 236-258.
- Raney, K. Radar Fundamentals: technical perspective. In: Henderson, F.M.; Lewis, A.J. **Principles & applications of imaging Radar. Manual of Remote Sensing.** 3rd. New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 8-130.
- Rebello-Mochel, F. Mangroves on São Luís Island, Maranhão, Brazil. In: Kjerfve, B.; Lacerda, L. D.; Diop, E. H. S. (Ed.). **Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa.** Paris, UNESCO, 1997. p. 145-154.
- Rodrigues, T.L.das N.; Araújo, C.C. de; Camozzato, E.; Ramgrab, G. E. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: São Luís. Folha SA.23-Z-A. Cururupu. Folha SA.23-X-C. Estado do Maranhão.** Escala 1:250.000. Brasília: CPRM. 1994. p. 3-106.
- Teixeira. S. G. **Análise de imagens de sensores remotos orbitais para mapeamento de ambientes costeiros tropicais e de índices de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo no Golfão Maranhense.** 2006. 171p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Pará, Belém. 2006.