



**XVII ENANPUR**

SÃO PAULO • 2017



# **O MODELO VIS (VEGETAÇÃO- IMPERMEABILIZAÇÃO-SOLO) PARA ANÁLISES URBANAS A PARTIR DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

**VIS Model (Vegetation-Impervious-Soil) for  
urban analysis based on remote sensing data**

*Mayumi Cursino de Moura Hirye, Instituto Nacional de  
Pesquisas Espaciais - INPE, [mayhirye@hotmail.com](mailto:mayhirye@hotmail.com)*

*Diógenes Salas Alves, INPE, [dalves@dpi.inpe.br](mailto:dalves@dpi.inpe.br)*

*Hermann Johann Heinrich Kux, INPE, [hermann@dsr.inpe.br](mailto:hermann@dsr.inpe.br)*

## Resumo

O artigo discute a utilização de dados de sensoriamento remoto em estudos urbanos, oferecendo um quadro atual dos sensores disponíveis para aplicações urbanas. Apresenta como estudo de caso, a análise da expansão da cidade de Altamira (PA) entre os anos de 2000 e 2010 a partir de dados de sensoriamento remoto de média resolução espacial e do modelo Vegetação-Impermeabilização-Solo (VIS). O trabalho mostra a particular utilidade do modelo VIS para a análise de cidades como Altamira, pouco consolidadas e que apresentam um acentuado processo de crescimento.

**Palavras Chave:** sensoriamento remoto; modelo VIS; expansão urbana

## Abstract

This article describes remote sensing data in the context of urban studies, offering a current picture of the sensors available for urban applications. It presents as a study case, the analysis of urban expansion of Altamira (PA) between 2000 and 2010, based on remote sensing data of medium spatial resolution and the Vegetation-Impervious-Soil (VIS) model. It was shown the particular utility of the VIS model for analysis of cities such as Altamira, which are not consolidated and exhibit a rapid growth process.

**Keywords:** remote sensing, VIS model, urban expansion

## INTRODUÇÃO

Sensoriamento remoto, definido de maneira simples e curta, envolve a obtenção de informações sobre objetos distantes, sem contato com os mesmos (ESTES *et al.*, 2001). Em conjunto com técnicas de interpretação visual ou de processamento digital de imagens, o sensoriamento remoto oferece instrumental para a observação do território e suas transformações ao longo do tempo. As vantagens da obtenção de informações por meio do sensoriamento remoto estão associadas à possibilidade de coleta sistemática e remota de dados, de sensoriamento de extensas áreas e de economia de recursos humanos e econômicos em relação aos custos da coleta em campo.

Além da produção de mapas de cobertura do solo urbano, os dados de sensoriamento remoto são insumos para diversos tipos de estudos urbanos. Para análises socioeconômicas, a integração de dados de sensoriamento remoto com dados de outras fontes pode ser utilizada na estimativa e distribuição da população e de indicadores sociodemográficos. A análise ambiental pode ser feita a partir de mapeamentos de superfícies impermeabilizadas, de vegetação urbana ou de características físicas, como a topografia ou a temperatura das superfícies. Os dados de sensoriamento remoto também podem ser dados de entrada em modelos de dinâmica urbana (crescimento, dispersão ou mudança de uso e cobertura) e de ecologia urbana (sequestro de carbono, qualidade do ar, clima, hidrologia ou distribuição da fauna). Aplicações mais recentes envolvem a modelagem tridimensional do ambiente urbano.

A aquisição de imagens de sensoriamento remoto a partir de satélites iniciou-se na década de 1970, quando o primeiro satélite Landsat foi lançado, possibilitando o monitoramento global e sistemático da Terra. A partir disso, os sensores e satélites têm evoluído continuamente. Almeida (2010) diferencia três gerações de satélites para estudos urbanos:

- a geração dos primeiros satélites, inaugurada com LANDSAT 1 e caracterizada pela baixa resolução espacial das imagens (o sensor MSS a bordo dos satélites LANDSAT 1, 2 e 3 possuía resolução espacial de 80m);
- a segunda geração, que corresponde aos satélites lançados a partir de 1980 com sensores de média resolução espacial (de 30 m, como o do sensor TM, a bordo dos satélites LANDSAT 4 e 5, a 10m, como o do sensor a bordo dos satélites SPOT 1, 2 e 3);
- a terceira geração, dos sensores de alta resolução (menos de 10m) e altíssima resolução (menos de 1m) que teve como marco o lançamento do primeiro satélite comercial, o IKONOS, e se estende até a atualidade.

O desenvolvimento tecnológico dos satélites e sensores deve ser acompanhado pelo desenvolvimento de técnicas robustas para a caracterização urbana a partir dos dados de sensoriamento remoto. Isso implica na melhoria dos algoritmos e métodos de classificação para a extração de informações e também na proposição de modelos conceituais adequados para descrever essas informações, em termos de atributos e relações. Além disso, os métodos e técnicas de sensoriamento remoto urbano devem ser operacionalizados de maneira que possam ser incorporados nas rotinas de planejamento urbano.

O modelo Vegetação-Impermeabilização-Solo (VIS), proposto por Ridd (1995) é um modelo conceitual que fornece uma chave para a classificação da cobertura do solo urbano. Pensado para os dados de sensoriamento remoto, o modelo VIS é simples, mas poderoso. A partir da composição VIS das cidades ou trechos delas, é possível estabelecer comparações, observar trajetórias de desenvolvimento urbano ou alimentar modelos de fluxo de energia ou água.

O presente artigo tem como objetivo apresentar, na seção 1, alguns aspectos do sensoriamento remoto urbano, oferecendo um quadro atual dos sensores disponíveis para aplicações urbanas. Adicionalmente, o artigo apresenta, na seção 4, um estudo de caso que exemplifica a utilização do modelo VIS para análise urbana a partir de dados de sensoriamento remoto de média resolução espacial. Esses dados são bastante utilizados pois permitem a composição de longas séries temporais e são de livre distribuição. O estudo de caso é a análise da expansão da cidade de Altamira entre os anos de 2000 e 2010. Por fim, na seção 2, é apresentado o modelo VIS e algumas de suas utilizações e, na seção 3, são abordados os problemas inerentes à média resolução espacial e as técnicas usualmente empregadas para a classificação dessas imagens.

## 1. SENSORES PASSIVOS PARA APLICAÇÕES URBANAS

Os sensores remotos passivos são instrumentos que captam a radiação eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos distantes, ou alvos. Distintos dos sensores ativos, como o radar ou o LIDAR, que emitem energia em direção ao alvo e registram o sinal refletido, os sensores passivos captam a radiação eletromagnética que provem do Sol e é refletida pelos alvos. A radiação medida pelos sensores passivos é relacionada não somente com as características dos alvos, mas também depende das características do sensor, do ângulo de visada do sensor e da iluminação no momento do imageamento, de interações da radiação eletromagnética com a atmosfera (que resultam na absorção e/ou espalhamento da radiação pelos gases partículas que constituem a atmosfera) e da orientação geométrica dos materiais na superfície, incluindo a topografia (SMITH *et al.*, 1990).

Os sensores passivos possuem quatro características principais: suas resoluções radiométrica, temporal, espacial e espectral. A resolução radiométrica refere-se à quantidade de níveis em que a radiação eletromagnética que chega ao sensor será discretizada; a maior resolução radiométrica significa que a informação será expressa em mais níveis de valores e, portanto, terá mais nuances.

A resolução temporal é a frequência de aquisição de informação pelos sensores: satélites meteorológicos, por exemplo, são capazes de adquirir imagens horárias ou diárias. A resolução espacial está relacionada ao campo de visada instantânea de cada sensor, ou seja, a menor unidade de área na superfície terrestre imageada pelo sensor. Nas imagens resultantes do sensoriamento remoto, o tamanho do pixel é o tamanho do campo de visada instantâneo. Existe um compromisso entre a resolução temporal e a espacial: quanto maior uma, menor a outra.

A resolução espectral diz respeito à sensibilidade do sensor para captar a radiação eletromagnética em um número específico de faixas ou intervalos de comprimentos de ondas eletromagnéticas, chamados de bandas espectrais. Cada material tem uma resposta, ou assinatura, espectral específica.

O ambiente urbano é caracterizado pela heterogeneidade das superfícies, com grande variação espectral intrapixel e interpixel (YANG, 2011). Tomando amostras da área urbana de Santa Bárbara e Goleta, no estado da Califórnia (EUA), Herold *et al.* (2004) propuseram uma biblioteca com dados da resposta espectral de diversos materiais urbanos, hierarquizada a partir dos níveis I e II da classificação de cobertura e uso do solo proposta por ANDERSON *et al.* (1976) (Tabela 1).

Tabela 1 – Materiais de cobertura do solo urbano organizados segundo o nível hierárquico

Nível I	Nível II	Nível III
1. Áreas construídas	1.1 Edifícios / coberturas	1.1.1 Telha composta
		1.1.2 Plástico
		1.1.3 Vidro
		1.1.4 Cascalho
		1.1.5 Metal
		1.1.6 Asfalto
		1.1.7 Telha de barro
		1.1.8 Cobertura de betume
		1.1.9 Telha de madeira
	1.2 Áreas de circulação	1.2.1 Via de asfalto
		1.2.2 Via de concreto
		1.2.3 Via de cascalho
		1.2.4 Estacionamento
1.2.5 Linha férrea		
1.2.6 Calçada		
1.2.7 Pintura de via		
1.3 Infraestrutura de esportes	1.3.1 Quadra de tênis	
	1.3.2 Pista de atletismo	
	1.3.3 Quadra de basquete	
2. Vegetação	2.1 Vegetação verde	
	2.2 Vegetação não-fotossintética	
3. Áreas não-construídas de solo exposto	3.1 Solo exposto	
	3.2 Praia	
	3.3 Afloramentos rochosos	
4. Corpos d'água	4.1 Corpo d'água natural ou quase-natural	
	4.2 Piscinas	

Fonte: adaptado de Herold et al. (2004).

O nível I apresenta os quatro principais tipos de cobertura do solo: áreas construídas, vegetação, áreas não-construídas de solo exposto e corpos d'água. O nível II apresenta, para as áreas construídas, tipos de cobertura do solo baseados em seu uso, função ou outra característica genérica evidente. Para os demais tipos principais de cobertura do solo, o nível II define classes mais abrangentes. O nível III subdivide as áreas construídas de acordo com as propriedades do material utilizado. A biblioteca espectral proposta pelos autores consiste de 4.500 assinaturas espectrais, categorizadas em 108 tipos de cobertura. A partir da análise da biblioteca de materiais urbanos, os autores concluíram que as características espectrais, mesmo que expressas em mais de duas centenas de bandas espectrais, não são capazes de diferenciar inequivocamente determinados materiais. Dentre os materiais da biblioteca, confundem-se: vias de concreto e áreas de solo exposto; vias de asfalto e telhas compostas, cobertura de betume ou telhas de cor cinza; telhas de cor cinza e telhas compostas ou cobertura de betume; vias de asfalto e áreas de estacionamento (HEROLD *et al.*, 2004).

Mesmo com imagens de sensores de alta resolução espectral, a análise de imagens a partir apenas de atributos espectrais encontra limitações para níveis maiores de detalhamento. A 'Análise Orientada a Objetos Geográficos' ('*Geographic Object Image Analysis*' – GEOBIA) é uma abordagem que propõe superar algumas das limitações das análises fundadas nos atributos espectrais dos *pixels*. GEOBIA pode ser definido como "o processo de segmentação e de classificação de imagens conduzidos de forma a gerar segmentos ou objetos com características próximas ou iguais aos objetos reais da cena" (BENZ *et al.*, 2004). Embora sejam também aplicadas a imagens de média e baixa resolução espacial, é nas imagens de alta e altíssima resolução espacial que as técnicas de GEOBIA mostram-se especialmente vantajosas (BLASCHKE, 2010). Um

dos fatores mais evidentes é a capacidade de discriminar feições de interesse em ambientes intraurbanos reduzindo ruídos e a variabilidade espectral intra e interclasses típicas das imagens de alta resolução espacial. Para tanto, os objetos são definidos a partir de atributos de tamanho, forma, localização e textura, entre outros, ademais de atributos espectrais.

São as características dos objetos a serem mapeados e a natureza do estudo urbano a ser realizado que devem nortear a escolha da imagem de sensoriamento mais adequada. Sob este ponto de vista, os aspectos mais relevantes das imagens a serem observados são a resolução espacial e espectral, possibilidade de compor séries temporais e política de distribuição das imagens. Assim as imagens de satélites disponíveis para estudos urbanos (com resolução espacial menor que 30m) são apresentadas na Figura 1. Destaca-se que foram elencadas as imagens orbitais de sensores passivos, excluindo-se, portanto as de sensores ativos (como radares e LIDAR) e as obtidas por dispositivos suborbitais (veículos aéreos não tripulados – VANTS ou aviões). Além disso, não foram incluídas as imagens de alta resolução espectral (hiperespectrais), que possuem centenas de bandas, estreitas e contínuas, cobrindo todo o espectro.

Se os sensores com maior resolução espacial permitem o detalhamento das estruturas urbanas, captando toda a variedade e complexidade da cobertura do solo urbano, os sensores de menor resolução espacial proporcionam uma visão sinótica das cidades, em que são ressaltadas as características mais expressivas que distinguem, por exemplo, áreas urbanizadas de não urbanizadas ou áreas de alta e baixa densidades. Em geral, os sensores de maior resolução espacial são comerciais. O único sensor que disponibiliza imagens gratuitamente é o CBERS 2B/HRC e o CBERS 4/PAN, ambos frutos da cooperação entre agências espaciais brasileiras e chinesas.

A resolução temporal e o tempo de vida útil dos satélites são determinantes para a obtenção de longas séries temporais. Satélites não-comerciais são, em geral, parte de programas de monitoramento da Terra e fornecem imagens regularmente, enquanto que imagens de satélites comerciais são, em geral, adquiridas sob demanda. Merece destaque o Landsat 5, que foi um satélite excepcionalmente longevo e obteve imagens de qualquer ponto do globo terrestre a cada 16 dias por quase 30 anos.

Em termos da resolução espectral na região do visível (comprimentos de onda de 400 a 700nm), os sensores apresentam pequena variação: a maioria deles possui bandas nos comprimentos de onda do azul, verde e vermelho. Os worldview II e III possuem bandas em comprimentos de onda baixos (coastal) e entre as bandas do verde e vermelho (no comprimento que corresponde ao amarelo); o ResourceSat-1 / LISS-III, TERRA/Aster, Spots 1 a 5 e o CBERS/Pan por outro lado, possuem apenas as bandas do azul e vermelho. A energia eletromagnética na região do visível é capaz de sensibilizar o olho humano, transmitindo a sensação das cores. As bandas nessa região do espectro são utilizadas para diferenciar materiais como água, vegetação, superfícies impermeabilizadas e solo exposto, entre outros.

Determinados minerais e materiais de coberturas de edifícios, aerossóis e características da vegetação podem ser captadas por comprimentos de onda na região do infravermelho. Todos os sensores possuem pelo menos uma banda na região do infravermelho próximo (700 a 1400nm), devido ao fato da vegetação apresentar comportamento bastante destacado nessa região, refletindo a maior quantidade de radiação eletromagnética nesses comprimentos. Por outro lado, nem todos os sensores possuem bandas na região do infravermelho de ondas curtas (1400 a 3000nm). Apenas o WorldView III possui bandas nessa região com resolução espacial menor que 10m. As bandas pancromáticas são bandas largas que cobrem todo o espectro de cores. Nessas bandas a resolução espacial pode ser menor que 0,5m.

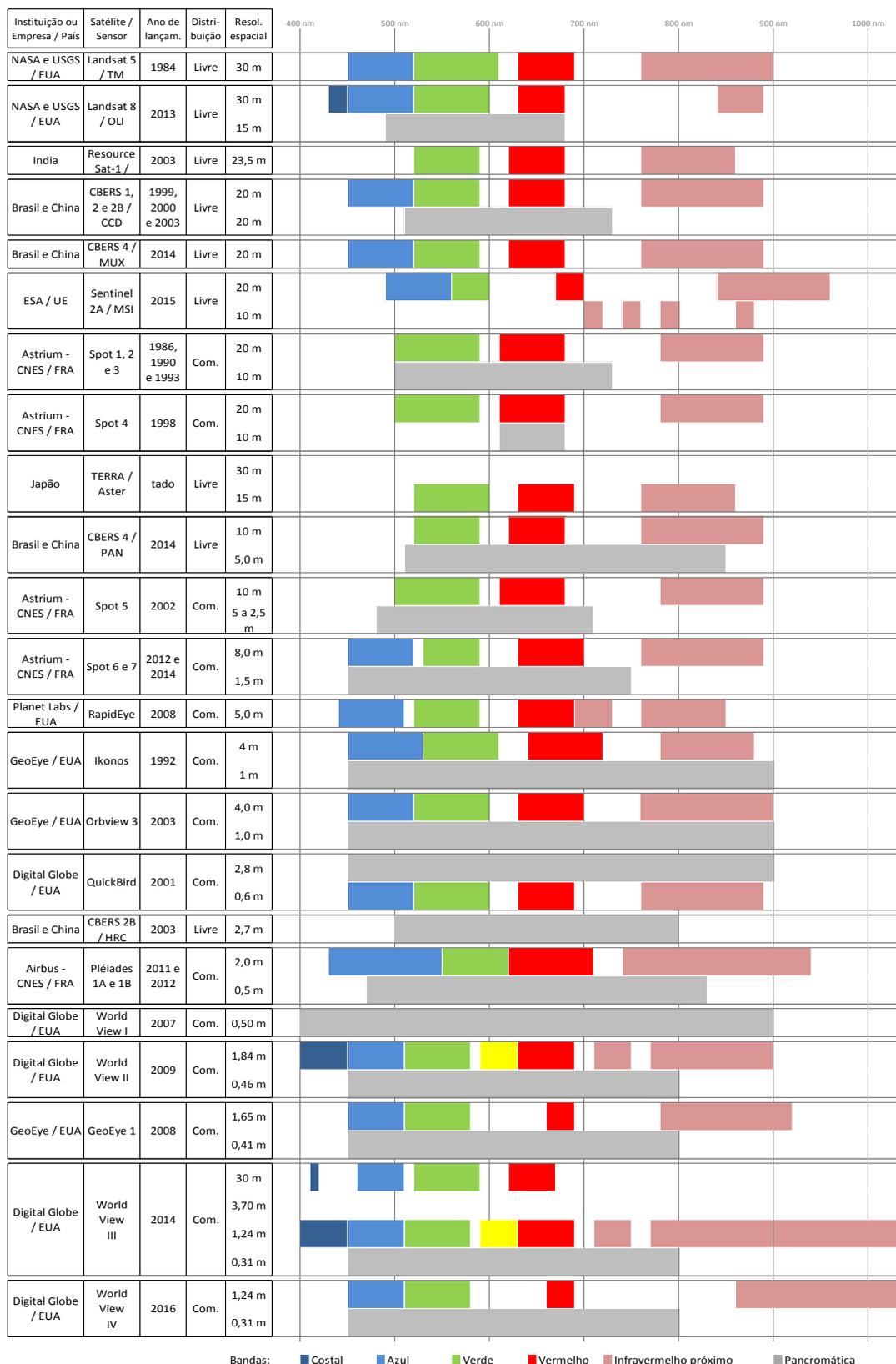
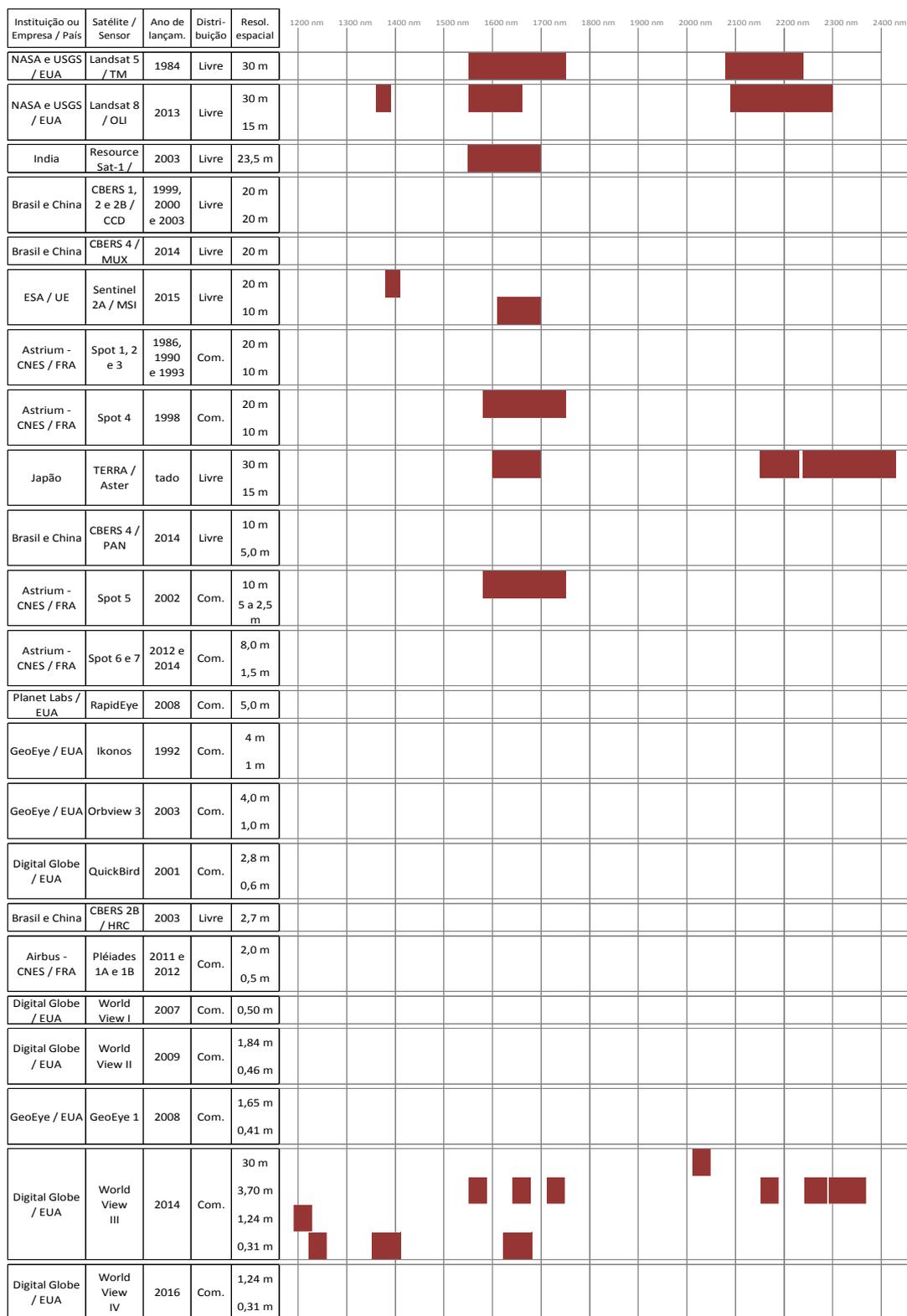


Figura 1 – Características das imagens de satélite disponíveis para estudos urbanos.



Bandas: ■ Infravermelho de ondas curtas

Figura 1 – Características das imagens de satélite disponíveis para estudos urbanos (cont.).

## 2. O MODELO VEGETAÇÃO-IMPERMEABILIZAÇÃO-SOLO (VIS)

O modelo VIS foi proposto por Ridd (1995) para o estudo da morfologia urbana a partir da cobertura do solo, para a parametrização biofísica dos componentes do ambiente urbano necessária na construção de modelos de fluxo de energia e para a análise do sistema social com base em dados demográficos, de infraestrutura ou qualidade ambiental que possam ser inferidos a partir de imagens de satélite (RIDD, 1995).

O diagrama do modelo VIS foi desenvolvido à semelhança do diagrama ternário de areia, argila e silte, com os vértices ocupados pelos três componentes, vegetação, impermeabilização e solo. Qualquer ponto dentro do diagrama corresponde a uma determinada composição percentual de VIS (Figura 2). Esse ponto pode ser um pixel de uma imagem de sensoriamento remoto. Entretanto, Ridd (1995) afirma que a análise urbana só é possível quando os pixels são agregados em unidades espaciais, chamadas por ele de ecounidades. A lógica utilizada para agregar os pixels, assim como o tamanho ou a forma das ecounidades, é dependente dos objetivos da análise pretendida.

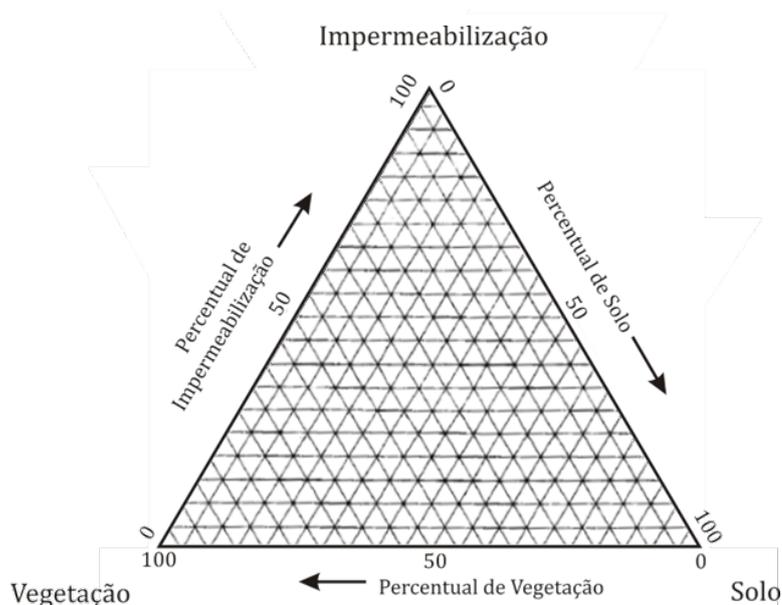


Figura 2 – Representação do modelo VIS.  
Fonte: adaptado de Ridd (1995).

Por ser um modelo simples, mas poderoso, ele é amplamente utilizado em estudos de diversas cidades ao redor do globo (OKUJENI *et al.*, 2015; TANG e WANG, 2012; WENG e LU, 2009; POWELL e ROBERTS, 2008 e 2010; POWELL *et al.*, 2007; LU e WENG, 2004; WU e MURRAY, 2003; PHINN *et al.*, 2002; MADHAVAN *et al.*, 2001; entre outros).

Diagramas ternários de VIS foram propostos para diversas cidades, com resultados distintos. Em um teste piloto, Ridd (1995) propôs um diagrama para Salt Lake, no Estados Unidos, explicitando a composição VIS de diferentes classes de uso do solo (área central, comercial, área residencial de alta densidade etc.). Madhavan *et al.* (2001) propuseram diagramas semelhantes para Bangkok (Tailândia) em dois anos (1988 e 1994). A partir do modelo VIS, os autores analisaram as transformações da cidade, observando a forte ampliação das áreas residenciais e comerciais, que se deu sobre áreas de vegetação e de ocupação esparsa próximas à área central da cidade.

Phinn *et al.* (2002) aplicaram o modelo VIS a Brisbane (Austrália), observando que a maior proporção do componente solo ocorreu em áreas de consolidação urbana no interior da cidade e em áreas residenciais novas no subúrbio. Powell e Roberts (2010) também observaram que o componente solo é característico das áreas que estão sendo ocupadas. Os autores analisaram a expansão de nove cidades no estado de Rondônia / BR entre 1985 e 2000 e concluíram que a trajetória de ocupação e consolidação das cidades pode ser caracterizada pela: situação inicial, quando predomina cobertura de floresta primária; fase subsequente, quando ocorre o desflorestamento e surgimento do “campo urbano”, representado pelo aumento da proporção de solo; fase do início da urbanização, quando aparecem áreas impermeabilizadas em proporções variadas; e situação final, de consolidação do assentamento, com o aumento da proporção de vegetação (arborização urbana ou revegetação de áreas abertas). Na Figura 3, o diagrama ternário apresentado pelos autores mostra a trajetória da ocupação em termos da composição VIS de cada fase.

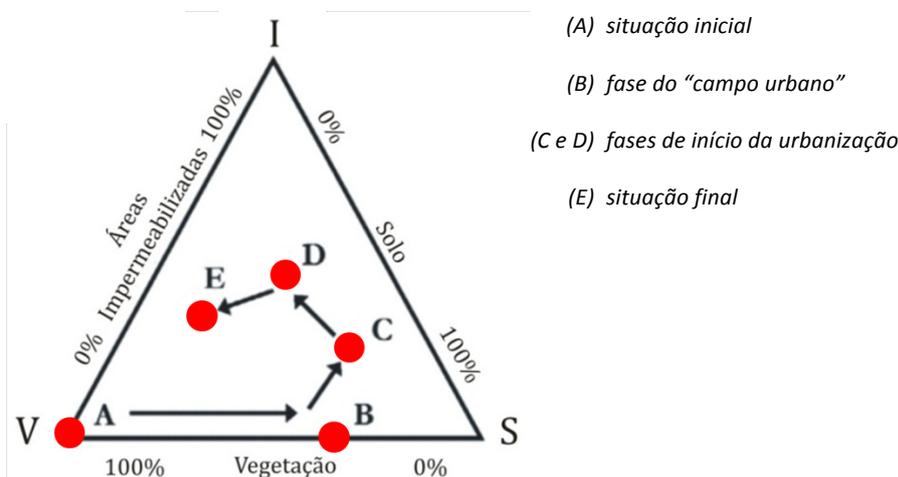


Figura 3 - Representação da trajetória de desenvolvimento de núcleos urbanos na fronteira de ambiente de floresta tropical, proposto por Powell e Roberts (2010).  
 Fonte: adaptado de Powell e Roberts (2010).

A Figura 4 ilustra a trajetória de ocupação em imagens de satélite de média resolução espacial, para um bairro da cidade de São José dos Campos: inicialmente a área tem a tonalidade verde, devido ao recobrimento de vegetação; no período intermediário, há a retirada da vegetação e ocorrem as obras de terraplenagem e a área apresenta tonalidade rosa uniforme, devido às áreas de solo exposto; no período final, já estão construídas as edificações e demais estruturas urbanas resultando na textura que mistura tons de roxo (das áreas impermeabilizadas) e de verde (da vegetação).

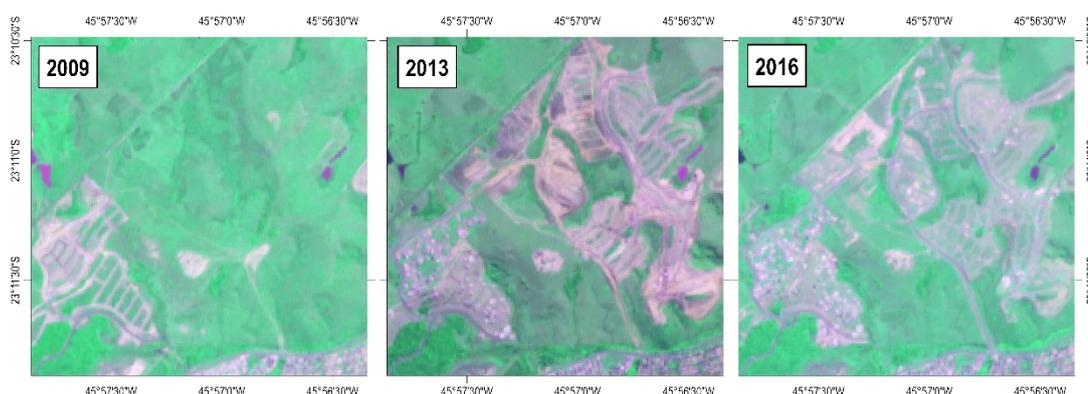


Figura 4 – Trajetória de ocupação de novo bairro em São José dos Campos.

Lu e Weng (2004) argumentaram que o modelo VIS é de difícil implementação, devido justamente à componente áreas impermeabilizadas, que, embora fundamental na composição teórica da paisagem, é, na realidade, uma combinação complexa de materiais, de difícil identificação e que varia de acordo com a localidade considerada. Por outro lado, a sombra é um importante componente capturado pelas imagens. Assim, os autores propuseram um modelo conceitual que considera nos vértices do diagrama ternário os componentes obtidos diretamente das imagens de satélite de média resolução (Landsat/TM): sombra; vegetação fotossinteticamente ativa e solo/áreas impermeabilizadas.

### 3. IMAGENS DE MÉDIA RESOLUÇÃO ESPACIAL E O PROBLEMA DE MISTURA DO PIXEL

As imagens de média resolução espacial, em sua maioria, possuem as séries temporais mais longas e são disponibilizadas gratuitamente. Entretanto, a resolução espacial é limitadora da diferenciação dos alvos. Um mesmo pixel, a depender de seu tamanho, pode conter diferentes alvos (como, por exemplo, parte de um telhado, uma árvore e sua sombra). Assim, o sinal captado pelo sensor é a mistura da resposta dos alvos presentes na área imageada. Na literatura, isso é referido como o problema de mistura do pixel (SHIMABUKURO e SMITH, 1991; LU e WENG, 2004; ADAMS e GILLESPIE, 2006). Esse problema foi identificado e tem sido estudado desde o início da utilização de imagens de média resolução espacial (GILLESPIE *et al.*, 1990).

A abordagem mais comum para lidar com o problema de mistura de pixel tem sido a de decomposição linear de pixels de imagens de média resolução espacial, com destaque para as imagens obtidas com o sensor TM, a bordo dos satélites Landsat (Tabela 2). A decomposição de pixels com algoritmo não-linear ou o sistema de regras baseado em expertise, ou a utilização de imagens de outros sensores, incluindo imagens de alta resolução espacial, mereceram pequena atenção (Tabela 2).

Tabela 2 – Trabalhos de mapeamentos da cobertura do solo urbano de acordo com o tipo de imagem e método utilizados

Método	Satélite e resolução espacial	IKONOS (4m)	ASTER (15m)	LANDSAT (30m)
Modelo Linear de Mistura Espectral		Small (2003) Song (2005)		Phinn <i>et al.</i> (2002) Wu e Murray (2003) Lu e Weng (2004) Song (2005) Small e Lu (2006) Weng e Lu (2009) Tang e Wang (2012)

Satélite e resolução espacial	IKONOS (4m)	ASTER (15m)	LANDSAT (30m)
Método			
Análise de mistura espectral com múltiplos <i>endmembers</i> (MESMA)			Powell <i>et al.</i> (2007) Powell e Roberts (2008) Powell e Roberts (2010)
Erdas Imagine <i>sub-pixel analysis</i> e sistema de regras baseado em expertise			Myint (2006)
Decomposição de pixels com algoritmo não linear (rede neural artificial)		Pu <i>et al.</i> (2008)	

Conforme Adams e Gillespie (2006), a análise de mistura espectral pressupõe um modelo físico que tenta 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 dados 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 compõem a unidade de resolução no solo (SHIMABUKURO; SMITH, 1991).

A maior parte dos estudos admite, em concordância com Adams e Gillespie (2006), que a mistura linear é dominante na escala de imageamento do sensoriamento remoto. São poucos os trabalhos que investigam as características de linearidade da mistura espectral dos materiais de cobertura das cidades. Small (2003) observou que, para cenas de 14 áreas urbanas decompostas em 3 componentes – alto albedo (materiais que refletem grande parte da energia que incide sobre eles), baixo albedo (materiais que absorvem grande parte da energia que incide sobre eles) e vegetação – a mistura espectral é predominantemente linear. O autor observou alguma não-linearidade no eixo dos componentes alto e baixo albedo, que abrangem a diversidade de materiais de cobertura e pavimentação urbana. Para a decomposição da cena urbana em três componentes, vegetação, impermeabilização e solo, Pu *et al.* (2008) concluíram que os melhores resultados foram obtidos com a aplicação de método não-linear.

A variabilidade espectral dos componentes da cena urbana foi tratada pelo modelo de análise de mistura espectral com múltiplos componentes (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* - MESMA), proposto por Roberts *et al.* (1998). O MESMA pressupõe a linearidade da mistura, mas admite que a mistura pode ser variável em relação ao número de componentes e ao espectro que representam cada componente – uma biblioteca de espectros para o MESMA é composta de centenas de espectros.

#### 4. ESTUDO DE CASO: A EXPANSÃO URBANA DE ALTAMIRA (PA)

Altamira está situada na porção central centro do Estado do Pará, na margem esquerda do rio Xingu (Figura 5). 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.

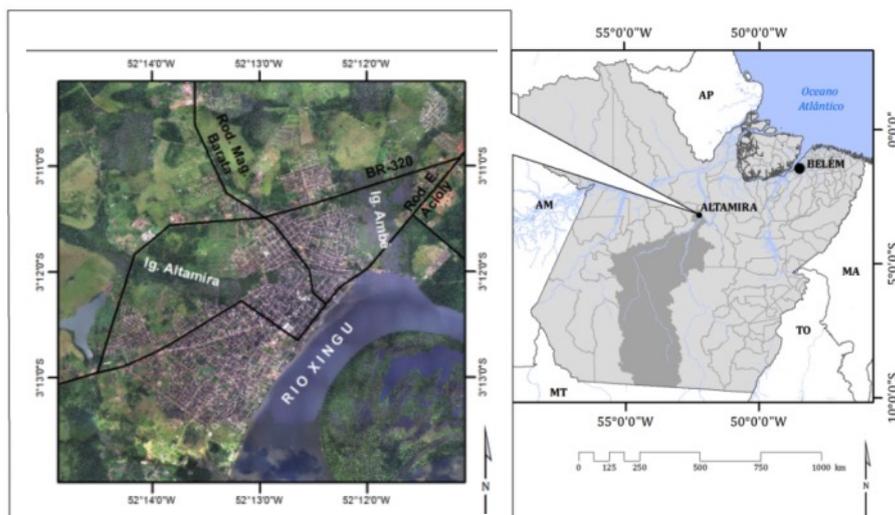


Figura 5 - Localização de Altamira.

A cidade 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, entre 2000 e 2010, o ritmo de crescimento diminuiu, chegando à média de 3% ao ano, quando a população urbana passou de 62 mil para 84 mil pessoas (IBGE, 2013). Após o pico de crescimento da cidade ocorrido na década de 70, vinculado à ocupação da fronteira agrícola e, especificamente, à construção da Rodovia Transamazônica, a construção da UHE Belo Monte, nos anos recentes, pode ser associada a uma nova fase de transformações na cidade.

Apesar dos aportes e esforços governamentais que acompanham os investimentos e programas de desenvolvimento e o crescimento intenso da cidade, sua estrutura física ainda é deficiente. Dados estatísticos (IBGE, 2013) e de campo comprovam a abrangência parcial das redes de abastecimento de água coletivo, coleta e tratamento de esgoto, pavimentação e drenagem de águas pluviais.

### Metodologia

Para a elaboração de mapas de cobertura da terra em Altamira, para as datas de 2000 e 2010, foi aplicado o modelo linear de mistura espectral a imagens do sensor TM conforme detalhado em Hirye *et al.* (2015). As imagens utilizadas foram selecionadas da base de dados da Divisão de Geração de Imagens (DGI/INPE), e são datadas de 28 de julho de 2000 e 24 de julho de 2010 (Figura 6). Adicionalmente, fotografias aéreas de 1999/2000 e 2010 foram utilizadas para a caracterização da área de estudo e para a interpretação e validação dos resultados obtidos.

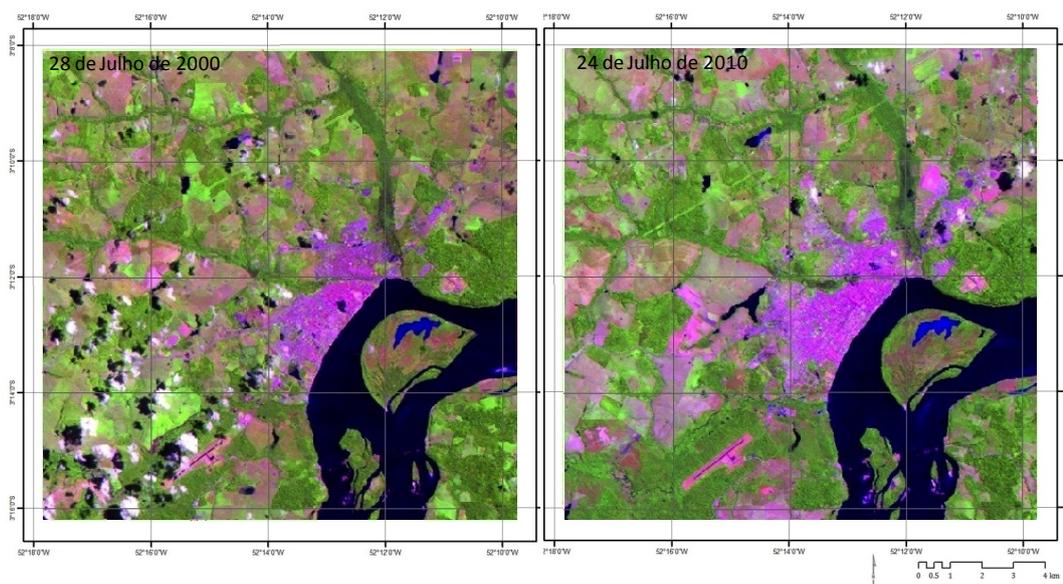


Figura 6 - Altamira nas imagens do sensor TM na composição RGB das bandas 5, 4 e 3 em 2000 (à direita) e em 2010 (à esquerda).

Fonte: INPE, 2012.

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 dados das fotografias aéreas, considerados como a “verdade de campo”. Foram utilizadas 169 e 193 amostras da “verdade de campo” para a avaliação dos mapas de 2000 e 2010, respectivamente. As matrizes de confusão normalizadas permitem a comparação direta dos valores de concordância obtidos em cada data e para cada componente, eliminando a diferença das amostras utilizadas em cada validação.

A análise da expansão urbana de Altamira foi feita a partir dos dados dos mapas de cobertura da terra de 2000 e 2010 plotados em um diagrama ternário de VIS, considerando a classificação dos bairros em: centro, caracterizado como a área de ocupação mais antiga da cidade; bairros com mais de 50% dos lotes ocupados em 2010; e bairros com menos de 50% dos lotes ocupados em 2010. O percentual de lotes ocupados foi a maneira encontrada para caracterizar os bairros que estão em processo de ocupação, daqueles que já tem uma ocupação mais avançada. Adicionalmente, foram identificados os bairros de chácaras: bairros próximos à mancha urbana de Altamira com lotes de área mínima de 2.500 m<sup>2</sup> (PREFEITURA MUNICIPAL DE ALTAMIRA, Lei n° 21.518/200). A classificação dos bairros foi feita com base na identificação da ocupação nas fotografias aéreas de 1999/2000 e 2010 e em trabalhos de campos, descritos detalhadamente em Hirye (2014).

## Resultados e Discussão

Os dois mapas de cobertura da terra (Figura 7) apresentaram exatidão global de 85,2% (2000) e 88,1% (2010). O índice Kappa foi de 0,668 (2000) e 0,751 (2010), com um intervalo de confiança (95%) de  $\pm 0,120$  (2000) e  $\pm 0,09$  (2010). A incorporação dos erros de omissão e comissão no cálculo da exatidão global normalizada faz com que seus valores sejam menores que a exatidão global, sendo 75,2% (2000) e 71,6% (2010). Para um nível de significância de 5%, o teste Z mostrou que ambos os mapas são melhores que uma classificação casual.

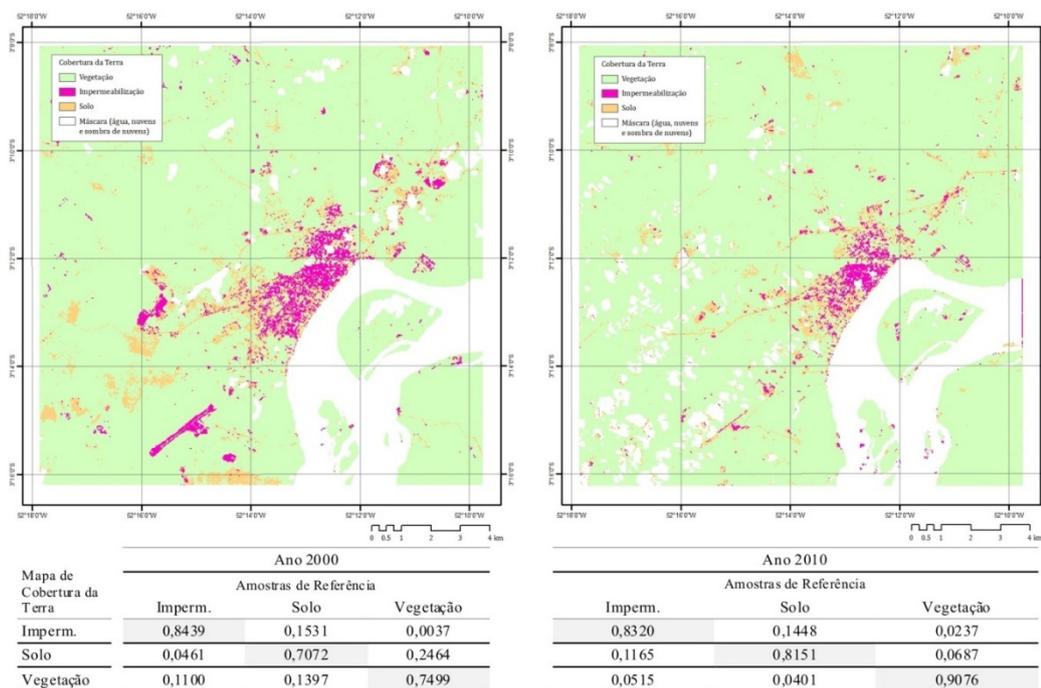


Figura 7 - Mapas de cobertura da terra de Altamira e matrizes de confusão normalizadas.

As frações de vegetação e solo apresentam maior concordância, sendo que a impermeabilização para o ano de 2000 é ligeiramente melhor que para 2010 (Figura 7). 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.

Tomando-se como recorte o perímetro urbano de Altamira vigente em 2010 (PREFEITURA MUNICIPAL DE ALTAMIRA, Lei nº 2.047/2009), a comparação entre os mapas de cobertura da terra de 2000 e 2010 mostrou o crescimento das áreas impermeabilizadas, que chegaram perto de dobrar, e de solo e a diminuição das áreas de vegetação (Tabela 3). Em ambas as datas, mais de 60% da área definida como perímetro urbano era coberta por vegetação

Tabela 3 – Áreas de vegetação, impermeabilização e solo no perímetro urbano de Altamira.

Ano	Vegetação		Impermeabilização		Solo		Sem Informação		Perímetro Urbano definido pela Lei 2.047/2009 (ha)
	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	
2000	66,2	5.935	3,7	328	6,6	596	23,5	2.109	8.970
2010	62,0	5.560	6,1	551	8,3	745	23,5	2.111	

O centro, nas duas datas, foi caracterizado pelo maior percentual de impermeabilização (65%). Entretanto, observou-se uma pequena diminuição das áreas de solo exposto e o aumento do percentual de vegetação, configurando a etapa da consolidação do assentamento descrita por Powell e Roberts (2010). Nas duas datas, a vegetação predominou nos bairros de chácaras, cobrindo perto de 80% da área, enquanto que a participação do solo ficou entre 10 e 15% e da impermeabilização, perto de 5%. Entre 2000 e 2010, a expansão das áreas urbanizadas de Altamira

ocorreu tanto nos bairros com mais de 50% de lotes ocupados em 2010 quanto nos com menos de 50% de lotes ocupados (Figura 7).

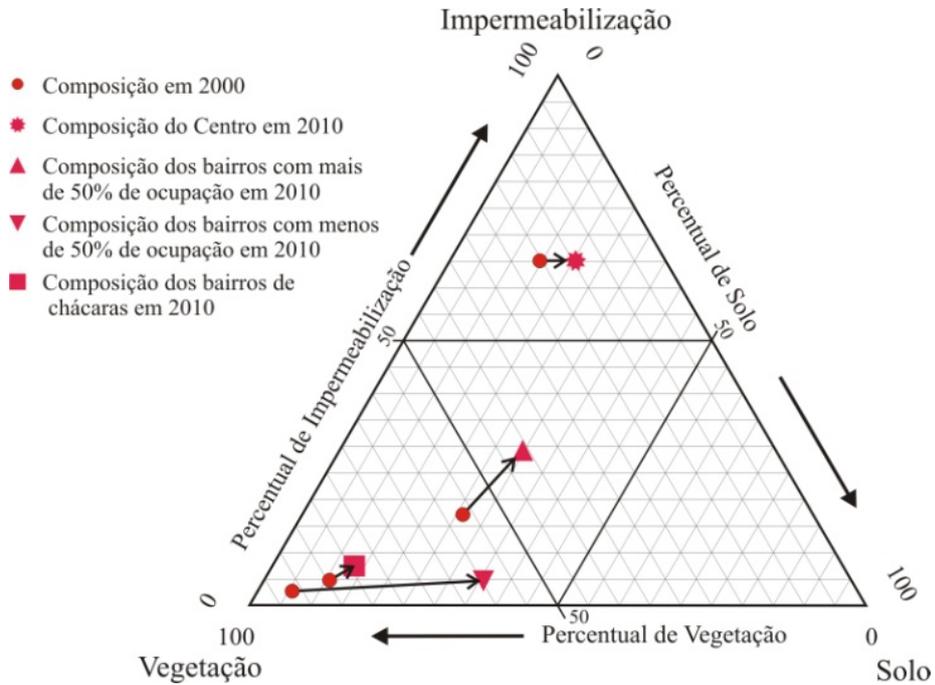


Figura 7 – Diagrama ternário da composição VIS dos bairros de Altamira em 2000 e 2010.

Nas áreas dos bairros com mais de 50% dos lotes ocupados, observou-se o aumento da impermeabilização (de 17% para 29%) e a diminuição da componente vegetação (de 56% para 41%), enquanto o percentual de solo apresentou menor variação (de 27% para 30%). Nas áreas dos bairros com menos de 50% dos lotes ocupados em 2010, observou-se a diminuição do percentual de vegetação (de mais de 92% em 2000, para 58% em 2010) com o aumento do percentual de solo (de 7% para 37%). Nesses bairros, o percentual de impermeabilização ainda é baixo (menos de 5% nas duas datas). Assim, a modificação da composição VIS refletiu tanto o surgimento de novos bairros como o adensamento das construções em bairros já implantados (Figura 8).

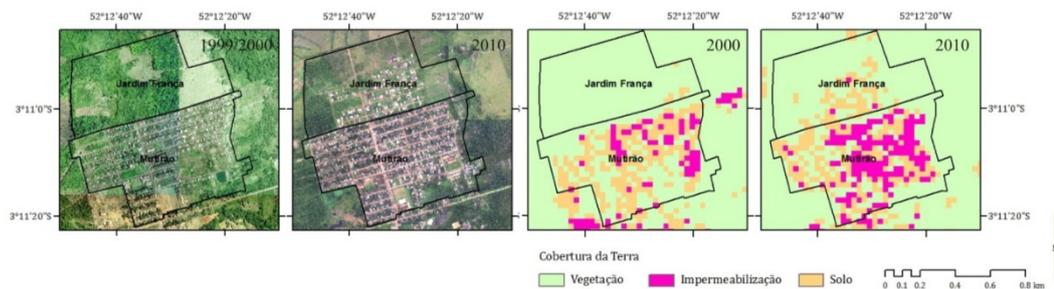


Figura 8 – Bairros Jardim França (com menos de 50% dos lotes ocupados) e Mutirão (com mais de 50% dos lotes ocupados).

## CONCLUSÕES

Os mapas de cobertura do solo urbano de 2000 e 2010, obtidos a partir das imagens de sensoriamento remoto, apresentaram exatidão global superior a 85%, podendo ser considerados satisfatórios conforme critérios sugeridos por Foody (2002). Os valores de Kappa indicam que os mapas apresentam concordância substancial com a referência, de acordo com a classificação proposta por Landis e Koch (1977). Para um nível de significância de 5%, o teste Z mostra que ambos os mapas são melhores que uma classificação casual.

Áreas de solo apresentaram confusão tanto com áreas impermeabilizadas como com áreas de vegetação, conforme reportado em trabalhos anteriores (LU; WENG, 2004; POWELL *et al.*, 2007; KUCK; ALVES, 2012). 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, conclusão também de WENG (2012). Isso é particularmente importante na utilização de imagens do sensor TM, de resolução espectral relativamente grosseira nas regiões do visível e do infravermelho (HEROLD *et al.*, 2004).

Certamente que o mapeamento da cobertura do solo urbano e a análise da composição VIS poderiam se beneficiar dos avanços na obtenção e disseminação de imagens de alta e altíssima resolução espacial. Entretanto, a análise proposta tirou proveito da visão sinótica oferecida pelas imagens de média resolução e utilizou, com bons resultados, o modelo linear de mistura espectral para a classificação dessas imagens.

Entre 2000 e 2010, o crescimento de Altamira ocorreu nos bairros com mais de 50% de lotes ocupados em 2010 quanto nos com menos de 50% de lotes ocupados, resultado tanto do surgimento de novos bairros como do adensamento das construções em bairros já implantados. Nos bairros com mais de 50% dos lotes ocupados, observou-se que o maior incremento foi na impermeabilização (de 17% para 29%), enquanto que nos bairros com menos de 50% dos lotes ocupados, o solo apresentou o maior incremento (de 7% para 37%). Nas áreas de chácaras, a participação da impermeabilização foi semelhante à dos bairros com menos de 50% dos lotes ocupados, porém com maior proporção de vegetação e menor proporção de solo. A área central já está na fase de consolidação da ocupação descrita por Powell e Roberts (2010), pois apresentou maior proporção de impermeabilização nas duas datas e aumento da vegetação em 2010.

A caracterização dos bairros de Altamira poderia ser utilizada no desenvolvimento de metodologia para a agregação dos pixels em unidades territoriais homogêneas, em substituição à delimitação de bairros realizada a partir dos dados de campo e da interpretação das fotografias aéreas.

Por fim, este trabalho mostra a particular utilidade da composição VIS para a análise de cidades como Altamira, pouco consolidadas e que apresentam um acentuado processo de crescimento. Nesses casos, as áreas urbanas não são caracterizadas pela predominância absoluta da componente impermeabilização. A componente solo é crucial, já que capta as áreas de solo exposto preparadas para a urbanização ou construção, as vias não pavimentadas e áreas públicas e privadas sem tratamento paisagístico ou pavimentação.

## BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, J. B.; GILLESPIE, A. R. **Remote sensing of landscapes with spectral images: a physical modeling approach**. 1a. ed. Cambridge: Cambridge University, 2006.
- ALMEIDA, C. M. DE. Aplicação dos sistemas de sensoriamento remoto por imagens e o planejamento urbano regional. **Arq.Urb - revista eletrônica de arquitetura e urbanismo (USJT)**, teste de notas, v. 3, p. 98–123, 2010.
- ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T.; WITMER, R. E. **A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data**. Washington, 1976.
- BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for gis-ready information. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 58, p. 239–258, 2004.
- BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 65, n. 1, p. 2–16, 2010.
- FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote sensing of environment**, v. 80, p. 185–201, abr. 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), 2., Pasadena. **Proceedings...** Pasadena: NASA, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1990. p.243–290.
- 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**, v. 91, n. 3–4, p. 304–319, jun. 2004.
- HIRYE, M. C. DE M. **Análise da expansão urbana com utilização do modelo linear de mistura espectral: estudo de caso em Altamira (PA) entre 2000 e 2010**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2014.
- HIRYE, M. C. DE M.; ALVES, D. S.; KUX, H. J. H. 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. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 1, p. 157-168, 2015.
- KUCK, T. N.; ALVES, D. S. Aplicação do mesma para análise multitemporal do processo de impermeabilização do solo urbano de manaus-am. **Revista brasileira de cartografia**, v. 64, n. 5, p. 601–617, 2012.
- 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**, v. 70, n. 9, p. 1053–1062, 2004.

- 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**, v. 22, n. 5, p. 789–806, 2001.
- MYINT, S. W. Urban vegetation mapping using subpixel analysis and expert system rules: a critical approach. **International journal of remote sensing**, v. 27, n. 13, p. 2645–2665, 2006.
- OKUJENI, A.; LINDEN, S. VAN DER; HOSTERT, P. Remote sensing of environment extending the vegetation – impervious – soil model using simulated enmap data and machine learning. **Remote sensing of environment**, v. 158, p. 69–80, 2015.
- 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**, v. 23, n. 20, p. 4131–4153, 2002.
- POWELL, R. L.; ROBERTS, D. A. Characterizing urban land-cover change in Rondônia, Brazil: 1985 to 2000. **Journal of latin american geography**, v. 9, n. 3, p. 183–211, 2010.
- POWELL, R. L.; ROBERTS, D. A. Characterizing variability of the urban physical environment for a suite of cities in rondônia, brazil. **Earth interactions**, v. 12, n. 13, p. 1–32, 2008.
- 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**, v. 106, n. 2, p. 253–267, 2007.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE ALTAMIRA. **Lei Municipal 2.047/2009. Dispõe sobre o Perímetro Urbano de Altamira.**
- PU, R.; GONG, P.; MICHISHITA, R.; SASAGAWA, T. Spectral mixture analysis for mapping abundance of urban surface components from the terra/aster data. **Remote sensing of environment**, v. 112, n. 3, p. 939–954, 2008.
- Remote sensing. In: ESTES, J.; KLINE, K.; COLLINS, E. **International encyclopedia of social & behavioral sciences**, 2001. p. 13144–13150.
- RIDD, M. K. Exploring a V-I-S model for urban ecosystem through remote sensing: a comparative anatomy for cities. **International journal of remote sensing**, v. 16, n. 12, p. 2165–2185, 1995.
- ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote sensing of environment**, v. 65, p. 267–279, 1998.
- 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**, v. 29, n. 1, p. 16–20, 1991.
- SMALL, C. High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. **Remote sensing of environment**, v. 88, n. 1–2, p. 170–186, 2003.

- SMALL, C.; LU, J. W. T. Estimation and vicarious validation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. **Remote sensing of environment**, v. 100, n. 4, p. 441–456, 2006.
- 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**, v. 31, p. 1–26, 1990.
- SONG, C. Spectral mixture analysis for subpixel vegetation fractions in the urban environment: how to incorporate endmember variability? **Remote sensing of environment**, v. 95, n. 2, p. 248–263, 2005.
- TANG, Q.; WANG, L. Urban land-use, land-cover classification through watershed segmentation in the v–i–s feature space. **Remote sensing letters**, v. 3, n. 8, p. 677–685, 20 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**, v. 30, n. 10, p. 2547–2577, 2009.
- WU, C.; MURRAY, A. T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. **Remote sensing of environment**, v. 84, n. 4, p. 493–505, 2003.
- YANG, X. What is urban remote sensing? In: YANG, X. (Org.). **Urban Remote Sensing Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment**. 1a. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. p. 3–11.