

# Habitação e Sensoriamento Remoto:

Uma análise da expansão urbana na RMSP por meio de imagens de satélite aplicando o Modelo Linear de Mistura Espectral



Julio Cesar Pedrassoli

Programa de Pós Graduação em Geografia  
Humana – Universidade de São Paulo

# **UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas  
Departamento de Geografia  
Programa de Pós Graduação em Geografia Humana

## **RELATÓRIO PRELIMINAR PARA PEDIDO DE PRORROGAÇÃO NA INSCRIÇÃO DO EXAME DE QUALIFICAÇÃO**

Julio Cesar Pedrassoli

Relatório preliminar de pesquisa apresentado para pedido de prorrogação de prazo para inscrição no Exame de Qualificação para doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Paul Pérez Machado

São Paulo, Setembro de 2014

# Sumário

<b>Introdução.....</b>	<b>3</b>
<b>Hipótese.....</b>	<b>6</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>7</b>
<b>Objetivo principal:.....</b>	<b>7</b>
<b>Objetivos específicos:.....</b>	<b>7</b>
<b>Justificativa.....</b>	<b>8</b>
<b>Por que a mudança no uso do solo na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)? .....</b>	<b>8</b>
<b>Por que lançamentos imobiliários residenciais e favelas? .....</b>	<b>8</b>
<b>Por que o Sensoriamento Remoto?.....</b>	<b>9</b>
<b>Metodologia.....</b>	<b>10</b>
<b>Material utilizado.....</b>	<b>10</b>
<b>Desenvolvimento da Pesquisa.....</b>	<b>12</b>
<b>Revisão bibliográfica.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Geografia e urbanização: a abordagem científica no contexto político-econômico do problema .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Contextualização do modelo e do processo de urbanização no Brasil e na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em mapas: primeira abordagem na construção de indicadores para a tese .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 A espacialidade do processo de verticalização na RMSP na perspectiva dos lançamentos imobiliários .....</b>	<b>22</b>
<b>2. A definição de Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. O sensoriamento remoto do espaço urbano .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2. Considerações sobre o uso das resoluções de SR em ambientes urbanos: .....</b>	<b>28</b>
O tempo.....	28
O espaço.....	29
O espectro.....	31
<b>3. Mistura Espectral.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. Modelo Linear de Mistura Linear .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2. O Modelo Linear de Mistura Espectral em sua expressão matemática .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3. Modelos multi-escalares e padronizados de mistura espectral .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4. Aplicações.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5. Estudos de caso em agricultura, vegetação e processos de degradação ambiental.....</b>	<b>41</b>
<b>3.6. A análise de mistura espectral aplicada a áreas urbanas .....</b>	<b>46</b>
<b>4. Referências.....</b>	<b>54</b>

## Introdução

São Paulo e sua região metropolitana são em poucas palavras grandes e complexas, e mais que isso, estão expandindo sua ocupação urbana. Um dos motores desse processo é o crescimento populacional e a necessidade cada vez maior de local para moradia. Soma-se também a política de desenvolvimento urbano que em muitos casos favorece a especulação imobiliária e as relações políticas viesadas nas capilaridades que constituem o sistema urbano em sua complexidade de gestão e fiscalização.

Pensando na ótica da moradia temos dois processos conjuntos atuando na Região Metropolitana de São Paulo: os lançamentos imobiliários residenciais formais representando a política habitacional de escala associada ao adensamento vertical e o aumento da população morando em favelas, simultaneamente. Dados da Organização das Nações Unidas indicam que as pessoas cada vez mais viverão em favelas, pois estas têm se tornando um fenômeno inevitável da indústria da urbanização nos países em desenvolvimento.

Conforme a figura 1 (ONU-HABITAT, 2003; PEDRASSOLI, 2011) em todo o mundo há tendências que projetam o aumento de pessoas vivendo em favelas no mundo todo:

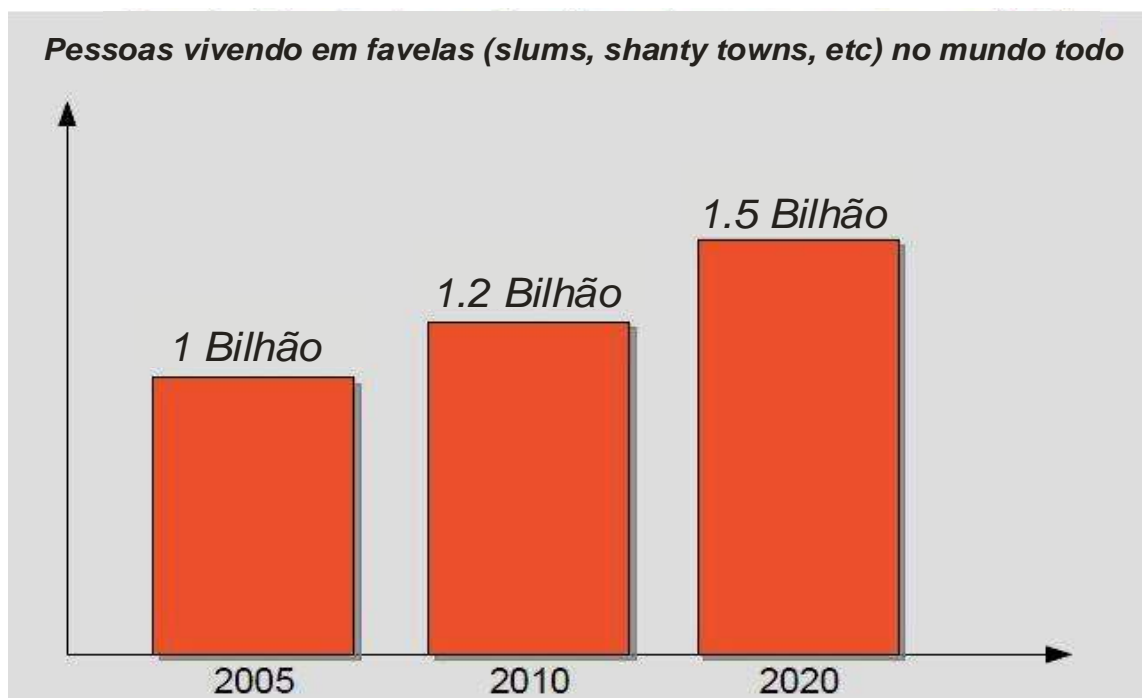


Figura 1: Projeção do número de pessoas vivendo em favelas no mundo: 2005 - 2020. ONU, 2013.

Na cidade de São Paulo a proporção de população residindo em favelas em relação à população total da cidade dobrou, passando de 3,1% para 6% entre 1991 e 2010 (IBGE, 1991, 2000, 2010).

No mesmo período de tempo a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) acumulou um total de 11.672 novos lançamentos imobiliários, acompanhados, somando um total de 783.212 novas unidades habitacionais.

A população total de pessoas morando em favelas atualmente em São Paulo é de aproximadamente 2,2 milhões de pessoas. Se consideramos que cada unidade habitacional lançada entre 1991 e 2010 tem capacidade para uma família média de 5 pessoas, teremos uma capacidade acumulada de 3.916.060 de pessoas para estas unidades habitacionais, ou seja, no mesmo período o número de lançamentos supera o crescimento da população favelada em quase 100%, contudo a baixa renda das famílias, associada a supervalorização imobiliária especulativa, impede o acesso a moradia adequada. Tomemos como exemplo o aumento desproporcional de preços dos imóveis a partir de 2009 com o Programa “Minha Casa Minha Vida” (vide gráfico 2 do item 1.1).

Quanto as mudanças ambientais globais, incluindo as mudanças climáticas, a área urbana da RMSP assim como as demais regiões metropolitanas no Brasil, muitas pesquisas estão em andamento. Em parâmetros físicos a RMSP é tipicamente uma ilha de calor em função das características de capacidade térmica de sua composição estrutural, os vales de seus rios, mesmo que ocupados de forma diferencial ao longo do tempo, constituem hoje vales aquecidos e cedem lugar ao sistema viário das cidades componentes.

A pressão demográfica envolvida no processo intensifica as situações de vulnerabilidade, especialmente pelo aumento de ocupações em áreas de risco potencial. A intensificação dessa vulnerabilidade reflete o modo de ocupação e apropriação diferencial do espaço pelos agentes sociais, e surge também em função da expansão e expulsão promovida pela especulação imobiliária nas áreas periféricas ao centro da metrópole.

### ***1.3. O uso das Geotecnologias no entendimento destes processos no Brasil***

Delimitado o problema, pensamos em como analisá-lo. A urbanização, as mudanças no uso e ocupação do solo, a especulação e a precarização da moradia, constituem enfim um sistema de interação complexa. Algumas ferramentas podem

auxiliar na modelagem espaço-temporal da questão, sendo o Geoprocessamento uma delas.

Associado a outras técnicas, como o Sensoriamento Remoto, o Geoprocessamento pode fornecer uma base de análise ampla, espacialmente localizada e com dimensão temporal, sendo a utilização de Sistemas de Informação Geográfica recomendada e necessária para a análise e mapeamento dos processos de urbanização.

No Brasil, os esforços neste sentido, tem partido de várias instituições de renome no cenário nacional, tais quais o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, DSR, DPI, CCST), USP (Universidade de São Paulo IG, IAG, IO, FFLCH, PROCAM, entre outros), Unicamp (NEPO, PROLAM, entre outros), além de outras instituições como Unesp, Universidades Federais e outros centros de excelência, na utilização de imagens orbitais e geoprocessamento para a análise da urbanização e das mudanças ambientais globais, além da instituição de cooperação entre universidades brasileiras (UNESP/UNICAMP/USP/INPE) no estudo dos impactos das mudanças climáticas nas regiões metropolitanas brasileiras.

Considerando o sensoriamento remoto como ferramenta principal, os Modelos Lineares de Mistura Espectral (MLME) trazem uma abordagem robusta. Este modelo é baseado na possibilidade de podermos calcular, para cada pixel que compõe uma imagem, a proporção de tipos de cobertura da terra que lá estão presentes, e se pudermos realizar o mesmo procedimento em imagens registradas numa série temporal delimitada, temos a capacidade de acompanhar e mensurar a mudança dessas proporções no espaço e no tempo.

Com este princípio, é possível a correlação entre essas mudanças registradas e os dados empíricos coletados, como a localização de favelas e dos lançamentos imobiliários residenciais. A partir daí temos a possibilidade de estabelecer um modelo ou um conjunto de modelos que ajudam a entender o processo, e que sejam aplicáveis a outras partes da superfície terrestre que experimentem processos semelhantes.

## **Hipótese**

A hipótese assumida neste trabalho é a de que existe uma relação mensurável entre as alterações no uso e ocupação do solo da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e as proporções de frações de cobertura do solo registradas em imagens orbitais multiespectrais, através do uso do modelo linear de mistura espectral.

A hipótese subjacente é a de que as mudanças na estrutura urbana causadas pelo adensamento e verticalização acumulados promovidos pelos lançamentos imobiliários na (RMSP) entre 1985 e 2011, calculados a partir de índices gerados e agregados por setores censitários e distritos, têm alta correlação com o aumento da fração substrato e diminuição da fração vegetação no modelo linear de mistura espectral aplicado em imagens Landsat correspondentes ao mesmo período.

## **Objetivos**

### **Objetivo principal:**

Correlacionar os índices de mudança de uso e ocupação do solo na RMSP com os valores de mudança nas proporções das frações do modelo linear de mistura espectral em imagens Landsat entre 1985 e 2011.

### **Objetivos específicos:**

- 1) Gerar os índices de verticalização provocada pelos lançamentos imobiliários residenciais e os índices de ocupação do solo por favelas na RMSP agregados por distritos e setores censitários entre 1985 e 2011;
- 2) Aplicar o modelo linear de mistura espectral nas imagens Landsat selecionadas datadas de 1986, 2000, 2005 e 2010, gerando as respectivas frações a partir do uso de membros de referências globais, propostos por SMALL e MILESI (2013);
- 3) Estabelecer a correlação entre os resultados obtidos nos procedimentos adotados nos objetivos 1 e 2;
- 4) Estabelecer um modelo extensível para aplicação em outras áreas metropolitanas;



## **Justificativa**

### **Por que a mudança no uso do solo na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)?**

O processo de urbanização pelo qual passam diversas regiões em todo o mundo está no alvo de muitas investigações em diversos campos da ciência. Essa preocupação é explicada em grande parte pela relação entre as dinâmicas associadas ao processo de urbanização e o modo de vida nas cidades com as mudanças ambientais globais.

Hoje é certo que mais da metade da população mundial vive nas cidades e que essa tendência é mais claramente observada nos grandes aglomerados urbanos. Essa concentração de gente se traduz também na concentração desigual de acessos, recursos e infraestrutura a que são submetidas as populações urbanas.

Para melhor agir sobre essa problemática complexa que a urbanização representa, é necessário conhecê-la, ter dados e análises sobre seu funcionamento, nas dimensões físicas, econômicas, políticas, sociológicas e, numa abordagem sistêmica de funcionamento do espaço geográfico, da relação entre estas diversas dimensões.

Conhecer melhor a dinâmica de urbanização da RMSP através do uso de técnicas promissoras como os produtos de sensoriamento remoto é uma abordagem complementar e necessária, especialmente quando pensamos na capacidade de extração de informações possíveis no espaço tempo, especialmente na dinâmica recente, de transformação da RMSP.

### **Por que lançamentos imobiliários residenciais e favelas?**

Dados recentes demonstram que na última década o Brasil teve um aumento da população vivendo em condições de precariedade habitacional proporcionalmente superior ao aumento da população total no mesmo período.

Considerando a cidade de São Paulo, a proporção da população morando em favelas em relação a população total saltou de 3,1% para 6% entre 1991 e 2010. Esse fenômeno em parte pode ser explicado pelo aumento total de população. Simultaneamente a isso, ocorre um aumento na oferta de crédito habitacional associado ao aumento exponencial do número de lançamentos imobiliários residenciais no Brasil.

Na região metropolitana de São Paulo esse processo é mensurável. Houve um aumento da oferta habitacional na última década, de forma mais acentuada nos últimos 5 anos em função de políticas habitacionais federais de grande escala, que é acompanhado do aumento desproporcional dos preços do m<sup>2</sup> da moradia. Essa lacuna entre quantidade de oferta e

possibilidade de acesso financeiro aparenta ter relação com a continuidade do processo de precarização habitacional mesmo frente a políticas de acesso a moradia de grande escala na RMSP.

Considerando o uso habitacional do solo, temos dois vetores de mudança na estrutura da cidade nas últimas décadas: os lançamentos imobiliários residenciais, e na outra ponta a ocupação precária de áreas desvalorizadas, caracterizadas pela informalidade e/ou pelo risco e/ou pela ausência de infra estrutura urbana, pois mesmo na escala atual de produção de novas moradias não conseguem acesso à terra urbana adequada.

Consideramos que estes dois aspectos da urbanização metropolitana podem explicar uma parcela importante das mudanças no uso do solo na RMSP, e se correlacionadas corretamente com dados de Sensoriamento Remoto podem trazer alguma contribuição ao entendimento das dinâmicas envolvidas no espaço e no tempo.

### **Por que o Sensoriamento Remoto?**

Os produtos de Sensoriamento Remoto talvez se constituam hoje num dos maiores arquivos de dados espaço-temporais sobre as mudanças no uso do solo e da superfície da terra dos últimos 40 anos. Tomemos como exemplos as imagens geradas pela missão Landsat que efetuam registro contínuo da superfície terrestre a cada 16 dias desde 1973, quando foi lançado o primeiro satélite da série.

Nesse período a população mundial se tornou urbana, as cidades se tornaram metrópoles, as metrópoles se tornaram megalópoles e as marcas do homem na superfície e em toda a dinâmica que ela registra foram vistas do espaço orbital.

A RMSP é uma área cujos registros das mudanças captados pelas imagens de satélite têm ajudado a entender sua dinâmica e prever ações futuras sobre seu território. Devido a sua escala única na América do Sul a RMSP é, sem dúvida, um fenômeno que o Sensoriamento Remoto pode contribuir muito para o seu entendimento.

## Metodologia

A metodologia empregada e os procedimentos técnicos adotados baseiam-se no processamento e análise de três bases de dados principais: Uma série temporal e georreferenciada dos pontos correspondentes aos lançamentos imobiliários residenciais na Região Metropolitana de São Paulo entre os anos de 1985 e 2011; O mapeamento das favelas no município de São Paulo e imagens do Satélite Landsat, correspondentes ao mesmo período, para geração das proporções de mistura espectral e sua evolução espaço-temporal na série de imagens consideradas.

## Material utilizado

### 1) Quanto aos dados de lançamentos imobiliários residenciais:

Consistem em um arquivo de pontos georreferenciados em formato *shapefile* contendo um total de 15.133 registros organizados pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM), com uma série de atributos associados a cada ponto, incluindo data de lançamento, valor do m<sup>2</sup> atualizado, quantidade de andares do empreendimento, entre outros;

### 2) Quanto ao arquivo de localização das favelas no município de São Paulo:

Consiste no arquivo vetorial fornecido pela prefeitura municipal de São Paulo através do HABISP, contendo as geometrias localizadas e informações sobre nomenclatura das favelas;

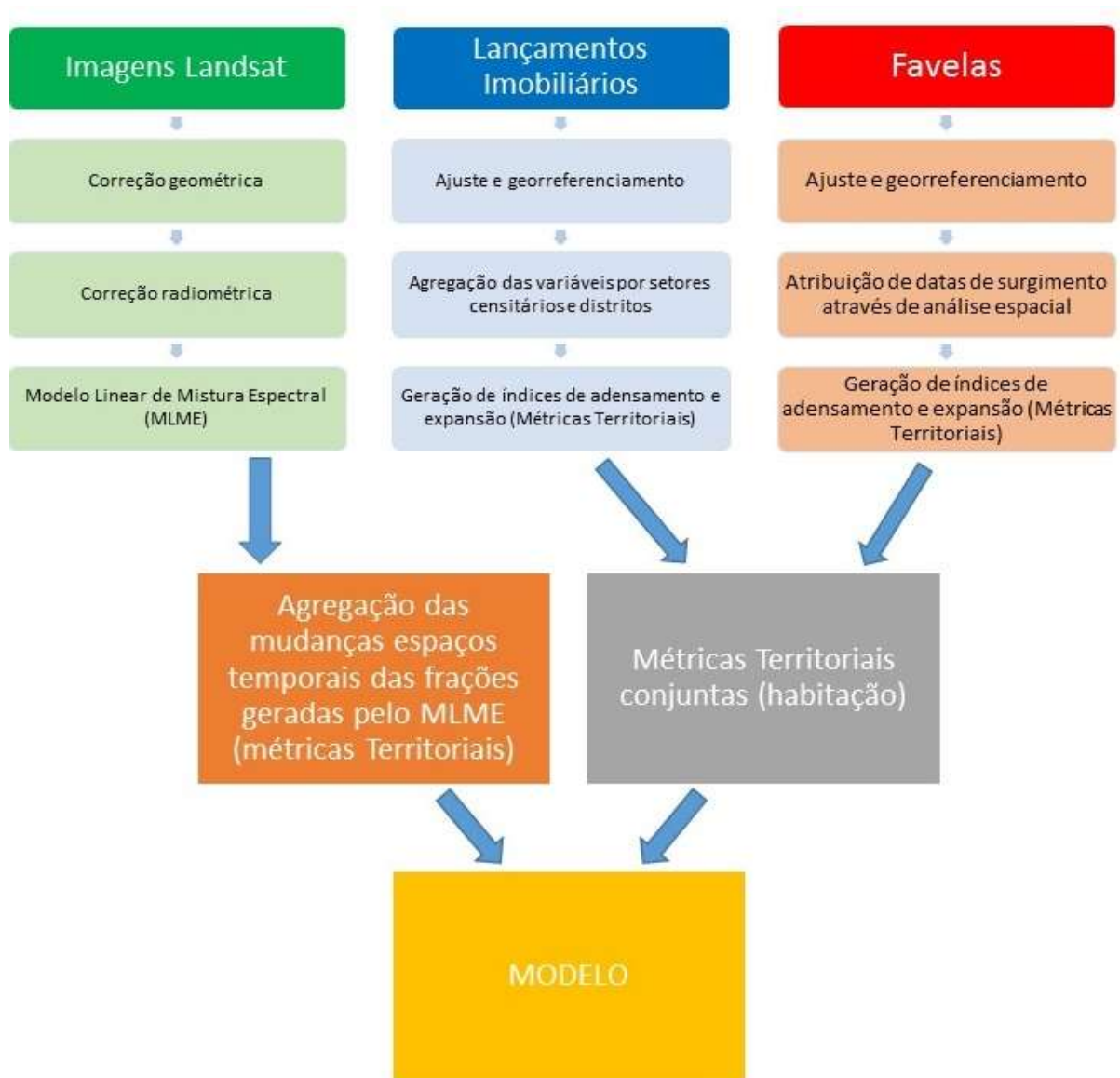
### 3) Quanto aos dados de Sensoriamento remoto:

Consistem numa série temporal de imagens Landsat, incluindo os sensores TM (Landsat 5) e ETM+ (Landsat 7), adquiridas via EROS data center (NASA) e EarthExplorer (USGS), as quais são:

Imagem	Satélite	Sensor	Aquisição		
			data	hora	elevação solar
219076 & 219077 +1986218XXX04	Landsat 5	TM	06/08/1986	12:26 PM	33.22
219076 & 219077 +2000121EDC00	Landsat 7	ETM+	30/04/2000	12:57 PM	40.90
219076 & 219077 +2005214EDC00	Landsat 7	ETM+	02/08/2005	12:53 PM	36.97
219076 & 219077 +2010108CUB01	Landsat 5	TM	18/04/2010	12:55 PM	43.39

Outras bases de dados, como por exemplo os dados censitários disponibilizados pelo IBGE, incluindo os dados de 1991, 2000 e 2010, também são utilizadas na elaboração desta pesquisa, bem como a revisão bibliográfica.

Considerando os dados básicos aqui elencados, os desenvolvimentos dos procedimentos técnicos referentes a metodologia seguem a sequência representada no esquema a seguir:



## Desenvolvimento da Pesquisa

### Revisão bibliográfica

#### 1. Geografia e urbanização: a abordagem científica no contexto político-econômico do problema

A Geografia é historicamente relacionada aos estudos ambientais e ao entendimento dos processos de transformações do uso da superfície terrestre, seja no contexto do modo de produção capitalista ou socialista, e a urbanização, por conta de sua relação intrínseca com as mudanças ambientais globais e com as transformações econômicas e sociais multi-escalares em todo o planeta, é uma das questões alvo centrais da Geografia nessa relação histórica.

Diversas questões refletem tais direcionamentos. A partir do clube de Roma em 1968 e a publicação de “*limits to growth*” (MEADOWS et al, 1972) se evidencia em maior escala nos meios acadêmicos tal preocupação. Esse crescente discurso acerca das questões ambientais por parte da comunidade científica se acentua, passando pela “Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente” em Estocolmo no ano de 1972, a “*Conferência Intergovernamental de Tbilisi*” na Geórgia em 1977, ECO 92, RIO+20, HABITAT, entre tantos outros encontros globais, que discutiram politicamente as evidências apresentadas pela ciência. Desde então, muitos esforços têm sido desenvolvidos no sentido de estabelecer bases metodológicas para estudos que viabilizem o entendimento das questões ambientais e sua associação com o processo de urbanização em curso.

Da discussão emerge o conceito de *cidade sustentável* que incorpora no estatuto da cidade previsto em lei, o qual estabelece como uma de suas principais diretrizes a:

*“[...] garantia do direito às cidades sustentáveis, entendida como o direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura urbana, ao transporte e aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer, para as presentes e futuras gerações [...]” (Art. 2º da lei nº 10.257 de 10 de julho de 2001).*

Com este propósito - a conquista da sustentabilidade – surgem mais marcadamente vários pesquisadores, a partir da década de 1992, egressos de diversos ramos científicos, procurando explicar as possíveis relações, mediações, contradições e oposições,

entre os componentes que contextualizam natureza e sociedade. No espaço urbano não foi diferente.

O rápido crescimento das cidades muito tem afetado a qualidade de vida urbana, ocasionando enormes disparidades sócio-espaciais e ambientais, em todos os aspetos, problemas que, cada vez mais, tem afetado a qualidade ambiental urbana e causado pressão sobre o modo de vida atual.

Todavia pensar o espaço urbano é lembrar que em seu caminhar histórico a cidade traz consigo as marcas das configurações espaciais de seu surgimento, dos períodos pelos quais passou e de suas transformações atuais. Neste sentido CORREA (2006) ressalta que “o espaço urbano, especialmente o da cidade capitalista, é profundamente desigual, uma vez que, a desigualdade constitui-se em característica própria do espaço urbano capitalista” (CORREA, 2006, p. 8) e, “por ser reflexo social e porque a sociedade tem a sua dinâmica, o espaço urbano é também mutável, dispondo de uma mutabilidade que é complexa, com ritmos e natureza diferenciados” (CORREA 2006, p. 8), onde a temporalidade do capital não vai ao encontro da temporalidade da natureza, que é por vezes geológica e cujo tempo de recuperação não obedece aos anseios de lucro.

Ao olhar a cidade sob a criticidade de sua produção no espaço, o que se vê são indícios de um ambiente urbano socialmente desigual em função das necessidades capitalistas. Os acessos aos meios, pela população, para o usufruto urbano são diferenciados trazendo em seu bojo componentes espacialmente correlacionados. Assim sendo, as diferentes formações espaciais urbanas configuradas em sua paisagem dinâmica, nos levam a perceber a desigualdade urbana em suas diversas facetas, muitas vezes percebidas de forma disjunta e sem uma consideração sistêmica de seu caráter enquanto processo (PEDRASSOLI, 2008), reprodução capitalista do espaço geográfico, nomeada de urbanização.

MARICATO (2003), coloca que:

*"a segregação urbana ou ambiental é uma das faces mais importantes da desigualdade social e parte promotora da mesma. A dificuldade ao acesso aos serviços de infraestrutura urbanos (transporte precário, saneamento deficiente, drenagem inexistente, dificuldade de abastecimento, difícil acesso aos serviços de saúde, educação e creches, maior exposição a ocorrência de enchentes e desmoronamentos, etc.) somam-se menos oportunidades de emprego (particularmente do emprego formal), menos oportunidades de profissionalização, maior exposição a violência (marginal ou policial), discriminação racial, discriminação contra mulheres e crianças, difícil acesso à justiça oficial, difícil acesso ao lazer. A lista é interminável"* (MARICATO 2003, p. 152).

O modelo brasileiro de financiamento da progressiva urbanização tem como base o modelo norte americano, e esse retrospecto histórico demonstra como o urbano no Brasil também se constituiu progressivamente em um afrente de valorização do capital (FIX, 2011).

### **1.1 Contextualização do modelo e do processo de urbanização no Brasil e na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em mapas: primeira abordagem na construção de indicadores para a tese**

De 1991 a 2010 a população brasileira residente em favelas passou de 3,1 % para 6 % do total da população. Em dados brutos isso significa que em 1991 a população favelada era de 4,4 milhões de pessoas e em 2010 já havia 11,4 milhões de pessoas em condições precárias de vida e moradia (IBGE, 2010).

Nesse período de 20 anos a população brasileira teve um aumento de cerca de 20% enquanto a população residente nos aglomerados subnormais ou favelas aumentou na ordem de 61% (IBGE 1991, 2010), conforme o gráfico 1:

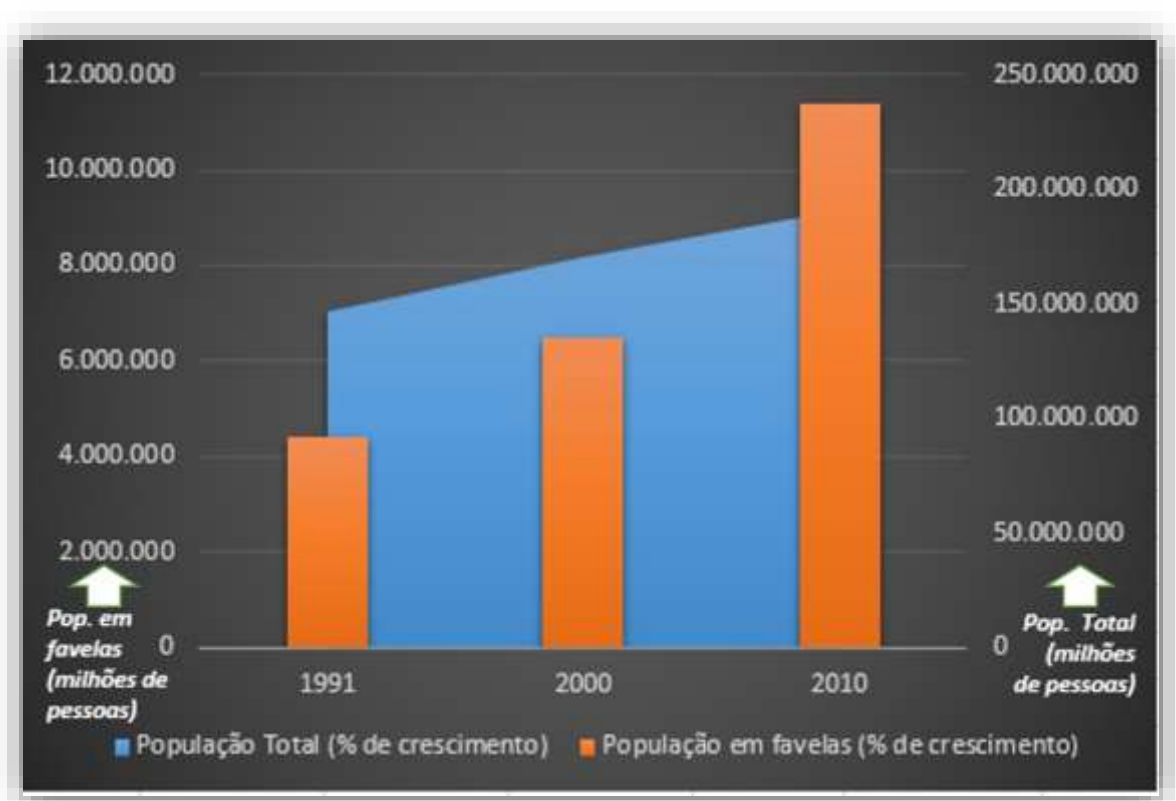


Gráfico 1: crescimento percentual de população em favelas em relação a população total nas duas últimas décadas no Brasil – Elaboração do autor a partir dos dados do IBGE (1991, 2000 e 2010)

Somente na região metropolitana da cidade de São Paulo o número de moradores em favelas supera os 2,2 milhões de pessoas, o equivalente a 18,9 % da população total. Esses patamares descompassados de crescimento da população urbana e de crescimento

da precariedade urbana é uma característica comum a todas as grandes cidades brasileiras e as suas regiões metropolitanas— e um indicador que revela não apenas a precarização da moradia, nesse exemplo específico, mas revela também o processo de urbanização perverso.

Na outra ponta do mesmo processo, observamos na região metropolitana de São Paulo nos últimos cinco anos, os efeitos da política habitacional de grande escala implementada pelo governo federal com o Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), lançado em meados de 2009, e a reação do mercado imobiliário formal diante da oferta de crédito e dos incentivos para a produção habitacional trazidos pelas políticas urbanas locais, bipolarizando a produção do espaço urbano com o aumento do descompasso entre crescimento populacional e do crescimento de pessoas residindo em condições de precariedade habitacional.

Para efeito de entendimento, entre 1991 e 2010 a Região Metropolitana de São Paulo acumulou um total de 11.672 novos lançamentos imobiliários, com o aumento do valor médio do m<sup>2</sup> nesse mesmo período crescendo em um ritmo superior a taxa de novos lançamentos, conforme o gráfico 2:

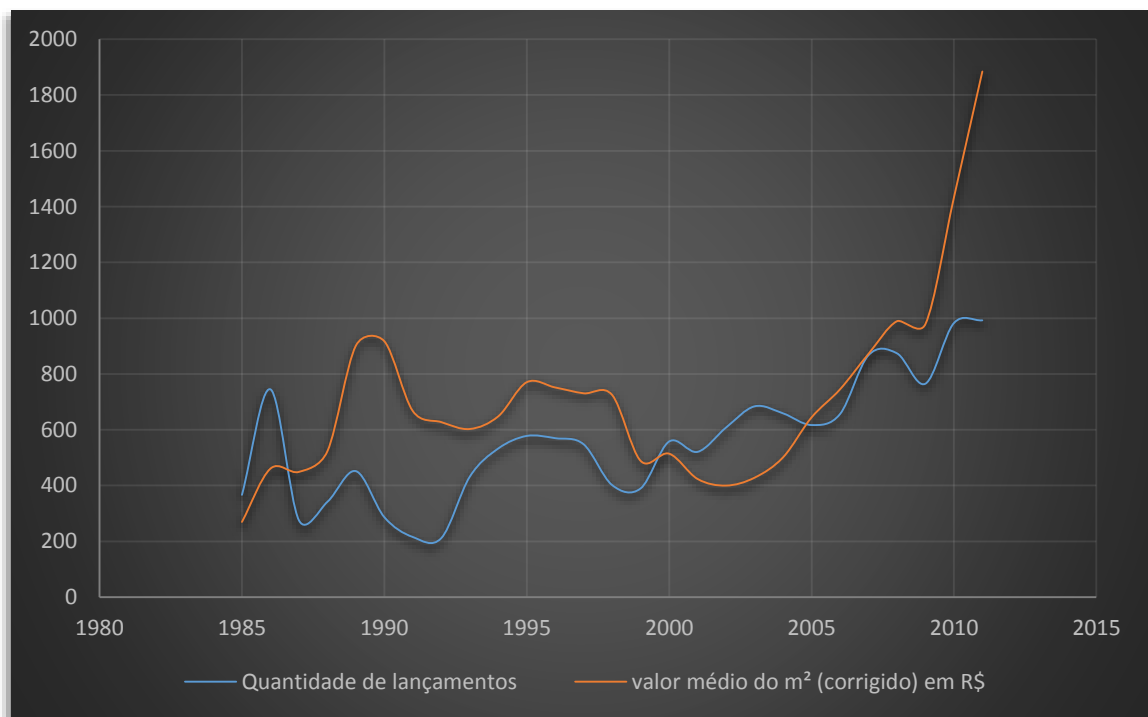


Gráfico 2: Aumento bruto acumulado do valor do m<sup>2</sup> em relação ao número de lançamentos na RMSP. (Valores históricos corrigidos) – Elaboração do autor a partir dos dados do CEM

Considerando a última década, podemos observar um aumento dos valores do m<sup>2</sup> excepcionalmente maior a partir 2009. Tendo como base a política habitacional nacional



podemos associar tal supervalorização ao lançamento do programa *Minha Casa, Minha Vida*<sup>1</sup> (MCMV), o qual catapultou em algumas áreas o valor dos imóveis em função da procura elevada e do acesso ao crédito.

Ao analisarmos os lançamentos imobiliários residenciais na RMSP distribuídos em períodos tri-anuais constatamos, ao somarmos apenas os lançamentos posteriores ao PMCMV, entre 2009 e 2011, que estes representam um valor superior a 18% de todos os lançamentos acumulados na série histórica de 1985 a 2011, e que estas porcentagens apresentam tendência de crescimento a partir do início da década de 2000, como podemos ver no gráfico 3 a seguir:

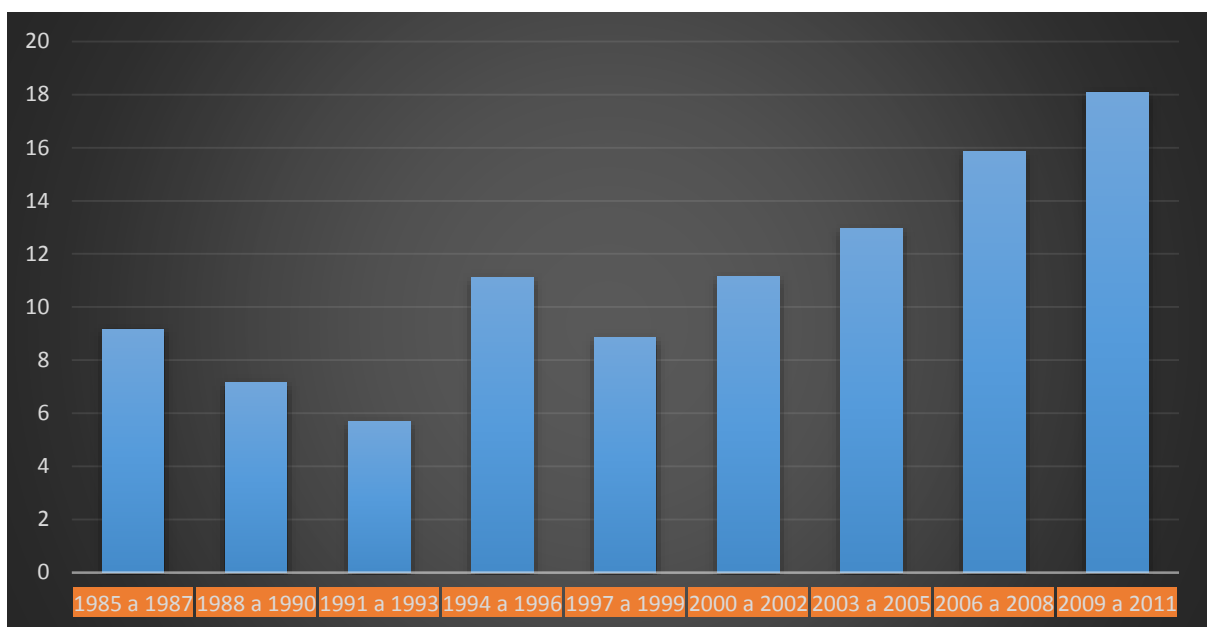


Gráfico 3: Série histórica de lançamentos imobiliários residenciais agregados em períodos tri-anuais. Elaborado pelo autor a partir dos dados do CEM

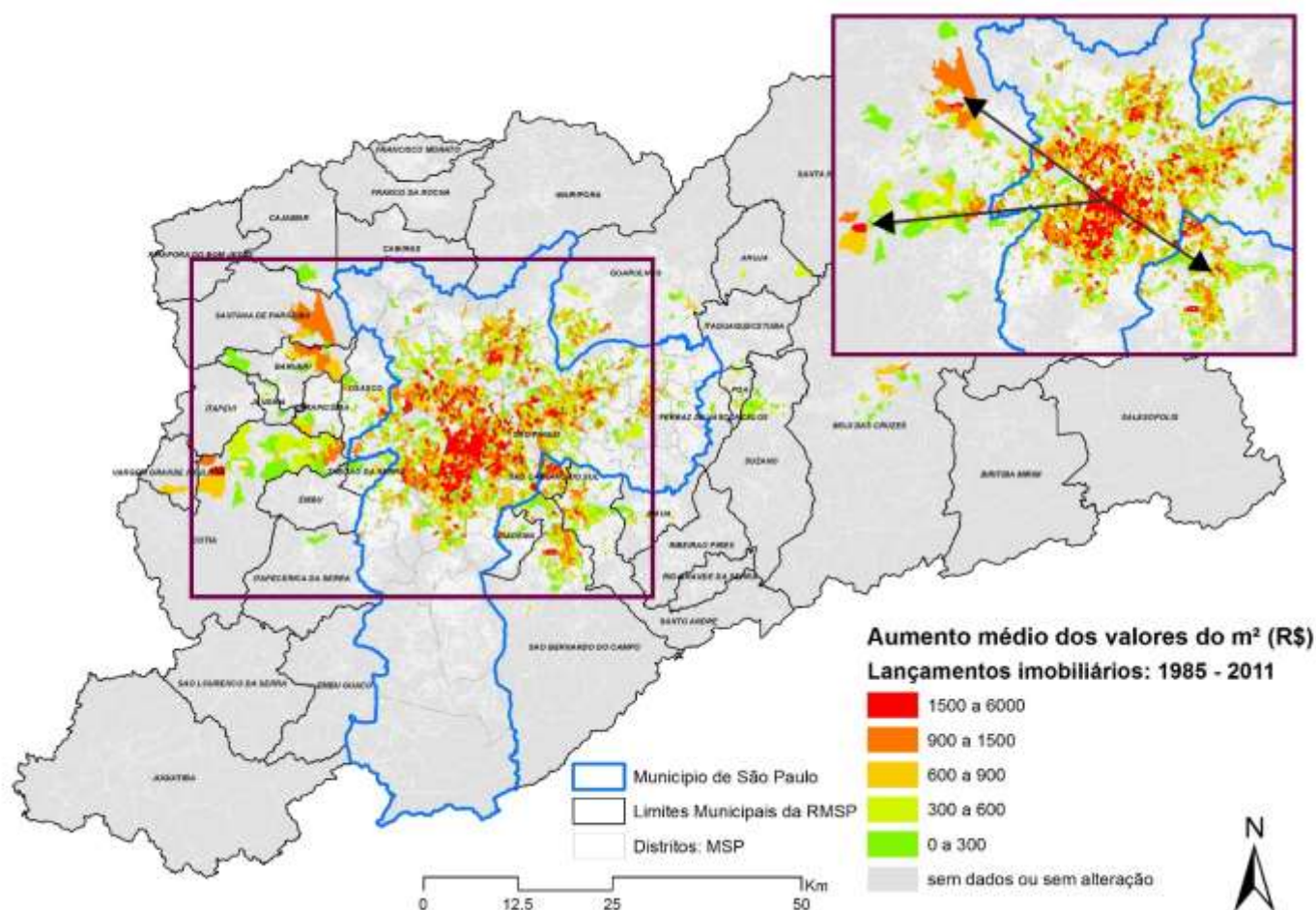
Contudo, o valor do acesso à terra continua sendo um dos fatores definidores do tipo de ocupação na RMSP, e reflete a lógica espacial entre centro e periferia. Se considerarmos o aumento acumulado dos valores do m<sup>2</sup> em sua expressão espacial, verificamos que as áreas centrais do município de São Paulo ainda representam os maiores incrementos de valor na série histórica.

Não obstante, novos eixos de valorização imobiliária se apresentam no contexto dos 25 anos considerados no cálculo, com uma visível tendência de aumento dos valores médios do m<sup>2</sup> em três eixos principais: o eixo direcional partindo da cidade de São Paulo

---

<sup>1</sup> É um programa habitacional do Governo Federal do Brasil, anunciado no dia 25 de março de 2009, que consiste no financiamento da habitação.

para Osasco e Santana do Parnaíba, o eixo direcional sentido Cotia e mais fortemente a Região do ABC paulista, conforme o mapa 1:

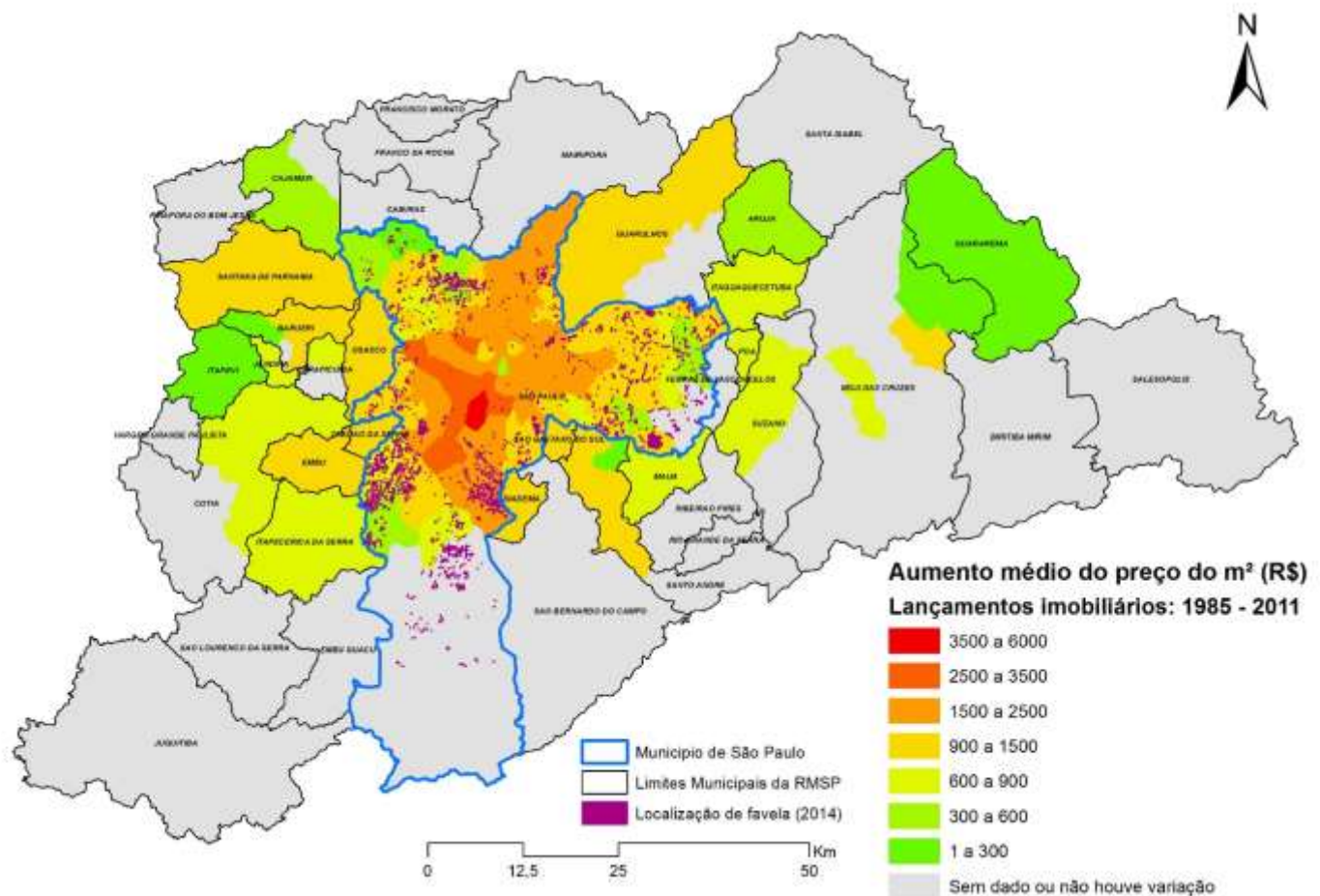


Mapa 1: Aumento médio acumulado do valor do m² (valores históricos corrigidos) e vetores de valorização imobiliária agregados por setor censitário. Elaboração do autor a partir de IBGE (2010) e CEM

Enquanto o mercado imobiliário acumula aumentos significativos nos lucros, conforme os dados, e investe em novas frentes de expansão na metrópole paulista, o outro dipolo dessa equação permanece como uma característica contraditória frente a aparente valorização do espaço que os lançamentos imobiliários apresentam. Contraditória num sentido de que o espaço acumula riqueza e valor, mas autoexplicativa e claramente correlacionada num outro sentido em que esse acúmulo de valor exige a manutenção de uma massa de espaço e gente desvalorizada.

Nessa lógica os espaços periféricos da metrópole ainda desvalorizados são delineados por processos de produção e reprodução do espaço geográfico calcados na inadequação habitacional, reflexo local e regional de processos multi escalares. As favelas estão

à margem da valorização do mercado imobiliário, mas sob a ameaça da crescente valorização destas áreas pela saturação de áreas centrais, conforme o mapa 2:



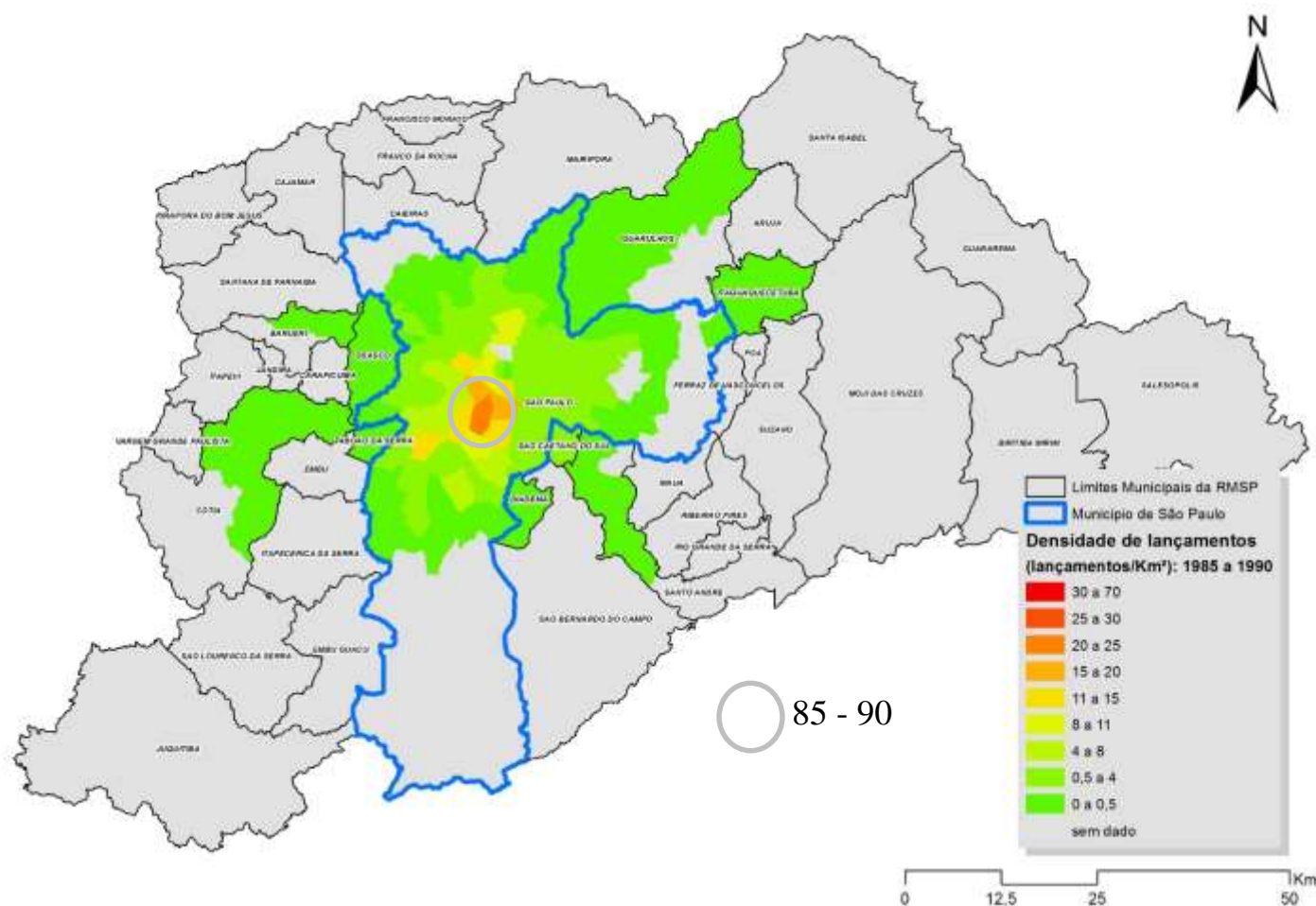
Mapa 2: Localização das favelas em relação a valorização imobiliária acumulada agregada por distritos da RMSP. Elaboração do autor a partir dos dados do IBGE (2010), CEM e HABISP/PMSP

Estas áreas centrais, historicamente valorizadas pelo mercado imobiliário na metrópole, ainda persistem como centros de alto valor da terra mas a evolução do mercado e da demanda gerada associada a especulação imobiliária levou, ao considerar a análise dos lançamentos imobiliários residenciais entre 1985 e 2011, a tendência de ocupação de exploração de novas áreas imediatamente circulares ao centro de exploração imobiliária inicial.

Ao analisar a distribuição espacial da densidade de lançamentos imobiliários por distritos da região metropolitana de São Paulo agregados pelas décadas de 1980, 1990 e 2000 é possível constatar que, ao longo dos períodos analisados, os lançamentos expandiram seus territórios e ocuparam novas frentes de valorização, resultando na criação de novos padrões de ocupação desses espaços, seja no nível econômico ao pressionar as pessoas que não tem capital suficiente para absorver a valorização crescente dessas novas áreas para ocupação

de áreas cada vez mais periféricas das cidades mas, também, devido ao padrão predominantemente vertical dos lançamentos, na estrutura física da metrópole.

Na dimensão espaço-temporal o processo aqui deduzido torna-se mais inteligível e evidente. Consideremos a densidade acumulada de lançamentos imobiliários (lançamentos por Km<sup>2</sup> em cada distrito da RMSP) entre 1985 e 1990, conforme o mapa 3 a seguir:



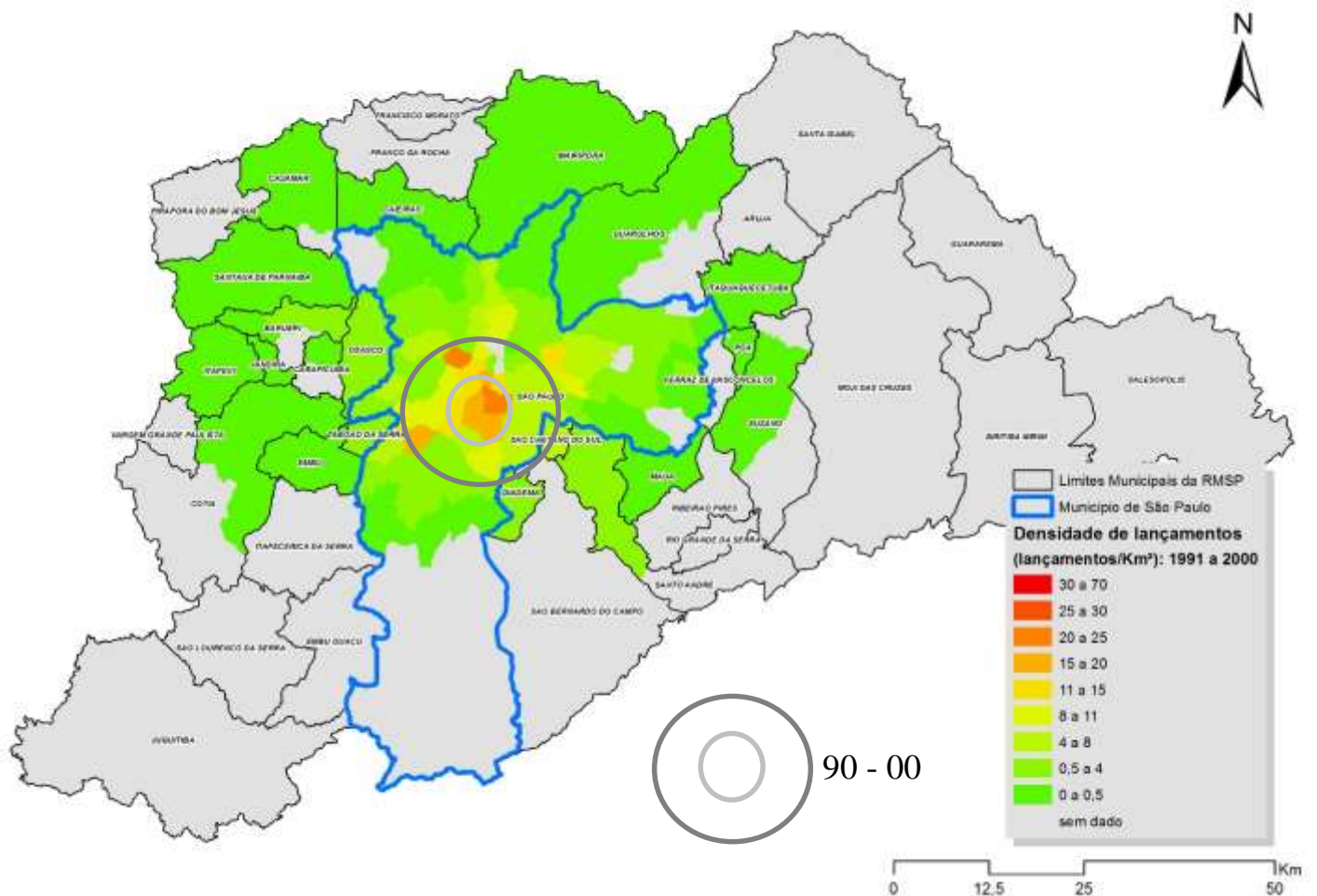
Mapa 3: Densidade de lançamentos por distrito na RMSP entre 1985 e 1990. Elaborado pelo autor a partir dos dados de CEM, HABISP e IBGE (2010). Puxar zoom das região de moema ...

Os distritos de Moema, Jardim Paulista e Vila Mariana tiveram a maior concentração de lançamentos imobiliários no período. Essas áreas são regiões da cidade de São Paulo de altíssima valorização acumulada do m<sup>2</sup> (mapas 1 e 2).

Não obstante, na década subsequente, a densidade de lançamentos imobiliários residenciais nesses mesmo distritos, especialmente no distrito de Moema que foi o



local com maior densidade na década de 1980, apresentou diminuição enquanto as áreas do entorno imediato apresentaram uma elevação na densidade, conforme o mapa 4:

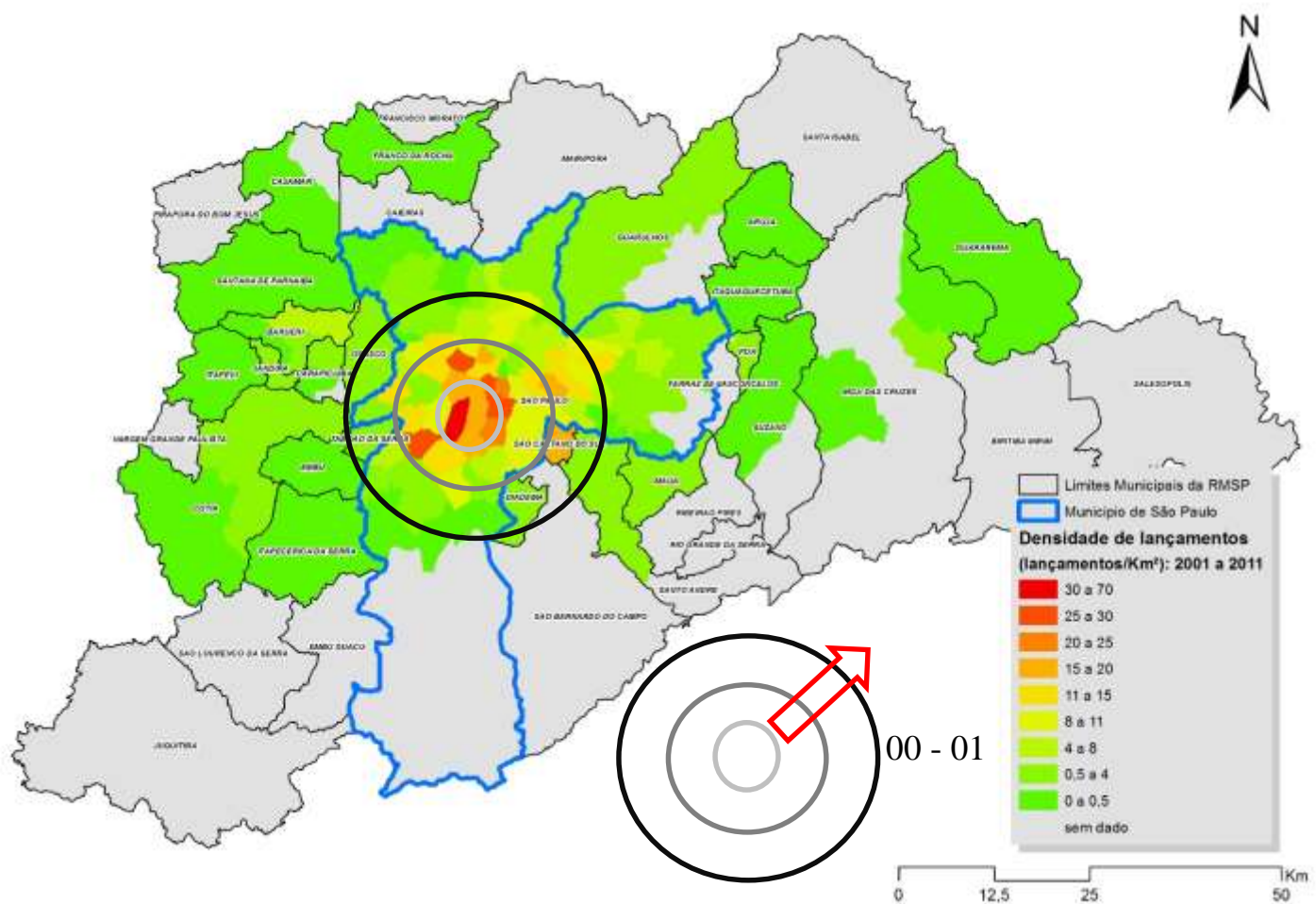


Mapa 4: Densidade de lançamentos por distrito na RMSP entre 1990 e 2000. Elaborado pelo autor a partir dos dados de CEM, HABISP e IBGE (2010)

Podemos entender que houve uma saturação das áreas mais centralizadas na década de 1980 e o mercado buscou áreas imediatamente contíguas a essas. A proximidade da infraestrutura é um fator importante de indução da ocupação dessas áreas pelo capital imobiliário, contudo o mercado imobiliário sempre exerceu uma forte pressão sobre os governos para instalação de infraestrutura visando a valorização de novas áreas sob seu investimento. É uma equação complexa que resulta em valorização de novas áreas, com indução do poder público ou do mercado imobiliário, que conjuntamente produzem condições para novos tipos de usos urbanos.

A concentração de equipamentos públicos de lazer, de saúde, de educação, de circulação e transporte, as áreas comerciais, enfim, todas as estruturas valorizadoras da terra urbana necessárias ao uso residencial, especialmente quando pensamos a realidade da escala metropolitana, tem uma forte correlação espacial com as áreas de maior densidade de lançamentos imobiliários residenciais.

A década de 2000 apresenta o mesmo processo dos outros períodos analisados, entretanto já aponta para alguma dispersão dos lançamentos para fora do município de São Paulo associados a novas centralidades, como vemos no mapa 5:



Mapa 5: Densidade de lançamentos por distrito na RMSP entre 1990 e 2000. Elaborado pelo autor a partir dos dados de CEM, HABISP e IBGE (2010) – aumentar o nome dos municípios e refazer cálculo para SBC.

A região do Grande ABC apresenta significativo aumento na densidade de lançamentos imobiliários residenciais nesse período, enquanto o processo de ocupação mais denso na área do centro expandido da cidade de São Paulo se mantém. Podemos caracterizar

esse fenômeno, associado aos dados de valorização imobiliária no período, como a tendência de novos vetores de especulação imobiliária na RMSP.

É nesse contexto que relaciona a reprodução do espaço pelas forças do capital que a presente pesquisa busca entender e correlacionar as mudanças no uso e ocupação do solo da RMSP, sob a perspectiva diatônica da especulação imobiliária e da moradia precária, através de análise espacial e modelos de mistura espectral em Sensoriamento Remoto.

### **1.2 A espacialidade do processo de verticalização na RMSP na perspectiva dos lançamentos imobiliários**

O *Skyline* de São Paulo impressiona. Os dados coletados pela *Emporis*<sup>2</sup> aponta a cidade como o sétimo maior *Skyline* do mundo com mais de 5.700 edifícios cadastrados para o ranking, com alturas que se aproximam dos 190 metros.



Figura 2: Parte do skyline de São Paulo. Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_tallest\\_buildings\\_in\\_São\\_Paulo](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_in_São_Paulo)

---

<sup>11</sup> A Emporis GmbH é uma empresa de mineração de dados sobre imóveis com sede em Frankfurt, que coleta e publica dados e fotografias sobre construções ao redor do mundo. Seus dados são frequentemente citados na mídia como referência sobre construções

Essa forma urbana reflete o que a cidade de São Paulo é atualmente em termos de estrutura. A verticalização da cidade é um processo que caracteriza a construção de espaço virtual sobre o solo onde a expansão horizontal não é mais possível devido a falta de oferta de terra ou por restrições colocadas pelas políticas de planejamento urbano, mas é também o reflexo do aproveitamento máximo do espaço produzido na lógica da valorização imobiliária.

A constatação é simples, prédios mais altos, com unidades individuais cada vez menores. Na RMSP, entre 1985 a 1990, quando foram lançados, aproximadamente, 20.000 unidades residenciais por ano, a área útil média das unidades era de 85,40 m<sup>2</sup>. Na década seguinte, essa média correspondeu a 70,70m<sup>2</sup> enquanto o número anual de unidades residenciais lançadas por ano foi de quase 50 mil unidades. Uma diminuição média da área da unidade de, aproximadamente, 20% enquanto o aumento do número de lançamentos aumentou de forma expressiva no mesmo período considerando todos os padrões de imóveis lançados nas respectivas décadas para a composição do cálculo.

Entre 2001 e 2008, foram lançados, aproximadamente, 35 mil unidades por ano com uma área útil media por unidade de 91 m<sup>2</sup>. Após o lançamento do PMCMV, entre 2009 e 2011, a área útil média dos apartamentos foi de 71,40m<sup>2</sup> e o número de unidades lançadas por ano quase dobrou em relação ao período anterior chegando a 60 mil, conforme ilustra o gráfico 4:

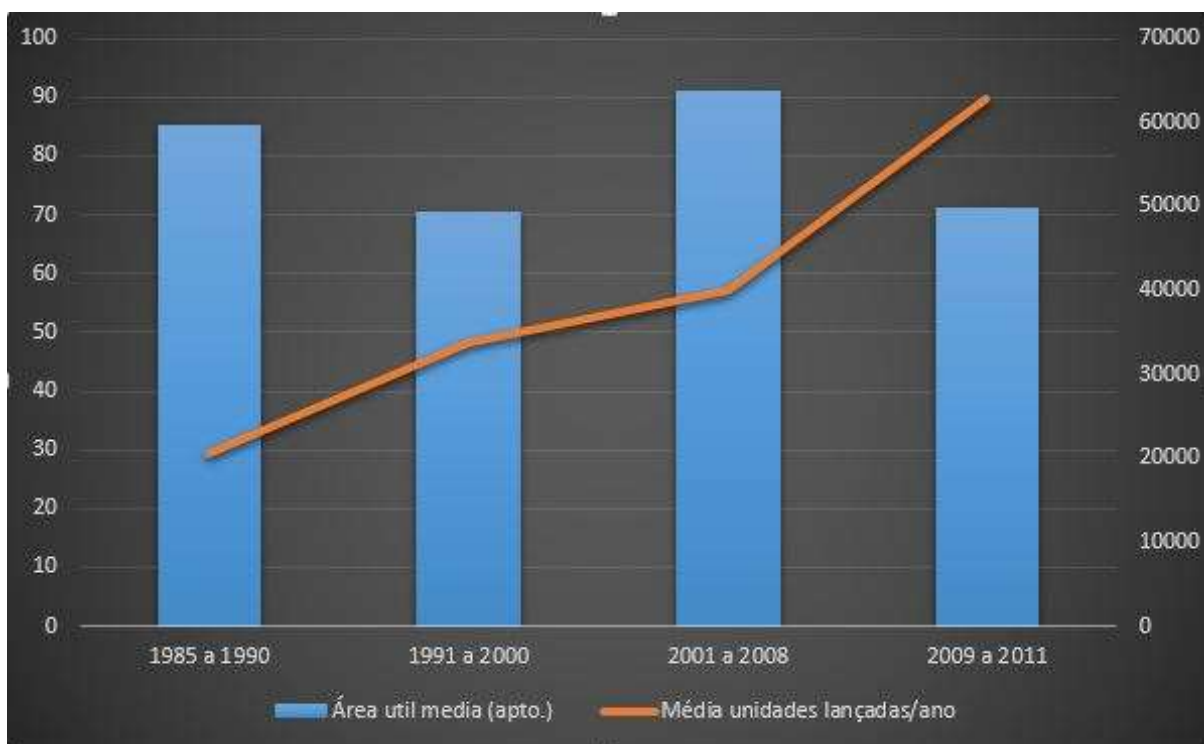
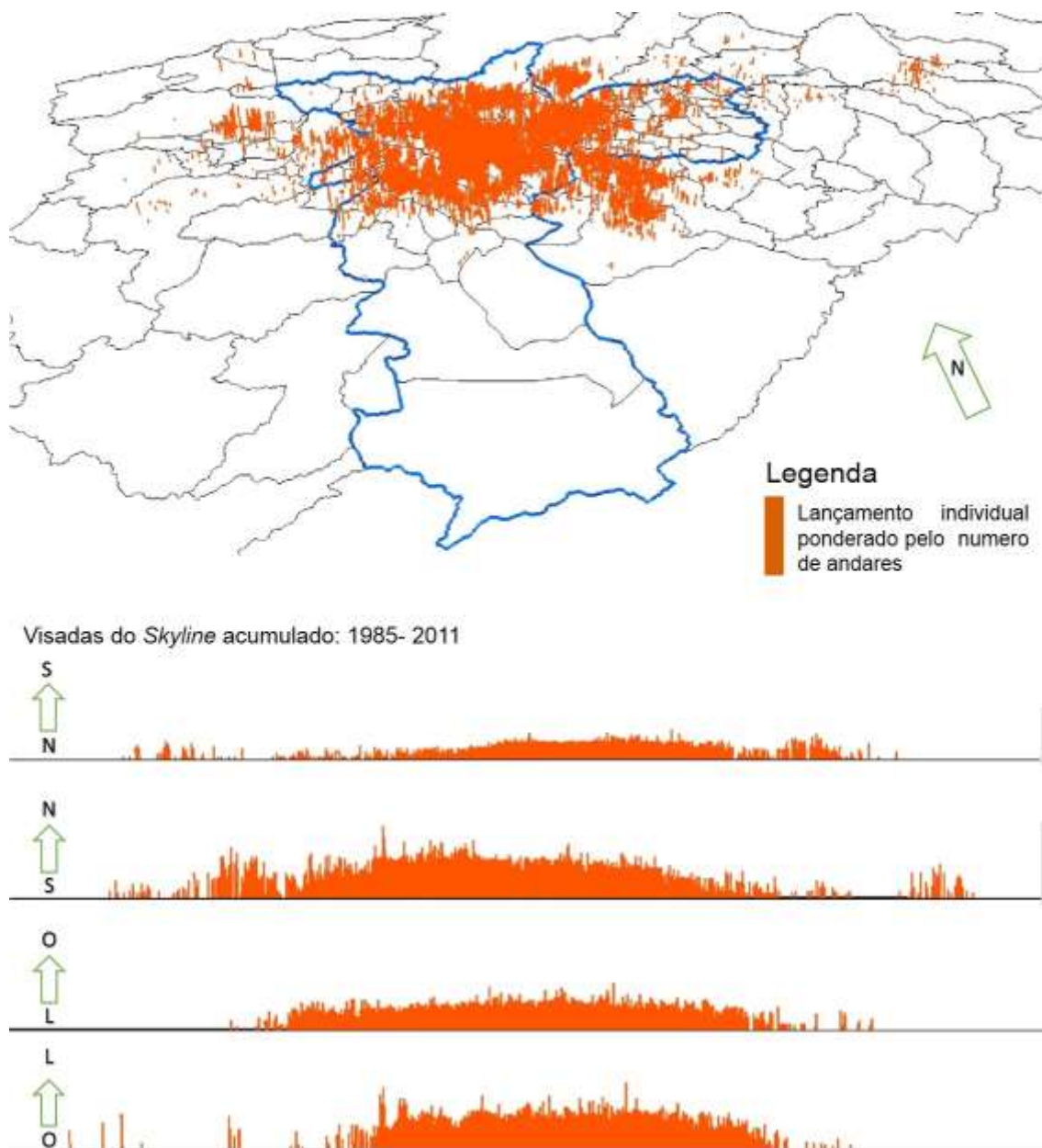


Gráfico 4: Áreas médias das unidades habitacionais lançadas por períodos



Essa mudança na estrutura de cobertura do solo tem significativa resposta na dinâmica física de funcionamento da cidade como corpo que interage, em toda sua complexidade com a energia que recebe, produz e libera, sistemicamente. Essas mudanças associadas ao processo de verticalização implicam no aumento da proporção de áreas recobertas por construções em relação a fração composta pela vegetação e solo com outros usos, se considerarmos o modelo linear de mistura espectral em uma imagem sobre a área. Na prática o que se tem é uma acumulação vertical ao longo do tempo que acompanha o movimento de expansão periférica da densidade de lançamentos, como podemos observar no mapa 6:



Mapa 6: Distribuição tridimensional dos lançamentos imobiliários residenciais acumulados de 1985 a 2011 (extrusão dos pontos ponderados pelo número de andares) e as visadas do skyline acumulado pelo mesmo processo no mesmo período. Elaborado pelo autor a partir dos dados do CEM e IBGE (2010)

## 2. A definição de Sensoriamento Remoto

NOVO (2008) define o termo Sensoriamento Remoto (SR) como “um conjunto de técnicas destinado a obtenção de informação sobre objetos, sem que haja contato físico com eles”, sendo esta uma definição globalizante do tema. Definições mínimas, mais focadas, são discutidas por JENSEN (2009), onde são bem delimitados os tipos de sensores ou instrumentos, o espectro de energia registrado, as plataformas a quais os sensores podem ser acoplados e o processamento possível dos dados adquiridos. Todas estas definições são válidas, e dependem do contexto em que se inserem. O que se pode afirmar, de todas as definições, é que o SR é uma ferramenta, uma técnica útil para várias áreas do conhecimento.

O SR é hoje um instrumento imprescindível para os planejadores, os geógrafos, os urbanistas, os ambientalistas e os pesquisadores de várias ciências, por sua capacidade de obtenção de informações de uma determinada área e por possibilitar também a análise dos fenômenos e das feições que ali ocorrem.

Basicamente as imagens geradas pelos sensores tem quatro resoluções distintas:

- a) Espacial: está associada ao tamanho das feições que podem ser visivelmente diferenciadas do seu entorno numa imagem;
- b) Temporal: refere-se ao tempo cíclico de coleta de imagens por um determinado sensor sobre uma mesma área;
- c) Radiométrica: é a amplitude que um *pixel*<sup>3</sup> em uma determinada imagem pode assumir. Quanto mais valores possíveis de serem registrados num pixel, maior esta resolução;
- d) Espectral: descreve quais comprimentos de ondas, separados pelas imagens nas chamadas “bandas espectrais”, uma imagem é capaz de registrar, podendo subdividir um trecho do espectro eletromagnético em várias subpartes referentes a intervalos de comprimentos de ondas específicos, sendo estes comprimentos de onda visíveis pelo olho humano ou mesmo fora desta faixa visível.

A expressão Sensoriamento Remoto surgiu nos anos 60 (JENSEN, 2009) e se refere à utilização de sensores capazes de captar a energia eletromagnética refletida ou emitida

---

<sup>3</sup> É a unidade fundamental de uma imagem. A resolução espectral é medida num exponencial de base 2: por exemplo, uma imagem de 8 bits equivale a  $2^8$ , ou seja, cada pixel consegue registrar 256 valores diferentes.

total ou parcialmente, por objetos e feições sobre a superfície terrestre, como construções (casas, edifícios, estradas, etc.), rochas, rios, matas e muitas outras.

Estes sensores são acoplados em plataformas como aviões ou satélites orbitais que situados a determinada distancia da superfície terrestre obtêm dados, em geral sob a forma de imagens, caracterizando a primeira etapa do uso de produtos de SR definida como aquisição de dados. Após a aquisição seguem-se as fases de interpretação, a qual consiste na apreensão das informações sobre as feições naturais e objetos representadas nos produtos adquiridos, e processamento, gerando a partir daí mapas, tabelas, relatórios, etc.

Como ponto de partida para pensar o uso desta técnica no o estudo do espaço urbano pela Geografia, reproduzimos as considerações do professor Milton Santos:

*“Os progressos técnicos que, por intermédio dos satélites, permitem a fotografia do planeta, permitem-nos uma visão empírica da totalidade dos objetos instalados na face da Terra. Como as fotografias se sucedem em intervalos regulares<sup>4</sup>, obtemos, assim, o retrato da própria evolução do processo de ocupação da crosta terrestre. A simultaneidade retratada é fato verdadeiramente novo e revolucionário para o conhecimento do real e o correspondente enfoque das ciências do homem, alterando-lhes, assim, os paradigmas” (SANTOS, 2008).*

## **2.1. O sensoriamento remoto do espaço urbano**

Nas áreas urbanas a utilização dos dados dos sensores é de extrema importância e adequabilidade levando-se em conta os processos de urbanização e degradação socioambiental a que são submetidas as cidades.

Contudo “seu grande avanço, para pesquisadores do meio urbano, ocorre somente entre o final do século XX e início de século XXI, com o aparecimento de sistemas destinados a fornecer imagens com altíssima resolução espacial” (LUCHIARI, 2008). Podemos destacar entre os sensores de alta resolução, por sua adequabilidade aos estudos urbanos, os produtos dos satélites IKONOS, o QuickBird, o GeoEye, entre outros que possuem respectivamente resolução espacial de 1m, 0,68m e 0,40m o que corresponde a um grande detalhamento espacial da informação.

Apesar da evidente qualidade de dados para estudos urbanos das imagens de altíssima resolução, algumas pesquisas pioneiras se utilizaram de sensores muito conhecidos

---

<sup>4</sup> Características de resolução temporal

como o Landsat e são referências básicas. LUCHIARI (2008) destaca os trabalhos realizados na Região Metropolitana de São Paulo por FORESTI, NIERO e SANCHES (1981) com imagens Landsat de 1973, 1975, 1977 e 1978, que permitiram a verificação de áreas de expansão urbana, além do estabelecimento de classes de uso e revestimento da terra. Somado a isso, as imagens de média resolução como as do Landsat representam baixo custo e acessibilidade na aquisição de dados, tornando-o atrativo para o desenvolvimento de metodologias de estudos urbanos que possam utilizar estes sensores no desenvolvimento de processos para uso destas imagens em áreas urbanas nos dias atuais.

Ainda que o incremento de resolução espacial dos sensores represente um avanço e ganho de possibilidades para os estudos urbanos, em especial a partir da interpretação dos dados gerados nestas séries de imagens de altíssima resolução espacial, o grande detalhamento também revela a complexidade envolvida na interpretação e classificação dos usos do espaço urbano, onde as formas e estruturas, especialmente as apreensões difusas mas perceptíveis, associadas a construção do espaço em função do capital (SANTOS, 2006) são captadas em riqueza de detalhes.

Os fixos do espaço urbano são compostos de uma grande diversidade de materiais (asfalto, concreto, plástico, metal, madeira, cerâmica, solo, vegetação arbustiva, grama, etc.), complexamente dispostas, associadas aos sistemas implantados para a habitação, as infraestruturas em geral, o comércio, a indústria e outros tantos diferentes usos associados ao solo urbano. Os fixos apresentam-se, neste sentido, como uma grande quantidade de materiais espalhados sobre o terreno, mas obedecem a uma lógica de associação e contexto, seja este apreensível numa imagem de forma direta ou a partir de um pensamento abstrato de contextualização que leva em conta o sistema socioeconômico em vigência e seus desdobramentos no espaço.

Tecnicamente o uso e a interpretação de fotografias aéreas e imagens orbitais são importantes ferramentas em órgãos de gestão pública (BURROUGH, 1998; GOODCHILD, 1992). Todos estes profissionais e órgãos que produzem e utilizam este tipo de informação representam os usuários qualificados e os profissionais da informação urbana (CULLINGWORTH, 1997; JENSEN, 2009; PEDRASSOLI, 2011).

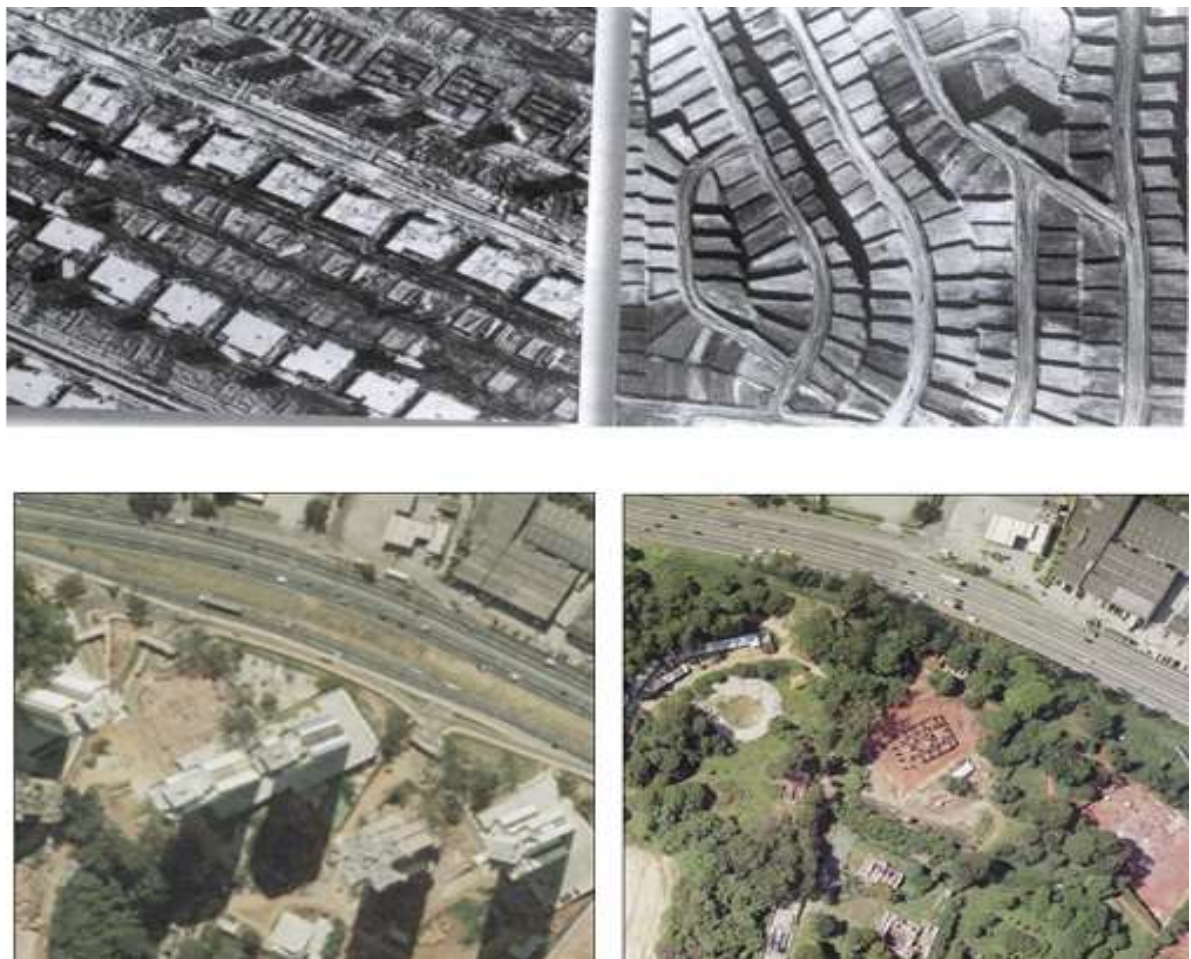
A dinâmica de produção e reprodução do espaço urbano tem características que tornam seu estudo, avaliação e monitoramento, processos com necessidades específicas na escolha de produtos de sensoriamento remoto destinados a estes fins. Existem em sensoriamento remoto quatro tipos de resolução que devem ser consideradas no uso de seus produtos: a resolução espacial; a resolução espectral; a resolução temporal; e a resolução radiométrica

(JENSEN 2009, LILLESAND & KIEFER, 2000). Destas, a configuração das resoluções espacial, espectral e temporal são essenciais para entendimento da dinâmica urbana.

## **2.2. Considerações sobre o uso das resoluções de SR em ambientes urbanos:**

### **O tempo**

Os fenômenos urbanos/periurbanos ocorrem em um determinado ciclo de desenvolvimento observável (JENSEN, 2009) (analogicamente ao ciclo fenológico de uma planta, apenas para uma função didática) como é exemplificado na figura 2. Este tempo é variável e em muitos casos tem especificidades, mas traz a primeira constatação importante referente ao uso de SR nas áreas urbanas: para poder analisar os fenômenos urbanos através de SR é preciso compreender o funcionamento dos processos e estruturas urbanas no tempo.



*Figura 3: Acima, terrenos limpos para loteamento em San Diego e residências em diferentes etapas de construção em Denver. Abaixo, construção de empreendimento imobiliário entre 2004 e 2007 em Taboão da Serra, RMSP. JENSEN (2009) e PEDRASSOLI (2011). Org. do autor*

Existem diferentes sensores com diferentes resoluções temporais. A escolha do tempo ideal coleta de informação sobre uma área é função do tempo de recorrência ou de desenvolvimento do fenômeno que se quer observar. As imagens coletadas pelo satélite

Landsat, por exemplo, têm um tempo de revisita de 16 dias, e já coleta informações desde 1973, o que torna a escala temporal de análise em áreas urbanas com este sensor muito ampla. Atualmente é possível trabalhar até mesmo com resolução temporal sob encomenda, como é o caso das plataformas sub-orbitais ou uso de veículos aéreos não tripulados (VANTS), os quais dependendo da área imageada podem ter revisita diária (PEDRASSOLI, 2011).

Para JENSEN (2009) “o sensoriamento remoto é especialmente útil no monitoramento da atividade do homem através do tempo, indicando um caminho promissor para o desenvolvimento sustentável e para as decisões governamentais

## **O espaço**

O espaço como conceito, no registro de uma imagem obtida por SR, é caracterizado pelo conjunto de objetos geográficos presentes na cena, e ainda que essa informação estática represente apenas a posição e a composição dos fixos no espaço geográfico, esses objetos são carregados de significado em seu contexto.

Os elementos espaciais geométricos presentes em uma cena são utilizados para a interpretação a partir de sua forma, do tamanho, da textura, da orientação, do padrão e formato e da sombra que ele produz sobre o substrato da cena. Ainda assim para que seja possível a extração da informação desejada é importante a concepção do contexto, o qual chamamos na interpretação visual de imagens de associação ou convergência de evidências, que é mais aprimorada tanto quanto for mais profundo o conhecimento do intérprete sobre a área de estudo.

De forma geral quanto maior é a resolução espacial de uma determinada imagem maior é a quantidade de informação presente e envolve a proporcional complexidade na interpretação, como compara a figura 3:





Figura 4: Parque do Ibirapuera numa imagem GeoEye com resolução espacial de 0,40 m e numa imagem Landsat com resolução espacial de 30m. Google Maps e NASA (2014), org. do autor.

O critério para escolha da resolução espacial adequada para uso em áreas urbanas se relaciona ao tipo de informação que se deseja extrair. Por exemplo, assentamentos precários, conhecidos popularmente como favelas, em geral necessitam de uma resolução espacial muito elevada para análise visual, visto que o adensamento das construções é alto, de difícil delimitação entre uma unidade habitacional e outra e além disso, as construções são pequenas, exigindo um tamanho de pixel que possibilite a observação de laterais de edificações pequenas, muitas vezes inferiores a 2,5 m e construídas a partir de materiais muito diversificados, gerando um padrão de reflectância<sup>5</sup> complexo (PEDRASSOLI, 2011).

Neste sentido, é a partir da necessidade de apreensão do fenômeno que definimos a resolução espacial adequada e as imagens de alta resolução espacial, a exemplo da QuickBird, vem representando avanço para aplicações de detalhe urbano, mas as altas resoluções espaciais não são a única forma de se estudar as problemáticas da urbanização, especialmente em escalar maiores como as escalas metropolitanas.

<sup>5</sup> Reflectância é uma função da porção da energia emitida pelo sol que chega até a superfície terrestre e interage com os objetos nela existentes. Da energia total que chega, quanto maior for a parcela dessa energia que é refletida pelo objeto que a recebeu, dizemos que maior é a reflectância desse objeto. Esse conceito será melhor explorado em tópicos posteriores.

## **O espectro**

Frequentemente os estudos urbanos através de SR estão associados com ideia de que nestas áreas é mais importante uma grande resolução espacial, menor que 5m, do que uma elevada resolução espectral (JENSEN, 2009). Essa ideia é válida para aplicações de gestão cuja confiabilidade sub-métrica da informação de uso do solo é relevante, como por exemplo nos cadastros técnicos.

No entanto, a informação espectral e a resolução temporal de uma imagem são muitas vezes mais importantes para entender a dinâmica de certos fenômenos como por exemplo o caso da vegetação urbana. A vegetação possui um comportamento espectral característico que permite mapear sua disponibilidade, qualidade e quantidade no espaço e no tempo através de seu registro espectral em uma imagem, mesmo que a imagem tenha baixa ou moderada resolução espacial, inclusive em áreas urbanas. A criação de índices de vegetação que reduzem a dimensionalidade da informação são um exemplo dessas possibilidades de mapeamento urbano.

Estudos referentes ao comportamento do campo térmico em áreas urbanas, conhecidos pelos estudos de ilha de calor urbana, também fazem uso de características espectrais em áreas urbanas. A sensibilidade dos olhos humanos é primariamente as luzes azul, vermelha e verde o que limita a possibilidade visual de comprimentos de onda pelo olho humano a uma faixa pequena do espectro eletromagnético. Neste sentido a utilização de sensores multiespectrais em áreas urbanas pode trazer informações para além da percepção visual convencional.

Em cada pixel de uma imagem, de qualquer resolução espacial, o valor assumido é uma mistura das respostas espectrais de todos os elementos que compuseram aquele pixel no momento de tomada da imagem pelo sensor. Essa informação mixada pode ser desmembrada, é o que chamamos de mistura espectral.



### 3. Mistura Espectral

Todos os elementos que compõe a superfície terrestre interagem com a energia proveniente do Sol<sup>6</sup>, definida em termos físicos como Irradiância Solar Incidente, em todos os diferentes comprimentos de ondas que formam o espectro eletromagnético. Esse é o princípio fundamental de funcionamento do Sensoriamento Remoto.

O registro desta informação em uma imagem é o produto básico de um satélite imageador. No entanto imagens são um modelo simplificado de representação do contínuo da realidade física observada, e para isso as imagens são constituídas de uma unidade fundamental chamada “*pixel*”<sup>7</sup>, que corresponde a menor unidade componente da imagem (figura 5). O pixel registra na forma de um número a parte da energia proveniente da fonte primária que interagiu com o objeto na superfície imageada e foi refletida, sendo possível seu registro pelo sensor a bordo de um satélite, por exemplo.

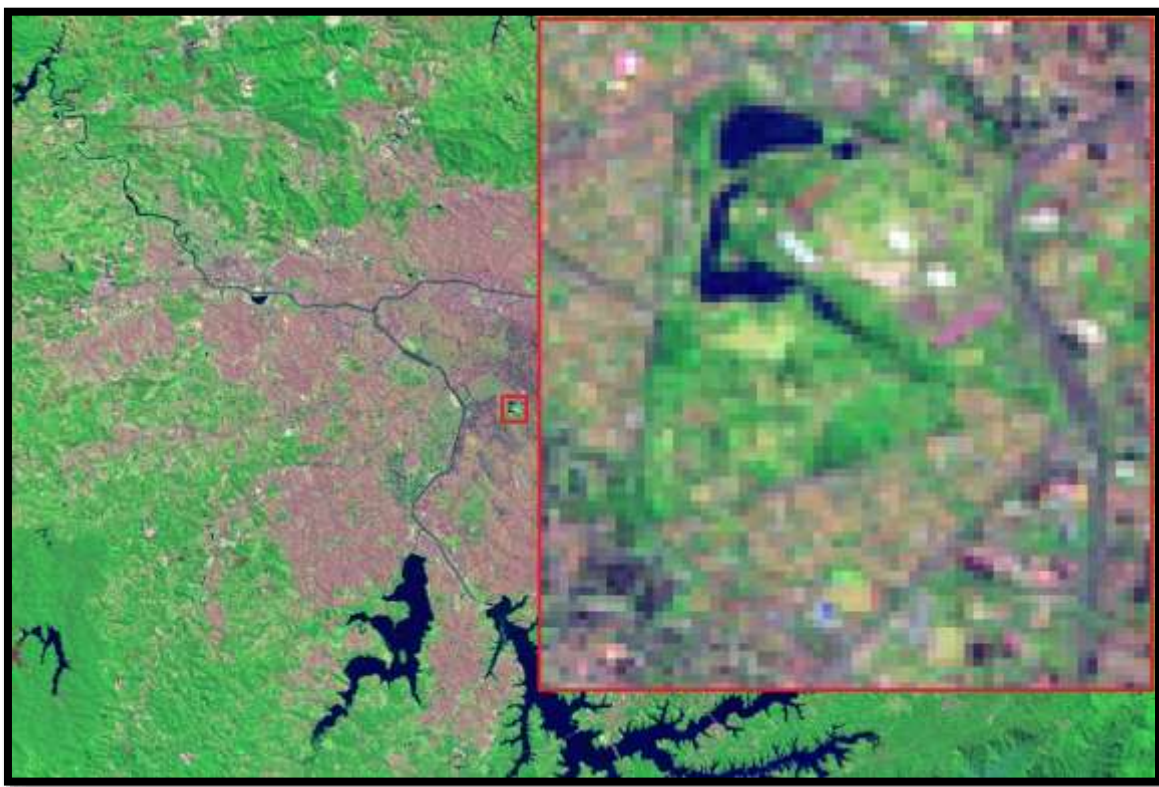


Figura 5: : Os pixels do parque Ibirapuera em São Paulo em uma imagem Landsat de 01/09/2013. Adaptado de NASA, 2013 (Growth of São Paulo, Brazil, July 9, 2014 - <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83987>)

<sup>6</sup> A energia com a qual os elementos da superfície terrestre interagem podem também ser provenientes de fontes não naturais, por exemplo os sensores orbitais do tipo RADAR, os quais produzem seu próprio pulso de energia para interação com os “alvos”. Neste caso, estamos falando de sensores ativos, enquanto que aqueles que registram as informações utilizando a energia proveniente do Sol, estamos falando de sensores passivos.

<sup>7</sup> Do inglês: *Picture Cell* ou *Picture Element*

Esse registro numérico, o qual dá o valor de representação do pixel na imagem, recobre uma determinada área da superfície terrestre que definimos como Campo de Visada Instantânea<sup>8</sup> (IFOV), e portanto o valor registrado referente a um pixel em uma imagem é na verdade uma média integrada dos valores da energia refletida por um conjunto de elementos da superfície terrestre, com diferentes interações com esta ao longo do espectro eletromagnético, e que formam a área imageada e registrada num determinado pixel. Esse registro da complexidade do comportamento espectral dos alvos em uma média única num pixel é chamado de Mistura Espectral, e dá a base para o modelo de mistura espectral<sup>9</sup>.

A mistura pode acontecer de duas maneiras: de modo linear ou não linear. O primeiro caso considera que a mistura de espectro registrada é uma combinação linear dos elementos presentes no IFOV ponderados por suas respectivas proporções. O segundo caso é mais complexo, considera que há uma interação da radiância de vários materiais distintos para composição do valor de determinado pixel. (PEREZ MACHADO & SMALL, 2012). Se cada fóton proveniente da fonte de energia primária interage com um único tipo de cobertura do solo no IFOV do sensor, a mistura pode ser considerada linear e o espectro modelado neste caso pode ser considerado como a soma linear das proporções do espectro de cada tipo de cobertura do solo presente multiplicado pela fração de superfície ao qual corresponde (SETTLE & DRAKE, 1993; ADAMS *et al.*, 1995)

De maneira geral o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) é considerado a forma predominante de funcionamento do registro das informações, enquanto o Modelo Não-Linear é considerado uma forma subjacente de funcionamento do registro das imagens (PEREZ MACHADO & SMALL, 2012).

### 3.1. Modelo Linear de Mistura Linear

O Modelo Linear de Mistura Espectral representa as medições de radiância como uma mistura linear dos Componentes <sup>10</sup> refletidas por diferentes materiais, e então captadas pelo IFOV do sensor (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) (SMALL & MILESI, 2013), assumindo que os componentes da mistura são a maior fonte da variação espectral em uma cena (SHIMABUKURO, 1987; TOLEDO & SHIMABUKURO, 2005).

---

<sup>8</sup> Originalmente: *Instantaneous Field of View*

<sup>9</sup> Em alguns trabalhos aparece a expressão “*mixel*”, referente a mistura espectral que compõe o *pixel* não puro

<sup>10</sup> Endmembers, do original em inglês

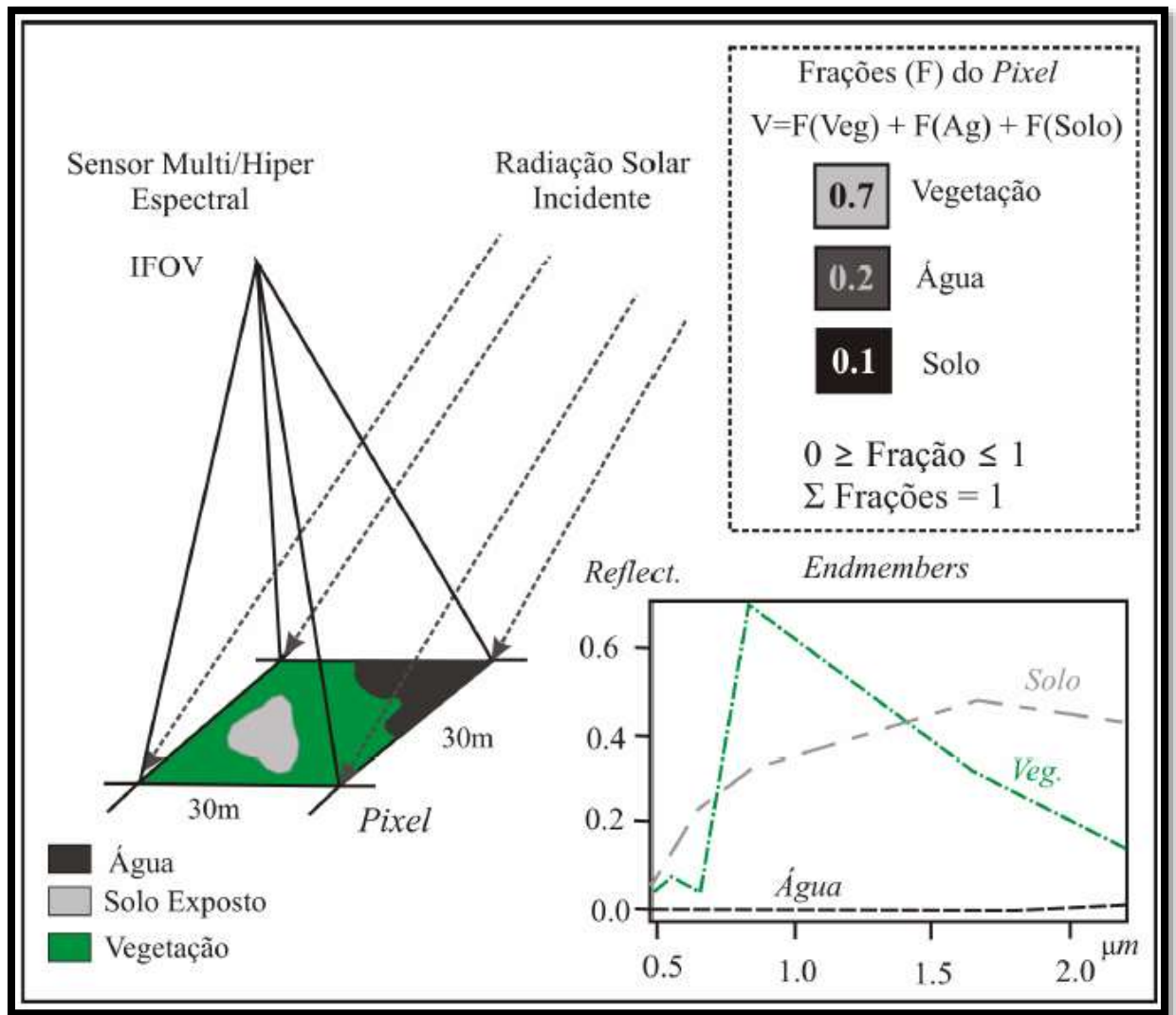


Figura 6: Decomposição perfeita de um MLME supondo um pixel de 30m de resolução espacial e com três componentes: vegetação, água e solo. Caso em que o resíduo do modelo é zero. (KAWAKUBO, 2010; PEREZ MACHADO & SMALL, 2012)

A mistura do pixel é uma questão de escala e tem relação direta com a resolução espacial do sensor. Em linhas gerais resoluções espaciais mais grosseiras têm maior probabilidade de se encontrar mistura (fato relacionado a complexidade e heterogeneidade das paisagens sobre a superfície terrestre) e menor probabilidade de apresentar pixels espectralmente puros, sem mistura (KAWAKUBO, 2010; SMALL & MILESI, 2013).

Além disso a ocorrência de misturas espectral não linear é mais frequente em comprimentos de onda com forte absorção de radiação incidente e também quando há presença de materiais com forte absorção combinados com a presença de material translucido (KAWAKUBO, 2010). Depreende-se daí que em alvos com grande absorção em determinados comprimentos de onda, como as bandas do vermelho e do infravermelho próximo dos sensores

Landsat, associadas ao estudo da vegetação, tendem a apresentar maior ocorrência de mistura espectral não linear.

Sendo o modelo linear o mais recorrente, na prática o que ocorre é que o valor de cada *pixel* e nas diferentes bandas espectrais da imagem assume um valor que representa a curva espectral, em seu respectivo intervalo, que é a curva ajustada pelos pesos dos componentes presentes no IFOV, gerando uma curva síntese, linearmente derivada das curvas dos componentes (Figura 8).

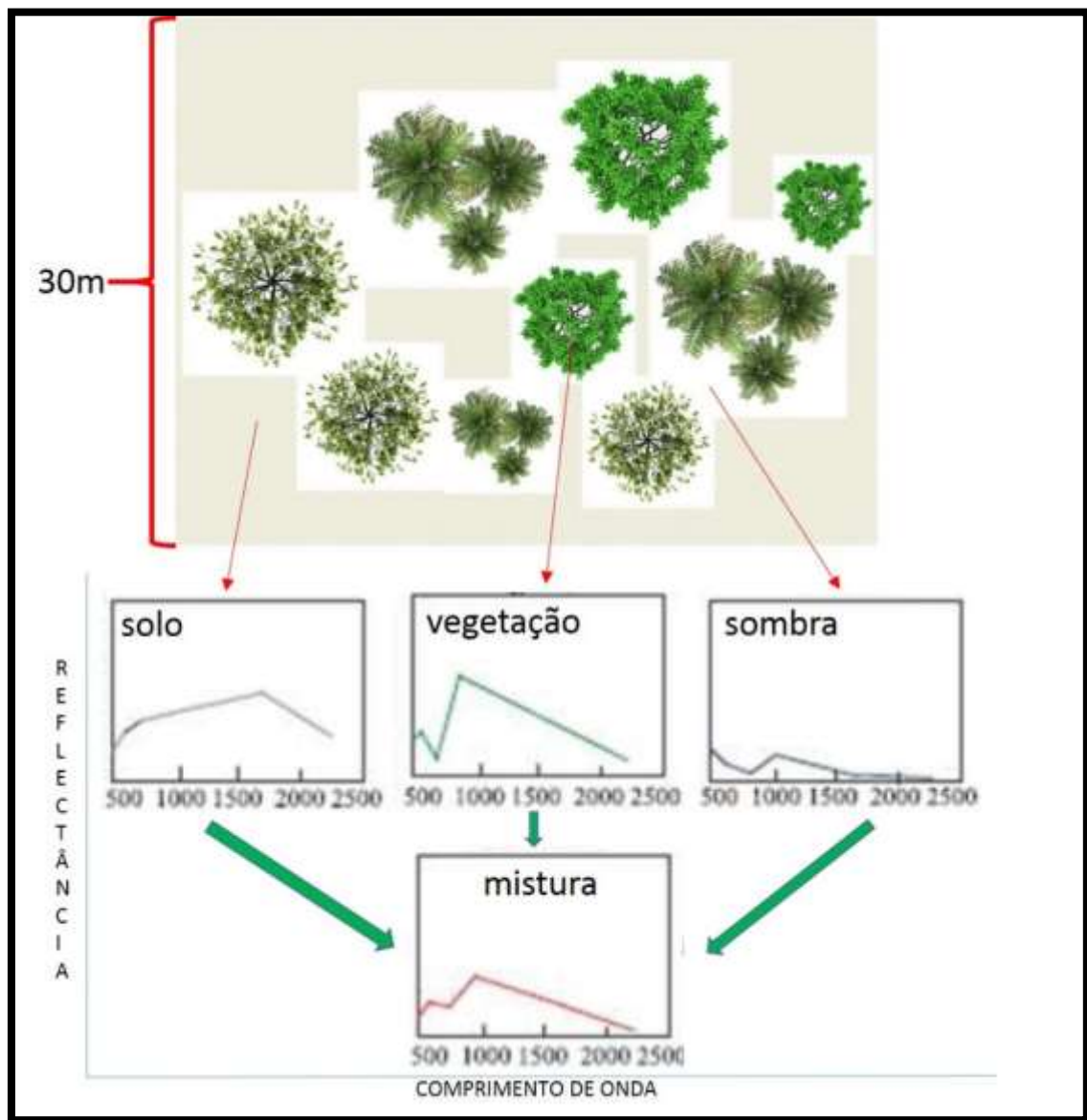


Figura 7: curva espectral ponderada resultante da mistura espectral linear

### 3.2. O Modelo Linear de Mistura Espectral em sua expressão matemática

A reflectância espectral nesse modelo pode ser descrita como a combinação linear dos componentes do espectro (SETTLE & DRAKE, 1993; ROBERTS et al, 1996; BATISTELLA et al, 2004; SMALL, 2005; SHIMABUKURO et al, 2005, WENZE et al, 2006; KUMAR et al, 2013), como:

$$f_1 \mathbf{C}_1(\lambda) + f_2 \mathbf{C}_2(\lambda) + \dots + f_n \mathbf{C}_n(\lambda) = \mathbf{R}(\lambda)$$

Sendo:

$\mathbf{R}(\lambda)$  é o perfil de reflectância observado, uma função contínua do comprimento de onda ( $\lambda$ );

$\mathbf{C}(\lambda)$  são os Componentes (*endmembers*) espectrais;

$f$  são as frações correspondentes dos  $n$  Componentes;

Perfis contínuos de reflectância são representados como vetores de reflectância estimada em comprimentos de onda específicos:

$$\mathbf{C}(\lambda) = [c_{\lambda 1}, c_{\lambda 2} \dots c_{\lambda n}] \quad \text{e} \quad \mathbf{R}(\lambda) = [r_{\lambda 1}, r_{\lambda 2} \dots r_{\lambda n}]$$

Sendo:

$c_{\lambda 1}$  Representa a reflectância observada do componente correspondente  $\mathbf{C}(\lambda)$ ;

$\mathbf{R}(\lambda)$  é a Integrada sobre uma banda espectral finita com um comprimento de onda central;

$r_{\lambda 1}$  Representa a porção observada do espectro de reflectância;

O modelo de mistura linear contínuo pode ser representado num formato discreto como um sistema de equações de mistura linear:

$$f_j \mathbf{C}_{ij} = \mathbf{r}_i$$

Sendo:

$$i = 1, b \quad \text{e} \quad j = 1, n$$

O sistema das equações lineares  $b$  pode ser descrito como:

$$\mathbf{Cf} = \mathbf{r}$$

Os valores determinados acima do esperado pelo modelo são incorporados pela mensuração do erro:

$$\mathbf{r} = \mathbf{C}\mathbf{f} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

Sendo que  $\boldsymbol{\varepsilon}$  é um vetor de erro que deve ser minimizado para encontrar o vetor fração  $\mathbf{f}$ , o que traz o melhor ajuste ao vetor de reflectância observado  $\mathbf{r}$ . Sendo então  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{r} - \mathbf{C}\mathbf{f}$ , procura-se minimiza-lo:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{r} - \mathbf{C}\mathbf{f})^T (\mathbf{r} - \mathbf{C}\mathbf{f})$$

Considerando o caso de ruído não correlacionado, a solução através do método dos mínimos quadrados é dada da seguinte forma:

$$\mathbf{f} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{r}$$

Sendo os dados dos satélites multiespectrais gerados em múltiplas bandas espectrais, consideramos a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral como uma solução conjunta de equações, formando um sistema:

$$\begin{array}{ccccccc} f_1 \mathbf{C}_{1\lambda 1} & f_2 \mathbf{C}_{2\lambda 1} & \dots & f_n \mathbf{C}_{n\lambda 1} & & \mathbf{R}_{\lambda 1} \\ f_1 \mathbf{C}_{1\lambda 2} & f_2 \mathbf{C}_{2\lambda 2} & \dots & f_n \mathbf{C}_{n\lambda 2} & & \mathbf{R}_{\lambda 2} \\ f_1 \mathbf{C}_{1\lambda 3} & f_2 \mathbf{C}_{2\lambda 3} & \dots & f_n \mathbf{C}_{n\lambda 3} & & \mathbf{R}_{\lambda 3} \\ f_1 \mathbf{C}_{1\lambda 4} & f_2 \mathbf{C}_{2\lambda 4} & \dots & f_n \mathbf{C}_{n\lambda 4} & = & \mathbf{R}_{\lambda 4} \\ f_1 \mathbf{C}_{1\lambda 5} & f_2 \mathbf{C}_{2\lambda 5} & \dots & f_n \mathbf{C}_{n\lambda 5} & & \mathbf{R}_{\lambda 5} \\ f_1 \mathbf{C}_{1\lambda 6} & f_2 \mathbf{C}_{2\lambda 6} & \dots & f_n \mathbf{C}_{n\lambda 6} & & \mathbf{R}_{\lambda 6} \end{array}$$

*Equação 1: Sistema linear de equações onde as radiâncias dos componentes se misturam linearmente em proporção a sua área ocupada. Obs. Caso do uso das 6 bandas espectrais do Landsat 7*

A resposta espectral registrada em um pixel segundo o modelo linear de mistura é o resultado da contribuição dos componentes, ou *endmembers*. A definição exata da quantidade de componentes é uma tarefa difícil face a grande variabilidade de alvos presentes na paisagem da superfície terrestre e que podem contribuir para a formação da imagem.

Uma etapa de grande importância no processo de modelagem da mistura espectral é a seleção dos componentes que farão parte do modelo. Em teoria, conhecendo-se de forma exata os espectros dos materiais presentes na paisagem, os valores das imagens-frações<sup>11</sup> geradas a partir do modelo de mistura espectral distribuem-se num intervalo de valores entre 0 e 1, sendo que a soma total das frações é igual a 1 (KAWAKUBO, 2010). Reside na dificuldade de se conhecer em exatidão os materiais presentes na paisagem e o número exato de componentes contribuintes na mistura espectral um dos maiores problemas.

A seleção de componentes de maior representatividade para o modelo em uso é uma etapa do processo. A seleção desses componentes é função dos componentes da cena e em grande parte dos trabalhos que usam a aplicação do MLME esta etapa de coleta, incluído trabalho de campo e construção de bibliotecas espectrais, visualização n-Dimensional da distribuição dos componentes e os testes, é uma parte da metodologia, como em CARVALHO JUNIOR et al, 2003; LINN, 2008; KAWAKUBO, 2010; MYINT & OKIN, 2010; entre outros.

A abordagem da análise da mistura espectral considera a variação espectral dos diferentes componentes (ou membros de referência, conforme aparecem em diversas publicações científicas) que formam o pixel numa imagem, mas não consideram a variação espectral interna de um componente, e é daí que surge o uso de múltiplos componentes na análise da mistura. Essa abordagem do MLME é conhecida como *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA), proposta por ROBERTS et al, 1998. O uso do MESMA estabelece para cada pixel o melhor modelo de mistura a partir do menor valor de erro médio quadrático (OKIN et al, 1998; RASHED et al, 2001 e 2003; SONG, 2003; POWELL & ROBERTS, 2007; FRANKE et al, 2009; MYINT & OKIN, 2010; KUMAR et al, 2013).

Os múltiplos Componentes demonstram a complexidade espectral das paisagens. Podemos definir então o processo de seleção dos componentes que melhor se ajustarão ao modelo linear de mistura espectral como um processo de redução de dimensionalidade dos dados, onde as dimensões mais representativas espectralmente, quando aplicadas ao modelo, produzirão o menor erro residual.

Neste aspecto, considerando a necessária seleção de Componentes em cada processamento, novas abordagens sugerem o uso de modelos globais e estandardizados de mistura espectral.

### **3.3. Modelos multi-escalares e padronizados de mistura espectral**

---

<sup>11</sup> São as imagens individualizadas, cujos números digitais dos pixels representam os valores proporcionais do componente referente que a originou. O número de imagens-frações são tantos quantos os componentes considerados no modelo.



A análise de mistura espectral vem tendo grande aplicação em imagens multiespectrais como as geradas pelos sensores TM e ETM+<sup>12</sup> a bordo das missões Landsat. Contudo grande parte destes estudos, por razões técnicas e metodológicas de seus objetivos na grande maioria dos casos, consideram a localização específica de suas áreas de estudo por conta da composição dos materiais componentes da paisagem local, onde a seleção de Componentes para a aplicação no modelo é sempre específica. Algumas implicações são as dificuldades de comparabilidade entre resultados obtidos por estudos que utilizam componentes específicos.

A ideia de modelos globais de componentes para uso em modelos lineares de mistura espectral é baseada na possibilidade de estabelecimento de componentes padronizados, possibilitando que componentes específicos possam ser adicionados a estes em casos específicos.

SMALL (2004), analisando o espaço espectral de mistura do sensor ETM+ realizou um estudo com 30 sub-cenas do ETM+ de 30 x 30 km de extensão cada, as quais compreendiam em sua delimitação amostras de várias partes do globo terrestre além de contemplar em cada sub-cena a maior variedade de componentes possíveis. Os resultados deste estudo indicam que uma grande variedade do espectro de reflectância pode ser representada, com bastante acurácia, como uma combinação de solo e substrato rochoso, vegetação e superfícies escuras (alta absorção) (SMALL, 2004). Neste mesmo estudo, a análise global dos resultados indica que mais de 98% da variância espectral do sensor ETM+ pode ser representada num espaço de mistura espectral tridimensional, adicionalmente mais de 90% da variância pode ser descrita em uma projeção bidimensional do espaço de mistura.

SMALL & MILESI (2013), tendo como base os resultados obtidos por SMALL (2004), ampliaram o rol de imagens e sub-cenas utilizadas para 100 (figura 9), além disso aplicaram além da conversão de radiância da superfície no bloco de imagens, a correção atmosférica para comparação. Neste estudo a análise global dos resultados demonstram que para o conjunto de dados analisado 99% da variância espectral pode ser representada num espaço de mistura espectral tridimensional. Os componentes Solo, Vegetação e Superfícies Escuras (SVD<sup>13</sup>) retornaram um desajuste inferior a 0.05 nos testes realizados, apontando para o potencial global destes componentes em qualquer modelo linear de mistura espectral (equação 2).

---

<sup>12</sup> TM = Thematic Mapper; ETM+ = Enhanced Thematic Mapper, referentes ao Landsat 5 e 7 respectivamente.

<sup>13</sup> *Soil, Vegetation and Dark Surfaces*



$$\begin{array}{ccc|c|c}
 f_1 C_{1\lambda 1} & f_2 C_{2\lambda 1} & f_3 C_{3\lambda 1} & & R_{\lambda 1} \\
 f_1 C_{1\lambda 2} & f_2 C_{2\lambda 2} & f_3 C_{3\lambda 2} & & R_{\lambda 2} \\
 f_1 C_{1\lambda 3} & f_2 C_{2\lambda 3} & f_3 C_{3\lambda 3} & & R_{\lambda 3} \\
 f_1 C_{1\lambda 4} & f_2 C_{2\lambda 4} & f_3 C_{3\lambda 4} & = & R_{\lambda 4} \\
 f_1 C_{1\lambda 5} & f_2 C_{2\lambda 5} & f_3 C_{3\lambda 5} & & R_{\lambda 5} \\
 f_1 C_{1\lambda 6} & f_2 C_{2\lambda 6} & f_3 C_{3\lambda 6} & & R_{\lambda 6}
 \end{array}$$

Equação 2: Sistema de equações ajustado aos componentes globais propostos por SMALL (2004) e SMALL & MILESI (2013)

Adicionalmente, a utilização dos componentes em uma imagem WorldView 2 adquirida sob as mesmas condições dos testes do ETM+ apresentou resultados do modelo altamente correlacionados aos do Landsat.

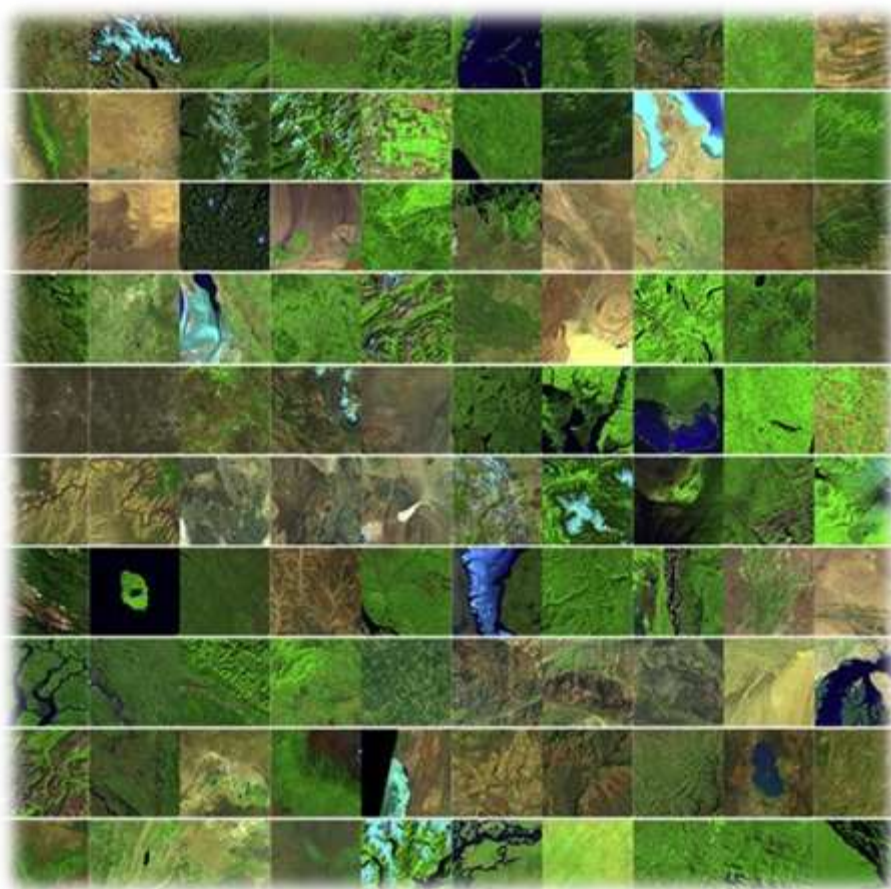


Figura 9: Conjunto de sub-cenas utilizadas por SMALL & MILESI, 2013

A interpretação de imagens através de suas imagens frações ao invés de considerarmos valores de espectro contínuo de emitância ou radiância torna-se mais fácil, e possivelmente seja essa uma das principais vantagens do uso da análise de mistura espectral.

Em primeiro lugar porque é mais palatável a qualquer analista o entendimento de presença de alvos sobre a superfície da terra e que contribuem para a formação da resposta espectral de um pixel em termos de proporção de contribuição, ou presença desses alvos em cada pixel, do que a leitura das grandezas físicas representadas na numerização da imagem.

Em segundo lugar, se considerarmos os modelos com uso de componentes globais, a comparação entre proporções de componentes altamente representativos do ponto de vista analítico de composição da superfície da superfície terrestre e de sua mudança, como por exemplo a fração vegetação, há maior robustez dos resultados pela possibilidade de comparação experimental e pelo maior poder de comunicação que os resultados atingem pela diminuição da dimensionalidade.

### **3.4. Aplicações**

A análise de mistura espectral vem sendo aplicada a inúmeras áreas de investigação científica envolvidas na análise das mudanças sobre a superfície terrestre.

Em todos os casos o objetivo se concentra no entendimento e modelagem dos processos de uso e ocupação do solo, seja com agricultura, usos urbanos, preservação ambiental ou outros. Em grande parte dos estudos se busca a modelagem das relações entre processos de extrema importância para a vida humana, como a produção de alimentos e a vida nas cidades, com as mudanças globais em curso, em especial as mudanças ambientais. O acúmulo histórico de dados sobre a superfície terrestre, vide o exemplo da missão Landsat, tem contribuído de maneira vigorosa com as construções dos modelos e das metodologias para esses fins, incluindo a utilização da análise de mistura espectral, na medida que adicionam a dimensionalidade do tempo nos modelos.

### **3.5. Estudos de caso em agricultura, vegetação e processos de degradação ambiental**

MOREIRA et al (1998) aplicaram o modelo linear de mistura espectral para avaliação e identificação de áreas de plantio de soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais. A metodologia consistiu na geração das frações de solo, vegetação e sombra das áreas em questão através do modelo de mistura linear para desmixagem das respectivas

proporções, e sobre essas imagens fração foram aplicados processos de segmentação para agrupamento de regiões com assinaturas espectrais homogêneas, comparando-se os resultados dessa classificação com os resultados obtidos na aplicação do mesmo método nas imagens Landsat TM originais. Como resultados do modelo proposto demonstraram que o a mistura espectral é mais eficiente no mapeamento de soja, comparativamente aos resultados obtidos nas imagens originais.

Outros tipos de plantio também aparecem como alvo das investigações utilizando modelos de mistura espectral. FITZGERALD et al (2004) aplicaram o MESMA em dados multiespectrais coletados a partir de uma plataforma sub orbital em uma fazenda de algodão, cujo objetivo foi a comparação dos modelos testados com 3 ou 4 componentes (endmembers) e dados de campo, incluindo duas frações de sombra diferentes no modelo de 4 componentes: vegetação sombreada e solo ombreado. Os resultados indicaram que a inclusão das frações sombra aumentaram os valores de correlação entre a proporção de cobertura do cultivo e a altura das plantas, quando comparados com o modelo que usa apenas a fração vegetação.

Numa abordagem mais conceitual outros estudos de mistura espectral em agricultura propõem soluções para o entendimento do problema da mistura espectral. KOSAKA e KOSUGI (2003) propõe um novo método para estimativa de elementos puros e da proporção de mistura em áreas vegetadas e de produção agrícola através da aplicação do *Independent Component Analysis* (ICA). Na técnica proposta os autores definem a distribuição espacial periódica dos plantios ao longo da área de estudo como sendo os componentes independentes (IC) e a partir disso os espectros puros dos plantios são estimados como a proporção e mistura do IC. É uma abordagem semelhante ao modelo de mistura espectral.

Similarmente SOMERS et al (2009) propõe o que chamam de “solução para o problema da mistura espectral no sensoriamento remoto da agricultura”. O trabalho propõe a geração das frações da mistura em dados hiperespectrais combinadas com o uso de dados de campo, e os resultados dos experimentos da equipe demonstram um erro médio quadrático inferior a 0.075 para estimativa do espectro da vegetação.

Muitos estudos também apresentam o uso de redutores de dimensionalidade como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) associados ou comparados aos resultados obtidos pela fração vegetação do modelo linear de mistura espectral para monitoramento de áreas de cultivo.

No Brasil projetos de natureza mais contínua sobre o monitoramento dos padrões de uso do solo que utilizam a análise da mistura espectral como procedimento técnico

são bastante eficazes. De maneira geral esses projetos têm iniciativa como políticas públicas e tem objetivo de combate às ilegalidades no desmatamento e avanço ilegal da agricultura em grandes áreas do centro-oeste e norte do Brasil (KAWAKUBO, 2010). O TerraClass é uma dessas iniciativas. O objetivo é o acompanhamento das mudanças de uso nas áreas monitorados pelo PRODES<sup>14</sup> através da classificação do uso do solo nestas áreas com uso de modelo de mistura espectral e segmentação de imagens. O TerraClass possibilita o acompanhamento das mudanças de uso do solo, incluindo a agricultura e pecuária e seu avanço sobre áreas de desmatamento na Amazônia legal.

É notável o aumento significativo dos estudos científicos que utilizam os modelos de mistura espectral para identificação e monitoramento do desmatamento, espacialmente na região Amazônica, em termos de publicações nacionais e internacionais, e do Cerrado e Pantanal brasileiros com uma maior concentração de publicações ainda em língua portuguesa.

MORAN, BATISTELLA e LU (2004a), e MORAN, BATISTELLA, LU e MAUSEL (2004b) realizaram classificações multi temporais em imagens Landsat com base na classificação das frações sombra, vegetação verde e solo seguindo as classes de mapeamento definidos pela metodologia *Land Use/Land Cover* (LULC)<sup>15</sup>, cujo objetivo foi a geração de mapas de detecção de mudanças no uso e cobertura da terra em Rondônia, Brasil. Os resultados apresentados confirmam para o caso de estudo (2004a) que a abordagem das imagens fração derivadas do modelo de mistura espectral para classificação multi temporal em imagens multiespectrais é mais eficaz quando comparada a métodos de classificação tradicionais, além disso os resultados experimentais (2004b) demonstraram que a utilização de correção atmosférica nas imagens exerceu baixa interferência nos resultados finais, com uma acurácia de 86,6% na classificação baseada na análise de mistura espectral frente a 81,4% no classificador de máxima verossimilhança. Resultados semelhantes já haviam sido obtidos pelos mesmos autores em 2002 (MORAN, BATISTELLA e LU, 2002).

SHIMABUKURO, NOVO e PONZONI (1998) também utilizaram imagens fração derivadas do modelo linear de mistura espectral num estudo para o monitoramento da

---

<sup>14</sup> Monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite, baseado em imagens Landsat e CBERS, quantifica o desmatamento. Conta ainda com o DETER que divulga os resultados, o QUEIMADAS e o DEGRAD, que tem função similar de acompanhamento e fiscalização dos processos de uso do solo

<sup>15</sup> LULC é uma legenda padrão, a qual derivou de um projeto desenvolvido pela Convenção das Nações Unidas no Combate à Desertificação (UNCCD) entre os anos de 2006 e 2010. A legenda LULC é descrita para uso em escalas regionais.

([http://www.desertwatch.info/index.php?option=com\\_content&view=article&id=95:lulc&catid=34:project&Itemid=71](http://www.desertwatch.info/index.php?option=com_content&view=article&id=95:lulc&catid=34:project&Itemid=71)).

cobertura do solo na região do Pantanal. O método consistiu na comparação dos resultados obtidos em duas imagens Landsat 5 dos anos de 1992 e 1993, referentes aos períodos seco e chuvoso respectivamente, da caracterização das mudanças com o NDVI e a fração vegetação do modelo linear. Os resultados deste estudo apontaram uma maior sensibilidade da imagem fração da vegetação às mudanças quando comparada aos resultados obtidos com o NDVI.

TOLEDO e SHIMABUKURO (2005) compararam as frações vegetação advindas do modelo linear de mistura espectral aos índices NDVI e EVI<sup>16</sup> derivados de imagens dos sensores ETM+ e MODIS<sup>17</sup> referentes a amostras aleatórias da região Amazônica e regiões montanhosas do sul do Brasil. Novamente os resultados indicaram melhor desempenho do uso das frações em relação aos índices, e especificamente neste caso o modelo linear teve melhor funcionamento na amostra da região Amazônica. Estudos semelhantes em áreas montanhosas foram feitos por ROBERTS et al (1996), tendo como área teste a região montanhosa de Santa Mônica, na Califórnia, empregando múltiplos membros de referência em modelo linear de mistura espectral.

Também em 2005, ANDERSON, ARAGÃO, LIMA e SHIMABUKURO publicaram resultados semelhantes aos encontrados no trabalho anterior publicado no mesmo ano, sendo que neste último o cerne da análise foi a avaliação apenas do sensor MODIS e tendo como campo de prova apenas a região da Amazônia Legal, no estado do Mato Grosso.

FREITAS, HAERTEL e SHIMABUKURO (2008) trabalharam na perspectiva da dificuldade de aquisição de *pixels* puros para indicação dos membros de referência ou componentes em função da diminuição da resolução espacial do sensor utilizado. Os autores testaram uma proposta comparativa utilizando dados dos sensores CCD (20m de resolução espacial), IRMSS (80m de resolução espacial) e WFI (260m de resolução espacial), sendo que as reflectâncias espectrais dos membros foram estimadas para todas as imagens, vegetação, sombra e solo, e os resultados demonstraram que as curvas estimadas para o IRMSS<sup>18</sup> e o WFI<sup>19</sup> são muito próximas daquelas estimadas para o CCD.

Também debruçados sobre a região Amazônica, ADAMS et al (1995) utilizaram um modelo linear de mistura espectral com 4 componentes, numa área de expansão nas proximidades de Manaus em imagens com variação temporal. Os resultados obtidos

---

<sup>16</sup> Do inglês: *Enhanced Vegetation Index*

<sup>17</sup> Do inglês: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

<sup>18</sup> *Infrared multispectral scanner*

<sup>19</sup> *Wide Field Imager*

somam-se a outros que sugerem que o uso do modelo de mistura espectral na classificação de imagens multi temporais é eficiente.

KAWAKUBO (2010) em sua tese de doutorado apresentou a aplicação de uma metodologia para mapeamento das mudanças do uso do solo e variação da vegetação também na região Amazônica, especificamente em São Felix do Xingu/PA. A metodologia do trabalho consistiu na utilização conjunta do modelo linear de mistura espectral com vistas a redução da dimensionalidade dos dados de imagens TM e a classificação por regiões, através de processos de segmentação. Os resultados deste trabalho apontam para a adequabilidade e acurácia do modelo proposto além de indicar forte correlação entre as mudanças do uso do solo na área de estudo a o avanço da pecuária na região.

Aplicações do modelo linear de mistura espectral em dados coletados de outros ecossistemas também têm se mostrado eficientes. O entendimento de alguns processos sobre estes ecossistemas são de extrema importância para a continuidade do uso dos recursos naturais pelo homem, a Desertificação é um exemplo.

DAWEBAIT e MORARI (2011) aplicaram o modelo linear de mistura espectral para o monitoramento da degradação da vegetação em regiões de Savana no Sudão, buscando a associação disso com o processo de Desertificação em curso. Para tanto utilizaram uma série temporal de 3 imagens TM e 2 imagens ETM+ adquiridas entre 1987 e 2008 no centro norte do estado de Kurdufan no Sudão. Os autores compararam as imagens registrando as mudanças a partir das frações extraídas do modelo linear e como resultados, além da indicação da adequabilidade do análise de mistura espectral, concluíram que é necessário um esforço para identificação de fatores locais causadores do processo de desertificação e criação de estratégias de combate, também concluem que a obtenção de informações sobre o processo de desertificação a partir do modelo de mistura espectral é consistente, de baixo custo e responde à necessidade de identificação de áreas com maior risco.

OKIN et al (1998) também investigaram o processo de desertificação em Las Cruces, Novo México, utilizando a classificação dos dados do sensor AVIRIS<sup>20</sup> através do modelo linear de mistura espectral. A metodologia consistiu na utilização de múltiplos membros de referência (MESMA), comparando os resultados para modelos com 2,3 e 4 componentes. As conclusões deste trabalho também trazem indicações da aplicabilidade da análise de mistura espectral em áreas áridas e semiáridas.

---

<sup>20</sup> *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*

### **3.6. A análise de mistura espectral aplicada a áreas urbanas**

Os estudos realizados em áreas urbanas, de maneira geral no campo do Sensoriamento Remoto e também no caso específico das análises de mistura espectral, concentram-se no processo de expansão urbana.

Essa inferência pode ser confirmada, por exemplo, ao comparar a quantidade de referências encontradas nos periódicos especializados tratando do sensoriamento remoto de áreas urbanas e as abordagens que tais estudos utilizam.

Isso faz sentido, pois se considerarmos que as técnicas aplicadas, incluindo a análise de mistura espectral, buscam a caracterização do uso da terra, é na verdade no processo, conhecido como urbanização, e não na figura estática que reside o verdadeiro centro da questão. Mesmo regiões como a Amazônica, além de muitas outras ao redor do globo, são também locais de ocorrência contínua desse processo (BOUCEK e MORAN, 2004), clara evidência quando retomamos os estudos de caso de aplicação na análise da vegetação já citados neste trabalho.

Dito isto, muitos trabalhos sobre análise da mudança do uso do solo urbano vêm sendo desenvolvidos, todos em comum possuem a preocupação com o entendimento do processo de urbanização e suas relações com mudanças ambientais e sociais a nível global como pano de fundo.

Os exemplos de estudo são diversos. KRESSLER e STEINNOCHER (1996) realizaram um estudo multi temporal com duas cenas TM, 1986 e 1991 respectivamente, compreendendo a cidade de Viena, Áustria, cujo método consistiu no uso de análise de mistura espectral utilizando múltiplos membros de referência para geração de 4 imagens fração em cada época: vegetação, água, área construída e sombras. A fração “área construída” foi comparada no intervalo temporal para detecção das mudanças e indicação de novas urbanizações, sendo que os resultados do estudo indicados pelos autores demonstram que a maioria das áreas detectadas como novas ocupações urbanas foram confirmadas com dados validados em campo.

SMALL (2002) traz um estudo cujo objetivo é a avaliação multi temporal da reflectância urbana, tendo como área teste a área metropolitana de Nova York, usando análise de mistura espectral, considerada pelo autor como ferramenta capaz de gerar medidas físicas robustas do ambiente e assim possibilitam as estimativas de proporção sub-pixel. Seus resultados incluem a indicação de que a reflectância urbana pode ser descrita como um modelo linear de mistura espectral de 3 componentes divididos em albedo alto, albedo baixo e vegetação. O autor avaliou a variação interanual de dados do sensor TM entre maio e dezembro de 2002, e conclui que esses dados podem ser aplicados a monitoramento da variação tanto da vegetação quanto das áreas ocupadas.

Neste mesmo estudo SMALL também faz algumas indicações importantes para o uso de análise de mistura espectral em ambientes urbanos: o modelo linear descreve com maior precisão as variações da fração vegetação, e na transição entre as frações de alto e baixo albedo é onde ocorrem confusões pelo funcionamento não linear da mistura. O autor aponta aqui parte do que vem dando continuidade com publicações seguintes em SMALL (2004) e SMALL e MILESI (2013), com a sugestão de membros de referência padronizados e multi-escalares.

Em 2003 o mesmo autor apresenta um estudo sobre a avaliação da reflectância urbana utilizando imagens IKONOS de 14 localidades urbanas ao redor do globo. Novamente os resultados apresentados apontam que o mesmo grupo de 3 membros de referência explicam o comportamento na massa de dados em estudo.

ALBERT, WEEKS e COE (2004) aplicaram o modelo linear de mistura espectral para identificação de mudanças no uso da terra da região central de uma área estuarina ao norte dos Estados Unidos conhecida como Puget Sound. A metodologia adotada pelos autores foi multi escalar, sendo analisados os resultados na escala regional ou da paisagem, sub-bacias hidrográficas e num grid definido de janelas de 90m e teve como procedimentos técnicos a aplicação do modelo linear de mistura espectral, utilizando três componentes ou membros de referência, sendo vegetação, áreas pavimentadas e sombras, mais uma fração do erro. O modelo foi aplicado sobre duas imagens ETM+ datadas de 1991 e 1999, sendo gerados mapas de uso para cada data contendo as seguintes classes: urbano misto, urbano impermeável, floresta, agricultura, solo exposto, clareiras e água. Os resultados apresentados vêm da comparação da evolução das classes apresentadas para os respectivos períodos, sendo que acurácias obtidas para 1991 foi de 91% para 1991 e 88% para 1999, adicionalmente apontam os autores que o resultado global demonstra um incremento de 6.7% de áreas pavimentadas no período.

Na cidade de Indianapolis localizada no estado de Indiana, Estados Unidos, LU e WENG (2004) examinaram as características urbanas do local através das classes definidas pelo LULC, tendo como objetivos a avaliação da classificação a partir das imagens fração, geradas para o estudo com testes de 3 e 4 componentes, ao método de máxima verossimilhança numa imagem ETM+ datada de 2000. A combinação de componentes foi definida a partir de diversos testes de combinação. Os resultados apresentam uma acurácia de 89,33% e índice Kappa de 0.8575 para os resultados obtidos com análise de mistura espectral, enquanto que os valores obtidos pela máxima verossimilhança foram de 80% de acurácia e índice Kappa de 0.7284. Outros apontamentos dos autores é a indicação de que estratificação da área em unidades homogêneas, como residencial, residencial e comercial, etc, possivelmente



aumentem a riqueza das imagens fração. Estudos semelhantes foram feitos por NOGUEIRA, SANSON e PESSOA (2007) objetivando o entendimento da expansão urbana da cidade de Manaus, Amazonas, e sua relação com as características demográficas utilizando a análise de mistura espectral para classificação de séries temporais de imagens, além dos desenvolvidos por SARAPIROME e KULRAT (2010).

POWELL e ROBERTS (2007) também preocuparam-se com o crescimento urbano e mudanças na paisagem nas áreas urbanas e peri-urbanas em Rondônia, fronteira da Amazônia legal. A metodologia se baseou na aplicação de análise de mistura espectral com múltiplos membros de referência, conhecida como MESMA, aplicadas a imagens TM e ETM+ de 1985, 1990, 1995 e 2000, buscando a quantificação das áreas convertidas em urbanização no período. Os autores concluem que, além do processo de desmatamento estar também associado ao processo de urbanização, o método de múltiplos componentes demonstrou adequado aos objetivos propostos.

KÄRDI (2007) conduziu estudos sobre a cidade de Tartu, Estônia, cujo objetivo principal foi o estudo da classificação de três imagens TM, com datas de aquisição em 1988, 1995 e 2001, para mapeamento da vegetação, superfícies impermeáveis e solo. O modelo linear de mistura espectral foi utilizado para geração das frações e os resultados comparados ao mapa básico público da Estônia, em escala 1:10.000, concluindo que o erro global relativo foi de 9%, sendo o erro individualizado para vegetação e solo de 6% e para superfícies impermeáveis de 15%.

Na área metropolitana de Phoenix, cidade localizada em uma região desértica no Arizona, MYINT e OKIN (2010). No estudo foram empregados um total de 204 combinações de modelos com 4 componentes para identificação dos candidatos em áreas urbanas e 96 combinações de modelos com 5 componentes em áreas não urbanas utilizando o MESMA, com validação efetuada com auxílio de uma imagem QuickBird. Os resultados indicaram um nível de confiança de 99% das frações derivadas pelo MESMA em relação as frações derivadas da classificação da imagem QuickBird, com correlação de Pearson acima de 85% para todas as frações. Ponderam os autores que os resultados corroboram com avaliações sobre a MESMA em estudos urbanos obtidas por outros autores, ampliando, com os devidos ajustes, a aplicabilidade para estudos de cidades localizadas em áreas desérticas.

PEREZ MACHADO e SMALL (2012) publicaram a proposta e os primeiros resultados de um estudo urbano utilizando o modelo linear de mistura espectral na cidade de São Paulo, o maior aglomerado urbano da América do Sul. O objetivo do estudo foi avaliar as mudanças no uso da terra na área em questão utilizando imagens TM e ETM+ para identificação

entre as décadas de 1986 a 2010. Os resultados demonstram que a aplicação do MLME com três membros de referência padronizados – substrato, vegetação e frações escuras - (SMALL & MILESI, 2013), e detectaram um valor global de 0,99% de mudança de cobertura entre 1986 e 2005 e 1,32% entre os anos de 2000 e 2010, considerando ainda que tais valores são superiores quando observadas apenas as mudanças na cidade de São Paulo e não em todo o aglomerado urbano. Adicionalmente os autores desenvolvem uma proposta de utilização conjunta ao modelo linear de mistura espectral e os dados multi temporais (2000, 2006 e 2010) de radiância de focos de luminosidade gerados pelo sensor DMSP-OLS<sup>21</sup> na mesma área para uma análise exploratória do processo de urbanização em São Paulo.

LU et al (2014) realizaram o mapeamento das mudanças multi temporais em imagens Landsat na área de Jin-Jin-Tang, China, utilizando a redução de dimensionalidade dos dados através da geração de duas frações pelos métodos do NDVI para vegetação, e do NDBI para áreas construídas. Utilizando o NDVI como parte do processo metodológico MORATO (2008) apresenta um modelo de análise espacial para o mapeamento da desigualdade ambiental no município de São Paulo, onde a fração vegetação obtida pelo NDVI é associada a informações demográficas na modelagem da distribuição espacial do fenômeno da desigualdade.

Tratando do tema de vegetação em áreas Urbanas YU et al (2005) aplicaram o modelo linear de mistura espectral para geração da fração de vegetação em imagens ETM+ de 2000 referentes a cidade de Shanghai, maior aglomerado urbano da China. Os autores concentraram-se na utilização de algoritmos de geração de índice de pureza do pixel (PPI) e em algoritmos de *Minimum Noise Fraction* (MNF). Concluem os autores que o MNF reduz a redundância ao concentrá-la nas frações mais importantes.

SONG (2005) também desenvolveu estudo de análise de mistura espectral tratando da vegetação urbana, discutindo no artigo a incorporação da variabilidade dos membros de referência, utilizando o NDVI para simulação de um modelo de 2 membros de referência. Anteriormente SMALL e MILLER (1999; 2000) desenvolveram pesquisas sobre a quantificação de vegetação intraurbana na cidade de Nova York em imagens Landsat, utilizando o modelo linear de mistura espectral para extração da fração vegetação da área. Os autores enfatizam que o método da análise da mistura espectral quando comparado ao mais comumente método de extração de vegetação conhecido como NDVI, tem a vantagem de ser

---

<sup>21</sup> Defense Meteorological Satellite Program – Operating Linescan System

extremamente voltado a uma leitura física do ambiente além de poder ser associado a uma quantidade de área num pixel.

Outras abordagens são possíveis, e de fato uma série de pesquisadores tem aplicado esforços na modelagem dos sistemas terrestres, sejam ele físicos, antrópicos e suas relações entre si. O uso do sensoriamento remoto e da aplicação análises de mistura espectral tem feito parte desses esforços.

A associação entre as informações obtidas por sensores orbitais e características socioeconômicas dos territórios é uma linha que se segue nesse mar de possibilidades científicas abertas pelas técnicas apresentadas, e essa fronteira de integração de instâncias ainda é um dos principais desafios.

POZZI e SMALL (2001) desenvolveram pesquisa cujo objetivo foi a análise exploratória da consistência entre os valores de densidade demográfica em áreas suburbanas advinda de coletas censitárias e a abundância de vegetação derivada a partir de imagens orbitais com aplicação de análise de mistura espectral. Seis cidades nos Estados Unidos foram analisadas. Os resultados obtidos demonstraram que área ocupada por vegetação diminui linearmente em uma taxa referente ao logaritmo de base 10 do valor de densidade populacional nas cidades com maiores índices de densidade. De maneira geral, o que os autores demonstram no caso das cidades norte-americanas é uma correlação espacial entre a densidade populacional e a presença de vegetação.

A vegetação, e sua fração correspondente, tem sido também alvo dos investigadores em áreas urbanas por sua relação com a qualidade ambiental e com a qualidade devida nas cidades. É neste sentido que MORATO (2008), cujo trabalho já foi descrito anteriormente neste texto, engloba a fração vegetação extraída por NDVI aos setores censitários da cidade de São Paulo para associa-la, através da geração de índices sintéticos, ao comportamento sociodemográfico dos dados coletados por pesquisas censitárias.

RASHED (2004) traz estudo abordando a questão urbana e a relação possível dos dados de sensoriamento remoto e das unidades de planejamento com dados socioeconômicos agregados através dos conceitos de métricas da paisagem, lógica *fuzzy* e MESMA. O autor propõe uma metodologia a testa na cidade de Los Angeles, Califórnia. O desenvolvimento do estudo envolve a utilização da MESMA para geração de 4 imagens fração: vegetação, área impermeável, solo e sombra, para imagens Landsat datadas de 1990 e 2000. As frações são normalizadas e então cruzadas com os setores censitários da área de estudo para a geração posterior de um índice de mudanças ocorridas na década agregadas ao setor censitário. Os autores concluem que as métricas apresentadas podem de fato explicar, em termos de

expansão urbana e impermeabilização no período, a forma de aplicação de políticas públicas na área urbana de Los Angeles. Essa mesma metodologia é aplicada por RASHED et al (2005) na região metropolitana da cidade do Cairo, Egito, e tecnicamente o trabalho apresenta resultados semelhantes.

WENG (2007) elabora um trabalho com metodologia similar ao modelo proposto por MORATO (2008), trabalhando as variáveis ambientais associadas a dados sócio demográficos, não obstante o autor utiliza a análise de mistura espectral para obtenção das variáveis ambientais em detrimento do NDVI. O objetivo do trabalho foi a geração de mapas índices de qualidade ambiental na cidade de Indianapolis, nos Estados Unidos.

Essa breve análise bibliográfica (resumida na tabela 1) contendo alguns estudos que envolvem o uso de modelos de mistura espectral permite inferir que:

- a) Existem evidências de que a classificação de imagens e as análises de mudança no uso da terra apresentam maior acurácia quando elaboradas com base em análise de mistura espectral;
- b) As aplicações da análise de mistura espectral apresentam resultados satisfatórios em ambientes rurais, florestas e áreas urbanas;
- c) Três membros de referência, ou componentes, é o número mais recorrente nos trabalhos realizados, sendo eles em sua grande maioria: vegetação, substrato e sombras. Isso vai ao encontro das propostas de componentes padronizados (SMALL & MILESI, 2013);
- d) Existe um grande potencial para aplicações no entendimento do processo de urbanização;

*Tabela 1: Resumo da breve revisão sobre a aplicação do modelo linear de mistura espectral*

Legenda	
	Estudo em vegetação
	Estudo em vegetação urbana
	Estudo em agricultura
	Estudos teóricos
	Estudos urbanos

<i>Autores</i>	<i>Ano de publicação</i>	<i>Abordagem adotada</i>
KRESSLER et al	1996	MLME na avaliação da mudança multi temporal em áreas urbanas
MOREIRA et al	1998	MLME na agricultura
SIMABUKURO et al	1998	MLME no Pantanal

SMALL et al	1999	MLME no estudo da vegetação urbana
SMALL et al	2000	MLME no estudo da vegetação urbana
POZZI et al	2001	MLME no estudo da relação entre demografia e vegetação urbana
SMALL	2002	MLME e avaliação multi temporal da reflectância urbana
KOSAKI e KOSUGI	2003	ICA, IC, AME na agricultura
FITZGERALD et al	2004	MESMA na agricultura
MORAN et al	2004	LULC e MLME na vegetação de floresta
LU et al	2004	LULC e MLME na vegetação de floresta
BOUCEK	2004	MLME e LULC na Amazônia
SMALL	2004	MLME e membros de referencia globais
ALBERT et al	2004	MLME multi temporal e multi escalar em áreas urbanas
LU et al	2004	LULC e MLME em área urbana
RASHED	2004	MLME associada a dados socioeconomicos em área urbana
TOLEDO et al	2005	comparação NDVI, EVI, MLME na vegetação de floresta
ANDERSON et al	2005	MLME na vegetação de floresta
YU et al	2005	MLME, PPI e MNF em áreas urbanas
SONG	2005	MLME no estudo da vegetação urbana
RASHED	2005	MLME associada a dados socioeconomicos em área urbana
NOGUEIRA et al	2007	MLME e séries multi temporais em área urbana
POWEL et al	2007	MESMA e séries multi temporais em área urbana
KÄRDI	2007	MLME e séries multi temporais em área urbana
WENG	2007	MLME associada a dados socioeconomicos em área urbana
FREITAS et al	2008	comparação dos membros de referencia no CCD, IRMSS e WFI
SOMERS	2009	AME na agricultura
KAWAKUBO	2010	uso do solo e MLME na vegetação de floresta
SARAPIROME et al	2010	MLME e séries multi temporais em área urbana
MYINT et al	2010	MESMA e comparação de membros de referencia em área urbana
DAWEBAIT et al	2011	MLME para avaliar impactos de desertificação
PEREZ MACHADO et al	2012	MLME, séries multi temporais e irradiância noturna em área urbana
SMALL et al	2013	MLME e membros de referencia globais

LU et al	2014	MLME, NDVI, NDBI e séries multi temporais em área urbana
ADAMS et al	1995	MLME na avaliação e expansão urbana em área de floresta
OKIN et al	1998	avaliado MESMA com diferentes quantidades de componentes

#### 4. Referências

ADAMS et al. **Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land cover change in the brazilian Amazon**. Remote Sensing of Environment, Elsevier Inc, 1995.

ALBERTI, M., WEEKS, R., COE, S. **Urban Land-Cover Change Analysis in Central Puget Sound**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 70, No. 9, September 2004, pp. 1043–1052.

ANDERSON et al. **Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira**. ACTA AMAZONICA, VOL. 35(4) 2005: 445 – 456.

BOUCEK, B., MORAN, E., **Inferring the Behavior of Households from Remotely Sensed Changes in Land Cover: Current Methods and Future Directions**. In: Spatially Integrated Social Science, GOODCHILD, M. F., JANELLE, D. G., (orgs.) Oxford University Press, Nova York, 2004.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998.

CARLOS, A. F. A. **O Espaço Urbano: Novos Escritos sobre a Cidade**. São Paulo: Labur Edições, 2007, 123p.

CHANG, C. **Fisher's linear spectral mixture analysis**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, num. 8, Agosto de 2006.

CHEN, X; LI, L. **A comparisson of spectral mixture analysis methods for urban landscape using Landsat ETM+ data: Los Angeles, CA**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008.

CULLINGWOTH, B. **Planning in the USA: Policies, Issues and Processes**. Routledge, London, 280 p., 1997.

DAWEBAIT, M. A. A., MORARI, F., **LANDSAT, Spectral Mixture Analysis and Change Vector Analysis to Monitor Land Cover Degradation in a Savanna Region in Sudan (1987-1999-2008)**. International Journal of Water Resources and Arid Environments 1(5): 366-377, 2011.

FITZGERALD et al. **Shadow Fraction in Spectral Mixture Analysis of a Cotton Canopy**. Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability, edited by Wei Gao, David R. Shaw, Proceedings of SPIE Vol. 5544

FIX, M. A. B. **Financeirização e transformações recentes no circuito imobiliário Brasileiro**. Tese de doutorado em economia, UNICAMP, 2011.

FRANKE et al., **Hierarchical Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) of hyperspectral imagery for urban environments**. Remote Sensing of Environment 113 (2009) 1712–1723.

FREITAS, R. M., HERTEL, V., SHIMABUKURO, Y. E., **Modelo Linear de Mistura Espectral em imagem de moderada resolução espacial**. Boletim de Ciências Geodésicas, sec. Artigos, Curitiba, v. 14, no 1, p.55-71, jan-mar, 2008.

GOODCHILD, M. **Geographical Information Science**. International Journal of Geographical Information Systems, 6 (2): 35-45, 1992.

HOSTERT et al. **Spectral unmixing based on image and reference endmembers for urban change analysis**. New Strategies for European Remote Sensing, Oluic (ed.). Millpress, Rotterdam, 2005.

INSTITO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010: Aglomerados subnormais - Informações territoriais**. IBGE, 2010.



JENSEN, J. R.; **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. University of South Carolina. Tradução da segunda edição Editora Parênteses – São José dos Campos, 2009.

JUNIOR et al. **Mistura espectral: (I) detecção dos membros finais utilizando a geometria simplex**. Espaço & Geografia, Vol.6, No 1 (2003), 147:173.

KARDI, T. **Remote sensing of urban areas: linear spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper images acquired over Tartu (Estonia)**. Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol., 2007, **56**, 1, 19.32.

KAWAKUBO, F. S. **Metodologia de classificação de imagens multiespectrais aplicada ao mapeamento do uso da Terra e cobertura vegetal na Amazônia: Exemplo de caso na Região de São Félix do Xingu, no Pará**. Tese de doutorado em Geografia Física, FFLCH/USP, 2010.

KIMIJIAMA, S., NAGAI, M., **Study for urbanization corresponding to socio-economic activities in Savannaket, Laos using satellite remote sensing**. 7th IGRSM International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition, 2014.

KOSAKA, N.; KOSUGI, Y. **ICA aided linear spectral mixture analysis of agricultural remote sensing images**. 4th International Symposium on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA2003), April 2003, Nara, Japan.

KRESSLER, F., STEINNOCHER, K. **Change detection in urban areas using satellite images and spectral mixture analysis**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXI, Part B7. Viena, 1996.

KUMAR et al., Assimilation of endmember variability in spectral mixture analysis for urban land cover extraction. Advances in Space Research 52 (2013) 2015–2033.

LI, G., WENG, Q., **Measuring the quality of life in city of Indianapolis by integration of remote sensing and census data**. International Journal of Remote Sensing 2007.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 2a Edição, Nova York. John Wiley & Sons. 2000. 721p. Forestry, Lago Buena Vista, Florida, 2000.

LINN, R. M. **Avaliação dos modelos de mistura espectral MESMA e SMA aplicados aos dados hiperespectrais HYPERION/EO-1 adquiridos na planície costeira do Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto, UFRGS, 2008.

LIVERMAN et al. (editores). **People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science** Committee on the Human Dimensions of Global Change, National Research Council, 1998.

LU et al., **Monitoring bidecadal development of urban agglomeration with remote sensing images in the Jing-Jin-Tang area, China**. Journal of Applied Remote Sensing Vol. 8, 2014.

LU, D., BATISTELLA, M., MORAN, E. **Multitemporal spectral mixture analysis for Amazonian land-cover change detection**. Canadian Journal on Remote Sensing, Vol. 30, No. 1, pp. 87–100, 2004

LU, D., BATISTELLA, M., MORAN, E., MAUSEL, P., **Application of spectral mixture analysis to Amazonian land-use and land-cover classification**. International Journal of Remote Sensing. 10 December 2004. Vol. 25, No. 23. Taylor & Francis Ltd. Pp. 5345-5358.

LU, D., BATISTELLA, M., MORAN, E., MAUSEL, P., **Linear spectral mixture analysis of TM data for land-use and land-cover classification in Rondônia, Brazilian Amazon**. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, 2002.

LU, D., WENG. Q., **Spectral Mixture Analysis of the Urban Landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ Imagery**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 70, No. 9, September 2004, pp. 1053–1062.

MACHADO, R. P. P. M., SMALL, C., **Identifying multi-decadal changes in of the São Paulo Urban Agglomeration with mixed remote sensing techniques: SpectralMixture Analysis and Night Lights**. EARSeL eProceedings 12/2, 2012.

MACHADO, R. P. P. M. **Um modelo geoespacial do uso e demografia: O caso do município de São Paulo**. Tese de doutorado em Geografia, FFLCH/USP, 2000.

MARQUES, E. **A dinâmica imobiliária de incorporação em período recente**. In atores e ações sobre a segregação e a pobreza urbana. MARQUES, E. C., GAMA. H. G., (orgs.) Editora Senac, São Paulo, 2004.

CARDOSO, A. L. (org.), **O programa Minha Casa Minha Vida e seus efeitos territoriais**. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2013.

LUCHIARI, A.; **Obtenção de índices de qualidade ambiental urbana por meio de imagens orbitais de alta resolução e de dados de setores censitários, e análise das transformações no uso da terra em Santana do Parnaíba**; Projeto temático financiado pela Fapesp, FFLCH/USP, 2008.

LUCHIARI, A.; **Identificação da cobertura vegetal em áreas urbanas por meio de produtos de sensoriamento remoto e de um sistema de informação geográfica**; Revista do Departamento de Geografia; 14 (2001) 47 – 58.

MARICATO, E.; **Metrópole, legislação e desigualdade**; Estudos avançados, 17(48), 2003.

MATTHIAS, B., MARTIN, H., **Mapping imperviousness using NDVI and linear spectral unmixing of ASTER data in the Cologne-Bonn region (Germany)**. Proceedings of the SPIE 10th International Symposium on Remote Sensing, 8-12 September 2003, Barcelona, Spain.

MEADOWS et al. **The limits to growth**. Library of Congress, USA, 1972.

MORATO, R. G. **Análise espacial e desigualdade ambiental no município de São Paulo**. Tese de doutorado em Geografia Humana, FFLCH/USP, 2008.

MOREIRA et al. **Modelo de mistura espectral para identificar e mapear áreas de soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais**. Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 53-57.

MYINT, S. W., OKIN, G. S., **Modeling Land-Cover Types Using Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis in a Desert City**. GeoDa Center for Geospatial analysis and computation. Working Paper Number 2010-06, 2010.

NOGUEIRA, A. C. F., SANSON, F., PESSOA, K., **A expansão urbana e demográfica da cidade de Manaus e seus impactos ambientais**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5427-5434.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Principios e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008.

OKIN et al, **Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis: Application to an Arid/Semi-arid Landscape**. Summaries of the 7nd JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 97-21 v.1, p.291-299, 1998.

PARECE, T. E., CAMPBELL, J. B., **Comparing Urban Impervious Surface Identification Using Landsat and High Resolution Aerial Photography**. *Remote Sens.* **2013**, 5, 4942-4960.

PASTERNAK, S., BOGUS, L. M. M., **Como anda São Paulo: continuidades e descontinuidades na cidade dos anéis**. Núcleo de estudos e pesquisas urbanas, PUC/SP, 2004.

PEDRASSOLI, J. C. **Análise da desigualdade ambiental nos municípios do médio Paranapanema-SP: Diagnósticos e Subsídios ao Planejamento Sócio-Ambiental Urbano através da Integração entre o Sensoriamento Remoto e os Sistemas de Informação Geográfica – ISRSIG**. Trabalho de conclusão de curso – UNESP, 2008.

PEDRASSOLI, J. C. **Análise Orientada a Objeto para detecção de favelas e classificação do uso do solo em Taboão da Serra/SP**. Dissertação de mestrado em Geografia Física FFLCH/USP, 2011.

POWELL, R., ROBERTS, D., **Characterizing Urban Growth and Peri-Urban Landscape Change in Rondônia using Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 6933-6940.

POZZI, F., SMALL, C., **Exploratory Analysis of Suburban Land Cover and Population Density in the U.S.A.** IEEE/ISPRS joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Paper 35, Rome, Italy, 8-9 November, 2001.

RASHED et al., **Measuring temporal compositions of urban morphology through spectral mixture analysis: toward a soft approach to change analysis in crowded cities.** International Journal of remote sensing. 699-718, 2005.

RASHED et al., **Measuring the Physical Composition of Urban Morphology Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 69, No. 9, September 2003, pp. 1011–1020.

RASHED, T., **Quantifying the ecological patterns of urban densification through multiple endmember spectral mixture analysis, landscape metrics and fuzzy logics.** ISPRS Archives – Volume XXXV Part B7, Istambul, Turquia, 2004.

RASHED, T., WEEKS, J. R., SAAD GADALA, M., **Revealing the Anatomy of Cities through Spectral Mixture Analysis of Multispectral Satellite Imagery: A Case Study of the Greater Cairo Region, Egypt.** *Geocarto International*. Vol. 16. No.4. December 2001.

ROBERTS et al. **Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using Multiple Endmember Spectral Mixture Models.** Remote Sensing of Environment, Volume 65, Number 3, September 1998, pp. 267-279(13).

ROCHA et al., **Classificação de uso do solo urbano através da análise linear de mistura espectral com imagens de satélite.** *Finisterra*, XLII, 83, pp. 47-62, 2007.

ROLNIK, R. **The city and the law: legislation, urban policy and territories in the city of São Paulo (1886 – 1936).** Tese de doutorado submetida ao departamento de história da New York University, maio de 1995.

SANTOS, M. **A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo, Razão e Emoção.** 4. ed. 2. Reimpressão. - São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006.

SANTOS, M.; **Técnica, Espaço, Tempo: Globalização e meio técnico-científico-informacional**; 5° Ed. 2008 – Edusp, São Paulo.

SANTOS, M. **Metamorfoses do espaço habitado. Fundamentos Teórico e metodológico da geografia**. Hucitec. São Paulo 1988.

SARAPIROME, S.; KULRAT, C. **Comparisson on urban classification using Landsat-TM and linear spectral misture analysis extracted images: Nakhon Ratchasima municipal área, Thailand**. Suranaree Journal of Science and Technology. 17(4):401-411, 2010.

SETTLE, J. J., DRAKE, N, A. **Linear mixing and the estimation of ground cover proportions**. International Journal of Remote Sensing, 14:6, 1159-1177, 1993.

SHIMABUKURO, Y. E., NOVO, E. M., PONZONI, F. J. **Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.33, Número Especial, p.1729-1737, out. 1998.

SMALL, C. **High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance**. Remote Sensing of Environment 88 (2003) 170–186.

SMALL, C. **Multitemporal analysis of urban reflectance**. Remote Sensing of Environment 81 (2002) 427– 442.

SMALL, C. **The Landsat ETM+ spectral mixing space**. Remote Sensing of Environment 93 (2004) 1 –17.

SMALL, C., **A global analysis of urban reflectance**. International Journal of Remote Sensing Vol. 26, No. 4, 20 February 2005, 661–681.

SMALL, C., MILLER, R. B., **Monitoring the urban environment from space**. Digital Cities II: International Symposium on Digital Earth, Beijing/CHINA, Nov. 1999.

SMALL, C., MILLER, R., **Spatiotemporal Monitoring of Urban Vegetation**. International Symposium on Remote Sensing of Environment - Proceedings Paper Capetown, 2000.

SMALL, C., POZZI, F., ELVIDGE, C., D., **Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights**. Remote Sensing of Environment 96 (2005) 277 – 291.

SMALL, C.; MILESI, C. **Multi-scale standardized spectral mixture models**. Remote Sensing of Environment 136 (2013) 442–454.

SOMERS et al. **A solution for the mixture problem in agricultural remote sensing**. Anais do IGARSS 2009. Cape Town – Africa, 2009.

SONG, C., **Spectral mixture analysis for subpixel vegetation fractions in the urban environment: How to incorporate endmember variability?**. Remote Sensing of Environment 95 (2005) 248–263.

TENODÓRIO, J. A., ROCHA, J., **Great Lisbon Metropolitan Area land use/cover characterization through multi-temporal and multi-resolution VIS componentes analysis**. EARSeL eProceedings. 2005.

TOLEDO, J. M. A., SHIMABUKURO, E. D., **Comparison of Linear Spectral Mixture Models and Vegetation Indices in Two Land Cover Sample Zones in Brazil by Using MODIS and ETM+ Data Products**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3469-3476.

UN-HABITAT; **Slums of the world: The face of urban poverty in the new millennium**. Global Report on Human Settlement, ONU, 2003.

WENG, F. **Mapping and Assessing Urban Impervious Areas Using Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis: A Case Study in the City of Tampa, Florida**. Dissertação de mestrado, University of South Florida, 2012.

WU, C. **Remote Sensing, Geographical information Systems, and Spatial Modelling for analyzing ublic transit services**. Tese de doutorado. Ohio State University, 2003.



**YANG et al, Urban Land-Cover Change Detection through Sub-Pixel Imperviousness Mapping Using Remotely Sensed Data.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 69, No. 9, September 2003, pp. 1003–1010.

**YU, X., LU, C., Urban percent impervious surface and its relationship with land surface temperature in Yantai City, China.** Proceedings of the 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35), 2014.

**YUE, W., XU, J., WU, J., Improvement of Linear Spectral Mixture Analysis and experimentation in Estimation of Urban Vegetation Fraction.** Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05. Proceedings. IEEE International (Volume:8), 2005.

**YUE, W., XU, JIANHUA, XU, L., Remote sensing of spatial patterns of urban renewal using linear spectral mixture analysis: A case of central urban area of Shanghai (1997—2000).** *Chinese Science Bulletin* 2006 Vol. 51 No. 8 977—986.

**Lei 10.257 de 10 de Julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.** Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/110257.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm)