

Discriminação de tipos fisiográficos de bosques de mangue por meio de imagens de radar de abertura sintética

Francisca Rocha de Souza Pereira¹
Milton Kampel¹
Marília Cunha-Lignon²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fran, milton}@dsr.inpe.br

² Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP
09972-270 - Diadema – SP, Brasil
cunha.lignon@unifesp.br

Abstract. Mangrove is a typical coastal ecosystem in the tropical and subtropical regions. This ecosystem is important to maintenance the health and live of the many species, protect the coastal line, and a lot of others functions. Their structural characteristics are directly linked to the variability of environmental conditions. The remote sensing technical can be useful to evaluate and characterize this ecosystem. Synthetic aperture radar (SAR) images are useful for vegetation studies due to microwave penetration and interaction with plant's structure. In this context the present work analysis the backscatter coefficient of incoherent parameters derived from a Palsar image to discriminate different physiographic types of mangroves in Cananéia-Iguape Coastal System region and the SAR parameters relation with structural parameters. The results show that the polarization HH and HV have potential to discriminate mangrove types and the SAR incoherent parameters have a strong relation with canopy height, mean height and mean DBH. This work demonstrated that Palsar image can be useful to the mangrove study, consequently, for the coastal management.

Palavras-chave: remote sensing, synthetic aperture radar, mangrove, sensoriamento remoto, radar de abertura sintética, manguezal.

1. Introdução

Manguezais são ecossistemas costeiros típicos de regiões tropicais e subtropicais e fazem contato entre o continente e o oceano. São considerados importantes transformadores de matéria orgânica e geradores de bens e serviços. Proporcionam a manutenção da vida de muitas espécies terrestres e marinhas, auxiliam na contenção da erosão da linha de costa, dentre outras funções (Alongi, 2008). A vegetação encontrada neste ecossistema apresenta características específicas como a adaptação à alta salinidade, desenvolvimento em solos inconsolidados e com pouco oxigênio. Bosques de mangue podem ser classificados segundo as características fisiográficas relacionadas principalmente com a hidrodinâmica local. Atualmente, dois tipos fisiográficos principais são sugeridos, o tipo franja e bacia (Schaeffer-Novelli et al. 2000). O tipo franja ocorre ao longo das bordas nos estuários, expostas as condições de alta salinidade e nutrientes e são induzidas pelos movimentos verticais das marés diárias, já os bosques do tipo bacia ocupam terrenos com menos frequência de inundação da maré. Diante da importância e complexidade deste ecossistema, estudos que visem sua caracterização e proteção são de grande valia.

Uma das ferramentas utilizadas é o sensoriamento remoto que proporciona estudos espaço-temporais em maior escala, como o mapeamento e quantificação dos manguezais (Giri et al. 2010). O uso das imagens de radar de abertura sintética apresenta algumas vantagens no estudo de florestas, pois este tipo de sensor permite a penetração da onda eletromagnética incidente no dossel vegetal. Esta característica deste tipo de sensor tem possibilitado a caracterização e qualificação de manguezais (Mougin et al. 1999; Proisy et al. 2002; Mitchell, 2003; Pereira et al. 2012). Mougin et al. (1999) e Proisy et al. (2002) utilizaram dados de radar polarimétrico para o estudo do comportamento do SAR em bosques de mangue com diferentes fases de desenvolvimento estrutural da vegetação. Os autores averiguaram se as

diferenças na estrutura e biomassa variam em função dos estágios e características dos bosques e se apresentam respostas distintas nos dados SAR. Pereira et al. (2012), com o uso de produtos derivados das imagens do sensor Palsar e técnicas de classificação contextual, obtiveram bons resultados no mapeamento do manguezal da região do litoral sul de São Paulo, Brasil.

Dentre muitas aplicações de dados SAR em estudos de manguezais, o presente trabalho faz uma análise em produtos derivados de uma cena do sensor *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (Palsar) multipolarizada objetivando discriminar os tipos fisiográficos de bosques de mangue, como franja e bacia, e averiguar e analisar a relação dos valores de retroespalhamento dos atributos SAR com a estrutura de bosques de mangue da região do Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, litoral sul de São Paulo.

2. Metodologia de trabalho

2.1. Imagem de radar de abertura sintética

Neste trabalho foi utilizada uma imagem do sensor orbital Palsar com as seguintes características: multipolaridade (HH, HV, VH, VV), banda L com comprimento de onda de aproximadamente 23,6 cm, modo polarimétrico e ascendente, data de imageamento 08/06/2009, 02:10 h (GMT), com um ângulo de incidência de 25,7° e resolução espacial (slant. x az.) de 9,4 x 4,5m. A Figura 1 mostra a localização da área de estudo na imagem Palsar combinação colorida RHH/GHV/BVV.

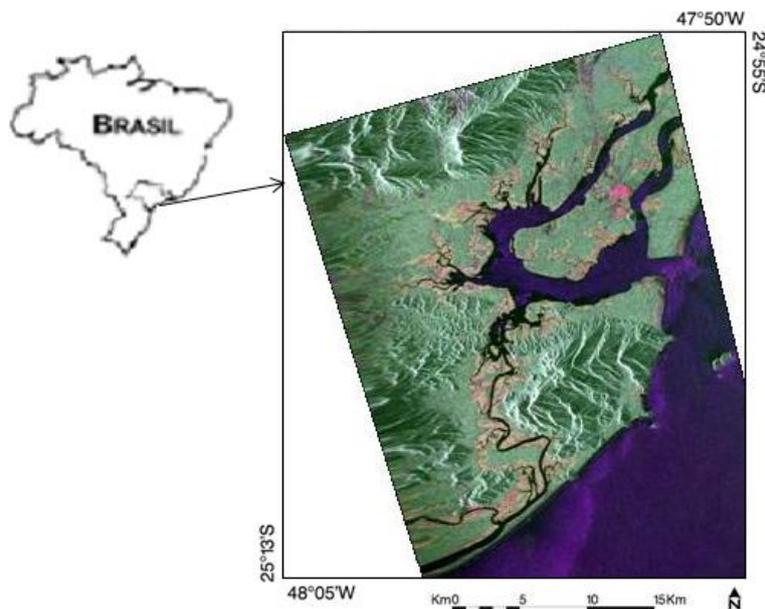


Figura 1- Localização da área de estudo, região de Cananéia no litoral Sul de São Paulo. Imagem Palsar combinação colorida RHHGHVBVV, data 08/06/2009.

A cena Palsar foi pré-processada passando por algumas etapas descritas a seguir: foi aplicado o filtro *speckle* polarimétrico, de acordo com Lee et al. (1999), janela 5x5 objetivando reduzir o ruído *speckle* da imagem original. Obteve-se como produto uma imagem filtrada no formato de matriz de covariância [C4]. Assim, foi possível extrair as imagens em intensidade multipolarizadas (HH, HV,VH,VV). Após esta etapa, as imagens passaram pela correção geométrica, na qual foram transformadas do formato *slant range* para o formato *ground range*. Para isto foi necessário utilizar parâmetros do sensor e do imageamento, disponíveis em Rosenqvist et al. (2007). O georreferenciamento foi efetuado

com base no modelo matemático *Rational Function*, onde as imagens foram registradas utilizando como base cartográfica digital a folha topográfica SG-23-V-A-IV-3 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Ilha de Cananéia, escala 1:50.000, e pontos GPS obtidos em campo. Para a correção geométrica foram utilizados 16 pontos GPS distribuídos sobre a imagem Palsar, na projeção UTM, Datum SAD69, zona 23, com tamanho de pixel igual a 12,5 m. O erro médio quadrático obtido nesta etapa foi igual a 10,15 m.

Para a conversão de números digitais (ND) para valores de coeficiente de retroespalhamento (σ°) em sigma zero (decibel- dB) foi aplicada a equação descrita em Shimada et al. (2009) (Equação 1), onde f_c é o fator de calibração igual a - 83; A é o fator de conversão igual a 32.

$$\sigma^\circ = 10 * \log(DN) + f_c - A \quad (3.2) \quad (1)$$

Após a conversão para σ° foram obtidos os dez parâmetros incoerentes. Os parâmetros selecionados para esta pesquisa são baseados nas medidas de potência do radar, os quais são: o coeficiente de retroespalhamento (σ°) nas três polarizações (HH, HV e VV), a potência total (Pt); a razão de polarização paralela (Rp: VV/HH), a razão de polarização cruzada (Rc:HV/HH e HV/VV), descritos em Henderson e Lewis (1998) e os índices de biomassa (BMI, *biomass index*), de estrutura do dossel (CSI, *canopy structure index*) e de espalhamento volumétrico (VSI, *volume scattering index*), desenvolvidos por Pope et al. (1994)

Foram obtidos valores médios de σ° das imagens atributos incoerentes a partir de polígonos representativos de cada bosque de mangue com o auxílio visual de uma imagem óptica e pontos GPS obtidos em campo. O valores médios de retroespalhamento foram transformados para a escala decibel (dB) segundo a Equação 2.

$$\sigma^\circ(dB) = 10 * \log_{10}(\sigma^\circ linear) \quad (2)$$

A partir dos valores de retroespalhamento, objetivando discriminar os tipos fisiográficos de bosques de mangue tais como: franja com bosques em progradação, franja com bosques maduros e o tipo bosque de bacia foi aplicado o método estatístico de análise discriminante. Para uma segunda abordagem, a fim de fazer uma análise exploratória da relação entre os valores de retroespalhamento dos atributos incoerentes da imagem SAR com os dados estruturais dos bosques de mangue, tais como: altura média do bosque, altura do dossel, DAP médio, área basal e densidade, foi aplicado o método de principais componentes. Segundo Valentin (2012) a técnica de análise discriminante consiste em interpretar grupos previamente conhecidos a partir de descritores específicos. Já a análise em componentes principais é um método de ordenação que estabelece um conjunto de eixos perpendiculares a partir de uma matriz de semelhança. Neste trabalho utilizou-se uma matriz de correlação.

2.2. Dados de campo

A região de estudo está inserida no Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, que localiza-se no litoral sul do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 24°40'S e 25°19'S e 47°24'W e 48°05'W (Figura 1). O sistema possui três ilhas principais: Cardoso, Cananéia e Comprida, formadas por sedimentos quaternários e rochas cristalinas pré-cambrianas. O clima mostra características de clima tropical úmido de acordo com a classificação de *Koppen*. Na região são encontradas as espécies vegetais típicas de mangue *R. mangle*, *A. schaueriana* e *L. racemosa*, assim como floresta ombrófila e vegetação de restinga (Coelho-Jr 2003; Cunha-Lignon et al., em elaboração). Observou-se que para o dia e horário da aquisição da cena Palsar, utilizada neste trabalho, a maré estava em 0,9 m. Desta forma, o ambiente estava alagado no momento da aquisição da imagem.

Os dados estruturais referentes aos 16 bosques de mangue foram obtidos a partir dos valores estruturais de parcelas previamente estudadas por Coelho-Jr (2003), e Cunha-Lignon et al. (em elaboração).. Para a caracterização do desenvolvimento estrutural dos bosques de mangue, adota-se a metodologia padronizada por Schaeffer-Novelli e Cintrón (1986), delimitando-se parcelas de tamanho variável, em função da densidade dos indivíduos. Foram obtidos os parâmetros estruturais altura do dossel, altura média, densidade, diâmetro a altura do peito (DAP) e área basal. No presente trabalho, os dados foram adaptados para se estudar o comportamento do manguezal utilizando dados SAR. Desta forma, parcelas pertencentes ao mesmo tipo fisiográfico tais como o tipo franja em progradação, franja com bosques maduros e bacia, foram agrupadas formando os 16 bosques de mangue.

3. Resultados e Discussão

Foi aplicado o método de análise discriminante múltipla nas polarizações HH, HV e VV, formando três grupos fisiográficos de bosques de mangue: (i) franja com bosques em progradação (P), (ii) franja com bosques maduros (M) e (iii) bacia (B). Na Tabela 1 os valores de Lambda Wilks' indicam que a polarização HH contribuiu mais na discriminação dos grupos, seguida da polarização HV. A Figura 2a mostra o gráfico de dispersão dos grupos progradação (P), bosque maduro (M) e bacia (B), observa-se que para o eixo 1 é possível discriminar o grupo P do grupo M. Já no eixo 2 é possível discriminar o grupo P do grupo B. Na Tabela 2, observa-se que os eixos 1 e 2 foram mais fortemente influenciados pelas polarizações HH e HV. A proporção cumulativa para o eixo 1 representa 63% da variância explicativa, ou seja, a maior parte do poder discriminatório é explicado por esta primeira função.

A Figura 2b mostra o diagrama de agrupamento dos 15 bosques de mangue utilizando o método Ward's e distância Euclidiana para as polarizações HH, HV e VV. Observa-se que os bosques de bacia foram agrupados em A e os bosques de franja com bosques maduros e franja em progradação foram agrupados em B e C, respectivamente. Os bosques de franja não apresentaram um padrão definido, mas pode-se observar que bosques da mesma localidade, como os pares franja em progradação bosque 1 (P1) e franja bosque maduro bosque 2 (M2), P3 e M4, P6 e M7, M12 e M13, aparecem agrupados no gráfico. Alguma característica típica do local ou espécie predominante, ou outra característica aqui não detectada, pode ter influenciado na resposta SAR e conseqüentemente, no agrupamento destes bosques vizinhos.

Tabela 1- Teste de Wilks' da análise discriminante múltipla. Wilks' lambda, valor de F e seu respectivo valor *p* indicando a contribuição de cada variável e sua significância.

	Wilks' Lambda	F- (2,10)	p-valor
HH	0,376965	12,15002	0,002106
HV	0,268524	7,21648	0,011485
VV	0,114216	0,19625	0,824894

Tabela 2- Coeficientes padronizados para as variáveis HH, HV e VV, as quais computaram a função discriminante.

	Eixo 1	Eixo 2
HH	-1.71517	-0.476951
HV	1.57038	-0.834139
VV	0.09965	0.372600
Autovalor	2.63273	1.504728
Proporção cumulativa	0.63632	1.000000

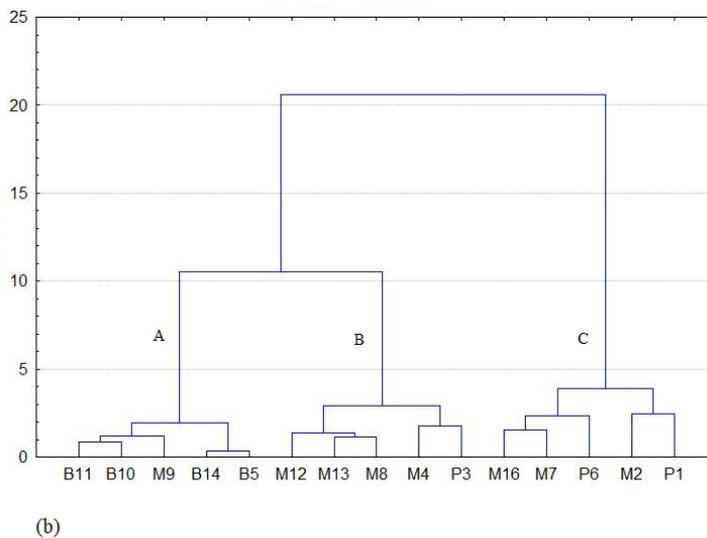
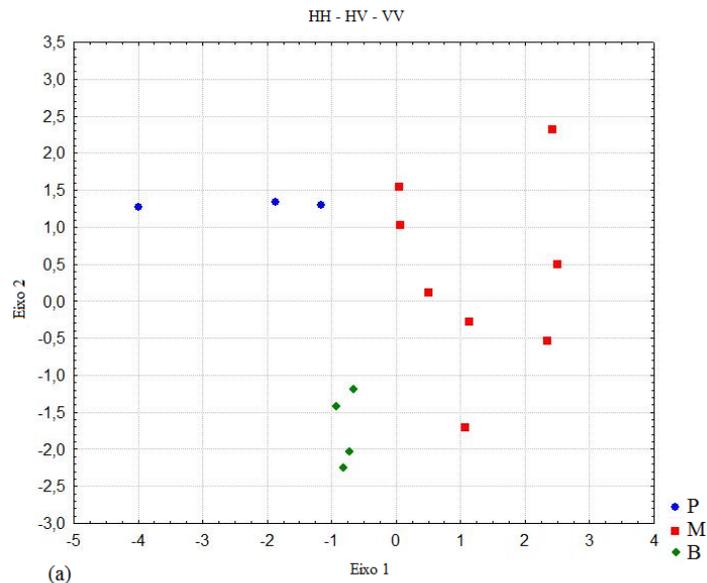


Figura 2- (a) Gráfico de dispersão dos grupos gerados pela análise discriminante. b) Diagrama de agrupamento utilizando o método Ward's e distância Euclidiana. Ambos os gráficos utilizam valores de retroespalhamento das polarizações HH, HV e VV. Legenda: bacia (B), franja com bosques maduros (M) e franja em progradação (P).

Os resultados do método de análise de componentes principais aplicado aos dados SAR e dados de estrutura para os 16 bosques de mangue são apresentadas nos gráficos da Figura 3. A Figura 3a mostra a projeção gráfica dos pontos-variáveis no plano dos eixos 1 e 2 onde pode-se observar a maior parte da variabilidade dos dados. O plano 1 explica 50,44% de variância e o plano 2 explica 30,93% da variância. O plano 1 é negativamente ligado ao retroespalhamento derivado das variáveis SAR. Em ordem decrescente, as variáveis SAR que tiveram maior influencia na variância do plano 1 foram os atributos: HV, VV, Pt, BMI, HV/HH, CSI, VSI, HH. Valores de retroespalhamento foram maiores para os bosques 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 (Figura 3b). Observa-se no plano 1 alta correlação inversa de HH, Pt e BMI com os parâmetros estruturais altura do dossel, altura média e DAP médio. Mostrando maior influência do parâmetro altura média para este plano.

Para o plano 2 HH, HV/HH, VV/HH, VSI, CSI, BMI e Pt, apresentaram maior influência na sua variância. Observa-se que os parâmetros estruturais DAP médio, altura média e altura

do dossel apresentaram maior influência na resposta dos atributos SAR com uma relação inversa com Pt, HH e BMI e relação direta com CSI, VSI, HV/HH, VV/HH.

Na Figura 3b pode-se observar o agrupamento dos bosques de bacia (5, 10, 11, 12, 14) e dos bosques de franja com bosques maduros (4, 8, 12, 13).

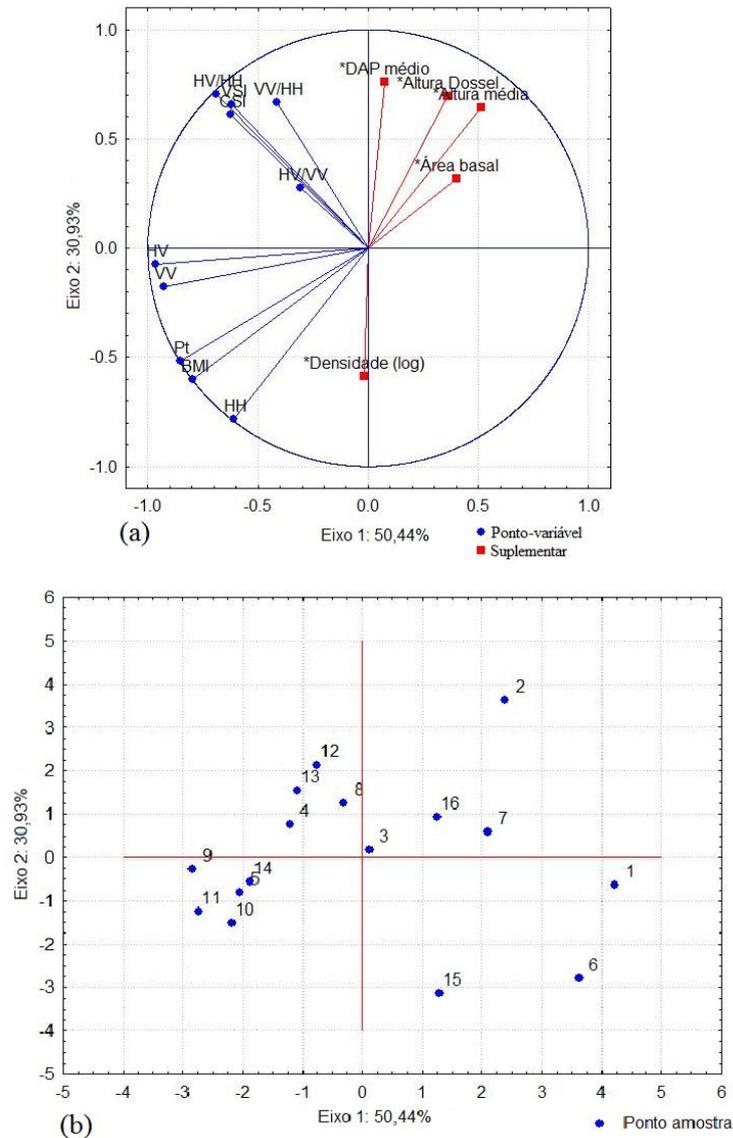


Figura 3- Análise de principais componentes. (a) Projeção gráfica dos pontos-variáveis SAR: HH, HV, VV, BMI, CSI, VSI, HV/HH, HV/VV e VV/HH e variáveis complementares altura do dossel, DAP médio, altura média, área basal e densidade. (b) Projeção gráfica dos pontos-observações relacionados aos bosques.

A partir dos resultados acima, observa-se que as polarizações HH e HV foram significativamente importantes na discriminação dos tipos fisiográficos de bosques de mangue, principalmente entre os tipos franja e bacia. O tipo bacia possui indivíduos com baixos valores de altura, altura média de aproximadamente 3,5m e alta densidade de indivíduos. Já o tipo franja com bosques maduros possui indivíduos maiores, mais desenvolvidos, com valores da altura do dossel de aproximadamente 14m e baixa densidade de indivíduos. A estrutura de um bosque de mangue pode influenciar no comportamento da resposta SAR. Mitchell (2003) mostrou que os bosques maduros com baixa densidade de

indivíduos apresentam alto retorno para o radar, principalmente para a co-polarização, sugerindo maior interação solo-tronco da onda incidente.

Considerando as três polarizações HH, HV e VV, o bosque maduro que apresentou maior retroespalhamento foi o M9 (Figura 4b). Este alto retroespalhamento pode ser justificado baseado nas características do bosque que apresentam muitos rizóforos expostos, troncos inclinados, presença de grandes bromélias nos troncos das árvores e muitos troncos caídos no solo, com algumas áreas mais abertas do dossel. Estas características possivelmente proporcionaram maior penetração e interação da onda incidente com os componentes do dossel e sob este, possibilitando maior retorno para o radar. Segundo Lucas et al. (2007), a magnitude do coeficiente de retroespalhamento varia com a natureza do sistema de raízes expostas. O retroespalhamento é dominado pelos componentes que sofrem reflexão do solo da floresta, devido a interação solo-tronco proporcionando o domínio do mecanismo *double bounce* na polarização HH (Richards et al. 1987). Em Proisy et al. (2002), bosques com mais biomassa porém com dosséis fechados apresentaram menor valor de retroespalhamento do que o bosque com grande porção de abertura no dossel. Na Figura 5, observa-se maior distanciamento do bosque P6 indicando menor valor de retroespalhamento para a polarização HV e maior valor para o bosque M9. Este último é um bosque maduro, estruturalmente maior do que o bosque P6. Maior sensibilidade para a biomassa de bosques de mangue na polarização HV é observada em Mougín et al. (1999). Para as três polarizações os maiores valores de retroespalhamento foram para os bosques do tipo bacia. Segundo Leckie e Ranson (1998) altos valores de retroespalhamento para a polarização cruzada (HV) podem ocorrer em áreas vegetadas que apresentam espalhamento de pequenos elementos e múltiplos espalhamentos entre as superfícies.

4. Conclusão

No presente trabalho foi possível observar que a resposta referente ao retroespalhamento dos atributos SAR derivados de uma cena Palsar banda L são influenciados pelos tipos fisiográficos de bosques de mangue com diferentes desenvolvimentos estruturais. Dentre as três polarizações, HH e HV tiveram maior influência na discriminação dos tipos fisiográficos. Os parâmetros estruturais altura média, altura do dossel e DAP médio apresentaram maior correlação com a maioria dos atributos SAR considerados.

Em trabalhos futuros pretende-se analisar maiores detalhes de cada um dos dez atributos SAR e a relação destes com os parâmetros estruturais dos diferentes tipos fisiográficos de bosques de mangue. De forma geral, as análises mostraram que imagens de radar de abertura sintética podem ser úteis em estudos de manguezais, bem como servir de ferramenta e suporte na conservação e gerenciamento deste ecossistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Dr. Waldir Paradella, INPE/DSR, pelo pedido da cena PALSAR adquirida pelo projeto - ALOS RA# 219: "*Geoscience Applications with L-Band PALSAR data in the Tropical Environments of Brazil*". À CAPES pelo financiamento durante o Mestrado da primeira autora. Ao Dr. Ricardo Palamar Menghini, pelo auxílio durante o trabalho de campo e ao Dr. Clemente Coelho Jr pela disponibilidade dos dados de campo na sua tese.

Referências Bibliográficas

Alongi, D.M. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, n.76, p.1-13, 2008.

- Coelho-Jr., C. **Ecologia de manguezais: zonação e dinâmica da cobertura vegetal em gradientes ambientais, Cananéia, São Paulo, Brasil.** 2003. 166p. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, Brasil, 2003.
- Cunha-Lignon; M.; Menghini, R.P.; Almeida, R.; Coelho-Jr., C.; Schaeffer-Novelli, Y.; Cintrón, G.; Dahdouh-Guebas, F. Successional processes in mangrove forests in depositional areas, Southeastern, Brazil. (em elaboração).
- Giri, C.; Oching, E.; Tieszen, L.L.; Zhu, Z.; Singh, A.; Loveland, T.; Masek, J.; Duke, N. Status and distribution of mangrove forest of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**. (doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x), p. 1-6, 2010.
- Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars.** 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998. 866p.
- Leckie, D.G.; Ranson, K.J. Forestry Applications Using Imaging Radar. In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. (eds.). **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars.** 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998. Cap 9, 866 p.
- Lee J.S., M.R. Grunes, And G. De Grandi. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. **IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing**, v.37, n. 5, p.2363-2373, 1999.
- Lucas,R.; Mitchell, A.L.; Rosenqvist, A.; Proisy, C.; Melius, A. Ticehurst. The potencial of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: case studies from the tropics. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v.17, n.3, p. 245-264, 2007.
- Mitchell, A. **Remote sensing techniques for assessment of mangrove forest structure, species composition and biomass and response to environmental change.** 2003. 510p. PhD thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia. 2003.
- Mougin, E.; Proisy, C.; Marty, G.; Fromard, F.; Puig, H.; Betoulle, J.L.; Rudant, J.P. Multifrequency and multipolarisation radar backscattering from mangrove forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n.1, p.94–102, 1999.
- Pereira, F. R. S. ; Kampel, M. ; Cunha-Lignon, M. . Mapping of mangrove forests on the southern coast of São Paulo, Brazil, using synthetic aperture radar data from ALOS/PALSAR. **Remote Sensing Letters**, v. 3, p. 567-576, 2012.
- Pope K. O., Rey-Benayas J.M., Paris J.F. Radar Remote Sensing of forest and wetland ecosystems in Central American Tropics. **Remote Sensing of Environment**, v.2; n.48, p.205-219, 1994.
- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F. ; Trichon, V.; Karam, M.A. On the influence of canopy structure on the radar backscattering of mangrove forest. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.20, 4197-4210, 2002.
- Richards, J. A.; Woodgate, P. W.; Skidmore, A. K. An explanation of enhanced radar backscatter from flooded forests. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.7, p.1093–1100, 1987.
- Rosenqvist, A.; Shimada, M.; Ito, N.; Watanabe, M. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global- Scale Monitoring of the Environment. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v.45, n.11, p. 3307-3316, 2007.
- Schaeffer-Novelli, Y.; Citrón-Molero. Guia para estudo de áreas de manguezal: estrutura, função e flora. São Paulo: **Caribbean Ecological Research**. 1986. 140p.
- Schaeffer-Novelli, Y.; Citrón-Molero, G.; Soares, M.L.G; De Rosa, T. Brazilian mangroves. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, v.3, n.4, p.561-570, 2000.
- Shimada, M.; Isogushi, O.; Tadono, T.; Isono, K. PALSAR Radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, aceito para publicação, 2009.
- Valentin J. L. **Ecologia Numérica: Uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos.** Ed Interciencia, 2012, 154p.