

Análise da impermeabilização da área urbana de Manaus (1987-2006) com o uso do modelo de mistura espectral *MESMA*

Tahisa Neitzel Kuck¹
Diógenes Salas Alves¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
tahisakuck@yahoo.com.br; dalves@dpi.inpe.br

Abstract. The accelerated process of urbanization is responsible for significant anthropogenic alterations of natural landscapes. The understanding and monitoring of these changes are fundamental for urban planning which envisions the spatial planning and the contention of environmental impacts resulting from occupation of new áreas, including high rates of soil high imapermeabilization. Remote sensing delivers a series of tools and products suitable for the development of a variety of up-to-date and historical information at a synoptic view to be analysed within this context. The objective of this research is to delimit the fractions of impermeable surfaces (that indicate the urban growth direction) within the city of Manaus, Amazonas State, Brazil, between the years 1987 and 2006 based on the application of *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA* - ROBERTS et al. (1998)) on a series of Landsat Thematic Mapper (TM) imagery. In total, 30 sample spectra were selected for the modeling of 2 and 3 endmembers e 18 sample spectra for the 4 endmembers, of which 97.7% was correctly modeled for the 2006 image and 99.2% for the 1987 image with a root mean squared (RMS) error of 2.5 %. Finally, fraction maps were generated with each of the pixels representing a percentage of the determined endmember present within the pixel. This study demonstrates the potential of satellite images of moderate spatial resolution and the mixture models based on multiple endmembers for the analysis of urban environmental problems related to soil impermeabilization.

Palavras-chave: remote sensing, urban land cover, Vegetation-Impervious-Soil fracions, Landsat, sensoriamento remoto, cobertura do solo urbano, frações de Vegetação-Impermeável-Solo, Landsat.

1. Introdução

O rápido processo de urbanização ocorrido nas últimas décadas tem sido a causa de diversos problemas ambientais urbanos ocasionados em função das alterações na ecologia e qualidade de vidas das populações dessas áreas. Dentre outros, os impactos hidrológicos são os mais comumente observados, enquadrando-se nestes a poluição dos cursos d'água, processos erosivos e inundações, causados, dentre outros, pela supressão da cobertura vegetal e sua substituição por superfícies impermeáveis (PAUL e MEYER, 2001).

Em Manaus, alvo deste estudo, os resultados desse processo não foram menos impactantes. A capital do estado do Amazonas, com uma população de cerca de 1,6 milhões de habitantes (IBGE, 2007), teve seu crescimento associado a um grande número de ocupações espontâneas desprovidas de infra-estrutura e em áreas de risco ambiental. Em maior ou menor grau, todos os igarapés intraurbanos estão poluídos e pelo menos dez bairros encontram-se em áreas sujeitas a alagamento nos picos de chuvas intensas (CPRM, 2008).

A compreensão e o monitoramento das mudanças na cobertura do solo ocasionadas pela urbanização são fundamentais para as atividades de planejamento urbano, administração dos serviços básicos de saneamento e infra-estrutura, alocação da oferta de serviços, dentre outras medidas que buscam a minimização e mitigação dos impactos ocasionados (JAT et al., 2008).

O sensoriamento remoto constitui um instrumento importante para pesquisas urbanas (HAACK e RAFTER, 2006) por possibilitar uma visão sinóptica do território e a aquisição de séries temporais de dados, e diversos estudos utilizando imagens multitemporais para análises urbanas têm sido realizados, (JAT et al., 2008).

Neste trabalho é utilizada uma técnica de transformação espectral de dados do sensor TM baseada no Modelo de Mistura Espectral com Múltiplas Componentes (*Multiple Endmember*

Spectral Mixture Analysis – MESMA, Roberts et al 1998), em combinação com dados dos sensores Quickbird e IKONOS para validação, para estimar mudanças da fração de superfícies impermeáveis de Manaus entre os anos de 1987 e 2006 e sua relação com configuração espacial do processo de expansão urbana no decorrer deste período.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo e dados utilizados

A área de estudo (Figura 1) compreende a porção urbana do município de Manaus, capital do estado do Amazonas, sendo sua cidade mais populosa, contendo aproximadamente 1,6 milhões de habitantes.

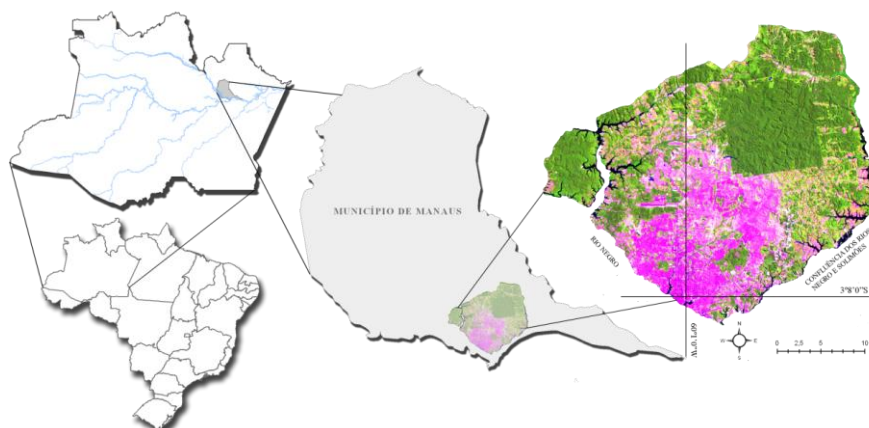


Figura 1. Área de estudo, com a localização do perímetro urbano de Manaus no município.

O rápido crescimento urbano, aliado à falta de planejamento e monitoramento, produziu uma ocupação desordenada do território, gerando à cidade altos índices de informalidade ou ilegalidade e desigualdade social, resultando em trágicos resultados ambientais e sociais. Hoje, por exemplo, em maior ou menor grau, todos os igarapés urbanos estão poluídos, e pelo menos 10 bairros encontram-se em áreas sujeitas a alagamento em função das chuvas intensas (CPRM, 2008).

2.2 Dados utilizados

Para analisar o processo de ocupação urbana foram selecionadas duas datas distintas de imagens Landsat TM (Thematic Mapper), da órbita/ponto 231/062, sendo a mais recente de 02 de setembro de 2006 e a mais antiga de 12 de julho de 1987. Uma imagem de 02 de julho de 2001 foi utilizada para calibração da biblioteca espectral necessária à aplicação do modelo de mistura espectral, conforme será detalhado a seguir.

Para validação dos resultados obtidos através da aplicação do modelo de mistura espectral, foram utilizadas imagens de alta resolução espacial, uma do sensor Quickbird compreendendo o ano de 2006, utilizada para avaliar as frações de componentes obtidas através da imagem Landsat TM de 2006, e outra do sensor IKONOS compreendendo o ano de 2001, utilizada para avaliar as frações de componentes obtidas pela imagem Landsat TM de 2001.

Pelo fato de as imagens TM multitemporais e a imagem Quickbird terem sido obtidas em datas diferentes e segundo diferentes parâmetros geométricos de aquisição, foi realizado o co-registro antes das demais fases de processamento. A imagem Quickbird foi adquirida pela Prefeitura Municipal de Manaus já com as devidas correções geométricas, e foi utilizada como base. O registro utilizou a metodologia de pontos homólogos nas duas imagens: imagem base e imagem a ser registrada. Polinômios de segundo grau foram utilizados na modelagem

das equações de correspondência. Os valores de RMS obtidos foram inferiores a 0,5 pixel, tanto para as imagens TM como para a IKONOS, conforme recomendado por Dai e Khorram (1998).

Posteriormente, procedeu-se à conversão dos Números Digitais das imagens Landsat TM em valores físicos. Com a imagem referência em valores de reflectância de superfície, procedeu-se à normalização radiométrica das demais datas, através do método proposto por Canty e Nielsen (2008), denominado *Iteratively Re-weighted Multivariate Alteration Detection* (IR-MAD). Esse procedimento foi adotado, pois uma vez que estudos multitemporais consideram essencialmente o comportamento espectral dos alvos ao longo do tempo, é de extrema importância que sejam aplicadas correções radiométricas adequadas nas imagens a fim de calibrá-las radiometricamente.

2.3 Aplicação do modelo MESMA

O aspecto central do método adotado no trabalho é o uso dos modelos de análise de mistura espectral (do inglês *Spectral Mixture Analysis* - SMA) são utilizados para estimar a fração de contribuição de determinado componente puro (*endmember*) na resposta espectral de um pixel (ADAMS et al., 1993; ROBERTS et al., 1998).

Esses modelos podem ser classificados em lineares (Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME) ou não lineares, de acordo com sua complexidade. Para a maioria das aplicações urbanas, são utilizados modelos lineares (PHINN et al., 2002), em que a reflectância ρ'_λ de um pixel i é representada como (Equação 1):

$$\rho'_\lambda = \sum_{i=1}^N f_i * \rho_{i\lambda} + \varepsilon_\lambda \quad \text{para} \quad \sum_{i=1}^N f_i = 1, \quad (1)$$

onde $\rho_{i\lambda}$ é a reflectância da componente i em uma banda específica (λ), f_i é a fração da componente, N é o número de componentes e ε_λ é o erro residual. O ajuste do modelo é avaliado através do cálculo do erro médio quadrático (RMSE – *Root Mean Squared Error*) dos resíduos de cada pixel em todas as bandas (ADAMS et al., 1993; ROBERTS et al., 1998), dado por (equação 2):

$$RMSE = \left(\sum_{k=1}^{\lambda} (\varepsilon_{i\lambda})^2 / N \right)^{1/2} \quad (2)$$

A aplicação do algoritmo de mistura resulta em tantas imagens quantas forem as componentes puras utilizadas pelo modelo. Nos modelos de mistura é possível gerar imagens-erro, as quais permitem avaliar os resultados.

Devido à grande heterogeneidade espectral encontrada em ambientes urbanos, a aplicação de um modelo linear de mistura espectral padrão, ou seja, baseado na aplicação de um conjunto fixo de componentes para todos os pixels da imagem, pode representar uma abordagem falha por ocasionar alto índice de resíduos ou de pixels não modelados (POWELL, 2007). Em função disto, a metodologia definida para este trabalho baseia-se na possibilidade de variação do número e tipo de componente pixel a pixel, através da aplicação do Modelo de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes (MESMA (ROBERTS et al., 1998)), que encontra-se implementado em linguagem *IDL* sob a plataforma *VIPER Tools*.

A fase mais importante para a aplicação de qualquer modelo de análise de mistura espectral consiste na seleção dos espectros que comporão a biblioteca espectral, pois estes devem ser representativos da complexidade espectral dos alvos da área em estudo.

Para este estudo, todos os espectros foram derivados da imagem, conforme proposto por ADAMS et al. (1995). Como se trata de um estudo em área urbana, os componentes selecionados podem ser agrupados em Vegetação, Superfícies Impermeáveis, Solo e Sombra (RIDD, 1995). A componente vegetação foi dividida em vegetação verde e vegetação seca.

Inicialmente, uma máscara de água foi gerada através do fatiamento da banda 7 da imagem de 02 de julho de 2001 e posterior análise e correção manual. Também foi gerada uma máscara de nuvens e sombras de nuvens através de vetorização manual sobre as imagens das três datas. Tanto os corpos d'água quanto as nuvens e suas sombras foram eliminados das análises por não representarem objetivo deste estudo.

A primeira seleção de componentes para compor a biblioteca espectral foi realizada através da aplicação do *Pixel Purity Index* sobre as três primeiras bandas resultantes da transformação *Minimum Noise Fraction* sobre a imagem referência, e posterior inspeção visual dos pixels na imagem Quickbird e de seus espectros. Os espectros selecionados foram então inseridos no aplicativo *VIPER Tools*.

A segunda seleção de componentes baseou-se nas métricas implementadas no *VIPER Tools* (ROBERTS et al., 2007) que determinam quais espectros são mais representativos de sua classe. Nesta etapa, foram selecionados para compor a biblioteca espectral os espectros que apresentaram os menores valores de *EAR*, *MASA* e *out_COB* e maiores valores de *in_COB*.

Como os pixels mais representativos da biblioteca espectral não necessariamente correspondem aos mais representativos dos alvos em estudo, a biblioteca espectral gerada a partir do *VIPER Tools* não foi considerada como sendo a biblioteca espectral final, uma vez que todos os parâmetros de seleção utilizados até então se basearam na relação entre os espectros integrantes da biblioteca. Para a seleção final de espectros, o *MESMA* foi aplicado sobre a imagem referência, inicialmente utilizando-se apenas 2 componentes, sendo o primeiro proveniente da biblioteca espectral e o segundo, sombra fotométrica. Os parâmetros definidos nessa etapa foram: -0.05 e 1.05 para fração mínima e máxima permitida de componente, respectivamente, 0.80 para fração máxima de sombra permitida e 0.025 para *RMSE*. A mesma biblioteca espectral foi também aplicada sobre a imagem de 2001, utilizando-se os mesmos parâmetros.

A partir dos resultados gerados, foram selecionados para compor uma nova biblioteca espectral aqueles espectros que modelaram maior quantidade de pixels nas duas imagens e ao mesmo tempo geraram menores valores de *RMSE*. Tais pixels foram inspecionados visualmente na imagem Quickbird (para os resultados obtidos sobre a imagem de 2006) e na imagem IKONOS (para os resultados obtidos sobre a imagem de 2001) a fim de confirmar sua adequação às componentes que os modelaram.

Procedeu-se então com a criação de uma máscara sobre os pixels das imagens das duas datas (uma máscara para cada imagem) não modelados segundo os critérios adotados, e sobre estes foi aplicado o modelo *MESMA* com 3 componentes, sendo os dois primeiros compostos pelos espectros selecionados segundo a metodologia descrita anteriormente, e o terceiro, sombra fotométrica. Uma nova máscara foi criada para os pixels não modelados através de 2 ou 3 componentes, e sobre estes aplicou-se o modelo *MESMA* com 4 componentes, sendo os três primeiros compostos por espectros da biblioteca e o quarto, sombra fotométrica. Estudos anteriores demonstraram que a utilização de mais componentes não resulta em melhores resultados (POWELL et al., 2007). Portanto, os pixels não modelados através de 2, 3 ou 4 componentes foram incluídos na classe "não modelados". Todas as frações resultantes foram normalizadas segundo à fração de sombra.

Com a adoção da metodologia descrita, pode-se considerar os pixels selecionados como sendo os mais representativos da biblioteca espectral bem como os mais representativos da área em estudo. Portanto, a mesma biblioteca foi utilizada para a aplicação do *MESMA* sobre a imagem de 1987.

2.4 Avaliação dos Resultados

As frações resultantes da aplicação do *MESMA* sobre as imagens Landsat TM de 2006 e 2001 foram avaliadas utilizando-se como referência as imagens Quickbird e Ikonos, respectivamente. Para a realização da validação, foram selecionadas amostras aleatórias com tamanho equivalente a 9 pixels *Landsat TM* (90m x 90m), a fim de minimizar os erros devido às distorções geométricas entre as imagens fração e as imagens de alta resolução espacial e à influência dos alvos vizinhos na resposta espectral de determinado pixel (POWELL et al., 2007).

Foram selecionadas 98 amostras na imagem Quickbird, e 68 na imagem Ikonos. As amostras foram classificadas através de interpretação visual e vetorização manual, para posterior comparação com as frações resultantes do *MESMA*.

A acurácia das frações e das componentes dominantes modeladas foi avaliada utilizando-se todo o conjunto de amostras, separadamente para cada data, através do cálculo do índice de exatidão global (EG) e *Kappa* (κ) (COHEN, 1960; CONGALTON, 1999), a partir da matriz de confusão. Para o cálculo da acurácia das componentes dominantes, cada amostra foi denominada como pertencendo à componente que correspondia à maior fração modelada. Como a acurácia das componentes dominantes não representam bem a acurácia das áreas heterogêneas modeladas, foi calculada também a acurácia das frações de componentes, as quais foram agrupadas nos seguintes intervalos na matriz de confusão: 0%, 0 – 10%, 10 – 25%, 25 – 50%, 50 – 75%, 75 – 90% e 90 – 100% (Dennison e Roberts, 2003).

Foi realizado ainda um teste estatístico Z para avaliar individualmente os valores de *Kappa* obtidos, a fim de verificar se os resultados foram significativamente melhores que uma classificação casual. O objetivo é testar as seguintes hipóteses: a classificação se deu devido ao acaso e não, ou seja, não há evidências para se afirmar que os resultados obtidos não foram significativamente melhores que em uma classificação casual. Para que se rejeite, o valor de deve ser maior ou igual ao valor de referência de Z. Esse valor, para um nível de significância de 5%, é aproximadamente igual a 1,96.

3. Resultados e discussão

A primeira seleção de componentes, realizada através da aplicação do *Pixel Purity Index* sobre a imagem referência (Landsat TM 2006), identificou 1332 pixels como sendo extremos, ou seja, puros. Depois de inspecionados através da imagem de alta resolução espacial, e da aplicação das métricas *EAR* (*Endmember Average RMSE*), *MASA* (*Minimum Average Spectral Angle*) e *COB* (*Count-based Endmember Selection*) foram selecionados para comporem a biblioteca espectral de entrada do *MESMA*, 142 espectros, sendo 65 de superfícies impermeáveis, 10 de vegetação seca, 16 de solo e 51 de vegetação verde.

Após a aplicação do *MESMA* sobre as imagens de 2006 e 2001, com a biblioteca composta por todos os 142 espectros independentemente dos valores obtidos das métricas, foi verificado que as componentes com menores valores de *EAR*, parâmetro que expressa quão representativo determinado espectro é de sua classe, não foram capazes de modelar algumas regiões da imagem. O mesmo foi observado por Powell (2007), e ocorre em função do pressuposto de que um espectro ser representativo de sua classe não necessariamente representa que o mesmo é representativo dos materiais que compõem a cena em estudo. Por isso, para a seleção final de espectros, procurou-se evitar apenas a confusão entre as classes de componentes, selecionando-se os espectros que resultaram em menores valores de *out_COB*, que modelaram uma maior fração de pixels nas imagens de 2006 e 2001 e geraram valores baixos de erro. Como resultado, foram selecionados 30 espectros para compor a biblioteca

espectral final, sendo 5 espectros de vegetação seca, 14 de superfícies impermeáveis, 6 de solo e 5 de vegetação verde (Figura 2).

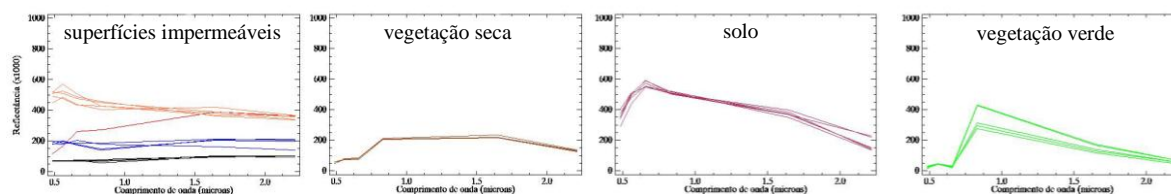


Figura 2. Espectros selecionados para compor a biblioteca espectral final.

Ao todo, 97,7% dos pixels da imagem de 2006 foram modelados, sendo 70,1% através de 2 componentes, 27,4% através de 3 e 0,2 % através de 4. Para o ano de 2001, 98,8% dos pixels foram modelados, sendo 77% através de 2 componentes, 20,9% através de 3 e 0,9% através de 4. E finalmente para o ano de 1987, 99,2% dos pixels foram modelados, sendo 84,5% através de 2 componentes, 14,4% através de 3 e 0,3% através de 4.

Para a geração dos mapas finais de fração das componentes (Figura 3), as frações de cada componente da cobertura do solo, resultantes da aplicação de modelos com 2, 3 e 4 componentes, foram somadas. As componentes vegetação verde e vegetação seca foram unidos em uma única classe para melhor visualização dos mapas de fração, uma vez que a porção de vegetação seca não é significativa.

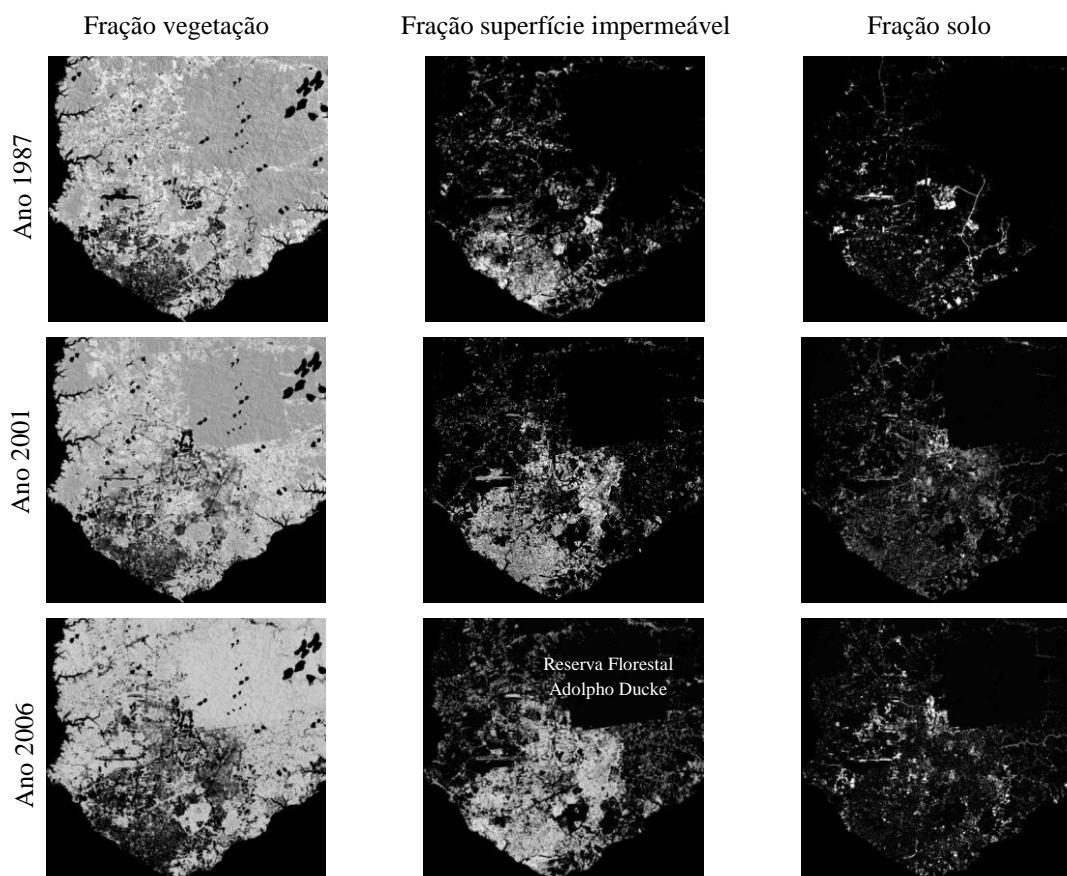


Figura 3. Imagens fração resultantes da aplicação do *MESMA* sobre as 3 datas em análise.

Para a classe dominante, foi obtida exatidão global de 94% e κ igual a 0,89 para a imagem de 2001 e exatidão global de 95% e κ igual a 0,90 para a imagem de 2006. O índice κ obtido para as duas datas é classificado como excelente segundo a literatura. Já pelo método que testa a acurácia

nos intervalos das frações obtidas, a exatidão global para a imagem de 2006 foi de 70,41% e κ igual a 0,62, e exatidão global de 66,18% e κ igual a 0,59 para a imagem de 2001. Nos dois métodos de validação o teste Z indicou que para ambas as datas os resultados obtidos foram melhores que em uma classificação casual, ou seja, foi rejeitado a um nível de 5% de significância.

A distribuição das componentes nas diferentes datas sugere coerência nas frações obtidas. O ano de 1987 apresenta grandes áreas com concentração de solo exposto, enquanto que em 2006 as frações desta componente ocupam áreas menores, e encontram-se menos concentradas e mais dispersas, o que pode estar associado às altas taxas de ocupação e conseqüente indisponibilidade de grandes áreas vagas para novos empreendimentos ou novas obras de infraestrutura. É provável que em função disso que o mapa fração de solo de 2006 apresentou níveis de cinza mais escuros em relação ao de 1987, o que representa valores de fração menores.

A perda de cobertura vegetal ocorrida entre os anos de 1987 e 2006, e um incremento proporcional das áreas impermeáveis, também pode ser visualizado nas frações de vegetação e superfícies impermeáveis. A análise visual dos resultados indica um possível eixo de expansão da ocupação no sentido sudoeste-nordeste, no exato sentido e localização das principais bacias urbanas de Manaus, São Raimundo e Educandos, pode ter sido o responsável pela substituição da cobertura vegetal por superfícies impermeabilizadas. Segundo Oliveira (2008), os igarapés serviram como eixos de expansão urbana em Manaus, o que pode explicar o eixo visualizado na imagem-fração de superfícies impermeáveis. Tal expansão foi limitada pelos limites sul e oeste da Reserva Florestal Adolpho Ducke, cujos limites são realçados na fração de superfícies impermeáveis do ano de 2006 em relação ao de 1987.

4. Conclusões

Os resultados deste trabalho indicaram ser possível, através das componentes vegetação, superfícies impermeáveis e solo obtidas a partir de imagens multitemporais, identificar mudanças na cobertura do solo urbano, em especial através da componente superfícies impermeáveis, a qual dá um indicativo de quais áreas estão sendo ocupadas e da taxa de adensamento das mesmas.

Através do mapa de fração de superfícies impermeáveis, observou-se um possível eixo de expansão no sentido sudoeste-nordeste, no exato sentido e direção da bacia hidrográfica do São Raimundo. A Reserva Florestal Adolfo Ducke pode estar sofrendo pressão demográfica, uma vez que a expansão urbana já atingiu seus limites, visíveis nas frações de vegetação e superfícies impermeáveis, esta última sugerindo também o surgimento de novas centralidades.

Uma única biblioteca espectral poderia ser utilizada para modelar imagens de datas diversas, desde que estas sejam do mesmo sensor e cubram a mesma área. É indispensável calibrar a biblioteca espectral através da aplicação da mesma em uma data diversa daquela em que os espectros foram selecionados e para a qual haja a possibilidade de avaliar os resultados através de uma imagem de alta resolução espacial. A imagem de alta resolução espacial faz-se indispensável também no processo de seleção dos espectros da biblioteca, etapa fundamental para a obtenção de bons resultados. Mais esforços devem ser despendidos em análises de outras áreas urbanas, que não Manaus, para verificar a aplicabilidade desta metodologia.

Referências bibliográficas

ADAMS, J. B.; SABOL, D. E.; KAPOV, V.; ALMEIDA FILHO, R.; ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O. et al. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, v. 52, p. 137-154, 1995.

ADAMS, J. B., SMITH, M. O., JOHNSON, P. E. Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis. In: PIETERS, C. M.; ENGLERT, P. A. J. **Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition**. Cambridge, England: Cambridge University Press, p. 145-165, 1993.

CANTY, M. J.; NIELSEN, A. A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.3, p. 1025-1036. 2008

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, v. 20, p. 37– 46, 1960.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Gerenciamento da cheia de Manaus – evento 2008**, 2008. Disponível em < [http:// www.cprm.gov.br/rehi/manaus/pdf/re_l_final_2008.pdf](http://www.cprm.gov.br/rehi/manaus/pdf/re_l_final_2008.pdf)>

CONGALTON, R. A review of assessment the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, p. 35– 46, 1991.

DAI, X.; KHORRAM, S. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1566-1577, 1998.

DENNISON, P. E.; ROBERTS, D. A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. *Remote Sensing of Environment*, v. 87, p. 123-135, 2003.

HAACK, B. N.; RAFTER, A. Urban growth analysis and modeling in the Kathamandu valley, Nepal. **Habitat International**, v. 30, n. 4, p. 1056-1065, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contagem da população 2007**. Disponível em < [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/ default.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/default.shtm)> Acessado em 12/01/2009.

JAT, M. K.; GARG, P. K.; KHARE, D. Monitoring and modeling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, p. 26-43, 2008.

OLIVEIRA, J. A. de. Espaço-tempo de Manaus: a natureza das águas na produção do espaço urbano. *Espaço e Cultura - UERJ*, n. 23, p. 33-41, 2008.

PAUL, M. J.; MEYER, J. L. Streams in the urban landscape. **Annual Review of Ecological Systems**, v. 32, p. 333-365, 2001.

PHINN, S.; STANFORD, M.; SCARTH, P.; MURRAY, A. T.; SHYY, T. Monitoring the composition and form of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by sub-pixel analysis techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 20, p. 4131-4153, 2002.

POWELL, R. L.; ROBERTS, D. A.; DENNISON, P. E.; HESS, L. L. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, n. 106, p. 253-267, 2007.

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**, v. 16, p. 2165-2185, 1995.

ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, p. 267– 279, 1998.

ROBERTS, D.; HALLIGAN, K.; DENNISON, P. VIPER Tools user manual. UC Santa Barbara, Department of Geography, Visualization and Image Processing for Environmental Research Laboratory, 2007. Disponível em <<http://www.vipertools.org/?q=content/envi-plugin-0>>. Acessado em 12/01/2009.

SMALL, C. A global analysis of urban reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, n. 26, p. 661-681, 2005.