

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/1 157-168
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MAPEAMENTO DA COBERTURA DA TERRA NA CIDADE DE ALTAMIRA (PA) EM 2000 E 2010, COM A UTILIZAÇÃO DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL DE IMAGENS DO SENSOR TM

*Mapping Land Cover in the city of Altamira (PA) in 2000 and 2010 using Linear
Spectral Mixture of TM Images*

**Mayumi Cursino de Moura Hirye¹, Diógenes Salas Alves² &
Hermann Johann Heinrich Kux³**

**¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto**

Av. dos Astronautas, 1758 - Jd. da Granja - São José dos Campos - SP, Brasil - CEP 12227-010.
mayhirye@hotmail.com

**²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Processamento de Imagens – DPI / Coordenação de Observação da Terra**
Avenida dos Astronautas, 1758, CEP 12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil
dalves@dpi.inpe.br

**³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR / Coordenação de Observação da Terra**
Avenida dos Astronautas, 1758, CEP 12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil
hermann@dsr.inpe.br

*Recebido em 11 de Agosto, 2014/ Aceito em 23 de Novembro, 2014
Received on August 11, 2014/ Accepted on November 23, 2014*

RESUMO

A cidade de Altamira (PA) passou por transformações importantes em seu território desde a década de 1970, quando se acelerou a expansão da fronteira agrícola na Amazônia. Novas formas de ocupação urbana foram justapostas às estruturas urbanas herdadas de períodos anteriores, ao lado da expansão da área urbanizada. Na década de 1970, a população urbana cresceu a uma taxa média de 16% ao ano. No período subsequente, o ritmo de crescimento diminuiu, chegando à média de 3% ao ano, entre 2000 e 2010. Neste trabalho, foi elaborada e avaliada uma metodologia para classificação da cobertura da terra de imagens do sensor TM de Altamira para os anos de 2000 e 2010, com a utilização das técnicas de Modelos Lineares de Mistura Espectral e Vegetação-Impermeabilização-Solo (V-I-S). A acurácia dos mapas de cobertura da terra foi avaliada com base em ortofotos, registradas e mosaicadas. As classes de vegetação e impermeabilização apresentaram boa concordância com a referência, enquanto a classe de solo apresentou confusão tanto com as áreas impermeabilizadas como com as áreas de vegetação.

Palavras chaves: Landsat TM, Modelo Linear de Mistura Espectral, Modelo Vegetação-Impermeabilização-Solo, Cobertura da Terra, Áreas Urbanas.

ABSTRACT

The city of Altamira (PA) underwent major territorial changes starting in the 1970s, at the time of the acceleration of the agricultural frontier expansion in the Brazilian Amazonia. New forms of urban occupation were juxtaposed to urban structures inherited from previous periods, at the same time as the urban area expanded. During the 1970s, urban population grew at 16% per year. In the next decades the growth rate decreased, reaching an average of 3% per year between 2000 and 2010. In this work, a methodology was developed and evaluated for land-cover classification with TM Landsat images for 2000 and 2010 in Altamira, using Linear Spectral Mixture Model and Vegetation-Impervious surface-Soil Model (V-I-S) techniques. The accuracy of land-cover fractions was assessed using high-resolution, geocoded images mosaicked orthophotos. Vegetation and impervious classes were found to be in good agreement with the reference, whereas soil tended to be confused with impervious and vegetation areas.

Keywords: TM Landsat TM, Linear Spectral Mixture Model, Vegetation-Impervious Surfaces-Soil Model, Land Cover, Urban Areas.

1. INTRODUÇÃO

As aplicações do sensoriamento remoto em estudos de áreas urbanas tem se beneficiado do mapeamento de superfícies impermeáveis (“impervious surfaces”) (LU et al. 2011a e b; KUCK, 2010; WENG e LU, 2008 e 2009; LU e WENG, 2004 e 2006; BAUER et al., 2008; POWELL e ROBERTS, 2008; POWELL et al. 2007; DOUGHERTY, 2004; WU e MURRAY, 2003; SMALL, 2002; PHINN et al., 2002; CIVCO et al., 2002, entre outros). As superfícies impermeáveis ou impermeabilizadas podem ser caracterizadas por “feições construídas pela ação humana através das quais a água não pode infiltrar no solo” (WENG, 2012), que cobrem parte importante das cidades. A extensão das superfícies impermeabilizadas é utilizada em variadas aplicações de planejamento urbano e ambiental, tais como a delimitação de áreas urbanizadas ou a avaliação do crescimento urbano, assim como para entender e controlar os impactos hidrológicos na escala de uma bacia hidrográfica ou subsidiar avaliações de qualidade da água.

A composição das áreas impermeabilizadas é diversa e complexa. Herold et al. (2004) observaram que mesmo sensores com dezenas ou centenas de bandas não permitem diferenciar inequivocamente certos materiais encontrados em áreas urbanas. Espectros de materiais urbanos, adquiridos por meio de espectralradiômetros em campo e em laboratório e convoluídos para as 224 bandas do sensor AVIRIS, compõe a biblioteca criada por Herold et al., 2004. Nela é possível observar casos de confusão entre materiais, como vias de concreto vs. áreas de solo exposto; vias de asfalto vs. telhas compostas, cobertura de betume

ou telhas de cor cinza; telhas de cor cinza vs. telhas compostas ou cobertura de betume; vias de asfalto vs. áreas de estacionamento (HEROLD et al., 2004).

Para imagens de média resolução, as principais técnicas utilizadas no mapeamento de áreas impermeabilizadas são a classificação subpixel (Erdas Imagine), a regressão, a complementaridade com a fração vegetação e, a mais amplamente desenvolvida, análise linear de mistura espectral (WENG, 2012).

Conforme Adams e Gillespie (2006), a análise de mistura espectral pressupõe um modelo físico que busca prever como e quais materiais no solo serão expressos em imagens espectrais. O modelo é necessariamente uma simplificação, já que por meio de um conjunto limitado de informações espectrais não é possível deduzir todos os atributos dos alvos. A análise de mistura espectral linear considera que a resposta de cada elemento de resolução da imagem (pixel) em qualquer banda espectral é a combinação linear das respostas dos alvos que compõe a unidade de resolução no solo (SHIMABUKURO e SMITH, 1991).

O modelo linear de mistura espectral (MLME) pode ser expresso como:

$$R_b = \sum_{b=1}^{b_n} (F_e R_{e,b}) + r_b \quad (1)$$

Onde: R_b é a reflectância do pixel na banda b ; F_e é fração do endmember e ; $R_{e,b}$ é a reflectância do pixel de amostra do endmember e na banda b ; b_n é o número total de bandas e r_b é o resíduo em cada banda.

As áreas impermeabilizadas, em conjunto com a vegetação e o solo, são os componentes utilizados para caracterizar distintos segmentos

de áreas urbanas de acordo com o modelo Vegetação-Impermeabilização-Solo (V-I-S), proposto por Ridd (1995) para análises a partir de dados de sensoriamento remoto (Fig. 1). As classes utilizadas no diagrama ternário (i.e., área central comercial, área residencial de alta densidade etc.) foram assim denominadas por terem um significado de entendimento fácil e familiar – do modelo V-I-S não se depreendem classes de uso do solo.

Vegetation: Vegetação; *Impervious*: Impermeabilização; *Soil*: Solo; CBD (*central business district*): área central; *high-density residential*: área residencial de alta densidade; *medium-density residential*: área residencial de média densidade; *low-density residential*: área residencial de baixa densidade; *lawn*: gramado; *cover crops*: áreas de cultivo; *forest*: floresta; *row crops*: plantio em fileiras; *range land*: áreas de pasto; *desert*: deserto; *bare soil*: solo exposto; *heavy industry*: indústria pesada; *light industry*: indústria leve.

Ainda que cada pixel de uma imagem possa ser caracterizado a partir da composição de vegetação, impermeabilização e solo, a análise urbana só é possível na agregação dos pixels em unidades espaciais, chamadas pelo autor de eco-unidades. A lógica utilizada para agregar os pixels, assim como o tamanho ou a forma das eco-unidades, depende dos objetivos da análise pretendida. A caracterização de cada eco-unidade que torna possível a comparação morfológica (mudanças no tempo e entre diferentes cidades) ou a estimativa de indicadores biofísicos ou

sociais (RIDD, 1995). Por ser um modelo simples, mas eficaz para a caracterização de áreas urbanas, ele tem sido utilizado em diversos estudos (WENG e LU, 2009; POWELL e ROBERTS, 2008; POWELL et al., 2007; WU e MURRAY, 2003; PHINN et al., 2002; MADHAVAN et al., 2001; entre outros).

Em cidades que apresentam um acentuado processo de crescimento ou cidades pouco consolidadas, o solo é um componente crucial para identificar as áreas preparadas para a urbanização ou construção, as vias não pavimentadas e as áreas públicas e privadas sem tratamento paisagístico ou pavimentação. O modelo

V-I-S, por incorporar o componente solo, permite caracterizar essas situações, encontradas em Altamira.

Este estudo tem como objetivo elaborar e avaliar metodologia para mapear a cobertura da terra na cidade de Altamira em 2000 e 2010, com a utilização do Modelo Linear de Mistura Espectral e do Modelo V-I-S aplicados a imagens do sensor TM do satélite Landsat5.

2.MATERIAL E MÉTODOS

Para o mapeamento da cobertura da terra na área de estudo selecionada, foi desenvolvida metodologia, descrita na sequência, que abrange: seleção de imagens e seu pré-processamento, cálculo dos modelos lineares de mistura espectral, mapeamento da cobertura da terra a partir dos resultados de cada modelo calculado e avaliação dos modelos e da exatidão dos mapas de cobertura da terra.

2.1Área de Estudo

A cidade de Altamira está situada na porção central centro do Estado do Pará, na margem esquerda do rio Xingu (Fig. 2). Dista 720km da capital do Estado sendo um centro sub-regional, subordinado à própria capital Belém (IBGE, 2008). A BR-320, rodovia Transamazônica, corta a cidade em sua porção noroeste, conectando-a a dois importantes centros regionais, Marabá, a leste, e Santarém, pela BR-163, a oeste.

A ocupação de Altamira data do século XVIII, para a exploração do interior da Amazônia, empreendida pelos jesuítas (UMBUZEIRO, 1988). Em 1883, foi fundada a vila de Altamira junto à foz do igarapé Ambé, para apoiar a

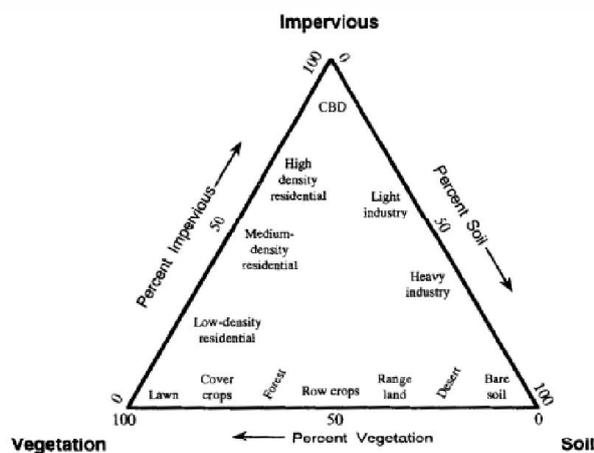


Fig. 1 – Representação do modelo Vegetação-Impermeabilização-Solo proposto por Ridd (1995).

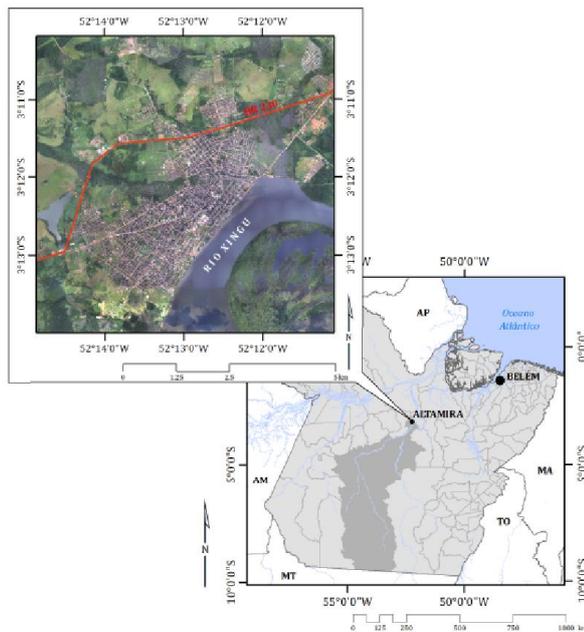


Fig. 2 – Localização de Altamira.

exploração da borracha nativa. O município de Altamira foi emancipado de Souzel em 1911.

Os dados estatísticos (IBGE, 2013) apontam que o período de maior crescimento demográfico da cidade foi na década de 1970, com as iniciativas do governo federal para a ocupação da Amazônia. A taxa de crescimento da população urbana nessa década foi de 16,4% a.a.: de 6 mil habitantes em 1970, a cidade passou a abrigar em 1980, cerca de 27 mil pessoas. No período seguinte, entre 1980 e 1991, a taxa de crescimento decaiu para 5,8% a.a.; em 1991, a população urbana era de cerca de 50 mil habitantes. Entre 1991 e 2000, a taxa de crescimento continuou diminuindo, chegando a 2,4% a.a., menor que a média do Estado do Pará. Entre 2000 e 2010, a população urbana passou de 62 mil para 84 mil pessoas e a taxa de crescimento registrada foi de 3% a.a., ligeiramente maior que a taxa estadual.

O crescimento da cidade ocorreu, em parte, com bairros planejados pela Prefeitura Municipal, pela Prelazia do Xingu e por empresas privadas. Parte da população teve como alternativa a ocupação das baixadas e áreas alagadiças, das áreas periféricas da cidade e dos morros (UMBUZEIRO, 1988; BECKER, 1985). Assim Altamira apresenta padrões variáveis de urbanização em termos de infraestrutura urbana e condições das edificações.

2.2 Seleção de Imagens e Pré-Processamento

Da base de dados da Divisão de Geração de Imagens (DGI/INPE), foram selecionadas duas imagens do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite Landsat 5 de 28.07.2000 e de 24.07.2010 (cena 226/62). As imagens foram reprojetaadas para o sistema adotado neste trabalho, o Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 22, datum WGS-84 e recortadas para a área de interesse, compreendida pelas coordenadas 355.846,008 E, 9.653.462,980 N, 370.816,008 E, 9.638.492,980 N.

Para validação dos mapas de cobertura da terra, foram utilizadas ortofotos de 1999 e 2010 cedidas pelas Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (Eletronorte). As ortofotos foram mosaicaadas e reamostradas, com o método de vizinho mais próximo, para 60 cm de resolução espacial.

O registro foi feito com base na ortofoto de 2010, utilizando a transformação polinomial de primeiro grau e a reamostragem pelo método do vizinho mais próximo. Foram tomados 20 pontos de controle para o registro de cada imagem do sensor TM (2000 e 2010) e 35 pontos de controle para a ortofoto de 2000. Os erros médios quadráticos foram menores que 0,6 pixel (18m) e de 4,3 pixel (3m), respectivamente.

Em seguida, as imagens do sensor TM foram radiometricamente transformadas. Os dados de calibração do sensor TM foram utilizados para converter os valores de número digital para valores de reflectância no topo da atmosfera.

2.3 Cálculo dos Modelos de Mistura

Foram calculados modelos lineares de mistura espectral com número variável de endmembers e variações na escolha do pixel de amostra. Não foi imposta nenhuma das duas restrições possíveis à equação do MLME (a soma-para-umidade, na qual os estimadores mais o erro devem somar 1, e a de que os valores dos estimadores devem estar no intervalo entre 0 e 1), à semelhança da solução adotada por Lu e Weng (2004).

Para cada endmember foram selecionadas da própria imagem do sensor TM de 2010 pixels de amostras que podem ser utilizados

sem a necessidade de calibração (ADAMS e GILLESPIE, 2006). Neste estudo, experimentou-se considerar as áreas impermeabilizadas como compostas de três endmembers: telha metálica, telha de fibrocimento e asfalto. Além disso, foram incorporados como endmembers nos modelos testados: vegetação, solo e água.

Numa primeira etapa, foram selecionados visualmente possíveis pixels de amostras com o auxílio das ortofotos. Sempre que possível, buscou-se um pixel no interior de áreas com a mesma cobertura/material, minimizando assim o deslocamento do pixel devido ao erro de registro entre a imagem de média resolução e a ortofoto. Os espectros tomados da imagem do sensor TM em refletância de cada pixel foram plotados em gráficos para a análise e escolha final dos pixels que apresentassem comportamento espectral distinto, testando a diversidade de amostras para representar cada endmember, numa abordagem simplificada dos métodos propostos por Carvalho et al. (2003).

A composição dos modelos foi feita por sucessivos refinamentos, ou seja, a partir da avaliação de um modelo inicial, seus endmembers e pixels de amostras foram sendo substituídos nos modelos seguintes, de forma semelhante à adotada por Gillespie et al. (1990), Smith et al. (1990) e Lu e Weng (2004).

Dessa maneira, foram realizadas 6 rodadas, cujos modelos foram inter-comparados. As 3 primeiras rodadas compararam modelos com 6 endmembers. A 4ª rodada explorou as composições de modelos com 5 endmembers, a 5ª rodada, os modelos com 4 endmembers e a 6ª rodada, aqueles com 3 endmembers.

O modelo selecionado foi reproduzido na imagem do TM de 2000, utilizando-se o mesmo perfil espectral dos pixels de amostra de 2010, ou seja:

$$R_{b(2010)} = R_{b(2000)} \quad (2)$$

2.4 Classificação da Cobertura da Terra

Os mapas de cobertura da terra de 2000 e 2010 foram gerados a partir da classificação de vegetação, áreas impermeabilizadas e solo das imagens-fração resultantes do MLME selecionado. Os códigos foram desenvolvidos para identificar, em cada pixel da cena, a imagem-fração que possui o maior valor e atribuir como: Vegetação, os pixels cujo maior

valor seja o da fração de vegetação; Solo, os pixels cujo maior valor seja o da fração de solo; e Impermeabilizado, os pixels cujo maior valor seja o de uma das frações de asfalto, telha clara ou telha escura.

Atribui-se valor 0 aos pixels de cada imagem-fração com valor inferior a 0 ou superior a 1. As imagens-fração que representam as classes do mapa de cobertura da terra foram normalizadas, desprezando-se as demais, conforme descrito por Adams e Gillespie (2006). As imagens-frações de interesse foram recalculadas para que sua soma seja equivalente a 1. Para excluir pixels identificados como água, nuvem ou sombra de nuvem, foram criadas máscaras a partir da interpretação visual das imagens de 2000 e 2010.

2.5 Avaliação dos Modelos Lineares de Mistura Espectral e dos Mapas de Cobertura da Terra

Os índices de Exatidão Global e Exatidão Global Normalizada e Kappa, derivados da matriz de confusão e da matriz de confusão normalizada, foram utilizados para avaliar a concordância entre a classificação da cobertura da terra e as ortofotos.

Amostras de tamanho de 3x3 pixels (90m x 90m) foram aleatoriamente selecionadas. As amostras de referência foram obtidas pela interpretação visual das ortofotos de 2010 e 1999. Para determinar a qual classe pertence cada amostra do mapa de cobertura da terra, foi feita a soma dos pixels por classe. Foram excluídas as amostras localizadas fora das ortofotos ou em áreas mascaradas (água, nuvens e sombras de nuvens). Também foram eliminadas as amostras que apresentaram dúvidas na classificação e as que não puderam ser classificadas por que houve empate ou na soma do número de pixels por classe do mapa de cobertura da terra ou na área das classes interpretadas nas ortofotos.

A estimativa do índice de concordância Kappa do mapa de cobertura da terra resultante foi utilizada para avaliar os MLMEs. Além disso, utilizou-se: a análise das frações pelo contexto da imagem (nas áreas onde é conhecida a presença do endmember que originou a fração, seus valores devem estar no intervalo entre 0 e 1); a análise do erro (pelo valor do erro médio quadrático e pela distribuição espacial do erro,

com a identificação das áreas onde o erro é maior); e a análise do mapeamento da fração de maior valor em cada pixel (considerando, diferentemente do mapa de cobertura da terra, todas as frações resultantes do modelo).

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram estimados 47 modelos que testaram o número e tipo de endmember, a variabilidade intraclasse (entre as amostras de um endmember) e a incorporação da análise dos scatterplots para a seleção de pixels de amostras. A Tabela 1 e a Fig. 3 apresentam as amostras (pixels) selecionadas para representar os endmembers asfalto, telha clara, telha escura, solo, vegetação e água.

O erro médio quadrático dos modelos com menor número de endmembers foi da ordem de 10-2, maior que o dos modelos de 6 endmembers, da ordem de 10-8. O valor de Kappa dos mapas de cobertura da terra resultantes de MLMEs com menor número de endmembers não é superior ao dos modelos com 6 endmembers.

O MLME 10 (6 endmembers) foi a composição que resultou no mapa de cobertura da terra de maior Kappa e na melhor avaliação pelo contexto da imagem. Esse modelo foi comparado, de forma mais detalhada, ao de 4 endmembers, MLME 36, cujos pixels foram escolhidos por serem os posicionados nas extremidades do volume de dados representado nos scatterplots (Fig. 3), e ao modelo de 3 endmembers, MLME 29, que simula o modelo V-I-S de Ridd (1995) a partir da eliminação de endmembers do MLME 10.

O valor do Kappa do mapa de cobertura da terra do MLME 10 é o maior e a diferença do EMQ desse modelo em relação aos outros dois é da ordem do milionésimo (Tabela 2).

A utilização de apenas 3 endmembers no MLME 29 fez com que os componentes da mistura não representados pelos endmembers fossem expressos nas frações e no erro, resultando na variação dos valores de determinadas frações e em valores maiores de erro. Na análise qualitativa, do mapa de cobertura da terra foi possível observar que áreas onde predominam a vegetação ou materiais impermeabilizantes foram mapeadas como solo.

O mapa de cobertura elaborado a partir das imagens-fração resultantes do MLME 36 apresentou o menor valor do índice de

Tabela 1: Amostras Selecionadas.

| Endmember | Amostra | Características |
|--------------|------------|--|
| Asfalto | Asf1 | Asfalto novo do pátio de aeronaves do aeroporto de Altamira. |
| | Asf2 | Asfalto antigo do pátio de aeronaves. |
| | Asf3 | Asfalto novo da pista do aeroporto. |
| Telha Clara | TC1* | Telhado metálico, Armazém Paraíba, no centro da cidade. |
| | TC2 | Telhado metálico, loja e galpão, no centro da cidade. |
| | TC3* | Idem TC3. |
| Telha Escura | TE1 | Telhado de fibrocimento de loja e edifício, no centro da cidade. |
| | TE2 | Telhado de fibrocimento de loja e mercado municipal, no centro. |
| Solo | SoloAgr | Solo de área de cultivo com alguma cobertura vegetal rasteira. |
| | SoloExtr1 | Solo de cor vermelha, em área de extração de argila, na margem da Rod. Ernesto Acioly. |
| | SoloExtr2* | Solo de cor marrom, em área de extração de argila, na saída para o Aeroporto. |
| | SoloExtr3* | Idem SoloExtr2. |
| Vegetação | VegArb | Vegetação de mata, pertencente ao 51° BIS. |
| | VegGram | Gramado em frente à avenida principal do 51° BIS. |
| | VegRRur | Vegetação rasteira na área rural de Altamira. |
| Água | RioCalha | Centro do leito do Rio Xingu. |
| | RioMargem | Margem do Rio Xingu |

(*) Amostra selecionada em duplicata para compensar um possível deslocamento, devido ao erro de registro entre as imagens de média e alta resolução.

concordância Kappa. A análise qualitativa mostrou que, diferentemente dos dois outros modelos, as áreas de solo com baixa cobertura de vegetação rasteira ou grama, como as que circundam a pista do aeroporto de Altamira, foram mapeadas como solo.

O MLME 10 foi o que apresentou os melhores resultados de acordo com os critérios propostos. Esse modelo foi propagado para a imagem de reflectância de 2000. As imagens-fração do MLME 10 aplicado às imagens de 2000 e 2010 foram utilizadas para gerar o mapa de cobertura da terra de 2000 (Fig. 4 e 5).

Os dois mapas podem ser considerados

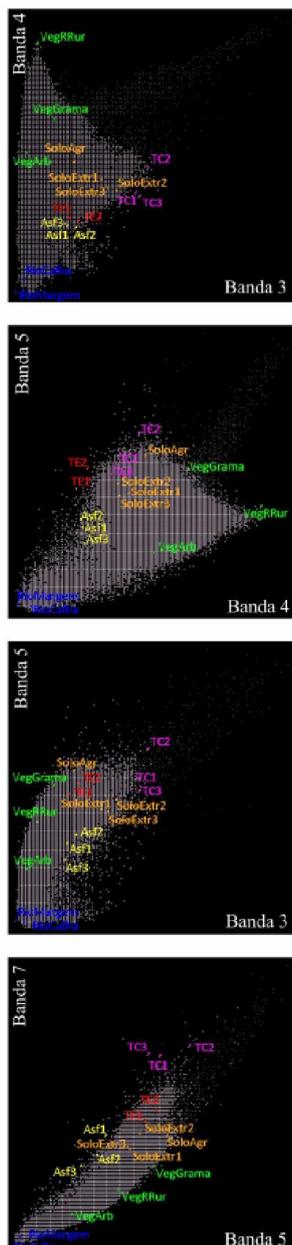


Fig. 3 – Scatterplots apresentando as respostas das amostras da Tabela 1 para pares de canais da imagem do sensor TM de 2010.

satisfatórios, já que apresentaram exatidão global superior a 85% (Tabela 3), conforme critérios sugeridos por Foody (2002). Os valores obtidos para o índice Kappa são classificados como de concordância substancial, de acordo com Landis e Koch (1977). Os três índices, Kappa, exatidão global e normalizada, foram superiores para o mapeamento de 2010. Para um nível de significância de 5%, o teste Z mostrou que ambos os mapas são melhores que uma classificação casual.

As frações de vegetação e solo

Tabela 2: Composição e acurácia dos mapas referentes aos modelos 10, 36 e 29

| | MLME 10 | MLME 36 | MLME 29 |
|-------------------------------------|--|------------------------------------|------------------------|
| Nº de Endmembers | 6 | 4 | 3 |
| Composição dos Endmembers | Asf1, TC3, TE2, SoloExtr2, VegArb, RioMargem | TC2, SoloExtr2, VegRRur, RioMargem | TE2, SoloExtr2, VegArb |
| EMQ da Imagem-erro | $8 \cdot 10^{-9}$ | 0,0050 | 0,0169 |
| Kappa do mapa de cobertura da terra | 0,5822 | 0,4933 | 0,5526 |

apresentam maior concordância, sendo que a impermeabilização para o ano de 2000 é ligeiramente melhor que para 2010 (Tabela 4).

A fração solo foi aquela que apresentou os valores mais baixos na matriz, devido a sua confusão tanto com áreas impermeabilizadas como com áreas de vegetação. Em 2000, a confusão foi mais acentuada com áreas impermeabilizadas.

A análise qualitativa mostra que áreas preparadas para o plantio ou para a urbanização foram mapeadas ora como solo, ora como impermeabilização, conforme exemplificado na Fig. 6.

O cemitério, no canto direito das imagens, foi mapeado como impermeabilização e solo. A área mapeada como solo (inferior das imagens) aparece coberta de vegetação na ortofoto e como área preparada para a urbanização (na cor roxa uniforme) na imagem do sensor TM. A rodovia Transamazônica, asfaltada, está mapeada como solo. Áreas de solo preparado para agricultura em rosa uniforme na imagem do sensor TM, foram mapeadas como impermeabilização e aparecem na ortofoto já com cultura.

No interior da cidade, pela análise visual do mapa de cobertura da terra, foi possível observar que áreas com maior extensão de vegetação foram corretamente mapeadas. Áreas menores de vegetação arbórea no interior das quadras não foram todas identificadas como vegetação, ao mesmo tempo em que se observou confusão entre áreas impermeabilizadas e de vegetação, sobretudo para o ano de 2000, conforme exemplificado na Fig. 7.

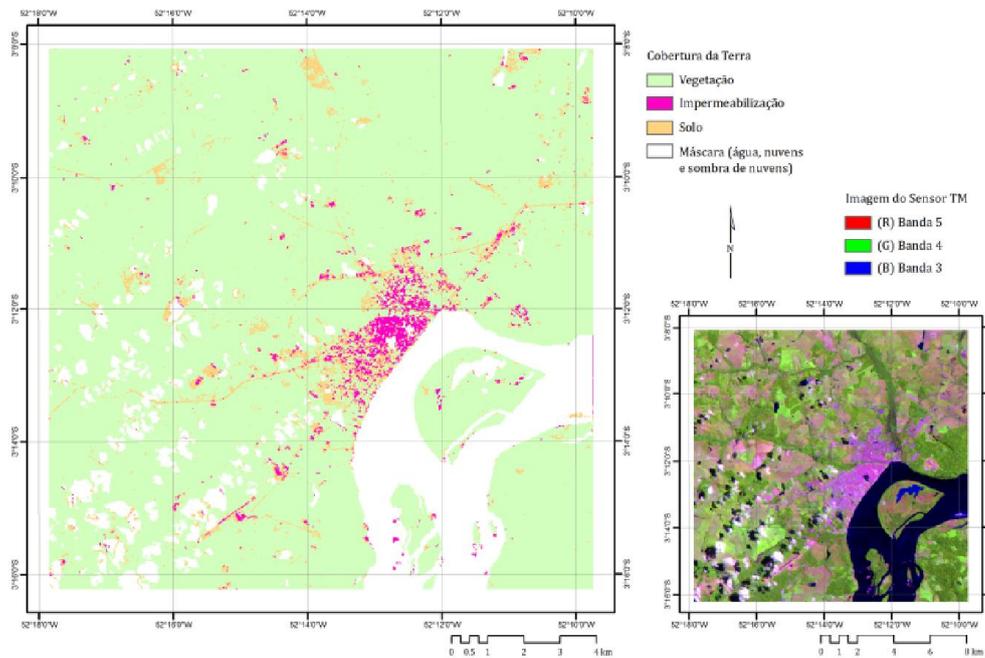


Fig. 4 – Mapa de cobertura da terra de Altamira em 2000.

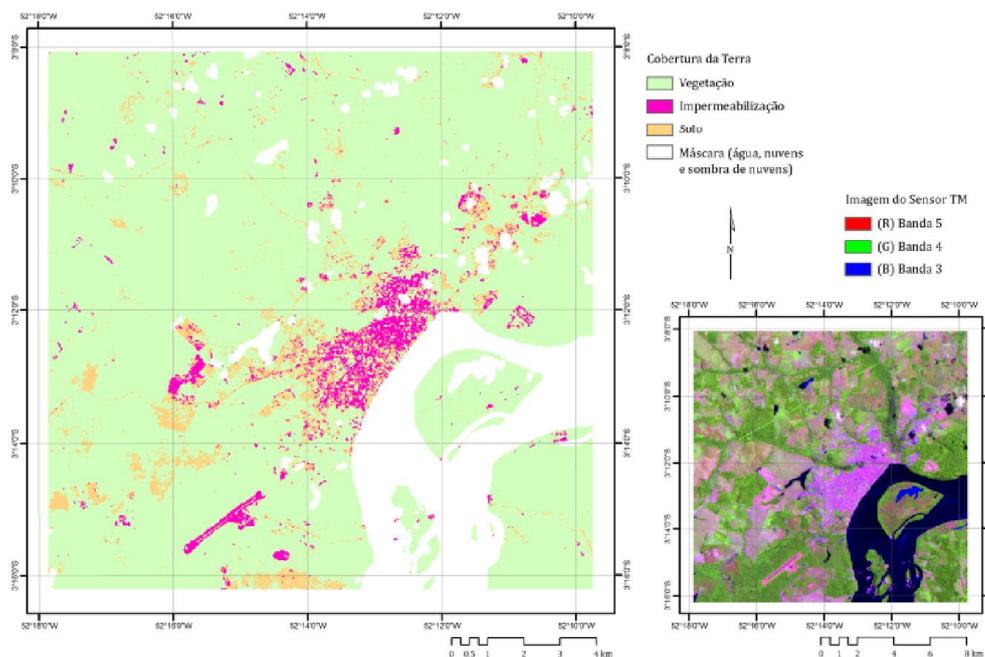


Fig. 5 – Mapa de cobertura da terra de Altamira em 2010.

4.CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado e avaliado um método simplificado para elaborar mapas de cobertura da terra da cidade de Altamira em 2000 e 2010, a partir de imagens-fração estimadas com o modelo linear de mistura espectral aplicado em imagens de média resolução do sensor TM. O modelo compreendendo 6 endmembers – solo de área de extração, vegetação de área florestada, telha escura, telha clara, asfalto e água – foi o que apresentou os melhores resultados de acordo com os critérios propostos. Os mapas de

cobertura da terra de 2000 e 2010 foram obtidos com a atribuição da classe de acordo com o pixel de maior valor dentre as 6 imagens-fração. As classes adotadas no mapa de cobertura da terra foram Vegetação, Impermeabilização e Solo, em concordância com o proposto no modelo V-I-S (RIDD, 1995).

Os mapas de cobertura da terra de 2000 e 2010 apresentaram concordância substancial com a referência, de acordo com Landis e Koch (1977), e podem ser considerados satisfatórios conforme critérios sugeridos por Foody (2002).

Tabela 3: Acurácia dos mapas de cobertura da terra de 2000 e 2010

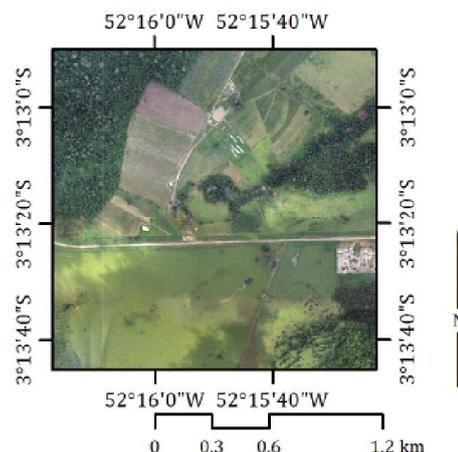
| | 2000 | 2010 |
|------------------------------|--------------------|--------------------|
| Nº de Amostras | 169 | 193 |
| Exatidão Global | 0,8521 | 0,881 |
| Kappa | 0,668 | 0,751 |
| Intervalo de Confiança (95%) | ± 0,120 | ± 0,09 |
| p-Value | 310 ⁻¹⁵ | 210 ⁻¹⁶ |
| Exatidão Global Normalizada | 0,767 | 0,852 |

Tabela 4: Matrizes de confusão normalizada para os anos de 2000 e 2010

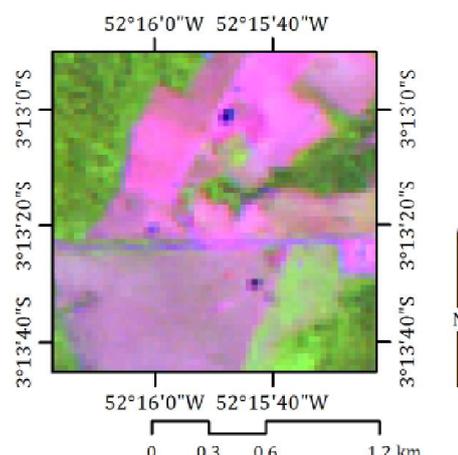
| | | Amostras de Referência | | |
|----------------------------|-------------------|------------------------|--------|-----------|
| | | Impermeabilização | Solo | Vegetação |
| Mapa de Cobertura da Terra | Ano 2000 | | | |
| | Impermeabilização | 0,8439 | 0,1531 | 0,0037 |
| | Solo | 0,0461 | 0,7072 | 0,2464 |
| Vegetação | 0,1100 | 0,1397 | 0,7499 | |
| | | Amostras de Referência | | |
| | | Impermeabilização | Solo | Vegetação |
| Mapa de Cobertura da Terra | Ano 2010 | | | |
| | Impermeabilização | 0,8320 | 0,1448 | 0,0237 |
| | Solo | 0,1165 | 0,8151 | 0,0687 |
| Vegetação | 0,0515 | 0,0401 | 0,9076 | |

Para um nível de significância de 5%, o teste Z mostra que ambos os mapas são melhores que uma classificação casual.

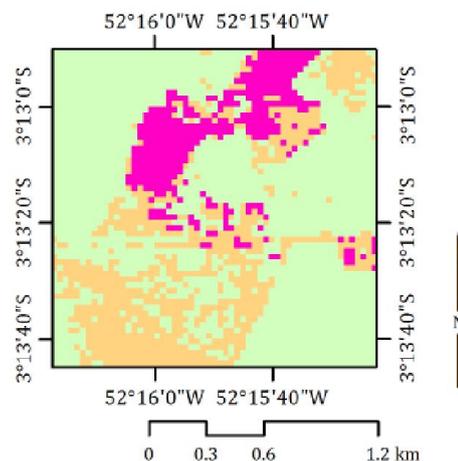
Observou-se que as áreas de solo apresentaram confusão tanto com áreas impermeabilizadas como com áreas de vegetação. Áreas de solo exposto preparadas para a urbanização foram, por vezes, mapeadas como impermeabilizadas. A confusão entre alvos de resposta espectral semelhante é um limite para a aplicação do MLME, o que é particularmente importante na utilização de imagens do sensor TM, de resolução espectral relativamente grosseira nas regiões do visível e do infravermelho.



(a) Ortofoto de 2010



(b) Imagem do sensor TM, na composição R(5), G(4) e B(3) de 2010



Vegetação Impermeabilização Solo

(c) Mapa de cobertura da terra de 2010

Fig. 6 – Detalhe da área rural.

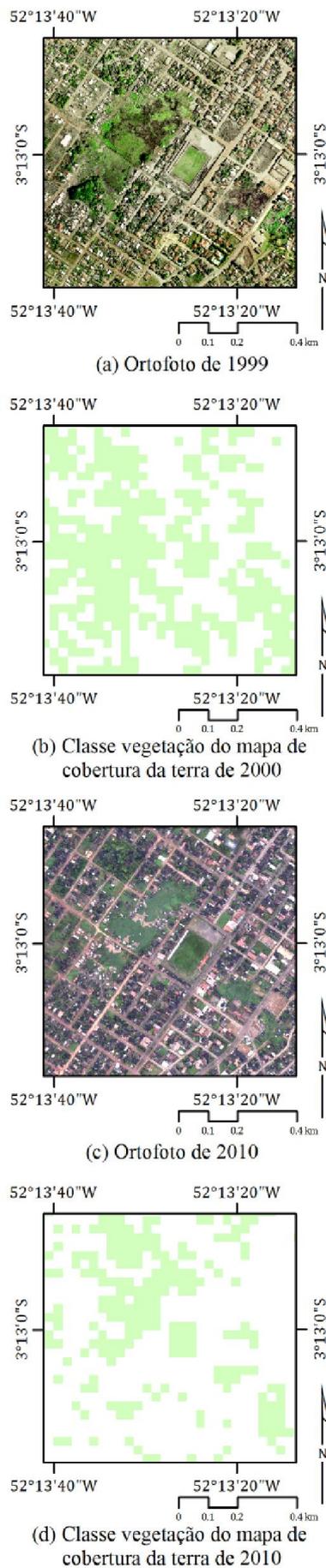


Fig. 7 – Detalhe da área ao redor do campo de futebol municipal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. B.; GILLESPIE, A. R. **Remote sensing of landscapes with spectral images a physical modeling approach**. Cambridge, England: Cambridge University, 2006. 362 p.

BAUER, M. E.; LAFFELHOLZ, B. C.; WILSON, B. Estimating and Mapping Impervious Surface Area by Regression Analysis of Landsat Imagery. In: WENG, Q. (Org.). **Remote Sensing of Impervious Surfaces**. Boca Ratón, Flórida, Estados Unidos: CRC / Taylor & Francis, p. 3-19, 2008.

BECKER, B. Fronteira e urbanização repensadas. **Revista Brasileira de Geografia**, vol. 47, n° 3/4. 1985. p. 315-426.

CARVALHO JR., O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Mistura espectral: (i) detecção dos membros finais utilizando a geometria do simplex. **Espaço & Geografia**, vol. 6, n° 1. 2003. p. 147-173.

CIVCO, D.; HURD, J.; WILSON, E.; ARNOLD, C.; PRISLOE, M. Quantifying and Describing Urbanizing Landscapes in the Northeast United States. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 68, n° 10, p. 1083-1090, 2002.

DOUGHERTY, M.; DYMOND, R.; GOETZ, S.; JANTZ, C.; GOULET, N. Evaluation of impervious surface estimates in a rapidly urbanizing watershed. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 70, n° 11, p. 1275-1284, 2004.

FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n° 1, p. 185-201, 2002.

GILLESPIE A.R.; SMITH M. O.; ADAMS, J. B.; WILLIS, S. C.; FISCHER, A. F.; SABOL, D. E. **Interpretation of residual images: spectral mixture analysis of AVIRIS images**. In: Anual JPL Airborne Visible/ Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, p. 243–290, 1990.

HEROLD, M.; ROBERTS, D. A.; GARDNER, M. E.; DENNISON, P. E. Spectrometry for urban area remote sensing - Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400

- nm. **Remote Sensing of Environment**, vol. 91, n° 3-4, p. 304–319, 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. Dados dos Censos Demográficos de 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010. Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em fev-2013.
- _____. **Regiões de Influência das Cidades**, 2007. Rio de Janeiro, 2008. 201 p.
- KUCK, T. N. **Análise da Impermeabilização da Área Urbana de Manaus (1987-2006) com o uso do Modelo de Mistura Espectral MESMA**. Dissertação (mestrado em Sensoriamento Remoto) São José dos Campos: INPE, 2010. xxii+ 74 p.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n°1, p. 159-174, 1977.
- LU, D.; WENG, Q. Spectral Mixture Analysis of the Urban Landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ Imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 70, n° 9, p. 1053–1062, 2004.
- _____. Use of impervious surface in urban land-use classification. **Remote Sensing of Environment**, vol. 102, n° 1-2, p.146-160, 2006.
- LU, D.; MORAN, E.; HETRICK, S. Detection of impervious surface change with multitemporal Landsat images in an urban-rural frontier. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 66, n. 3, p. 298-306, 2011a.
- LU, D.; LI, G.; MORAN, E.; BATISTELLA, M.; FREITAS, C. C. Mapping impervious surfaces with the integrated use of Landsat Thematic Mapper and radar data: A case study in an urban-rural landscape in the Brazilian Amazon. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 66, n. 6, p. 798-808. 2011b.
- MADHAVAN, B. B.; KUBO, S.; KURISAKI, N.; SIVAKUMAR, T. V. L. N. Appraising the anatomy and spatial growth of the Bangkok Metropolitan area using a vegetation-impervious-soil model through remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 22, n° 5, p. 789–806, 2001.
- PHINN, S.; STANFORD, M.; SCARTH, P.; MURRAY, A. T.; SHYY, P. T. Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by subpixel analysis techniques. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 23, n° 20, p. 4131–4153, 2002.
- POWELL, R.; ROBERTS, D.; DENNISON, P.; HESS, L. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, vol. 106, n° 2, p. 253-267. 2007.
- POWELL, R. L.; ROBERTS, D. A. Characterizing Variability of the Urban Physical Environment for a Suite of Cities in Rondônia, Brazil,” **Earth Interactions Journal**, vol. 12, n° 13, p. 1–32, 2008.
- RIDD, M. K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 16, n° 12, p. 2165-2185, 1995.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The Least-Squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived From Remote Sensing Multispectral Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, n. 29, vol. I, 1991, p. 16-20.
- SMALL, C. Multitemporal analysis of urban reflectance. **Remote Sensing of Environment**, vol. 81, n° 2–3, p. 427–442, 2002.
- SMITH, M. O.; USTIN, S. L.; ADAMS, J. B.; GILLESPIE, A. R. Vegetation in Deserts: I. A Regional Measure of Abundance from Multispectral Images. **Remote Sensing of Environment**, vol. 31, p. 1–26, 1990.
- UMBUZEIRO, U. M. **Altamira e sua História**. Altamira, Pará: Grupo Cultural, 1988. 2ª edição. 134p.
- WENG, Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. **Remote Sensing of Environment**, vol. 117, p. 34-49, 2012.
- WENG, Q.; LU, D. Landscape as a continuum: an examination of the urban landscape structures and dynamics of Indianapolis City, 1991–2000,

by using satellite images. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 30, n°10, p. 2547-2577, 2009.

WENG, Q.; HU, X.; LU, D. Extracting impervious surfaces from medium spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery: a

comparison. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 29, n° 11, p. 3209–3232, 2008.

WU, C.; MURRAY, A. T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, vol. 84, n. 4, p. 493-505, 2003.