



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E
GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO PADRÃO ESPECTRO-TEMPORAL DE
AMBIENTES COSTEIROS COM IMAGENS LANDSAT, ILHA
DE MARAJÓ/PA**

Dissertação apresentada por:

GUSTAVO FREITAS CARDOSO

Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho

Coorientador: Dr. Carlos Moreira de Souza Junior.

**BELÉM
2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

C268a Cardoso, Gustavo Freitas
Análise do padrão espectro-temporal de ambientes costeiros com
imagens Landsat, Ilha de Marajó/PA / Gustavo Freitas Cardoso;
Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho; Coorientador: Carlos
Moreira de Souza Junior – 2010
xiv, 61 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-
Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

1. Sensoriamento remoto. 2. Análise espectral. 3. Zonas úmidas
costeiras. 4. Detecção de mudanças. I. Souza Filho, Pedro Walfir
Martins e, *orient.* II. Souza Junior, Carlos Moreira de, *coorient.* III.
Universidade Federal do Pará. IV. Título.

CDD 20. ed.: 547.346



Universidade Federal do Pará

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**ANÁLISE DO PADRÃO ESPECTRO-TEMPORAL DE
AMBIENTES COSTEIROS COM IMAGENS LANDSAT, ILHA
DE MARAJÓ/PA**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

GUSTAVO FREITAS CARDOSO

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA.

Data de aprovação: 06 / 10 / 2010

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho
(Orientador - UFPA)

Prof. Dr. Ulf Mehlig
(Membro - UFPA)

Prof. Dr. Yosio Edemir Shimabukuru
(Membro - INPE)

Dedico à ciência, à mãe natureza, aos amazônidas, aos meus pais Antonio e Teresa, a minha esposa Ana Paula, e meus irmãos Felipe e Janaina.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai Maior pelas bênçãos e aprendizados na vida. Em especial, agradeço a minha esposa Ana Paula, pelo amor, carinho, amizade, dedicação e paciência nesta difícil e compensadora etapa das nossas vidas.

Aos meus pais, Antonio e Teresa, pelos seus ensinamentos, por sempre mostrarem o “caminho das pedras”, mesmo este nem sempre percorrido; pelo amor, e pela dedicação em dar uma educação de qualidade para seus filhos. Aos meus irmãos Janaina e Felipe, pelos conselhos e torcida, mesmo que de longe, para meu sucesso pessoal e profissional.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Pedro Walfir e Dr. Carlos Souza Jr., que me ensinaram como fazer pesquisa durante nossas reuniões; pela amizade e conselhos dados sobre a vida profissional e acadêmica.

A todos os professores que me transmitiram seus conhecimentos, desde a época dos primeiros desenhos, no jardim da infância, passando pela faculdade de Ecologia, até os dias atuais. Os aprendizados certamente formaram o profissional que sou.

Ao Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), que sempre incentivou a pesquisa na Amazônia, e possibilitou as atividades necessárias à conclusão dessa dissertação, como toda a estrutura predial e de escritório; pela liberação para assistir às disciplinas do mestrado, participar de cursos e treinamentos, assim como simpósios e congressos.

A todos os amigos que durante as conversas e discussões técnicas influenciaram direta ou indiretamente para o desenvolvimento e conclusão da dissertação. São eles, os amigos do SIPAM, Jamer Costa, Flávio Altieri, Ulisses Guimarães e Luis Sadeck, e ao amigo do LAIT, Wilson Rocha.

À Amazônia, lugar imponente, de belas paisagens, rico em culturas populares e recursos naturais que merecem atenção da comunidade científica e de nossos governantes. E finalmente ao povo paraense, que acolheu de braços abertos mais uma família paulista.

RESUMO

O conhecimento da distribuição espacial e temporal e o acompanhamento da sua evolução dinâmica são os fatores mais importantes para o estudo e da gestão de zonas úmidas. O objetivo deste trabalho foi caracterizar, mapear, comparar a resposta espectral de zonas úmidas costeiras, assim como detectar suas mudanças na margem leste da Ilha de Marajó, no Estado do Pará, através de imagens reflectância do TM Landsat-5. Para tanto, as imagens foram corrigidas geométrica e radiometricamente. Coletaram-se na imagem de referência (2008), no mínimo, 20 amostras poligonais (5x5 pixels) para cada tipo de cobertura do solo. A análise de variância (ANOVA), o Teste de Tukey HSD e um índice de separabilidade espectral de pares de regiões de interesse (ROIs) foram calculados. O mapeamento foi gerado a partir do classificador supervisionado *Spectral Angle Mapper*, e a validação dos dados, delineados pela Matriz de Confusão. Desta forma foram reconhecidos as seguintes unidades: MAN - manguezal, MAD - manguezal degradado, PRD - praias e dunas, VSI - vegetação secundária inicial, VSA - vegetação secundária avançada, ACS - água com sedimento, ASS - água sem sedimento, OCH - ocupação humana e CAM - campos. O resultado da ANOVA mostrou que há diferenças significativas entre as reflectâncias médias em todas as classes, em no mínimo um par de médias, para todas as bandas (1-5 e 7) da imagem. O Teste de Tukey HSD verificou que a menor diferença entre duas médias nas bandas 1 e 2 ocorre no par VSA-MAN, na banda 3, VSI-MAN, na banda 4, OCH-MAN, na banda 5, OCH-PRD, e na banda 7, ACS-ASS. A função de separabilidade espectral de pares de ROIs destacou um baixo valor para o par de classes OCH-CAM. O cálculo da exatidão do mapeamento apresentou valores aceitáveis. Foi aplicada também a técnica do modelo de mistura espectral para determinar as frações - vegetação, água e/ou sombra, solo e vegetação não fotossinteticamente ativa - nas imagens reflectância dos anos de 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 e 2008. A detecção de mudanças ao longo destes anos foi feita com o auxílio do diagrama tri linear de Thompson, usado para analisar a evolução dos ambientes Manguezal, Campos Salinos com predomínio de solos, Campos Salinos com vegetação campestre, Praias e Dunas, Sedimentos Úmidos, Água com Sedimento e Água sem Sedimento. Os resultados mostraram que 80% das amostras do ambiente Manguezal, mantiveram suas características espectrais, ou seja, o ambiente não sofreu alterações ao longo do tempo, e que 15% das trajetórias possíveis indicaram uma mudança gradativa para formação de Manguezal até o ano de 2008. Do total dos pixels analisados para este ambiente, 93% corresponderam ao próprio Manguezal, confirmando uma relativa estabilidade deste ambiente na área de estudo. Os Campos Salinos indicaram uma

condição atípica nas análises da imagem do ano de referência (2008), com comportamento espectral similar ao do solo, característica esta não verificada nos anos pretéritos. Nestes anos, houve o predomínio de Campos Salinos com Vegetação Campestre. Já para o ambiente Praias e Dunas detectou-se um considerável aumento de sua superfície (66,7%) no período de 20 anos (1988-2008). De modo geral, os resultados alcançados sugerem que a área em estudo, vem sofrendo o processo de progradação de sedimentos ao longo da linha de costa e uma estabilização no aumento da superfície de Manguezal desde 2006. Para os Campos Salinos detectaram-se as variações nos valores de abundância entre as três frações (Vegetação Verde, Sombra/Água e Vegetação não fotossinteticamente ativa/solo) geradas pelo modelo de mistura espectral, devido principalmente a sazonalidade climática da região. O método de detecção de mudanças propiciou o desenvolvimento de um modelo de diagrama de dispersão espectral para ambientes úmidos costeiros. Este modelo deve auxiliar em futuras pesquisas acerca do monitoramento dos impactos dos ambientes úmidos costeiros oriundos do aumento do nível do mar, da localização e caracterização espectral, assim como detecção das mudanças no tempo.

Palavras-Chave: Sensoriamento remoto. Análise espectral. Zonas úmidas costeiras. Detecção de mudanças.

ABSTRACT

Knowledge of spatial and temporal distribution and monitoring of its dynamic evolution are the most important factors for the study and management of wetlands. The aim of this study was to characterize, to map, to compare the spectral response of coastal wetlands, as well as detect the changes on the eastern shore of Marajo, State of Pará, using images from TM Landsat-5 reflectance. To this end, the images were geometrically and radiometrically corrected. Were collected in the reference image (2008), at least 20 polygonal samples (5x5 pixels) for each type of land cover. The analysis of variance (ANOVA), Tukey HSD Test and an index of spectral separability of pairs of regions of interest (ROIs) were calculated. The mapping was generated from the supervised classification Spectral Angle Mapper, and validating data, outlined by the Confusion Matrix. Thus were recognized the following units: MAN - mangrove, MAD - degraded mangrove, PRD – beaches and dunes, VSI - initial secondary vegetation, VSA - advanced secondary vegetation, ACS – water with sediment, ASS - water without sediment, OCH - human occupation and CAM – marshes. The result of ANOVA showed that there are significant differences between the average reflectance in all classes and at least one pair of means, for all bands (1-5 and 7) image. The Tukey HSD test found that the smallest difference between two means of bands 1 and 2 occurs in pair VSA-MAN, the band 3, VSI-MAN, the band 4, OCH-MAN, the band 5, OCH-PRD, and band 7, ASS-ACS. The function of spectral separability of pairs of ROIs highlighted a low value for the pair of classes OCH-CAM. The calculation accuracy of the mapping showed acceptable values. Was also applied the technique of spectral mixture model to determine the fractions – green vegetation, water and/or shade, soil and vegetation not photosynthetically active - in reflectance images in years from 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 and 2008. The detection of changes over the years was done with the help of the tri-linear diagram of Thompson, used to analyze the evolution of Mangrove environments, Salt Marshes with a predominance of soils, Grassland Salt Marshes, Beaches and Dunes, Wet Sediment, Water with Sediment and Water without Sediment. The results showed that 80% of the samples from mangrove environment, maintained their spectral characteristics, ie, the environment has not changed over time, and that 15% of possible paths indicated a gradual change for the formation of mangrove until 2008. Of the total number of pixels analyzed for this environment, 93% corresponded to the actual mangrove, confirming a relative stability of this environment in the study area. Salt Marshes showed an unusual condition in the analysis of the image of the reference year (2008), with spectral response similar to the soil characteristics, this is not checked in years

gone by. In recent years, there was a predominance of Grassland Salt Marshes. As for the environment Beaches and Dunes revealed a considerable increase of its surface (66.7%) in the 20-year period (1988-2008). Overall, the results suggest that the study area has undergone the process of progradation of sediments along the shoreline and stabilization in the increase of surface Mangrove since 2006. For the Salt Marshes detect the variations in the abundance values among the three fractions (Green Vegetation, Shade/Water, Non-photosynthetically Active Vegetation and Soil) generated by the spectral mixture model, mainly due to seasonal climate in the region. The method of change detection applied fostered the development of a model spectral dispersion diagram for coastal wetlands. This model should assist in future research about the monitoring of the impacts of the humid coastal environments from the increase in sea level, the location and spectral characterization, and change detection.

Keywords: Remote sensing. Spectral analysis. Coastal wetlands. Change detection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Mapa de localização da área de estudo_____	10
Figura 1.2 – Registros fotográficos utilizados para amostrar as classes de cobertura do solo na imagem Landsat _____	13
Figura 1.3 – Seleção das regiões de interesse para cada classe analisada na extração das informações espectrais na imagem Landsat TM 5, composição R5G4B3_____	15
Figura 1.4 – Padrões espectrais da cobertura dos ambientes costeiros a partir das amostras dos ROIs na imagem TM Landsat-5_____	17
Figura 1.5 – Mapa da cobertura da zona úmida costeira classificado pelo algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM)_____	25
Figura 2.1 – Mapa de localização da área de estudo_____	37
Figura 2.2 – Distribuição Ternária dos pixels coletados nas imagens fração do ano base 2008 referente aos ambientes úmidos costeiros estudados_____	44
Figura 2.3 – Evolução da amostra 1 (em amarelo) nas imagens fração (composição colorida R-SOIL, G-GV, B-SHADOW) ao longo do tempo _____	45
Figura 2.4 – Evolução gradativa para formação de Manguezal. A linha verde representa a trajetória das amostras 13 e 14 ao longo do tempo (1988-2008) _____	47
Figura 2.5 – Distribuição das amostras de Campos Salinos no diagrama tri linear de Thompson no período de 1988 a 2008_____	49
Figura 2.6 – Diagrama tri linear com trajetórias de amostras dos ambientes costeiros coletadas nas imagens fração ao longo de 1988 a 2008_____	52
Figura 2.7 – Modelo de distribuição das zonas úmidas costeiras no diagrama tri linear_____	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Descrição das coberturas do solo considerando a geomorfologia costeira local_____	11
Tabela 1.2 – Parâmetros utilizados na aplicação do FLAASH_____	15
Tabela 1.3 – ANOVA para as reflectâncias das coberturas nas bandas 1(Cb1), 2(Cb2), 3(Cb3), 4(Cb4), 5(Cb5) e 7(Cb7)_____	21
Tabela 1.4 – Teste Tukey HSD para as bandas 1-5 e 7: Pares de Cobertura do Solo (abscissa) e Diferença nas Médias de Reflectância (ordenada)_____	22
Tabela 1.5 – Separabilidade de pares de ROIs identificados na imagem TM Landsat-5 __	23
Tabela 1.6 – Matriz de Erro comparando o mapeamento pela imagem Landsat TM 5 de 2008 e os ROIs considerados como referência de campo_____	26
Tabela 2.1– Descrição das zonas úmidas costeiras em relação à geomorfologia da planície costeira_____	38
Tabela 2.2 – Cenas TM Landsat-5 usadas para este estudo_____	38
Tabela 2.3 – Detecção das mudanças nos ambientes úmidos costeiros no período de 1988 a 2008_____	45
Tabela 2.4 – Número de amostras identificadas para cada ambiente por ano_____	47

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO I.....	5
 Mapeamento dos Ambientes Úmidos Costeiros através da Análise Espectral de Imagens TM Landsat-5, Ilha de Marajó, Brasil	
Resumo.....	5
Abstract.....	6
1. Introdução.....	7
2. Área de Estudo e Cobertura do Solo.....	8
3. Base de Dados.....	12
3.1. Dados de Sensores Remotos.....	12
3.2. Dados de Campo.....	12
4. Métodos.....	14
4.1. Pré-processamento.....	14
4.2. Seleção das Regiões de Interesse (ROIs).....	15

4.3. Delineamento Estatístico.....	16
4.4. Mapeamento da Cobertura das Zonas Úmidas Costeiras.....	16
5. Resultados e Discussão.....	17
5.1. Reflectância.....	17
5.1.1. Feições da Vegetação.....	18
5.1.2. Feições do Solo.....	19
5.1.3. Feições da Água.....	19
5.2. Análise Estatística da Variabilidade Espectral.....	20
5.3. Mapeamento e Exatidão.....	24
6. Conclusões.....	27
7. Referências Bibliográficas.....	28
CAPÍTULO 2.....	32
Detecção de Mudanças a partir da Análise de Mistura Espectral Temporal em Ambientes Úmidos Costeiros do Norte da Amazônia Brasileira	32
Resumo.....	32
Abstract.....	33
1. Introdução.....	34
2. Área de Estudo.....	36
3. Base de Dados.....	38
3.1. Dados de Imagens de Satélite.....	38
4. Métodos.....	39

4.1. Pré-processamento.....	39
4.2. Análise de Mistura Espectral.....	40
4.3. Análise da Evolução Composicional dos Ambientes.....	42
5. Resultados.....	42
5.1. Detecção de Mudanças.....	44
6. Discussão.....	49
7. Conclusões.....	52
8. Referências Bibliográficas.....	53
CONCLUSÕES GERAIS.....	55
REFERÊNCIAS.....	58

INTRODUÇÃO GERAL

A área de estudo está inserida no maior arquipélago flúvio-marinho do mundo, o arquipélago do Marajó, composto por dezenas de ilhas localizadas na foz do Rio Amazonas. A ilha de Marajó, a maior do arquipélago, com cerca de 40 mil km², apresenta uma cobertura do solo complexa e que vem sofrendo um ajustamento horizontal em seus limites. Esta complexidade surgiu primeiramente no final do período geológico do Pleistoceno, quando houve o abatimento da margem leste da ilha provocando alagamento devido, principalmente, ao aumento da influência dos processos costeiros (Rossetti, 2008). Com isso, áreas de floresta ombrófila densa, tipicamente amazônicas, foram sendo substituídas por savanas e zonas úmidas costeiras, representadas por manguezais e campos de água doce e salobra, a leste. (Amaral, 2007).

A heterogeneidade da cobertura do solo encontrada no setor leste da ilha do Marajó constitui zonas úmidas costeiras que são definidas como áreas de transição entre o sistema terrestre e aquático, onde o lençol freático está geralmente próximo a superfície, ou a superfície do terreno é coberta por água rasa (Frohn et al., 2009). Zona Úmida é um termo genérico usado para definir o universo de ambientes úmidos incluindo manguezais, pântanos, campos alagados, e áreas similares. Estes ambientes estão sujeitos a inundações permanentes ou periódicas ou a saturação prolongada do solo, que permitem condições ambientais adequadas para o estabelecimento de hidrófitas. (Tiner, 1999). Estes sistemas fazem parte da etapa final no processo de nivelamento e preenchimento das depressões costeiras, e dependem do balanço entre o aumento do nível do mar e a acumulação de sedimentos provocada pela ação das marés.

As zonas úmidas agem como centros de produtividade biológica e apresentam muitas funções, incluindo: conservação da diversidade biológica, habitat para vida selvagem, fonte de alimento para peixes e humanos, regulação do ciclo hidrológico e controle de inundação, melhoria e proteção da qualidade da água, e controle da erosão e proteção da linha de costa. (Coughanowr, 1998).

Contudo, o nível de proteção de Wetlands sobre a retrogradação e progradação da linha de costa depende principalmente dos processos costeiros atuantes, como ondas de maré, e o nível do mar. De acordo com Bindoff et al. (2007), há uma perspectiva de uma contínua elevação acelerada do nível do mar em aproximadamente 1,7 mm/ano, provocada sobretudo pela expansão termal dos oceanos e degelo das calotas polares. Devido principalmente ao

aquecimento global, os ambientes adjacentes à faixa litorânea da Ilha do Marajó podem apresentar um alto grau de vulnerabilidade aos efeitos dessa taxa de aumento do nível do mar. Portanto, é necessário conhecer e caracterizar as zonas úmidas costeiras de modo que consigamos diferenciar, mapear e monitorá-las ao longo do tempo. O uso de técnicas de análise de imagens de satélite e a interpretação da interação eletromagnética (REM) entre os diferentes alvos da superfície da Terra, tais como a vegetação, água e solo exposto podem servir como ferramentas para mapear a extensão espacial e as modificações temporais destas feições através do sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto na forma de fotografias aéreas tem sido um importante recurso para obter informações do uso e da cobertura do solo. Entretanto, o custo de aquisição destas imagens e da interpretação dos tipos de cobertura do solo é alto para grandes áreas geográficas. Uma alternativa é adquirir as informações necessárias a partir de imagens digitais de satélite, como o Landsat TM. Este satélite apresenta diversas vantagens, entre elas: (1) a visada sinóptica do sensor fornece imagens que cobrem grandes áreas geográficas, (2) a forma digital dos dados disponibiliza uma análise mais eficiente e os dados classificados são compatíveis com o sistema de informações geográficas, eliminando a necessidade de digitar informações interpretadas, e (3) mapas de cobertura da Terra podem ser gerados com custos consideravelmente mais baixos que por outros métodos (embora sua resolução espacial seja de 30 metros). (Bauer et al., 2003).

Nas imagens de sensores ópticos, a exemplo do Landsat, os alvos refletem proporções diferentes de energia nas regiões do azul, verde, vermelho e infravermelho. A quantidade de energia refletida para cada um desses materiais pode ser medida em comprimentos de onda específicos, criando uma curva de reflectância espectral, também chamada de assinatura espectral. O comportamento da curva de reflectância espectral para um determinado material é aferido em função das tonalidades de cinza do objeto em cada banda, e estes valores podem ser comparados em diferentes épocas para uma mesma área. (Jensen, 1996). O monitoramento da cobertura do solo, baseado em análise multitemporal de imagens de satélite, tem demonstrado grande potencial para detectar e identificar quais sucessões de mudanças está ocorrendo. Porém, um problema associado com os dados históricos (multitemporais) de sensoriamento remoto é que as imagens utilizadas não são da mesma data (dia/mês), apresentando variação entre os ângulos de incidência solar, nas condições atmosféricas e na umidade do solo. Portanto, os dados de sensoriamento multitemporais devem ser

normalizados (equalizados) para que estes efeitos sejam minimizados ou eliminados (Jensen, 2000).

Muitos estudos detalhados que envolvem o mapeamento e monitoramento de zonas úmidas costeiras utilizam as imagens dos sensores de radar (Touzi et al. 2007, Li et al. 2007, Whitcomb et al. 2009). Souza Filho & Paradella (2002, 2003) e Souza Filho et al. (2006) utilizaram imagens do Radarsat 1 para reconhecer feições geomorfológicas costeiras, mapear manguezais e usos do solo, e detectar mudanças na linha de costa. Diversos trabalhos de caracterização, mapeamento e monitoramento de zonas úmidas costeiras tem sido desenvolvido em todo o mundo utilizando imagens ópticas (Dillabaugh and King 2008, Liu et al. 2009, Ramsey et al., 2009). Entretanto, é raro o uso destas imagens para estudos detalhados de mapeamento, caracterização e monitoramento espectral das zonas úmidas costeiras amazônicas, devido principalmente à presença constante de nuvens na região equatorial.

A presente pesquisa apresenta dois objetivos principais e complementares, sendo o primeiro referente à avaliação do uso da imagem em reflectância do TM Landsat-5 para a caracterização e mapeamento das zonas úmidas costeiras amazônicas, comparando a resposta espectral das diferentes coberturas do solo – manguezal, manguezal degradado, praias e dunas, vegetação secundária inicial, vegetação secundária avançada, água com sedimento, água sem sedimento, ocupação humana e campos - na margem leste da Ilha de Marajó, Brasil. O segundo objetivo, com os dados obtidos acerca da caracterização espectral, analisou-se a evolução temporal-espectral dos ambientes úmidos presentes na planície costeira no período de 1988 a 2008.

Para a caracterização e comparação espectral das diferentes zonas úmidas costeiras, coletaram-se na imagem, 20 amostras poligonais (5x5 pixels) para cada tipo de cobertura do solo. A análise de variância (*Analysis of Variance* - ANOVA), o Teste de Tukey HSD e um índice de separabilidade espectral de pares de regiões de interesse (ROIs) foram calculados. O mapeamento foi gerado a partir do classificador supervisionado *Spectral Angle Mapper*, e a validação dos dados, delineados pela Matriz de Confusão. Como estes dados espectrais podem ser comparados em diferentes épocas para uma mesma área, e imagens de média resolução espacial apresentam problema de mistura de radiância dentro do IFOV, foi aplicada a técnica do modelo de mistura espectral para determinar as abundâncias das frações – vegetação, água e/ou sombra, solo e vegetação não fotossinteticamente ativa – nas imagens

reflectância datadas na série temporal de 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 e 2008. Como forma de analisar e apresentar os dados espectrais multitemporal em imagens ópticas, o diagrama trilinear é proposto como nova abordagem metodológica numa escala subpixel.

CAPÍTULO 1

Mapeamento dos Ambientes Úmidos Costeiros através da Análise Espectral de Imagens Landsat TM5, Ilha de Marajó, Brasil

CARDOSO, G.F.¹, SOUZA, JR. C.² & SOUZA FILHO, P.W.M.^{1*}

*1 Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Cidade Universitária, Av. Augusto Correa 1. PO BOX 8608, 66075-110 Belém, Pará, Brasil.
E-mail: gcardoso@ufpa.br; walfir@ufpa.br.*

2 Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – IMAZON. IMAZON - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – Rua Domingos Marreiros, 2020 – Altos - Bairro Umarizal - Belém, PA - 66060-160 E-mail: souzajr@amazon.org.br

**Autor Correspondente: Pedro Walfir Martins e Souza Filho*

Resumo: O uso do sensoriamento remoto é uma importante ferramenta no entendimento da interação da radiação eletromagnética entre diferentes alvos da superfície da Terra, tais como a vegetação, água e solo exposto. Este estudo procurou caracterizar, mapear e comparar a resposta espectral das zonas úmidas costeiras (MAN - manguezal, MAD - manguezal degradado, PRD - praias e dunas, VSI - vegetação secundária inicial, VSA - vegetação secundária avançada, ACS - água com sedimento, ASS - água sem sedimento, OCH - ocupação humana e CAM - campos) nos municípios de Soure e Salvaterra, margem leste da Ilha do Marajó, no Estado do Pará, Brasil, através da imagem reflectância do TM Landsat-5. Para tanto, a imagem foi corrigida geométrica e radiometricamente, e os valores absolutos do pixel, transformados para valores físicos de reflectância. Para a caracterização e comparação espectral das diferentes zonas úmidas costeiras, coletaram-se na imagem, no mínimo, 20 amostras poligonais (5x5 pixels) para cada tipo de cobertura do solo. A análise de variância (ANOVA), o Teste de Tukey HSD e um índice de separabilidade espectral de pares de regiões de interesse (ROIs) foram calculados. O mapeamento foi gerado a partir do classificador supervisionado *Spectral Angle Mapper*, e a validação dos dados, delineados pela Matriz de Confusão. Estas simulações foram aferidas através do comparativo entre a imagem Landsat classificada e a referência de campo via ROI. O resultado da ANOVA mostrou que há diferenças significativas entre as reflectâncias médias em todas as classes, em no mínimo um par de médias, para todas as bandas (1-5 e 7) da imagem. O Teste de Tukey HSD verificou que a menor diferença entre duas médias nas bandas 1 e 2 ocorre no par VSA-MAN, na banda 3, VSI-MAN, na banda 4, OCH-MAN, na banda 5, OCH-PRD, e na banda 7, ACS-ASS. A função de separabilidade espectral de pares de ROIs destacou um baixo valor para o par de classes OCH-CAM. O cálculo da exatidão do mapeamento apresentou valores aceitáveis, no entanto, devido às características limitantes e intrínsecas verificadas no sensor Landsat, os resultados encontrados – como confusão entre as matrizes de classificação, a baixa separabilidade espectral entre pares de vegetação densa (MAN-VSA) e entre feições de solo, como os pares OCH-CAM – sugerem a utilização de métodos alternativos para melhor discriminar estes alvos, como imagens fração (solo, água e vegetação), derivadas da análise de mistura espectral, e uso de imagens de alta resolução espacial e espectral.

Palavras-Chave: Zonas úmidas costeiras, Análise espectral, Estatística, Amazônia.

Abstract: The use of remote sensing is an important tool for understanding the interaction of electromagnetic radiation among different targets on the Earth's surface, such as vegetation, water and exposed soil. This study sought to characterize, map and compare the spectral response of coastal wetlands: (MAN - mangrove, MAD - degraded mangrove, PRD - beaches and dunes, VSI - initial secondary vegetation, VSA - advanced secondary vegetation, ACS - water with sediment, ASS - water without sediment, OCH - human occupation and CAM - marshes) in the municipalities of Soure and Salvaterra, eastern side of Marajó Island, State of Pará, Brazil, by means of image reflectance with the TM Landsat-5. To do this, the image was geometrically and radiometrically corrected, and the absolute values of the pixel were transformed into physical reflectance values. For spectral characterization and comparison of the different coastal wetlands, in the image at least 20 polygonal samples (5x5 pixels) for each type of land cover were collected. An analysis of variance (ANOVA), Tukey HSD Test and spectral separability index for pairs in the regions of interest (ROIs) were calculated. Mapping was generated using the *Spectral Angle Mapper* supervised classifier, and validation of data was delineated using the Confusion Matrix. These simulations were verified by comparing the Landsat image classified and the field reference via ROI. The result from ANOVA showed that there are significant differences between the average reflectances of at least one pair of averages, for all of the bands (1-5 and 7). The Tukey HSD Test verified that the smallest difference between two averages in bands 1 and 2 occurs in pair VSA-MAN, in band 3, VSI-MAN, in band 4, OCH-MAN, in band 5, OCH-PRD, and in band 7, ACS-ASS. The spectral separability function of ROIs highlighted a low value for the OCH-CAM pair of classes. Calculating the exactness of the mapping presented acceptable values; however, due to the limiting and intrinsic characteristics verified in the Landsat sensor, the results found – such as confusion between the classification matrices, the low spectral separability between pairs of dense vegetation (MAN-VSA) and between soil features, such as the OCH-CAM pairs – suggest utilization of alternative methods to better discriminate between these targets, such as fraction images, (soil, water and vegetation), derived from analysis of the spectral mixture, and the use of images with high spatial and spectral resolution.

Keywords: Landsat image, coastal wetlands, spectral analysis, mapping, Amazon.

1. Introdução

A área de estudo está inserida no maior arquipélago flúvio-marinho do mundo, o arquipélago do Marajó, composto por dezenas de ilhas localizadas na foz do Rio Amazonas. A ilha de Marajó, a maior do arquipélago, com cerca de 40 mil km², apresenta uma cobertura do solo complexa e que vem sofrendo um ajustamento horizontal em seus limites. Esta complexidade surgiu primeiramente no final do período geológico do Pleistoceno, quando houve o afundamento da margem leste da ilha provocando alagamento devido, principalmente, ao aumento da influência dos processos costeiros, como correntes de maré e ondas (Rossetti, 2008). Com isso, áreas de floresta tipicamente amazônica foram sendo substituídos por um mosaico de florestas ombrófila densa à oeste; e savanas e zonas úmidas costeiras, representadas por manguezais (mangroves) e campos de água doce e salobra à leste (Figura 1.1) (Amaral, 2007).

A heterogeneidade da cobertura do solo encontrada no setor leste da ilha do Marajó constitui zonas úmidas costeiras, que são definidas como áreas de transição entre o sistema terrestre e aquático, onde o lençol freático está geralmente próximo a superfície, ou a superfície do terreno é coberta por água rasa (Frohn et al., 2009). “Wetland” é um termo genérico usado para definir o universo de ambientes úmidos incluindo manguezais, pântanos, campos alagados, e áreas similares. Estes ambientes estão sujeitos a inundações permanentes ou periódicas ou a saturação prolongada do solo, que permitem condições ambientais adequadas para o estabelecimento de hidrófitas. (Tiner, 1999). Estes sistemas fazem parte da etapa final no processo de nivelamento e preenchimento das depressões costeiras, e dependem do balanço entre o aumento do nível do mar e a acumulação de sedimentos provocada pela ação das marés.

De acordo com Bindoff et al. (2007), há uma perspectiva de uma contínua elevação acelerada do nível do mar em aproximadamente 1,7 mm/ano, provocados principalmente pela expansão termal dos oceanos e degelo das calotas polares. Devido principalmente ao aquecimento global, os ambientes adjacentes à faixa litorânea da Ilha do Marajó podem apresentar um alto grau de vulnerabilidade aos efeitos dessa taxa de aumento do nível do mar. Portanto, é necessário conhecer e caracterizar as zonas úmidas de modo que consigamos diferenciar e mapear as diferentes zonas úmidas costeiras. O uso de técnicas de sensoriamento remoto é uma importante ferramenta no entendimento da interação da radiação

eletromagnética (REM) com diferentes alvos da superfície da Terra, tais como a vegetação, água e solo exposto.

Estes alvos refletem proporções diferentes de energia nas regiões do azul, verde, vermelho e infravermelho nas imagens de sensores ópticos. A quantidade de energia refletida para cada um desses materiais pode ser medida em comprimentos de onda específicos, criando uma curva de reflectância espectral, também chamada de assinatura espectral. O comportamento da curva de reflectância espectral para um determinado material é aferido em função das tonalidades de cinza do objeto em cada banda (Jensen, 2000).

Muitos estudos detalhados que envolvem o mapeamento e monitoramento de zonas úmidas costeiras utilizam as imagens dos sensores de radar (Touzi et al. 2007, Li et al. 2007, Whitcomb et al. 2009). Souza Filho & Paradella (2002, 2003) e Souza Filho et al. (2006) utilizaram imagens do Radarsat 1 para reconhecer feições geomorfológicas costeiras, mapear manguezais e usos do solo, e detectar mudanças na linha de costa. Diversos trabalhos de caracterização, mapeamento e monitoramento de zonas úmidas costeiras tem sido desenvolvido em todo o mundo utilizando imagens ópticas (Dillabaugh and King 2008, Liu et al. 2009, Ramsey et al., 2009). Entretanto, é raro o uso destas imagens para estudos detalhados de mapeamento e caracterização espectral das zonas úmidas costeiras amazônicas, devido principalmente a presença constante de nuvens na região equatorial.

O objetivo deste estudo é avaliar o uso das imagens TM Landsat-5 para a caracterização e o mapeamento das zonas úmidas costeiras amazônicas, assim como comparar a resposta espectral das diferentes coberturas do solo – manguezal, manguezal degradado, praias e dunas, vegetação secundária inicial, vegetação secundária avançada, água com sedimento, água sem sedimento, ocupação humana e campos - na margem leste da Ilha de Marajó, caracterizadas pela imagem reflectância.

2. Área de Estudo e Cobertura do Solo

A área de estudo está localizada na porção leste da Ilha de Marajó, estado do Pará, Brasil, no litoral dos municípios de Soure e Salvaterra, no trecho entre as desembocaduras dos canais de marés do Cajuúna e Jubim (latitude entre 00° 36' S e 00° 49' S; longitude entre 48° 27' W e 48° 33' W). (Figura 1.1). Esta área pertence à região estuarina denominada de golfão marajoara, cuja distância em linha reta da cidade de Belém é de aproximadamente 86 km, e o acesso se dá por via rodo-fluvial e aérea.

Segundo Rossetti (2007), a história geológica da Ilha do Marajó foi fortemente controlada pela tectônica, separando-se do continente recentemente, provavelmente no Holoceno. Antes deste período, a calha do rio Tocantins cortava no sentido norte, em direção ao oceano, até que falhas tectônicas desviaram seu curso para nordeste. Concomitante ao processo de formação da calha do rio Pará, no sul da ilha, esse processo refletiu em sistemas de falhas com direção principal E-W, o que provocou a total separação da ilha do Marajó do continente.

Estes eventos tectônicos recentes ocorreram junto ao processo de sedimentação, sendo, portanto, um grande controlador na evolução do sistema deposicional. A tectônica favorece o desenvolvimento de áreas de subsidência e a formação de locais de acomodação do novo sedimento. A região permanece tectonicamente instável durante a sedimentação e camadas espessas do depósito são fortemente marcados pela abundância de sedimento fino (Rossetti *et al.*, 2007).

Com relação à geomorfologia da área de estudo, França & Souza Filho (2006), afirmam que, com base nas formas de relevo, na topografia, na geologia, na granulometria dos sedimentos e na cobertura vegetal, é possível compartimentar a área de estudo em: Planalto Costeiro, representado por superfície dos baixos platôs, cujas cotas topográficas variam de 5 a 20 m acima do nível do mar; e a Planície Costeira, constituída por sedimentos lamosos e arenosos quaternários, com cotas topográficas inferiores a 5 m e que se estende para o interior até o alcance máximo da zona de influência das marés, onde se limita com o planalto costeiro.

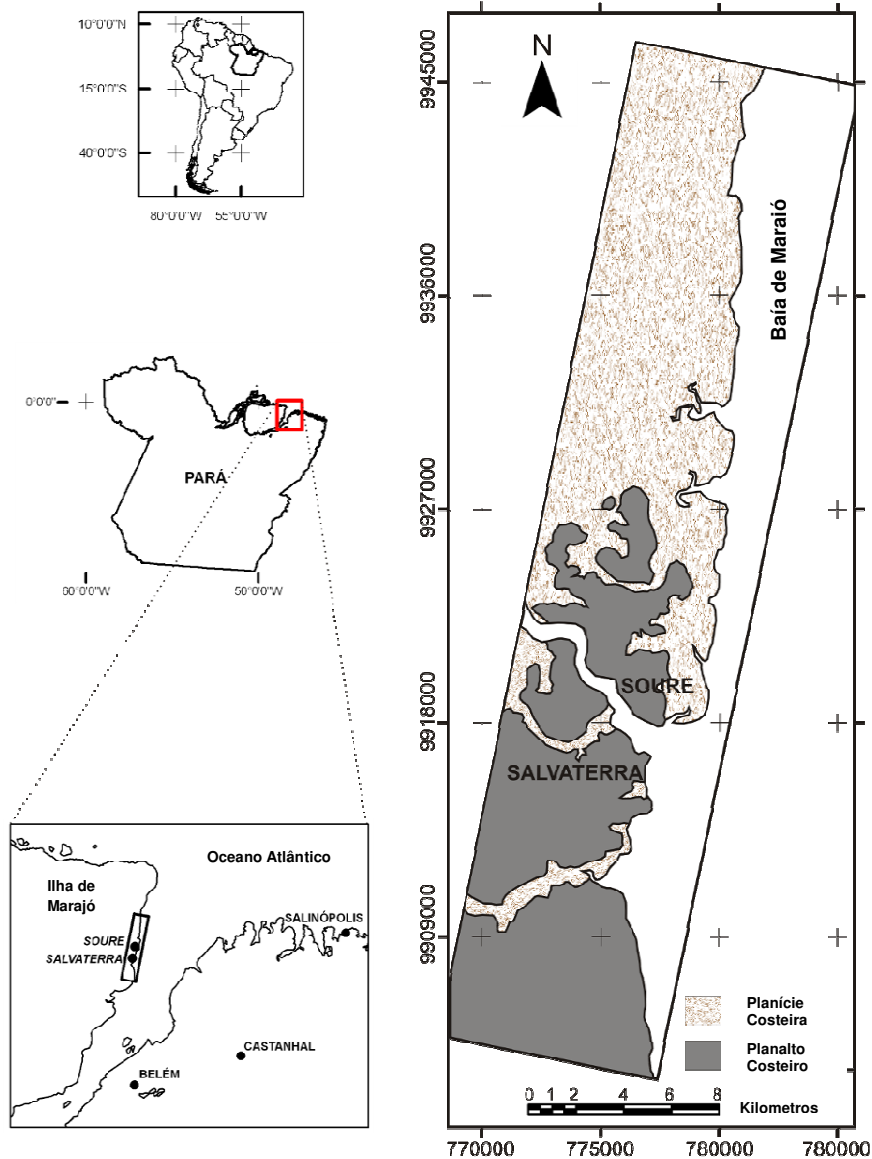


Figura 1.1: Mapa de localização, em UTM, da área de estudo.

Quanto à cobertura e uso do solo, que estão relacionados intimamente com os compartimentos geomorfológicos costeiros, temos: Manguezal, Campos Salinos e Praias e Dunas – localizados na Planície Costeira; e Ocupação Humana, Campos Limpos e Mistos, e Vegetação Secundária, encontrados no Planalto Costeiro. (Tabela 1.1) (França et al. 2007). Estas definições das classes dos diferentes tipos de ambiente subsidiaram a identificação das amostras na imagem reflectância e as análises espectrais.

Tabela 1.1: Descrição das coberturas do solo considerando a geomorfologia costeira local.

Geomorfologia Costeira	Classes de Cobertura e Uso do Solo
<p>Planície Costeira: constituída por sedimentos lamosos e arenosos quaternários, cuja deposição foi realizada por processos flúvio-marinhos e eólicos, durante fase progradacional da linha de costa, sob condições regressivas ou de mar estável, (Souza Filho et al., 2006; 2009).</p>	<p>Manguezal: vegetação situada na planície de intermaré; formações vegetais pioneiras de influência fluvio-marinha e estrato arbóreo; espécies predominantes: <i>Rhizophora</i>, <i>Avicennia</i> e <i>Laguncularia</i> (IBGE, 2004 e Governo do Estado do Pará, 2004).</p>
	<p>*Campos Salinos – localizados na planície de supramaré, entre o planalto costeiro e a planície de intermaré; origem relacionada aos processos de afogamento e colmatagem de paleocanais; controlados ora pela pluviosidade ora por influência das marés. A redução das chuvas favorece a maior penetração das marés, tornando salobra a água superficial. A vegetação campestre é dominada pelas cibráceas <i>Eleocharis interstincta</i> “junco poque-poque” e <i>Eleocharis mutata</i> “junco triângulo” (França & Souza Filho, 2006; França et al., 2007).</p>
	<p>Praias e dunas – cordões arenosos atuais formados em consequência do aporte sedimentar arenoso (França & Souza Filho, 2006). Os sedimentos são transportados por ação das ondas e ventos, paralela a linha de costa, onde se encontram tipologias vegetacionais herbáceas, arbustivas e arbóreas, conhecidas como restinga (Governo do Estado do Pará, 2004).</p>
<p>Planalto Costeiro: representa a superfície dos baixos platôs, cujas cotas topográficas variam de 5 a 20 m acima do nível do mar, formando um relevo aplainado com suaves ondulações. (França & Souza Filho, 2006).</p>	<p>Ocupação Humana - vegetação ausente por ação antrópica. Áreas de uso e ocupação humana intensa, com atividades de moradia, industrial, comercial, agropecuário, exploração mineral e entre outros. Nestas áreas o solo está sem cobertura vegetal ou muito incipiente (Governo do Estado do Pará, 2004).</p>
	<p>*Campos Limpos e Mistos – nos campos limpos, forte dominância de gramíneas (como as do gênero <i>Andropogon</i>, <i>Axonopus</i> e <i>Panicum</i>) e ciperáceas (em destaque para os gêneros <i>Fimbristylis</i>, <i>Kyllinga</i> e <i>Rhynchospora</i>), originando uma paisagem campestre; no tipo misto predominam o estrato arbustivo-arbóreo ou os mondrongos (pequenos capões de mata e ilhas florestais de tamanhos e formas variados com destaques para os gêneros <i>Ocotea</i>, <i>Paliocourea</i>, <i>Paullinea</i>, <i>Archonea</i>, entre outros) e aglomerações de palmeiras (<i>Mauritia flexuosa</i> e <i>Mauritiellaaculeata</i>) (Amaral, 2007).</p>
	<p>Vegetação Secundária Inicial - é o estágio inicial de regeneração de áreas desflorestadas ou áreas destinadas a atividades de agricultura e pecuária (Governo do Estado do Pará, 2004).</p>
	<p>Vegetação Secundária Avançada – é a vegetação densa,</p>

porém já degradada, com espécies em estágio sucessional avançado (RADAMBRASIL, 1974). Os principais usos do solo de conversão das florestas primitivas da borda leste da ilha do Marajó em vegetações secundárias são a agricultura familiar para plantio de culturas de subsistência e pecuária.

* Os campos *salino, limpo e misto* foram agregados para classe *Campos* na análise espectral.

3. Base de Dados

3.1. Dados de sensores remotos

As análises das características espectrais de cada tipo de cobertura e uso do solo foram baseadas no sensor óptico orbital TM, do satélite Landsat 5, órbita/ponto 224/060, datada em 21 de agosto de 2008, fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

3.2. Dados de Campo

Foi realizada uma campanha de campo, no período de 07 a 10 de dezembro de 2008, a fim de conhecer, *in situ*, os diferentes ambientes, e auxiliar na identificação de amostras de regiões de interesse (ROIs) na imagem reflectância para cada classe de cobertura do solo. Para tanto, registros fotográficos dos diferentes ambientes foram inseridos e posicionados geograficamente no software livre EasyGPS (Figura 1.2).

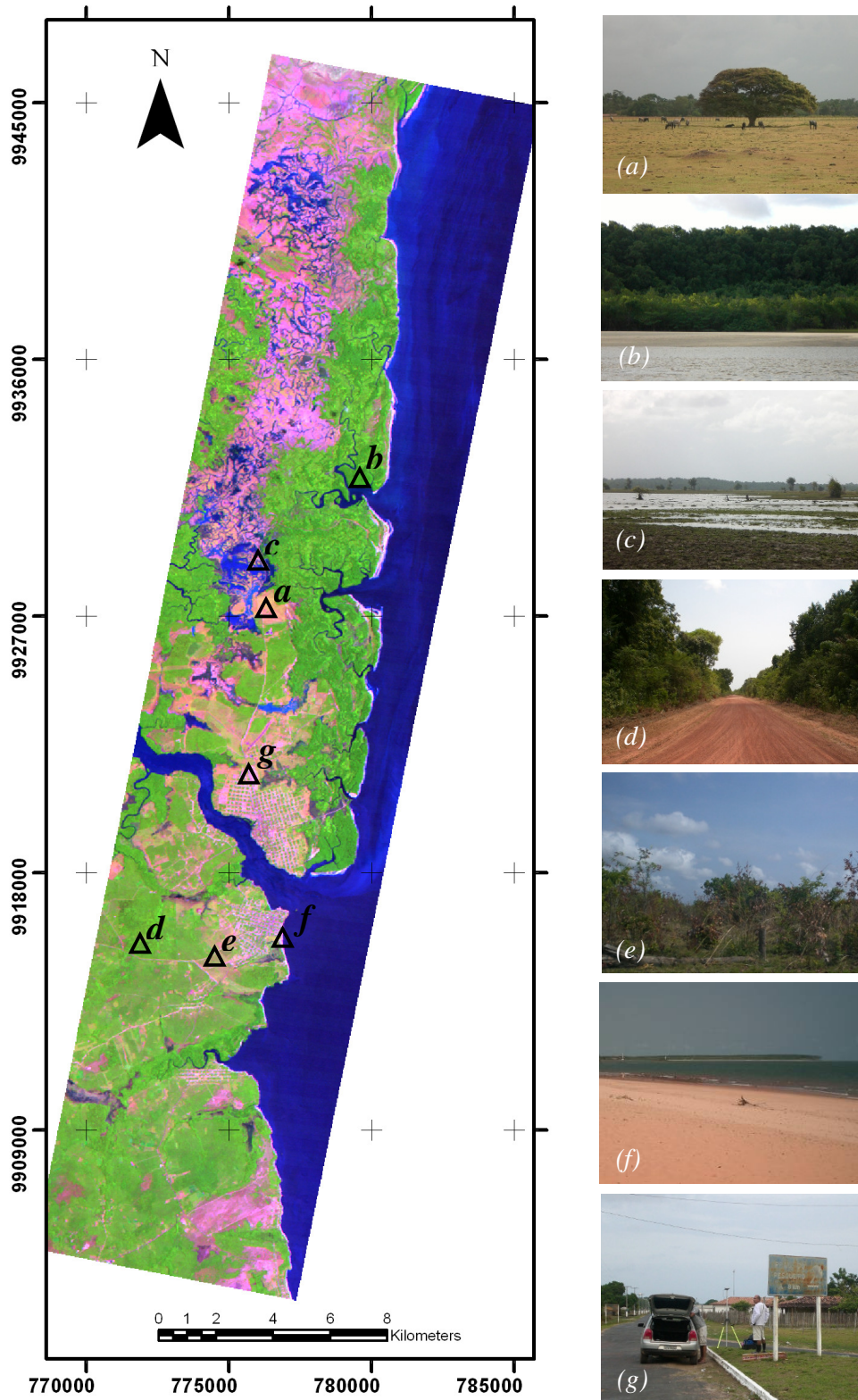


Figura 1.2: Registros fotográficos utilizados para amostrar as classes de cobertura do solo na imagem Landsat. O triângulo indica a posição geográfica das fotografias: (a) pastagem, (b) manguezal, (c) campo alagado, (d) vegetação secundária avançada, (e) vegetação secundária inicial, (f) praia e duna, e, (g) ocupação humana.

4. Métodos

A metodologia empregada consistiu em quatro etapas: 1) pré-processamento; 2) amostragem estatística das classes de cobertura do solo (Tabela 1.1); 3) análise estatística da resposta e separabilidade espectral das classes de cobertura do solo; e 4) mapeamento da cobertura das zonas úmidas costeiras.

4.1. Pré-processamento: registro, calibração radiométrica e correção atmosférica

A imagem TM Landsat-5 de 2008 foi georreferenciada usando 21 pontos de controle com base no mosaico da National Aeronautics and Space Administration (NASA) *GeoCover* (imagem *S-22-00_2000*, através do site <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>). O registro baseou-se no algoritmo de triangulação, pelo método de reamostragem por “vizinho mais próximo” e emprego de um polinômio de 1º grau, disponível no software Environment for Visualizing Images (ENVI), versão 4.5. (ENVI, 2008). O erro quadrático médio (RMS) extraído da imagem registrada aferiu valores inferiores a 1 (um) *pixel*, ou 900m² (30 x 30m), para todos os pontos de controle.

Após registro, a imagem foi radiometricamente corrigida usando os valores de ganho e “offset” para cada banda. (USGS, 2007). Para conversão dos valores digitais em valores físicos de reflectância foi necessário aplicar uma correção atmosférica na imagem. Para correção utilizou-se o módulo *FLAASH*, do ENVI, baseado no uso do MODTRAN 4, que transforma valores de radiância para reflectância de superfície. O modelo tropical e uma quantidade fixa de vapor d’água foram adotados para fins de correção dos efeitos de espalhamento e absorção atmosféricos.

Os dados de entrada utilizados na interface padrão do módulo FLAASH são relativos às características da imagem, do sensor e da órbita/ponto, tais como data e hora de aquisição, altitude do sensor, altitude média, coordenadas geográficas do centro da cena, além do tamanho do pixel. Foram selecionados os respectivos modelos de atmosfera e de aerossóis mais adequados à área de interesse, e inseridos o valor multiplicador da coluna de água e a visibilidade (Tabela 1.2). Sabendo que o modelo é mais aplicado em sensores hiperspectrais e o LANDSAT não possui bandas estreitas localizadas nas faixas comprimentos de onda como 940 e 1135 nm, nos quais é forte a absorção da REM pelo vapor d’água, estas estimativas não foram aplicadas.

O modelo aplicado considerou um único valor de altitude para toda a cena. Este procedimento deve tornar a imagem corrigida para área de estudo, já que a Ilha do Marajó apresenta pequena variação altimétrica. Para o parâmetro de visibilidade optou-se pelo valor de 40 km, pois para cenas claras é indicada uma visibilidade de 40 a 100 km. O modelo de aerossóis utilizado foi o Rural porque, conforme RSI (2005), o modelo Marítimo em faixas litorâneas está associado ao meio rural.

Tabela 1.2: Parâmetros utilizados na aplicação do FLAASH.

Parâmetro	Valor
Modelo de atmosfera	Tropical
Modelo de aerossóis	Rural
Visibilidade (km)	40
Multiplicador da coluna de água	1.0

4.2. Seleção das Regiões de Interesse (ROIs)

Para extração estatística das classes de cobertura do solo utilizou-se o software ENVI 4.5, onde foram criadas no mínimo 20 amostras de regiões de interesse (ROIs) retangulares (5x5 pixel) na imagem reflectância para cada classe, totalizando 500 pixels. (Figura 1.3).

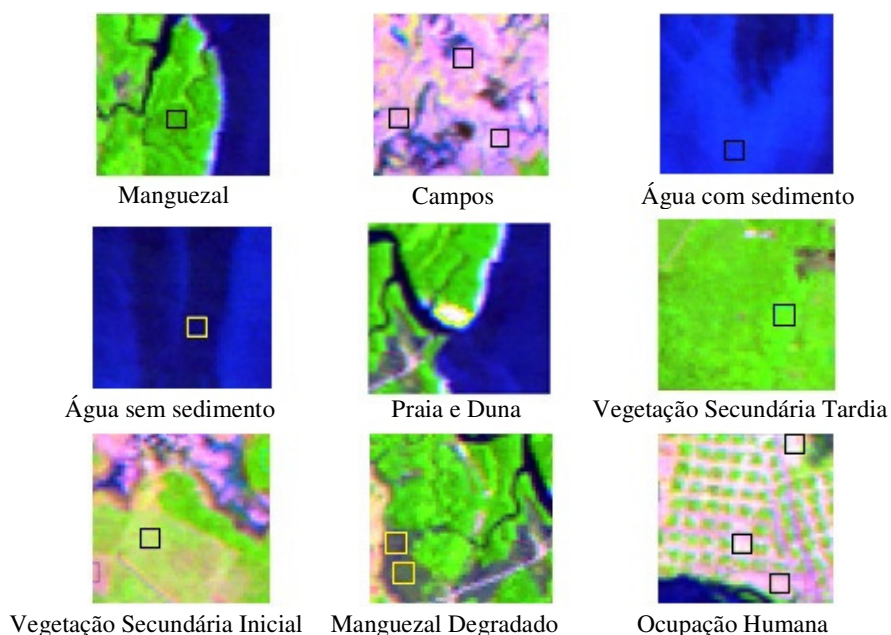


Figura 1.3: seleção das regiões de interesse para cada classe analisada na extração das informações espectrais na imagem Landsat TM 5, composição R5G4B3.

4.3. Delineamento Estatístico

Para verificar se as médias de reflectância são estatisticamente diferentes entre as nove classes de cobertura do solo, calcularam-se as estatísticas básicas (valor máximo e mínimo, média e desvio padrão), e por meio do software R, aplicaram-se técnicas de análises de variância (ANOVA) e o teste de Tukey HSD, para cada banda da imagem.

Primeiramente, o Teste de Variância foi usado para testar se a variância maior é significativamente diferente da variância menor. Quando a variância não foi significativa, o teste de Bartlett foi aplicado para testar as homogeneidades das variâncias. Em seguida, aplicou-se o Teste de Normalidade das reflectâncias através do teste de Shapiro-Wilks para verificar a normalidade das observações nos diferentes ambientes: se aceita a normalidade das observações quando $W > p\text{-value}$. Posteriormente, aplicou-se uma Análise de Variância (ANOVA) para verificar diferenças na reflectância média (variável reflectância) entre as diferentes classes. E por fim, para verificar quais pares de classes de coberturas ocorrem diferenças significativas na reflectância em cada banda e entre quais pares as diferenças são maiores, utilizou-se o teste de Tukey HSD, onde o intervalo de confiança para as diferenças entre as médias são maiores que zero (“lwr” positivo).

4.4. Mapeamento da cobertura das zonas úmidas costeiras

O classificador supervisionado *Spectral Angle Mapper* (SAM) foi usado para mapear a zona úmida costeira. Vinte e sete locais de visitas no campo, em diferentes ambientes, foram identificados e localizados na imagem reflectância da área de estudo. A coleta destes alvos na imagem para caracterização espectral dos ambientes foi feita através da função *Region of Interest (ROI)* do ENVI 4.5 e usadas como amostras puras para alimentar o classificador.

O SAM é um método de classificação que permite um rápido mapeamento através do cálculo da similaridade espectral entre a imagem espectro e o espectro de referência, que pode ser extraído da imagem reflectância. (Yuhás et al.,1992). O algoritmo SAM determina a similaridade espectral entre dois espectros calculando o “ângulo” entre eles, tratando ambos os espectros como vetores em um espaço com dimensionalidade igual ao número de bandas. Ângulos menores entre os dois espectros indicam alta similaridade e maiores ângulos, baixa similaridade (Kruse et al., 1993).

Este método de classificação apresenta como desvantagem a mistura espectral. Esta confusão espectral do pixel pode levar a uma superestimativa ou subestimativa de uma classe

espectral, principalmente em imagens com resolução média, como as imagens do TM Landsat-5. (Gebbinck, 1998). Porém, produtos de classificação gerados com o SAM mostram que este método de mapeamento é efetivo para classificar diferentes coberturas da Terra através das imagens ópticas do ETM+ Landsat-7 (Sohn & Qi, 2005).

Para validação dos dados do mapeamento, calculou-se a Exatidão Global, o Coeficiente Kappa, a Exatidão do Produtor e a Exatidão do Usuário, no programa ENVI 4.5.

5. Resultados e Discussão

5.1. Reflectância

A figura 1.4 mostra as curvas das feições espectrais referentes à reflectância média das coberturas do solo estudadas dentro da faixa espectral das bandas 1-5 e 7, do sensor TM Landsat-5.

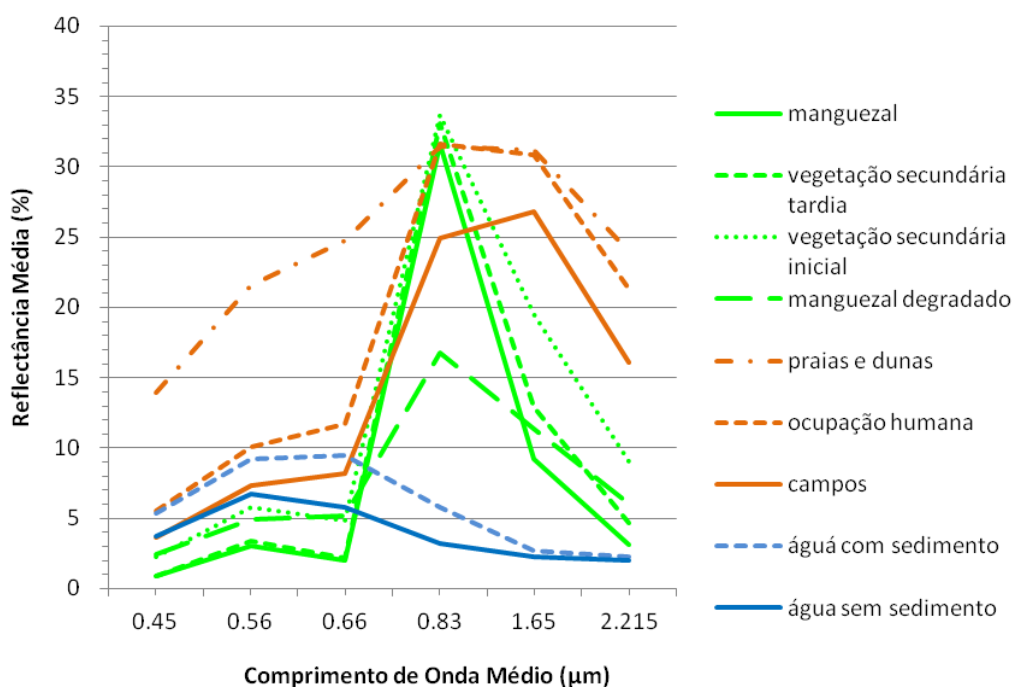


Figura 1.4: Padrões espectrais da cobertura dos ambientes costeiros a partir das amostras dos ROIs na imagem Landsat TM5.

5.1.1. Feições da Vegetação

A vegetação está representada pelas classes Manguezal, Vegetação Secundária Inicial e Vegetação Secundária Avançada. A análise visual da reflectância média destas feições de vegetação mostra uma curva padrão na região do visível, caracterizada por baixos valores de

reflectância na banda do azul, valores relativamente mais altos na região do verde e finalmente mais baixos valores de reflectância de superfície na banda do vermelho.

Comparando a distribuição das curvas espectrais de cada classe dominada pela vegetação, o Manguezal e a Vegetação Secundária Avançada apresentam curvas com picos de curva de reflectância espectral (em torno de 3,5%) sobrepostos na região do visível. Nesta faixa do espectro as concentrações/atividades de pigmentos fotossintetizantes presente nas folhas indicam uma provável similaridade em suas propriedades químicas ou diferenças estruturais mínimas. Já as classes Manguezal Degradado e Vegetação Secundária Inicial aferiram valores percentuais maiores de reflectância média na mesma faixa do espectro, de 5% e 6% respectivamente, devido à maior participação da resposta espectral do solo.

No intervalo de comprimento de onda referente ao infravermelho próximo (0,76 – 0,90 μ m), as classes de vegetação apresentam comportamento espectral semelhante, com picos de reflectância de 31% na banda 4 (comprimento de onda médio – 0,83 μ m) para as classes Manguezal e Vegetação Secundária Avançada. Este comportamento indica semelhança na estratificação horizontal, que geralmente implica em maior sombreamento das folhas das árvores destas feições e maior rugosidade na imagem. (Ponzoni & Shimabukuru, 2007). Para a classe Vegetação Secundária Inicial, valores de reflectância (34%) ligeiramente superiores a ao Manguezal e a Vegetação Secundária Avançada indicam menor estratificação horizontal e, portanto, uma textura mais lisa na imagem. Ainda nesta faixa do espectro, a classe Manguezal Degradado demonstra o menor valor de reflectância provavelmente por sofrer inundações frequentes e uma maior presença de matéria orgânica no solo.

Na região do infravermelho médio (1,65 e 2,215 μ m), o comportamento espectral das classes Manguezal, Vegetação Secundária Avançada e Inicial é similar, no entanto com algumas distinções. Tratando-se de uma faixa do espectro de absorção de água, os valores de reflectância estão diretamente associados à quantidade de biomassa e consequentemente a presença de água na vegetação, reduzindo sua reflectância. De acordo com a Figura 1.4, o Manguezal possui menor reflectância e a Vegetação Secundária Inicial a mais elevada, devido principalmente a sua localização no Planalto Costeiro, sem influência de inundações. Ainda no infravermelho médio, destaque para a classe Manguezal Degradado com percentual de pico de curvas de reflectância de superfície relativamente baixa, sendo atribuída provavelmente pela presença de água no solo.

5.1.2. Feições do Solo

As feições de solo, compreendida pelas classes de Campos (classe de vegetação introduzida na feição do solo devido ao comportamento da curva espectral apresentar características semelhantes ao solo exposto, já que o período de aquisição da imagem ocorreu na estação seca), Ocupação Humana e Praia/Dunas caracterizam-se pelo aumento da reflectância com o aumento dos comprimentos de onda, especialmente no visível e no infravermelho próximo. Este comportamento espectral pode ser explicado para a área de estudo principalmente pela granulometria, constituição mineral e umidade do solo. Solos arenosos secos, e com minerais mais brilhantes, caso do quartzo, refletem mais que solos argilosos ou siltosos. (Jensen, 2000).

Isto ocorre principalmente na classe Praia/Duna, que se destaca com os maiores valores percentuais de reflectância, a partir de 14% na banda do azul, atingindo 24% na banda do vermelho. A curva de reflectância espectral da classe Ocupação Humana, na faixa do infravermelho próximo, se sobrepõe à Praia/Dunas, já que ocupam áreas mais elevadas (Planalto Costeiro), e, portanto, não inundáveis. A maioria das amostras dos campos naturais foi coletada em áreas dominadas por paleocanais, e no período de baixa pluviosidade. A vegetação herbácea seca, predominante nestas condições ambientais, associada a uma geomorfologia de acomodação de sedimentos e de umidade, foram fundamentais para que a classe Campos apresentasse os menores valores de reflectância ao longo do comprimento de onda médio.

5.1.3. Feições da Água

O comportamento espectral da água caracteriza-se pela alta transmitância e baixa reflectância em todas as faixas do espectro. Porém comparando as feições de água pura, (classe Água sem Sedimento), e água com partículas em suspensão (classe Água com Sedimento), puderam-se verificar distinções nos valores de reflectância.

Com relação às classes de água na faixa do visível, observa-se que há maior diferença nos valores de reflectância nesta faixa do espectro, entre Água com Sedimento (partículas em suspensão) e Água sem Sedimento. A classe Água com Sedimento apresenta maiores valores de reflectância de superfície com seu pico de curva espectral, em torno de 9%, na banda do vermelho. Já a classe Água sem Sedimento ou sem partículas em suspensão tem seu pico de reflectância em 5% na banda do verde. A diferença entre os picos de curva de reflectância

espectral média na banda média do vermelho ($0,66\mu\text{m}$) apresenta uma maior amplitude, de 4%. Meneses & Netto (2001) confirmam este comportamento das curvas de reflectância na Água com Sedimento, explicando que o material particulado em suspensão tem como principal efeito o aumento do coeficiente de espalhamento da água. Já nos comprimentos de onda mais longos (região do infravermelho próximo e médio) esta amplitude tende a diminuir até se sobrepossem na banda de absorção da água ($1,65\mu\text{m}$).

Como o estudo do comportamento espectral de materiais é dependente de variáveis como escala e interpretação visual, cálculos estatísticos dos dados são necessários para inferir com maior precisão as relações espectrais das coberturas de solo nas seis bandas espectrais analisadas.

5.2. Análise Estatística da Variabilidade Espectral

O resultado dos cálculos estatísticos no software R, conforme descrito nos métodos gera abreviaturas e números para as análises dos testes Tukey HSD que significam: *diff*– diferença nas médias observadas; *lwr*– ponto final mais baixo do intervalo; *upr*– ponto final mais alto do intervalo; *p adj* – p valor calculado após ajustamento de comparações múltiplas; 1 - Manguezal; 2 - Praia e Dunas; 3 - Água com Sedimento; 4 – Água sem Sedimento; 5 – Vegetação Secundária Avançada; 6 - Vegetação Secundária Inicial; 7 – Manguezal Degradado; 8 – Ocupação Humana; e 9 – Campos.

Para todas as bandas, o Teste de Variância, mostra que não há diferença significativa entre as variâncias e que pelo teste de Bartlett, as variâncias apresentam-se homogêneas. O teste de normalidade (Shapiro-Wilksons) demonstra que há normalidade nas reflectâncias de todas as classes amostradas com $W > p$ value. Os resultados do teste ANOVA demonstraram que as diferenças entre as médias de reflectância dos ambientes costeiros estudados são altamente significativas, ou seja, há diferenças significativas em no mínimo um par de classes, para todas as bandas analisadas. (Tabela 1.3).

Tabela 1.3: ANOVA para as reflectâncias das coberturas nas bandas 1(Cb1), 2(Cb2), 3(Cb3), 4(Cb4), 5(Cb5) e 7(Cb7). CV = Coeficiente de Variação, GL = Grau de Liberdade, SQ = Soma dos Quadrados, QM = Quadrado Médio, e Cb = Cobertura na banda.

CV	GL	SQ	QM	P valor calc	P valor tab
Cb1	8	611615937	76451992	2087.9	2.2e-16 ***
Resíduos	4491	164443349	36616		
Cb2	8	1234941368	154367671	2309.7	2.2e-16 ***
Resíduos	4491	300150419	66834		
Cb3	8	1906455877	238306985	2511.7	2.2e-16 ***
Resíduos	4491	426093724	94877		
Cb4	8	5686416341	710802043	3864.3	2.2e-16 ***
Resíduos	4491	826068525	183939		
Cb5	8	4996814621	624601828	3060.1	2.2e-16 ***
Resíduos	4491	916674863	204114		
Cb7	8	2861208451	357651056	1702.8	2.2e-16 ***
Resíduos	4491	943267772	210035		

*signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1*

Para o Teste de Tukey HSD, os resultados foram aferidos num nível de confiança de 95%. Comparações múltiplas nas médias dos pares foram analisadas banda a banda e apresentadas com os maiores (*lwr* positivos e maiores que a média), e menores valores (*lwr* negativos) significativamente diferentes em duas médias. (Tabela 1.4).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 1.4, verificamos que a menor diferença entre duas médias, ou seja, os pares mais difíceis de separar, nas bandas 1, 2 e 3, ocorre nos pares VST-MAN, nas bandas 1 e 3, nas classes VSI-MAD, na banda 2, no par de classes ACS-CAM, e na banda 4, nos pares OCH-MAN, PRD-OCH, MAN-PRD, VST-VSI. Para a banda 5, os pares OCH-PRD e ACS-ASS mostraram a menor diferença na resposta espectral, e na banda 7, ACS-ASS. Podemos constatar também que as bandas 1, 2, 3 podem ser aplicadas para discriminar melhor a classe PRD dos demais ambientes, e a banda 4 para separar as classes ASS, ACS e MAD. As bandas 5, 4 e 7 mostraram ser as faixas de comprimento de onda que separam a maioria dos ambientes estudados, com 21, 19 e 17 possíveis combinações de pares de classes com valor positivo e maior que a média de *lwr*, respectivamente.

Tabela 1.4: Teste Tukey HSD para os pares de classes nas bandas 1-a, 2-b, 3-c, 4-d, 5-e, e 7-f. Em cinza claro, as diferenças negativas entre duas reflectâncias médias distintas, e em cinza escuro, as positivas. *lwr*– ponto final mais baixo do intervalo. 1 – MAN; 2 – PRD; 3 – ACS; 4 – ASS; 5 – VST; 6 – VSI; 7 – MAD; 8 – OCH; 9 – CAM.

<i>Pares</i>	<i>lwr</i>	<i>Pares</i>	<i>lwr</i>	<i>Pares</i>	<i>lwr</i>	<i>Pares</i>	<i>lwr</i>	<i>Pares</i>	<i>lwr</i>
5--1a	-33.9584	5--1c	-38.0805	1--7d	1354.597	2--6e	984.0246	8--4e	2767.973
7--6a	-30.4684	8--5c	884.4715	5--7d	1500.177	6--1e	984.5846	4--3f	-89.9444
3--9a	-17.8164	8--1c	906.8455	6--7d	1558.993	8--6e	1004.395	9--7f	1022.936
2--4a	961.8816	2--8c	1226.142	9--3d	1726.305	9--5e	1253.727	8--6f	1126.862
2--7a	1097.59	2--9c	1426.854	9--4d	2039.395	9--7e	1395.381	9--5f	1156.684
2--6a	1104.678	2--3c	1518.186	2--3d	2407.045	9--1e	1629.833	2--6f	1304.716
2--5a	1244.182	2--4c	1817.352	8--3d	2448.355	6--3e	1638.099	9--1f	1313.672
2--1a	1247.78	2--7c	1887.268	1--3d	2451.659	6--4e	1674.907	9--4f	1424.002
3--9b	-16.5214	2--6c	1888.95	5--3d	2597.239	2--5e	1681.175	9--3f	1424.006
5--1b	-13.1054	2--5c	2171.068	6--3d	2656.055	8--5e	1701.545	8--7f	1443.542
2--8b	1082.689	2--1c	2193.442	2--4d	2720.135	2--7e	1822.829	8--5f	1577.29
2--3b	1189.167	1--8d	-80.8711	8--4d	2761.445	8--7e	1843.199	2--7f	1621.396
2--9b	1223.385	8--2d	-42.8651	1--4d	2764.749	2--1e	2057.281	8--1f	1734.278
2--4b	1419.267	1--2d	-39.5611	5--4d	2910.329	8--1e	2077.651	2--5f	1755.144
2--6b	1497.817	6--5d	-25.3591	6--4d	2969.145	9--3e	2283.347	8--4f	1844.608
2--7b	1595.667	7--3d	1012.887	8--2e	-68.3014	9--4e	2320.155	8--3f	1844.612
2--5b	1751.839	2--7d	1309.983	3--4e	-51.8634	2--3e	2710.795	2--1f	1912.132
2--1b	1789.473	7--4d	1325.977	5--3e	940.9486	8--3e	2731.165	2--4f	2022.462
7--6c	-58.7725	8--7d	1351.293	5--4e	977.7566	2--4e	2747.603	2--3f	2022.466

Para complementar e comparar as análises estatísticas feitas no software R utilizou-se a função de separabilidade espectral de ROIs do software ENVI 4.5. (Tabela 1.5). De acordo com Richards (1999), os valores espectrais entre pares de ROIs escolhidos no programa computacional ENVI 4.5, variam entre 0 e 2. Com valores acima de 1,9, os pares apresentam boa separabilidade, podendo ser utilizados para caracterização espectral e algoritmos de classificação; abaixo desse valor, recomenda-se editar novamente os ROIs ou selecionar novas regiões de interesse; e valores inferiores a 1 apresentam baixa separabilidade e os ROIs devem ser descartados.

Tabela 1.5: Separabilidade de pares de ROIs identificados na imagem Landsat TM 5.

	<i>MAN</i>	<i>MAD</i>	<i>CAM</i>	<i>VSI</i>	<i>VSA</i>	<i>PRD</i>	<i>OCH</i>	<i>ASS</i>	<i>ACS</i>
<i>MAN</i>	-	1.9991	1.9999	1.9502	1.6580	1.9999	1.9984	2.0000	1.9999
<i>MAD</i>	1.9991	-	1.9098	1.9919	1.9971	1.9904	1.9965	1.9997	1.9766
<i>CAM</i>	1.9999	1.9098	-	1.9028	1.9997	1.9449	1.3596	1.9999	1.9998
<i>VSI</i>	1.9502	1.9919	1.9028	-	1.8850	1.9999	1.8359	2.0000	2.0000
<i>VSA</i>	1.6580	1.9971	1.9997	1.8850	-	1.9999	1.9950	2.0000	2.0000
<i>PRD</i>	1.9999	1.9904	1.9449	1.9999	1.9999	-	1.9386	1.9996	1.9890
<i>OCH</i>	1.9985	1.9965	1.3596	1.8359	1.9951	1.9386	-	2.0000	1.9999
<i>ASS</i>	2.0000	1.9997	1.9999	2.0000	2.0000	1.9996	2.0000	-	1.5895
<i>ACS</i>	1.9999	1.9767	1.9999	2.0000	2.0000	1.9890	1.9999	1.5895	-

Manguezal (MAN); Manguezal Degradado (MAD); Campos (CAM); Vegetação Secundária Inicial (VSI); Vegetação Secundária Avançada (VSA); Praias e Dunas (PRD); Ocupação Humana (OCH); Água sem Sedimento (ASS); Água com Sedimento (ACS).

 Boa Separabilidade

Segundo os valores de separabilidade das amostras referente às regiões de interesse extraídas da imagem reflectância, a Tabela 1.5 indica que a maioria dos pares de ROIs analisados (84%) apresenta separabilidade espectral acima de 1,9 e nenhum pareamento mostrou números inferiores a 1,0. Porém alguns pares de ROIs aferiram valores entre os limiares 1,0 e 1,9 que serão confrontados com as análises estatísticas posteriormente. Entre estes pares, as regiões de interesse delimitadas para o Manguezal (MAN) apresentaram dígitos em torno de 1,66 – podendo gerar confusão entre estas classes na classificação - quando confrontado com a Vegetação Secundária Avançada (VSA), e aferições acima de 1,9 quando pareados com os demais tipos de cobertura do solo.

Já os pixels escolhidos e analisados para a classe Ocupação Humana (OCH), quando pareados com a classe de Campo (CAM), apresentaram valores baixos (1,36), porém ainda superiores a 1,0. Em relação às amostras coletadas na imagem reflectância para o ROI referente ao pareamento água com sedimento (ACS) e sem sedimento (ASS), os resultados aferiram valores próximos de 1,59. Isto indica que estes pareamentos deverão sofrer ajustes de edição e ou seleção dos ROIs.

De modo geral, os demais pareamentos espectrais entre ROIs, cujos pixels analisados eram dominados por vegetação, ora água ou solo, aferiram valores próximos de 2,0, indicando assim uma boa separabilidade entre essas três feições nas imagens TM Landsat-5 para a área de estudo.

5.3. Mapeamento e Exatidão

O mapa da cobertura do solo nas zonas úmidas costeiras, assim como o cálculo da exatidão do mapeamento, se encontra na Figura 1.5 e Tabela 1.6, respectivamente. Para a validação dos dados considerou-se, para comparação, o mapeamento gerado a partir da classificação das imagens Landsat TM 5 de 2008, e as regiões de interesse (ROIs) considerados como referência de campo. A Exatidão Global Geral (*Overall Accuracy*) foi de 86,1% e o Coeficiente Kappa 0,84.

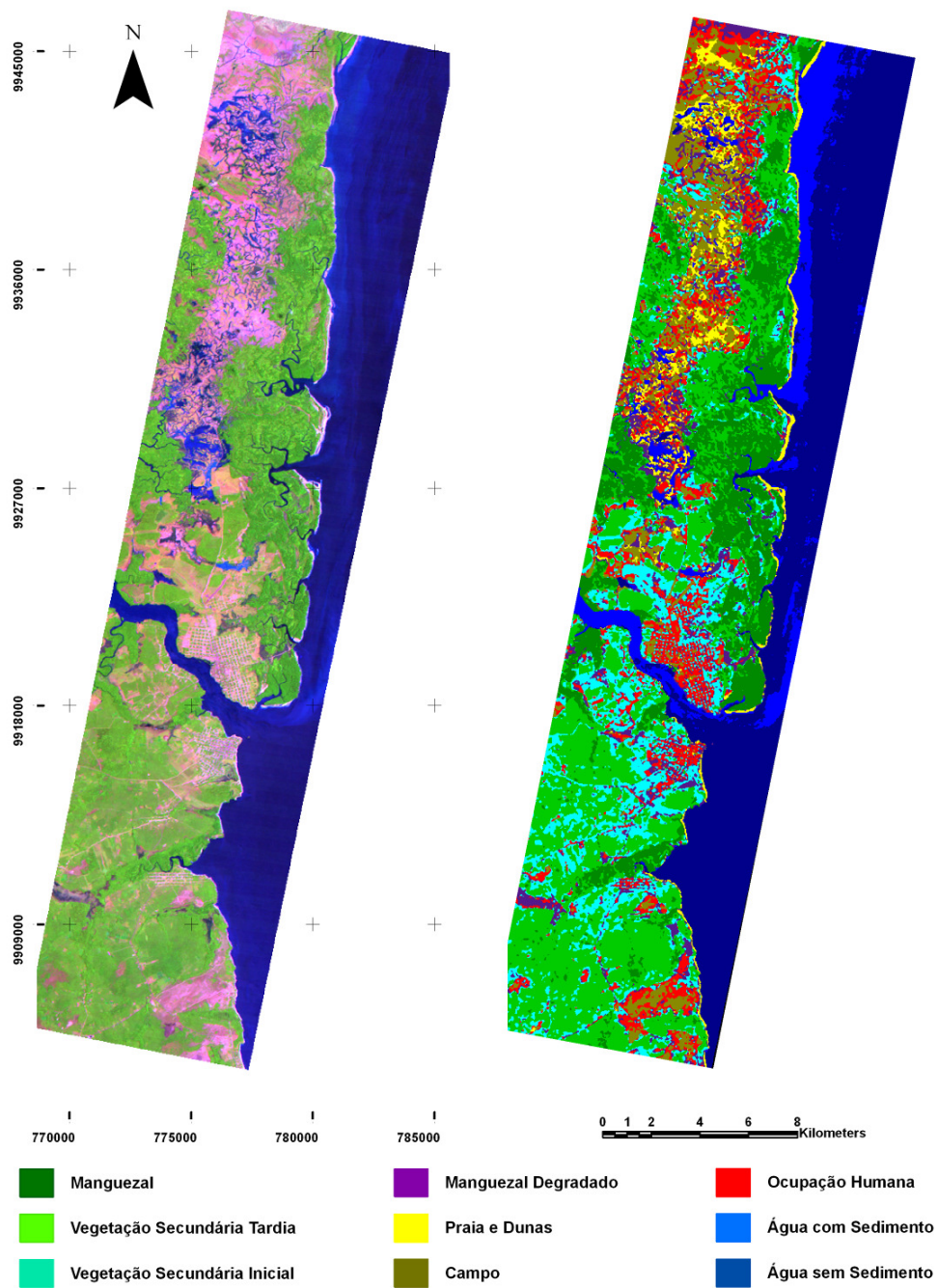


Figura 1.5: Mapa da cobertura da zona úmida costeira classificado pelo algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM).

Tabela 1.6: Matriz de Erro comparando o mapeamento pela imagem Landsat TM 5 de 2008 e os ROIs considerados como referência de campo.

<i>Cobertura das zonas úmidas costeiras (pixels)</i>											Erro de Omissão (%)	Exatidão do Produtor (%)	
<i>Cobertura das zonas úmidas costeiras via ROIs (pixels)</i>	MAN	MAD	VSA	VSI	PRD	ACS	ASS	CAM	OCH	TOTAL			
	NA		1							1			
	477	5	2		1					485	4.6	95.4	
		427		1	12				36	476	17.09	82.91	
	23	7	498	53						581	0.4	99.6	
		45		461				1	11	518	10.66	89.34	
		3			472				26	4	505	6.16	93.84
						1	443	48			492	11.4	88.6
							57	452			509	9.6	90.4
					1	1			346	123	471	30.8	69.2
			27			16			127	336	506	34.12	65.88
TOTAL	500	515	500	516	503	500	500	500	510	4544			
Erro de Comissão (%)	1.65	10.29	14.29	11	6.53	9.96	11.2	26.54	33.6		Exatidão Global = 86,09%		
Exatidão do Usuário (%)	98.35	89.71	85.71	89	93.47	90.04	88.8	73.46	66.4		Coeficiente Kappa = 0,84		

(MAN) Manguezal; (MAD) Manguezal Degradado; (VSA) Vegetação Secundária Avançada; (VSI) Vegetação Secundária Inicial; (PRD) Praias e Dunas; (ACS) Água com Sedimento; (ASS) Água sem Sedimento; (CAM) Campos e (OCH) Ocupação Humana.

Na análise das medidas de exatidão, verifica-se que aproximadamente 34% da classe Ocupação Humana – referência de campo via ROIs - foi classificada erroneamente (erros de omissão) pelo algoritmo SAM na imagem TM Landsat-5. Os 66% corretamente classificados (exatidão do produtor) correspondem a 66,4% da classe Ocupação Humana, representados pela exatidão do consumidor. Não obstante, 33,6% da área mapeada como Ocupação Humana na imagem de satélite não correspondia espacialmente ao real - erros de comissão – para esta classe. No entanto, apenas as classes Ocupação Humana e Campos apresentaram resultados desta ordem, sendo que os demais apresentaram erros de omissão de até 17%, resultando em exatidões do produtor acima de 82%. A maior dificuldade de acerto nas simulações destas duas classes corrobora com o valor mais baixo (1,36) de separabilidade espectral entre os pares de classe calculados segundo Richards (1999).

Embora os resultados das medidas da exatidão, em sua maioria, demonstrassem números aceitáveis e até com níveis elevados de exatidão, a distribuição espacial da cobertura das zonas úmidas costeiras podem sofrer alocações errôneas, principalmente aquelas classes que aferiram valores de acurácia mais baixos, caso da Ocupação Humana e Campo. As

alocações errôneas feita por uma classificação são normalmente distribuídas de modo não aleatório sobre a região. Muitas vezes, há um distinto padrão de distribuição espacial dos erros temáticos decorrente das propriedades do sensor e/ou das condições da cobertura do solo, com, por exemplo, erros espacialmente correlacionados com os limites das classes. Muito do que ocorre no erro dos limites está associado ao registro incorreto do conjunto de dados e à mistura de pixels. Infelizmente, porém, a matriz de confusão e as métricas de precisão dele derivados não fornecem informações sobre a distribuição espacial do erro (Foody, 2002).

6. Conclusões

A análise espectral dos ambientes úmidos costeiros manguezal, manguezal degradado, praias e dunas, vegetação secundária inicial, vegetação secundária avançada, água com sedimento, água sem sedimento, ocupação humana e campos naturais - na margem leste da Ilha de Marajó, foi obtida através da interpretação do comportamento das curvas espectrais das grandes feições de solo, água e vegetação; do uso de testes estatísticos da variabilidade espectral entre as médias desses ambientes costeiros, que confirmaram as análises visuais; da função Separabilidade Espectral de pares de ROIs no software ENVI 4.5, que mostrou coerência com o teste estatístico de Tukey, sugerindo ser uma boa ferramenta para análise preliminar da qualidade de regiões de interesse coletados na imagem reflectância; e do mapeamento com o uso do algoritmo SAM, cujas medidas de exatidão aferiram valores aceitáveis, porém indicando algumas confusões matriciais.

Devido à baixa separabilidade ou diferença não significativa nas médias dos pares de alguns ambientes florestais, sugere-se estudos que apontam métodos alternativos para discriminar diferentes formações e sucessões florestais na Amazônia. Souza Jr (2005), mostra em sua pesquisa que imagens fração (solo, água e vegetação), derivadas da análise de mistura espectral, são sensíveis para monitorar as mudanças nas transições florestais. Pereira (1996) comparou diferentes métodos para estudos de reflectância de coberturas florestais na Amazônia. Segundo este autor as imagens reflectância geradas pelo método de Roberts (1991) representa melhor fisicamente as coberturas vegetais na cidade de Marabá, estado do Pará. O método de Roberts (1991) leva em consideração uma série de regressões entre os componentes puros da imagem e os seus correspondentes espectros de reflectância, uma avaliação espectral da regressão, seleção e avaliação dos componentes puros da imagem e análise de regressão das misturas. Segundo Pereira (1996), o método de Roberts apresenta

também uma minimização dos efeitos atmosféricos, correções estas que devem ser consideradas em regiões de elevada umidade atmosférica, como acontece em regiões amazônicas.

O resultado destas técnicas de análise espectral usadas neste estudo para um maior conhecimento do ambientes costeiros aponta que imagens Landsat têm grande potencial para caracterizar esses tipos de ambientes e para monitorar a dinâmica costeira. Além disso, devido à disponibilidade de dados históricos, as imagens Landsat oferecem a possibilidade de estudos temporais de larga escala (i.e. > 25 anos) de zonas costeiras, para identificar e caracterizar mudanças naturais e antrópicas. A combinação de imagens Landsat com imagens de radar e modelos digitais de terreno pode também melhorar a discriminação desses ambientes e o entendimento da transição dos ambientes costeiros, fundamental para identificar áreas com alta vulnerabilidade de erosão, sedimentação e de alagamento. Esse tipo de informação ainda não existe para o litoral Atlântico norte, e para grande parte do litoral brasileiro, mas pode ser gerada combinando a robustez espectro-temporal de imagens Landsat com a capacidade de imageamento de sensores radar.

7. Referências Bibliográficas

Amaral, D. D. (2007). Campos e Florestas das Bacias dos Rios Atuí e Anajás, Ilha do Marajó, Pará. Belém: Ed MPEG.110p. (Coleção Adolpho Ducke).

Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K.Shum, L.D.Talleyand, A. Unnikrishnan. (2007). Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press.

Dillabaugh, K. A. and D. J. King. 2008. Riparian marshland composition and biomass mapping using Ikonos imagery. Canadian Journal of Remote Sensing 34: 143-158.

ENVI. 2008. ITT Visual Information Solutions. ENVI Help. Versão 4.5. Boulder: RSI.

Foody, G.M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment 80:185–201.

França C.F. and P.W.M. Souza Filho. 2006. Compartimentação morfológica da margem leste da ilha de marajó: zona costeira dos municípios de soure e salvaterra – Estado do Pará. Revista Brasileira de Geomorfologia 7: 33-42.

- França, C. F., P. W. M. Souza Filho and M. El-Robrini. 2007. Análise faciológica e estratigráfica da planície costeira de Soure (margem leste da ilha de Marajó-PA), no trecho compreendido entre o canal do Cajuúna e o estuário Paracauari. *Acta Amazonica* 37:261-268.
- Frohn, R. C., M. Reif, C. Lane and B. Autrey. 2009. Satellite Remote Sensing of Isolated Wetlands Using Object-Oriented Classification of Landsat-7 Data. *Wetlands* 29: 931-941.
- Gebbinck, M.S.K. 1998. Decomposition of Mixed Pixels in Remote Sensing Images to Improve the Area Estimation of Agricultural Fields. Tese, Ph.D. Katholieke Universiteit Nijmegen, Veenendaal Universal Press, 165 p.
- Governo do Estado do Pará. 2004. Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e do Meio Ambiente - Pará. Macrozoneamento Ecológico Econômico – MZEE.
- IBGE, 2004. Mapa de Vegetação do Brasil. 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE.
- Kruse, F.A., A.B. Lefkoff, J.W. Boardman, K.B. Heidebrecht, A.T. Shapiro, P.J. Barloon and A.F.H. Goetz. 1993. The spectral image processing system (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment* 44: 145-163.
- Jensen, J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2nd Ed. 316 p.
- Jensen, J.R. 2000. *Remote sensing of environment: an Earth resource perspective*. New Jersey: Prentice Hall Series in Geographical Information, 544 p.
- Li, J., W. Chen and R. Touzi. 2007. Optimum RADARSAT-1 configurations for wetlands discrimination: a case study of the MerBleue peat bog. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33: 46-55.
- Liu, K., X. Li, X. Shi and S. Wang. 2009. Monitoring mangrove forest changes using remote sensing and GIS data with decision-tree learning. *Wetlands* 28: 336-346.
- Meneses, P.R. and J.S.M. Netto. 2001. *Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília: UnB; Planaltina: EMBRAPA. 262p.
- Novo, E. M. L. M. and Y. E. Shimabukuro. 1997. Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model. *International Journal of Remote Sensing* 18: 663– 670.
- Pereira, J.L.G., G.V. Batista, D. Roberts. 1996. Reflectância de Coberturas Vegetais na Amazônia. *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, Brasil, 14-19, INPE, p. 551-556.
- RADAMBRASIL, 1974. Folha SA-22. Belém: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial de terra. Brasília: DNPM.
- Ramsey, E., A. Rangoonwala, B. Middleton and Z. Lu. 2009. Satellite optical and radar data used to track wetland forest impact and short-term recovery from Hurricane Katrina. *Wetlands* 29: 66-79.
- Research Systems Incorporated (RSI). 2005. *ENVI user's guide*. Version 4.2. Boulder: RSI.

- Richards, J.A. 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 240p.
- Roberts, D.A. 1991. Separating spectral mixtures of vegetation and soils. (Ph.D. Thesis in Geological Sciences) - University of Washington, Seattle.
- Rossetti, D.F. and Valeriano, M.M. 2007. Evolution of the lowest Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. *Catena* 70: 253-265.
- Rossetti, D.F; A.M. Goes, M.M. Valeriano and M.C. Miranda. 2007. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. *Journal Quaternary Science* 22: 121–131.
- Rossetti, D.F. 2008. Reflorestamento natural no Marajó: Fatores geológicos são determinantes para o processo de avanço da floresta na ilha. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/marajo/reflorestamento_natural_marajo.pdf>. Acesso em 19 de setembro de 2009.
- Sohn, Y. and Qi, J. 2005. Mapping Detailed Biotic Communities in the Upper San Pedro Valley of Southeastern Arizona Using Landsat 7 ETM_ Data and Supervised Spectral Angle Classifier. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71: 709–718.
- Souza-Filho, P. W. M., M. C. L. Cohen, R. J. Lara, G. C. Lessa, B. Koch and H. Behling. 2006. Holocene Coastal Evolution and Facies Model of the BragançaMacrotidal Flat on the Amazon Mangrove Coast, Northern Brazil. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 39: 306-310.
- Souza-Filho, P. W. M., G. C. Lessa, M. C. L. Cohen, F. R. Costa and R. J. Lara. 2009. The Subsiding Macrotidal Barrier Estuarine System of the Eastern Amazon Coast, Northern Brazil. In: Dillenburg, S.F. and Hesp, P.A. (eds) *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, New York, pp 347-375.
- Souza Filho, P.W.M., E.S.F. Martins and F.R. Costa. 2006. Using mangrove as a geological indicator of coastal changes in the Bragançamacrotidal flat, Brazilian Amazon: A remote sensing data approach. *Ocean & Coastal Management* 49: 462-475.
- Souza Filho, P.W.M. and W.R., Paradella. 2002. Recognition of the main geobotanical features in the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM e RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management* 10: 123-132.
- Souza Jr., C.M., D.A. Roberts, and A.L., Monteiro. 2005. Multitemporal analysis of degraded forests in the southern Brazilian Amazon. *Earth Interactions* 9: 1-25.
- Tiner, R. W. 1999. Wetland indicators: a guide to wetland identification, classification and mapping. CRC Press, Boca Raton. 424p.
- Touzi, R., A. Deschamps and G. Rother. 2007. Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33: S56-S67.
- USGS. 2007. Revised Landsat 5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/documents/L5TM_postcal_v11.pdf>. Acesso em 07 de abril de 2009.

Whitcomb, J., M. Moghaddam, K. McDonald, J. Kelndorfer and E. Podest. 2009. Mapping vegetated wetlands of Alaska using L-band radar satellite imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35: 54-72.

Yuhas, R.H., A.F.H. Goetz and J.W. Boardman. 1992. Discrimination Among Semi-Arid Landscape Endmembers Using the Spectral Angle Mapper (SAM) Algorithm. *Summaries of the 4th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 92-41*, pp.147-149.

CAPÍTULO 2

Detecção de Mudanças a partir da Análise de Mistura Espectral Temporal em Ambientes Úmidos Costeiros no Norte da Amazônia Brasileira

CARDOSO, G.F.^{1,3}, SOUZA, JR. C.^{2*} & SOUZA-FILHO, P.W.M.¹

*1 Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Cidade Universitária, Av. Augusto Correa 1. PO BOX 8608, 66075-110 Belém, Pará, Brasil.
E-mail: gcardoso@ufpa.br; walfir@ufpa.br.*

2 Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – IMAZON – Rua Domingos Marreiros, 2020 – Altos - Bairro Umarizal - Belém, PA - 66060-160 E-mail: souzajr@amazon.org.br

3 Divisão de Sensoriamento Remoto, Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM - Centro Regional Belém. Av. Julio César 7060, Bairro Val de Cans – Belém, PA – 66617420.

**Autor Correspondente: Carlos M. Souza Jr.*

Resumo: Os ecossistemas úmidos costeiros são ambientes que atuam como centros de produtividade biológica e entre outras funções, controlam a erosão e protegem a linha de costa, porém são altamente susceptíveis ao aumento do nível do mar. O conhecimento da distribuição espacial e temporal e o acompanhamento da sua evolução são fatores fundamentais para o estudo e gestão dessas áreas. O sensoriamento remoto na forma de imagens Landsat tem sido um importante recurso para obter informações acerca das zonas úmidas. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso das imagens fração para análise da evolução temporal-espectral das zonas úmidas costeiras - manguezal, campos salinos, praias e dunas - presentes na margem leste da Ilha do Marajó, foz do Rio Amazonas, Brasil, e propor um modelo metodológico de análise espectral para estes ambientes, além de uma nova abordagem de análise e apresentação dos dados espectrais multitemporais baseado num diagrama ternário. Para tanto, as imagens foram corrigidas geométrica e radiometricamente, e os valores absolutos do pixel, transformados para valores físicos de reflectância. Aplicou-se o modelo de mistura espectral nas imagens reflectância dos anos de 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 e 2008 para geração das imagens fração (Vegetação Verde, Sombra/Água, Vegetação Não Fotossinteticamente Ativa e Solo). Coletaram-se nas imagens multitemporais, 20 amostras poligonais (5x5 pixels) para cada ecossistema úmido costeiro. A detecção de mudanças ao longo destes anos foi feita com o auxílio do diagrama tri linear de Thompson. Os resultados mostraram que 80% das amostras do Manguezal não sofreram alterações ao longo do tempo e que 15% das trajetórias possíveis indicaram uma mudança gradativa para formação de Manguezal até o ano de 2008. Os Campos Salinos indicaram uma condição atípica nas análises da imagem do ano de referência (2008), com comportamento espectral similar ao do solo, característica esta não verificada nos anos pretéritos. Já as Praias e Dunas aferiram um considerável aumento de sua superfície (66,7%) no período de 20 anos (1988-2008). Esta pesquisa sugere que a área de estudo vem sofrendo um processo de progradação de sedimentos ao longo da linha de costa e uma estabilização gradativa no aumento da superfície da vegetação de Manguezal. O método de detecção de mudanças usado propiciou o desenvolvimento de um modelo de diagrama de dispersão espectral para ambientes úmidos costeiros, e poderá ajudar no planejamento e gestão das políticas públicas de regiões litorâneas.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Zonas Úmidas Costeiras, Análise de Mistura Espectral, Detecção de Mudanças.

Abstract: The coastal wetlands are environments that act as centers of biological productivity, among other functions, control erosion and protect the coastline, but they are highly susceptible to increased sea level. The knowledge of spatial and temporal distribution and monitoring of their evolution are key factors in the study and management of these areas. Remote sensing in the form of Landsat images has been an important resource for information about wetlands. The aim of this study ACS to evaluate the use of fraction images for analysis of Spectral-temporal evolution of coastal wetlands - Mangrove, Salt Marshes, Beaches and Dunes – present on the east cost of Marajo, mouth of the Amazon River, Brazil, and propose a methodological model of spectral analysis for these environments, a new approach to analysis and presentation of multitemporal spectral data based on a ternary diagram. To this end, the images were geometrically and radiometrically corrected, and the absolute values of the pixel processing for physical values of reflectance. Applied the spectral mixture model, the reflectance images from the years 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 and 2008 to generate the fraction images (Green Vegetation, Shade/Water, Non-Photosynthetically Active Vegetation and Soil). Were collected in multitemporal images, 20 polygonal samples (5x5 pixels) for each coastal wetland. The detection of changes over the years ACS done with the help of the tri-linear diagram of Thompson. The results showed that 80% of samples of mangrove have not changed over time and that 15% of possible trajectories indicated a gradual change for the formation of mangrove by the year 2008. Salt Marshes showed an unusual condition in the analysis of the image of the reference year (2008), with spectral response similar to the soil characteristics; this is not checked in years gone by. Already, the beaches and dunes measure a significant increase of its surface (66.7%) in the 20-year period (1988-2008). This research suggests that the study area has been undergoing a process of progradation of sediments along the shoreline stabilization and a gradual increase in the surface of the mangrove vegetation. The method used to detect changes led to the development of a model spectral dispersion diagram for coastal wetlands, and may help in planning and management of public policies in coastal regions.

Keywords: Remote Sensing, Coastal Wetlands, Spectral Mixture Analysis, Change Detection.

1. Introdução

Zona Úmida é um termo genérico usado para definir o universo de ambientes úmidos incluindo manguezais, pântanos, campos alagados, e áreas similares. Estes ambientes estão sujeitos a inundações permanentes ou periódicas ou a saturação prolongada do solo, que permitem condições ambientais adequadas para o estabelecimento de hidrófitas. (Tiner, 1999). As zonas úmidas atuam como centros de produtividade biológica e apresentam diversas outras funções, como: conservação da diversidade biológica, habitat para vida selvagem, fonte de alimento para peixes e humanos, regulação do ciclo hidrológico e controle de inundação, melhoria e proteção da qualidade da água, e controle da erosão e proteção da linha de costa. (Coughanowr, 1998). Quando localizados adjacentes à linha de costa, as zonas úmidas costeiras são consideradas altamente susceptíveis ao aumento do nível do mar (Boorman, 1999) e conseqüentemente são influenciados por processos costeiros atuantes, como ondas e marés. Estes sistemas fazem parte da etapa final no processo de nivelamento e preenchimento das depressões costeiras, e dependem do balanço entre o aumento do nível do mar e a acumulação de sedimentos governada pela ação das marés (Frey and Bassan, 1985).

De acordo com Bindoff et al. (2007), há uma perspectiva de uma contínua elevação acelerada do nível do mar em aproximadamente 1,7 mm/ano, provocados principalmente pela expansão termal dos oceanos e degelo das calotas polares. Devido principalmente ao aquecimento global, os ambientes adjacentes à faixa litorânea podem apresentar um alto grau de vulnerabilidade aos efeitos dessa taxa de aumento do nível do mar. Desse modo, o conhecimento da distribuição espacial e temporal dos ambientes úmidos costeiros, a compreensão exata da situação dos seus recursos, e o acompanhamento da sua evolução dinâmica são fatores para o estudo e gestão dessas áreas. (Wei et al., 2008).

O uso de técnicas de sensoriamento remoto é uma importante ferramenta no entendimento da interação da radiação eletromagnética (REM) com diferentes alvos da superfície da Terra, tais como a vegetação, água e solo, e suas mudanças no tempo. Esta tecnologia está sendo extremamente útil e amplamente utilizada na extração de informações, investigação e monitoramento das zonas úmidas (Edward et al., 1997).

O sensoriamento remoto na forma de imagens de alta resolução espacial e espectral tem sido um importante recurso para obter informações acerca das zonas úmidas (Hirano et al., 2003). Entretanto, o custo de aquisição destas imagens e da interpretação dos tipos zonas úmidas é alto para grandes áreas geográficas. Uma alternativa é adquirir as informações

necessárias a partir de imagens digitais de satélite, como o Landsat *Thematic Mapper* (TM). Este satélite apresenta diversas vantagens, entre elas: (1) a visada sinóptica do sensor fornece imagens que cobrem grandes áreas geográficas, (2) a forma digital dos dados disponibiliza uma análise mais eficiente e os dados classificados são compatíveis com o sistema de informações geográficas, eliminando a necessidade de digitar informações interpretadas, e (3) mapas de cobertura da Terra podem ser gerados com custos consideravelmente mais baixos que por outros métodos, embora sua resolução espacial seja de 30 metros (Bauer et al., 2003).

Nas imagens de sensores ópticos, a exemplo do Landsat TM, os alvos refletem proporções diferentes de energia (radiância) nas regiões do azul, verde, vermelho e infravermelho. A quantidade de energia refletida para cada um desses alvos pode ser medida em comprimentos de onda específicos, criando uma curva de reflectância espectral, também chamada de assinatura espectral. O comportamento da curva de reflectância espectral para uma determinada feição é aferido em função das tonalidades de cinza do objeto em cada banda, e estes valores podem ser comparados em diferentes épocas para uma mesma área (Jensen, 1996).

Porém, o sensor TM do satélite Landsat detecta uma média ponderada das radiâncias de todos os materiais contidos em cada pixel da imagem. Desse modo, a radiância corresponde a uma mistura de diferentes tipos de superfícies. Esta mistura de pixel ocorre então quando mais que um tipo de cobertura do solo está presente no *Instantaneous Field of View* (IFOV) (Small, 2004). A resposta espectral de cada elemento presente no IFOV é uma combinação linear da resposta de cada pixel em qualquer comprimento de onda (Shimabukuro e Smith, 1991). Para análise da mistura, estes autores desenvolveram um modelo linear de mistura para imagens multiespectrais aplicado ao estudo dos recursos terrestres.

A aplicação deste modelo gera imagens fração, ou proporção, do sinal refletido pelos constituintes (*endmembers*) de interesse, que podem ser diretamente selecionados da imagem ou escolhidos a partir de uma biblioteca espectral baseada em dados coletados de espectrômetros de campo. Para questões relacionadas com a vegetação, uma técnica comum é usar o GV (vegetação verde), NPV (vegetação não fotossinteticamente ativa), solo e sombra, como *endmembers*, e assumir que cada pixel é uma combinação linear desses alvos. (Chambers et al., 2007; Souza Jr. et al., 2005).

O objetivo deste estudo é avaliar o uso das imagens fração, de acordo com a metodologia proposta por Souza Jr., et al. (2005), para análise da evolução temporal-espectral

das zonas úmidas costeiras - manguezal, campos salinos, praias e dunas - presentes na margem leste da Ilha do Marajó, Brasil, e propor um modelo metodológico de análise espectral multitemporal para estes ambientes. Dessa forma, é aplicada a técnica do modelo de mistura espectral nas imagens reflectância do TM Landsat-5, e uma nova abordagem de análise e apresentação dos dados espectrais multitemporais baseado no diagrama tri linear.

2. Área de Estudo

A área de estudo se encontra na porção leste da ilha do Marajó, estado do Pará, Brasil, no litoral dos municípios de Soure e Salvaterra (latitude entre $00^{\circ} 28' S$ e $00^{\circ} 52' S$; longitude entre $48^{\circ} 27' W$ e $48^{\circ} 33' W$) (Figura 2.1). Este limite pertence à região estuarina denominada de golfão marajoara.

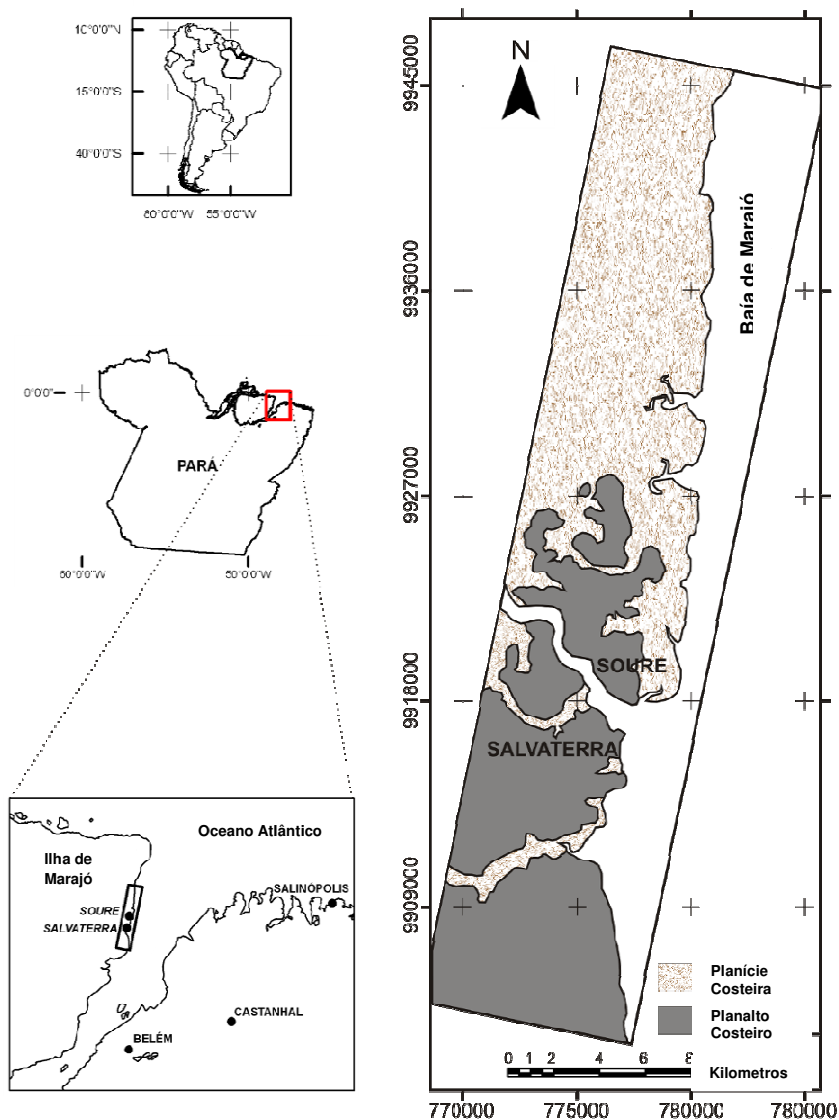


Figura 2.1: Mapa de localização, em UTM, da área de estudo.

A geologia da Ilha do Marajó foi fortemente controlada pela tectônica, separando-se do continente no período Holocênico. Anteriormente, a calha do rio Tocantins cortava no sentido norte, em direção ao oceano, até que falhas tectônicas desviaram seu curso para nordeste. Concomitante ao processo de formação da calha do rio Pará, no sul da ilha, esse processo refletiu em sistemas de falhas com direção principal E-W, o que provocou a total separação da ilha do Marajó do continente (Rossetti, 2007). Estes eventos tectônicos recentes ocorreram junto ao processo de sedimentação, sendo, portanto, um grande controlador na evolução do sistema deposicional. A tectônica favorece o desenvolvimento de áreas de subsidência e a formação de locais de acomodação do novo sedimento. A região permanece tectonicamente instável durante a sedimentação, e camadas espessas do depósito são fortemente marcados pela abundância de sedimento fino (Rossetti et al., 2007).

Com relação à geomorfologia da área de estudo, França & Souza Filho (2006), afirmam que, com base nas formas de relevo, na topografia, na geologia, na granulometria dos sedimentos e na cobertura vegetal, é possível compartimentar a área de estudo nas seguintes unidades geomorfológicas: Planalto Costeiro, representado por superfície dos baixos platôs, cujas cotas topográficas variam de 5 a 20 m acima do nível do mar; e a Planície Costeira, constituída por sedimentos lamosos e arenosos quaternários, com cota topográfica inferior a 5 m e que se estende para o interior até o alcance máximo da zona de influência das marés, onde se limita com o planalto costeiro. Neste estudo, assumiu-se que a planície costeira é a unidade geomorfológica onde os ambientes úmidos costeiros se estabeleceram.

Quanto à cobertura do solo, que está relacionada intimamente com os compartimentos geomorfológicos costeiros (França & Souza Filho, 2006), a planície costeira é constituída pelos ambientes de Manguezal (MAN), Campos Salinos (CAM) e Praias e Dunas (PRD). (Tabela 2.1). Estas definições das classes dos diferentes tipos de ambiente, associado às águas com presença de sedimento (ACS) e sem a presença de sedimento (ASS), interpretadas com auxílio de composição de bandas e contrastes nas imagens TM Landsat-5, subsidiaram a identificação das amostras na imagem reflectância e as análises espectrais.

Tabela 2.1: Descrição das zonas úmidas costeiras em relação à geomorfologia costeira.

Geomorfologia Costeira	Cobertura do Solo
<p>Planície Costeira: constituída por sedimentos lamosos e arenosos quaternários, cuja deposição foi realizada por processos flúvio-marinhos e eólicos, durante fase progradacional da linha de costa, sob condições regressivas ou de mar estável, no Holoceno (Souza Filho et al., 2006; 2009)</p>	<p>Manguezal: vegetação situada na planície de intermaré; formações vegetais pioneiras de influência fluvio-marinha e estrato arbóreo; espécies predominantes: <i>Rhizophora</i>, <i>Avicennia</i> e <i>Laguncularia</i> (IBGE, 2004; Governo do Estado do Pará, 2004).</p> <hr/> <p>Campos Salinos – localizados na planície de supramaré, entre o planalto costeiro e a planície de intermaré; origem relacionada aos processos de afogamento e colmatagem de paleocanais; controlados ora pela pluviosidade ora por influência das marés. A redução das chuvas favorece a maior penetração das marés, tornando salobra a água superficial. A vegetação campestre é dominada pelas ciperáceas <i>Eleocharis interstincta</i> “junco poque-poque” e <i>Eleocharis mutata</i> “junco triângulo” (França & Souza Filho, 2006; França et al., 2007).</p> <hr/> <p>Praias e dunas – cordões arenosos atuais formados em consequência do aporte sedimentar arenoso (França & Souza Filho, 2006). Sedimentos transportados por ação das ondas e ventos, paralela a linha de costa, onde se encontram tipologias vegetacionais herbáceas, arbustivas e arbóreas, conhecidas como restinga. (Governo do Estado do Pará, 2004).</p>

3. Base de Dados

3.1 Dados da Imagem de Satélite

As imagens Landsat-5 Thematic Mapper 5 (TM), bandas 1–5 e 7, adquiridas entre os anos de 1988 e 2008 foram usadas neste trabalho (Tabela 2.2). As imagens foram adquiridas através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Tabela 2.2: Cenas Landsat TM5 usados para este estudo (órbita/ponto: 224/060).

Ano	Sensor Landsat	Dia e Mês	Fonte
1988	TM5	14-Aug	INPE
1994	TM5	30-Jul	INPE
1998	TM5	25-Jul	INPE
2004	TM5	25-Jul	INPE
2006	TM5	29-Jun	INPE
2008	TM5	21-Aug	INPE

4. Métodos

A metodologia empregada consistiu em três etapas: 1) pré-processamento; 2) análise de mistura espectral; e 3) análise da evolução espectro temporal das zonas úmidas costeiras.

4.1. *Pré-processamento: registro, calibração radiométrica e correção atmosférica*

Inicialmente, a imagem Landsat TM 5 do ano de 2008 foi georreferenciada usando 21 pontos de controle com base no mosaico da National Aeronautics and Space Administration (NASA) *GeoCover* (imagem *S-22- 00_2000*, através do site <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>). Depois, a imagem Landsat georretificada foi usada como imagem referência para o registro das imagens adquiridas para as demais datas. O registro baseou-se no algoritmo de triangulação, pelo método de reamostragem por “vizinho mais próximo” e emprego de um polinômio de 1º grau, disponível no software Environment for Visualizing Images (ENVI), versão 4.5 (ENVI, 2008). O erro quadrático médio (RMS) extraído da imagem registrada aferiu valores inferiores a 1 (um) *pixel* para todos os pontos de controle.

Após registro, as imagens foram radiometricamente corrigidas usando os valores de ganho e “offset” para cada banda. (USGS, 2007). Para conversão dos valores digitais em valores físicos de reflectância foi necessário aplicar uma correção atmosférica na imagem. Para correção utilizou-se o módulo *FLAASH*, do ENVI, baseado no uso do MODTRAN 4, que transforma valores de radiância para reflectância de superfície. O modelo tropical e uma quantidade fixa de vapor d’água foram adotados para fins de correção dos efeitos de espalhamento e absorção atmosféricos.

Os dados de entrada utilizados na interface padrão do módulo FLAASH são relativos às características da imagem, do sensor e da órbita/ponto, tais como data e hora de aquisição, altitude do sensor, altitude média, coordenadas geográficas do centro da cena, além do tamanho do pixel. Foram selecionados os modelos de atmosfera “Tropical” e aerossóis “Rural” mais adequados à área de interesse, e inseridos o valor 1.0 como multiplicador da coluna de água e 40 km, de visibilidade. Sabendo que o modelo é mais aplicado em sensores hiperespectrais e o LANDSAT não possui bandas estreitas localizadas nas faixas comprimentos de onda como 940 e 1135 nm, nos quais é forte a absorção da REM pelo vapor d’água, estas estimativas não foram aplicadas.

O modelo aplicado considerou um único valor de altitude para toda a cena. Este procedimento deve tornar a imagem corrigida para área de estudo, já que a Ilha do Marajó apresenta pequena variação altimétrica. Para o parâmetro de visibilidade optou-se pelo valor de 40 km, pois para cenas claras é indicada uma visibilidade de 40 a 100 km. O modelo de aerossóis utilizado foi o Rural porque, conforme RSI (2005), o modelo Marítimo em faixas litorâneas está associado ao meio rural.

E por fim, aplicou-se o algoritmo “haze correction”, implementado em IDL© (Interactive Data Language) para minimizar os efeitos provocados por neblina e fumaça nas imagens (Carlotto, 1999).

4.2. Análise de Mistura Espectral

A análise de mistura espectral simula o processo físico de medição da mistura da radiação para cada elemento contido no IFOV a partir de um modelo linear de mistura (Adams et al., 1993). Tradicionalmente, os modelos de análise de mistura espectral de um espectro de reflectância são como uma combinação linear de um número finito de assinaturas espectrais dos componentes puros originais da superfície, denominado “endmembers”. Com a escolha ideal dos membros finais, os coeficientes da combinação linear são não-negativos, e somados a 1, e, portanto, interpretáveis como frações da cobertura do solo. Um modelo de mistura com base em três ou quatro membros finais selecionados corretamente tem a interpretação geométrica simples como o triângulo ou tetraedro cujos vértices são os “endmembers”. As imagens fração da cobertura do solo são determinadas pela posição do espectro modelado no interior ou nos extremos dessas figuras geométricas (Bateson et al., 2000).

Os dados das imagens reflectância de cada pixel foram decompostos nas frações Sombra/Água, Solo, Vegetação Verde (VV) e Vegetação Não Fotossinteticamente Ativa (VNF) a partir da análise de mistura espectral (Adams et al., 1993). Estes quatro tipos de constituintes puros são esperados em ambientes florestais degradados na Amazônia (Souza Jr. et al., 2005) e foram testados neste estudo para zonas úmidas costeiras.

O modelo linear de mistura espectral foi computado no programa ENVI© 4.6.1 nas imagens reflectância LANDSAT TM5 de 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 e 2008 para estimar a abundância dessas frações. O algoritmo PPI (Pixel Purity Index) foi usado para identificar os “endmembers” na imagem reflectância de referência (Boardman et al., 1995). Cinco

subamostras de imagens (500 x 500 pixels), representando a variedade dos tipos de cobertura do solo encontrada na imagem de referência, foram usadas como entrada para o algoritmo PPI. O gráfico de dispersão N-dimensionais, disponível no ENVI, auxiliou na seleção dos pixels puros finais, sendo os mesmos localizados na imagem reflectância para extração das curvas espectrais. Os candidatos a “endmembers” escolhidos estavam situados nas extremidades da nuvem dos dados espectrais. O modelo matemático para análise da mistura espectral pode ser expresso como:

$$DN_b = \sum F_i DN_{t,b} + \varepsilon_b \quad (1)$$

Para:

$$\sum F_i = 1 \quad (2)$$

Sendo:

DN_b o número digital da banda b;

F_i a abundância do "endmember" i;

$DN_{t,b}$ o número digital relativo do "endmember";

i, na banda b; e

ε_b o erro na banda b

Os resultados do modelo de mistura espectral foram inspecionados através dos erros médios quadráticos (RMS) das imagens, e aceitaram-se na análise somente os valores de RMS maiores que 95%, os valores do pixel localizados entre 0 e 1 maiores que 98%, e valores médios de abundância consistentes ao longo do tempo.

Para eliminar o efeito de sombra devido às diferenças de iluminação no momento da aquisição das imagens, a imagem de abundância de vegetação foi normalizada (MONTEIRO, 2005) através de:

$$VEG = VEG / (100 - SOMBRA) * 100$$

Sendo:

(3)

VEG a imagem fração de vegetação (VV);

SOMBRA a imagem fração de sombra

4.3. Análise da Evolução Composicional dos Ambientes

A análise espectral temporal se baseou na coleta de amostras das diferentes zonas úmidas costeiras encontradas na imagem fração de referência, ano de 2008. A identificação na imagem dos ambientes costeiros teve sua confirmação em campanhas de campo (Figura 2). Foram extraídas, de modo aleatório, 20 amostras poligonais (5x5 pixels) para os seguintes ambientes costeiros: Manguezais, Sedimento Úmido, Praias e Dunas, Campos Salinos, Água com Sedimento e Água sem Sedimento. Os valores da fração para cada pixel amostrado foram tabelados para a caracterização espectral espacial, totalizando aproximadamente 3.000 pixels.

Para conhecer a distribuição das frações VV, Sombra, e VNF+Solo nos pixels amostrados, utilizou-se o programa gratuito Triplot, disponível no sítio <http://mypage.iu.edu/~tthomps/programs/html/tntriplot.htm> (Triplot, 2010). Neste software, os valores da fração ou abundância de todos os pixels (n = 500) de cada amostra foram tabelados e plotados no diagrama ternário. Isso permitiu visualizar a distribuição composicional dos ambientes em termos das imagens-fração VV, Sombra e VNF+Solo, e avaliar se há regiões no espaço de mistura características de cada ambiente estudado. Após a caracterização espectral espacial de cada pixel compreendido nas amostras dos ambientes úmidos costeiros de 2008, a localização dos polígonos referente às amostras para os demais anos (1988, 1994, 1998, 2004 e 2006) foi preservada, e seus dados foram extraídos e tabelados. A partir deste pacote de dados, analisou-se a evolução espectral, numa escala subpixel, das zonas úmidas costeiras num período de 20 anos.

5. Resultados

A Figura 2.2 mostra a disposição espacial espectral dos pixels coletados nas imagens fração (VV, Sombra e VNF+Solo) geradas a partir do Modelo de Mistura Espectral na imagem reflectância do ano de 2008. Podemos a partir de uma interpretação visual no diagrama tri linear, caracterizar e distinguir composicionalmente todas as amostras dos seis ambientes costeiros assim identificados: MAN – Manguezal, SDU – Sedimento Úmido, CMS

– Campos Salinos, PRD – Praias e Dunas, ASS – Água sem Sedimento, e ACS – Água com Sedimento.

A visualização da composição dos ambientes costeiros estudados no diagrama ternário aponta que esses ambientes possuem composição distinta em termos de VV, SOMBRA e VNF+SOLO. A classe PRD apresentou a maioria dos pixels com valores acima de 50% de VNF+SOLO e menos de 40% e 50% de VV e SOMBRA, respectivamente. As classes ASS e ACS apresentaram também composições distintas com mais de 80% dos seus pixels compostos por SOMBRA, o que indica alta absorção da energia eletromagnética. A classe MAN indicou uma distribuição dos pixels entre 30% e 70% de VNF+SOLO e VV, e acima de 90% na composição de SOMBRA. Com relação à classe SDU, esta apresentou uma composição com a maioria dos pixels entre 60% e 90% de VNF+SOLO, mais de 80% de SOMBRA, e entre 10% e 40% de VV. Já a distribuição composicional dos pixels referente à classe CAM abrange uma região entre 40% e 70% de VNF+SOLO, menos de 40% de VV, e 50% a 80% de SOMBRA.

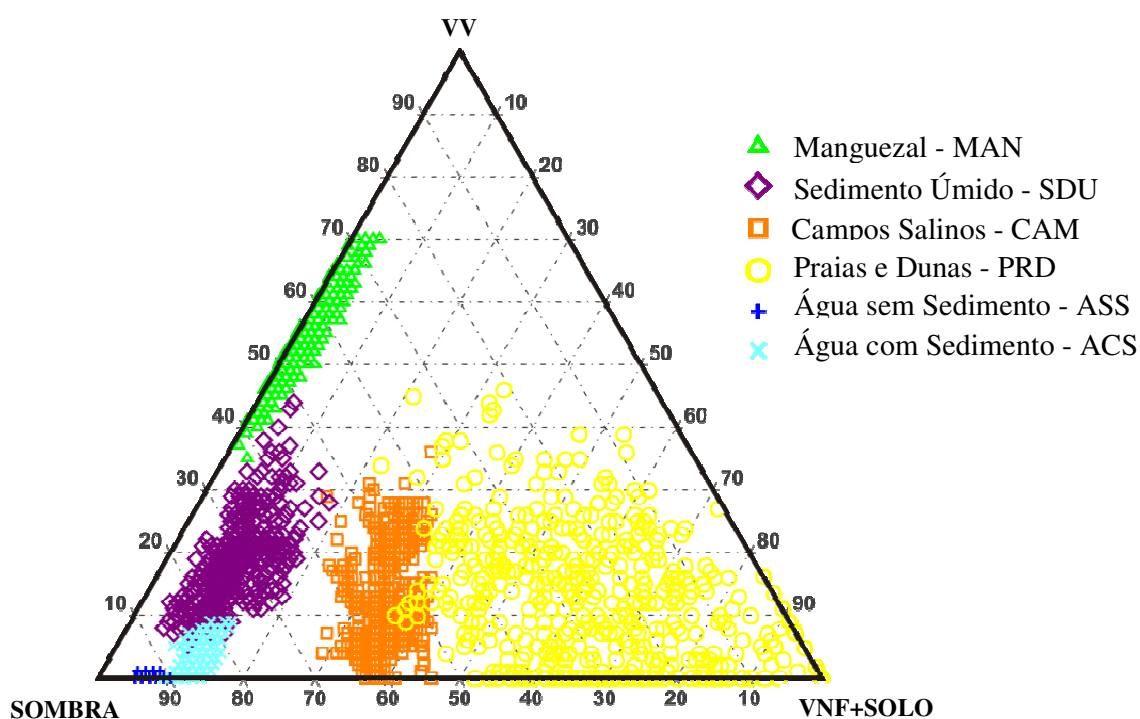


Figura 2.2: Distribuição Ternária dos pixels coletados nas imagens fração (GV, SHADOW e NPV+SOIL) do ano base 2008 referente aos ambientes úmidos costeiros estudados.

5.1. Detecção de Mudanças

Na imagem abundância de 2008, os pixels compreendidos na classe Manguezal (MAN) concentram seus valores da fração predominantemente entre 40 e 70% na face SOMBRA-VV (Figura 2.2), indicando vigor na vegetação de manguezal, com alguma influência de sombra e/ou água. Isto se deve pela distribuição das amostras de manguezal estar concentrada predominante junto à linha da costa e, portanto, influenciadas pela variação das marés. A Tabela 2.3 mostra a evolução das amostras extraídas nas imagens fração ao longo do tempo (1988-2008). A amostra 1 indica uma mudança abrupta entre os anos de 2004 e 2006, em que o processo de progradação lamosa condicionou o desenvolvimento da vegetação de manguezal (Figura 2.3). No período de 1988 a 2004 o ambiente Água predominou, se mantendo estável, e a partir de 2006, a vegetação de manguezal se estabeleceu, permanecendo em 2008. A taxa de mudança do tipo de ambiente costeiro na amostra 1 é pequena, devido principalmente ao tempo prolongando na condição espectral estável de água (1988-2004) e uma única mudança, de água para manguezal, percebida entre 2004 e 2006.

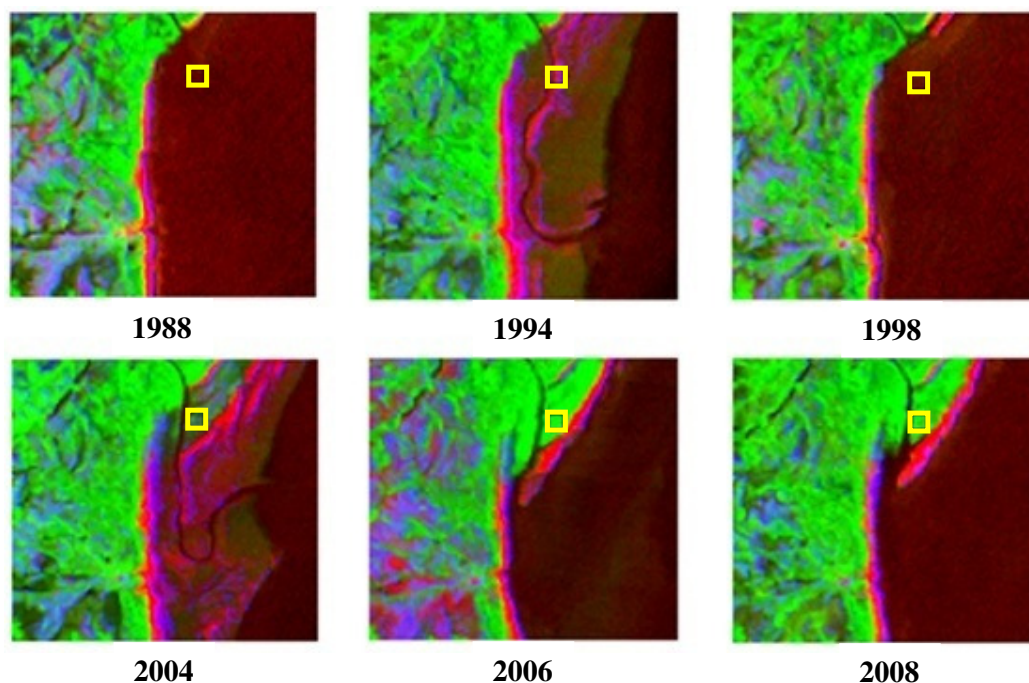


Figura 2.3: Evolução da amostra 1 (em amarelo) nas imagens fração (composição colorida R-SOIL, G-GV, B-SHADOW) ao longo do tempo.

A amostra 3 apresentou uma mudança também abrupta. No período de 20 anos detectou-se uma única alteração, entre os anos de 1988 e 1998. Em 1994, a amostra em questão se encontrava no ambiente transicional de Sedimento Úmido, com presença de

alguma vegetação, segundo o diagrama tri linear. Já que em 1988 e depois de 1998, a amostra 3 apresentava características espectrais de Manguezal, sugere-se que nesse intervalo de 10 anos, as condições ambientais eram desfavoráveis ao desenvolvimento da vegetação de mangue. A degradação antrópica a partir da extração da madeira, a quantidade de chuvas e ou o regime de marés podem ser as possíveis causas para esta modificação.

Tabela 2.3: Detecção das mudanças nos ambientes úmidos costeiros no período de 1988 a 2008.

AMBIENTES	AMOSTRAS	MUDANÇAS						TRAJETÓRIA		
		1988	1994	1998	2004	2006	2008	COMPOSICIONAL	AMBIENTAL	(%)
MAN	1	ASS	ACS	ASS	ACS	MAN	MAN	4	1	5
	3	MAN	SDU	MAN	MAN	MAN	MAN	1	1	5
	13; 14	ASS	SDU	SDU	MAN	MAN	MAN	3	2	10
	2; 4-12; 15-20	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	0	0	80
CAS	1; 4; 9; 18	CSV	CSV	CSV	CSV	CSV	CSS	5	1	20
	2	SDU	SDU	CSS	SDU	SDU	CSS	4	3	5
	3	CSV	CSV	CSV	SDU	SDU	CSS	5	2	5
	5;6	AGU	SDU	SDU	CSV	CSV	CSS	5	3	10
	7; 13; 14; 20	SDU	SDU	SDU	SDU	SDU	CSS	5	1	20
	8	CSV	CSV	CSV	CSV	SDU	CSS	5	2	5
	10	CSV	CSV	CSV	CSS	CSV	CSS	4	2	5
	11	CSV	SDU	CSV	CSV	CSV	CSS	5	3	5
	12	SDU	SDU	SDU	CSV	CSV	CSS	5	2	5
	15; 16	SDU	SDU	CSV	CSV	SDU	CSS	5	3	10
17	CSS	CSV	CSV	CSV	NVM	CSS	3	2	5	
19	CSV	PSS	NVM	CSV	CSV	CSS	3	1	5	
PRD	1; 5; 17; 22	AGU	AGU	AGU	PRD	PRD	PRD	3	1	16.7
	2; 9; 15; 19	AGU	PRD	AGU	PRD	PRD	PRD	2	3	16.7
	3; 6; 10; 11; 18; 20; 21	PRD	PRD	PRD	PRD	PRD	PRD	0	0	29.2
	4; 13; 16	AGU	AGU	AGU	AGU	PRD	PRD	4	1	12.5
	7	BDU	BDU	AGU	BDU	BDU	BDU	1	1	4.2
	8; 24	AGU	BDU	BDU	BDU	BDU	BDU	1	1	8.3
	12	MAN	MAN	BDU	BDU	BDU	BDU	2	1	4.2
	14	MAN	MAN	MAN	MAN	BDU	BDU	4	1	4.2
23	PRV	PRV	BDU	BDU	BDU	BDU	2	1	4.2	

MAN – Manguezal, CAS – Campos Salinos, PRD – Praias e Dunas, CSS – Campos Salinos com predomínio do solo, CSG – Campos Salinos com Gramíneas, SDU – Sedimento Úmido, ACS – Água com Sedimento, ASS – Água sem Sedimento, AGU – Água (ACS e/ou ASS), PRV – Praias e Dunas com vegetação, NVM – Nuvem, e PSS – Perda de sinal do satélite.

Nas amostras 13 e 14 foram detectadas mudanças gradativas e coerentes na formação e estabilização de um ambiente de Manguezal, inicialmente com a progradação lamosa junto à linha de costa, até a sua estabilização, e posterior sucessão da vegetação. A partir de 1988 o ambiente de água foi sendo substituído pelo aporte de sedimentos grosseiros, areia, e depois por sedimentos mais finos (lama), identificados espectralmente em 1994 e se estendendo até 1998. A transição do ambiente de Sedimento Úmido para o ambiente de Manguezal foi até 2004, quando a partir deste ano, as amostras 13 e 14 se firmaram como Manguezal e se estenderam até 2008. (Figura 2.4).

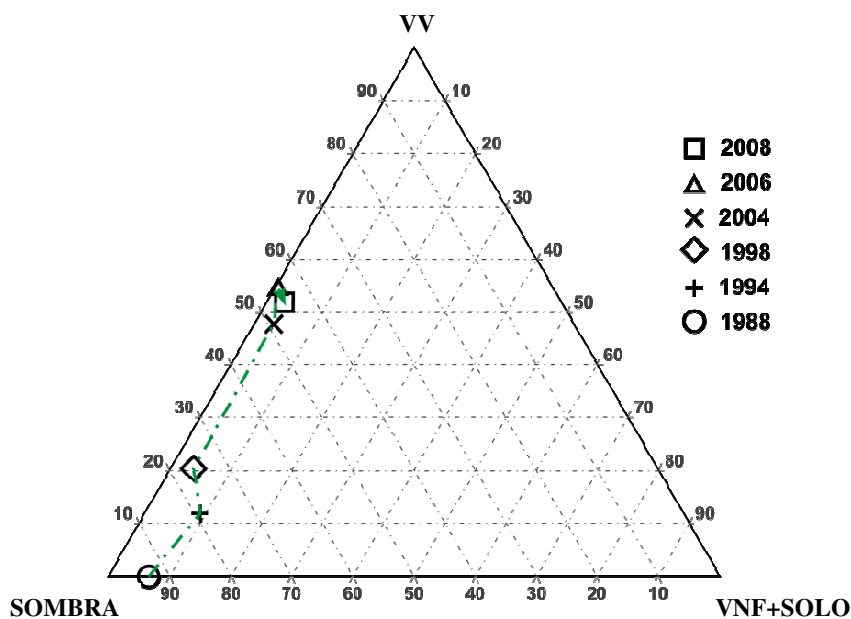


Figura 2.4: Evolução gradativa para formação de Manguezal nas amostras 13 e 14. A linha verde representa a trajetória ao longo do tempo (1988-2008).

As outras 16 amostras (80%) não sofreram mudanças em sua trajetória no período de 20 anos (1988-2008), sugerindo um conjunto amostral cujo ambiente Manguezal esteve relativamente estável e preservado espectralmente. Já analisando a Tabela 2.4, que mostra os três possíveis ambientes passíveis de ocorrer ao longo dos anos num ambiente de Manguezal, e a quantidade de amostras identificadas segundo o ambiente para cada ano; das 120 amostras analisadas, 112 (93,3%) pertenciam ao Manguezal, 5 (4,2%) ao ambiente Água, e 3 (2,5%) ao Sedimento Úmido. Verificou-se também, que a partir de 1994, a superfície de Manguezal aumentou em 15% até 2008: em 1994, 17 (85%) amostras apresentavam abundância de Manguezal, 1998, 18 (90%), em 2004, 19 (95%), e em 2006 e 2008, 20 (100%).

Tabela 2.4: Número de amostras identificadas para cada ambiente por ano.

AMBIENTES		1988	%	1994	%	1998	%	2004	%	2006	%	2008	%	TOTAL	%
MAN	MAN	18	90	17	85	18	90	19	95	20	100	20	100	112	93.3
	AGU	2	10	1	5	1	5	1	5	0	0	0	0	5	4.2
	SDU	0	0	2	10	1	5	0	0	0	0	0	0	3	2.5
CAS	CSS	1	5	0	0	1	5	1	5	0	0	20	100	23	19.2
	CSV	9	45	8	40	11	55	13	65	10	50	0	0	51	42.5
	AGU	2	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1.7
	SDU	8	40	11	55	7	35	6	30	9	45	0	0	41	34.2
	OTH*	0	0	1	5	1	5	0	0	1	5	0	0	3	2.5
PRD	PRD	8	33.3	14	58.3	11	45.8	20	83.3	24	100	24	100	101	70.1
	MAN	2	8.3	2	8.3	1	4.2	1	4.2	0	0	0	0	6	4.2
	AGU	13	54.2	7	29.2	12	50.0	3	12.5	0	0	0	0	35	24.3
	PRV	1	4.2	1	4.2	0	0.0	0	0.0	0	0	0	0	2	1.4

MAN – Manguezal, CAS – Campos Salinos, PRD – Praias e Dunas, CSS – Campos Salinos com predomínio de solo, CSV – Campos Salinos com gramíneas, SDU – Sedimento Úmido, ACS – Água com Sedimento, ASS – Água sem Sedimento, AGU – Água e OTH* - PSS ou NVM.

As amostras de Campos Salinos (SSM) coletados na imagem fração de 2008 estão distribuídas no diagrama tri linear (Figura 2.5). No entanto esta distribuição é deslocada quase que totalmente para uma posição mais próxima da face SHADOW-GV nos demais períodos estudados, indicando uma condição ambiental atípica no ano de 2008. Provavelmente uma situação de baixa pluviosidade e ou maré para o interior da ilha, explicaria a maior abundância de solo na imagem fração de 2008, e uma abundância maior de vegetação para os outros períodos.

Para a análise espectral temporal dos Campos Salinos considerou-se a presença de mais um ambiente e que pôde ser caracterizado espectralmente no diagrama ternário. Trata-se do ambiente Campos Salinos com Vegetação Campestre (GSM). Os Campos Salinos são cobertos por lagos intermitentes e vegetação herbácea em épocas chuvosas, sendo observadas estas condições somente na análise espectral dos anos pretéritos.

A Tabela 2.3 mostra as mudanças detectadas nesse ambiente. Entre as modificações observadas, podemos destacar as amostras 1, 4, 9 e 18 (20% das amostras) que indicaram um ambiente estável com vegetação campestre de 1988 a 2006 e uma única alteração em 2008, período com valores espectrais referente a Campos Salinos com maior exposição do solo e menor de vegetação. As amostras 7, 13,14 e 20 (20%) apresentaram comportamentos

espectrais similares ao ambiente transicional Sedimento Úmido, com pouca presença de vegetação e maior abundância de sombra/água entre os períodos de 1988 a 2006.

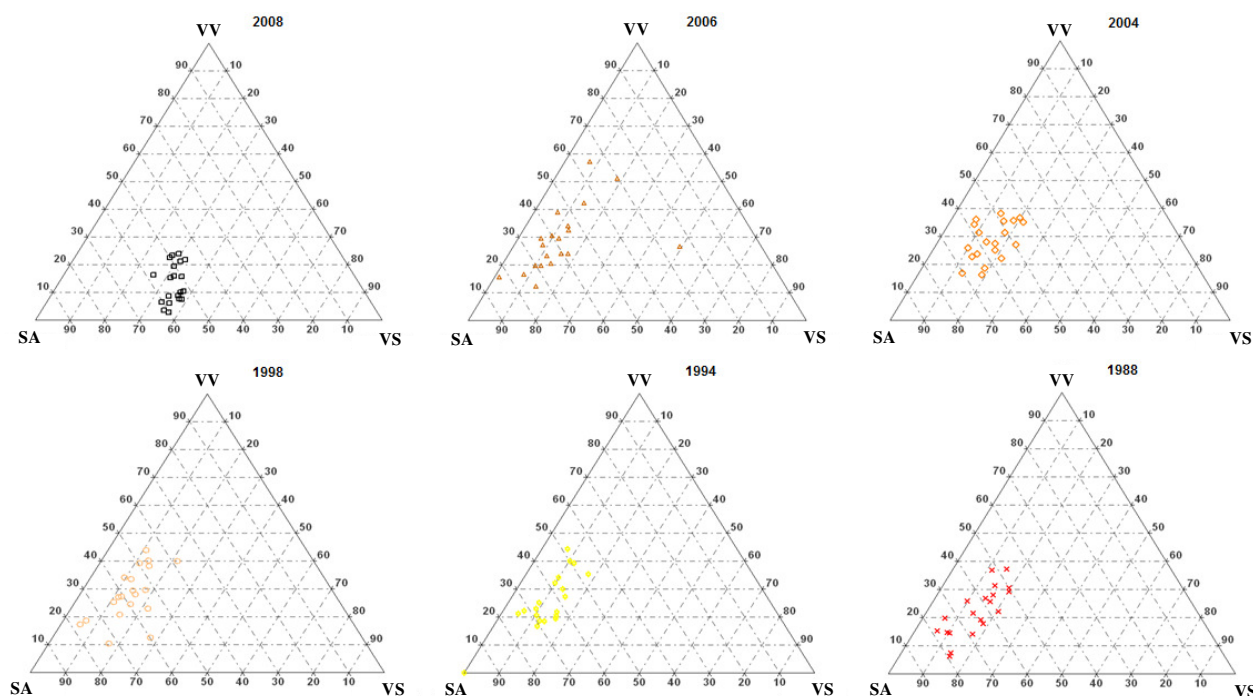


Figura 2.5: Distribuição das amostras de Campos Salinos no diagrama tri linear no período de 1988 a 2008. Verifica-se um deslocamento dessas amostras para a face SHADOW-GV nos anos anteriores a 2008. (VV – Vegetação Verde; SA – Sombra/Água; VS – Vegetação Não Fotossinteticamente Ativa e Solo).

Apesar do comportamento espectral das amostras coletadas na imagem fração de 2008 distinguirem, de um modo geral, daquelas extraídas dos anos pretéritos, o ambiente Campos Salinos permaneceu estável, com poucas alterações ao longo do tempo. Estas modificações ocorreram notavelmente nas amostras 5 e 6 – correspondente a 10% do total das amostras de Manguezal – que em 1988, apresentavam maior abundância da fração água, indicando a presença de campos alagados influenciados pela ação da maré, pois a imagem foi gerada na época de pouca chuva (agosto) para a região de estudo. Nos anos de 1994 e 1998 essas amostras correspondiam ao ambiente Sedimento Úmido, e nos anos de 2004 e 2006, Campos Salinos com Vegetação Campestre.

A Tabela 2.4 mostra que das 120 amostras coletadas nas imagens fração de 1988 a 2008 em ambiente de Campos Salinos (SSM), 51 (42,5%) correspondiam aos Campos Salinos

com vegetação de gramíneas (GSM), 41 (34%) ao Sedimento Úmido, e somente 23 (19,2%) representavam os Campos Salinos de referência (SSM), mais secos. Este dado indica que as amostras extraídas na imagem fração de 2008 não satisfaziam a condição ambiental padrão para essa zona úmida costeira.

Nas amostras pretéritas ao ano de referência (2008), o ambiente Praia e Duna (BDU) foi considerado o ambiente costeiro predominante na análise do valor de abundância no diagrama tri linear, ou seja, aqueles ambientes não predominantes presentes na amostra com valores de fração inferiores foram descartados para análise das Tabelas 2.3 e 2.4. Analisando a Tabela 2.3, nota-se que aproximadamente 29% das amostras (7) de Praia e Dunas, que representam a maioria, não sofreram mudanças no decorrer dos 5 períodos estudados, e que 16% representavam o ambiente Água nos anos de 1988, 1994 e 1998, e que modificaram para o ambiente de Praia e Duna a partir de 2004. Para os períodos observados, no total de 144 amostras de Praia e Duna analisadas, 101 (70,1%) mantiveram a característica espectral de referência, 35 (24,3%) sofreram alterações no valor de abundância para Água, 6 (4,2%) indicavam a presença de Manguezal, e apenas 2 (1,4%) amostras sugeriram aspectos espectrais de vegetação, não necessariamente Manguezal, no ambiente de Praia e Duna. Segundo a Tabela 2.4, podemos constatar que houve um aumento de 66,7% da superfície de Praia e Duna em relação a 1988, e ao longo dos anos, uma diminuição da classe Água.

6. Discussão

A visualização da distribuição composicional dos ambientes costeiros estudados no diagrama ternário do ano de referência de 2008, em termos das imagens-fração VV, Sombra e VNF+Solo, demonstrou que não há regiões de mistura espectral entre eles.

Das 20 trajetórias possíveis para o ambiente de Manguezal, identificadas nas imagens fração, 16 (80%) não sofrem alterações ao longo de todo o período estudado; e 3 trajetórias (15%) indicaram uma mudança gradativa para formação de Manguezal. Inicialmente em 1988, estas amostras foram totalmente cobertas por Água, que progressivamente com o tempo foi sendo preenchida por sedimentos, e, após a acomodação e fixação sedimentar, houve o aparecimento e estabilização do Manguezal a partir de 2006, permanecendo estas condições em 2008. A quantidade das amostras coletadas durante o período de 1988 a 2008 totalizou 120, sendo que aproximadamente 93% desse total corresponderam ao Manguezal, corroborando o predomínio e uma relativa estabilidade desta zona úmida costeira na área de estudo (Figura 2.6).

Com relação aos Campos Salinos, podemos afirmar que a condição ambiental de referência (2008), identificada pela extração das amostras na imagem fração, correspondia a um ambiente com comportamento espectral similar ao do solo. Um comportamento espectral díspar foi identificado nas análises dos anos anteriores a 2008, quando os Campos Salinos apresentavam, na sua maioria, uma vegetação campestre. A amostra total mostrou que 42% indicava a presença de campo com vegetação, 34%, Sedimento Úmido e o restante (19%), Campos Salinos sem cobertura vegetal (Figura 2.6).

Como a vegetação campestre faz parte de um processo natural dos campos salinos na área de estudo, e não são limítrofes a Praia e Duna, o ambiente Campos Salinos não apresentou mudanças significativas para outros ambientes (1,4% para Água), apenas modificações referente a presença ou ausência de cobertura vegetal.

Nas análises feitas no ambiente Praia e Dunas a maior parte das amostras (praticamente 70%) mantiveram a característica espectral de referência, e o restante, 30%, sofreram alterações nos valores de abundância, principalmente para Água e Manguezal (23% e 6% respectivamente) no decorrer dos 6 anos estudados. Juntamente com os dados de aumento de 66,7% da superfície de Praia e Duna, podemos concluir que a superfície de Praia e Duna aumentou consideravelmente no período de 1988 a 2008 (Figura 2.6).

De modo geral, os resultados das amostras coletadas nos ambientes Manguezal (MAN), Campos Salinos (CAM) e Praia e Duna (PRD) ao longo dos anos de 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 e 2008 sugerem que a zona costeira em estudo vem sofrendo o processo de progradação de sedimentos ao longo da linha de costa e uma estabilização no aumento da superfície de Manguezal. Já os Campos Salinos apresentaram variações dinâmicas nos valores de abundância entre as três frações geradas pelo modelo de mistura espectral, devido principalmente ao período de inundações dessas áreas.

Estas interpretações geradas a partir das análises das trajetórias dos ambientes costeiros, através da distribuição tri linear dos valores de abundância dos ambientes úmidos costeiros ao longo do tempo, permitiram o desenvolvimento de um modelo de diagrama de dispersão espectral para ambientes úmidos costeiros (Figura 2.7). O modelo de diagrama de distribuição espectral para as zonas úmidas costeiras proposto permite o reconhecimento a partir da caracterização espectral dos alvos, assim como detecção das mudanças no tempo, dos ambientes de Manguezal, Campos Salinos com predomínio de solos, Campos Salinos

com vegetação campestre, Praias e Dunas, Sedimentos Úmidos, Água com Sedimento e Água sem Sedimento.

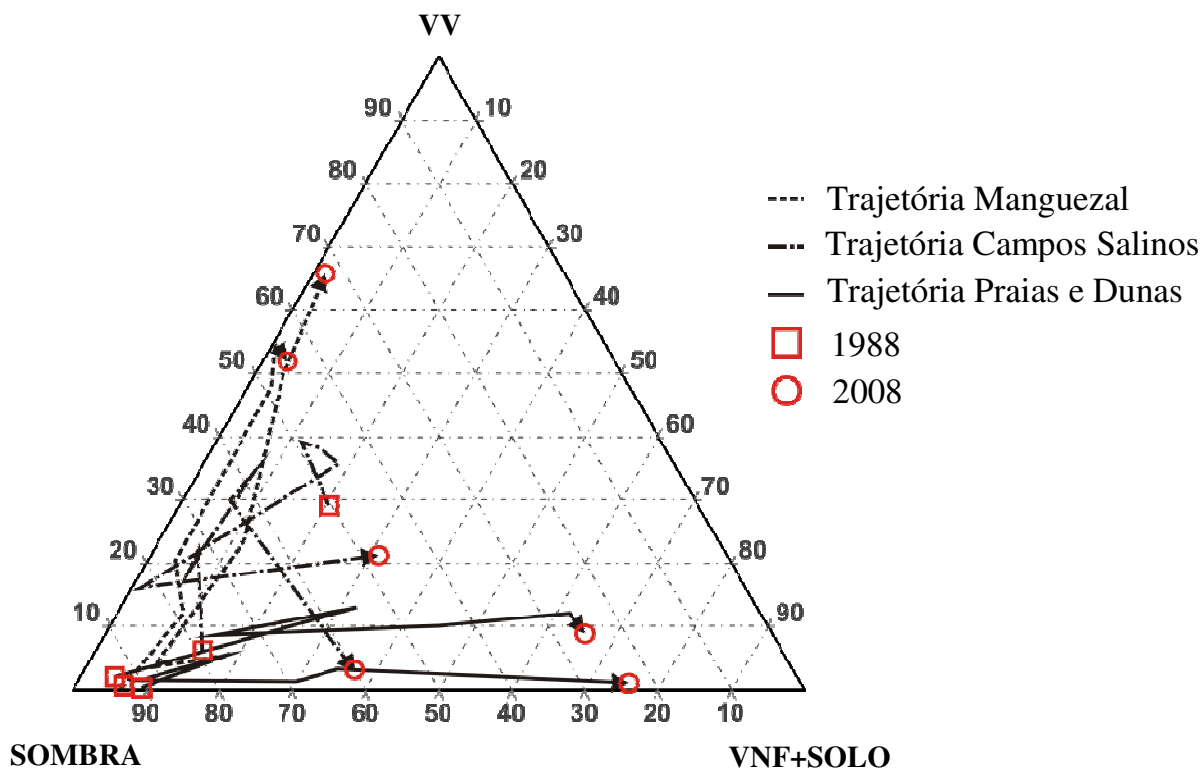


Figura 2.6: Exemplo de um diagrama tri linear contendo a trajetória de algumas amostras de wetlands costeiros coletadas nas imagens fração ao longo de 1988 a 2008 e que subsidiaram a construção de um modelo geral de dispersão e caracterização espectral.

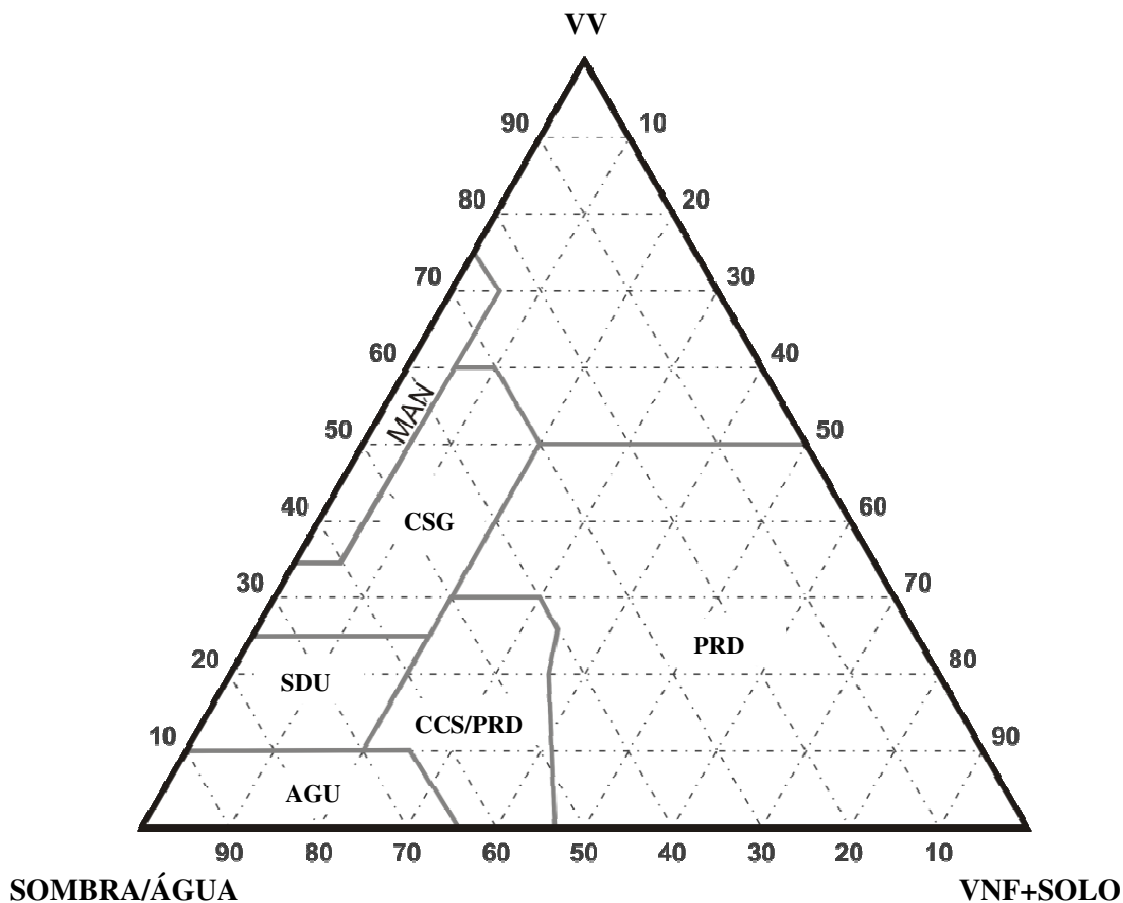


Figura 2.7: Modelo de distribuição das zonas úmidas costeiras no diagrama tri linear. MAN – Manguezal, CCS – Campos Salinos com Solo, CSG – Campos Salinos com Gramíneas, PRD – Praias e Dunas, SDU – Sedimento Úmido e AGU – Água.

7. Conclusões

A análise espectral temporal realizada nas imagens fração gerada a partir da aplicação do modelo de mistura espectral, em zonas úmidas costeiras dos municípios de Soure e Salvaterra, Ilha de Marajó, mostrou ser uma técnica inovadora com o uso do diagrama tri linear para analisar a evolução dos ambientes Manguezal, Campos Salinos com predomínio de solos, Campos Salinos com vegetação campestre, Praias e Dunas, Sedimentos Úmidos, Água com Sedimento e Água sem Sedimento.

O modelo de diagrama de distribuição espectral para as zonas úmidas costeiras proposto permite o reconhecimento a partir da caracterização espectral destes alvos, assim como a detecção de suas mudanças ao longo do tempo. Para quantificar as mudanças no processo de formação dos bancos de areia/lama e de bosques de vegetação ao longo da linha de costa, sugerem-se estudos futuros para estimar a idade de bosques formados no período estudado.

8. Referências Bibliográficas

- Adams, J. B., Smith, M. O. and Gillespie, A. R. 1993. Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis. In V. M. Pieters and P. Englert (Eds.), Remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition. New York, Cambridge University Press: 7, 145–166.
- Bateson C.A. Asner G.P., and SDUsman, C.A. 2000. Endmember Bundles: A New Approach to Incorporating Endmember Variability into Spectral Mixture Analysis. IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, 38 (2): 1083 – 1094.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A. and Green, R. O. 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. Summaries of the 5th Airborne Earth Science Workshop. JPL Publication: 95(1). 23–26.
- Boorman, L.A. 1999. Salt marshes – present functioning and future change. Mangrove and Salt Marsh. 3(4): 227–241.
- Carlotto, M.J. 1999. Reducing the effects of space varyin, wavelength dependent scattering in multispectral imagery. International Journal of Remote Sensing, London, 20 (17): 3333-3344.
- Chambers, J.Q; Asner G.P.; Morton, D.C.; Anderson, L.O; Saatchi S.S.; Espírito-Santo F.D.B.; Palace, M. and Souza Jr., C. 2007. Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. Trends Ecology and Evolution, 22:8, 414 – 423.
- Coughanowr, C.1998. Wetlands of the humid tropics: AGUer related issues and problems of the Humid tropical and other warm humid regions. Paris, UNESCO. IHP, Humid Tropics Program 12: 47.
- Edward, B.1997. Economic Value of Wetland. Ramsar Convention Bureau. Gland, Switzerland, p. 143-154.
- ENVI. 2008. ITT Visual Information Solutions. ENVI Help. Versão 4.5. Boulder: RSI.
- França C.F. and P.W.M. Souza Filho. 2006. Compartimentação morfológica da margem leste da ilha de marajó: zona costeira dos municípios de soure e salvaterra – Estado do Pará. Revista Brasileira de Geomorfologia 7: 33-42.
- França, C. F., P. W. M. Souza Filho and M. El-Robrini. 2007. Análise faciológica e estratigráfica da planície costeira de Soure (margem leste da ilha de Marajó-PA), no trecho compreendido entre o canal do Cajuúna e o estuário Paracauari. Acta Amazonica 37:261-268.
- Frey, R.W. and Bassan, P.B. 1985. Coastal Salt Marshes. In: Davis, R.A. Jr. Coastal Sedimentary Environments. New York: Springer-Verlag, 2nd Ed, p.225–302.
- Governo do Estado do Pará. 2004. Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e do Meio Ambiente - Pará. Macrozoneamento Ecológico Econômico – MZEE.
- Hirano, A.; Madden, M. and Welch. R. 2003. Hyperspectral Image Data for Mapping Wetland Vegetation. Wetlands, 23: 2, 436 – 448.

IBGE, 2004. Mapa de Vegetação do Brasil. 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE.

Jensen, J.R. 1996. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2nd Ed. 316 p.

RADAMBRASIL, 1974. Folha SA-22. Belém: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial de terra. Brasília: DNPM.

Research Systems Incorporated (RSI). 2005. ENVI user's guide. Version 4.2. Boulder: RSI.

Rossetti, D.F. and Valeriano, M.M. 2007. Evolution of the loSDUt Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. *Catena* 70: 253-265.

Rossetti, D.F; A.M. Goes, M.M. Valeriano and M.C. Miranda. 2007. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. *Journal Quaternary Science* 22: 121–131.

Shimabukuro, Y. E. and Smith, J. A. 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29: 16-21.

Small, C. 2004. The Landsat ETM+ spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*, 93: 1-17.

Souza-Filho, P. W. M., M. C. L. Cohen, R. J. Lara, G. C. Lessa, B. Koch and H. Behling. 2006. Holocene Coastal Evolution and Facies Model of the Bragança Macrotidal Flat on the Amazon Mangrove Coast, Northern Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39: 306-310.

Souza-Filho, P. W. M., G. C. Lessa, M. C. L. Cohen, F. R. Costa and R. J. Lara. 2009. The Subsiding Macrotidal Barrier Estuarine System of the Eastern Amazon Coast, Northern Brazil. In: Dillenburg, S.F. and Hesp, P.A. (eds) *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, New York, pp 347-375.

Souza Jr., C.M.; Roberts, D.A.; Cochrane, M.A. 2005. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment* 98: 329–343.

Triplot, 2010. Todd Thompson Software. Versão 4.2.1. Disponível em: <<http://mypage.iu.edu/~tthomps/programs/html/tntriplot.htm>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2010.

Wei, W.; Zhang, X.; Chen, X.; Tang J. and Jiang, M. 2008. Wetland Mapping Using Subpixel Analysis And Decision Tree Classification In The Yellow River Delta Area. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, 37 (B7): 667 – 670.

CONCLUSÕES GERAIS

A caracterização espectral dos ambientes úmidos costeiros presentes no litoral leste da Ilha de Marajó foi detalhadamente estudada no Capítulo 1 deste trabalho. A análise do comportamento das curvas espectrais dos ambientes Manguezal, Manguezal Degradado, Praias e Dunas, Vegetação Secundária Inicial, Vegetação Secundária Tardia, Água com Sedimento, Água sem Sedimento, Ocupação Humana e Campos Naturais se mostrou coerente e complementar com os resultados estatísticos calculados. Coerente, por exemplo, pela sobreposição das curvas espectrais dos pares das classes Manguezal e Vegetação Secundária Avançada na região do visível e infravermelho próximo, sendo condizentes com a baixa variabilidade espectral aferidas pelo Teste de Tukey no software R e pelo algoritmo da função de separabilidade de ROIs (*Region of Interest*) encontrada no software ENVI 4.5; e complementar, já que a função de separabilidade espectral aferiu que os pares das classes Campos Naturais e Ocupação Humana apresentavam baixa variabilidade, dado este não constatado pelo comportamento de suas curvas espectrais, mas conferido pela confusão entre as matrizes de classificação gerada pelo classificador SAM, pela distribuição destas classes na área de estudo e pelo conhecimento de campo. Desta maneira, a função Separabilidade Espectral de pares de ROIs no software ENVI 4.5 se mostrou coerente com o teste de Tukey, sugerindo ser uma boa ferramenta para análise preliminar da qualidade de regiões de interesse extraídos na imagem reflectância.

Devido à baixa variabilidade espectral ou diferença não significativa nas médias dos pares de ROIs analisados nas feições de vegetação, sugere-se métodos alternativos para melhor realçar as diferentes formações e sucessões florestais na Amazônia. Entre as referências estudadas, Souza Jr. et al. (2005) e Roberts (1991) utilizaram imagens fração (solo, água e vegetação), derivadas da análise de mistura espectral em imagens Landsat, para monitorar as mudanças nas transições florestais na Amazônia. Segundo estudos de Pereira (1996), o método de Roberts apresentou uma minimização dos efeitos atmosféricos, correções estas que devem ser consideradas em regiões de elevada umidade atmosférica, como acontece em regiões amazônicas.

Com o conhecimento adquirido a partir das informações espectrais coletadas dos ambientes costeiros decidiu-se estudar a dinâmica dos ambientes presentes na planície costeira ao longo do tempo (capítulo 2). Para tanto, aplicou-se o método de mistura espectral nas imagens reflectância dos anos de 1988, 1994, 1998, 2004, 2006 e 2008. A detecção de

mudanças ao longo destes anos foi feita com o auxílio do diagrama tri linear de Thompson para analisar a evolução dos ambientes Manguezal, Campos Salinos com predomínio de solos, Campos Salinos com vegetação campestre, Praias e Dunas, Sedimentos Úmidos, Água com Sedimento e Água sem Sedimento.

Os resultados mostraram que 80% das amostras do ambiente Manguezal, coletadas nas imagens fração para os anos considerados, mantiveram suas características espectrais, ou seja, o ambiente não sofreu alterações ao longo do tempo, e que 15% das trajetórias possíveis indicaram uma mudança gradativa para formação de Manguezal até o ano de 2008. Do total dos pixels analisados para este ambiente, nas imagens multitemporais, 93% corresponderam ao próprio Manguezal, confirmando uma relativa estabilidade deste ambiente costeiro na área de estudo. As análises multitemporais espectrais no ambiente Campos Salinos indicaram uma condição atípica nas análises da imagem do ano de referência (2008), com comportamento espectral similar ao do solo, característica esta não verificada nos anos pretéritos. Nestes anos, houve o predomínio de Campos Salinos com Vegetação Campestre. Nas análises feitas no ambiente Praia e Duna destaca-se o considerável aumento de sua superfície (66,7%) no período de 20 anos (1988-2008).

De modo geral, os resultados alcançados no Capítulo 2 sugerem que a planície costeira dos municípios de Soure e Salvaterra, na Ilha de Marajó, vem sofrendo o processo de progradação de sedimentos ao longo da linha de costa e uma estabilização no aumento da superfície de Manguezal desde 2004. Para os Campos Salinos detectaram-se as variações nos valores de abundância entre as três frações (Vegetação Verde, Sombra/Água e Vegetação não fotossinteticamente ativa/solo) geradas pelo modelo de mistura espectral, devido principalmente a sazonalidade climática da região.

O método de detecção de mudanças aplicado neste estudo, para identificar a evolução das trajetórias dos ambientes costeiros através da distribuição tri linear dos valores de abundância ao longo do tempo, propiciou o desenvolvimento de um modelo de diagrama de dispersão espectral para ambientes úmidos costeiros. Este modelo deve auxiliar em futuras pesquisas acerca do monitoramento dos impactos de ambientes costeiros, da localização e caracterização espectral, assim como detecção das mudanças no tempo. Além disso, este trabalho pode fornecer subsídios técnicos para o planejamento e gestão das políticas públicas locais, através do uso destas técnicas de processamento de imagens ópticas, visando um

desenvolvimento sócio-econômico sustentável, e ações de preservação dos recursos naturais em zonas úmidas costeiras.

REFERÊNCIAS

- Adams, J. B., Smith, M. O.; Gillespie, A. R. 1993. Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis. In V. M. Pieters and P. Englert (Eds.), *Remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition*. New York, Cambridge University Press: 7, 145–166.
- Amaral, D. D. (2007). *Campos e Florestas das Bacias dos Rios Atua e Anajás, Ilha do Marajó, Pará*. Belém: Ed MPEG. 110p. (Coleção Adolpho Ducke).
- Bateson C.A. Asner G.P., and Wessman, C.A. 2000. Endmember Bundles: A New Approach to Incorporating Endmember Variability into Spectral Mixture Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 38 (2): 1083 – 1094.
- Bauer, M.E.; Yuan, F. and Sawaya, K.E. 2003. Multi-temporal landsat image classification and change analysis of land cover in the twin cities (minnesota) metropolitan area. *Second International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*. Ispra, 1-8.
- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K.Shum, L.D.Talleyand, A. Unnikrishnan. (2007). *Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A. and Green, R. O. 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. *Summaries of the 5th Airborne Earth Science Workshop*. JPL Publication: 95(1). 23–26.
- Boorman, L.A. 1999. Salt marshes – present functioning and future change. *Mangrove and Salt Marsh*. 3(4): 227–241.
- Carlotto, M.J. 1999. Reducing the effects of space varyin, wavelength dependent scattering in multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, London, 20: 17, 3333-3344.
- Chambers, J.Q; Asner G.P.; Morton, D.C.; Anderson, L.O; Saatchi S.S.; Espírito-Santo F.D.B.; Palace, M. and Souza Jr., C. 2007. Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. *Trends Ecology and Evolution*, 22:8, 414 – 423.
- Coughanowr, C.1998. *Wetlands of the humid tropics: Water related issues and problems of the Humid tropical and other warm humid regions*. Paris, UNESCO. IHP, Humid Tropics Program 12: 47.
- Edward, B.1997. *Economic Value of Wetland*. Ramsar Convention Bureau. Gland, Switzerland, p. 143-154.
- Dillabaugh, K. A. and D. J. King. 2008. Riparian marshland composition and biomass mapping using Ikonos imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34: 143-158.

- ENVI. 2008. ITT Visual Information Solutions. ENVI Help. Versão 4.5. Boulder: RSI.
- Foody, G.M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80:185–201.
- Frey, R.W. and Bassan, P.B. 1985. Coastal Salt Marshes. In: Davis, R.A. Jr. *Coastal Sedimentary Environments*. New York: Springer-Verlag, 2nd Ed, p.225–302.
- França C.F. and P.W.M. Souza Filho. 2006. Compartimentação morfológica da margem leste da ilha de marajó: zona costeira dos municípios de soure e salvaterra – Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 7: 33-42.
- França, C. F., P. W. M. Souza Filho and M. El-Robrini. 2007. Análise faciológica e estratigráfica da planície costeira de Soure (margem leste da ilha de Marajó-PA), no trecho compreendido entre o canal do Cajuúna e o estuário Paracauari. *Acta Amazonica* 37:261-268.
- Frohn, R. C., M. Reif, C. Lane and B. Autrey. 2009. Satellite Remote Sensing of Isolated Wetlands Using Object-Oriented Classification of Landsat-7 Data. *Wetlands* 29: 931-941.
- Gebbinck, M.S.K. 1998. Decomposition of Mixed Pixels in Remote Sensing Images to Improve the Area Estimation of Agricultural Fields. Tese, Ph.D. Katholieke Universiteit Nijmegen, Veenendaal Universal Press, 165 p.
- Governo do Estado do Pará. 2004. Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e do Meio Ambiente - Pará. Macrozoneamento Ecológico Econômico – MZEE.
- Hirano, A.; Madden, M. and Welch. R. 2003. Hyperspectral Image Data for Mapping Wetland Vegetation. *Wetlands*, 23: 2, 436 – 448.
- IBGE, 2004. Mapa de Vegetação do Brasil. 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE.
- Kruse, F.A., A.B. Lefkoff, J.W. Boardman, K.B. Heidebrecht, A.T. Shapiro, P.J. Barloon and A.F.H. Goetz.** 1993. The spectral image processing system (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment* 44: 145-163.
- Jensen, J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2nd Ed. 316 p.
- Jensen, J.R. 2000. *Remote sensing of environment: an Earth resource perspective*. New Jersey: Prentice Hall Series in Geographical Information, 544 p.
- Li, J., W. Chen and R. Touzi. 2007. Optimum RADARSAT-1 configurations for wetlands discrimination: a case study of the MerBleue peat bog. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33: 46-55.
- Liu, K., X. Li, X. Shi and S. Wang. 2009. Monitoring mangrove forest changes using remote sensing and GIS data with decision-tree learning. *Wetlands* 28: 336-346.

- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E. and Moran, E. 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 25(12): 2365-2401.
- Meneses, P.R. and J.S.M. Netto. 2001. Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília: UnB; Planaltina: EMBRAPA. 262p.
- Novo, E. M. L. M. and Y. E. Shimabukuro. 1997. Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model. *International Journal of Remote Sensing* 18: 663– 670.
- Pereira, J.L.G., G.V. Batista, D. Roberts. 1996. Reflectância de Coberturas Vegetais na Amazônia. *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19, INPE, p. 551-556.*
- RADAMBRASIL, 1974. Folha SA-22. Belém: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial de terra. Brasília: DNPM.
- Ramsey, E., A. Rangoonwala, B. Middleton and Z. Lu. 2009. Satellite optical and radar data used to track wetland forest impact and short-term recovery from Hurricane Katrina. *Wetlands* 29: 66-79.
- Research Systems Incorporated (RSI). 2005. ENVI user's guide. Version 4.2. Boulder: RSI.
- Richards, J.A. 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 240p.
- Roberts, D.A. 1991. Separating spectral mixtures of vegetation and soils. (Ph.D. Thesis in Geological Sciences) - University of Washington, Seattle.
- Rossetti, D.F. and Valeriano, M.M. 2007. Evolution of the lowest Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. *Catena* 70: 253-265.
- Rossetti, D.F; A.M. Goes, M.M. Valeriano and M.C. Miranda. 2007. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. *Journal Quaternary Science* 22: 121–131.
- Rossetti, D.F. 2008. Reflorestamento natural no Marajó: Fatores geológicos são determinantes para o processo de avanço da floresta na ilha. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/marajo/reflorestamento_natural_marajo.pdf>. Acesso em 19 de setembro de 2009.
- Shimabukuro, Y. E. and Smith, J. A. 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29: 16-21.
- Small, C. 2004. The Landsat ETM+ spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*, 93: 1-17.
- Sohn, Y. and Qi, J. 2005. Mapping Detailed Biotic Communities in the Upper San Pedro Valley of Southeastern Arizona Using Landsat 7 ETM_ Data and Supervised Spectral Angle Classifier. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71: 709–718.

- Souza-Filho, P. W. M., M. C. L. Cohen, R. J. Lara, G. C. Lessa, B. Koch and H. Behling. 2006. Holocene Coastal Evolution and Facies Model of the Bragança Macrotidal Flat on the Amazon Mangrove Coast, Northern Brazil. *Journal of Coastal Research, Special Issue 39*: 306-310.
- Souza-Filho, P. W. M., G. C. Lessa, M. C. L. Cohen, F. R. Costa and R. J. Lara. 2009. The Subsiding Macrotidal Barrier Estuarine System of the Eastern Amazon Coast, Northern Brazil. In: Dillenburg, S.F. and Hesp, P.A. (eds) *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, New York, pp 347-375.
- Souza Filho, P.W.M., E.S.F. Martins and F.R. Costa. 2006. Using mangrove as a geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian Amazon: A remote sensing data approach. *Ocean & Coastal Management* 49: 462-475.
- Souza Filho, P.W.M. and W.R., Paradella. 2002. Recognition of the main geobotanical features in the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM e RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management* 10: 123-132.
- Souza Jr., C.M.; Roberts, D.A.; Cochrane, M.A. 2005. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environmental* 98: 329–343.
- Souza Jr., C.M., D.A. Roberts, and A.L., Monteiro. 2005. Multitemporal analysis of degraded forests in the southern Brazilian Amazon. *Earth Interactions* 9: 1-25.
- Tiner, R. W. 1999. *Wetland indicators: a guide to wetland identification, classification and mapping*. CRC Press, Boca Raton. 424p.
- Touzi, R., A. Deschamps and G. Rother. 2007. Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33: S56-S67.
- Triplot, 2010. Todd Thompson Software. Versão 4.2.1. Disponível em: <<http://mypage.iu.edu/~tthomps/programs/html/tnttriplot.htm>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2010.
- USGS. 2007. Revised Landsat 5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/documents/L5TM_postcal_v11.pdf>. Acesso em 07 de abril de 2009.
- Wei, W.; Zhang, X.; Chen, X.; Tang J. and Jiang, M. 2008. Wetland Mapping Using Subpixel Analysis And Decision Tree Classification In The Yellow River Delta Area. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, 37 (B7): 667 – 670.
- Whitcomb, J., M. Moghaddam, K. McDonald, J. Kellendorfer and E. Podest. 2009. Mapping vegetated wetlands of Alaska using L-band radar satellite imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35: 54-72.
- Yuhas, R.H., A.F.H. Goetz and J.W. Boardman. 1992. Discrimination Among Semi-Arid Landscape Endmembers Using the Spectral Angle Mapper (SAM) Algorithm. *Summaries of the 4th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 92-41*, pp.147-149.