

**INTEGRAÇÃO GEO-ESCALAR: PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE MUDANÇAS NO USO, OCUPAÇÃO E COBERTURA DO SOLO APLICANDO A TECNOLOGIA GEOESPACIAL.**

**Análise da utilização desta técnica para reconhecimento dos assentamentos precários na Cidade de São Paulo.**

**Reinaldo Paul Pérez Machado**

**Tese apresentada ao concurso público para Livre Docente no Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo**

**SÃO PAULO, AGOSTO DE 2012**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação  
Serviço de Biblioteca e Documentação  
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Pérez Machado, Reinaldo Paul

Integração geo-escalar: proposta de uma metodologia de identificação de mudanças no uso, ocupação e cobertura do solo aplicando a tecnologia geoespacial / Reinaldo Paul Pérez Machado.

178 f.

Tese de Livre-docência – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Humana.

1. Identificação de Mudanças Territoriais. 2. Assentamentos Precários. 3. Modelo Linear de Mistura Espectral. 4. Aglomerações Urbanas. 5. Conurbação. I. Título.

*“Depois de ter feito uma descrição completa do mundo sensível que constitui sua cidade, ele a representa num mapa bem organizado e de medidas proporcionais de modo a não perdê-la”.*

Opinião de Nicholas de Cusa (1401-1460), proeminente filósofo, místico e teólogo alemão do século XV, ao referir-se à peculiar faculdade humana de dar forma ao mundo, e em certo sentido, dominá-lo, (WATTS, 1982).

## **Agradecimentos**

À minha esposa Violêta, por tudo.

Agradeço ao caro colega Christopher Small, pelo seu apoio, sugestões e críticas durante a realização do Pós-doutorado realizado no CIESIN em 2009. Todavia, a contribuição mais importante, em minha opinião, foi sua amizade.

A meus colegas do Departamento de Geografia, Ligia Vizeu Barrozo, Ailton Luchiari, Emerson Galvani, Luis Antonio Bittar Venturi, Alfredo Pereira de Queiroz Filho, Jorge Raffo (*in memoriam*), Fernanda Padovesi Fonseca, Sandra Lencioni, Jurandyr Luciano Sanches Ross, Adílson Avansi de Abreu e a todos aqueles, ligados à Cartografia ou não, que me alentaram, ajudaram e incentivaram para concluir esta tese.

A Pablo Nepomuceno, Rúbia Gomes Morato e Fernando Shinji Kawakubo pela ajuda competente e valiosa no processamento das imagens.

A Walter Pires, por sua gentileza costumeira ao transmitir conhecimento e pela generosidade ao emprestar as fotos aéreas e mapas antigos.

A Fatima Tostes e à Diretoria da Base Aerofotogrametria pela colaboração em ceder fotografias aéreas de seu acervo.

A Eliene Corrêa Rodrigues Coelho, cara orientanda de pós-graduação, pelas contribuições pertinentes e atuais.

A Rafael Venancio Candeaux Duffatt (*in memoriam*), pelo entusiasmo e apoio com que sempre me brindou, tanto em Cuba como no México.

## RESUMO

Tradicionalmente são utilizadas imagens de satélite de alta (pixel menor que 5 m) e superalta (pixel menor que 1 m) resolução espacial para realizar estudos urbanos. Apresentamos uma metodologia que permite a identificação de mudanças relevantes nas formas de uso, ocupação e cobertura do solo na Cidade de São Paulo utilizando imagens de mediana resolução espacial, com pixels de 30 m.

Empregamos o Modelo Linear de Mistura Espectral em séries temporais de imagens satelitais para a identificação de mudanças qualitativas e quantitativas. A análise foi baseada no modelo linear de mistura que incorporou os componentes substrato, vegetação e sombra, utilizadas diretamente para visualização em composições de falsa cor como vermelho, verde e azul.

Selecionaram-se pares de imagens capturadas no verão e no inverno, usando como critério sua qualidade e consistência quanto à iluminação solar para dois intervalos de tempo: 1986 - 2005 e 2000 – 2010. Deste modo foram quantificadas as mudanças ocorridas nos dois períodos, que indicaram aumento da fração substrato acima de 10% e 5% da superfície do pixel, com diminuição equivalente da fração vegetação e/ou sombra. Devido a esses incrementos na fração substrato inferimos o aumento da superfície urbanizada.

O método proposto apresenta-se como um instrumento integrador escalar e uma alternativa de custo acessível para que gestores públicos e grupos sociais, também em outras cidades, possam identificar zonas onde aconteceram drásticas modificações na cobertura do solo. Tais mudanças poderiam ser o resultado de alterações no uso e ocupação que, eventualmente, apontassem para o surgimento de algum tipo de assentamento precário. A metodologia pode ser utilizada também para auxiliar na tomada de decisões nos ambientes espectralmente complexos que hoje constituem as aglomerações metropolitanas.

O principal benefício oferecido pelas imagens de moderada resolução é a calibração consistente entre os sensores e sua geometria de visualização sinóptica. Tais consistências permitiram a análise quantitativa retrospectiva das mudanças no uso e cobertura do solo ocorridas em São Paulo desde mediados da década de 1980.

Palavras chave: Identificação de Mudanças Territoriais; Assentamentos Precários; Modelo Linear de Mistura Espectral, Aglomerações Urbanas, Conurbação.

## ABSTRACT

Satellite imagery of high (pixel smaller than 5 m) and very-high (pixels smaller than 1 m) spatial resolution is generally used for urban studies. Here we present a methodology that uses decameter-resolution (30 m) satellite imagery for the identification of relevant changes in land cover. These land cover changes provide a spatially explicit depiction of changing land use and occupation in the city of Sao Paulo.

A Linear Spectral Mixture model was applied to multitemporal series of Landsat satellite imagery for identification of both qualitative and quantitative changes. The analysis was based on a three component linear mixture model incorporating substrate, vegetation and dark endmembers. The resulting endmember fraction estimates are used for visualization as false color composites of red, green & blue respectively.

Winter and summer image pairs were selected for quality and consistency of solar illumination for two time intervals: 1986 – 2005 and 2000 – 2010. Thus the differences over both time periods were quantified in terms of changes in endmember fractions. The results show increases of substrate, greater than 10% and 5% of the pixel area, with equivalent reduction of vegetation and/or shadow fractions. From these increases in substrate fraction, we infer an increase in urbanized land cover.

The proposed methodology is presented as a relatively low cost alternative tool that will allow public administrators and social groups, even from other cities, to identify zones of drastic alterations in land cover. Changes in land cover may result from changes in land use that, eventually, might point to the appearance of some kind of precarious settlement. It can be used as well to aid decision making on the complex spectral environments that characterize metropolitan agglomerations today.

The benefit of moderate resolution imagery is its consistent calibration between sensors and its synoptic viewing geometry. These consistencies allow quantitative retrospective analysis of land cover change over all of Sao Paulo since the mid-1980.

Key words: Identification of Territorial Changes, Precarious Settlements, Linear Spectral Mixture Model, Urban agglomerations, Conurbation.

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| 1) Introdução.....   | 10 |
| 2) Da Tese .....   | 16 |
| 2.1) Hipótese.....   | 16 |
| 2.2) Hipótese subjacente.....  | 16 |
| 2.3) Tese.....   | 16 |
| 2.4) Objetivo geral.....   | 16 |
| 2.5) Objetivos específicos .....   | 17 |
| 2.6) Justificativa .....   | 17 |
| 3) Contextualização.....   | 20 |
| 3.1) Considerações teórico-metodológicas.....  | 20 |
| 3.2) Os Sistemas de Informações Geográficas e a Geografia .....                      | 21 |
| 3.3) A Tecnologia da Informação Geográfica no estudo dos assentamentos precários.... | 22 |
| 3.4) Os assentamentos precários no Município de São Paulo.....                       | 24 |
| 3.5) Sobre os dados e informações disponíveis no Sistema Habisp.....                 | 29 |
| 4) Base teórica e conceitual. ....   | 36 |
| 4.1) Modelos de Mistura Espectral .....  | 40 |
| 4.2) Modelos de Mistura Espectral e sua aplicação em áreas urbanas. ....             | 48 |
| 4.3) Modelos de Mistura Espectral e a detecção de mudanças. ....                     | 50 |
| 4.4) Classificador por Árvore de Decisão ( <i>Decision Tree Classifier</i> ).....    | 52 |
| 5) Materiais, métodos e análise.....   | 54 |
| 5.1) Definição da área de estudos.....   | 54 |
| 5.2) Material utilizado .....  | 55 |
| 5.3) Metodologia de trabalho.....  | 56 |
| 5.4) O trabalho de detecção de mudanças.....   | 58 |
| 5.5) O processo de seleção das imagens.....  | 59 |
| 5.6 Tratamento digital das imagens.....  | 76 |
| 6) Resultados e discussão .....  | 84 |
| 6.1) Seleção das imagens. Separação por qualidade visual.....                        | 84 |
| 6.2) Calibração radiométrica .....   | 85 |
| 6.3) Identificação da área de estudos.....   | 88 |
| 6.4) Identificação dos melhores pares.....   | 89 |
| 6.5) Articulação em mosaico e recorte. ....  | 91 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.6) Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME .....  | 95  |
| 6.7) Elaboração das imagens por subtração .....                    | 107 |
| 6.8) Identificação de áreas conspícuas .....                       | 111 |
| 6.9) Aplicação do classificador por Árvore de Decisão .....        | 112 |
| 6.10) Sobreposição dos polígonos dos assentamentos precários ..... | 137 |
| 6.11) Mapas, imagens e análises finais.....                        | 141 |
| 7) Conclusões .....  | 161 |
| 8) Referências Bibliográficas .....                                | 164 |
| 9) Anexos.....   | 171 |
| 9.1) Arquivo de metadados L5219076_07619860315_MTL.txt .....       | 171 |
| 9.2) Programa para gerar o <i>Calendar Plot</i> .....              | 177 |



## Índice de Figuras

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1. Exemplo de interface para atualização de dados dos setores de risco -2010 .....   | 30  |
| Figura 2. Exemplo de sobreposição da camada com o mapeamento de risco -2010.....            | 35  |
| Figura 3. Decomposição perfeita de um Modelo Linear de Mistura Espectral .....              | 43  |
| Figura 4. Gráfico explicativo dos efeitos da ação de correção do SLC.....                   | 60  |
| Figura 5. Fragmento da imagem obtida pelo sensor Landsat 7 (ETM).....                       | 61  |
| Figura 6. Acesso ao site U.S.G.S. Global Visualization Viewer (Imagens Muito Boas) .....    | 66  |
| Figura 7. Acesso ao site U.S.G.S. Global Visualization Viewer (Imagens Boas) .....          | 66  |
| Figura 8. Acesso ao site U.S.G.S. Global Visualization Viewer (Imagens Utilizáveis) .....   | 68  |
| Figura 9. Acesso ao site U.S.G.S. Global Visualization Viewer (Imagens não utilizáveis).... | 68  |
| Figura 10. Gráfico de distribuição das imagens no tempo.....                                | 71  |
| Figura 11. Página principal do Generic Mapping Tools .....                                  | 71  |
| Figura 12. Cena do Landsat7 de 02/02/2003. ....   | 74  |
| Figura 13. Mosaico elaborado com as cenas 76 (N) e 77 (S) do satélite Landsat 5 .....       | 74  |
| Figura 14. Recorte do mosaico elaborado com as cenas 76 e 77 do Landsat 5.....              | 75  |
| Figura 15. Novo gráfico de distribuição das imagens no tempo. Atualizado.....               | 90  |
| Figura 16. Composição em falsa cor. Imagem Landsat 5 (TM) de 1986 .....                     | 93  |
| Figura 17. Composição em falsa cor. Imagem Landsat 7 (ETM+) de 2005.....                    | 93  |
| Figura 18. Composição em falsa cor. Imagem Landsat 7 (ETM+) de 2000 .....                   | 94  |
| Figura 19. Composição em falsa cor. Imagem Landsat 5 (TM) de 2010 .....                     | 94  |
| Figura 20. Frações Substrato, Vegetação e Sombra. Imagem LS5 de 1986.....                   | 98  |
| Figura 21. Frações Substrato, Vegetação e Sombra. Imagem LS7 de 2005.....                   | 98  |
| Figura 22. Frações Substrato, Vegetação e Sombra. Imagem LS7 de 2000.....                   | 99  |
| Figura 23. Frações Substrato, Vegetação e Sombra. Imagem LS5 de 2010.....                   | 99  |
| Figura 24. Composição colorida imagem fração LS 5 (2010). Zona nordeste .....               | 102 |
| Figura 25. Composição colorida imagem fração LS 5 (2010). Zona centro norte .....           | 103 |
| Figura 26. Composição colorida imagem fração LS 5 (2010). Zona centro oeste .....           | 104 |
| Figura 27. Composição colorida imagem fração LS 5 (2010). Zona centro sul.....              | 105 |
| Figura 28. Imagem produto da subtração Landsat 7 2005 - Landsat 5 1986.....                 | 108 |
| Figura 29. Imagem produto da subtração Landsat 5 2010 - Landsat 7 2000.....                 | 108 |
| Figura 30. Gráfico do comportamento espectral da coleção da bandas.....                     | 110 |
| Figura 31. Exemplo da janela de classificação por árvore de decisão .....                   | 113 |
| Figura 32. Resultado da primeira classificação por árvore de decisão.....                   | 114 |
| Figura 33. Resultado da classificação por árvore de decisão com limite de 10%.....          | 118 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 34. Resultado da classificação por árvore de decisão com limite de 5%.....   | 118 |
| Figura 35. Resultado da aplicação do Majority Analysis, limite de 10% (2005-1986) .....   | 121 |
| Figura 36. Resultado da aplicação do Majority Analysis, limite de 5% (2005-1986) .....  | 121 |
| Figura 37. Resultado da aplicação do Majority Analysis, limite de 10% (2010-2000) .....   | 123 |
| Figura 38. Resultado da aplicação do Majority Analysis, limite de 5% (2010-2000) .....  | 123 |
| Figura 39. Máscaras da Região Metropolitana e Município de São Paulo.....   | 127 |
| Figura 40. Resultado com aplicação da máscara do Município de São Paulo (2005-1986)   | 131 |
| Figura 41. Resultado com aplicação da máscara do Município de São Paulo (2010-2000)   | 131 |
| Figura 42. Produto da vetorização. Aumento de substrato (2005-1986) .....   | 133 |
| Figura 43. Produto da vetorização. Aumento de substrato (2010-2000) .....   | 133 |
| Figura 44. Mapa-imagem com os vetores de incremento de substrato urbanizado .....   | 136 |
| Figura 45. Detalhe ampliado do mapa-imagem anterior.....  | 136 |
| Figura 46. Mapa-imagem com os vetores assentamentos precários cadastrados .....   | 140 |
| Figura 47. Detalhe ampliado do mapa-imagem anterior.....  | 140 |
| Figura 48. Área piloto Vargem Grande .....  | 143 |
| Figura 49. Área piloto Cantinho do Céu .....  | 146 |
| Figura 50. Área piloto Paraisópolis .....   | 149 |
| Figura 51. Ampliação com imagem do Google Earth .....   | 150 |
| Figura 52. Área piloto Heliópolis .....   | 152 |
| Figura 53. Área piloto Jardim Pantanal .....  | 155 |
| Figura 54. Área piloto Recanto dos Humildes. Assentamentos precários .....  | 158 |
| Figura 55. Recanto dos Humildes. Assentamentos precários e polígonos de incremento da fração substrato nos dois períodos (2005-1986) e (2010-2000)..... | 158 |

## Índice de Tabelas

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1. Listagem das favelas no Município de São Paulo (por data início).....         | 25  |
| Tabela 2. Assentamentos precários na cidade de São Paulo (por tipologia).....           | 27  |
| Tabela 3. Domicílios por tipo de assentamento precário e região administrativa .....    | 28  |
| Tabela 4. Objetivos básicos do Sistema de Priorização.....                              | 32  |
| Tabela 5: Fórmula de cálculo do Índice de Priorização .....                             | 33  |
| Tabela 6: Fórmula de cálculo do Índice de Risco de Solapamento-Escorregamento .....     | 34  |
| Tabela 7. Listagem das áreas piloto no Município de São Paulo .....                     | 57  |
| Tabela 8. Características específicas das bandas espectrais dos satélites Landsat ..... | 83  |
| Tabela 9. Grupos de imagens, separadas pela qualidade .....                             | 84  |
| Tabela 10. Cenas brutas dos satélites Landsat TM e ETM+ processadas .....               | 91  |
| Tabela 11. Quantidade de superfície alterada nos dois períodos.....                     | 124 |
| Tabela 12. Quantidade de superfície que alterou sua fração predominante (10 %) .....    | 128 |
| Tabela 13. Quantidade de superfície que alterou sua fração predominante (5%) .....      | 128 |

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

AVIRIS – Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer

CEM – Centro de Estudos da Metrópole

ETM+ – Enhanced Thematic Mapper Plus

HABISP – Sistema de Informações para Habitação Social

HRVIR – High Resolution Visible and Infrared

IHS – Intensity Hue Saturation

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ITC – International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation

LASERE – Laboratório de Aerofotogeografia e Sensoriamento Remoto

MESMA – *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*

MLME – Modelo Linear de Mistura Espectral

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSP – Município de São Paulo

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

NPV – Nonphotosynthetic Vegetation

NVDI – Normalized Difference Vegetation Index

PMH – Plano Municipal de Habitação

PMSP – Prefeitura do Município de São Paulo

REM – Radiação Eletro Magnética

RGB – Red Green Blue

RMS – Root Mean Square

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SEBES – Secretaria do Bem Estar Social do Município de São Paulo

SEHAB – Secretaria Municipal de Habitação

SLC – Scan Line Corrector

SWIR – Short Wave Infrared

TIR – Thermal Infrared

TM – Thematic Mapper

UNICEF – United Nations Children's Fund

USGS – United States Geological Survey

VNIR – Very Near Infrared

## INTEGRAÇÃO GEO-ESCALAR: PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE MUDANÇAS NO USO, OCUPAÇÃO E COBERTURA DO SOLO APLICANDO A TECNOLOGIA GEOESPACIAL. ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DESTA TÉCNICA PARA RECONHECIMENTO DOS ASSENTAMENTOS PRECÁRIOS NA CIDADE DE SÃO PAULO.

### 1) INTRODUÇÃO

A necessidade da construção de uma política habitacional de interesse social com foco na integração urbana de assentamentos precários, especialmente na garantia do acesso ao saneamento básico, à regularização fundiária e à moradia adequada, articulada a outras políticas sociais e de desenvolvimento econômico, é essencial na prática de qualquer estratégia de combate à pobreza e perspectiva de sustentabilidade urbana.

Muitos organismos internacionais, de cooperação técnica com os países em desenvolvimento, estão firmemente empenhados em promover políticas públicas de erradicação da pobreza urbana, com foco específico no problema da moradia precária. A Aliança de Cidades<sup>1</sup> foi criada em 1996 como uma coalizão global entre autoridades locais, governos nacionais e organizações multilaterais com o objetivo de ampliar e disseminar estratégias bem sucedidas de redução da pobreza urbana. Em particular, a Aliança de Cidades apoia estratégias de urbanização de favelas e assentamentos precários aos níveis local e nacional, alinhadas com o Plano de Ação Global "*Cities Without Slums*" (Cidades Sem Favelas), que incluem a segurança da posse, o acesso a financiamentos habitacionais e políticas públicas para evitar o surgimento de novos assentamentos precários. O Plano estabelece como meta "até 2020 ter alcançado uma melhora significativa na vida de pelo menos 100 milhões de habitantes de assentamentos precários". Esta meta foi posteriormente ampliada pela Assembleia Geral da ONU, na Cúpula do Milênio+5, em setembro de 2005, com a inclusão da necessidade de se prevenir a formação de novos assentamentos precários mediante oferta de alternativas habitacionais de interesse social. O Governo Brasileiro entrou como membro pleno da Aliança de Cidades em 2003, por

---

<sup>1</sup> Aliança de Cidades (*Cities Alliance*), consórcio internacional de cidades e organismos de desenvolvimento econômico e social comprometidos em encontrar soluções para a redução da pobreza. A Aliança de Cidades é uma iniciativa conjunta entre a ONU-HABITAT e o Banco Mundial que tem como objetivo promover o papel dos governos locais na estruturação de políticas de desenvolvimento urbano e melhoria em assentamentos urbanos, mobilizando o apoio internacional de agências multilaterais (ONU-HABITAT, 2000).

meio do Ministério das Cidades e da Caixa Econômica Federal e integra, atualmente, seu Comitê Executivo. A sede da Aliança é em Washington e sua sede local no Brasil funciona no centro de São Paulo.

O Programa HABITAT das Nações Unidas estabeleceu o *Global Urban Observatory* - *GUO* (Observatório Urbano Global) para melhorar a capacidade dos países e cidades na tarefa de projetar suas necessidades de obtenção de dados, ganharem acesso à informação e usá-la para o planejamento de políticas públicas e seu monitoramento. O GUO tem duas funções principais: desenvolver uma amostra global de cidades e fornecer sustentação à formulação de políticas locais. Um componente desta segunda função é fornecer a tecnologia e o treinamento em Sistemas de Informação Geográfica - SIG.

O Observatório Urbano Global (GUO) canaliza a necessidade urgente de melhorar a base de dados mundial do conhecimento urbano, ajudando os governos, as autoridades locais e as organizações da sociedade civil a desenvolver e aplicar indicadores de políticas urbanas, estatísticas e outras fontes de informação. O GUO foi estabelecido por UN-HABITAT em resposta a uma decisão da Comissão de Assentamentos Humanos das Nações Unidas, que convocou a criação de um mecanismo que monitore o progresso global, coloque em prática a Agenda do HABITAT (UN-HABITAT, 1996) e (UN-HABITAT, 2003) e ainda observe e avalie as condições e tendências urbanas globais. Este organismo trabalha em estreita cooperação com o programa das Melhores Práticas e Liderança Local (BLP), que foi estabelecido em 1997, para utilizar a rede de informação global para o apoio na execução da Agenda HABITAT. Ambos os programas operam sob os auspícios do *Monitoring System Branch* que detém o mandato total para monitorar o progresso na Agenda HABITAT e as Metas de Desenvolvimento do Milênio das Nações Unidas, (UN-HABITAT, 1996)e (UN-HABITAT, 2003).

De acordo com o estipulado pelas Nações Unidas na Tarefa 11 (*Slums and Degraded Housing*) das Metas do Milênio,

*“...considera-se um domicílio em favela (slum) o grupo de indivíduos morando baixo o mesmo teto que careça de uma ou mais das cinco condições abaixo listadas:*

*Acesso adequado à água tratada. (a proporção da população com acesso sustentável a uma nascente de água tratada é a porcentagem da população urbana que usa alguns dos seguintes tipos de fonte de água potável: água encanada, torneira pública, perfuração ou bomba, poço protegido, nascente protegida ou água da chuva).*

*Acesso adequado ao esgoto e outras infraestruturas. (a proporção da população com acesso ao saneamento básico ou porcentagem da população com acesso a instalações higiênicas que separam as excreções humanas do contato direto com as pessoas, animais ou insetos).*

*Boa qualidade estrutural da moradia. (situada longe de locais perigosos e construída com materiais duráveis, capaz de proteger seus habitantes de condições climáticas extremas, tais como chuva, calor ou frio excessivo e umidade).*

*Área suficiente para morar (o adensamento demográfico está, geralmente, associado a um baixo valor de metros quadrados por pessoa, a taxas de ocupação elevadas - mais de três pessoas que compartilham um cômodo - e um alto número de unidades habitacionais formadas por um único cômodo).*

*Segurança na posse da moradia. (Por exemplo, a existência de documentos)."*

O último indicador não é mais utilizado pelas Nações Unidas na definição, identificação e mapeamento de favelas (SLIUZAS, STEIN, *et al.*, 2008).

A observação e monitoramento dos assentamentos precários como parte do exercício de monitoramento global da Tarefa 11 das **Millennium Development Goals - MDGs**<sup>2</sup> foram feitos por UN-HABITAT por meio de uma aproximação estatística, utilizando-se uma variante dos cinco indicadores já mencionados. Desde 2002, UN-HABITAT e um *Expert Group Meeting*<sup>3</sup> desenvolveram uma metodologia e a aproximação operacional para estimar, no mundo inteiro, o número de moradores em assentamentos precários. A metodologia fez uso extensivo de fontes de dados existentes, em particular das **Multiple Indicators Cluster Surveys – MICs** (Pesquisas de *Clusters* por Indicadores Múltiplos), das **Demographic and Health Surveys - DHS** (Pesquisas Demográficas e da Saúde) e, em alguns casos, a partir de dados censitários. Isto permitiu que UN-HABITAT começasse a publicar regularmente estatísticas acerca do número de pessoas que vivem em condições precárias de moradia, por países, incluindo, posteriormente, a produção de mais séries de dados sobre favelas para um número crescente de cidades de todo o mundo (SLIUZAS, MBOUP e DE SHERBININ, 2008, p. 28).

---

<sup>2</sup> **Millennium Development Goals** (Metas de Desenvolvimento do Milênio): oito objetivos específicos a serem alcançados até 2015 que apontam combater a pobreza extrema em todo o mundo. Estes objetivos foram criados na Cúpula do Milênio das Nações Unidas em Nova Iorque em setembro de 2000, evento que tem sido considerado o maior encontro de líderes mundiais da história.

<sup>3</sup> **Expert Group Meeting** (Reunião de Grupo de Peritos), organizada por UN-HABITAT em estreita colaboração com a **UN Statistical Commission** (Comissão de Estatística das Nações Unidas) e **Cities Alliance** (Aliança de Cidades) em Nairóbi, em outubro 2002.

Em 2006, UN-HABITAT e o Banco Mundial organizaram um *Peer Review*<sup>4</sup> para avaliar a metodologia de UN-HABITAT para o monitoramento da Tarefa 11, das Metas do Milênio, a saber, para fornecer uma avaliação científica da definição, das técnicas e das estimativas de quantificação dos assentamentos precários. A equipe de especialistas foi composta pelo Banco Mundial, a Aliança de Cidades, a Comissão de Estatística das Nações Unidas, o Fundo de População das Nações Unidas - FNUP, Programa de Monitoração Comum – JMP de fornecimento de água e saneamento básico de *World Health Organization - WHO/UNICEF*, o Conselho da População, representantes dos governos do Brasil e da Finlândia, além de acadêmicos de universidades com grande prestígio no meio científico. Reconheceu-se que o uso dos Sistemas de Informações Geográficas – SIG e de imagens oriundas do sensoriamento remoto, de alta resolução, têm o potencial de facilitar a localização geográfica dos assentamentos precários e enriquecer o processo analítico. O relatório elaborado por esta comissão recomendou incorporar a *contiguidade espacial* no cálculo do número de moradores dos assentamentos precários:

*“Recomendamos que seja conduzido um estudo das técnicas que possam assegurar que a dimensão espacial da carência habitacional se inclua na avaliação das favelas...”*

*Concordamos com a recomendação do Grupo de Peritos sobre a importância da contiguidade espacial na medição das favelas. Em longo prazo, na medida em que tais medições sejam incorporadas aos processos de avaliação, Habitat será capaz de produzir dados, simultaneamente, sobre o número de unidades e também daqueles com carências habitacionais”. (Peer review report, Global Slum Measurement: A Peer Review of UN-Habitat’s Approach to Monitoring Target 11, 2006, apud (SLIUZAS, MBOUP e DE SHERBININ, 2008, p. 3-4).*

Entre 21 e 23 de maio de 2008, um grupo de 21 especialistas internacionais em sensoriamento remoto e monitoramento de assentamentos precários reuniram-se na cidade de Enschede, na Holanda (SLIUZAS, MBOUP e DE SHERBININ, 2008). O foco da reunião era documentar métodos para a identificação e definição gráfica poligonal das áreas de assentamentos precários, com base no sensoriamento remoto de altíssima resolução espacial (VHR) e em séries de dados suplementares (por exemplo, recenseamentos demográficos e dados provenientes de Sistemas de Informação Geográfica – SIG, sobre infraestrutura urbana e serviços). Um dos principais objetivos do encontro era explorar o potencial das imagens de satélite

---

<sup>4</sup> *Peer Review*: Revisão por pares, também chamada revisão paritária ou arbitragem.



para auxiliar o **UN-HABITAT Global Urban Observatory - GUO** (Observatório Urbano Global das Nações Unidas) a produzir estatísticas globais sobre assentamentos precários, na sustentação da Tarefa 11, do Objetivo 7 das Metas de Desenvolvimento do Milênio, “melhorando as vidas de 100 milhões de moradores em assentamentos precários”. O evento foi organizado e patrocinado pelo **International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation – ITC**, de Holanda, **UN-HABITAT, Global Urban Observatory - GUO**, de Quênia, e **Center for International Earth Science Information Network – CIESIN**, (Centro Internacional para a Rede de Informação das Ciências da Terra) da Universidade de Columbia, Estados Unidos da América. O autor foi convidado para participar dessa reunião.

No Brasil a Aliança de Cidades tem promovido atuações em diversas cidades do país, e a colaboração com o governo federal gerou um plano de ações integradas de urbanização de assentamentos precários que contribuiu para o debate sobre o marco conceitual e os respectivos instrumentos disponíveis para a formulação de uma política pública capaz de integrar os assentamentos precários, garantindo o acesso à moradia digna de forma universalizada (MINISTÉRIO DAS CIDADES; ALIANÇA DE CIDADES, 2010, p. 3).

Segundo a referida publicação, uma grande oportunidade para por em prática os preceitos traçados na Política Nacional de Habitação veio com o Programa de Aceleração do Crescimento – PAC, plano de investimentos lançado pelo Governo Federal, em 2007, que prevê a aplicação não onerosa de parte (16,04 %) dos recursos no setor habitacional, dirigidos a ações prioritárias e integradas de urbanização, melhorias habitacionais e saneamento ambiental em assentamentos precários.

No que diz respeito à cidade de São Paulo, existe um importante acervo de dados e estudos dirigidos principalmente ao cadastro de favelas. Esses trabalhos foram realizados em diferentes épocas (1962, 1964, 1987, 1993 e 2001). Sendo que o mais recente é o Habisp, sistema de monitoramento de moradias precárias e loteamentos irregulares, com ênfase no estabelecimento de prioridades para urbanização, (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO; SECRETARIA DE HABITAÇÃO; SUPERINTENDÊNCIA DE HABITAÇÃO POPULAR, 2008).

O Sistema Habisp foi a contrapartida que ofereceu a Secretaria Municipal de Habitação de São Paulo ao Acordo de Cooperação Técnica com a Aliança de Cidades. Tem sido apresentado como boa prática de apoio técnico à gestão habitacional de interesse social em várias cidades mundiais e do Brasil, com ênfase no sistema de priorização das intervenções nos assentamentos precários. Este sistema de informações tem se aprimorado constantemente, desde sua gênese, incorporando diferentes bases cartográficas e temporais e desenvolvendo aplicativos específicos às diversas fases do planejamento habitacional. Foi de grande utilidade para apoiar nossa pesquisa e elaborações teóricas, especialmente porque se trata de uma base de dados geoespaciais dinâmica, refletindo estágios diversos, quantitativos e qualitativos, da realidade habitacional precária na cidade de São Paulo, sem ser um sistema de informações geográficas *strictu sensu*.

Pouco tempo depois de retornar da reunião de especialistas realizada na Holanda<sup>5</sup> em 2008, nos demos a tarefa de tentar resolver alguns dos principais desafios técnicos derivados daquele evento: Seria possível identificar e monitorar os assentamentos precários utilizando imagens de sensoriamento remoto? Essas imagens teriam que ser, necessariamente, de alta resolução espacial? Uma vez identificados, seria viável classificar esses assentamentos separando as diferentes tipologias de ocupação?

O presente estudo reúne as etapas de trabalho da pesquisa realizada a partir de aquele momento e seus resultados, que culminaram com a proposta de uma metodologia que permite identificar as principais mudanças no uso, ocupação e cobertura do solo urbano aplicando a tecnologia geoespacial.

---

<sup>5</sup> Para maiores detalhes sobre os temas tratados nessa ocasião ver o item 3.3.1 (*Expert Group Meeting on Slum Identification and Mapping – EGMSM*)

## **2) DA TESE**

### **2.1) HIPÓTESE**

É possível estabelecer uma metodologia que permita a identificação de mudanças relevantes nas formas de uso, ocupação e cobertura do solo na Cidade de São Paulo utilizando imagens satelitais de mediana resolução espacial.

### **2.2) HIPÓTESE SUBJACENTE**

As superfícies ocupadas por assentamentos precários são identificáveis e mensuráveis utilizando-se a tecnologia geoespacial.

### **2.3) TESE**

A identificação de mudanças qualitativas e quantitativas nos territórios, mediante a utilização do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), pode ser uma alternativa viável quando comparada à confiabilidade e pertinência da aplicação de técnicas de classificação supervisionadas, tradicionais nas aplicações de Sensoriamento Remoto. Estas propriedades passam a ter maior relevância quando o modelo é aplicado a imagens de mediana resolução espacial e ambientes espectralmente complexos, como é o caso das áreas urbanas e periurbanas.

Desta forma a análise do espaço urbanizado utilizando técnicas do MLME apresenta-se como uma valiosa alternativa na produção de estudos sobre transformações no tecido urbano, em especial quando seja possível contar com imagens satelitais do mesmo território inseridas numa serie histórica temporal. Assim as profundas transformações e mudanças no uso, ocupação e cobertura da terra, que ocorrem em porções conspícuas do território urbano e periurbano, são identificáveis e mensuráveis utilizando-se a tecnologia geoespacial.

### **2.4) OBJETIVO GERAL**

Pretende-se estabelecer uma metodologia aplicada que permita a identificação das principais mudanças ocorridas nas formas de uso, ocupação e cobertura da terra na cidade de São Paulo, utilizando-se séries temporais de imagens satelitais de mediana resolução espacial como fonte primária de informação, e verificar as

possibilidades de sua aplicação na identificação de assentamentos precários para a cidade de São Paulo, expandindo-se este método para outras áreas urbanas e metropolitanas.

## **2.5) OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estabelecer uma metodologia aplicada que subsidie determinar quais seriam os melhores candidatos para comparação dentre uma série temporal de imagens de Sensoriamento Remoto.

Demonstrar que as imagens satelitais de mediana resolução espacial, em especial as geradas pelos sensores da série *Landsat TM (Thematic Mapper)* e *ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)*, constituem uma valiosa e acessível fonte de dados e informações primárias, no que se refere à detecção de mudanças no uso, ocupação e cobertura da terra no território urbanizado, assim como a identificação dos assentamentos precários.

Analisar as vantagens da utilização do classificador por Árvore de Decisão, notadamente quando for indicado proceder à classificação como procedimento complementar após o emprego do Modelo Linear de Mistura Espectral.

Ponderar se é possível determinar um padrão de identificação (visual ou espectral), nas imagens satelitais de mediana resolução espacial para algumas das tipologias de assentamentos precários (favelas, loteamentos irregulares e núcleos urbanizados) na cidade de São Paulo.

## **2.6) JUSTIFICATIVA**

A necessidade de identificação das áreas ocupadas por assentamentos precários é preocupação presente e constante entre os gestores públicos, acadêmicos e da sociedade em geral, porque o número de favelas (e de todo tipo de assentamento precário) nas cidades do mundo inteiro está aumentando e a qualidade de vida de seus moradores precisa ser relevada e melhorada nestes territórios. Na atualidade, perto de um bilhão de pessoas vivem em condições de precariedade no mundo e espera-se que o número crescerá até 1.4 bilhões em 2020 (SLIUZAS, MBOUP e DE SHERBININ, 2008). Contudo, a correta identificação dos assentamentos precários ainda é problemática por várias razões:

- Muitos governos locais não têm os mecanismos para acompanhar o crescimento urbano de uma forma sistemática, ainda menos para monitorar o crescimento urbano informal. De acordo com UN-HABITAT, 80 cidades, numa amostra de 120, reconhecem que não possuem sistemas de vigilância para acompanhar as mudanças que ocorrem na dimensão espacial urbana (*Urban Indicators Program, 2005*)<sup>6</sup>.
- Os assentamentos precários, como parte do crescimento informal, são mais expressivos que o crescimento formal em muitas cidades do mundo em desenvolvimento. Estas áreas crescem mais rapidamente do que as áreas urbanizadas formais, segundo Sliuzas *et al.* (2008).

No caso da Cidade de São Paulo, há grandes esforços do Poder Público municipal, em concorrência com organismos do Governo do Estado e com recursos da União, para, como signatária das Metas do Milênio, com especial atenção para buscar cumprir a Meta 11, urbanizar os assentamentos precários, sejam favelas, loteamentos irregulares ou cortiços, a partir de uma priorização técnica-estratégica para esta intervenção.

Por outra parte, o crescente aumento das possibilidades técnicas dos satélites utilizados como instrumental básico do Sensoriamento Remoto, concretamente o aumento da resolução espacial, tem produzido uma focalização no emprego de sensores (e suas imagens) com detalhamento cada vez maior. Isto tem provocado, em nossa opinião, uma escalada no nível de exigência dos usuários assim como dos pesquisadores (FUCKNER, ROSEMBACK e ROSA, 2005). Tanto uns como outros (mas notadamente os primeiros), insistem que os estudos onde se empregam correntemente imagens satelitais atinjam as maiores escalas, e conseqüentemente, também as maiores resoluções possíveis. Acontece que, ao trabalhar com imagens satelitais de resolução espacial alta (menor que 5 m), e superalta (menor que 1 m), dois eventos importantes devem ser considerados: a perda da visão de conjunto por causa da escala de trabalho detalhada e o aumento exponencial do custo das imagens necessárias. Em contrapartida, deve-se avaliar a possibilidade de utilização de imagens de resolução espacial moderada, com pixels de 30 e 20 m, como as provenientes dos satélites Landsat TM (WU, 2004), (SMALL, 2005), (SMALL e LU,

---

<sup>6</sup> Apud (SLIUZAS, STEIN, et al., 2008, p. 2)

2006), e CBERS 2 - Satélite Sino Brasileiro de Recursos Terrestres (RODRÍGUEZ e MARTINS, 2009), respectivamente. Estas imagens estão disponíveis na Internet para serem obtidas, gratuitamente, (no caso de Landsat desde o início de 2009, no caso de CBERS desde junho de 2004).

Porém, a população que mora em assentamentos precários, em diversas partes do mundo, continua a aumentar. Os mais diversos tipos de materiais são empregados na construção de moradias precárias, nos diferentes países e continentes, assim algumas dessas habitações têm a aparência de casas construídas adequadamente, enquanto outras são construídas de forma inapropriada e erguidas, ilegalmente, em terras públicas ou privadas ao redor (ou no interior) das cidades. Desta maneira, novas comunidades foram criadas nas últimas décadas. A forma mais conhecida de moradia precária é denominada "*slum*", em Inglês, embora todas elas apresentem características similares. São chamadas de "Favelas" no Brasil, "Arrabales" ou "Chabolas" na Espanha, "Asentamientos" em Uruguai, "Ashwaiyyat" em Egito, "Barrios" ou "Ranchos" na Venezuela, "Bidonvilles" em Tunes e, em geral nos países francófonos, "Cun" na China, "Gecekondus" na Turquia, "Invasiones" na Colômbia, "Jacales" ou "Ciudades perdidas" no México, "Llega y Pon" ou "Asentamiento indocumentado" em Cuba, "Poblaciones Callampa" no Chile, "Shanty Towns" na Índia, "Tent towns" em Estados Unidos e "Villas Miseria" na Argentina. O importante é identificar o mais fielmente possível estes espaços e lidar com sua pré-existência, como dado dos projetos de urbanização socioambiental, priorizando as intervenções de forma científica.

### **3) CONTEXTUALIZAÇÃO**

#### **3.1) CONSIDERAÇÕES TEÓRICO-METODOLÓGICAS**

O aumento exponencial do número de usuários das Geotecnologias, Tecnologias da Informação Geográfica ou Geoprocessamento, (termos que em um sentido mais geral podem ser considerados como sinônimos) tem produzido certamente uma mudança paradigmática, consolidando a ideia do avanço progressivo em direção de uma sociedade informacional, com seu forte apelo na gestão e domínio da informação territorial (FERREIRA, 2006, p. 101).

Não é nossa intenção fazer apologias da eficiência, agilidade e desempenho dos Sistemas de Informações Geográficas – SIG (tido como representante principal e quinta-essência das Geotecnologias). A finalidade seria colaborar no resgate das origens teóricas e metodológicas da utilização das Tecnologias da Informação Geográfica no subsídio ao planejamento, análise espacial e à cartografia no contexto da Geografia, seja ela considerada Física ou Humana. Também, contribuir ao debate, que já se alastra há bastante tempo, de se as tecnologias geoespaciais devem formar parte do núcleo duro da Geografia ou se existe ou não uma Ciência da Informação Geográfica.

Porém, antes de enveredar por acepções mais gerais, como seria o conceito de Geoprocessamento, Tecnologias da Informação Geográfica, ou Geotecnologias, se comparados com os Sistemas de Informação Geográfica, vale a pena tratar estes últimos com mais detalhe, especialmente quando se trata das origens da inserção dos SIG na Geografia. Pretende-se abordar também o tema da virada que está acontecendo na Geografia e como isto afeta o tratamento dos dados espaciais e os métodos de representação e visualização cartográfica, demandando, além da estatística e de outras formas quantitativas já tradicionais nesse contexto, a incorporação de novas opções de análise qualitativa para atender aos requerimentos apresentados pelas necessidades das pesquisas nas diferentes áreas da Geografia Humana, o que constitui aparentemente, todo um novo desafio.

### 3.2) OS SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E A GEOGRAFIA

Em seu trabalho sobre este tema, o Professor Marcos César Ferreira (2006) faz toda a análise histórica, apresentando as bases teórico-metodológicas sobre as origens e a inserção dos SIG na Geografia. Suas considerações destacam que, devido ao perfil comercial atribuído a estes sistemas, não houve destarte a preocupação de estabelecer um debate sobre conceitos e paradigmas de análise espacial, o qual, aponta, seria a razão máxima e a condição primordial da existência de um SIG (ibidem p. 102). Comentando também que:

*“A postura geotecnológica exclusivista e tecnocrata do geoprocessamento ignorou o poder da análise espacial, entendendo-a apenas como sinônimo de “comandos” existentes nos SIG. Ora, um SIG só funciona porque foi desenhado com base em técnicas de análise espacial transformadas em funções por meio de linguagens de programação.” (ibidem p. 103).*

A crítica é pertinente, pois confundir análise espacial com “comandos” de um programa de SIG, além de propagar conceitos equivocados, pode trazer também consequências negativas no próprio desenho e construção do programa de geoprocessamento, aludindo ao Sistema de Informação Geográfica *sensu stricto*. Lembrando com afeto os tempos de trabalho no Instituto de Geografia da Academia de Ciências de Cuba, quando nos *idus* de 1985, comentava com os colegas (geógrafos físicos e humanos) que: “seria mais fácil ensinar programação a um geógrafo do que geografia a um técnico de informática”. Isto acontecia quando criávamos rotinas informáticas de SIG e de Cartografia Automatizada para serem incorporadas aos afazeres de pesquisa e produção cartográfica no Instituto (CANDEAUX DUFFAT, PÉREZ MACHADO e NÚÑEZ VÉLIZ, 1989).

Esta forma de pensar foi ratificada muito tempo depois na seguinte afirmação

*“Sem os geógrafos, os resultados e o desenvolvimento das Tecnologias da Informação Geográfica serão, sem dúvida, menos críticos, menos matizados e, por tanto, menos úteis” (CHUVIECO, BOSQUE SENDRA, et al., 2005, p. 46).*

Iríamos um pouco mais longe ao afirmar, que é relativamente comum encontrar deficiências e até conceitos errados nas formas de aplicação dos métodos cartográficos tradicionais em alguns SIG, que se tivessem incluído geógrafos nas equipes que desenvolveram esses algoritmos (no lugar de somente programadores), tais problemas não existiriam, e provavelmente, haveria mais recursos importantes da cartografia temática e de análise espacial para serem aplicados. No entanto, não deve confundir-se o manifestado acima, com a falta de conhecimento básico dos



métodos de representação cartográfica e da semiologia gráfica mais elementar na hora de aplicar a cartografia, já que os mapas são “considerados tradicionalmente a linguagem de expressão dos geógrafos” (IÑIGUEZ ROJAS, 2007, p. 49), e, em consequência, a voz natural da pesquisa geográfica, seja esta analógica ou digital.

Esta ressalva foi claramente apontada pelo Professor Horacio Capel quando afirmou:

*“...para utilizar corretamente esta ferramenta é útil também conhecer antes algo sobre as técnicas de representação gráfica e de semiologia, para que os mapas produzidos resultem legíveis” (CAPEL, 2006, p. 11).*

Resumindo, o que se desprende das manifestações anteriores, em nossa opinião, é que o que há de importante no uso dos sistemas de informação geográfica é sua capacidade de realizar análise espacial, e que é esta, e não outra, sua característica mais relevante. A questão fundamental não é apenas produzir mapas, às vezes denominados de ilustrações, arte final ou até mesmo “mapinhas”. Os produtos elaborados com SIG não significam nada, nem tem serventia alguma, sem a experiência e o conhecimento prévio de quem o opera. Sem aquela peça que fica entre o encosto da cadeira e a borda do teclado, como costumamos dizer jocosamente os nossos alunos.

### **3.3) A TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO ESTUDO DOS ASSENTAMENTOS PRECÁRIOS**

É possível obter uma perspectiva global do estado de desenvolvimento dos assentamentos precários em diferentes locais do mundo, utilizando-se métodos modernos de Sensoriamento Remoto? A resposta poderia ser afirmativa, se fosse desenvolvida uma melhor sistematização para a coleta de dados e inventários, que tivesse reflexos positivos diretos sobre a formulação de políticas públicas de intervenção física e socioambiental nestes territórios ocupados de forma irregular e sem as condições mínimas de habitabilidade. Desta forma, a alocação de recursos orçamentários e os efeitos das intervenções realizadas poderiam então ser analisados e monitorados, utilizando-se as tecnologias da geo-informação baseadas em modernos métodos de visualização e gestão. Adicionalmente, as informações sobre assentamentos precários, em um nível mais detalhado (bairro, localidade), são necessárias para criar indicadores de ocorrência da pobreza urbana e, ao mesmo tempo, permitir expandi-los ao nível de agregação nacional. Tais indicadores

deverão comportar melhores critérios de tomada de decisão, tanto nacional como internacionalmente, para refinar o diagnóstico e melhorar as condições de vida dos mais pobres.

Além disso, a Tecnologia da Informação Geográfica oferece a possibilidade de aumentar a capacidade das autoridades locais e nacionais para produzir a informação oportuna, correta e confiável, que pode ser usada para desenvolver sistemas de informações espaciais mais sustentáveis e que conduzam a uma melhor gerência urbana, incentivando o monitoramento local. (SLIUZAS, STEIN, *et al.*, 2008).

### **3.3.1) Expert Group Meeting on Slum Identification and Mapping – EGMSM<sup>7</sup>**

O foco deste evento dirigiu-se a documentar métodos próprios para a identificação e delineamento de áreas ocupadas por assentamentos precários, baseando-se em imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espacial, e bases de dados ancilares (por exemplo, censos e dados associados aos SIG, sobre infraestrutura e serviços). Isto deveria permitir a formulação de uma estratégia global para recolher informações confiáveis suficientes, no nível de detalhamento maior, intraurbano, e relacioná-las a informações no nível de detalhamento metropolitano.

Ao tratar de alcançar os objetivos almejados, discutiu-se amplamente sobre vários assuntos relacionados com o tema da identificação e monitoramento dos assentamentos precários; especial relevância nesse contexto tiveram os questionamentos relacionados a seguir:

*“A definição de um assentamento precário (especificamente “slum” - favela), tanto do ponto de vista estatístico como espacial e suas implicações para a coleta de dados e seu delineamento espacial, utilizando-se para isto o sensoriamento remoto. Quais os critérios espaciais adicionais deveriam acrescentar-se à definição existente? Como acomodar a heterogeneidade natural desses assentamentos nos critérios e métodos a serem estabelecidos?*

*Como equalizar diferentes métodos de levantamento de dados, isto é, como combinar, otimamente, dados locais e censitários com aqueles obtidos a partir das imagens de sensoriamento remoto de alta resolução?*

*Quais são as formas mais adequadas de armazenar e de visualizar a informação coletada nos diferentes níveis gerenciais, utilizando-se sistemas de informação*

---

<sup>7</sup> Reunião de grupo de peritos na identificação e mapeamento de favelas. Evento organizado em 2008 para tratar especificamente sobre a identificação e representação cartográfica das favelas (*slums*). O encontro foi promovido pelo *International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation – ITC*, de Holanda, *UN-HABITAT Global Urban Observatory - GUO*, de Quênia, e *Center for International Earth Science Information Network – CIESIN* da Universidade de Columbia, Estados Unidos da América.

*geográfica modernos, com ênfase na qualidade (porém sem esquecer a portabilidade, a disseminação e o intercâmbio de dados) e das maneiras que os SIG podem ser usados para a tomada de decisões?*

*Poderiam ser definidas metodologias, diretrizes e instruções para a replicação das formas de levantamento e da análise dos dados espaciais? Quão frequentemente deve ser repetido e/ou atualizado o inventário dos assentamentos precários e que métodos existem para manter sua consistência e a comparabilidade dos dados, ao longo do tempo?*

*É possível que os governos e as autoridades locais possam apoiar uma “agenda urbana”, integrando os assentamentos precários e as questões relacionadas com identificação e o monitoramento da pobreza urbana, por meio da tecnologia da geo-informação, nas políticas de desenvolvimento urbano, locais e nacionais?*

*É factível propor um método universal e operacional para a identificação dos assentamentos precários utilizando-se a tecnologia geo-espacial?*

*No final, o propósito do encontro concentrou-se em três objetivos fundamentais:*

*Estabelecer as principais diretrizes de mapeamento dos assentamentos precários para o Global Urban Observatory – GUO (Observatório Urbano Global) de UN-HABITAT;*

*Apresentar o “estado da arte” atual da utilização de imagens de alta resolução espacial para mapear assentamentos precários;*

*Identificar os métodos mais adequados para o desenvolvimento, transferência de tecnologias e incremento de capacidades adicionais”. (SLIUZAS, MBOUP e DE SHERBININ, 2008, p. 4).*

Desta forma, esta reunião de especialistas esperava produzir definições, indicadores e métodos de medida dos assentamentos precários (com ênfase nas favelas – *slums*) no aspecto físico (isto é, contiguidade, densidade, e estrutura espacial) como um complemento às definições estatísticas existentes. Alcançar melhores conhecimentos na diversidade dos assentamentos precários e de suas características físicas em vários contextos. Obter informação descritiva e analítica nos métodos mais avançados, para poder identificar, mapear, caracterizar e monitorar o desenvolvimento dos assentamentos precários como um componente do crescimento urbano, utilizando-se técnicas avançadas de sensoriamento remoto. Finalmente, obter um melhor conhecimento dos recursos técnicos sobre como analisar, visualizar e controlar dados estratificados e multitemporais dos assentamentos precários.

### **3.4) OS ASSENTAMENTOS PRECÁRIOS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO**

Favela. A origem deste termo se encontra no episódio histórico conhecido por Guerra de Canudos. A cidadela de Canudos foi construída junto a alguns morros, entre eles o Morro da Favela, o qual possui este nome porque o morro era coberto de uma planta, chamada de fava ou favela. Os soldados que foram lutar na região, ao voltar ao Rio de Janeiro, em certo momento deixaram de receber seu soldo e

passaram a morar em construções provisórias instaladas em alguns morros da cidade, juntamente de outros desabrigados. A partir daí, estes morros passaram a ser conhecidos como favelas, em referência à "favela" original (FERREIRA BUARQUE DE HOLLANDA, 1986).

No censo de Favelas realizado pelo Centro de Estudos da Metrópole – CEM, no ano 2000, consta como a mais antiga favela da cidade a denominada Chácara Chacrinha, com data de ocupação em 1896, localizada em uma estreita franja de terreno particular, à Rua da Chácara no Distrito Sacomã. Essa favela foi urbanizada no ano 2000. Contudo, embora boa parte dos estudos sobre o tema considere a década de 1940 como sendo a década de surgimento das favelas na Cidade, muito provavelmente isto já vinha acontecendo desde a década de 1930, ou antes.

No sistema Habisp (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2006), as mais antigas ocupações precárias de que se têm notícias remontam-se às décadas de 1930 e 1940 do século XX. Na Tabela 1, apresenta-se uma lista dessas ocorrências.

**Tabela 1. Listagem das favelas no Município de São Paulo com as datas mais antigas de início da ocupação.**

Fonte Habisp. Compilado pelo autor.

| LISTA DE FAVELAS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO |      |                         |   |               |
|--|------|-------------------------|---|---------------|
| ID   | Ano  | Nome                    | Endereço  | Distrito      |
| 271  | 1934 | Palmas do Tremembé      | Rua Professor Pedro Pinto e Silva /<br>Rua dos Mártires Armênios        | Tucuruvi      |
| 1211                                       | 1940 | Pau Queimado            | Rua Caetano de Campos   | Tatuapé       |
| 1136                                       | 1942 | Jardim Colombo          | Rua Clementine Brenne   | Vila Sônia    |
| 304  | 1942 | Guaicuri I              | Rua do Guaicuri x Rua Professor Araujo Lima                             | Cidade Ademar |
| 496  | 1945 | Coronel Luis Alves      | Rua Coronel Luis Alves /<br>Rua Souza Ramos                             | Vila Mariana  |
| 1237                                       | 1946 | Canão                   | Rua República do Iraque   | Campo Belo    |
| 1447                                       | 1946 | Mimosa                  | Rua Aperibé / Rua Alcina /<br>Rodovia Fernão Dias (Altura da Passarela) | Jaçanã        |
| 169  | 1947 | Motorádio               | Avenida Embaixador Macedo Soares /<br>Rua Botocudos                     | Lapa          |
| 1085                                       | 1947 | Avaré                   | Rua Gino Marinuzzi  | Cidade Ademar |
| 33   | 1947 | São José Barroca        | Avenida do Abranio /<br>Rua Senador Fernandez Távora                    | Artur Alvim   |
| 85   | 1948 | Sto. Antônio do Canindê | Rua Picina 169  | Pari          |
| 495  | 1949 | Souza Ramos             | Rua Souza Ramos, 518  | Vila Mariana  |

A publicação da Divisão de Serviço Social da Prefeitura (DSS) (São Paulo (Cidade), 1962) divulgou a pesquisa urbana realizada pela Sociedade de Análise Gráfica e Mecanográfica Aplicada aos Complexos Sociais (SAGMACS), a qual registrou, em 1957, a existência de 141 favelas em São Paulo, com 8.488 barracos e cerca de 50 mil moradores (FRANÇA, 2009). Godinho (1964:2, apud PASTERNAK, 2002) apresenta uma quantificação distinta, “150.000 pessoas morando em favelas”, citando informações do MUD (Movimento Universitário de Desfavelamento).

Embora se atribua aos anos 1940 o início do fenômeno das favelas em São Paulo, foi na década dos 1970 que ele se consolidou. Considerado o primeiro censo de favelas de São Paulo o “Estudo sobre o fenômeno favelas no município de São Paulo – SEBES 1974”, elaborado sob a responsabilidade da Coordenação do programa de Estudos e Documentação de Habitação e Trabalho, Vinculada a SEBES cadastrou 525 aglomerados, sendo 327 núcleos (aglomerados com até 10 barracos) e 198 favelas (aglomerados com mais de 10 barracos), totalizando 14.304 barracos com aproximadamente 71.840 habitantes. A atualização deste cadastro feita em 1975 (por voo de helicóptero) mostrou que a população favelada crescera para 117.237 pessoas, representando 1,6% da população do município (VÉRAS, 1974 apud FRANÇA, 2009) e (PASTERNAK, 2002).

Outro Censo de Favelas elaborado pela prefeitura em 1987 encontrou o total de 812.764 moradores de favelas em São Paulo, 8,9% do total da população do município, que à época era de pouco mais de nove milhões de habitantes. Em 1991, dados do Censo Demográfico contabilizam 585 favelas, com 146.892 domicílios e 711.032 pessoas. Em 1993, nova pesquisa é feita pela FIPE (Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas), como resultado computaram-se 1,9 milhões de favelados, ou seja, 19,8% da população. Atualmente há perto de três milhões de paulistanos vivendo em favelas, loteamentos irregulares e núcleos urbanizados além de uma significativa parcela que ocupa conjuntos habitacionais que estão em situação de irregularidade fundiária e ou edilícia. O Plano Municipal de Habitação produzido pela Sehab apresenta a seguinte conceituação para as tipologias aqui referidas (ver Tabela 2).

**Tabela 2. Assentamentos precários na cidade de São Paulo segundo o Plano Municipal de Habitação.**

Fonte: (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2011, p. 21)

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Favela                          | ocupação feita à margem da legislação urbanística e edilícia, de áreas públicas ou particulares de terceiros, predominantemente desordenada e com precariedade de infraestrutura, com construções predominantemente autoconstruídas e precárias, por famílias de baixa renda e vulneráveis socialmente.   |
| Núcleo urbanizado               | antiga favela, que conta com 100% de redes de infraestrutura urbana implantada por através de diferentes programas habitacionais, mas que ainda não conta com regularização jurídica e legal.   |
| Loteamento irregular            | assentamento onde se caracteriza a existência de um agente promotor ou comercializador, cuja tipologia e morfologia do parcelamento do solo estejam voltadas ao uso unifamiliar e multifamiliar de pequeno porte, que tenham sido implantados e ocupados sem prévia aprovação pelos órgãos públicos responsáveis ou, quando aprovados ou em processo de aprovação, implantados em desacordo com a legislação ou com o projeto aprovado. |
| Conjunto habitacional irregular | aquele que, apesar de ter sido produzido pelo poder público, ainda não tem regularização fundiária, jurídica e registraria. São objeto deste Plano apenas os conjuntos habitacionais irregulares produzidos pelo poder público municipal.   |
| Cortiço                         | domicílio em moradia coletiva, multifamiliar, constituída por uma ou mais edificações em um mesmo lote urbano, subdivididas em vários cômodos alugados, subalugados ou cedidos a qualquer título; com várias funções exercidas no mesmo cômodo; com acesso e uso comum dos espaços não edificadas e instalações sanitárias; com circulação e infraestrutura, no geral, precárias e superlotação de pessoas.                             |

No âmbito da cidade de São Paulo observa-se a ocupação cada vez maior de áreas sujeitas a restrições ambientais, áreas de risco com declives acentuados ou sujeita a inundações, solos contaminados, áreas próximas a aterros sanitários ou depósitos

de lixo. A maior incidência desta tipologia de ocupação se concentra nas regiões Sul, incluindo a dos Mananciais e a Zona Leste da cidade (ver Tabela 3), Os assentamentos precários ocupam uma área aproximada de 130 km<sup>2</sup> e concentram 30% da população (11,3 milhões de habitantes, IBGE 2010).

**Tabela 3. Domicílios por tipo de assentamento precário e por região administrativa da Sehab em 2009.**

Fonte: (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2011, p. 33)

|                                      | mananciais <sup>(1)</sup> | norte <sup>(1)</sup> | sul <sup>(1)</sup> | sudeste <sup>(1)</sup> | leste <sup>(1)</sup> | centro <sup>(1)</sup> | difuso <sup>(2)</sup> | total          |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| favela <sup>(1)</sup>                | 54.886                    | 65.696               | 117.793            | 64.980                 | 67.072               | 10.724                | 0                     | 381.151        |
| loteamento <sup>(1)</sup>            | 100.031                   | 60.769               | 44.953             | 22.739                 | 154.552              | 0                     | 0                     | 383.044        |
| núcleo urbanizado <sup>(1)</sup>     | 11.193                    | 7.403                | 1.973              | 1.051                  | 2.640                | 262                   | 0                     | 24.522         |
| cortiço <sup>(2) (3)</sup>           |                           |                      |                    |                        |                      | 11.086                | 69.303                | 80.389         |
| conjunto habitacional <sup>(1)</sup> | 669                       | 8.128                | 4.657              | 2.533                  | 3.056                | 1.659                 | 0                     | 20.702         |
| <b>total</b>                         | <b>166.779</b>            | <b>141.996</b>       | <b>169.376</b>     | <b>91.303</b>          | <b>227.320</b>       | <b>23.731</b>         | <b>69.303</b>         | <b>889.808</b> |

**Fonte:** (1) Habisp, 2009, referente às subprefeituras Sé e Mooca

(2) dado obtido a partir do número levantado pela Fundação Seade, do qual foi subtraído o levantamento do Habisp para as subprefeituras Sé e Mooca

(3) o valor total de 80.389 domicílios encortiçados foi estimado pela Fundação Seade

Atualmente, São Paulo tem uma das problemáticas habitacionais mais complexas do país, sendo que as dificuldades no âmbito da gestão habitacional, mercado de terras e financiamento habitacional para população de baixa renda, agravam-se a cada dia em virtude de diversos problemas econômicos e sociais. Essas questões socioeconômicas que dificultam o acesso das famílias à habitação formal são reforçadas pela dificuldade do poder público, e até mesmo da iniciativa privada, em encontrar terrenos propícios à construção de moradias com boa localização e preços adequados; isto tem provocado à diminuição da oferta de moradias na capital.

Esforços para articular as muitas variáveis relacionadas à questão estão sendo realizados pelo poder público municipal. O principal deles foi à elaboração de estudos aprofundados que culminaram em um Plano Municipal de Habitação com metas e ações para os anos 2009 a 2024, ora em tramitação na Câmara Municipal de Vereadores para aprovação.

### 3.5) SOBRE OS DADOS E INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS NO SISTEMA HABISP

O Habisp é um sistema de informações, que funciona via web, com capacidade para armazenar e processar informações alfanuméricas e geográficas. O foco é a habitação popular e os “loci” são as favelas, loteamentos irregulares, cortiços e empreendimentos habitacionais projetados para a população que aí vive (ver Tabela 2). O Habisp nasceu da iniciativa para elaboração do plano estratégico para habitação social no âmbito de um projeto com a Aliança de Cidades<sup>8</sup>, que se transformou, no decorrer dos estudos, em uma proposta para a elaboração do Plano Municipal de Habitação (PMH). A proposta engloba metas e objetivos de atendimento habitacional para quatro quadriênios de 2009 a 2024, incluindo o custo para intervenções de urbanização e regularização fundiária e construção de novas unidades, assentamento por assentamento (consultar Plano Municipal de Habitação: Documento para debate).

Os primeiros passos para a construção do PMH incluíram a organização dos dados e informações disponíveis sobre os assentamentos precários – visando à quantificação e classificação total da demanda habitacional – e a construção de um sistema para apoio à tomada de decisão, o Habisp, que contém dados alfanuméricos e geográficos sobre cada favela e loteamento da cidade e, ainda, de um sistema de priorização de intervenções; este contém um painel de indicadores físicos e sociais que levam em consideração as dimensões de risco geológico a que os assentamentos estão submetidos, precariedade de infraestrutura, índices de saúde e vulnerabilidade social das famílias moradoras.

No processo de organização e atualização dos dados sobre os assentamentos precários o Habisp foi o principal instrumento, por meio do qual as informações até então segmentadas nos diversos departamentos da SEHAB, foram reunidas em uma única base de modo a poderem ser comparadas e equiparadas em termos de qualidade de dados e informações.

Um grande número de dados foi levantado para produzir uma base de informações consolidada e organizada com vistas à tomada de decisão no que tange ao atendimento final das famílias moradoras.

---

<sup>8</sup> Aliança de Cidades (*Cities Alliance*), consórcio internacional de cidades e organismos de desenvolvimento econômico e social comprometidos em encontrar soluções para redução da pobreza.



O Sistema de Priorização de Intervenções foi elaborado pela Secretaria Municipal de Habitação (Sehab)/ Coordenadoria de Habitação Social, órgão da administração direta da Prefeitura da Cidade de São Paulo, para ser um instrumento de apoio à definição de metas e objetivos para o Plano Municipal de Habitação quanto ao atendimento à demanda de intervenção em assentamentos precários no médio e longo prazos. Tem como princípio a aplicação de análise multicritério e operações de geoprocessamento, a partir de uma base de dados alfanuméricos e geoespaciais, atualizada e consolidada por meio de trabalho de vistorias de campo dos técnicos da secretaria que alimentou o recém-criado Sistema de Informações para Habitação Social da Cidade de São Paulo - Habisp<sup>9</sup>, do qual o Sistema de Priorização é parte integrante (COELHO e PÉREZ MACHADO, 2009, p. 1).

O aspecto geográfico do problema foi reforçado pelo uso de uma interface web que permite a edição e inserção de informações geográficas e alfanuméricas, as quais ficam disponíveis aos técnicos e a toda a população em tempo real. Do mesmo modo são acrescentados ou atualizados outros dados ou informações relevantes (ver Figura 1). Portanto diferentes setores da sociedade se beneficiaram do uso de instrumentos de análise espacial, de eficácia comprovada, que foram incorporados ao sistema de priorização para orientar na tomada de decisão.

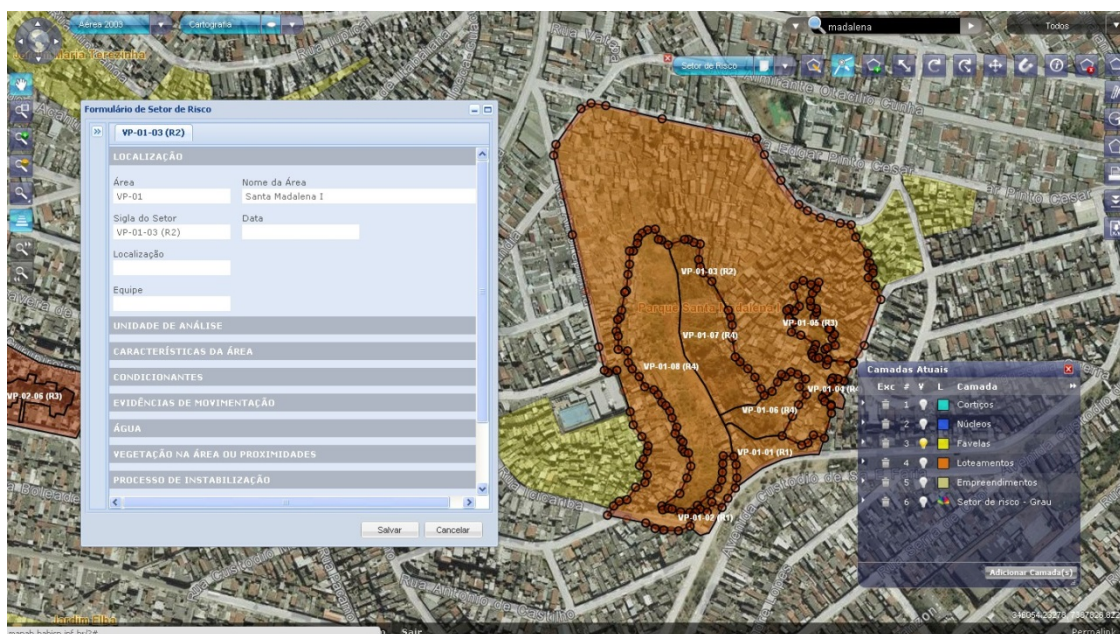


Figura 1. Exemplo de interface para atualização de dados dos setores de risco -2010  
 Fonte: [www.habisp.inf.br](http://www.habisp.inf.br). Na imagem é possível visualizar os perímetros das favelas (em amarelo) e os Setores de Risco (em marrom) no modo edição. Neste ambiente estes podem

<sup>9</sup> Sistema de Informações para Habitação Social, <<http://www.habisp.inf.br>>.

ser modificados por meio da inserção, deleção ou movimentação dos nós de edição dos vetores. No fundo o mosaico aerofotogramétrico do Município de São Paulo do ano 2007.

Com o advento do Habisp, as equipes de trabalho puderam obter uma visão mais ampla do problema. A defasagem dos dados mostrou-se nítida, e a sobreposição da cartografia dos assentamentos sobre a ortofoto de 2003 evidenciou também divergências quanto às feições geográficas dos assentamentos e serviu para estimular a discussão sobre os procedimentos de trabalho da Sehab e a integração das equipes na medida em que técnicos de diferentes departamentos sentaram para discutir temas como: otimização do trabalho, adequação e uniformização das informações e avaliação dos resultados (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO; SECRETARIA DE HABITAÇÃO; SUPERINTENDÊNCIA DE HABITAÇÃO POPULAR, 2008).

*A implantação dos dois instrumentos de planejamento – o Habisp e o Sistema de Priorização de Intervenções – foi realizada a partir do conhecimento acumulado e com a participação de todo o corpo técnico da Sehab, capacitado para o manuseio do sistema de informações. Com isto, instaurou-se um processo contínuo de conhecimento das dinâmicas de transformação do território, que possibilita o conhecimento de cada espaço habitado. As dinâmicas de transformação deste espaço são intensas e exigem novos programas, posturas, revisão constante dos arcaísmos jurídicos e arquitetônicos. A cultura técnica precisa ser revista constantemente. Conhecer estes processos de mudança permite que esta cultura se renove, se aprimore e chegue mais rápido ao seu objetivo de fornecer moradia digna a todos os moradores da cidade (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2011, p. 22).*

A urgência em atuar sobre o problema da habitação, mais especificamente ponderando a existência de habitações precárias e a escassez de recursos<sup>10</sup>, impulsionou a Sehab a desenvolver o Sistema de priorização. Em virtude da enorme demanda, definiu por meio do Plano Municipal de Habitação, como foco de sua atuação, a urbanização e regularização de favelas e loteamentos irregulares ocupados por população de baixa renda (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2011).

Estabeleceram-se quatro (4) etapas para definir a prioridade de atendimento de um assentamento em um determinado programa habitacional: caracterização, classificação, elegibilidade e priorização. Cada qual com seu objetivo, conforme pode ser observado na Tabela 4.

---

<sup>10</sup> Considerando recursos materiais e humanos.

**Tabela 4. Objetivos básicos das fases propostas para o Sistema de Caracterização, Classificação, Elegibilidade e Priorização.**

Fonte: Elaboração própria. (COELHO e PÉREZ MACHADO, 2009).

| Caracterização  | Classificação   | Elegibilidade  | Priorização   |
|---|---|--|---|
| ↓   | ↓   | ↓  | ↓   |
| Caracterizar os assentamentos precários do Município de São Paulo | Classificar estas áreas em grupos que orientem o tipo de intervenção necessária | Eleger as áreas a ser objeto de intervenção, já estabelecendo nesta fase um corte de atuação | Priorizar a atuação nas áreas que se enquadraram nos critérios de elegibilidade |

A primeira e principal etapa do sistema é a de caracterização, pois os resultados encontrados nas etapas futuras são ramificações das informações nela coletadas. Aí se iniciou o trabalho de atualização dos dados e a definição conceitual dos tipos de assentamentos objeto de atendimento pela política habitacional descrita à Tabela 2.

De acordo com o objetivo da ação, a Sehab definiu o foco da priorização. Para os projetos de urbanização, essa focalização estava dirigida às áreas mais precárias em todos os temas de análise. No entanto, para a regularização de favelas, como por princípio o programa não pode regularizar situações precárias, o foco da atuação foi dirigido às áreas com os melhores índices (COELHO e PÉREZ MACHADO, 2009).

O relatório “Sistema de Caracterização, Classificação, Elegibilidade e Priorização para Intervenções em Assentamentos Precários no Município de São Paulo/ Brasil” (PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; ALIANÇA DE CIDADES, 2007, p. 21) elenca dois princípios estabelecidos para a escolha dos indicadores e índices que compõem o índice de priorização: (1) a proteção da vida da população e a melhoria das condições de habitabilidade para patamares aceitáveis; e (2) a proteção à população socialmente mais vulnerável. O mesmo relatório aponta que as primeiras formulações realizadas pela Sehab escalonavam as prioridades em três patamares: alta, média e baixa, abordagem que se mostrou deficitária, pois o universo de assentamentos exige uma escala mais larga, o que resultou na elaboração do “índice de priorização”, que atribui uma nota entre 0 e 1 para cada assentamento, sendo que 0 é a ausência de precariedade e 1 a precariedade máxima com base em um modelo de análise multicritério. Na Tabela 5 apresentamos a fórmula de cálculo

do índice de priorização para o programa de urbanização e regularização de assentamentos precários.

**Tabela 5: Fórmula de cálculo do índice de priorização.**

Fonte: Elaboração Própria. Fonte: (COELHO e PÉREZ MACHADO, 2009).

|  |   |
|--|---|
| $IP = \frac{[(Y - IF) \times n_f] + (IR \times n_r) + (IV \times n_v) + [(Y - IS) \times n_s]}{(n_f + n_r + n_v + n_s)}$   |   |
| <p>Sendo:</p> <p>IF = índice de infraestrutura urbana</p> <p>IR = índice de risco de solapamento e escorregamento</p> <p>IV = índice de vulnerabilidade social</p> <p>IS = índice de saúde</p> | <p>Sendo:</p> <p><math>n_f</math> = peso do índice de infraestrutura urbana</p> <p><math>n_r</math> = peso do índice de solapamento e escorregamento</p> <p><math>n_v</math> = peso do índice de vulnerabilidade social</p> <p><math>n_s</math> = peso do índice de saúde</p> |
| <p>Y = Fator de Ordenamento da Prioridade. (se ordem crescente = 1) (se ordem decrescente = 0)</p>   |   |

Os índices utilizados têm origens diversas. Os de Saúde e Vulnerabilidade Social foram apropriados pela Sehab de outras iniciativas, ou seja, não foram produzidos exclusivamente para a priorização de intervenções, mas constituem referência para as políticas setoriais de saúde e assistência social, no âmbito municipal. O Índice Paulista de Vulnerabilidade Social (IPVS) tem como fonte de dados o Censo IBGE, 2000, e o índice de Saúde os dados do sistema municipal de saúde, 2006. Já o índice de urbanização é calculado com base nos dados coletados em campo e inseridos no Habisp, atualizados sempre que a equipe de campo identifica alterações na situação informada; ele é de responsabilidade da Sehab.

O índice de risco de solapamento e escorregamento é originário de um levantamento realizado pela Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP), em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológica (IPT)<sup>11</sup>, e intitulado “Mapeamento de riscos associados a escorregamentos em áreas de encostas e a solapamentos de margens de córregos nas favelas do Município de São Paulo, 2010”, em que a Secretaria de Habitação teve participação na indicação das áreas que deveriam ser objeto de análise pela equipe do IPT, juntamente com os técnicos (geólogos, engenheiros e arquitetos) das subprefeituras.

<sup>11</sup> A Prefeitura de São Paulo realizou, por meio da contratação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, dois mapeamentos de risco nos anos de 2003 e 2010. A metodologia elaborada pela Prefeitura em parceria com o IPT estabeleceu a reavaliação de todas as áreas contempladas em 2003 e as demais áreas identificadas pelos técnicos das subprefeituras e da Secretaria de Habitação (Sehab).

O índice de risco para os assentamentos precários, entretanto, foi concebido no âmbito do sistema de priorização e é calculado para cada assentamento com a utilização de operações de overlay (ver Tabela 6). O Habisp identifica, para cada assentamento, o percentual da sua área (m<sup>2</sup>) presente em cada setor de risco e então, mediante uma fórmula de cálculo que atribui um peso a cada grau de risco, indica o índice de risco de solapamento e escorregamento para o assentamento.

**Tabela 6: Fórmula de cálculo do índice de risco de solapamento e escorregamento. Elaboração própria.**

Fonte: Elaboração própria (COELHO e PÉREZ MACHADO, 2009).

|  |  |
|--|--|
| $IR = \frac{(P_{rb} \times n_{rb})}{100} + \frac{(P_{rm} \times n_{rm})}{100} + \frac{(P_{ra} \times n_{ra})}{100} + \frac{(P_{rma} \times n_{rma})}{100}$                 |  |
| $n_{rma}$  |  |
| <p>Sendo:</p> <p>P<sub>rb</sub> = % risco baixo</p> <p>P<sub>rm</sub> = % risco médio</p> <p>P<sub>ra</sub> = % risco alto</p> <p>P<sub>rma</sub> = % risco muito alto</p> | <p>Sendo:</p> <p>n<sub>rb</sub> = peso do risco baixo</p> <p>n<sub>rm</sub> = peso do risco médio</p> <p>n<sub>ra</sub> = peso do risco alto</p> <p>n<sub>rma</sub> = peso do risco muito alto</p> |

Considerando que o risco geológico é um fator determinante para aferir a condição de habitabilidade de uma área, a utilização do Habisp para subsidiar o novo mapeamento proporcionou não apenas a criação de um banco de dados consistente sobre o risco da cidade, mas também a rápida transferência e disseminação desse conhecimento. A delimitação das áreas estudadas e os principais atributos que fizeram parte da avaliação podem ser acessados por técnicos e gestores da administração municipal (ver Figura 2). A localização dos setores de risco e o grau de probabilidade de ocorrência de deslizamentos também estão disponíveis a universidades, centros de pesquisas, organizações não governamentais e ao público em geral, por meio do Habisp.

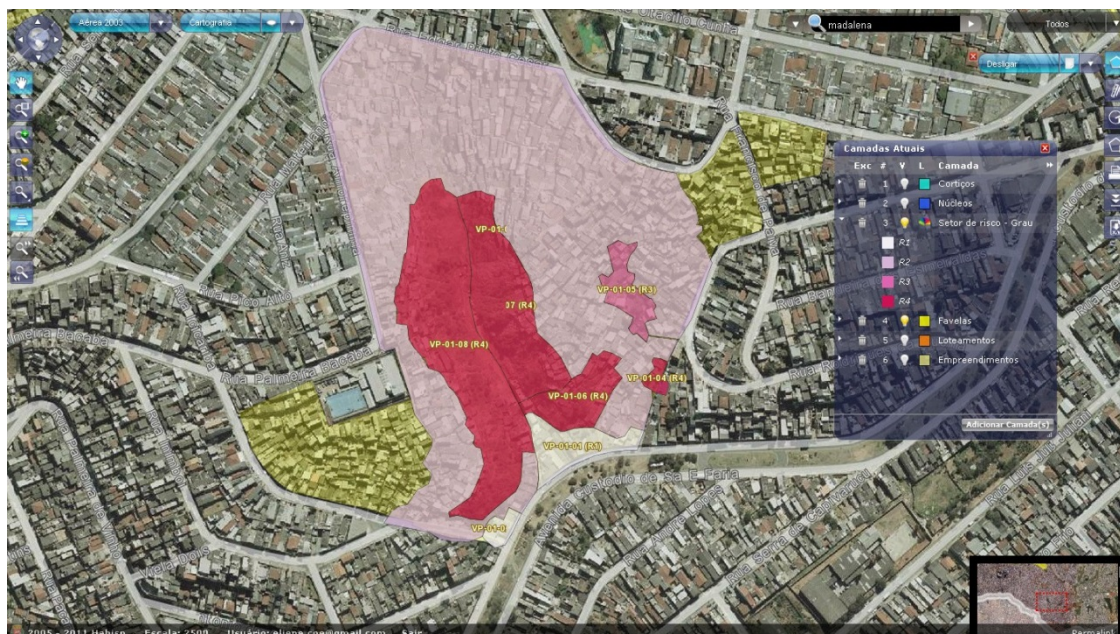


Figura 2. Exemplo de sobreposição da camada com o mapeamento de risco -2010 e a camada de favelas. Favela Parque Santa Madalena. Fonte: [www.habisp.inf.br](http://www.habisp.inf.br).

Os indicadores calculados foram, posteriormente, agregados e espacializados por sub-bacias hidrográficas e, posteriormente, visando definir a lista de áreas para intervenção por quadriênio, foram delimitados dentro de cada sub-bacia os perímetros de ação integrada (unidades de ação onde o projeto de urbanização é tratado de forma única). Atualmente o Habisp possui aproximadamente 200 camadas de mapas ligadas ao tema da habitação disponíveis para acessados via web e vários disponíveis para download, incluindo as feições utilizadas neste estudo: favelas, loteamentos irregulares e núcleos urbanizados.

A boa qualidade dos dados gráficos, especialmente no que tange à localização dos assentamentos precários, resultou um fator positivo na sua utilização como forma de validação e identificação das manchas geradas pelo Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME<sup>12</sup>. A ideia inicial foi a de se fazer a identificação inversa, aferindo os resultados obtidos mediante a análise dos dados e informações alcançados na pesquisa.

<sup>12</sup> Uma descrição dessa técnica aparece no item 6.6 (Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME).

#### 4) BASE TEÓRICA E CONCEITUAL.

Como já foi mencionada nos objetivos deste trabalho, a principal premissa adotada foi a de utilizar imagens satelitais de mediana resolução espacial. O motivo desta decisão transcende o simples fato de que as imagens de mediana resolução são geralmente oferecidas de forma gratuita. Uma característica importante a ser considerada é a área de abrangência, determinada pelo Campo Instantâneo de Visada (*Instantaneous Field of View – IFOV*) do sensor. Enquanto as imagens de mediana resolução espacial cobrem um território de dezenas de milhares de km<sup>2</sup>, as imagens de alta e superalta resolução espacial cobrem apenas algumas centenas ou até dezenas de km<sup>2</sup>, visto que há uma relação de proporcionalidade inversa entre a área de abrangência e a resolução espacial. Como consequência direta desse fato, caso o território estudado tenha uma dimensão maior que a imagem do sensor, circunstância que ocorre quase sempre com as imagens de alta resolução, as únicas alternativas são: reduzir a área de estudos ou adquirir mais imagens que deverão ser articuladas em forma de mosaico. Evidentemente isto implica uma redução da qualidade ou, no mínimo, no aumento exponencial na quantidade de trabalho e problemas técnicos a serem resolvidos. Adiante serão explicadas todas as operações que devem ser executadas em quaisquer imagens antes de poderem ser efetivamente aproveitadas corretamente utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Tais operações são consideradas como pré-processamento.

Veja-se agora a questão da escala de trabalho. Conforme foi comentado na Justificativa, existe uma tendência atual a privilegiar o uso de imagens de alta (1 a 5 m) e superalta (inferior a 1 m) resolução espacial. De maneira alguma está se rejeitando ou criticando o emprego destes recursos quando necessários e (sobre tudo) disponíveis (BARROS FILHO e SOBREIRA, 2008). O que sucede é que, em nossa opinião, o uso de imagens de resolução moderada em estudos com Sensoriamento Remoto aplicado a regiões urbanas têm sido, até certo ponto, negligenciado (PÉREZ MACHADO e SMALL, 2011, p. 2). As imagens de mediana resolução oferecem a possibilidade de trabalhar em escalas médias (entre 1:25.000 e 1:500.000), o que permite ter uma visão de conjunto sobre o território, abrindo a possibilidade de estabelecer relações e comparar regiões dentro do mesmo contexto (urbano neste caso). Esta possibilidade está vedada às imagens de alta resolução se consideradas individualmente. Aos custos financeiros e de trabalho, requeridos

para formar um mosaico equivalente à área de abrangência de apenas uma cena de mediana resolução de 185 km X 172 km, tomando, como exemplo, as do satélite *Landsat Thematic Mapper (TM)*, seria necessário adicionar a enorme dificuldade de se obter várias imagens de alta resolução tomadas no mesmo dia ou em datas muito próximas. Esta qualidade é recomendada para se garantir, minimamente, condições atmosféricas e de iluminação equivalentes para poder-se montar um mosaico confiável.

Outra característica importante das imagens de mediana resolução espacial é que elas existem há muito tempo. As primeiras cenas capturadas pelo *Landsat 4 Thematic Mapper - TM*, já com a resolução espacial de 30 m (ou seja, com pixels de 900 m<sup>2</sup>) remontam-se a Julio de 1982. Este sensor, com uma resolução temporal (tempo de revisita) de 16 dias, deixou de produzir imagens em junho de 2001. O seguinte satélite da série foi o *Landsat 5 Thematic Mapper - TM*, seu sensor TM equipa o satélite desde março de 1984 até hoje<sup>13</sup>, embora a frequência de geração de imagens de boa qualidade tenha se reduzido notavelmente. Na sequência, foi colocado em órbita o *Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+)* em julho de 1999, já que o lançamento do Landsat 6 foi infrutífero. Resumindo, é possível contar com imagens satelitais com resolução espacial de 30 m em registro há 29 anos. Isto constitui um importante e confiável acervo de dados multiespectrais que se encontra disponível a todos com apenas o trabalho de “baixá-los” pela Internet.

Mais um aspecto a ser considerado é a consistência sustentada pelas características técnicas comuns aos sensores da série Landsat: tamanho do pixel e área de cobertura (resolução espacial); número de canais e sua largura de banda (resolução espectral); e tempo de revisita da mesma área (resolução temporal). Devido à consistência intrínseca dessas imagens é possível voltar atrás (numa espécie de “máquina do tempo”), e comparar imagens da década de 1980 com imagens dos anos 1990 e 2000; enquanto as imagens geradas pelos diversos satélites de alta resolução estão disponíveis para uso civil somente a partir de 1999 e seu custo financeiro é alto. Ainda que outras fontes de imagens, como fotografias aéreas estejam disponíveis, elas não estariam calibradas, e conseqüentemente

---

<sup>13</sup> Informação colocada à época da redação inicial do texto. Em novembro de 2011 o Serviço Geológico Norte-Americano (USGS) anunciou o cese da aquisição de dados por parte do Landsat 5, devido à severa deterioração de seus componentes eletrônicos. O dispositivo, colocado em órbita em 1984, foi projetado para trabalhar por três anos e completou 27 anos produzindo imagens.



seriam muito difíceis de usar para realizar análises confiáveis. O mesmo ocorre com as imagens satelitais de alta resolução, onde pequenas diferenças na geometria e iluminação introduzem problemas muito sérios que dificultam ou até impedem a comparação e a detecção de mudanças quantitativamente. Fora disso, deve ser considerado também o fato de que as fotografias aéreas não possuem a qualidade da alta resolução espectral - com pelo menos sete (7) canais disponíveis - que as imagens Landsat das séries TM e ETM+ sempre têm.

Conforme foi mencionado antes, existe uma tendência a se utilizar imagens de satélite de alta e superalta resolução espacial, o principal argumento em favor do uso de imagens com essas qualidades indica que a paisagem urbana é composta por um vasto número de diferentes elementos e materiais. Isto define o tecido urbano como sendo radiometricamente heterogêneo e complexo (SMALL, 2005). Estas características tornam o uso de imagens de alta resolução espacial imprescindível para análises intraurbanas, segundo (FUCKNER, ROSEMBACK e ROSA, 2005), embora o curto período de tempo abrangido por essa tecnologia resulta num fator negativo na hora de analisar intervalos mais longos.

Por outro lado deve ser considerado também, que na medida em que a resolução espacial aumenta (com a diminuição do tamanho do pixel) aumenta também a quantidade de materiais diferentes que o sensor é capaz de diferenciar, indicando os valores de reflectância. Isto, em nossa opinião, resulta num fator de incremento da complexidade na hora de tentar identificar e classificar os diferentes usos da cobertura da terra, peculiaridade ainda mais acentuada em território urbanizado.

Em estudos urbanos realizados com sensores de alta resolução é possível empregar métodos de classificação precedidos por um processo de segmentação. Por exemplo, Matsuoka e Haertel (2007), levaram a cabo uma investigação das principais características desta metodologia utilizando imagens de alta resolução espacial provenientes do satélite Ikonos. A novidade foi utilizar uma combinação de diversas resoluções espaciais (1 e 4 m) e espectrais (3 bandas multiespectrais e 1 pancromática) combinadas ao critério de ponderação de formas e cores estabelecido pelo software *eCognition*. Também empregando *eCognition* e imagens de alta resolução espacial, mas neste caso obtidas a partir de uma plataforma aerotransportada, (RESENDE, 2010) utilizou a alta resolução espectral para o monitoramento das condições de uso de pavimentos rodoviários.

Devido à importância das áreas urbanas para a população mundial, diversas pesquisas têm sido realizadas para mapear a sua composição. Estas áreas são geralmente analisadas com imagens de alta resolução espacial (HEROLD, GOLDSTEIN e CLARKE, 2003), (SMALL, 2003). Segundo (NUNES e JÚNIOR, 2007) os altos custos dessas imagens inibem o acompanhamento constante das mudanças de composição e estrutura dos centros urbanos. Sucede que os instrumentos de análise utilizados, notadamente software, como é o caso do *eCognition*, mencionado acima, também apresentam elevados custos de aquisição. Alternativamente, imagens de resolução espacial moderada (pixel de 15 a 30 m), como as do satélite Landsat, têm sido usadas para estimar a composição e abundância de materiais e monitorar áreas urbanas (WU, 2004), (SMALL e LU, 2006). Técnicas como o Modelo de Mistura Espectral (MME), foram empregadas para esse propósito segundo Adams *et al.* (1993).

Uma das primeiras referências à utilização dos modelos de mistura em Sensoriamento Remoto remonta a uma época em que nem sequer existiam os sensores satelitais de alta resolução espacial. Em seu trabalho (ADAMS, SABOL, *et al.*, 1995) indicam a metodologia como auxílio na classificação de imagens multiespectrais para detectar mudanças na cobertura da terra na Amazônia.

Por recomendação do Prof. Dr. Christopher Small (CIESIN) e também pela análise da literatura especializada decidiu-se considerar a utilização da técnica do modelo de mistura espectral no estúdio das imagens escolhidas para esta pesquisa. Mais do que sua utilização direta na avaliação da qualidade das imagens, o Modelo de Mistura Espectral foi usado neste trabalho como meio principal de detecção de mudanças, (JENSEN, 1996) notadamente para subsidiar a comparação e identificação visual (KAWAKUBO, 2010, p. 69), embora também houvesse suporte estatístico nas análises realizadas, viabilizado pela aplicação de máscaras para concentrar as pesquisas em áreas específicas altamente urbanizadas, como a Região Metropolitana e o Município de São Paulo. Ainda, utilizaram-se técnicas de classificação por Árvore de Decisão e a filtragem de Modas por Maiores/Menores.

#### 4.1) MODELOS DE MISTURA ESPECTRAL

O Modelo de Mistura Espectral (MME) consiste numa técnica de redução da dimensionalidade dos dados que estima as proporções dos diferentes tipos de materiais (denominados de componentes) em cada pixel<sup>14</sup> da imagem.

O conceito de mistura espectral está diretamente relacionado ao Campo Instantâneo de Visada do sensor (*IFOV – Instantaneous Field of View*), que registra em cada unidade espacial da imagem (pixel) a média integrada de radiância de todos os materiais (denominados de componentes) dispostos na superfície (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Quando dois ou mais componentes são registrados num mesmo pixel, o resultado é a mistura destes componentes mais os efeitos atmosféricos e de degradação da imagem produzida pelo sensor.

A mistura que se produz no “interior” do pixel é uma característica que depende da escala e por tanto está diretamente relacionada com a resolução espacial do sensor. De uma maneira geral, quanto mais grosseira a resolução espacial do sistema-sensor, maior a probabilidade de se encontrarem misturas (por causa da heterogeneidade da paisagem) e menor a chance de se encontrarem “pixels puros” (KAWAKUBO, 2010).

Talvez a principal vantagem na utilização da análise de mistura espectral seja a possibilidade de proporcionar uma maior facilidade na interpretação das imagens. Isto porque interpretar uma imagem em termos de proporções ou frações aproximadas dos diferentes materiais presentes em cada pixel é bem mais fácil de ser feito do que considerar separadamente os valores expressos em radiância, reflectância ou emitância dos materiais (ADAMS e GILLESPIE, 2006). Assim, no conceito do Modelo de Mistura Espectral, uma imagem representando a fração solo, por exemplo, é analisada em relação a sua proporção dentro do pixel, que pode variar de zero (0) - área totalmente coberta por vegetação - a 100% - área de solo exposto totalmente desprovido de cobertura vegetal.

---

<sup>14</sup> **Pixel.** Refere-se à aglutinação de *Picture* e *Element*, ou seja, elemento de imagem, sendo *Pix* a abreviatura em inglês para *Picture* é o menor elemento num dispositivo de exibição (como por exemplo, um monitor), ao qual é possível atribuir-se uma cor. No contexto do Sensoriamento Remoto, um pixel é o menor componente que configura uma imagem digital, sendo que o conjunto de milhares ou milhões de pixels forma a imagem inteira.

A mistura espectral ocorre de duas formas: de modo linear e não linear. A mistura linear é mais frequentemente empregada na literatura e considera a mistura como uma combinação linear dos diferentes componentes presentes no pixel ponderados pelas suas respectivas proporções. A mistura não linear é mais complexa de ser representada que o modelo linear porque neste tipo de mistura a radiância interage com mais de um material podendo resultar em múltiplas e complexas interações.

De acordo com (ADAMS e GILLESPIE, 2006), a mistura não linear é mais atuante nas bandas com forte absorção da radiação e quando os materiais que possuem forte absorção são combinados com materiais translúcidos. A interação da radiação eletromagnética com a vegetação verde, por exemplo, tem potencial de ser não linear por causa da acentuada curva de absorção observada nos comprimentos de onda do vermelho e a elevada reflexão e transmissão da energia no infravermelho próximo. Adicionalmente, (ROBERTS, SMITH e ADAMS, 1993) e (ROBERTS, GARDNER, *et al.*, 1998), utilizando imagens do AVIRIS mostraram que os erros na modelagem de mistura são maiores nos intervalos de transição do vermelho para o infravermelho próximo.

Geralmente a mistura linear é considerada dominante e a mistura não linear um efeito de segunda ordem. No Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) o sinal registrado no pixel é matematicamente descrito pela seguinte fórmula:

$$R = R_a F_a + R_b F_b + \dots R_n F_n + r \quad (1)$$

Sendo que: R é o valor do pixel mistura;  $R_a$ ,  $R_b$  e  $R_n$  as respostas espectrais dos componentes;  $F_a$ ,  $F_b$  e  $F_n$  são as frações dos componentes; r é o resíduo que inclui a adequação dos componentes considerados, o erro da modelagem e também os efeitos atmosféricos, do ângulo de radiação solar e de degradação do sensor.

Conforme observado em (1), considerando que as respostas espectrais dos componentes analisados são conhecidas, é possível a partir de um conjunto de imagens multiespectrais ou hiperespectrais, e estimar as proporções de mistura no pixel resolvendo um sistema de equações simultâneas. Da mesma forma que é possível estimar as proporções de mistura em cada pixel da imagem quando as respostas espectrais dos componentes são conhecidas, também é possível inverter o modelo e estimar as respostas espectrais dos componentes quando as suas proporções são conhecidas, isto é importante para determinar a qualidade das

imagens a serem utilizadas num processo de classificação supervisionada, por exemplo.

Na análise de mistura, as respostas espectrais dos componentes ( $R_a, R_b, \dots, R_n$ ) também são conhecidas como "*endmembers*". Quando as respostas espectrais são extraídas diretamente da imagem, o termo "*image-endmember*" é empregado. Os espectros de referência adquiridos em laboratório ou em campo são conhecidos como "*reference-endmembers*". A Figura 3 ilustra o MLME.

A seleção de *endmembers* é uma etapa crucial na modelagem de mistura. Teoricamente, quando se conhece exatamente os espectros dos materiais presentes na paisagem, os valores das imagens-frações geradas pelo modelo de mistura distribuem-se em intervalos de 0 até 1 e a soma das frações é igual a um (1). O problema é que na realidade é difícil conhecer exatamente quais são os materiais presentes na paisagem e o número exato de componentes que contribuem com a mistura do pixel. Como é praticamente impossível considerar todos os espectros presentes na paisagem, tentam-se selecionar na análise de mistura apenas amostras dos espectros com maior representatividade.

Experiências descritas na literatura (ADAMS e GILLESPIE, 2006) recomendam a utilização de um número reduzido de *endmembers* (três ou quatro) como forma de reduzir os erros na estimativa da modelagem e os problemas de sobreposição de classes resultantes da limitação na separabilidade espectral (baixo contraste espectral).

A sobreposição acontece quando diferentes componentes possuem comportamentos espectrais iguais ou similares. Para que o modelo gere imagens com diferentes proporções de mistura, é preciso que os componentes extraídos tenham assinaturas espectrais que os diferenciem no mínimo em uma parte do espectro medido (SABOL, ROBERTS, *et al.*, 1992), (FERREIRA e HUETE, 2004).

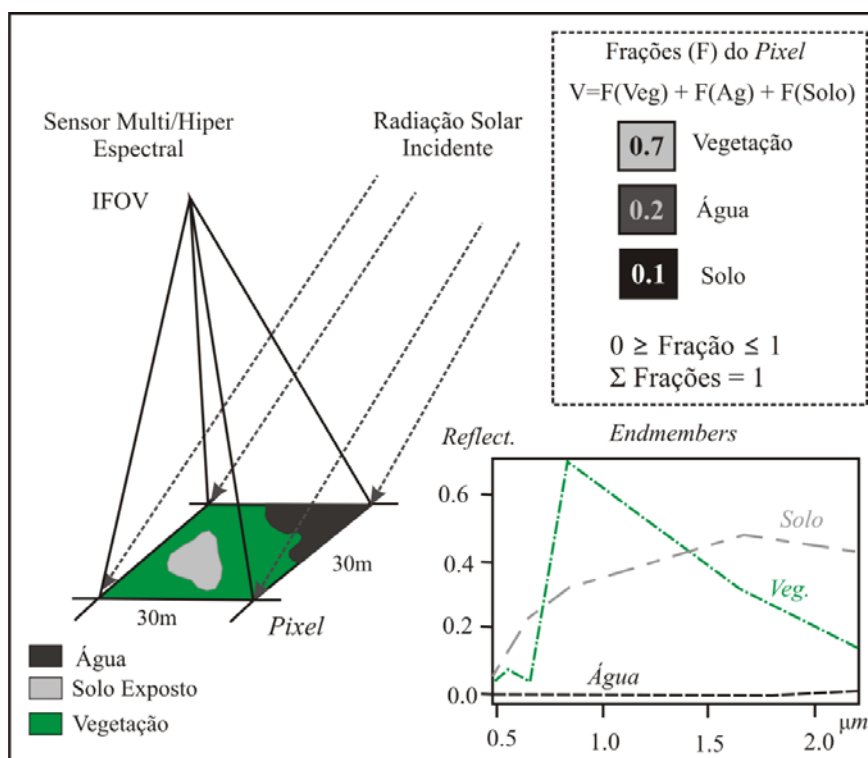


Figura 3. Decomposição perfeita de um Modelo Linear de Mistura Espectral num pixel de 30m englobando uma mistura com três componentes: vegetação, água e solo. Neste caso, o resíduo é zero. Fonte (KAWAKUBO, 2010, p. 27).

Alguns trabalhos como os de Aguiar *et al.* (1999), Rogan *et al.* (2002) e Shimabukuro *et al.* (1998) têm ressaltado o potencial das imagens geradas pelo MLME como um método alternativo e eficiente de redução da dimensionalidade de dados e de contraste espectral. Cabe ressaltar que estes trabalhos referem-se aos ambientes de floresta ou culturas, raramente a espaços urbanos. Para aplicação do MMLE aos espaços urbanos ver o item 8.2 adiante.

Aguiar *et al.* (1999) compararam o MLME com a Análise por Componentes Principais (ACP), Análise Canônica (AC) e a seleção de bandas pela distância Jeffries-Matusita (JM) para mapear uma área de reflorestamento de eucalipto. Imagens-frações representando as proporções de vegetação, solo e sombra foram gerados a partir das imagens do Landsat TM, e submetidos a uma rotina de classificação. Os resultados adquiridos foram comparados com outras classificações feitas com a ACP, AC e com as bandas TM-3, TM-4 e TM-5 selecionadas pela distância JM. Os resultados mostraram que o modelo de mistura é um método alternativo de redução da dimensionalidade de dados com desempenho comparável com a ACP e AC.

Além disto, possui a vantagem de fornecer informações adicionais a respeito das composições fracionais de cada classe dentro do pixel.

Rogan *et al.* (2002) também compararam o MLME com a transformação KT de Kauth e Thomas (1976) para monitorar as transformações da cobertura vegetal. Quatro imagens representando as frações de vegetação verde, vegetação não fotossintética (do inglês *Nonphotosynthetic Vegetation - NPV*), solo e sombra foram geradas e comparadas com as componentes brilho (*Brightness*), vigor da vegetação (*Greenness*) e umidade (*Wetness*) da transformação KT. A análise das transformações da cobertura do terreno foi feita com imagens Landsat TM de 1990 e 1996. As classificações geradas a partir das imagens-frações e KT mostraram resultados com exatidões similares; todavia, os autores (*op. cit.*) ressaltaram a vantagem das imagens-frações como sendo um método mais interativo que o KT. Enquanto que as imagens-frações são geradas a partir de um conjunto de *endmembers* selecionados pelo analista, a transformação KT se baseia em coeficientes fixos pré-estabelecidos em laboratório para a transformação das imagens.

Uma das técnicas de redução da dimensionalidade dos dados mais utilizada para a caracterização da cobertura vegetal consiste no *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. O NDVI é extensivamente utilizado pelo fato de fornecer informações importantes que são bem correlacionados com parâmetros biofísicos, como a biomassa e o Índice de Área Foliar. Neste sentido, Shimabukuro *et al.* (1998) compararam as imagens-frações de vegetação, solo e sombra derivadas do MLME com o NDVI para avaliar as mudanças na cobertura vegetal. Imagens Landsat TM adquiridas em dois períodos, chuvosos e secos, foram analisadas. Os resultados mostraram o MLME possui vantagens em relação ao NDVI. A fração vegetação além de ser bem correlacionada com o NDVI, mostrou-se mais sensível as variações na resposta da cobertura vegetal. Além disto, as outras imagens – representando as proporções de solo e sombra, forneceram informações complementares a respeito das mudanças ocorridas durante o intervalo de aquisição das imagens.

Por causa do enorme potencial que as imagens-frações oferecem a análise de mistura tem sido frequentemente empregadas em diversas aplicações e utilizando diferentes sistemas-sensores. Por exemplo, o modelo de mistura tem sido aplicado, nos Estados Unidos, para mapear comunidades de vegetação (SABOL, ROBERTS,

*et al.*, 1992) e separar classes de vegetação verde e seca com diferentes tipos de solo (ROBERTS, SMITH e ADAMS, 1993). No cerrado brasileiro, o modelo de mistura tem sido empregado com sucesso para mapear os diferentes tipos de uso da terra e cobertura vegetal (HOLBEN e SHIMABUKURO, 1993); (CARREIRAS, SHIMABUKURO e PEREIRA, 2002); (KAWAKUBO, MORATO, *et al.*, 2009). Na floresta Amazônica, o modelo de mistura tem se mostrado extremamente eficaz para realçar o uso da terra (ADAMS, SABOL, *et al.*, 1995); (LU, MAUSEL, *et al.*, 2004), as áreas afetadas pelo desmatamento (SHIMABUKURO *et al.*, (2009); ANDERSON *et al.* (2005), a degradação florestal resultante do corte seletivo de madeira (SOUZA JR., FIRESTONE, *et al.*, 2003) e a incidência de queimadas (COCHRANE e SOUZA JR., 1998); (SHIMABUKURO, DUARTE, *et al.*, 2009).

Utilizando dados do Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), Sabol *et al.* (1993) avaliaram as mudanças do ciclo sazonal da vegetação na região de Jasper Ridge, Califórnia, por meio da análise de mistura espectral. Imagens-frações representando a quantidade de vegetação verde, solo, NPV e sombra foram relacionadas com diferentes estágios de evoluções da vegetação. A fração sombra forneceu informação importante a respeito da arquitetura do dossel. Em áreas de floresta decíduas, o aumento da fração NPV nos períodos de junho a outubro foi relacionado à queda das folhas das árvores que resultou numa maior exposição de troncos e galhos. O aumento do NPV foi acompanhado muitas vezes da diminuição da fração solo. A explicação desta diminuição deve-se ao recobrimento do solo pela serrapilheira<sup>15</sup>, responsável pelo aumento da fração NPV e diminuição da fração solo. O trabalho mostrou ainda que o entendimento das mudanças espectrais de comunidades de vegetação ao longo das estações é importante porque permite identificar comunidades de vegetação com assinaturas espectrais similares através dos ciclos de crescimento.

Nas proximidades de Palo Alto, Califórnia, Roberts *et al.* (1993) discriminaram diferentes classes de vegetação verde, NPV e solo utilizando dados do AVIRIS. As imagens foram modeladas, inicialmente, como uma mistura linear de três componentes: vegetação, solo e sombra que responderam por mais de 98% da

---

<sup>15</sup> **Serrapilheira** é uma cobertura que se forma na superfície do solo, sendo composta por restos de vegetação, como folhas, arbustos, caules e cascas de frutos em diferentes estágios de decomposição; podem fazer parte dela também restos de animais e suas fezes. Esta camada é a principal fonte de nutrientes para ciclagem em ecossistemas florestais, enriquecendo o solo e sustentando a vegetação.



variabilidade espectral. Classes de NPV (como troncos caídos, grama e folhas secas) foram discriminadas dos diferentes tipos de solos por meio da análise do resíduo gerado pelo modelo de mistura. A separação entre classes de NPV e solos foi relacionada à presença de feições de absorção de lignina (2,130  $\mu\text{m}$  e 2,270  $\mu\text{m}$ ) e celulose (2,090  $\mu\text{m}$  e 2,270  $\mu\text{m}$ ) presentes na vegetação seca.

Na região do cerrado brasileiro, Holben e Shimabukuro (1993) mapearam o uso do solo e a cobertura vegetal utilizando dados do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo do satélite *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Utilizando os três primeiros canais do AVHRR, que cobrem os intervalos de 0,58-0,68 $\mu\text{m}$ , 0,725-1,1 $\mu\text{m}$  e 3,55-3,93 $\mu\text{m}$ , imagens-frações de vegetação, solo e sombra foram geradas. Estas imagens foram comparadas com NDVI e com as imagens-frações geradas do TM. Os resultados mostraram novamente a boa correlação da fração vegetação com o NDVI e a importância da fração solo no estudo do desmatamento na escala do pixel de 1,1 Km.

As proporções de mistura dentro do pixel para diferentes classes fisionômicas do cerrado também foram caracterizadas por Kawakubo et al. (2009), ao mapear o uso do solo nos arredores da Terra Indígena São Marcos, localizada a leste do Estado do Mato Grosso. Três imagens-frações representando as proporções de vegetação, solo e sombra foram gerados a partir do Landsat ETM+. A fração vegetação mostrou-se eficiente para separar diferentes classes de capoeira (em condições de regeneração e declínio). A fração solo realçou as diferenças entre as classes de capoeira densa (baixa quantidade de solo), cerrado (média quantidade) e pastagem (alta quantidade). A fração sombra mostrou excelente contraste entre o cerradão (média quantidade de sombra), cerrado (média a baixa quantidade de sombra) e capoeira (baixa quantidade).

Numa área marcada por um mosaico de florestas primárias, solo exposto, pastagens e capoeiras em diferentes estágios de regeneração, Adams et al. (1995) avaliaram as mudanças na cobertura da terra em duas fazendas no norte de Manaus (fazendas Dimona e Esteio) utilizando imagens Landsat TM de 1988 e 1989. Inicialmente, as imagens foram calibradas como forma de compensar as variações relacionadas à iluminação, ao efeito de dispersão atmosférico e à resposta do sensor. A partir de um MLME foram geradas quatro imagens-frações representando as proporções de vegetação verde, NPV, solo e sombra. Este trabalho foi

extremamente importante porque foi um dos primeiros a demonstrar que as florestas primárias e os diferentes tipos de vegetação e uso da terra podem ser descritos de acordo com as variações nas proporções de mistura. Demonstrou também que as transformações na cobertura da terra podem ser monitoradas por meio das variações de mistura.

No Estado de Rondônia, Lu *et al.* (2004) mapearam classes variadas de uso da terra e cobertura vegetal utilizando dados do Landsat TM. Fazendo uso do MLME, três imagens-frações representando a quantidade de solo, vegetação e sombra foram geradas e classificadas por meio de um classificador hierárquico não paramétrico. O trabalho mostrou que o modelo de mistura é uma técnica eficiente para o mapeamento do uso da terra e cobertura vegetal na medida em que as imagens-frações, quando comparadas com as imagens brutas, aumentam a separabilidade entre as classes. Os autores (*op. cit.*) também discutem as dificuldades encontradas na separação de classes de vegetação secundária em estágio inicial da avançada utilizando dados do TM.

Shimabukuro *et al.* (2009) utilizaram imagens-frações sombra derivadas de um MLME para avaliar o avanço do desmatamento em Rondônia. Fazendo uso de composições coloridas multitemporais construídas a partir das imagens-fração sombra, os resultados mostraram claramente as diferenças entre áreas com florestas e áreas desmatadas. Os autores (*op. cit.*) sugerem a classificação destas composições como uma forma alternativa para a construção de uma base digital de desmatamento.

Diferentemente do desmatamento de corte raso, em que toda a floresta é retirada, a degradação florestal causada pela extração de madeira não é tão fácil de ser observada com as imagens de resolução comparáveis com as do Landsat TM e ETM+ (30m). No município de Paragominas no leste do Pará, Souza Jr. *et al.* (2003) apresentaram uma metodologia para mapear diferentes estágios de degradação florestal causada pela exploração de madeira. Dados de classes de floresta degradada obtidos em campo foram relacionados com as imagens-frações vegetação, NPV solo e sombra derivada das imagens multiespectrais do instrumento *High Resolution Visible and Infrared (HRVIR)* a bordo do satélite SPOT-4. Os resultados mostraram que especialmente a fração NPV mostrou-se sensível aos estágios de degradação florestal e as áreas de corte seletivo. A abertura de clareiras

na floresta e a maior exposição de galhos e troncos em áreas de floresta degradada foram os principais fatores responsáveis pelo aumento na quantidade de NPV na imagem.

Dentro de um contexto regional, as áreas atingidas pelas intensas queimadas observadas no Estado do Acre foram mapeadas por Shimabukuro *et al.* (2009) utilizando imagens multitemporais do MODIS diário (MOD09) para os meses de setembro a outubro de 2005. Selecionando as bandas centralizadas em 0,640  $\mu\text{m}$ , 0,858  $\mu\text{m}$  e 1,640  $\mu\text{m}$  (equivalente às bandas 3, 4 e 5 do Landsat TM) imagens-frações representando a quantidade de sombra (que possuem características espectrais similares às cinzas e carvão), vegetação, e solo, foram estimadas para cada pixel da imagem. As áreas atingidas pelas queimadas foram acompanhadas pelo aumento da fração sombra em áreas de pastagem e floresta. Estimativas feitas por meio de classificação indicaram que 6.500  $\text{Km}^2$  de terras foram atingidas pelas queimadas, sendo que 3.700  $\text{Km}^2$  corresponderam a áreas previamente desmatadas e 2.800  $\text{Km}^2$  a áreas cobertas por florestas.

#### **4.2) MODELOS DE MISTURA ESPECTRAL E SUA APLICAÇÃO EM ÁREAS URBANAS.**

Os diferentes exemplos descritos nos itens 4 e 4.1 acima mostram a relevância da análise de mistura espectral como uma avançada técnica que permite reduzir a dimensionalidade dos dados e realçar alvos de interesse na imagem. Como foi indicado, seguindo esta metodologia consegue-se reduzir, ou melhor, sintetizar a informação contida em seis (6) bandas espectrais do Landsat TM e ETM+, por exemplo, em três (3) ou quatro (4) canais que mostram a proporção específica de cada fração no conjunto de pixels da coleção de bandas que formam uma cena. Além disto, esta técnica de processamento fornece significado físico à imagem, o que facilita, portanto, a sua interpretação. Porém, o MME e em especial o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) não constitui, por si só, um método de classificação. Ele deve ser considerado um dos métodos de realce de contrastes que facilita a visualização, e conseqüentemente, a interpretação das imagens. Mas, sobretudo, sua principal característica é a redução efetiva da massa de dados, amplificando aqueles valores que mais interessam ao estudo em questão.

A utilização dos Modelos de Mistura Espectral em estudos relacionados ao ambiente urbano não é muito frequente, nem no Brasil nem no mundo. Cabe ressaltar que,

mesmo assim, o emprego destas técnicas é geralmente associado às imagens de alta resolução espacial e, na maioria das vezes, aplicado como um método de pós-classificação para verificar a separabilidade entre classes. Ainda, outra particularidade refere-se ao fato de que este método é utilizado, com maior frequência, em territórios rurais para realizar estudos sobre especificidades de usos do solo e cobertura vegetal.

Um dos mais destacados especialistas mundiais na utilização dos modelos de mistura espectral aplicados a áreas urbanas é o Prof. Dr. Christopher Small. Seus trabalhos constituem importante referência, tanto desde o ponto de vista teórico/conceitual como empírico, aplicando esta técnica em imagens de alta resolução assim como também nas de moderada resolução espacial. No primeiro grupo, deve-se citar o estudo publicado no volume 88 de *Remote Sensing of Environment* (SMALL, 2003, p. 170-186). No segundo, destaca-se sua pesquisa de análise sobre as particularidades da reflectância dos alvos urbanos, com abrangência global (SMALL, 2005) e também no que se refere à abundância e distribuição da vegetação urbana (SMALL e LU, 2006).

O Dr. Small também é um defensor do emprego do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) especificamente nas imagens provenientes do sensor Landsat ETM+, ou seja, com resolução espacial considerada moderada. O principal argumento em favor desta metodologia refere-se ao fato de que enquanto outros modelos de mistura (não lineares) só funcionam com calibrações específicas ao local de sua aplicação, o MLME pode oferecer nas imagens obtidas pelos sensores TM e ETM+, as bases físicas para uma representação mais geral da reflectância da superfície terrestre, reduzindo a complexidade dos dados da imagem a frações genéricas, que conseqüentemente, seriam utilizáveis em diferentes locais do mundo (SMALL, 2004, p. 5) e também em (A Global analysis of urban reflectance, 2005), do mesmo autor, onde essa hipótese foi demonstrada.

No Brasil, e concretamente no Município de São Paulo, o MLME foi empregado em imagens de moderada resolução espacial para estudar a evolução de áreas verdes e urbanas (RODRÍGUEZ e MARTINS, 2009).

Dentro do contexto geral do uso dos modelos de mistura para estudar o entorno urbano este recurso foi utilizado para analisar e elaborar um mapa de conforto urbano para a cidade de Belo Horizonte (CARNEIRO, 2009). A autora fez uso de

imagens de alta resolução espacial do sensor ASTER do satélite IKONOS, explorando a sensibilidade das bandas infravermelhas deste sensor: VNIR (Infravermelho muito próximo), SWIR (infravermelho de onda curta) e TIR (infravermelho termal). O Modelo de Mistura Espectral de Múltiplos Componentes (MESMA) foi empregado para extrair frações da superfície, baseado no modelo V-I-S - *Vegetation, Impervious Surface and Soil*, ou seja, Vegetação, Superfície Impermeável e Solo.

Na mesma modalidade, e também aplicando o Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Membros Finais (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis - MESMA*), (NUNES e JÚNIOR, 2007) utilizam imagens com diferentes resoluções espaciais para avaliar a efetividade da aplicação de modelos de mistura simples, comparando-os com os de múltiplos membros finais (MESMA) na identificação de áreas urbanas. Os autores concluem que no caso das imagens multiespectrais provenientes do sensor Landsat a análise por meio do modelo simples de mistura espectral tem desempenho tão bom quanto o alcançado pelo MESMA, e o primeiro tem ainda a vantagem de empregar só uma combinação de componentes frações para modelar todos os pixels da imagem. Segundo Nunes e Júnior (op. cit.), isto é importante para a realização de estudos multitemporais em ambientes urbanos visto que, ao utilizar apenas um conjunto de frações (*endmembers*) a comparação espacial e temporal dos pixels é de esta forma facilitada.

De qualquer maneira, uma discussão mais detalhada sobre o uso da análise utilizando Modelos Lineares de Mistura Espectral, assim como os fundamentos teóricos mais detalhados e validação desta tecnologia foram publicados por Adams e Gillespie (2006), para sua utilização específica em áreas urbanas foi dado por Kressler e Steinnocher (1996), Small (2001; 2003; 2005) e Small e Lu (2006).

#### **4.3) MODELOS DE MISTURA ESPECTRAL E A DETECÇÃO DE MUDANÇAS.**

Conforme mencionado nos itens anteriores (4.1 e 4.2), o Modelo de Mistura Espectral consiste basicamente numa técnica de redução da dimensionalidade dos dados que estima as proporções dos diferentes tipos de materiais (denominados de componentes) em cada pixel da imagem. Isto se consegue fazendo com que um complexo algoritmo matemático realize a separação das reflectâncias dos diferentes

materiais (que aparecem expressados nas seis bandas espectrais utilizadas), completando um processo de inversão das misturas (chamado *unmix* em Inglês). De fato, há uma redução da dimensionalidade já que o produto da aplicação do modelo é sempre um número de canais menor que o número de bandas analisadas.

A mistura espectral do pixel é uma característica que depende da escala e por tanto está diretamente relacionada com a resolução espacial do sensor. É sabido que, de uma maneira geral, quanto mais baixa a resolução espacial do sensor, maior a probabilidade de encontrar misturas nos materiais que estão na superfície terrestre. Quiçá, uma solução lógica para evitar essa situação, seria aumentar a resolução espacial com sua conseqüente redução nas dimensões dos pixels das imagens utilizadas. Tais imagens são chamadas de alta resolução quando o tamanho do pixel for menor do que 5 m ( $25 \text{ m}^2$  em superfície). O problema está em que o tecido urbano é ainda muito complexo na medida em que "nos aproximamos", aumentando a resolução espacial, então isto faz com que apareçam novas "complexidades" formadas por combinações de materiais. Se considerarmos que ao aumentar a resolução espacial estamos implicitamente produzindo um incremento na capacidade do sensor em "enxergar" superfícies e objetos mais complexos, as probabilidades de achar pixels puros (ocupados por um único material) no lugar de aumentar diminuem, quando o que predomina na superfície retratada é o substrato urbano.

Nas circunstâncias desta pesquisa, esta aparente contradição resultou ser um fator positivo. Ela acrescenta, em nossa opinião, mais um argumento a favor de se utilizarem sensores que produzam imagens de mediana resolução espacial em estudos urbanos. Considerando, claras estão, as limitações que existem ao trabalhar com escalas mais reduzidas, caso isto impeça de alcançar algum dos objetivos almejados.

De qualquer maneira, a aplicação da técnica do MLME tem como vantagem aparente a possibilidade de aumentar a capacidade de interpretação da superfície apresentada na imagem, e conseqüentemente, de encontrar quais mudanças têm acontecido num determinado período de tempo. É sabido que interpretar uma imagem em termos de proporções ou frações aproximadas dos diferentes materiais que compõem cada pixel é mais simples de se fazer do que considerar valores separados de radiância, reflectância e emitância dos materiais presentes

individualmente analisados. (ADAMS e GILLESPIE, 2006). Desta forma, a força do método de Análise de Mistura Espectral se sustenta no fato de explicitamente tomar em consideração os processos físicos responsáveis pelos valores de reflectância observados e, desta forma, acomodar a existência dos pixels misturados, ou seja, "não puros", presentes nas diferentes bandas espectrais que foram registradas pelos satélites (PÉREZ MACHADO e SMALL, 2011).

No Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) o sinal registrado no pixel é matematicamente descrito pela fórmula (na página 38), onde se somam as respostas espectrais dos componentes, multiplicando suas frações (proporção dentro do pixel expressada em percentual) mais um resíduo ( $r$ ). Este resíduo inclui a adequação dos componentes considerados, o erro da modelagem e também os efeitos atmosféricos, do ângulo de radiação solar e de degradação do sensor.

Na análise de mistura, as respostas espectrais dos componentes ( $R_a, R_b, \dots, R_n$  na mencionada fórmula) também são conhecidas como "*endmembers*".

A seleção de *endmembers* é uma etapa crítica na modelagem de mistura. Teoricamente, quando se conhecem exatamente os espectros dos materiais presentes na paisagem, os valores das imagens-frações geradas pelo modelo de mistura distribuem-se em intervalos de 0-1 e a soma das frações é igual a um (1). O problema ocorre porque na realidade é difícil conhecer exatamente quais são os materiais presentes na paisagem e o número exato de componentes (e suas proporções) que contribuem à mistura do pixel. Como é praticamente impossível considerar todos os espectros presentes na paisagem, tentam-se selecionar na análise de mistura apenas amostras dos espectros com maior representatividade.

#### **4.4) CLASSIFICADOR POR ÁRVORE DE DECISÃO (*DECISION TREE CLASSIFIER*).**

O classificador por árvore de decisão é uma técnica de análise espacial do modelo de dados matricial que executa classificações mediante um processamento em etapas sucessivas usando uma série de decisões binárias<sup>16</sup> para alocação de pixels. A decisão separa pixels, pertencentes a um conjunto de imagens, dentro de duas classes baseadas numa determinada expressão. É possível subdividir cada nova classe em mais duas classes, ou seja, podem-se definir tantos nodos de decisão

---

<sup>16</sup> Resposta dicotômica simples (0 ou 1), traduzida como do tipo "sim/não" ou "verdadeiro/falso".

(que resultam em classes) quanto forem necessárias para gerar a classificação final. Uma vantagem deste procedimento é a possibilidade de unir dados provenientes de diferentes origens para produzir uma única decisão do classificador, ainda, o classificador permite criar, editar e executar árvores de decisão de forma interativa.

Os dados de entrada podem provir de diferentes fontes e tipos, inclusive uma mistura de dados quantitativos e qualitativos. Por exemplo, é possível utilizar dados multiespectrais em conjunção com um modelo digital de elevação, para encontrar pixels com uma classe específica de vegetação e altas declividades. Também, podem-se utilizar imagens ou mapas georreferenciados que estão em diferentes projeções cartográficas ou até mesmo com diferentes resoluções espaciais na mesma árvore de decisão. Igualmente, é permitido empregar variáveis especiais típicas das aplicações de sensoriamento remoto como NDVI, o sistema faz o cálculo na hora e utiliza o resultado nas expressões de decisão.

Uma das vantagens no emprego do classificador por árvore de decisão é que sua estrutura lógica pode ser muito simples, para produzir apenas algumas poucas categorias como resultado de sua aplicação, o que o torna perfeito para ser utilizado com uma imagem produto de um Modelo Linear de Mistura Espectral. Caso seja necessário, essa mesma estrutura lógica poder se tornar complexa, na hora de executar os passos ou nós onde se tomam as decisões, criando “ramas” ou “filhos” sempre baseados nas sucessivas respostas dicotômicas. Abstratamente, uma busca dicotômica pode ser vista como extremidades seguintes de uma estrutura de árvore binária até alcançar a folha (um objetivo ou estado final). Isso cria um problema teórico entre o número de estados possíveis e o tempo: dando  $k$  comparações, o algoritmo pode alcançar apenas  $O(2^k)$  possibilidades e/ou objetivos possíveis<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Segundo a definição de Busca dicotômica na Wikipédia, a enciclopédia livre [consultada em 17/03/2011].



## 5) MATERIAIS, MÉTODOS E ANÁLISE.

### 5.1) DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O objetivo principal de estudo, embora focalizado no ambiente urbanizado, iria considerar todo tipo de mudanças, em especial aquelas em que houve transformação de superfícies cobertas de vegetação para solo urbano. Por esse motivo, procurou-se definir uma área de estudos suficientemente extensa para conter não apenas o limite do Município de São Paulo, e sim toda a mancha da aglomeração urbana de São Paulo, cujos limites oficiais foram definidos na conformação da Região Metropolitana.

Esta região, formada por um conjunto de municípios, não existia legalmente constituída até muito recentemente, quando a Lei Complementar Estadual Nº 1.139 de 16 de junho de 2011 (ESTADO DE SÃO PAULO, 2011), lhe instituiu finalmente esse status, e oficialmente “*Reorganiza a Região Metropolitana da Grande São Paulo, cria o respectivo Conselho de Desenvolvimento e dá providências correlatas*” (p. 1). Interessante destacar que a designação utilizada desde 1974, que era Região Metropolitana da Grande São Paulo, passou a ser alterada para Região Metropolitana de São Paulo – RMSP com os 39 municípios que hoje a integram a partir dessa data.

Utilizando como referência o limite oficial da Região Metropolitana de São Paulo (segundo os contornos dos municípios que a formam), foi adicionada uma folga de 5 km nos extremos ocidental e oriental, e da mesma forma, foi considerando outro espaço, de 15 km, nos extremos septentrional e meridional. Desta maneira foi calculado um retângulo (de 165 x 128 km) que envolve o limite do conglomerado urbano de São Paulo incluindo uma franja que o bordeja. O resultado exhibe claramente o contínuo urbano da Região Metropolitana de São Paulo ao centro (ver Figura 12).

Fica evidente que, para poder organizar um estudo comparativo como o aqui apresentado, é imprescindível que a superfície analisada seja perfeitamente coincidente. Isto só pode ser alcançado porque todas as cenas dos três (3) satélites utilizados (Landsat 4, 5 e 7) têm órbita e superfície de leitura equivalentes, além de outras importantes características técnicas em comum, tais como: resolução, espacial, espectral e radiométrica idênticas em todas as imagens utilizadas.

Na fase inicial de seleção das imagens utilizou-se o critério de incluir todas as cenas que contivessem a mancha urbanizada característica da Metrópole Paulistana, já que a simples vista a urbe conurbada está totalmente contida em uma única cena ou arquivo digital, embora seu centro encontre-se localizado na parte Sul. Porém, logo se compreendeu que isto não era suficiente. A mancha urbanizada contínua de fato ocupa aproximadamente 1/3 da área do Município de São Paulo; contudo o limite municipal estende-se até superar o extremo sul das imagens inicialmente consideradas (ver item 10.3.3 **Triagem das imagens e a região de estudos**). Como argumento complementar, e decisivo, confirmou-se a presença de assentamentos precários na porção meridional do território acima mencionado.

## **5.2) MATERIAL UTILIZADO**

Para realizar o trabalho de pesquisa aqui apresentado, empregamos a versão 4.6 do software ENVI (marca registrada de *ITT Visual Information Solutions*). O sistema **ENVI - Environment for Visualizing Images** (Ambiente de visualização de imagens) é um conjunto de ferramentas para análise e processamento de imagens geoespaciais que permitem extrair informação dessas imagens com grande eficiência e rigor científico. Por esse motivo constitui uma boa opção de utilização para os mais variados campos do conhecimento, em especial no Sensoriamento Remoto e no Geoprocessamento. Suas principais opções incluem a possibilidade de leitura, exploração e análise das imagens tratadas.

Utilizamos um computador pessoal com sistema operacional Windows 7 Profissional (marca registrada de *Microsoft Corporation*) equipado com um processador Intel i7 (CPU 870) rodando em 2,93 GHz, 6 Gigabytes de memória RAM, disco rígido tipo SSD SATA de 128 Gigabytes para execução dos programas e disco rígido SATA de 1 Terabyte para armazenamento de dados e imagens.

A maior parte das imagens usadas na pesquisa foi adquirida no site do *USGS – United States Geological Survey* (Serviço Geológico dos Estados Unidos) com aproveitamento de todas as imagens utilizáveis do arquivo Landsat (sensores *Landsat Thematic Mapper 4, 5 e Enhanced Thematic Mapper Plus 7*), que desde o início de 2009 estão disponíveis na Internet para domínio público.

Embora a principal premissa adotada no trabalho de pesquisa refira-se à utilização de imagens de Sensoriamento Remoto de mediana resolução espacial, não se

dispensou totalmente o uso de imagens de alta resolução e outros documentos cartográficos como fotos aéreas e mapas.

### **5.3) METODOLOGIA DE TRABALHO**

A principal premissa adotada na pesquisa refere-se a não utilização de imagens de Sensoriamento Remoto de alta resolução espacial em séries diacrônicas. Em consequência, o alicerce do trabalho foi dirigido às imagens de mediana resolução.

Porém, como já foi mencionado antes, não se dispensou totalmente o uso de imagens de alta resolução e outros documentos cartográficos como fotos aéreas e mapas. Eles entraram, posteriormente, na caracterização das áreas e comprovação das mudanças identificadas em áreas conspícuas (destacadas) no território estudado. Dentro das fontes mais importantes para pesquisa de dados, contou-se com o acervo de imagens aerofotogramétricas e imagens satelitais do Arquivo de Fotografias Aéreas – AFA e também do Laboratório de Aerofotogeografia e Sensoriamento Remoto – LASERE, do Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo; dos cadastros e arquivos digitais, bases cartográficas e imagens satelitais e fotográficas do Sistema Habisp, da Superintendência de Habitação Popular, Secretaria Municipal de Habitação, da Prefeitura da Cidade de São Paulo (PMSP-SEHAB-HABI, 2008); aerofotografias e mapas do Departamento de Patrimônio Histórico da Prefeitura do Município de São Paulo; e imagens de satélite (de alta e mediana resolução espacial) provenientes do projeto CBERS, disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, assim como as imagens do navegador Google Earth.

A colaboração dos técnicos da Secretaria Municipal de Habitação, em especial aqueles vinculados com a gestão do Sistema Habisp, foi decisiva durante a elaboração da pesquisa. Junto a eles selecionamos seis locais bem conhecidos da listagem de assentamentos precários do Município de São Paulo. Na Tabela 7, apresentamos a listagem dessas seis áreas piloto, selecionadas pela sua relevância socioambiental e dimensões. Todas as seis localidades foram consideradas pontos de controle para testar a eficácia ou insucesso dos procedimentos de análise espacial utilizados.

**Tabela 7. Listagem das áreas piloto no Município de São Paulo, selecionadas pelo tamanho e relevância socioambiental.**

Fonte Habisp. Compilado pelo autor.

| LISTA DAS ÁREAS PILOTO SELECIONADAS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO |   |                       |            |
|---|---|-----------------------|------------|
| Nome  | Tipologia dominante                       | Distrito              | Região     |
| Vargem Grande   | Loteamento                                | Parelheiros           | Sul        |
| Cantinho do Céu   | Loteamento e Favela                       | Grajaú                | Sul        |
| Paraisópolis  | Favela                                    | Vila Andrade          | Centro-sul |
| Heliópolis  | Loteamento/Favela (sobreposição) e Núcleo | Sacomã/Ipiranga       | Sudeste    |
| Jardim Pantanal   | Loteamento/Favela (sobreposição) e Núcleo | Vila Jacuí/São Miguel | Leste      |
| Recanto dos Humildes  | Núcleo, Loteamento e Favela               | Perus                 | Noroeste   |

Como complemento importante da validação, o conhecimento do território foi reforçado por inúmeras visitas realizadas aos assentamentos precários na Cidade de São Paulo e outras regiões do Brasil. Esporadicamente, ao longo de mais de 15 anos, foram visitados também locais que mostraram diversos graus de precariedade habitacional em outros países, como Argentina, Chile, Espanha, México, Paraguai, Turquia, Uruguai e Venezuela.

O processo de aplicação da metodologia aqui utilizada envolveu, em termos gerais, as seguintes etapas:

- a. Seleção das imagens. Metodologia utilizada. Separação por qualidade visual.
- b. Calibração. As cenas foram calibradas e transformadas para valores de reflectância. Aplicação do algoritmo de calibração a todas as imagens utilizáveis.
- c. Identificação da área de estudos. Articulação em mosaico e recorte mediante ajuste geográfico com a Região Metropolitana de São Paulo. Criação do recorte padrão.
- d. Identificação das melhores imagens para serem comparadas.
- e. Articulação em mosaico e recorte mediante ajuste geográfico à imagem padrão (ver item c, acima), das oito (8) imagens selecionadas para compor as quatro (4) cenas escolhidas (ver item d).
- f. Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME. As quatro cenas mencionadas foram convertidas a frações Substrato, Vegetação e Sombra/Água

utilizando a técnica do MLME de forma a ressaltar o contraste entre essas categorias e evidenciar o tecido urbano.

- g. Elaboração das imagens por subtração. Produziram-se duas imagens subtração para poder identificar e medir as mudanças. Aplicação da operação algébrica: (imagem mais recente - imagem mais antiga).
- h. Processo de classificação por árvore de decisão.
- i. Aplicação das máscaras com o contorno da RMSP e MSP.
- j. Identificação de áreas conspícuas. Determinação do limiar mais adequado.
- k. Aplicação da filtragem Majority Analysis nas duas imagens.
- l. Vetorização do produto incremento de substrato nas duas imagens.
- m. Elaboração dos mapas imagem finais. Analisam-se as seis áreas piloto e se discutem os resultados

#### **5.4) O TRABALHO DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS**

Como já foi enunciado na hipótese principal, almeja-se estabelecer, com o auxílio desta pesquisa, uma metodologia que permita a identificação de mudanças relevantes nos assentamentos precários na Cidade de São Paulo utilizando imagens satelitais de mediana resolução espacial.

Adicionalmente, utilizaram-se, como recurso complementar, bases de dados ancilares quantitativos e qualitativos, com ênfase naqueles provenientes dos SIG, como os limites conhecidos dos assentamentos e outros atributos provenientes do Sistema Habisp (PMSP-SEHAB-HABI, 2008). Também, fotografias aéreas, em especial as provenientes de levantamentos aerofotogramétricos, devido à disponibilidade de séries temporais extensas e a facilidade de serem inclusas em ambientes digitais georreferenciados. Este último recurso é de aquisição relativamente facilitada em aglomerações urbanas antigas e bem consolidada como é o caso da cidade de São Paulo, que possui imagens fotográficas métricas desde os primeiros anos da década de 1930, como o conhecido levantamento SARA Brasil (DA SILVA, 2009, p. 58).

## 5.5) O PROCESSO DE SELEÇÃO DAS IMAGENS

Conforme mencionado nos objetivos específicos da hipótese principal, pretende-se estabelecer também uma metodologia que subsidie determinar quais seriam os melhores candidatos a serem comparados dentre uma série temporal de imagens de Sensoriamento Remoto.

A primeira tarefa realizada para atingir este objetivo constituiu a seleção das imagens brutas que poderiam ser utilizadas como fonte primária nos trabalhos de detecção de mudanças e sua caracterização. Para tal, acessamos a página Web denominada *USGS Global Visualization Viewer* (<http://glovis.usgs.gov/>) no Arquivo Landsat (*Landsat Archive*) que contém três coleções que foram objeto de interesse nesta pesquisa:

***Landsat 4 Thematic Mapper (TM)***. Este sensor equipou o satélite Landsat 4 desde julho de 1982 até junho de 2001 com uma resolução temporal (tempo de revisita) de 16 dias. O satélite manteve uma órbita polar heliosíncrona, com altitude de 705 km e as imagens geradas abrangiam um território de 185 km X 172 km.

***Landsat 5 Thematic Mapper (TM)***. Este sensor equipou o satélite Landsat 5 desde março de 1984 até novembro de 2011, com uma resolução temporal (tempo de revisita) de 16 dias. O satélite mantém uma órbita polar heliosíncrona, com altitude de 705 km e as imagens geradas abrangem um território de 185 km X 172 km.

***Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) SLC-on (1999-2003)***. Este sensor equipa o satélite Landsat 7 desde julho de 1999, com uma resolução temporal de 16 dias. O satélite mantém também uma órbita polar heliosíncrona, com altitude de 705 km e as imagens geradas abrangem um território levemente menor (183 km X 170 km). Até 30 de maio de 2003 trabalhou sem nenhuma deficiência técnica. No dia 31 de maio o *Scan Line Corrector – SLC* (Corretor da Linha de Varredura) do sensor parou e funcionar. Isto significa que a rotina de software que realizava a compensação pelo movimento de translação do satélite enquanto capturava as imagens falhou. Os esforços subsequentes para reparar o dispositivo foram infrutíferos, e a falha foi considerada permanente. Desde junho até o início de outubro de 2003 não houve coleta de imagens.

### 5.5.1) As imagens do Landsat 7 (ETM+) após outubro de 2003

**Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+) SLC-off (2003->).** A partir do dia 10 de outubro de 2003 o satélite voltou a gerar imagens, mas com o SLC desligado. Isto denota que as imagens geradas pelo sensor apresentam franjas duplicadas pelo movimento em ziguezague (ver Figura 4) da varredura de coleta que se mostram como falhas ou franjas vazias. O fenômeno vai aumentando em largura e intensidade na direção das bordas das cenas coletadas desta forma.

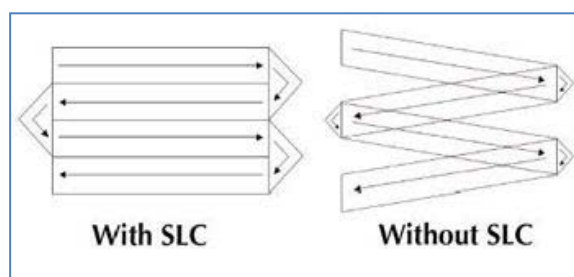


Figura 4. Gráfico explicativo dos efeitos da ação de correção do SLC sobre as imagens coletadas pelo sensor *Enhanced Thematic Mapper*. Na parte direita apresenta-se o resultado com o dispositivo desligado. Fonte *United States Geological Survey - USGS (2010)*.

Em termos práticos isto indicava que o satélite Landsat 7 ETM+ ainda era capaz de gerar imagens utilizáveis com o SLC desligado, particularmente na região central de qualquer cena analisada. De fato, todas as cenas desse sensor coletadas no modo *SLC-off* têm a mesma alta qualidade geométrica e radiométrica que as coletadas antes do defeito no SLC. As marcas (na forma de franjas vazias de resposta espectral com o valor do pixel igual a zero) produzidas pelo desligamento deste dispositivo são mais pronunciadas ao longo das bordas das cenas e vão diminuindo gradualmente na direção do centro (ver Figura 5). Essa parte central, que tem uns 25 km de largura aproximadamente, não apresenta duplicação ou perda de dados, em consequência, é muito similar em qualidade às imagens obtidas antes de 31 de maio de 2003, quando ocorreu o defeito no dispositivo SLC. Estima-se que 22 por cento dessas imagens é perdido por causa deste problema. A largura máxima das franjas vazias equivale a uma linha de varredura do scanner instalado no satélite como sensor, e oscila entre 390 e 450 metros. A localização precisa dessas falhas varia de cena para cena, mas a região onde a imagem apresenta-se contínua está

fixada ao longo do eixo central (USGS, 2010). Acontece que, como as franjas que afetam as imagens aparecem dispostas com certa inclinação sudeste (98,2 graus) em função da órbita e passagem do satélite, a área central totalmente livre de falhas teria uma superfície bem menor, caso tentássemos extrair esse núcleo central na forma de um retângulo, na orientação norte-sul e indo desde o extremo superior até o extremo inferior da imagem. Como se verá a seguir, esta peculiaridade mostrou-se importante na hora de corrigir as falhas nas imagens geradas pelo sensor ETM+ depois de outubro de 2003.

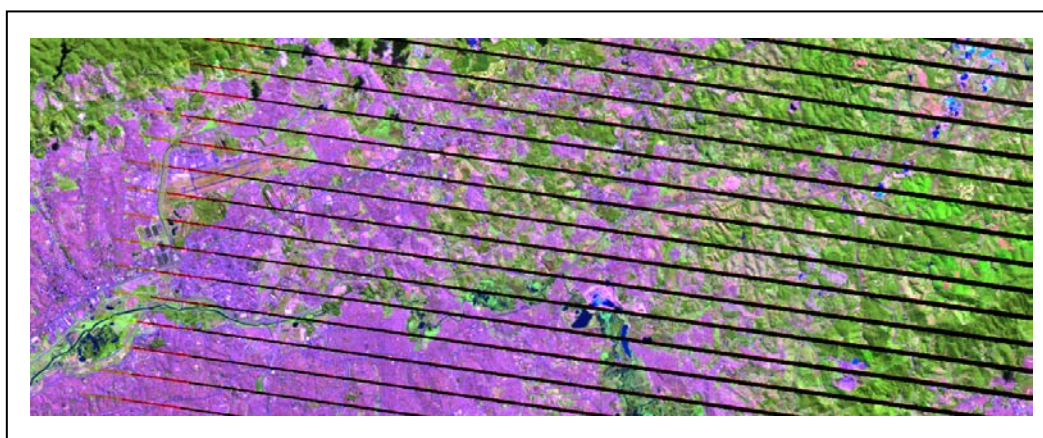


Figura 5. Fragmento da imagem obtida pelo sensor Landsat 7 (ETM) em 06 de Maio de 2006. Notem-se as falhas que aumentam progressivamente da região central na direção Oriental. Detalhe escolhido sobre a Zona Leste da Cidade de São Paulo na divisa com o Município de Guarulhos. Fonte NASA. Processamento pelo autor.

Embora o mundo científico e o próprio USGS estivessem preocupados em encontrar uma solução para este problema (VOGELMANN, OHLEN, *et al.*, 2003), (SCARAMUZZA, MICIJEVIC e CHANDER, 2004), não foi até junho de 2009, que se disponibilizou uma rotina (MINARI, 2009), produzida para ser executada no **ENVI - Environment for Visualizing Images**, que realmente conseguiu preencher as falhas das imagens do Landsat 7 provocadas pelo SLC desligado. O aplicativo em questão, denominado "*Landsat\_Gapfill*", utiliza a metodologia descrita por Scaramuzza, Micijevic e Chander em 2004, substituindo os pixels das franjas com defeito pela interpolação dos valores controlada pela informação contida numa imagem da mesma área de abrangência, mas com toda sua superfície registrada, ou seja, uma imagem produzida com o SLC ligado. Em março de 2010, Yanqing Dong (p. 1) publicou uma nova função para o software ENVI (*Landsat ETM+ Destripe*) que



também resolve, aparentemente, o problema, utilizando igualmente métodos de interpolação, mas neste caso, empregando o recurso unicamente nas superfícies previamente definidas por máscaras.

Recentemente foi divulgado outro método (BLAMANNEN, 2011), para eliminar estas falhas nas imagens geradas pelo sensor do Landsat 7 após outubro de 2003. Neste caso, é utilizado o recurso de aplicar o filtro conhecido como *Closing* ( fechamento). De fato, o processo de filtragem apresentado fecha as franjas preenchendo esses espaços vazios, o problema está em que a aplicação desta metodologia torna-se muito trabalhosa, pois é necessário cortar a imagem em fatias verticais, ou seja, orientadas Norte-Sul, isolando a franja central sem falhas e aplicando o filtro apenas nas fatias a ambos os lados. O autor recomenda utilizar 5 ou 7 destes cortes ou subconjuntos das imagens na forma de fatias longas e estreitas, que posteriormente deverão ser remontados numa única imagem mediante a elaboração de um mosaico. Mesmo assim, o método aplicando o filtro de fechamento foi testado, e se descartou sua utilização porque existe uma degradação da qualidade da imagem em aqueles lugares onde não há falhas na leitura, já que o filtro processa toda a superfície da imagem e não apenas aquela com as falhas. Aparentemente, este fenômeno não seria tão significativo num ambiente rural, onde grandes superfícies apresentam valores de reflectância muito similar. Como justamente o presente trabalho se ocupa das transformações ocorridas na Região Metropolitana de São Paulo e analisa as mudanças mais significativas, provocadas pela substituição do substrato vegetação pelo urbanizado, a aplicação desta metodologia não seria adequada.

Infelizmente, o surgimento destas possibilidades de recuperação das imagens produzidas pelo sensor ETM+ com o SLC desligado, só veio acontecer depois de termos processado todas as imagens da presente pesquisa; conseqüentemente, a maior parte do trabalho de calibração e processamento digital teve que ser feito nas imagens que foram coletadas após outubro de 2001. Mesmo assim, elas foram avaliadas, e se constatou que a que oferece melhores resultados foi a metodologia apresentada por Minari (2009). Por esse motivo escolhemos essa técnica para recuperar as áreas ocultas pela falha do sensor nas imagens, utilizadas nesta pesquisa, que apresentavam esse problema.

As falhas técnicas que eventualmente surgem nos satélites são muito difíceis de solucionar. Por exemplo, o Landsat 6, que foi lançado em 5 de outubro de 1993 contendo a primeira versão do *Enhanced Thematic Mapper – ETM* perdeu-se no espaço logo após seu lançamento. O satélite sino – brasileiro CBERS 2b, lançado em Alcântara – MA em 19 de fevereiro de 2007 funcionou corretamente até 11 de maio de 2010, quando teve que ser desativado antes de completar sua vida útil prevista. No entanto, às vezes acontecem surpresas agradáveis, como o fato de que o Landsat 5 (TM) continuou gerando imagens sem falhas (embora com frequência muito baixa no final), por 27 anos após seu lançamento, mesmo quando sua vida útil estava prevista para durar apenas 3 anos.

Para poder estabelecer sólidos critérios de comparação entre as imagens a serem empregadas optou-se por utilizar sensores que tivessem a mesma resolução espacial (pixel de 30 m, ou seja, com 900 m<sup>2</sup> de superfície) e a maior abrangência possível no tempo de coleta das imagens, estabelecendo desta forma séries temporais que atingiram, no intervalo maior, quase 25 anos de diferença. Ainda, outro argumento importante a favor do uso das imagens registradas por esses três sensores é que todos eles possuem em comum seis bandas espectrais que são de grande valor no processo de análise utilizado, onde a resolução radiométrica desempenha um papel primordial.

Não obstante os sensores da série *Landsat Enhanced Thematic Mapper* (apenas o ETM+ encontra-se atualmente em operação) estarem equipados com uma banda pancromática que atinge 15 m de resolução espacial (225 m<sup>2</sup> de superfície) optou-se por não utilizar o canal pancromático. Normalmente os usuários empregam o recurso de fundir essa banda às outras duas (em geral as bandas 4 e 3, ou 7 e 2) de resolução espacial menor, criando uma composição colorida no espaço IHS ou RGB. Preferiu-se trabalhar com os seis (6) canais espectrais na mesma resolução espacial (30 m) utilizando métodos de identificação fundamentados nos modelos de mistura. Segundo o pesquisador Christopher Small (comunicação pessoal, 2009), no processo de detecção de mudanças em território urbano com base nos modelos lineares de mistura espectral, o incremento da resolução espacial de 30 para 15 m não produz diferenças nem vantagens significativas. Essa característica foi mencionada por Kawakubo (2010), no contexto do mapeamento do uso da terra e cobertura vegetal na Amazônia, utilizando também a metodologia dos MLME. Os

procedimentos utilizados na identificação e medição de mudanças serão tratados em detalhe mais adiante.

Realizamos então uma análise exaustiva das coleções de imagens disponíveis no *USGS Global Visualization Viewer*, baixando efetivamente todas as imagens que poderiam ser empregadas. A priori, o quesito essencial foi à abrangência sobre a área de estudos, utilizando como referencia visual, muito clara, a mancha urbanizada da Cidade de São Paulo, que era perfeitamente visível mesmo na pequena escala apresentada pelo navegador web que oferece esse serviço de identificação.

Desta forma as imagens existentes foram separadas em três grupos:

- 1) Muito boas
- 2) Boas
- 3) Utilizáveis

Nessa fase inicial, o critério fundamental para a separação foi a presença de nuvens. Foram selecionadas 37 cenas obtidas pelos sensores Landsat 4, 5 e 7. No primeiro grupo, com oito (8) imagens, se incluíram as melhores, todas as que não apresentaram nuvens (Ver Figura 6). Posteriormente, foi adicionada a este grupo uma imagem, excepcionalmente clara, coletada em 18 de abril de 2010. Esta imagem, proveniente do sensor Landsat TM 5, tem ainda a vantagem de não apresentar as falhas existentes nas cenas criadas pelo Lansat ETM+ 7 após outubro de 2003.

No segundo grupo, com 12, se colocaram aquelas imagens que tinham algumas nuvens, mas sua presença não comprometia muito a visibilidade da área de interesse da pesquisa na cidade de São Paulo (ver Figura 7). Adicionalmente à existência de nuvens incluíram-se no grupo das “Boas” aquelas imagens provenientes do Landsat 7 com data posterior a outubro de 2003, ou seja, aquelas em que o sensor *Enhanced Thematic Mapper* estava com o SLC desligado (ver exemplo das consequências disto na Figura 4), independentemente de se tinham algum percentual de cobertura de nuvens ou apareciam totalmente livres delas.

No terceiro e maior grupo (com 17), ficaram aquelas imagens que embora tivessem uma maior cobertura de nuvens e névoa, ainda poderiam ser aproveitadas (ver

Figura 8). A superfície oculta chegaria a comprometer a visualização de alguma parte urbanizada, que em princípio seria o foco fundamental das pesquisas, mas ainda assim as imagens inclusas neste conjunto seriam consideradas.

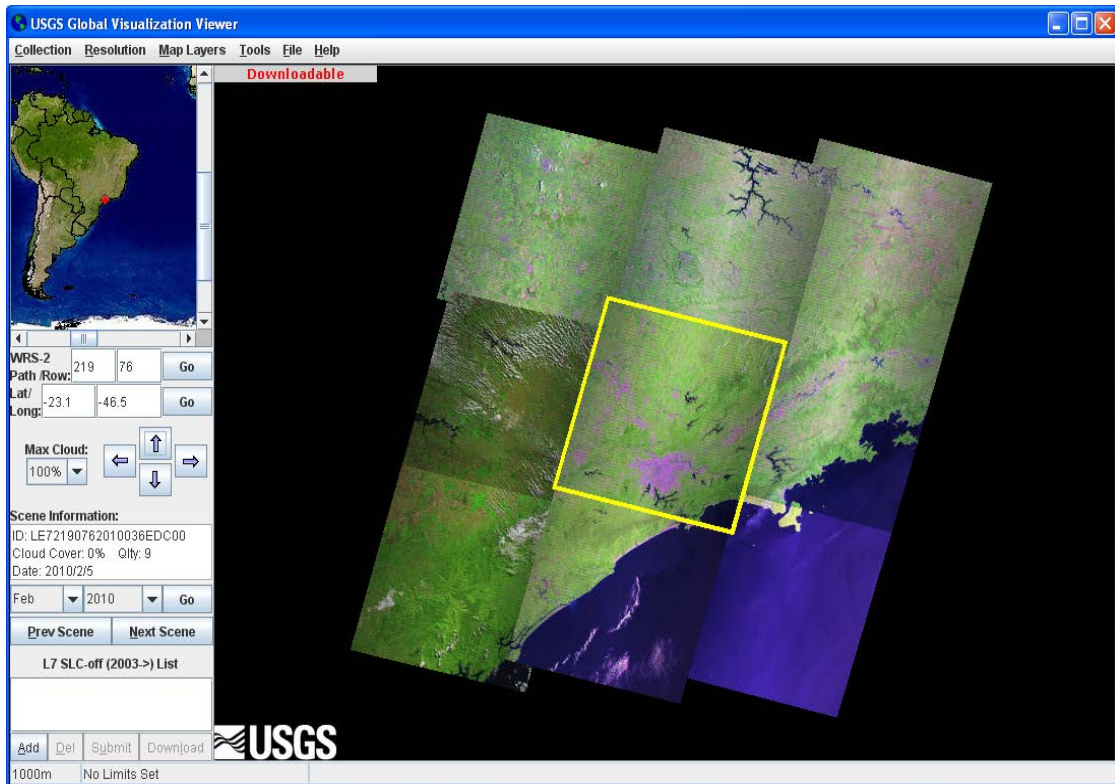


Figura 6. Exemplo de acesso ao site U.S.G.S. Global Visualization Viewer para seleção e obtenção de uma das imagens do primeiro grupo, na categoria de “Muito Boas”.

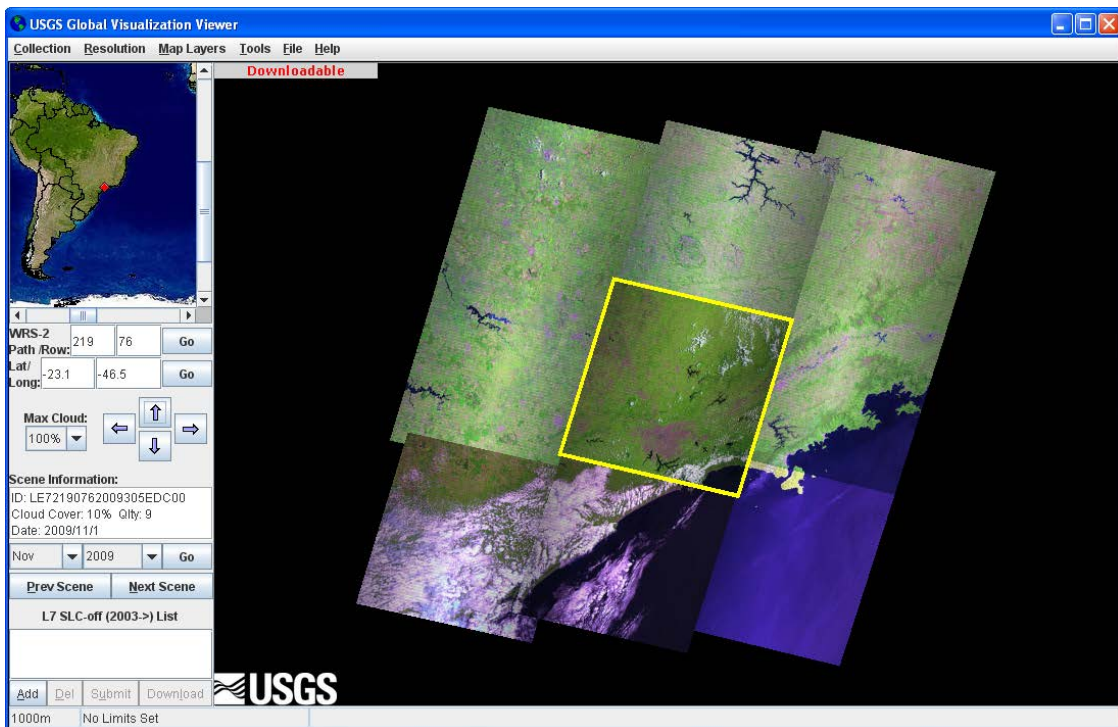


Figura 7. Exemplo de acesso ao site USGS Global Visualization Viewer para seleção e obtenção de uma das imagens do segundo grupo, na categoria de “Boas”.

Evidentemente a situação ideal seria que todas as imagens pertencessem ao Grupo 1 ou 2, ou ainda que o Landsat 7 não tivesse o SLC desligado em nenhum momento. Mas, considerando que a quantidade de imagens utilizáveis na área de estudos raramente atinge mais do que seis (6) ocorrências no ano, e isto aconteceu num período em que dois sensores (Landsat 5 e Landsat 7) mostravam bom desempenho de captura, com média de 4,75 imagens/ano; e considerando também que a incidência de céu nublado e das falhas provocadas pelo SLC desligado não chegam a afetar todas as áreas da cidade de São Paulo; foi necessário criar o terceiro Grupo, aquele que contém as cenas “Utilizáveis” para assim atingir um volume de amostras que permitisse estudos comparativos com diferentes intervalos de tempo entre eles. Afortunadamente, no final, só foram utilizadas imagens dos grupos Muito boas e Boas.

Embora os sensores utilizados nesta pesquisa apresentem resolução temporal (tempo de revisita) de 16 dias, por diversos motivos técnicos e climáticos, existem longos períodos em que não se coletaram imagens ou as que são capturadas aparecem totalmente inutilizáveis (ver Fig.9).

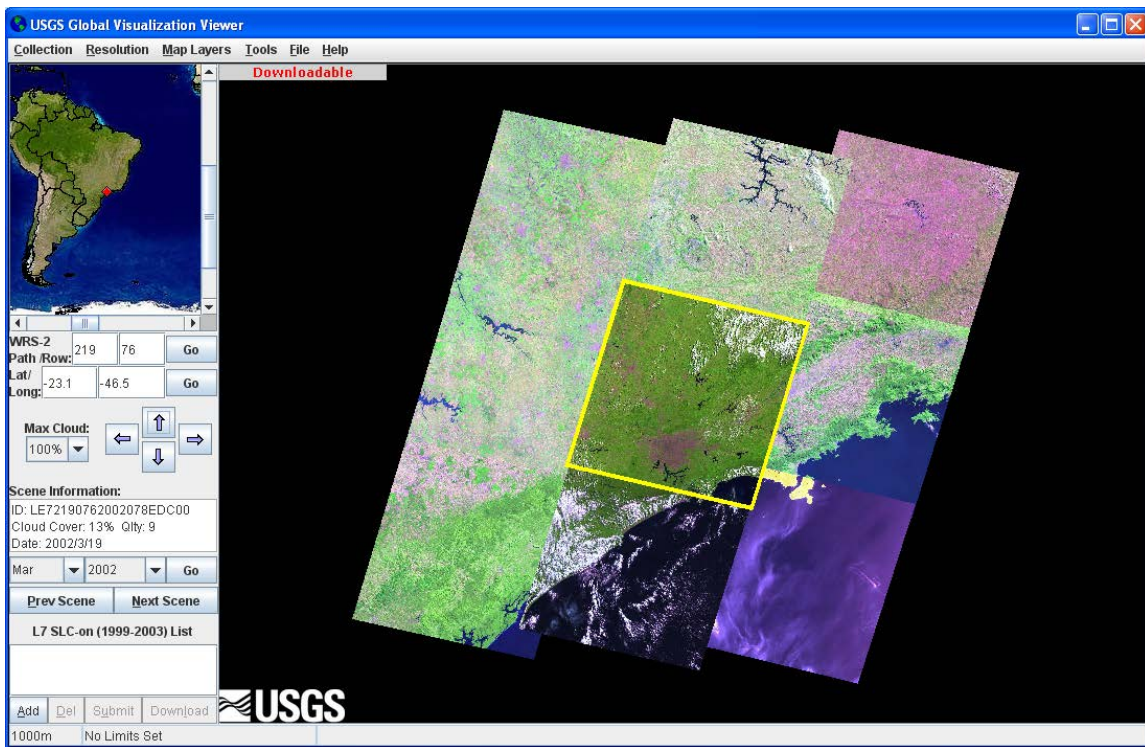


Figura 8. Exemplo de acesso ao site USGS Global Visualization Viewer para seleção e obtenção de uma das imagens do terceiro grupo, na categoria de “Utilizáveis”.

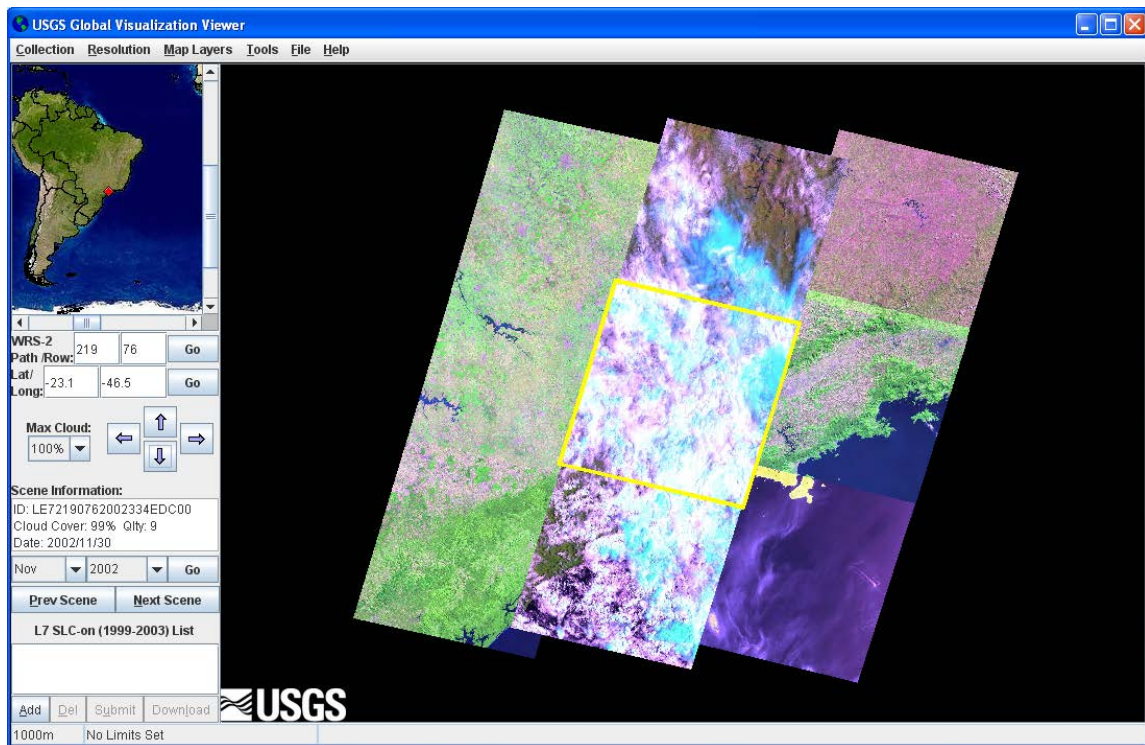


Figura 9. Exemplo de imagem conforme apresentada no site USGS Global Visualization Viewer embora não seja aproveitável por causa da densa cobertura de nuvens.

### 5.5.2) Identificação das melhores imagens para serem comparadas

Uma vez selecionadas, separadas em grupos e obtidas todas as imagens que, a priori, poderiam ser utilizadas no estudo, procedeu-se à identificação de quais seriam as melhores candidatas para serem analisadas e comparadas. A justificativa de se realizar essa operação é que o método de identificação que se utilizou neste trabalho, seguindo os Modelos de Mistura Espectral, fundamenta sua análise na comparação de duas imagens, obtidas sobre o mesmo território e separadas no tempo o maior lapso possível para se apreciarem as alterações produzidas nesse território no período estudado (série diacrônica). Então uma vez selecionado o par de imagens e executado o procedimento de separação das frações, o resultado passa a compor uma imagem colorida em falsa cor. Em seguida executa-se uma operação matemática onde a imagem mais antiga é subtraída da mais recente.

Sucedde que no site do *USGS Global Visualization Viewer* onde as imagens foram requeridas e baixadas, as mesmas são identificadas na nomenclatura adotada simultaneamente pelo sensor, a posição na superfície terrestre e a data da coleta. Por exemplo, o arquivo "**LT52190762004092CUB00.tar**" contém, em formato compactado (.TAR), todos os dados relacionados com a imagem do Landsat 5, correspondente à cena da Órbita 219, Ponto 076, do ano 2004 no dia juliano 92 dessa data em particular (01/04/2004)<sup>18</sup>. Ao mencionar todos os dados relacionados estamos nos referindo às sete bandas espectrais desse sensor (oito no caso do ETM+) em formato TIF, ao arquivo **L5219076\_07620040401\_GCP.txt**, que contém a localização dos pontos de controle para o georreferenciamento, ao arquivo **L5219076\_07620040401\_MTL.txt**, que apresenta as correções radiométricas, de elevação e ângulo solar no momento da captura, e por último o arquivo **README.GTF**, que descreve o conteúdo do arquivo compactado (.TAR) e provêm ao usuário de valiosas informações sobre as características específicas dos sensores e das imagens capturadas por eles.

Então, para poder ter uma visão de conjunto de todas as imagens selecionadas se utilizou o recurso de colocá-las em um gráfico que classificou as cenas de acordo

---

<sup>18</sup> A expressão "dia juliano" foi utilizada neste caso para se referir a um formato de data que consiste na referência ao número de dias desde o início do ano. Por exemplo, 1º de janeiro (de qualquer ano) é representado como 001 e 31 de dezembro como 355 (ou 356 se o ano em questão for bissexto). Observe-se que esse formato não está realmente baseado no calendário juliano *stricto sensu*.



com a data de aquisição, pelo sensor utilizado e pela qualidade das mesmas (ver Figura 10). Do ponto de vista temático, os círculos indicam as cenas capturadas pelos satélites Landsat 4 e 5, e as estrelas aquelas capturadas pelo Landsat 7. Quanto às cores, o verde indica que as imagens pertencem ao Grupo 1 (Muito Boas), o azul ao Grupo 2 (Boas) e o vermelho ao Grupo 3 (Utilizáveis). No eixo das ordenadas (Y), o gráfico apresenta o período de tempo coberto pelos sensores Landsat das séries 4, 5 e 7, ou seja, desde 1982 até 2009 (data de execução deste gráfico), em divisões numeradas. No eixo das abscissas (X) são mostrados os dias do ano segundo o calendário juliano em intervalos de 30 unidades; para facilitar o entendimento existem linhas verticais que separam os meses do calendário Gregoriano, de forma aproximada.

Em princípio, aquelas cenas que, estando separado por um considerável período de tempo (vários anos) e ao mesmo tempo apresentando-se alinhadas segundo a data juliana (no conceito aqui utilizado), teriam as melhores probabilidades de constituir um bom par de imagens para detecção de mudanças de uso e cobertura da superfície terrestre nessa área em particular. A razão fundamental para essa afirmação é que ao utilizar imagens de datas julianas muito próximas, de certa forma garante-se que as condições climáticas sejam similares e, o mais importante, que o ângulo de incidência dos raios solares, assim como a posição do sol, seja o mais parecido possível. Evidentemente, o maior intervalo temporal propiciaria a possibilidade de ocorrência (e identificação) de maior número de mudanças ocorridas no território estudado.

Para se executar o gráfico de distribuição de imagens no tempo, denominado em Inglês *Calendar Plot*, utilizou-se o recurso disponível em *Generic Mapping Tools - GMT*. O mesmo consiste em uma coleção com mais de 60 rotinas específicas para manipular conjuntos de dados gráficos e cartesianos que permite gerar ilustrações com diversos graus de complexidade e oferece também a possibilidade de produzir mapas em diferentes projeções cartográficas. GMT foi criado por Paul Wessel e Walter H.F. Smith, *School of Ocean and Earth Sciences and Technology, University of Hawaii*, com a ajuda de um conjunto de voluntários em diferentes locais do mundo e está disponível como código aberto de domínio público em: <http://gmt.soest.hawaii.edu/>. (Ver Figura 11).

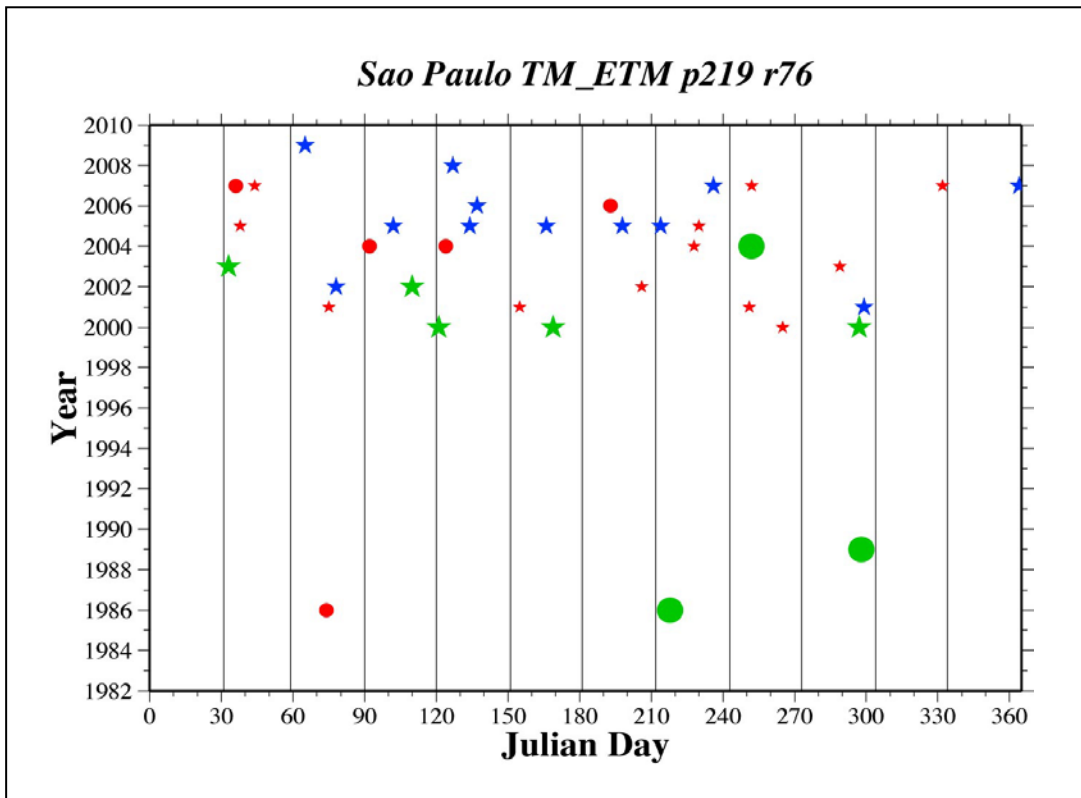


Figura 10. Gráfico de distribuição das imagens no tempo.

The screenshot shows the homepage of the Generic Mapping Tools (GMT) project. The page is titled "THE GENERIC MAPPING TOOLS" and includes a navigation menu on the left with links to HOME, EXAMPLES, FAQ, DOWNLOAD, DOCS, MAILINGLISTS, REGISTRATION, MIRRORS, RESOURCES, BUGS, ARRRGHH!, and RELEASES. The main content area is titled "What is GMT?" and provides a brief description of the software. A world map shows the distribution of users, with yellow dots representing 15x15 arc minute blocks. The current version is 4.5.2, released on January 15, 2010. The footer includes the SOEST logo and contact information for the School of Ocean and Earth Science and Technology at the University of Hawaii at Manoa.

Figura 11. Página principal do Generic Mapping Tools – GMT disponível no site da School of Ocean and Earth Sciences and Technology – SOEST, University of Hawaii, Manoa. (<http://gmt.soest.hawaii.edu/>)

A rotina específica para produzir o gráfico apresentado na Figura 10, foi gentilmente cedida pelo Dr. Christopher Small, do *Center for International Earth Science Information Network – CIESIN, Columbia University*, e adaptada para atender os requerimentos específicos do conjunto de imagens estudadas. O algoritmo, que pode ser executado em um computador pessoal mediante um artifício para emular o ambiente Unix, requer que se disponibilizem as três listas que separam as imagens segundo a presença de nuvens (Grupos 1, 2 e 3), e que se indique qual o critério temático para se utilizarem os símbolos geométricos. Pode se consultar um exemplo deste programa, na listagem que aparece no Anexo desta tese.

### **5.5.3) Triagem das imagens e a região de estudos**

Como já foi indicado, o principal foco de interesse deste trabalho é a cidade de São Paulo, ou melhor, a Aglomeração Urbana da Região Metropolitana de São Paulo. Na fase inicial de seleção das imagens utilizou-se o critério de incluir todas as cenas que, caindo dentro de um dos três grupos citados (“Muito boas”, “Boas” e “Utilizáveis”) contivessem a mancha urbanizada característica da Metrópole Paulistana, já que a simples vista da urbe conurbada está totalmente contida em uma única imagem, embora seu centro encontre-se localizado na parte Sul. Porém, logo se compreendeu que isto não era suficiente. A mancha urbanizada contínua de fato ocupa aproximadamente 1/3 da área do Município de São Paulo, contudo o limite municipal estende-se até superar o extremo sul das imagens selecionadas (ver Figura 12), ou seja, uma parte do território do Município de São Paulo encontra-se localizada em outra cena, aquela situada na posição imediatamente ao sul das inicialmente escolhidas. Adicionalmente, outros quatro municípios da Região Metropolitana além do Município de São Paulo têm parte de seu território fora da área coberta pela imagem. Como argumento complementar, e decisivo, confirmou-se a presença de assentamentos precários na porção meridional do território acima mencionado.

Mesmo que, efetivamente, exista uma área comum de sobreposição entre as cenas que incluem o grosso do Município de São Paulo (Órbita 219, Ponto 76 segundo a nomenclatura adotada internacionalmente para definir as cenas) e aquelas que cobrem o fragmento restante estendendo-se na direção meridional (Órbita 219, Ponto 77). Há ainda uma parte da superfície municipal que não é visível na imagem correspondente à porção Norte da órbita de passagem do satélite (Órbita 219, Ponto

76). Isto justifica, plenamente, a necessidade de se juntarem as duas cenas para produzir uma imagem maior que contemple todo o território a ser estudado. A mesma (de proporções enormes, pois ocupa uma superfície de 195 x 345 km) aparece inserida num retângulo ainda maior, de 275 x 370 km, por causa do ângulo de 98,2 graus característico da órbita hélios síncrona dos satélites da série Landsat (ver Figura 11). A cor preta (que aparece nas figuras 10, 11 e parcialmente na figura 12), corresponde justamente à ausência de cor, ou seja, áreas com reflectância zero. Este retângulo complementar que bordeja a superfície imageada é uma característica própria das imagens digitais, conformadas externamente por uma matriz retangular.

Frequentemente, em diversos trabalhos onde se faz uso das imagens satelitais provenientes do sensor Landsat, esta porção territorial do Município de São Paulo é negligenciada. Como a superfície contínua urbanizada da Cidade de São Paulo se estende efetivamente pelo território de 20 municípios da Região Metropolitana de São Paulo, neste estudo optou-se por considerar um retângulo suficiente para conter, com folga, a abrangência dos 39 municípios da RMSP.

Para cobrir totalmente toda essa região com imagens dos satélites Landsat 4, 5 e 7, foi necessário compor um mosaico com as cenas provenientes da Órbita 219, Ponto 76 e também 77, conforme mostrado na Figura 11, e seguidamente, recortá-lo nas dimensões adequadas (ver Figura 12). Como pode ser observado na Figura 10, a Região Metropolitana de São Paulo aparece localizada na porção centro-sul da cena correspondente ao Ponto 76 da Órbita 219. Os municípios de Juquitiba, São Paulo, São Lourenço da Serra, Embu Guaçu e São Bernardo do Campo são os que, em ordem decrescente, têm certa quantidade de superfície municipal localizada fora da área coberta por essas imagens dos satélites da série Landsat.

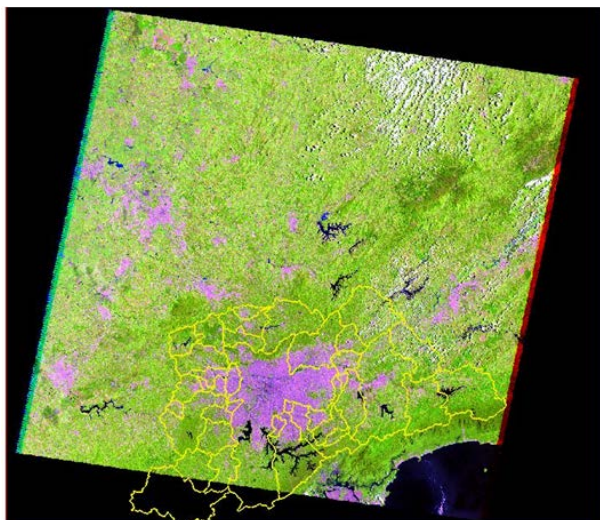


Figura 12. Cena do Landsat7 de 02/02/2003.

Observe-se como vários municípios da Região Metropolitana de São Paulo têm parte de seu território fora da área coberta pela imagem. Fonte NASA.



Figura 13. Mosaico elaborado com as cenas 76 (N) e 77 (S) do satélite Landsat 5 coletadas em 18/04/2010. Note-se como a mancha urbanizada ocupa a parte central da imagem, que aparece inserida no retângulo negro, inclinado por causa da órbita de passagem da plataforma orbital. Fonte NASA. Processamento pelo autor.

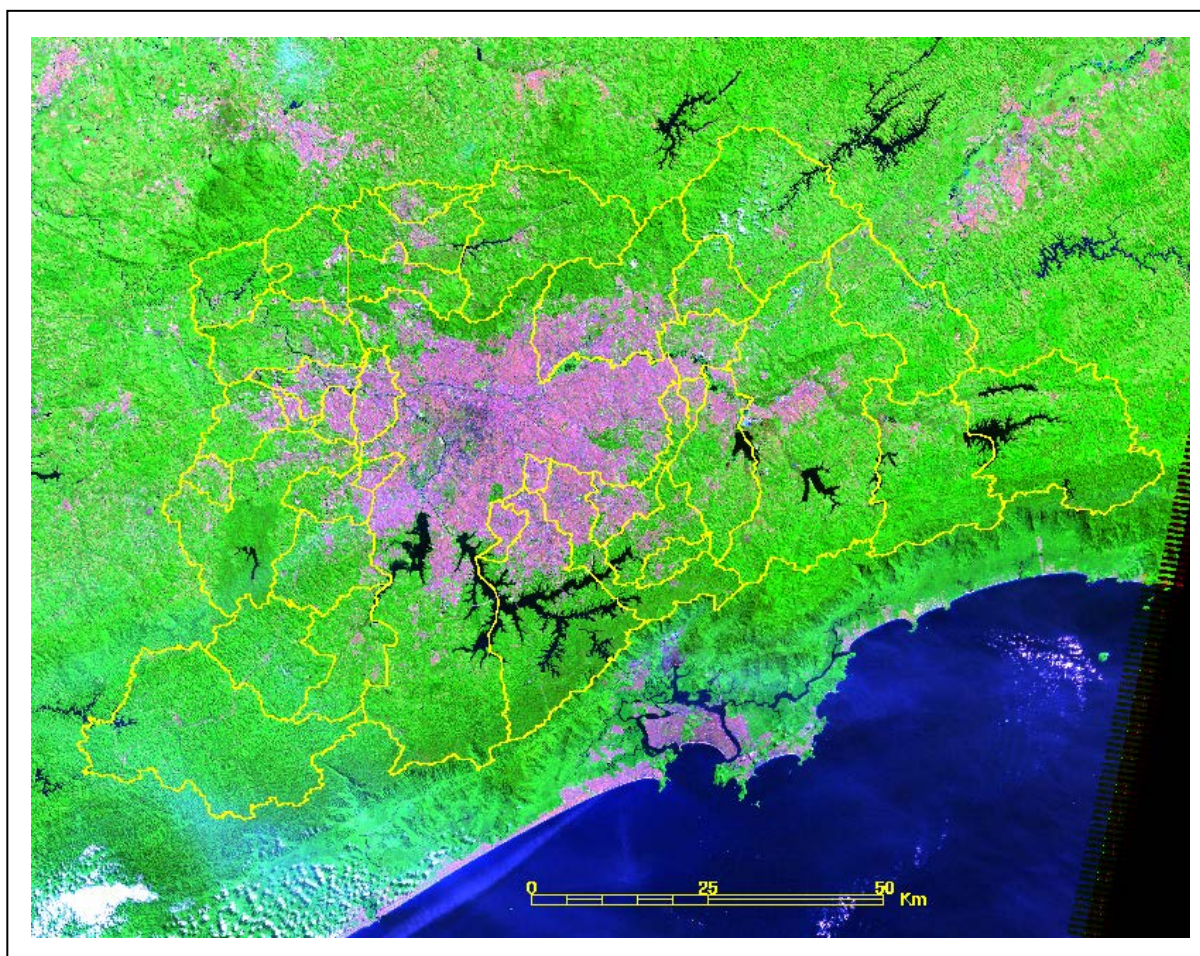


Figura 14. Recorte do mosaico elaborado com as cenas 76 e 77 de Landsat 5 de 06 de agosto de 1986. Note-se como a mancha urbanizada ocupa a parte central, e os limites dos municípios que compõem a Região Metropolitana de São Paulo, em amarelo, estão totalmente contidos na imagem. As dimensões deste enquadramento (165 x 128 km) serviram como padrão na hora de tratar todas as outras imagens. Fonte NASA. Processamento pelo autor.

Evidentemente que uma vez estabelecidas a forma e as dimensões da área de estudos recortada sobre a fusão das duas imagens no mosaico, a mesma foi replicada em todas as cenas contidas na seleção que fundamentou nossos estudos. Isto foi conseguido mediante a criação de uma imagem padrão (ou bitola) que depois era utilizada como referência espacial no momento da criação das outras. O resultado foi uma redução considerável (provocada pelo recorte) do tamanho dos arquivos tratados a partir desse momento, além de uma padronização muito desejável em estudos comparativos diacrônicos como o que se pretendia executar. Porém, para chegar a esse resultado, é imprescindível realizar a calibração e a junção de todos os canais utilizados nas cenas que formam a porção Norte da área, Órbita 219 Ponto 76, e também dos correspondentes ao Ponto 77 da mesma Órbita (porção Sul). O procedimento empregado, que será descrito a seguir é considerado parte do pré-processamento no tratamento digital das imagens.

## **5.6 TRATAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS**

As imagens produzidas pelos satélites de Sensoriamento Remoto são emitidas na forma de um fluxo de dados que são enviados à Terra em um formato digital cru. A menor unidade desses dados é representada por um número binário. Essas pequenas unidades são combinadas e aplicadas a um único ponto, o pixel, que então apresenta um valor denominado Número Digital - ND. A cada ND corresponde uma tonalidade de cinza que foi detectada pelo satélite. Esses pixels, quando são dispostos na ordem correta, formam o arranjo espacial da imagem do alvo (o superfície imageada), onde a variação dos tons de cinza representa a variação dos níveis de energia identificados pelo sensor em toda a superfície imageada, que é chamada de “cena”.

Quando as cenas são captadas pelos satélites na forma de imagens brutas elas apresentam diferentes deteriorações e deformações. Degradações radiométricas provocadas pelos desajustes na calibração dos sensores, erros esporádicos ocorridos na transmissão dos dados, influências atmosféricas e distorções geométricas provocadas pelo relevo. Todas essas imperfeições, caso não sejam corrigidas, podem comprometer os produtos gerados pelas imagens. O pré-processamento é a etapa preliminar do tratamento digital de imagens que se ocupa de corrigir essas deteriorações. Na literatura especializada em Sensoriamento

Remoto (JENSEN, 1996), basicamente são citadas três operações que formam parte do denominado pré-processamento:

### **5.6.1) Correção Geométrica**

Uma forma de distorção das imagens em seu estado inicial é a chamada distorção geométrica, que diminui a precisão espacial das informações contidas nas cenas. A correção geométrica retifica as distorções sistemáticas presentes nas imagens, estas distorções são resultantes do processo de aquisição e imprecisão dos dados de posicionamento da plataforma (por exemplo, o satélite), que carrega o sensor multiespectral (D'ALGE, 2001). Muitas aplicações como a cartografia, a confecção de mosaicos georreferenciados, os sistemas de informações geográficas e a detecção de mudanças espaciais ao longo do tempo (como acontece no presente caso), requerem de dados gráficos com boa precisão espacial, o que exige a correção de tais deformações, para poder sobrepor as imagens com suficiente grau de confiabilidade. Por isso em termos práticos a própria confecção de mosaicos pode ser considerada como parte do pré-processamento no tratamento digital de imagens.

Também chamada de georretificação, ou ajuste geométrico, ela confere coordenadas geográficas às imagens cruas obtidas pelos satélites, que inicialmente contém distorções e deformações que devem ser eliminadas.

Outros tipos de imagens produzidas por sensoriamento remoto, como por exemplo, as fotografias aéreas, apresentam erros como o deslocamento topográfico e radial; e as deformações provocadas pela inclinação da aeronave no momento da captura das fotos aéreas. Todas elas têm efeitos reduzidos nas imagens obtidas por plataformas orbitais, devido, principalmente, à maior altitude e grande estabilidade que os satélites têm ao mover-se num ambiente praticamente desprovido de atmosfera. Então, enquanto as fotos aéreas possuem várias fontes de erro geométrico, a principal causa de erro desse tipo nos dados obtidos por satélites deve-se à orientação não polar (inclinada) da órbita somada à provocada pela topografia da superfície imageada.

Em função de seu maior ou menor grau de ajuste geométrico, as imagens satelitais são oferecidas geralmente com algum tipo de correção. Nesta pesquisa todas as imagens utilizadas foram obtidas por meio do *USGS Global Visualization Viewer*, e



pertenciam aos satélites da série Landsat 4, 5, e 7. Em consequência, conforme informado pela NASA, por meio do USGS (2009, p. 1), todas elas foram processadas enquanto à correção geométrica segundo o Nível 1 do Sistema de Geração de Produtos (*Product Generation System – LPGS*), também chamado Correção de Terreno no Nível 1T (*Level 1T – L1T*).

*“A Correção de Terreno no Nível 1T proporciona correção radiométrica sistemática e precisão geométrica ao incorporar pontos de controle no terreno empregando, simultaneamente, o Modelo Digital de Elevação (MDE) para atingir precisão topográfica. A precisão geodésica do produto depende da exatidão dos pontos de controle calculados e da resolução espacial do MDE utilizado. Para lugares situados fora dos Estados Unidos, a exatidão dos produtos corrigidos por este método irá depender da disponibilidade dos pontos de controle de terreno no local, assim como da melhor qualidade do MDE disponível. Cenas que possuam uma qualificação de qualidade de 9 e menos de 40 por cento de cobertura de nuvens são automaticamente processadas, e para qualquer cena arquivada, independentemente de sua cobertura de nuvens, poderá ser requerido o processamento mediante os aplicativos GloVis ou Earth Explorer providos pelo USGS.” (Ibidem, p. 2).*

Em virtude da alta qualidade geométrica das imagens produzidas pela NASA e disponibilizadas no site do USGS, foi considerado desnecessário realizar algum tipo de correção geométrica adicional, especialmente considerando que a área de estudos, centrada na Região Metropolitana de São Paulo, reconhecidamente possui boa densidade de pontos de controle e elevada precisão dos modelos digitais de elevação, criados para esse território no intuito de ajustar topograficamente fotografias aéreas desde a década de 1930 (DA SILVA, 2009).

### **5.6.2) Correção Radiométrica e ajuste da Reflectância**

A Correção Radiométrica, também conhecida como restauração ou retificação, é utilizada para modificar os valores dos ND (expressados em tonalidades de cinza com valores de 0-256 em imagens de 8 bits) com o objetivo de reduzir o “ruído” provocado pela atmosfera, o ângulo de elevação solar, e as falhas nos mecanismos do próprio sensor.

Em outras palavras, o tratamento se destina a reduzir as degradações radiométricas decorrentes dos desajustes na calibração dos sensores específicos e também dos eventuais erros ocorridos na captura e transmissão dos dados. A retificação radiométrica visa minimizar as alterações de brilho entre as imagens produzidas pelas diferenças nas condições atmosféricas, de iluminação solar e de calibração do sensor no momento da captura das imagens. Este tipo de correção pode ser executado utilizando parâmetros de calibração e os dados fornecidos pela própria

instituição responsável pela aquisição das imagens. No caso das imagens utilizadas nesta pesquisa, todas provenientes dos satélites da série Landsat (TM e ETM+) esses parâmetros são oferecidos em um arquivo de texto<sup>19</sup> com extensão (.MTL), que acompanha todos os “pacotes” de dados compactados nos quais as imagens são entregues aos usuários no site do *USGS Global Visualization Viewer*, disponível no endereço (<http://glovis.usgs.gov/>) na Internet.

Na maioria das vezes, tais degradações devem ser corrigidas, especialmente:

- a) Se o “ruído” afeta significativamente a qualidade da imagem. (Por exemplo, as capturadas pelo sensor ETM+ após outubro de 2003);
- b) Pretende-se montar um mosaico com várias imagens;
- c) Para aumentar a confiabilidade em estudos com várias bandas (multiespectrais);
- d) Ao combinar imagens provenientes de diferentes sensores e/ou datas.

Como é possível observar, os dados e as imagens utilizados na presente pesquisa são influenciados por todas as ações e propriedades mencionadas acima. Então, resulta evidente que para poder organizar um estudo comparativo como o aqui apresentado é imprescindível que a superfície analisada seja perfeitamente coincidente. Isto só pode ser alcançado porque todas as cenas dos três (3) sensores utilizados (Landsat 4, 5 e 7) têm órbitas e superfícies de leitura equivalentes, além das outras características em comum anteriormente citadas, ou seja, resolução temporal, espacial, espectral e radiométrica idênticas nas seis bandas empregadas. Conforme relacionado no item 4.2 (Modelos de Mistura Espectral e sua aplicação em áreas urbanas), essas propriedades fazem que as imagens sejam consistentes e confiáveis num processo de análise comparativa. No entanto, é necessário mencionar que as mesmas imagens, ao serem capturadas pelos diferentes sensores ao longo do tempo, são produzidas baixo diferentes condições de iluminação, umidade (atmosférica e superficial) e efeitos atmosféricos (tanto na superfície como no topo da atmosfera), além das diferenças técnicas induzidas pela calibração dos dispositivos de varredura ótica instalados no satélite. Ainda, deve-se ressaltar que as

---

<sup>19</sup> Ver exemplo no Anexo.

mencionadas diferenças provocadas pelas condições naturais afetam até as cenas originadas pelo mesmo sensor e numa mesma órbita.

Então, para produzir jogos de imagens comparáveis de alta qualidade procura-se compensar essas diferenças na melhor forma possível, por exemplo, para realizar o ajuste da reflectância da radiação eletromagnética incidente sobre a superfície terrestre (e que é capturada pelos sensores dos satélites na forma de imagens), utiliza-se a informação contida nos arquivos de texto auxiliares. Neles constam os dados de ganho do dispositivo leitor e do ângulo de incidência e orientação do sol, para cada banda espectral que compõe a imagem, no momento da captura. Esse ajuste ou calibração da reflectância, forma parte também das correções radiométricas e atmosféricas que geralmente são executadas durante a etapa de pré-processamento.

### **5.6.3) Correção Atmosférica**

A interferência produzida pelas capas da atmosfera sobre a qualidade visual das imagens capturadas pelos sensores remotos pode chegar a comprometer sua análise e interpretação. A intensidade do efeito depende do comprimento de onda e, conseqüentemente, o mesmo acontece de maneira diferente cada uma das bandas espectrais capturadas pelos sensores. A correção atmosférica da imagem afetada é uma tarefa difícil, e pode ser realizada por meio de modelos matemáticos complexos. Por esse motivo, procura-se, na medida do possível, utilizar imagens que apresentem o mínimo de interferências atmosféricas. A interferência mais comum e evidente é a presença de nuvens. Em consequência, imagens com altos índices de recobrimento de nuvens sobre a região de interesse são descartadas. Mesmo assim, é possível que uma determinada imagem apareça livre de nuvens, mas ao começar a utilizá-la, percebem-se regiões onde ela fica escura, desfocada ou “embaçada”; essas desagradáveis interferências são provocadas pelos efeitos da dispersão (espalhamento) da radiação eletromagnética na atmosfera. Ao reduzir o contraste entre os pixels (reduzindo o intervalo dinâmico entre valores de reflectância), a dispersão atmosférica faz com que pixels contíguos pareçam mais parecidos do que na realidade são, considerando apenas a separação física entre eles. Em outras palavras, este fenômeno pode chegar a diminuir sensivelmente a qualidade gráfica da imagem afetada.

Se uma imagem estiver seriamente comprometida por causa dos efeitos da dispersão atmosférica não há muito que se possa fazer, caso tenha havido perda de informação, mas é possível recuperar uma parte do contraste. Visualmente isto é realizado por meio do esticamento do histograma, mas para análise multitemporal geralmente é necessário executar correções radiométricas para compensar as distorções. Dependendo do caso, as operações de compensação podem chegar a suprimir respostas espectrais que são importantes na análise das imagens multiespectrais. Por esse motivo deve considerar-se cuidadosamente a pertinência de realizar, ou não, operações de correção no intuito de compensar os efeitos da dispersão da REM na atmosfera, especialmente, quando a área de estudo apresenta superfícies urbanizadas.

#### **5.6.4) Características das imagens utilizadas**

Deve ser considerado que todas as análises realizadas sobre imagens provenientes dos satélites Landsat 4, 5 e 7 têm em comum seis (6) bandas espectrais que são essenciais nos estudos de classificação baseados justamente na mistura de valores produzidos pela combinação e variação dos materiais empregados nas construções urbanas e na alternância das diferentes formas e padrões de cobertura da terra. Cada uma dessas bandas espectrais está capacitada a capturar a radiação eletromagnética refletida pela superfície terrestre, sob a iluminação solar, em determinado comprimento de onda (Ver Tabela 8). Em outras palavras, elas têm diferente sensibilidade espectral e, em consequência, diferentes aplicações. Na realidade o número de bandas em comum é sete (7), mas a banda seis (6) possui uma resolução espacial mais grosseira (120 m no TM ou 60 m no ETM+) e por esse motivo optou-se por descartá-la. Desta forma, todas as imagens estudadas possuem o mesmo número de bandas espectrais (6) e a mesma resolução espacial (30 m). Por motivo similar descartou-se também a Banda 8 do Landsat 7. Essa banda pancromática (com comprimento de onda 0,52 a 0,9  $\mu\text{m}$ ) é exclusiva do sensor *Enhanced Thematic Mapper* e possui uma resolução espacial de 15 m; a mesma não existe nos sensores dos satélites Landsat 4 e 5. Por outra parte, o aumento de resolução espacial tem-se revelado pouco significativo em estudos com frações (KAWAKUBO, 2010, p. 58 e 59). Na metodologia de seu trabalho (p. 70) este pesquisador decide reamostrar às imagens utilizando pixel de 60 m no lugar da resolução nativa de 30 m por causa dessa propriedade. Agindo dessa maneira o

autor do estudo conseguiu maior agilidade na velocidade de processamento ao diminuir a resolução espacial e o volume da massa de dados sem perder informação. Tal procedimento torna-se importante quando se trabalha com extensos territórios e imagens grandes compostas por mosaicos.

**Tabela 8. Características específicas das 7 bandas espectrais comuns aos sensores dos satélites Landsat 4, 5 e 7.**

Mostra-se o intervalo do comprimento de onda, a resposta espectral, a resolução espacial e as aplicações mais utilizadas. Fonte NASA. Compilado pelo autor.

| Banda | Intervalo do comprimento de onda | Resposta Espectral    | Resolução Espacial | Aplicações   |
|-------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|--|
| 1     | 0,45-0,52 $\mu\text{m}$          | Azul-Verde            | 30 m               | Estudos de águas costeiras, discriminação solo/vegetação, identificação de objetos artificiais.                  |
| 2     | 0,52-0,60 $\mu\text{m}$          | Verde                 | 30 m               | Discriminação da vegetação saudável/não saudável, identificação de objetos artificiais.                          |
| 3     | 0,63-0,69 $\mu\text{m}$          | Vermelho              | 30 m               | Identificação de espécies vegetais, identificação de objetos artificiais.  |
| 4     | 0,76-0,90 $\mu\text{m}$          | Infravermelho Próximo | 30 m               | Monitoramento da umidade do solo, monitoramento de formações vegetais, identificação de corpos d'água.           |
| 5     | 1,55-1,75 $\mu\text{m}$          | Infravermelho Médio   | 30 m               | Monitoramento do conteúdo da umidade na vegetação.   |
| 6     | 10,40-12,50 $\mu\text{m}$        | Infravermelho Termal  | 120 m<br>60 m (L7) | Temperatura superficial, monitoramento de stress na vegetação, diferenciação de nuvens, monitoramento vulcânico. |
| 7     | 2,08-2,35 $\mu\text{m}$          | Infravermelho Médio   | 30 m               | Discriminação de minerais e rochas, conteúdo de umidade na vegetação.  |

## 6) RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme foi apresentada na seção 5 (**Metodologia de trabalho**), a pesquisa realizada envolveu diferentes etapas que foram produzindo os resultados que, apresentados na ordem de execução, relacionamos a seguir.

### 6.1) SELEÇÃO DAS IMAGENS. SEPARAÇÃO POR QUALIDADE VISUAL

Nessa fase, executada inicialmente em abril de 2009, foram selecionadas 44 imagens dentre mais de uma centena listada no site do USGS que abrangiam o território estudado. De acordo com o estabelecido no item 6.4.2 da metodologia (**Identificação das melhores imagens a serem comparadas**) as cenas completas que poderiam ser empregadas na análise foram identificadas e classificadas em três categorias: **Muito boas**; **Boas**; e **Utilizáveis** (ver tabela 9). Posteriormente, em novembro de 2010, incorporamos mais uma imagem do Landsat 5 ao grupo das muito boas. Esta cena, capturada em 18/04/2010 resultou de grande importância, sendo escolhida para formar o intervalo superior, de data mais recente, em um dos pares de imagens que subsidiaram o cerne desta pesquisa.

**Tabela 9. Apresenta os grupos de imagens, separados pela qualidade, que produziram o gráfico mostrado na Figura 10.**

A frequência dos diferentes sensores em cada categoria indica uma clara predominância das imagens geradas pelo Landsat 7 (ETM+).

| <b>Categoria</b> | <b>Quantidade</b> | <b>TM4</b> | <b>TM5</b> | <b>ETM+</b> |
|------------------|-------------------|------------|------------|-------------|
| Muito boas       | 9                 | 1          | 3          | 5           |
| Boas             | 19                | 0          | 0          | 19          |
| Utilizáveis      | 17                | 0          | 5          | 12          |
| <b>Total</b>     | 45                | 1          | 8          | 36          |

Para poder chegar a uma classificação onde se considerassem as características de qualidade visual das imagens seguindo um critério de avaliação o mais isonômico possível, adotaram-se as seguintes considerações:

- a) Toda imagem, proveniente das coleções dos sensores TM4, TM5 e ETM+ que tivessem menos de 40 % de cobertura de nuvens nas cenas da Órbita 219, Ponto 076<sup>20</sup> seriam consideradas aptas para serem processadas.
- b) As imagens com 0% de cobertura de nuvens seriam consideradas, automaticamente, como integrantes da categoria “**Muito boas**”.
- c) As imagens coletadas depois de outubro de 2003 pelo satélite Landsat 7 (sensor ETM+), não seriam consideradas como integrantes da categoria “**Muito boas**” mesmo que a cobertura de nuvens fosse igual a 0.
- d) As imagens com menos de 40 % de cobertura de nuvens que tivessem a área de abrangência da aglomeração urbana de São Paulo totalmente livre de nuvens integrariam a categoria “**Boas**”.
- e) As imagens com menos de 40 % de cobertura de nuvens que tivessem a área de abrangência da aglomeração urbana de São Paulo parcialmente afetada pela cobertura de nuvens integrariam a categoria “**Utilizáveis**”.

## 6.2) CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA

De acordo com o relatado no item 5.6.2 (Correção Radiométrica e ajuste da Reflectância), uma forma de realizar a correção radiométrica nas imagens provenientes de plataformas orbitais com sensores multiespectrais, é por meio do ajuste dos valores de reflectância. A calibração da reflectância nas imagens se consegue substituindo o número digital ou *digital number* (algarismo inteiro) que aparece inicialmente em todas as imagens quando elas são fornecidas no site do Serviço Geológico Norte-Americano (USGS) pelo valor efetivo da reflectância medida (fração < 1). Porém, acontece que para fazer essa substituição de forma correta, deve-se realizar a “calibração” nos pixels em todas as bandas espectrais que compõem a coleção ou “pacote” de imagens da mesma área a ser calibrado. Conforme apontado anteriormente, no caso das imagens utilizadas nesta pesquisa,

---

<sup>20</sup> Conforme explicado anteriormente, a maior parte da RMSP está contida nesta cena.



todas provenientes dos satélites da série Landsat (TM e ETM+) esses parâmetros são oferecidos, na forma de texto digital que acompanha os “pacotes” de dados compactados nos quais as imagens são entregues aos usuários (ver exemplo nos Anexos). Evidentemente é imprescindível aplicar a calibração radiométrica em toda a superfície da cena processada, antes de formar o mosaico e recortá-la.

Em março de 2009, tivemos a oportunidade de realizar os primeiros testes com um algoritmo específico para efetuar o ajuste da reflectância nas imagens da série Landsat, ou seja, incluindo os sensores dos satélites Landsat 4, 5 e 7. A rotina denominada “*TM Data Calibration*” foi programada por Tan Kun, à época estagiando no CIESIN sob a orientação do Prof. Dr. Christopher Small. O algoritmo realiza precisamente a operação de substituição do Número Digital pelo valor correto de reflectância atuando como uma função anexa ao Sistema de Processamento de imagens de sensoriamento remoto ENVI. Este aplicativo foi atualizado várias vezes, até chegar a sua última versão, em junho de 2009, quando ficou terminada. A rotina executa o processamento (para ajuste de reflectância) nos arquivos digitais (coleção de 6 bandas) das cenas obtidas pelos sensores TM e ETM+ dos satélites Landsat 4, 5 e 7.

Por causa de que a decisão de utilizar as duas cenas na composição final da área de estudos selecionada só foi tomada após terem sido processadas todas as cenas que potencialmente poderiam servir para a pesquisa, e também devido ao fato de que cada imagem que compus individualmente o mosaico recortado nas dimensões apontadas na Figura 12 possuía suas próprias características (o arquivo com os dados de calibração de uma imagem Órbita 219, Ponto 76 – parte Norte – e diferente de aquele que contém os dados da imagem Ponto 77 – parte Sul), se fez absolutamente necessário efetuar o recorte espacial do mosaico logo após sua execução utilizando como fonte as imagens já ajustadas na calibração radiométrica.

Os resultados deste processo resultaram em mais argumentos a favor de realizar, inicialmente o mosaico georreferenciado e, logo a seguir, o recorte da imagem maior produzida pelo mesmo. Atentando para o fato de que, se as imagens mosaicadas em seu estado natural tinham um “tamanho digital” grande, as produzidas com as cenas calibradas eram muito maiores, uma vez que, como foi mencionado antes, o processo de calibração transforma o Número Digital (valor inteiro) em um algarismo fracionário sempre menor que um (1) e com precisão de seis (6) ou mais casas

decimais. Em função de características próprias da forma de armazenamento de dados nos computadores um valor fracionário ocupa, no mínimo, o dobro do espaço na memória (disco rígido) destas máquinas.

No entanto, outra dificuldade surgiu, e precisou de muito esforço para ser resolvida. Como foi explicado no item 5.5.3. (Triagem das imagens e a região de estudos), as cenas Landsat fornecidas pelo USGS apresentam uma considerável superfície onde os pixels não contém informação; mesmo as geradas pelo sensor ETM+ anteriores a 2003 (SLC funcionando) exibem esta característica, típica condição de formação de uma imagem inclinada que é inserida numa matriz retangular. A ausência de informação é representada pelo valor zero, indicativo da cor mais escura em uma escala de tons de cinza no intervalo 0 – 255, onde o maior valor corresponde ao branco. Agora, ao aplicar o algoritmo de calibração da reflectância a todas as bandas da cena, inevitavelmente os pixels com valor zero são submetidos às complexas operações matemáticas que convertem os Números Digitais em valores de reflectância, e ganham um ND diferente de zero. Isto acontece porque o sistema de calibração é incapaz de diferenciar os pixels com valor zero da beirada das imagens dos pixels com valor zero que eventualmente possam vir aparecer na parte que constitui a verdadeira imagem captada pelo sensor, onde é representada a energia radiante refletida pela superfície terrestre (por exemplo, na superfície de lagos com águas calmas, límpidas e profundas, aonde a REM proveniente do sol é totalmente absorvida).

A dificuldade apareceu quando se iniciou o processo de “colar” as imagens da órbita 219 Ponto 76 (porção Norte), com as do Ponto 77 da mesma Órbita (porção Sul). Simplesmente o programa não permitia completar o mosaico, ou o criava de forma errada. O sistema de tratamento de imagens de sensoriamento remoto que utilizamos (ENVI 4.7) oferece a ferramenta de criação de mosaicos georreferenciados. Esta opção de processamento efetivamente permite fundir os pixels de uma imagem com os da outra, em função de sua posição no sistema de coordenadas de referência. Quando há superposição, o usuário decide qual das imagens ficará “por cima” da outra. Adicionalmente, na janela onde são declaradas as diferentes alternativas disponíveis para completar o mosaico, deve-se indicar qual é o valor do pixel a ser considerado “transparente”. Depois de muitas tentativas infrutíferas, percebeu-se que se as imagens não tivessem sido corrigidas pela

calibração radiométrica, sem dúvidas este valor seria zero, mas, ao efetuar a calibração, conforme citado acima, esses valores passaram a ser números fracionários muito próximos de zero, e conseqüentemente diferentes desse valor. A solução encontrada foi a de executar outra função do programa ENVI, denominada *Band Math* (Matemática de Bandas), criando uma imagem intermediária (antes de aplicar efetivamente o mosaico), ainda contendo os valores calculados de reflectância, onde os pixels que apresentaram quantias inferiores a zero foram trocados pelo dígito zero (0). Para atingir esse objetivo, aplicou-se a seguinte fórmula a todas as bandas espectrais:

$$0 > b1 < 1$$

Onde (b1) indica o nome da cena/coleção de seis bandas em que o dígito zero é restaurado. O resto dos pixels deverão apresentar valores de reflectância contidos no intervalo entre 0 e 1.

A partir desse momento, a função de completar o mosaico, a etapa seguinte no processamento digital das imagens, pode ser executada sem maiores problemas. Ainda incluindo na mesma operação espacial o recorte do mosaico resultante no subconjunto menor, e aplicando como referência as dimensões de uma imagem padrão, conforme mostrado na Figura 14 acima.

### **6.3) IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS**

Na seção 5.5.3 (Triagem das imagens e a região de estudos) ficou explicitado qual foi o método adotado para identificar a área de estudos, assim como os motivos que levaram, primeiro, a efetuar os mosaicos, e depois recortá-los no tamanho final. Adicionalmente, o processo de calibração radiométrica também contribuiu para que fosse possível completar as operações citadas.

Uma vez decidida a formação dos mosaicos juntando as duas cenas da mesma órbita de passagem (219), foi necessário incluir o contorno dos municípios que integram a Região Metropolitana de São Paulo.

Utilizando como referência os extremos ocidental e oriental dos referidos contornos municipais, com uma folga de 5 km, e os extremos setentrional e meridional, com uma folga de 15 km, foi determinado o limite do recorte retangular. O resultado, já apresentado à Figura 12, exhibe claramente o contínuo urbano da Região

Metropolitana de São Paulo ao centro. Na borda sudoeste da imagem aparece uma cunha não imageada, que representa a porção da superfície compreendida no enquadramento que estaria coberta pela passagem do satélite na órbita vizinha (218). Não foi necessário preencher este espaço com dados espectrais considerando que essa porção do território está, sobretudo, ocupada pelo mar ou por terra além do limite da RMSP. As dimensões finais da imagem recortada são 165 x 128 km, compostos por uma matriz de 5.500 x 4.250 pixels que ocuparam 561 megabytes de espaço em disco.

Uma vez atingido o objetivo almejado o arquivo digital resultante foi salvo, para servir como referência padrão aos quatro mosaicos que foram gerados a partir das imagens selecionadas na etapa seguinte.

#### **6.4) IDENTIFICAÇÃO DOS MELHORES PARES**

Segundo especificado na seção 5.5.2 (Identificação das melhores imagens para serem comparadas), o procedimento para selecionar as imagens mais adequadas para efetuar um estudo comparativo na série temporal contemplada (com imagens capturadas entre 1986 e 2010) envolveu a utilização de um conjunto externo de algoritmos, não ligados aos programas mais conhecidos de tratamento digital de imagens de sensoriamento remoto ou geoprocessamento. O mesmo consiste em uma coleção com mais de 70 rotinas específicas para manipular dados gráficos e cartesianos que permite gerar ilustrações com diversos graus de complexidade, inclusive em 3D, e oferece também a possibilidade de produzir mapas em diferentes projeções cartográficas. *Generic Mapping Tools - GMT*, que na atualidade encontra-se na sua versão 4.5.7, foi criado por Paul Wessel e Walter H.F. Smith, na *School of Ocean and Earth Sciences and Technology, University of Hawaii* em 07 de outubro de 1991, com a ajuda de um conjunto de voluntários em diferentes locais do mundo e está disponível como código aberto de domínio público em: <http://gmt.soest.hawaii.edu/> (WESSEL e SMITH, 1991).

A rotina específica para produzir o gráfico apresentado na Figura 10 acima, foi gentilmente cedida pelo Dr. Christopher Small, do *Center for International Earth Science Information Network – CIESIN, Columbia University*, e adaptada por nós para atender os requerimentos específicos do conjunto de imagens estudadas. O algoritmo, que pode ser executado em um computador pessoal mediante um artifício

para emular o ambiente Unix, requer que se disponibilizem as três listas que separam as imagens segundo a presença de nuvens (Grupos 1, 2 e 3), e que se indique qual o critério temático para se utilizarem os símbolos geométricos. Pode-se consultar um exemplo deste programa na listagem que aparece nos Anexos desta tese.

Posteriormente, analisando o gráfico da Figura 10, que foi criado em 2009, se optou por adicionar a imagem do satélite Landsat 5, coletada em abril de 2010. Após cuidadosa consideração chegou-se a estabelecer três bons pares, conforme aparece demonstrado na Figura 15. Porém o par assinalado com a cor violeta, correspondente ao período final do mês de outubro entre os anos 1989 e 2000, foi desconsiderado porque o par anterior, formado no início de agosto entre os anos 1986 e 2005 abrangia um período de tempo muito maior, e com sobreposição temporal com aquele formado em abril entre 2000 e 2010.

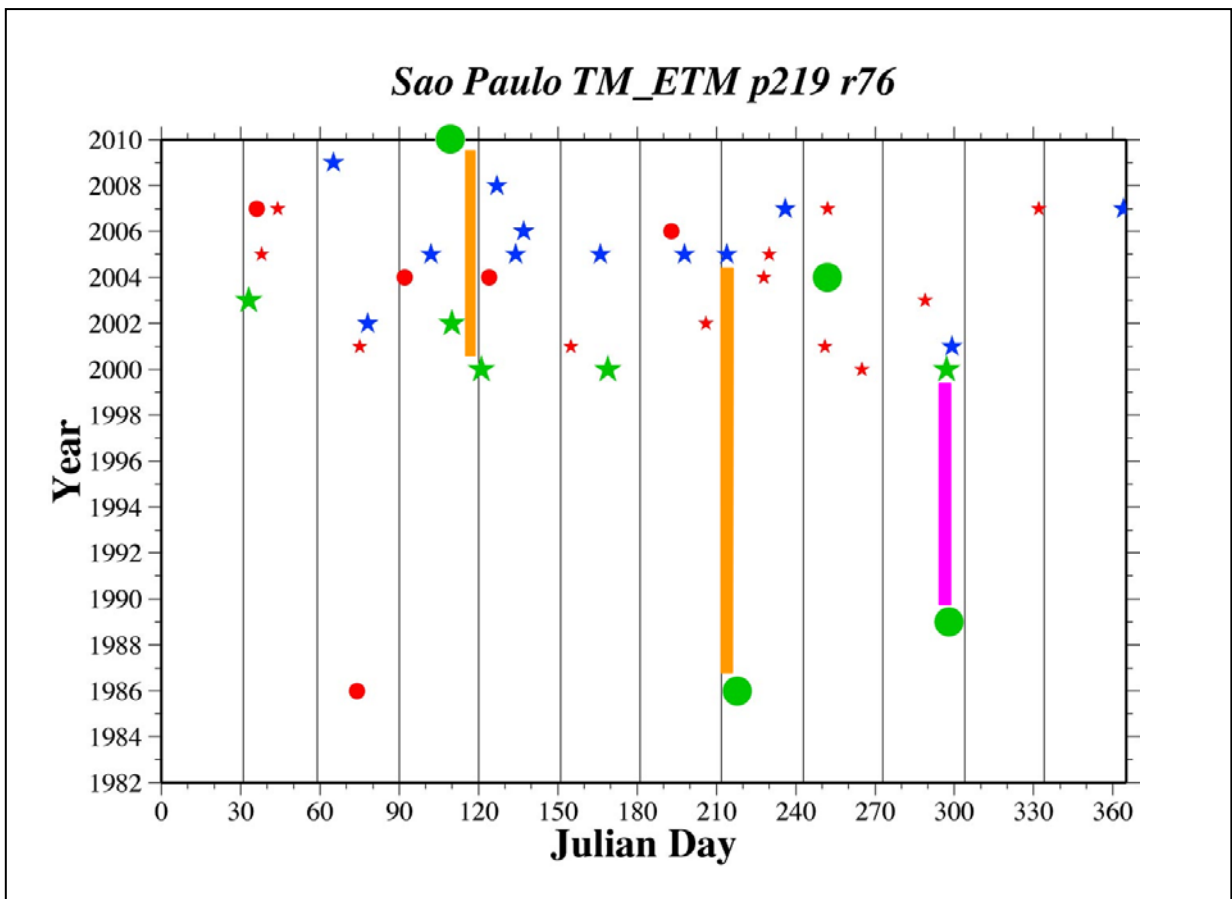


Figura 15. Novo gráfico de distribuição das imagens no tempo, agora atualizado até março de 2010. Os melhores pares a ser considerados aparecem destacados na cor ocre. O correspondente à barra na cor magenta não foi utilizado.

Os pares que efetivamente foram analisados aparecem destacados com a cor ocre. Eles estão formados pelas imagens LS5 1986 (coletada em 06/08/1986) e LS7 2005 (coletada em 02/08/2005); LS5 2000 (coletada em 30/04/2000) e LS5 (coletada em 18/04/2010). Na Tabela 10 aparecem relacionadas às imagens que compõem esses pares e o ângulo de incidência da radiação solar no momento do registro.

**Tabela 10. Apresentam-se as oito cenas brutas dos satélites Landsat TM e ETM+ que foram processadas.**

Notem-se as datas, horário e elevação solar nos pares 1986 – 2005 e 2000 – 2010 que facilitaram a combinação. Elaboração própria.

| Imagens         | Satélite  | Sensor | Dados na aquisição |         |                        |
|-----------------|-----------|--------|--------------------|---------|------------------------|
|                 |           |        | Data               | Horário | Elevação Solar (graus) |
| 219076 & 219077 | Landsat 5 | TM     | 06/08/1986         | 12:26   | 33.22                  |
| 219076 & 219077 | Landsat 7 | ETM+   | 02/08/2005         | 12:53   | 36.97                  |
| 219076 & 219077 | Landsat 7 | ETM+   | 30/04/2000         | 12:57   | 40.90                  |
| 219076 & 219077 | Landsat 5 | TM     | 18/04/2010         | 12:55   | 43.39                  |

### 6.5) ARTICULAÇÃO EM MOSAICO E RECORTE.

Como é possível observar, os dados e as imagens utilizados na presente pesquisa são influenciados por todas as características próprias das imagens orbitais, conforme o item 5.6.2 (Correção Radiométrica e ajuste da Reflectância). Então, fica evidente que para poder organizar um estudo comparativo como o aqui apresentado é imprescindível que a superfície analisada seja perfeitamente coincidente. Isto só pode ser alcançado porque todas as cenas dos três (3) sensores utilizados (Landsat 4, 5 e 7) têm uma órbita e uma superfície de leitura equivalente, além das outras características em comum, anteriormente citadas, ou seja, resolução espacial, espectral e radiométrica idênticas nas seis bandas empregadas.

Então, como a decisão de criar o mosaico e recortá-lo de acordo com as dimensões calculadas já tinha sido tomada, procedeu-se a sua execução.

O sistema de tratamento de imagens de sensoriamento remoto que utilizamos (ENVI 4.7) oferece a função de criação de mosaicos georreferenciados. Esta alternativa efetivamente permite fundir os pixels de uma imagem com os da outra, em função de sua posição no sistema de coordenadas de referência. Quando há superposição, o usuário decide qual das imagens ficará “por cima” da outra. Na janela onde são declaradas as diferentes opções disponíveis para completar o mosaico, deve-se indicar qual é o valor do pixel a ser considerado “transparente”. Adicionalmente, o sistema permite também, entre várias outras possibilidades, a formação de um subconjunto espacial que pode ser estabelecido interativamente ou mediante a aplicação de uma imagem de referência. Neste caso, selecionamos a segunda alternativa, indicando a imagem padrão que tinha sido criada previamente – ver item 6.3 (Identificação da área de estudos).

Finalmente, o procedimento de executar o mosaico georreferenciado com as cenas básicas, foi completado com sucesso nesta etapa, utilizando como insumo as oito (8) cenas selecionadas para compor as quatro (4) imagens que foram processadas, ver Tabela 10 e item 6.4 (Identificação dos melhores pares).

Assim, as oito cenas completas dos satélites Landsat TM e ETM+ foram calibradas radiometricamente, fundidas nos mosaicos e recortadas pela imagem padrão. Como resultado se produziram quatro imagens:

- L5-1986 (Landsat 5 TM, coletada em 06 de agosto de 1986)
- L7-2005 (Landsat 7 ETM+, coletada em 02 de agosto de 2005)
- L7-2000 (Landsat 7 ETM+, coletada em 30 de abril de 2000)
- L5-2010 (Landsat 5 TM, coletada em 18 de abril de 2010)

Antes de realizar a impressão dessas imagens procedeu-se ao ajuste interativo de seus histogramas, procurando utilizar os mesmos valores no três canais (7, 3 e 1, correspondentes às cores vermelho, verde e azul). Desta forma conseguiu-se melhor contraste na visualização e compatibilização entre as cores. As mesmas são apresentadas nas figuras 16, 17, 18 e 19, a seguir.

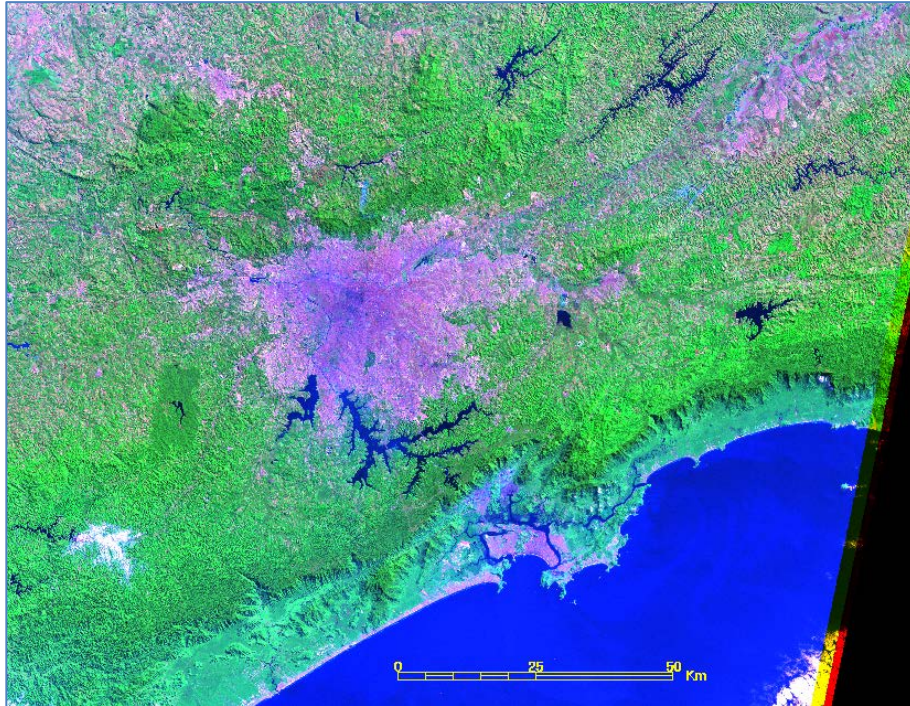


Figura 16. Composição em falsa cor da imagem gerada com as bandas multiespectrais (7, 4 e 1 / vermelho, verde e azul) do Landsat 5 TM. Cena capturada em 06/08/1986.

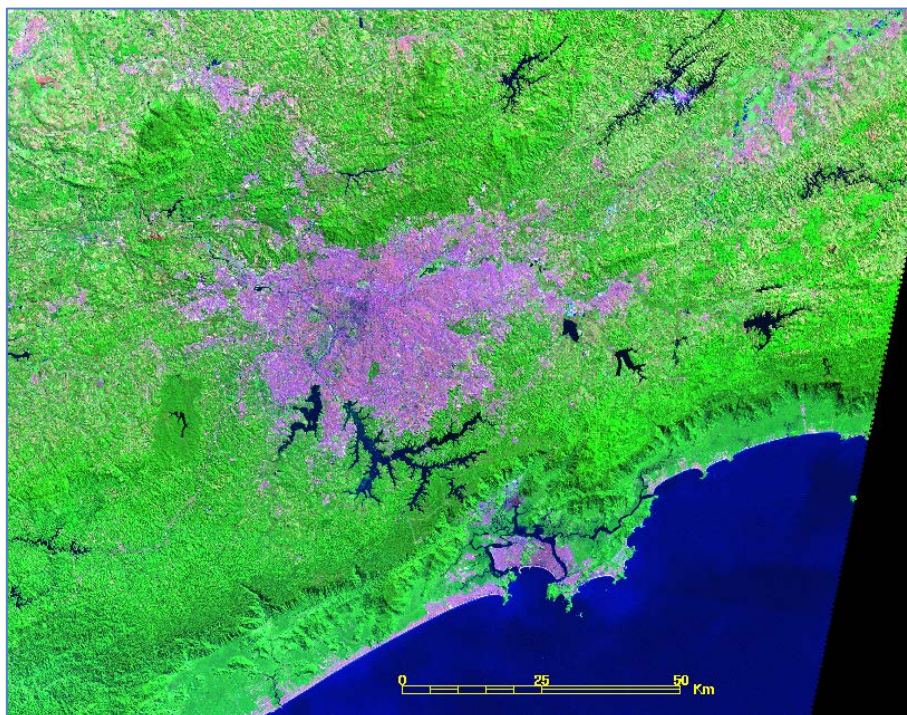


Figura 17. Composição em falsa cor da imagem gerada com as bandas multiespectrais (7, 4 e 1 / vermelho, verde e azul) do Landsat 7 ETM+. Cena de 02/08/2005, e tratada para retirar as falhas do SLC desligado em março de 2012.



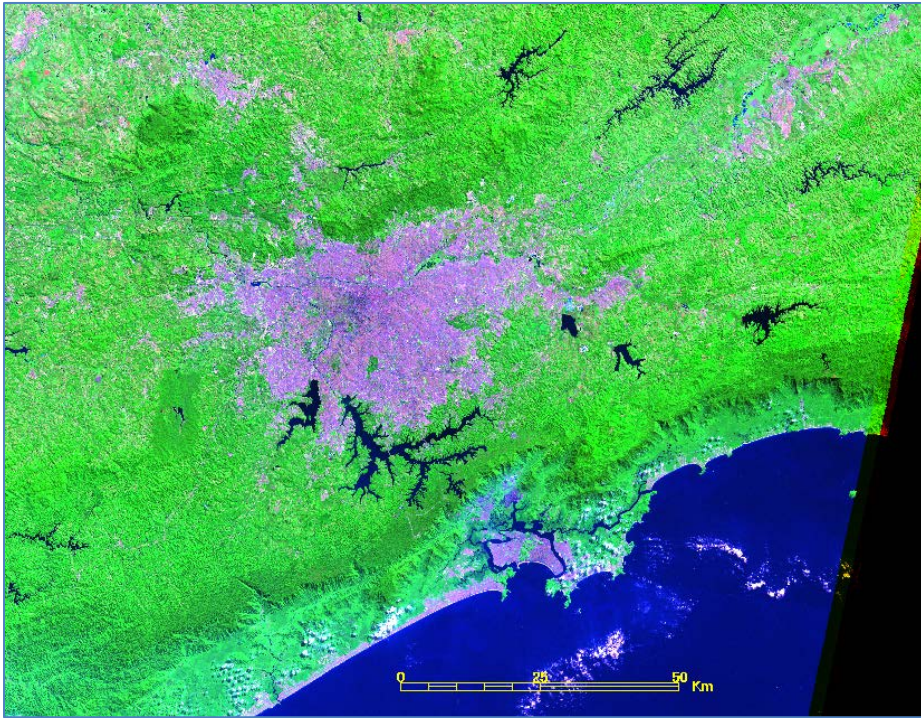


Figura 18. Composição em falsa cor da imagem gerada com as bandas multiespectrais (7, 4 e 1 / vermelho, verde e azul) do Landsat 7 ETM+. Cena capturada em 30/04/2000.

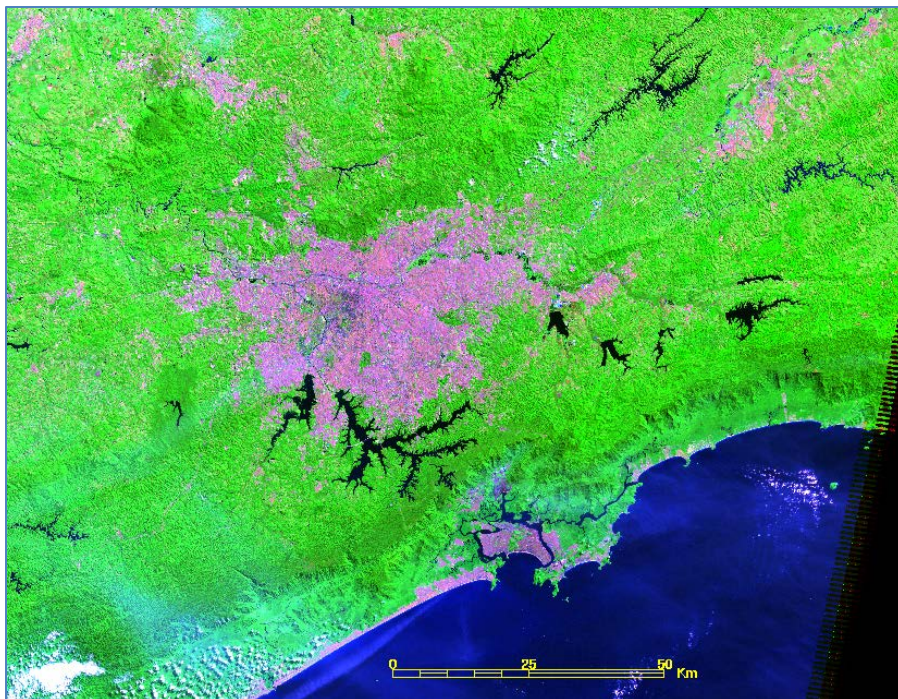


Figura 19. Composição em falsa cor da imagem gerada com as bandas multiespectrais (7, 4 e 1 / vermelho, verde e azul) do Landsat 5 TM. Cena capturada em 18/04/2010.

## 6.6) APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL – MLME

Como mencionado na metodologia (ver itens 4.1 e 4.2), o Modelo de Mistura Espectral consiste basicamente numa técnica de redução da dimensionalidade dos dados que estima as proporções dos diferentes tipos de materiais (denominados de componentes) em cada pixel da imagem.

A mistura que se produz no “interior” do pixel é uma característica que depende da escala e por tanto está diretamente relacionada com a resolução espacial do sensor. De uma maneira geral, quanto mais grosseira a resolução espacial do sistema-sensor, maior a probabilidade de se encontrar misturas (por causa da heterogeneidade da paisagem) e menor a chance de se encontrar “pixels puros” (KAWAKUBO, 2010). Quiçá, uma solução lógica para evitar essa situação, seria aumentar a resolução espacial com sua consequente redução nas dimensões dos pixels das imagens utilizadas. Tais imagens são chamadas de alta resolução quando o tamanho do pixel for menor do que 5 m (25 m<sup>2</sup> em superfície). O problema está em que o tecido urbano é ainda muito complexo e heterogêneo na medida em que “nos aproximamos”, aumentando a resolução espacial, então isto faz com que apareçam novas “complexidades” formadas por combinações de materiais. Se considerarmos que ao aumentar a resolução espacial implicitamente está se produzindo um incremento na capacidade do sensor em “enxergar” superfícies e objetos mais complexos, as probabilidades de achar pixels puros (ocupados por um único material) no lugar de aumentar diminuem, quando o que predomina na superfície analisada é o substrato urbano.

Nas circunstâncias desta pesquisa, esta aparente contradição resultou ser um fator positivo. Ela acrescenta, em nossa opinião, mais um argumento a favor de se utilizar sensores que produzam imagens de mediana resolução espacial em estudos urbanos. Considerando, claro está, as limitações que existem ao trabalhar com escalas mais reduzidas, caso isto empeça alcançar algum dos objetivos almejados.

De qualquer maneira, a aplicação da técnica do MLME tem como vantagem aparente a possibilidade de aumentar a capacidade de interpretação da superfície apresentada na imagem, identificando os materiais que compõem a cobertura da terra e os objetos dispostos sobre ela. Pois interpretar uma imagem em termos de proporções ou frações aproximadas dos diferentes materiais que compõem cada

pixel é mais simples de se fazer do que considerar valores separados de radiância, reflectância e emitância dos materiais presentes individualmente analisados. (ADAMS e GILLESPIE, 2006). Desta forma, a força do método de Análise de Mistura Espectral se sustenta no fato de explicitamente tomar em consideração os processos físicos responsáveis pelos valores de reflectância observados e, desta forma acomodar a existência dos pixels misturados, ou seja, "não puros", presentes nas diferentes bandas espectrais que foram registradas pelos satélites (PÉREZ MACHADO e SMALL, 2011).

Teoricamente, quando se conhecem exatamente os espectros dos materiais presentes na paisagem, os valores das imagens-frações geradas pelo modelo de mistura distribuem-se em intervalos de 0-1 e a soma das frações é igual a um (1). Acontece que, na realidade, é difícil conhecer exatamente quais são os materiais presentes na paisagem e o número exato de componentes (e suas proporções) que contribuem à mistura do pixel. Como é praticamente impossível considerar todos os espectros presentes na paisagem, tentam-se selecionar na análise de mistura apenas amostras dos espectros com maior representatividade, sempre utilizando um número pequeno dessas categorias. Ainda, por causa da composição em três cores das imagens em falsa cor, estabelecer três dessas categorias ou frações é o ideal.

Uma análise criteriosa das imagens produzidas pelos sensores Landsat TM e ETM+ indicou que a reflectância espectral da Agregação Urbana da Região Metropolitana de São Paulo pode ser descrita como uma mistura espectral de três (3) frações distintas: **Substrato**, **Vegetação** e **Sombra**.

Neste caso, o **Substrato** representa solo nu, rocas, e área construída, incluindo tanto superfícies impermeáveis como permeáveis, em geral superfícies de alta refletividade naturais ou artificiais. À **Vegetação** corresponde mata densa, arbustos, grama, ou zonas de cultivo. A mata densa e as árvores de dossel aberto contém um componente de sombra interna e aparecem representados ao largo da linha de mistura entre as frações de **Vegetação** e **Sombra**. À fração **Sombra** correspondem água límpida e sombra profunda. Água contendo sedimentos em suspensão e partículas de produtividade biológica é mais refletiva, em consequência ocorre a linha de mistura entre as frações **Substrato** e **Sombra**. Porém, em alguns casos aparece uma fração de **Vegetação** notável nos corpos d'água devido a presença de algas e macrófitas aquáticas cujo surgimento e crescimento foram potencializados

por diferentes graus de eutrofização. As nuvens no estão presentes no interior da área de estudos (definida pelos limites da Região Metropolitana de São Paulo) em nenhuma das quatro imagens utilizadas, porém, sim aparecem algumas ocorrências nas duas imagens do sensor Landsat 5 utilizadas (06 de agosto de 1986 e 18 de abril de 2010).

Desta maneira, a análise foi executada com base em um modelo linear de mistura espectral (MLME) de três componentes, que incorporou os alvos definidos pelas categorias **Substrato**, **Vegetação** e **Sombra**, no intuito de ressaltar o contraste entre essas categorias e evidenciar o tecido urbano.

Essas categorias, também conhecidas como frações (*endmembers*), uma vez calculadas foram representadas graficamente utilizando composições coloridas em falsa cor nas cores vermelha, verde e azul, respectivamente (ver Figuras 18, 19, 20 e 21). Os pares de imagens correspondentes ao verão (março de 2000 e 2010) e inverno (agosto de 1986 e 2005) foram combinados pela sua qualidade gráfica/espectral e consistência da iluminação solar, segundo o detalhado no item 6.4 (Identificação dos melhores pares), assim como pela data de ocorrência (ver Figura 15 e Tabela 10).

Ou seja, para poder aplicar a técnica de Análise Linear da Mistura Espectral (opção *Linear Spectral Unmixing* no software ENVI), se utilizaram as seis bandas espectrais (com 30 m de resolução espacial), que são comuns aos sensores TM e ETM+, nos quatro conjuntos de imagens selecionados, os quais já haviam sido convenientemente tratados e dimensionados para esse fim (ver itens 6.3 e 6.4). Como resultado, quatro imagens fração foram geradas, as mesmas são apresentadas nas Figuras 20, 21, 22 e 23 a seguir.

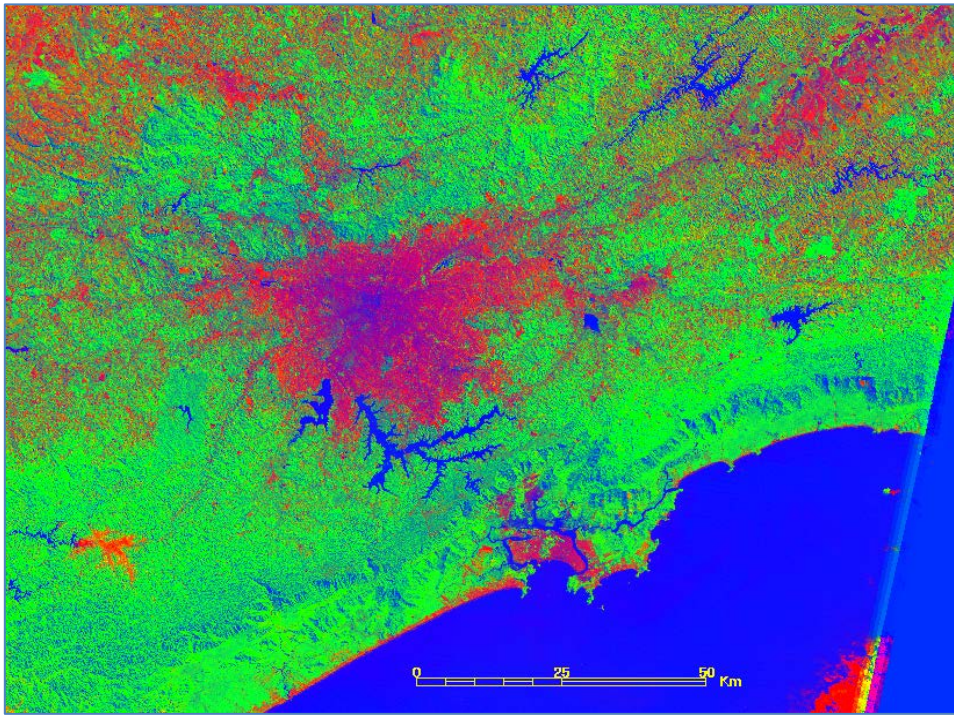


Figura 20. Composição em falsa cor da imagem fração gerada com as componentes (Substrato, Vegetação e Sombra / vermelho, verde e azul) do Landsat 5 TM. Cena capturada em 06/08/1986. Processamento pelo autor.

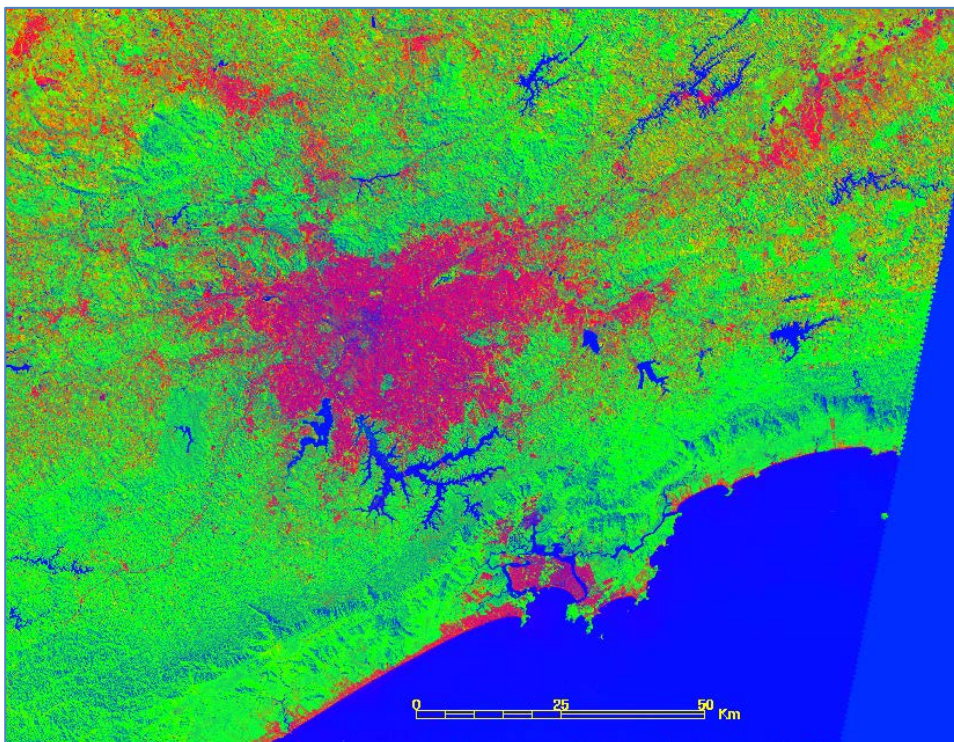


Figura 21. Composição em falsa cor da imagem fração gerada com as componentes (Substrato, Vegetação e Sombra / vermelho, verde e azul) do Landsat 7 ETM+. Cena capturada em 02/08/2005. Processamento pelo autor.

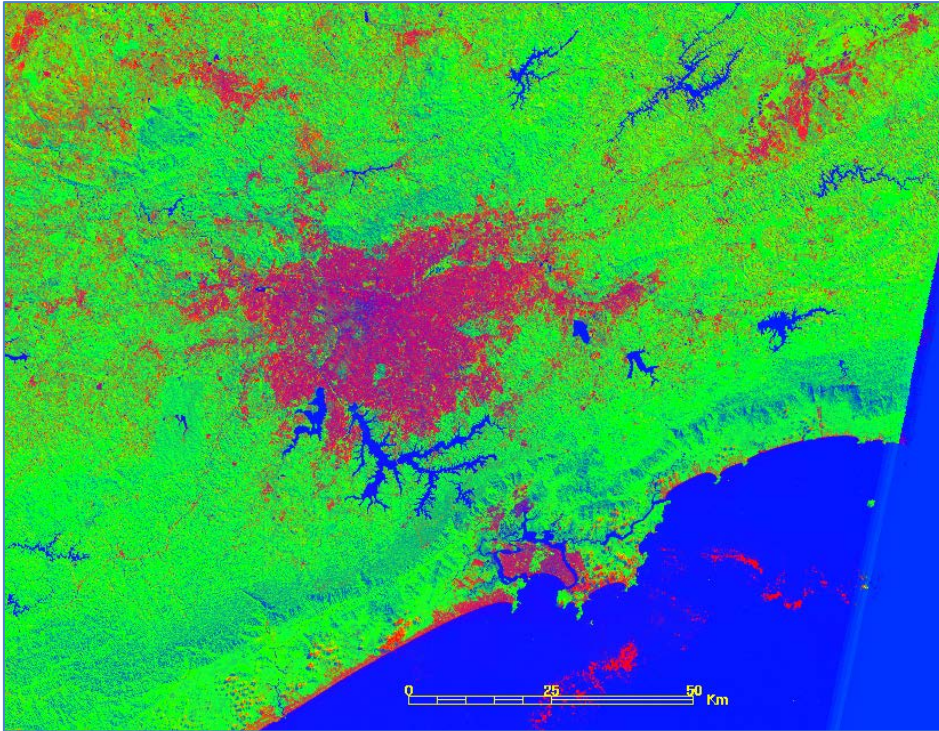


Figura 22. Composição em falsa cor da imagem fração gerada com as componentes (Substrato, Vegetação e Sombra / vermelho, verde e azul) do Landsat 7 ETM+. Cena capturada em 30/04/2000. Processamento pelo autor.

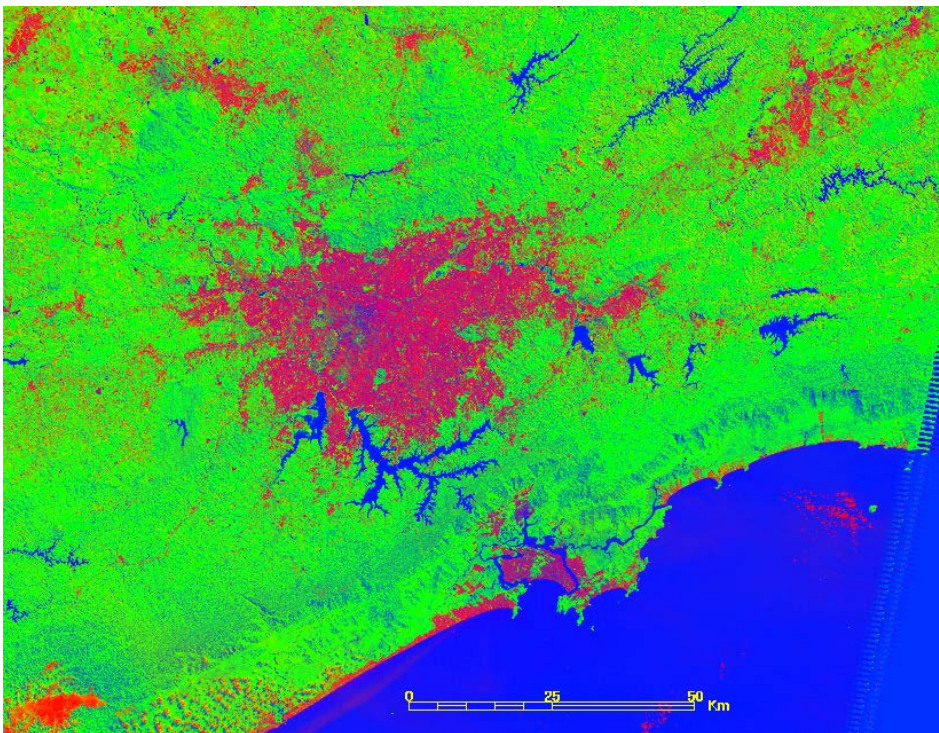


Figura 23. Composição em falsa cor da imagem fração gerada com as componentes (Substrato, Vegetação e Sombra / vermelho, verde e azul) do Landsat 5 TM. Cena capturada em 18/04/2010. Processamento pelo autor.

Conforme foi detalhado no item 4.1 (Modelos de Mistura Espectral), e no início deste (Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME), a fórmula matemática do MLME conduz a geração de um resíduo ( $r$ ), que inclui a adequação dos componentes considerados, o erro da modelagem e também os efeitos atmosféricos, do ângulo de radiação solar e de degradação do sensor. Este resíduo, quando é produzido pela aplicação do MLME do ENVI, mediante a opção *Linear Spectral Unmixing*, também gera uma matriz de valores, na forma de mais uma banda espectral, denominada *RMS - Root Mean Square* (Erro Médio Quadrático). Na realidade, neste componente especial, que possui exatamente as mesmas dimensões e resolução espacial que as outras três frações, se armazenam todos os valores residuais resultantes das operações estatísticas que foram aplicadas às seis bandas originais para convertê-las nas três imagens fração. Ou seja, tudo que "sobrou", estatisticamente falando, do processo de redução da dimensionalidade dos dados que permitiu a transformação dos seis (6) canais ou bandas espectrais em 3 imagens fração fica registrado no canal *RMS*. Resulta evidente que, se esta banda é gerada pelo sistema de processamento de imagens de sensoriamento remoto, sua visualização e utilização para outras operações de análise espacial devem ser perfeitamente possíveis.

Por este motivo, durante a etapa de aplicação da Análise Linear de Mistura Espectral - ALME às quatro imagens escolhidas para comparação decidi por utilizar esta banda para produzir uma composição em falsa cor substituindo um dos canais padrão, gerados no processo, pela banda *RMS*. Depois de algumas tentativas e erros, obtive um produto distinto trocando o canal correspondente ao **Substrato** (cor vermelha na composição colorida) pelo canal contendo os valores de ( $r$ ). Até é lógico que o canal *RMS* tenha produzido o resultado mais significativo quando substituiu a fração **Substrato**. Vejamos: Sabe-se que a banda que contém o *RMS* (Erro Médio Quadrático) guarda principalmente os erros do modelo utilizado, aqueles valores que de certa forma, não se encaixam em nenhuma das três componentes/categorias/frações produzidas. Por isso em lugar de serem desconsiderados pelo procedimento de análise, eles são guardados num quarto canal, ou banda, que só fica disponível após o processamento do MLME. Na aplicação do MLME neste estudo foi estabelecido que a fração definida como substrato representasse a categoria mais complexa no modelo, aquele componente que armazena as respostas espectrais (expressadas em valores de reflectância) da

parte urbanizada e das superfícies sem cobertura vegetal. Na fundamentação teórica dos Modelos de Mistura Espectral (ver itens 8.1 e 8.2) foi esclarecido também que este é, justamente, o ambiente mais complexo e heterogêneo em termos de variabilidade das respostas espectrais dos materiais que o compõem. Então é coerente pensar que ao substituir a banda que continha a fração **Substrato** pelo canal *RMS* sua expressão gráfica deveria mostrar aquelas variações no tecido urbano que não foram totalmente identificadas no processo de modelagem espacial.

Foi aplicado este raciocínio somente à imagem Landsat 5 (18/04/2010). Preferi esta cena por ser a mais recente e uma das melhores quanto a suas condições de visibilidade e qualidade da atmosfera. Assim, foi criada uma composição em falsa cor, desta vez produzida trocando o canal **Substrato** (vermelho) pelo ***RMS*** gerado no processo de Análise Linear da Mistura Espectral. Os canais **Vegetação** e **Sombra** (cores verde e azul respectivamente) permaneceram inalterados.

Para apresentar os resultados desta operação optou-se por colocar em cada figura, primeiro, a imagem produzida pela composição em falsa cor dos três canais correspondentes a **Substrato**, **Vegetação** e **Sombra** (cores vermelho, verde e azul, os tradicionais Red, Green, Blue das composições coloridas mais utilizadas no tratamento digital de imagens de sensoriamento remoto), e depois, a composição em falsa cor substituindo o canal Substrato pelo *RMS* gerado na etapa de Análise Linear da Mistura Espectral (também chamado de Unmix). Ver as Figuras 24, 25, 26 e 27.



Figura 24. Composição colorida da imagem fração Landsat 5 (18/04/2010). Na porção centro Norte destaca o Parque Ecológico do Tietê. No enquadramento superior, a combinação dos três componentes (**Substrato**, **Vegetação** e **Sombra** / vermelho, verde e azul) e depois, a combinação originada ao substituir o canal **Substrato** pelo canal **RMS**, calculados pelo Modelo Linear da Mistura Espectral.

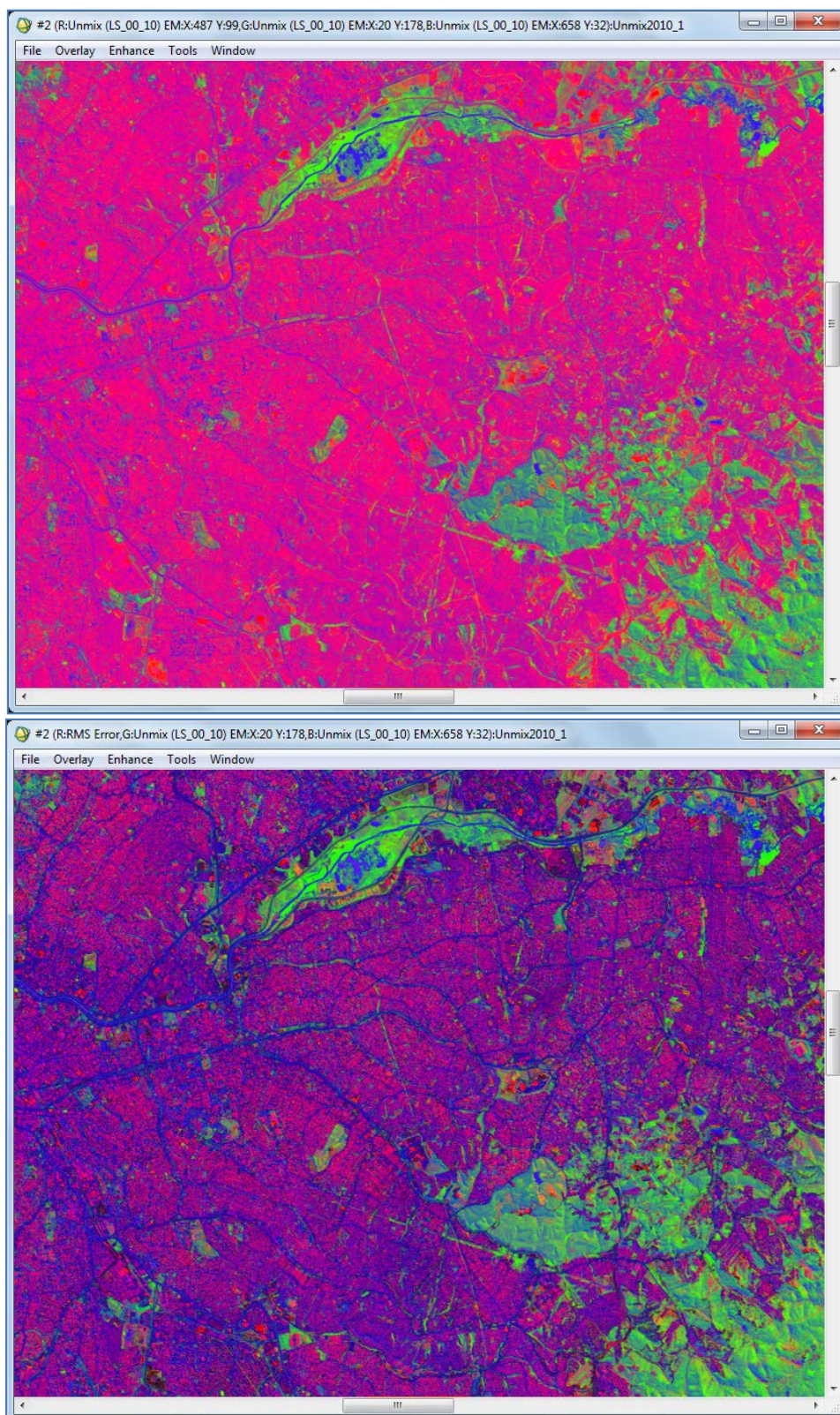


Figura 25. Composição colorida da imagem fração Landsat 5 (18/04/2010). Na porção centro-sul destaca o Campo de Marte. No enquadramento superior, a combinação dos três componentes (**Substrato**, **Vegetação** e **Sombra** / vermelho, verde e azul) e depois, a combinação originada ao substituir o canal **Substrato** pelo canal **RMS**, calculados pelo Modelo Linear da Mistura Espectral.

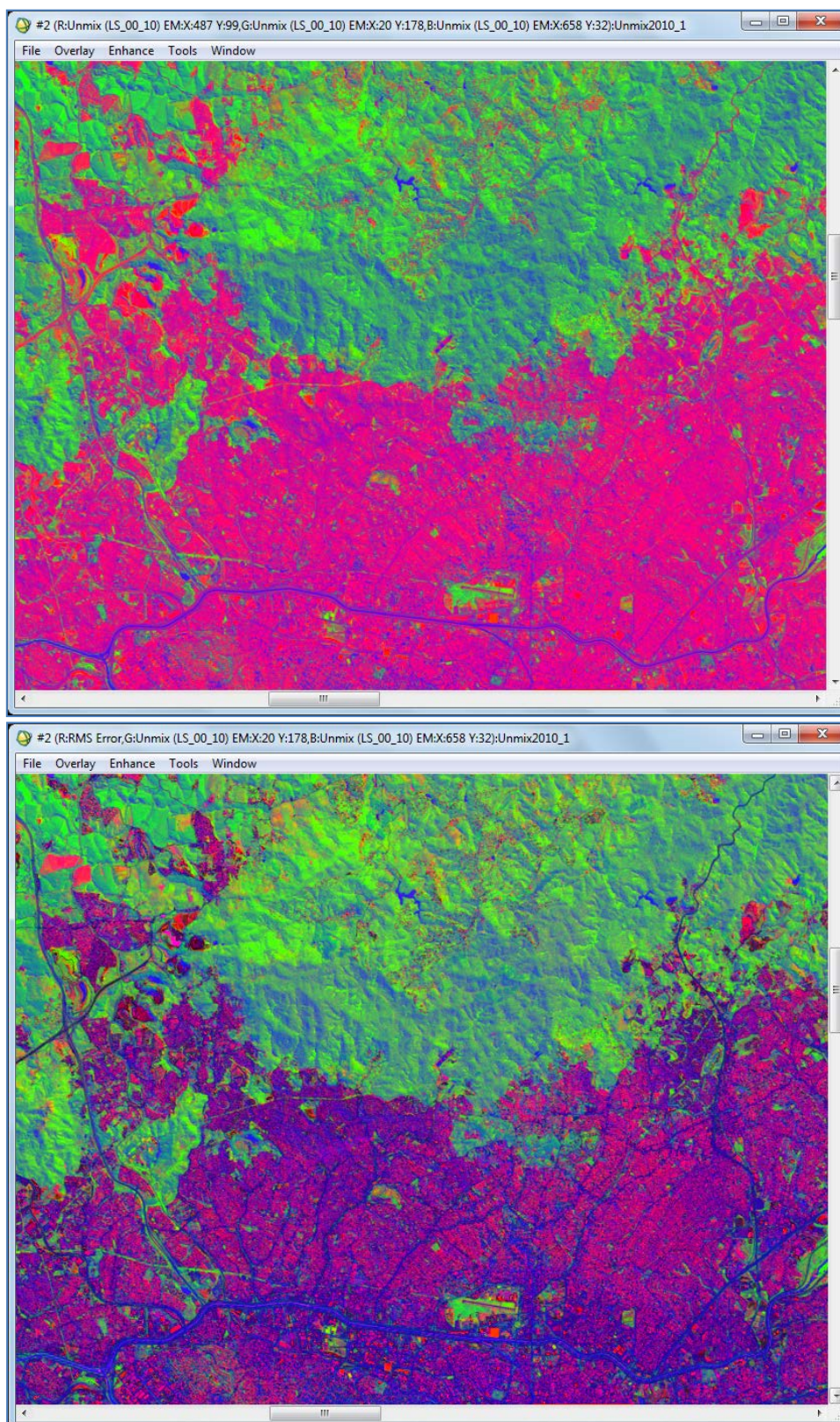


Figura 26. Composição colorida da imagem fração Landsat 5 (18/04/2010). Ao centro destacam o Campus da USP e a pista do *Jockey Club*. No enquadramento superior, a combinação dos três componentes (**Substrato**, **Vegetação** e **Sombra** / vermelho, verde e azul) e depois, a combinação originada ao substituir o canal **Substrato** pelo canal **RMS**, calculados pelo Modelo Linear da Mistura Espectral.

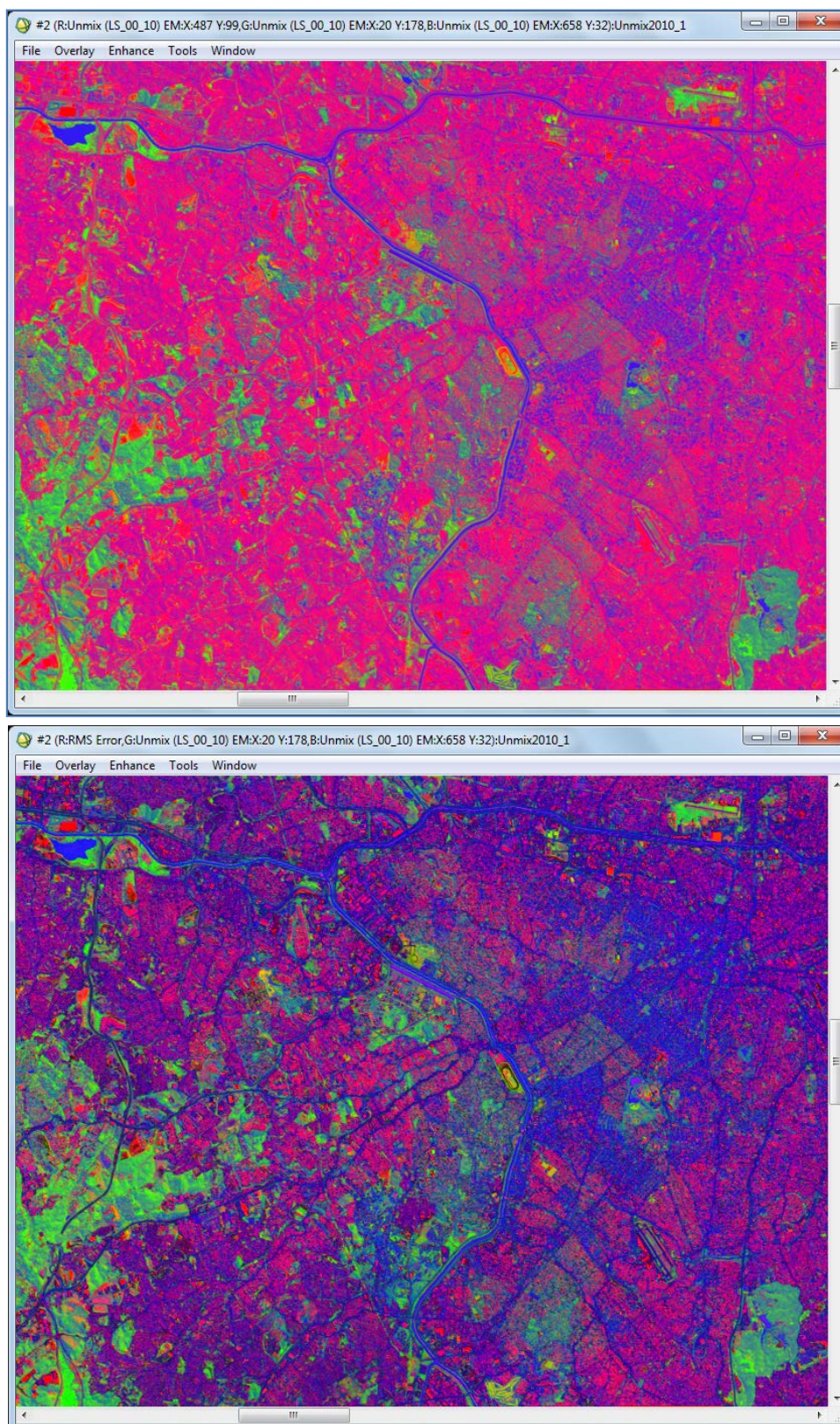
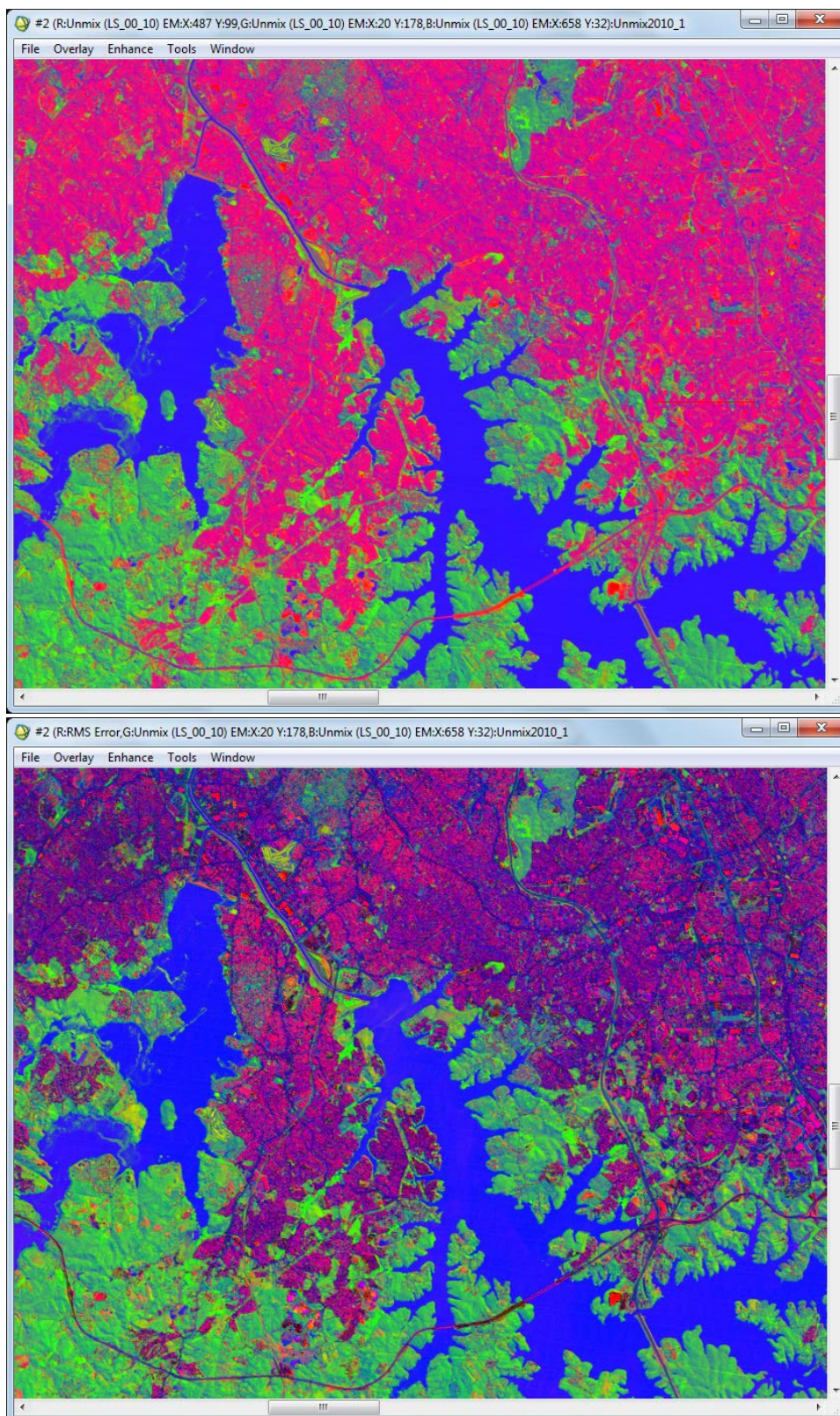


Figura 27. Composição colorida da imagem fração Landsat 5 (18/04/2010). Ressaltam os mananciais e o trecho sul do Rodoanel. No enquadramento superior, a combinação dos três componentes (**Substrato**, **Vegetação** e **Sombra** / vermelho, verde e azul) e depois, a combinação originada ao substituir o canal **Substrato** pelo canal **RMS**, calculados pelo Modelo Linear da Mistura Espectral.



A meu ver, a consequência desta operação foi surpreendente, embora os resultados gráficos impressos nunca sejam tão diáfanos e intensos como àqueles alcançados na tela do computador. Na imagem "alternativa" produziu-se uma transformação radical na visualização da superfície urbanizada. Surgiram matizes, contrastes e sombras que anteriormente não eram identificáveis. Imediatamente comecei a elucubrar sobre as possíveis implicações deste recurso de análise (por enquanto) visual. À primeira vista, a mais evidente seria para uso em planejamento urbano, sobretudo naquelas aplicações relacionadas com o sistema viário e o transporte de passageiros e cargas. Basta olhar para as figuras acima mencionadas (em especial, a Figura 26, que corresponde à Zona Centro-Oeste), para que se perceba, claramente, esta qualidade. As estradas, rodovias, grandes avenidas, e ruas aparecem destacadas, em tons de azul escuro, no fundo roxo - avermelhado das superfícies urbanizadas. E as alterações não param por aí: é visível que foram afetados também os substratos Vegetação e Sombra, que passaram a apresentar mais detalhes antes não percebidos, de forma equivalente.

Estudos conduzidos com as técnicas da análise espaço-temporais, utilizando imagens de sensoriamento remoto e os modelos de mistura espectral têm o potencial informar uma ampla variedade de perguntas relativas ao planejamento e às pesquisas de temática urbana (PÉREZ MACHADO e SMALL, 2011, p. 5). Embora outros autores tenham falado sobre as possíveis aplicações dos Modelos de Mistura Espectral em geral, e também da Análise Linear de Mistura Espectral no ambiente urbano (SMALL, 2001), (SMALL e LU, 2006), não conseguimos encontrar na literatura especializada nenhuma referência específica a se utilizar este recurso de substituição de uma das frações principais pelo canal dos resíduos.

O propósito principal de se exibir as quatro figuras supracitadas (24, 25, 26 e 27) foi demonstrar o efeito da substituição da fração Substrato pela fração RMS, comparando, no mesmo enquadramento, as duas alternativas. Para não perder a oportunidade de apresentar os importantes detalhes e nuances de variação no tecido urbanizado, optamos por selecionar fragmentos de 25 x 20 km em torno do núcleo central conurbado da aglomeração urbana da cidade de São Paulo. Mantendo a mesma escala (aproximadamente 1:200.000, bem maior que a empregada até o momento para mostrar o recorte da área de estudos), foi mudando-se a posição do centro da janela até completar um círculo aproximado. Este recurso,

muito empregado pelos usuários de sistemas *CAD* (*Computer Aided Design*) e Geoprocessamento, é conhecido como Pan.

A maneira de se tratar e exibir estes resultados faz necessário destacar que, quando se trabalha intensamente num ambiente georreferenciado, costuma-se prescindir de incluir nos mapas e imagens o valor da escala, tanto a numérica como sua forma gráfica. A razão principal de esta prática, de fato muito difundida, é que num sistema de geoprocessamento (seja um SIG, ou de tratamento de imagens de sensoriamento remoto), a mudança de escala se faz de forma muito rápida e dinâmica, aumentando ou diminuindo-a na conveniência do usuário (estes incrementos ou reduções interativos são chamados de Zoom + e Zoom -, respectivamente). Da mesma forma se prescinde do uso da seta do Norte, pois se entende que no referido ambiente georreferenciado, onde a projeção cartográfica e o sistema de coordenadas geográficas estão sempre presentes e ativos, sua inclusão na parte gráfica seria totalmente dispensável. Tais recursos complementares (ou anotações) são postergados para o momento em que se realize uma publicação mais formal, com qualidade cartográfica. Por outra parte, é bem conhecido o fato de que quando se utilizam mapas e imagens georreferenciadas para apresentações e publicações, é melhor não colocar uma escala numérica já que se no processo indicado houve-se uma alteração no tamanho (seja aumento ou diminuição) a mesma fica indicando um valor equivocado, enquanto a escala gráfica sempre conserva as dimensões corretas, desde que não haja deformações nas proporções da figura representada. Por esse motivo optou-se por colocar neste trabalho, sempre que possível, ao menos uma versão simplificada de escala gráfica.

### **6.7) ELABORAÇÃO DAS IMAGENS POR SUBTRAÇÃO**

Uma vez produzidas as quatro imagens fração (figuras 18, 19, 20 e 21), referentes aos dois pares selecionados (março de 2000/2010 e agosto de 1986/2005), na forma detalhada no item precedente (6.6 Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME), elas foram tratadas numa operação algébrica simples, de subtração, onde cada par produziu o resultado da diferença enunciada pela equação “imagem mais recente – imagem mais antiga”. Desta forma, o resultado gerou uma nova redução, neste caso de quatro imagens para duas (Figuras 28 e 29).

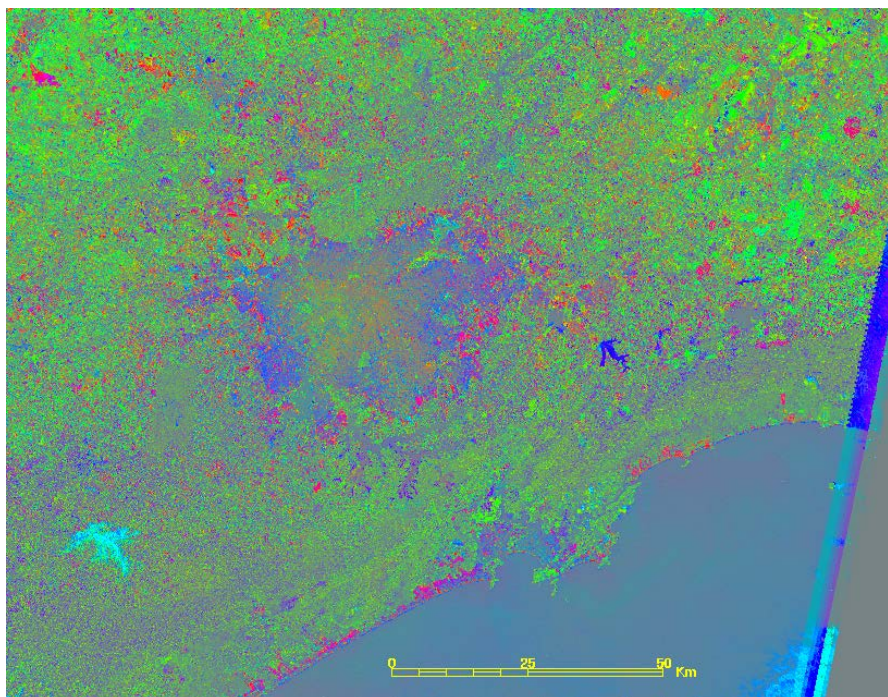


Figura 28. Composição em falsa cor produto da subtração das imagens fração (Landsat 7 2005 - Landsat 5 1986) As cores verde, vermelho e azul agora indicam a intensidade das mudanças nas frações Substrato, Vegetação e Sombra respectivamente.

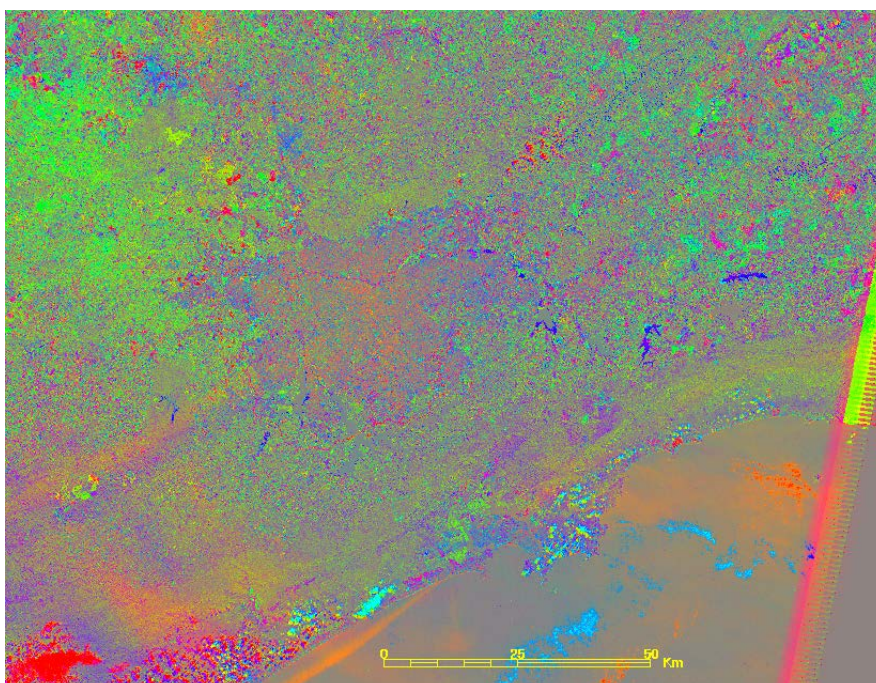


Figura 29. Composição em falsa cor produto da subtração das imagens fração (Landsat 5 2010 - Landsat 7 2000) As cores verde, vermelho e azul agora indicam a intensidade das mudanças nas frações Substrato, Vegetação e Sombra respectivamente.

A principal propriedade dessas duas imagens é que elas resumem todas as mudanças acontecidas no período representado pelo par que as originou. Ou seja, mantendo a mesma legenda, correspondente às frações **Substrato**, **Vegetação** e **Sombra**, agora elas indicam, em vermelho mais intenso, aquelas regiões onde houve maior número de mudanças, provocadas pela aparente diminuição da componente vegetação ante o avanço do substrato; as outras duas frações, nas cores verde e azul indicam o comportamento da vegetação e a sombra, respectivamente. Assim, as variações extremas são destacadas pelas cores mais "puras" e intensas em cada categoria:

- o vermelho intenso indica que houve diminuição da superfície vegetal, em princípio provocada pelo aumento na área construída (ou antropizada);
- o verde brilhante aponta que a vegetação surgiu em áreas antes cobertas por áreas urbanizadas, solo exposto ou água;
- o azul escuro distingue o avanço da água em áreas emergidas ou o aumento da sombra nas componentes substrato e vegetação.

Nas imagens diferença surgiram diversas outras combinações e gradações de matizes de cor, como amarelo, ciano, cinza, laranja, magenta, marrom, etc., contudo, basicamente guiadas pelas três propriedades supracitadas. Isto deve ser considerado como diferenças na reflectância em cada uma das categorias analisadas (expressadas nas cores Vermelha, Verde e Azul). Assim, as superfícies mais refletivas, em princípio pertencem ao **Substrato**, e as que absorvem mais (menos refletivas) são ocupadas por **Sombra**, segundo pode observar-se à Figura 30. A componente **Vegetação** mostra uma curva de reflectância que transita de valores baixos até altos. A componente **Sombra**, como já foi dito antes, pode aparecer "misturada" ao substrato indicando, por exemplo, prédios de maior altura, e à vegetação, como indicativo de vegetação com dossel mais elevado. No entanto, para o estudo em pauta, o aspecto mais relevante, e que logicamente ganhou maior ênfase, foi onde houve possível aumento na área construída em detrimento da superfície vegetal.



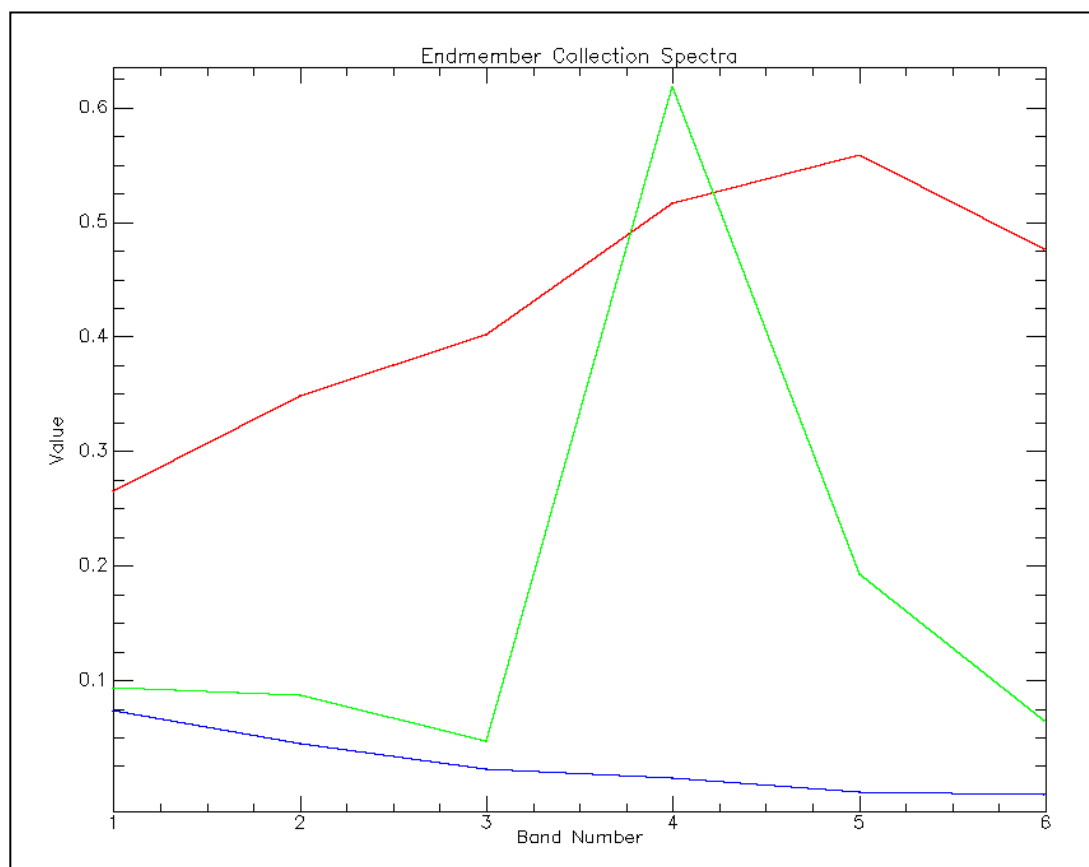


Figura 30. O gráfico apresenta o comportamento espectral da coleção das componentes (*endmembers*) no processo de agregação do MLME em três frações para a imagem Landsat 5 de 18/04/2010. As superfícies mais refletivas pertencem ao **Substrato** (linha vermelha), e as menos refletivas, são ocupadas pela **Sombra** (linha azul). A **Vegetação** (linha verde) apresenta uma curva de reflectância com valores altos e baixos.

De qualquer maneira, ao observar os últimos dois produtos (as imagens fração-diferença), resulta evidente que sua interpretação não é tarefa simples. Embora as áreas que mais interessam aparecem destacadas em vermelho brilhante (alta reflectância), há a questão do tamanho dos objetos a serem identificados. Lembre-se que a menor superfície que existe nas imagens analisadas é de  $900 \text{ m}^2$ , constituída pelo "átomo gráfico" (o *pixel*) de  $30 \times 30 \text{ m}$ . Supondo que muitos pixels da cor vermelha (ou seja, denotando aumento do substrato no período analisado), estivessem espalhados numa área assaz extensa, a percepção desse cúmulo de mudanças seria extremamente difícil de alcançar. No entanto, detectar uma concentração da mesma categoria de pixels, mesmo que esta apresentasse uma superfície menor na totalidade, seria um trabalho relativamente simples, porque

essas áreas destacariam como manchas vermelhas bem evidentes. É importante destacar, que as nuvens, por aparecerem como manchas brancas de alta refletividade nas imagens originais são incluídas pelo processo de separação de frações (*Spectral Unmix*) como superfícies que representam a fração substrato. Foi essa uma das razões pelas quais imagens com algum percentual de nuvens dentro da área de estudos principal não foram incluídas na melhor categoria no momento da seleção das imagens fonte.

Pelos motivos relacionados acima foi completada, inicialmente, uma análise visual cuidadosa no interior da área definida pela Região Metropolitana, com ênfase no território do Município de São Paulo. Depois realizou-se uma análise estatística, efetivada pela aplicação de máscaras para restringir o território de exame dentro da Região Metropolitana e do Município de São Paulo. As razões que justificam esta restrição territorial serão tratadas nos itens seguintes (6.8, Identificação de áreas conspícuas e 6.9, Aplicação do classificador por Árvore de Decisão).

#### **6.8) IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS CONSPÍCUAS**

Uma vez obtidas as duas imagens por subtração, correspondentes aos períodos de 19 anos (2005-1986) e 10 anos (2010-2000) representando as mudanças ocorridas nas três componentes (Substrato, Vegetação e Sombra) para os respectivos períodos de tempo calculados, o seguinte passo lógico a ser realizado seria a identificação e contabilização das áreas onde se produziram a maior quantidade de mudanças relativas ao aumento da fração Substrato em detrimento da fração Vegetação (e Sombra). Porém, conforme foi comentado anteriormente, embora as áreas com maior intensidade na ocorrência desta característica destacassem em vermelho nas imagens obtidas por subtração, existia uma gama de cores intermediárias que, ocupando toda a superfície destas, de fato mascaravam a evidência do fenômeno. Existiam formas contíguas, manchas e concentrações que sugeriam que tinham acontecido alterações nas superfícies urbanizadas, atraindo a atenção sobre estas áreas da cidade. Em consequência, e com o objetivo de esclarecer e melhorar a visualização do fenômeno estudado, ou seja, das regiões onde houve maior número de mudanças, fez-se necessária a aplicação de um poderoso recurso de análise especial denominado Classificador por Árvore de Decisão (*Decision Tree Classifier*).

## 6.9) APLICAÇÃO DO CLASSIFICADOR POR ÁRVORE DE DECISÃO

Conforme já foi descrito no item 4.4 da Base teórica e conceitual, o classificador por árvore de decisão é uma técnica de análise espacial do modelo de dados matricial que executa classificações por meio de um processamento em etapas sucessivas usando uma série de decisões binárias para alocação de pixels. Cada decisão separa pixels, pertencentes a um conjunto de imagens, dentro de duas classes baseadas numa determinada expressão dicotômica. Assim, é possível subdividir cada nova classe em mais duas classes, ou seja, podem-se definir tantos nós de decisão (que resultam em classes) quanto forem necessárias para gerar a classificação final.

Então, aplicou-se o classificador por Árvore de Decisão do software ENVI nas duas imagens obtidas por subtração (L7 2005-L5 1986, e L5 2010-L7 2000) a partir do Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME. Neste caso, a árvore de decisão estava formada por três nós de classificação, conforme representado à Figura 31.

A seguir as condições classificação da caixa do Substrato (Sub?) para um aumento de 20 % e redução de 10 % na Vegetação OU na Sombra: “(b1 GT 0.2) AND ((b2 LT -0.1) OR (b3 LT -0.1))”. Para mudar os índices e as cores do mapa de classificação resultante, basta clicar nas caixas coloridas da árvore de classificação (+Sub, +Veg, +Dark e No Change) e alterar conforme desejado. Valores lógicos seriam 1, 2, 3 para as cores RGB, correspondentes aos incrementos de Substrato (+Sub), Vegetação (+Veg) e Sombra (+Dark) e o índice 0 para o Cinza (No Change).

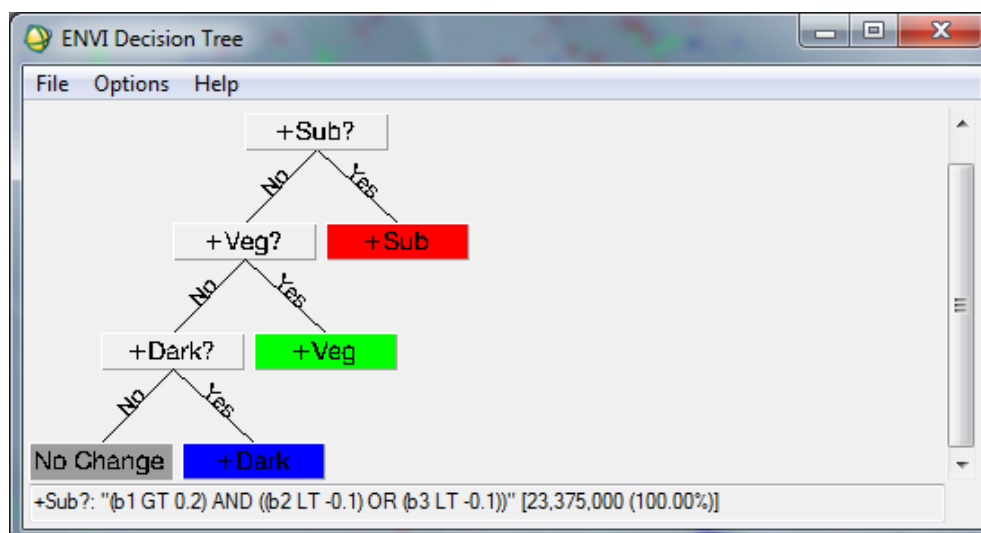


Figura 31. O gráfico apresenta um exemplo da janela de classificação por árvore de decisão no software ENVI (versão 4.7). Na linha de status na parte inferior, pode-se apreciar o conteúdo do primeiro nodo da classificação, representado na cor vermelha na imagem de saída, onde se discriminam os pixels do conjunto de imagens analisadas com incremento de substrato acima de 20 % e decréscimo simultâneo de mais de 10 % na vegetação e/ou na sombra.

O resultado da aplicação de uma árvore de decisão é um mapa-imagem, onde cada uma das caixas com cor exibidas na janela de classificação representa uma classe específica na legenda. No caso que se mostra aqui a classe com maior frequência é justamente aquela onde não houve mudanças na imagem diferença (No Change), produzida pelo último passo da classificação binária e representado na cor cinza. Nesta classe ou resíduo, estão agrupados todos os pixels que não cumpriram com nenhuma das três condições (aumento de **Substrato**, **Vegetação** ou **Sombra**), especificadas nos nós da árvore de decisão. Na Figura 32, se apresenta um exemplo deste tipo de imagem, resultante da classificação por árvore de decisão na zona sul do Município de São Paulo para o maior período analisado (2005-1986).

É preciso ressaltar que embora o principal interesse desta tese recaia especificamente sobre as transformações produzidas artificialmente, que implicam no aumento da superfície urbanizada (em princípio representado pela fração **Substrato**) em detrimento da vegetação (representada pela fração de igual nome), destarte foram calculadas simultaneamente na árvore de decisão as classes correspondentes ao aumento equivalente tanto na fração **Vegetação** como na fração **Sombra**, tomando como critério o limiar de 20 % estabelecido acima, para

manter a coerência no processo de classificação. A seguir, as linhas de comando contidas no classificador por árvore de decisão referente às três classes mencionadas:

+Sub?: "(b1 GT 0.2) AND ((b2 LT -0.1) OR (b3 LT -0.1))"

+Veg?: "(b2 GT 0.2) AND ((b1 LT -0.1) OR (b3 LT -0.1))"

+Dark?: "(b3 GT 0.2) AND ((b1 LT -0.1) OR (b2 LT -0.1))"

No Change: Resíduo.

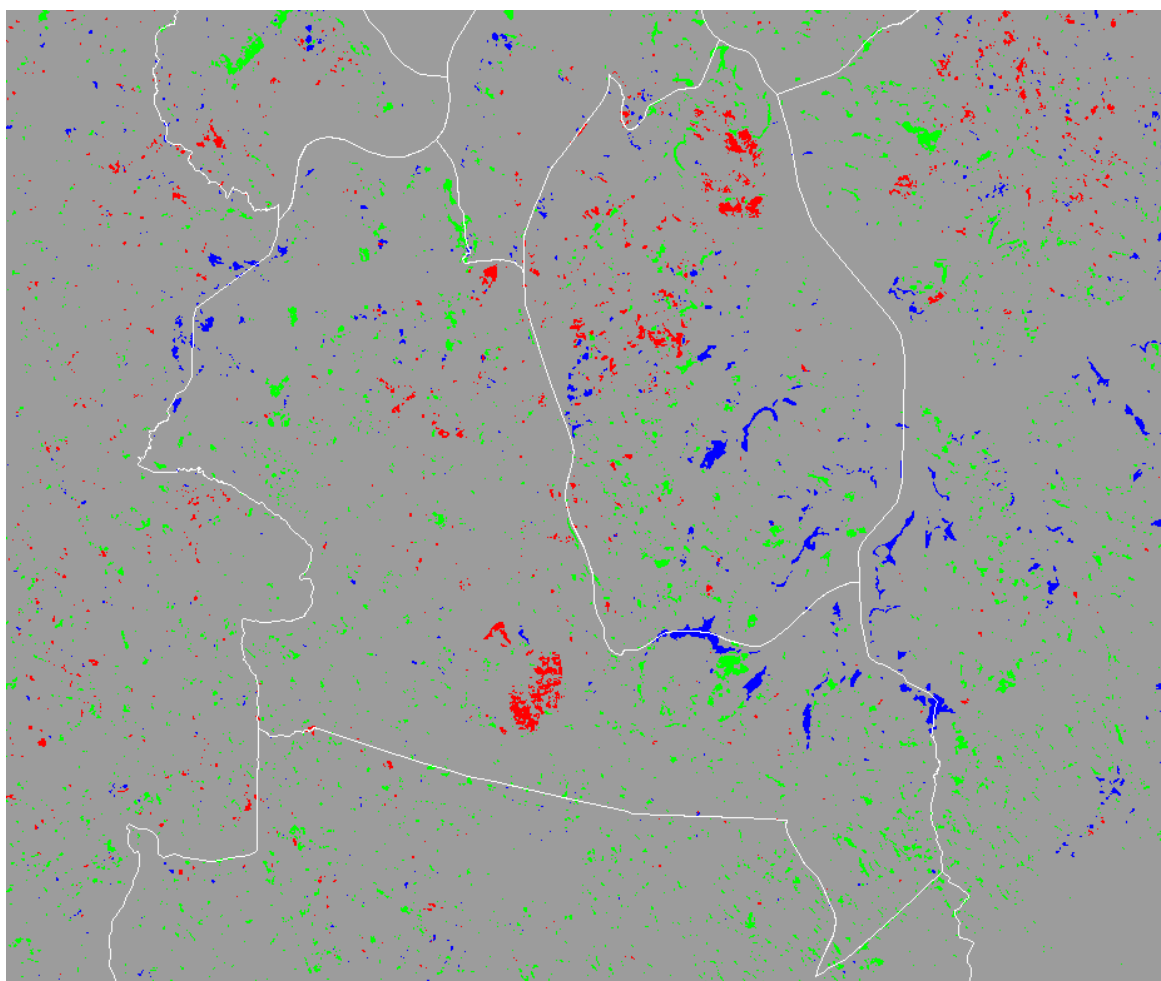


Figura 32. Resultado da aplicação da classificação por árvore de decisão com limiar de 20 % no incremento das três frações (Substrato, Vegetação e Sombra) na imagem do período 2005-1986. As cores vermelho verde e azul, respectivamente, representam essas categorias; a cor cinza aponta que não houve mudanças. As linhas brancas indicam os limites dos distritos na região sul do Município.

Conforme pode observar-se claramente na imagem da Figura 32, nessa zona de São Paulo aparecem muitas mudanças nas três categorias produzidas pelo classificador, com ênfase para a classe que indica aumento da fração **Substrato** superior aos 20 % da superfície contida nos pixels da imagem no período. Dentre as

porções do território que se mostram em evidência em virtude das manchas contíguas maiores podem-se mencionar dois locais bem conhecidos na listagem de assentamentos precários elaborada pela Sehab e mostrados no sistema Habisp (2008): o complexo Cantinho do Céu, localizado à península do Córrego do Bororé, na margem oeste do reservatório Billings, no Distrito de Grajaú, e o assentamento de Vargem Grande, que ocupa parte da Cratera de Colônia no Distrito de Parelheiros. Ambos os locais, pela sua relevância socioambiental e extensas dimensões formaram parte dos pontos de controle utilizados para testar a eficácia ou insucesso dos procedimentos de análise espacial utilizados<sup>21</sup>.

Contudo, duas questões se levantaram ao realizar uma exploração minuciosa do mapa/imagem resultante da aplicação da árvore de decisão:

- Alguns locais bem conhecidos onde apareceu superfície urbanizada em grandes extensões de terreno, como os dois casos supracitados, mostravam-se fracionados e com descontinuidade na sua conformação.
- Surgiram numerosos pontos espalhados apontando mudanças significativas de uso no período analisado, para as três categorias mencionadas, porém a superfície alterada não atingia, de forma contígua, valores significativos.

Então, tomaram-se medidas para tentar resolver, ou pelo menos amenizar, estes dois problemas. A questão da descontinuidade e fracionamento de superfícies onde as mudanças ocorreram comprovadamente no período de tempo analisado deu origem a se realizarem, a partir deste momento, duas classificações mediante o recurso da árvore de decisão para cada uma das imagens contendo as diferenças (subtração da mais antiga da mais nova). Uma mais conservadora ou restritiva, com (com 10 % como limiar de mudanças), e a outra mais liberal ou menos restritiva (com 5% como limiar de mudanças). Desta forma, ofereceram-se duas alternativas extremas, o que permitiu adotar um critério mais ou menos aberto ao analisar os resultados para decidir qual seria o limiar ou proporção limite ideal de mudanças.

Adicionalmente se editaram os nós da árvore de decisão de forma que se obtivesse como produto da classificação apenas duas classes: **+Sub?** (para indicar incremento na classe Substrato) e **Sem Mudar** (para indicar todas as alternativas que não

---

<sup>21</sup> Ver na Tabela 7 item 5.3 (Metodologia de trabalho) as seis áreas piloto que foram empregadas.

cumpriram a condição inicial). Desta forma conseguiu-se processar exclusivamente o incremento no substrato, destacando sua presença na imagem resultado.

As formulações utilizadas para os nodos ou passos da árvore de decisão estão listadas a seguir:

**+Sub?:** “(b1 GT 0.1) AND ((b2 LT -0.05) OR (b3 LT -0.05))”

**Sem Mudar:** Resíduo para o limiar de 10%.

**+Sub?:** “(b1 GT 0.05) AND ((b2 LT -0.025) OR (b3 LT -0.025))”

**Sem Mudar:** Resíduo para o limiar de 5%.

O mesmo procedimento foi aplicado à imagem L5 2010-L7 2000 obtendo-se também duas imagens como produto da utilização do classificador por árvore de decisão, uma com limiar de 10 % e a outra com limiar de 5%.

De qualquer maneira, é importante registrar que o classificador por árvore de decisão utilizado aqui é um recurso padrão do software ENVI, e permite bloquear temporariamente algumas ramificações da árvore de decisões e recuperá-las posteriormente quando for necessário. Neste caso, foram bloqueados os nós (ramas ou filhos) correspondentes aos incrementos nas frações Vegetação e Sombra. Percebe-se que estas duas categorias aparecem ligadas ao nó que determina o incremento no Substrato, nessa ordem (ver Figura 31).

A Figura 33 mostra o resultado da análise, com idêntica escala e posicionamento da janela de visualização, mas com limiar de 10 % apenas para a categoria Substrato, para o mesmo período de 19 anos (2005-1986), conforme apresentado na Figura 32, na qual foi aplicado o limiar de 20%. Foi repetido o procedimento equivalente, segundo demonstrado à Figura 34, que aponta o resultado da análise com limiar de 5 %, igualmente na categoria Substrato no período assinalado.

Nas três imagens resultado da classificação por árvore de decisão aqui apresentadas (Figuras 32, 33 e 34), que foram geradas sobre a mesma porção do território municipal para facilitar sua comparação, pode-se observar que na medida em que o critério de diferenciação ficou menos restritivo, ao passar de 20% para 10% e depois para 5%, as manchas contíguas, indicativas do aumento do substrato foram ficando maiores e mais condizentes com os fenômenos conhecidos nessa zona, centralizada na zona sul do Município de São Paulo.

Na imagem que utilizou o limiar de 5 % ou mais de mudanças calculadas no período (ver Figura 34), ficam evidenciadas as profundas transformações ocorridas nessa região, sobre tudo quando considerarmos unicamente a primeira classe (incremento de substrato) e, novamente, centrarmos a atenção nos dois pontos de referencia antes mencionados. Nesta imagem, a Península do Bororé aparece quase totalmente coberta pelo aumento de substrato, assim como o assentamento de Vargem Grande, que mostra uma superfície ocupada onde já não mais aparecem vazios, como ocorreu na imagem onde se utilizou o limiar de 10 % (Figura 33).

Nesta fase do processamento também foi aplicada a classificação por árvore de decisão à imagem diferença L52010-L72000, com limiar de 10% e 5%, da mesma maneira que se fez com a imagem correspondente ao período 2005-1986, apresentada às Figuras 33 e 34, entretanto os resultados gráficos não são mostrados aqui.

A questão dos numerosos pontos espalhados que indicavam mudanças, porém nos quais a superfície alterada não atingia, de forma contígua, valores expressivos para o estudo em pauta, foi resolvida utilizando um recurso tradicional nas operações de tratamento de imagens na etapa da pós-classificação: mediante a aplicação da *Majority/Minority Analysis*<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Este tipo de procedimento também poderia ser chamado de análise de maiorias/minorias, ou análise hierárquica, embora não tenhamos conseguido achar uma tradução exata, já consagrada, na literatura de sensoriamento remoto. Por esse motivo optamos por manter o termo em inglês.



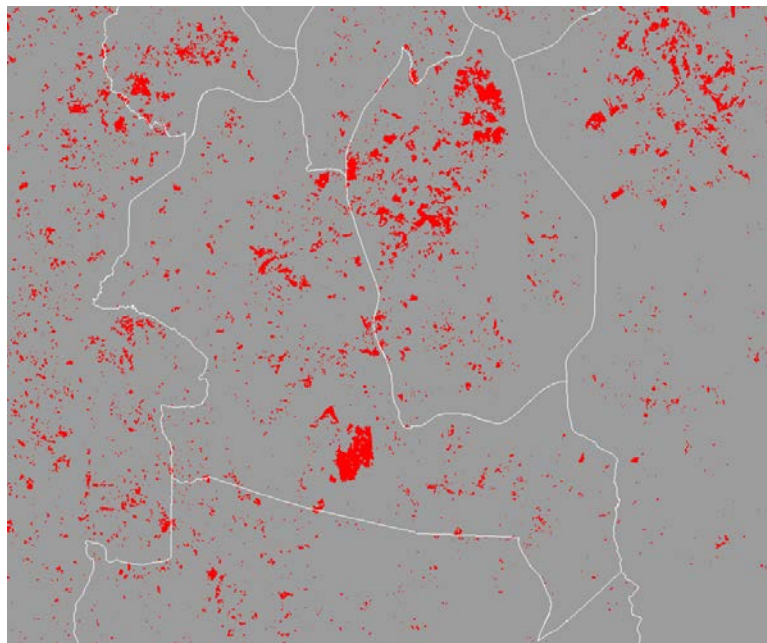


Figura 33. Resultado obtido com aplicação da classificação com limiar de 10 % no incremento da fração substrato na mesma imagem. Agora é bem visível a conformação do loteamento de Vargem Grande (ao centro sul), que se apresenta como uma mancha contínua com alguns espaços vazios no seu interior.

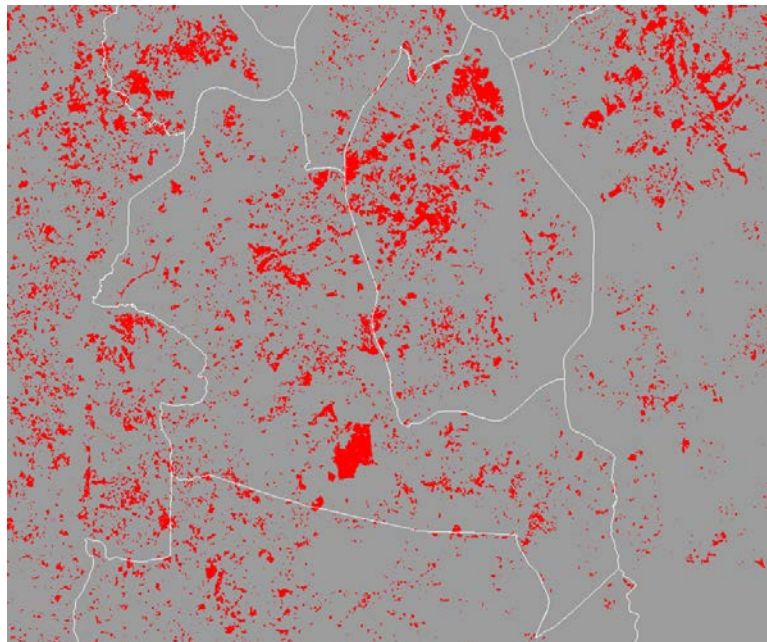


Figura 34. Resultado obtido com aplicação da classificação com limiar de 5 % no incremento da fração substrato. O loteamento de Vargem Grande se apresenta como uma mancha contínua onde os vazios no seu interior praticamente sumiram. Na península do Bororé pode-se apreciar que quase toda a superfície foi atribuída ao aumento de substrato.

### 6.9.1) Pós-classificação: *Majority/Minority Analysis*.

Uma vez completado o processo de classificação de uma imagem é recomendável submetê-la a uma etapa adicional que é denominada pós-classificação. O principal objetivo seria avaliar a exatidão do procedimento classificatório e melhorar sua qualidade, refinando as classes para, posteriormente, exportar os resultados a Sistemas de Informação Geográfica na forma de mapas-imagem ou vetores. Na pós-classificação é possível tratar essas imagens recém classificadas para obter estatísticas e matrizes de confusão; agrupar, filtrar e combinar classes; criar máscaras e combinar imagens; calcular áreas de influência; extrair o conteúdo das classes e exportá-los em camadas (*layers*) vetoriais; e também aplicar o filtro ou análise de maiorias/minorias (*majority/minority*), dentre outras várias possibilidades.

O recurso denominado *Majority/Minority Analysis* permite remover os pixels espúrios dissolvendo sua classe no entorno da classe maior que o rodeia, eliminando assim pixels isolados e pequenos agrupamentos dispersos que não são significativos no contexto. O algoritmo funciona como um filtro; onde o usuário informa o tamanho da matriz ou semente (*kernel*), deste modo, o valor do pixel central será trocado pelo valor que a maioria dos pixels da matriz possui. Caso a opção de análise por minoria seja aplicada, então o valor do pixel central na matriz será substituído pelo valor que têm a minoria dos pixels na matriz. Em outras palavras, ele funciona como um filtro, ou seja; procura dentro da matriz e compara o pixel central com todos os outros (em uma matriz de 3x3 seriam 8 valores, em uma de 5x5 seriam 24 e assim por diante), então substitui o valor central pelo valor de maior ou menor frequência, segundo seja o caso.

Como esta técnica pode ser aplicada seletivamente, o recurso permite que ele seja usado em uma ou em várias das categorias produzidas pela árvore de decisão. Nestes casos (Figuras 35 e 36), selecionamos a classe **+Sub**, que indica o incremento de substrato acima do limite estabelecido, e também a outra classe presente: **Sem Mudar**, no intuito de dissolver os vazios internos às manchas representadas na imagem com dimensões maiores que a área total definida pela matriz ou *kernel* usada na análise.

Na Figura 35 apresenta-se como exemplo a aplicação do *Majority Analysis* ao produto da classificação por árvore de decisão já processado para o limiar de 10% na imagem diferença para o período 2005-1986 (ver Figura 33). Novamente foi

selecionada a mesma escala e posição da ilustração para possibilitar sua comparação. Como a intenção era remover pixels isolados e pequenos grupos na classe Substrato, optou-se por utilizar um *kernel* de 3x3 pixels. Desta forma foram suprimidas da imagem tanto as manchas indicativas de aumento de substrato como as áreas onde não houve mudanças com áreas menores que 8.100 m<sup>2</sup>, o que corresponde a uma matriz de 90x90 m ou 3x3 pixels na resolução espacial de 30 m. Isto tudo, porém, sem causar deformações nas manchas que superavam essas dimensões.

Na Figura 36 apresenta-se a aplicação do *Majority Analysis* (com *kernel* de 3x3 pixels) ao produto da classificação por árvore de decisão já processado para o limiar de 5% (ver Figura 34). Da mesma forma que no exemplo anterior (com limiar de 10%), foi usada igual escala e posição da janela para facilitar a comparação. Desta maneira foram suprimidas da imagem as manchas indicativas de aumento de substrato assim como os vazios internos menores que 8.100 m<sup>2</sup>.

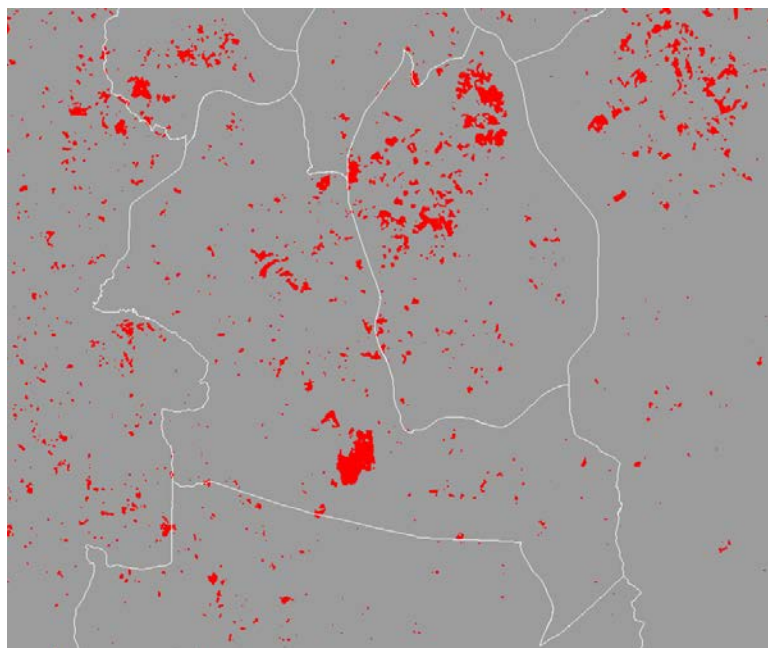


Figura 35. Resultado obtido com aplicação de Majority Analysis à classificação com limiar de 10 % no incremento da fração substrato. Observe-se que as grandes manchas não sofreram alterações visíveis, apenas diminuiu a quantidade de pixels isolados, pequenos grupos e vazios internos com dimensões inferiores a 8.100 m<sup>2</sup>.

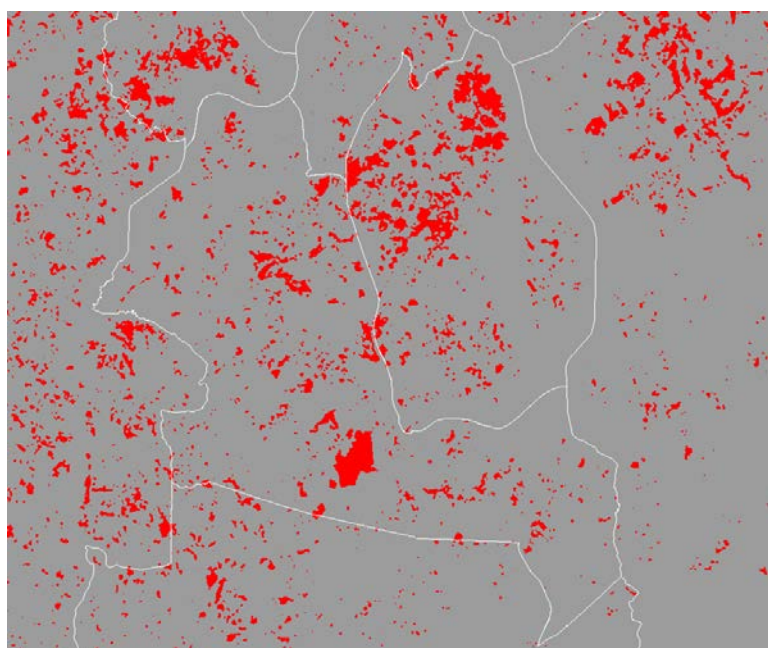


Figura 36. Resultado obtido com aplicação do Majority Analysis à classificação com limiar de 5 % no incremento da fração substrato. Observe-se que as grandes manchas não sofreram alterações visíveis, apenas diminuiu a quantidade de pixels isolados, pequenos grupos e vazios internos. A mancha do assentamento de Vargem Grande, ao centro sul, aparece agora totalmente preenchida.

Adicionalmente, a relação proporcional entre as categorias geradas pelo classificador por árvore de decisão pode ser utilizada como comprovação, já que na análise estatística posterior, a somatória das classes deve produzir a totalidade (100%) da superfície da imagem de referência. Este princípio está fundamentado no mesmo critério que motiva a decomposição perfeita de um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), já apresentado no embasamento teórico e conceitual desta pesquisa (ver item 4.1 e Figura 3).

Neste passo também foi adotado o mesmo critério em quanto às imagens que foram processadas no passo anterior, ou seja, se aplicou *Majority Analysis* às duas imagens diferença (L72005-L51986, e L52010-L72000, com limiar de 10% e 5% respectivamente), geradas na fase inicial do classificador por árvore de decisão, no item precedente (6.9). Nas Figuras 37 e 38 é exibida a mesma região, e na mesma escala utilizada nas imagens anteriores deste item, usando como referência o período 2010-2000, e os limiares de 10 e 5 %.

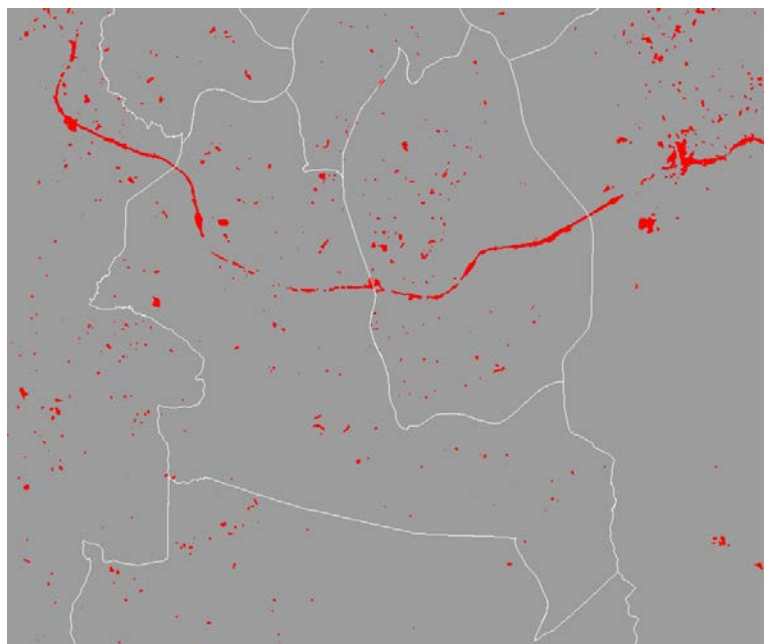


Figura 37. Resultado obtido com aplicação do Majority Analysis à classificação com limiar de 10 % no incremento da fração substrato na imagem de 2010-2000. Observe-se, que agora o destaque no aumento do substrato vai para o traçado linear indicando a construção do trecho sul do Rodoanel.

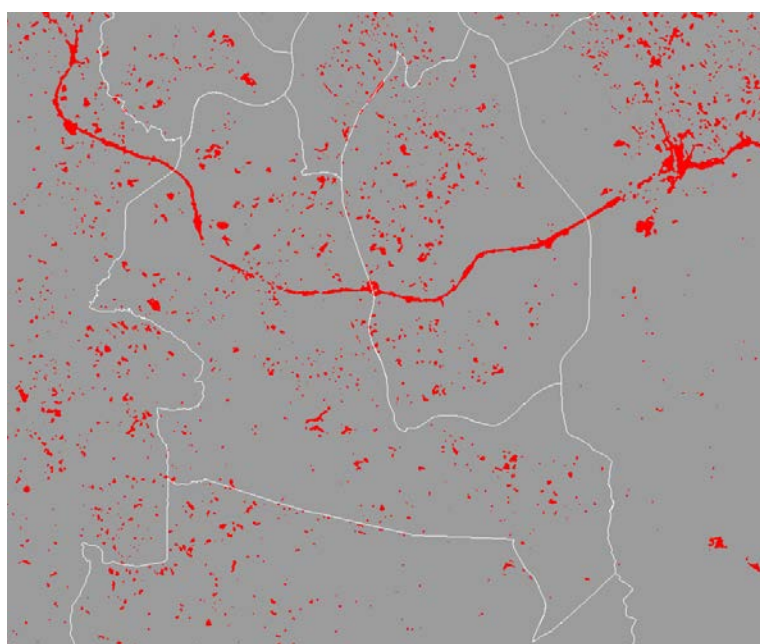


Figura 38. Resultado obtido com aplicação do Majority Analysis à classificação com limiar de 5% no incremento da fração substrato na mesma imagem. Observe-se, comparando com a figura anterior, que aumentou sensivelmente a continuidade da linha vermelha indicativa do Rodoanel. Também aumentou a quantidade de manchas e houve coalescência formando manchas maiores.

Na Tabela 11 é apresentado o produto da aplicação da Classificação por Árvore de Decisão nas quatro imagens mencionadas, com e sem usar *Majority Analysis*.

**Tabela 11. Os valores indicam a quantidade de superfície que alterou sua fração predominante de vegetação/sombra para substrato nos dois períodos estudados.**

Foram considerados o total do território de abrangência e os dois cenários produzidos pelo classificador por árvore de decisão com umbrais de 10 e 05 %, sem e com aplicação do *Majority Analysis*.

| Mudanças na totalidade da área de estudos.<br>Cálculo para os umbrais de 10 % e 5 % |                                     |                                  |                        |                                  |                        |                                       |                        |                                       |                        |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| IMAGEM DIFERENÇA  | SUPERFÍCIE TOTAL (KM <sup>2</sup> ) | MUDANÇAS 10 % (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS | MUDANÇAS 05 % (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS | MUDANÇAS 10 % E MA (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS | MUDANÇAS 05 % E MA (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS |
| 2005-1986   | 21.037,5                            | 871,0                            | 4,14                   | 1.862,1                          | 8,85                   | 650,1                                 | 3,09                   | 1.501,1                               | 7,14                   |
| 2010-2000   |                                     | 717,6                            | 3,41                   | 1.935,4                          | 9,20                   | 553,2                                 | 2,63                   | 1.534,39                              | 7,29                   |

Os resultados da Tabela 11 mostram um percentual de mudanças quase equivalente nos dois períodos analisados. Levemente maior para 2005-1986 na coluna de 10 % e situação inversa, levemente maior para 2010-2000, na coluna de 05 %. Quando se aplica o filtro de *Majority Analysis* a situação praticamente se repete; surgiu o aumento de um ponto percentual no período de 2005-1986 e apareceu um levíssimo aumento de 0,15 pontos percentuais no período de 2010-2000 na coluna de 05 %.

De qualquer maneira, esses valores demonstram duas questões importantes. Primeiro, que o limiar de 10 % é efetivamente mais conservador, haja visto que quando se aplicou o limiar de 5 %, mais liberal, o percentual de mudanças mais do que duplicou. Segundo, a situação se reproduziu quando foi aplicado o *Majority Analysis*, contudo, notou-se uma redução proporcional na superfície mudada em ambas as imagens de referência, o que demonstra que este filtro de fato reduz o ruído, eliminando pixels espúrios e áreas que não são importantes na escala e resolução espacial usada.

### 6.9.2) Aplicação das máscaras

Como se percebe, o processo de classificação por árvore de decisão permitiu separar as áreas com incremento do substrato, destacando aquelas com maiores

dimensões, e ainda a filtragem *Majority Analysis* deixou as imagens mais limpas, removendo os pixels isolados e manchas menores que  $8.100 \text{ m}^2$ . Devemos considerar que até esse momento na pesquisa estava-se trabalhando sobre uma área de estudos com uma superfície total de  $21.037,5 \text{ km}^2$ , coincidente nos dois pares de cenas separadas no tempo 19 e 10 anos respectivamente. Mesmo que no cerne desse território esteja localizada a maior aglomeração urbana da América do Sul e uma das maiores do mundo, é inegável que nesta superfície há uma predominância de massa verde (ver Figuras 18 a 21), que contribui decisivamente na proporção da componente Vegetação quando se aplica o Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME. Se continuarmos nessa mesma linha de raciocínio, há de se ter em conta que uma porção considerável dessa superfície vegetada está dedicada aos cultivos. Em consequência, esse território estaria submetido, periodicamente, à preparação do solo para o plantio, o que acontece para boa parte das culturas do Estado de São Paulo no período menos chuvoso do ano, ou seja, entre julho e setembro (INSTITUTO AGRONÔMICO, 1990, p. 212-218). Tais ações antrópicas sobre a terra, unidas à alternância sazonal do verão/inverno (período úmido/seco) são captadas pelas imagens satelitais atribuindo os pixels às categorias Vegetação ou Substrato, segundo seja o caso. A terceira categoria ou componente (Sombra), como já foi mencionada anteriormente, tende a se misturar na vegetação (indicando diferenças de altura no dossel) e no Substrato, apontando zonas mais verticalizadas e superfícies mais absortivas.

O gráfico de distribuição das imagens no tempo apresentado à Figura 15 indica a posição relativa dos dois pares de imagens utilizados dentro da sequência numérica dos dias do ano, também conhecida como calendário juliano. O par que aponta o maior intervalo de tempo (2005-1986) está localizado entre os dias 214 (02 de agosto) e 218 (06 de agosto), justamente no auge do período menos chuvoso no Estado de São Paulo, quando a vegetação semicaducifólia perde quase todas as folhas e as culturas estão na etapa da preparação do solo, ou prosperam apenas com irrigação. Consequentemente, nesse período de 19 anos, que ainda por cima é praticamente o dobro que o outro par analisado, em princípio teria maiores probabilidades de incorporar mais superfície com solo exposto que no intervalo de 10 anos (2010-2000). Além disso, as imagens compreendidas no intervalo mais curto estão localizadas entre o dia juliano 108 e o 120, ou seja, entre 18 e 30 de abril. Esse período está situado no final da estação chuvosa, quando a vegetação



começa reduzir sua área foliar (Emerson Galvani, comunicação pessoal). Por esse motivo, houve menos superfície de terreno exposta que no outro intervalo considerado.

Muito provavelmente a maioria dos pixels identificados como substrato pelo MLME, fora dos limites do urbano, apontou a presença de solo exposto. No entanto, ainda que seja conhecida a localização das áreas urbanizadas, o contrário também é válido. Ou seja, nem todo pixel considerado substrato dentro dos limites urbanos indica que esse substrato esteja formado por materiais artificiais, como cimento, asfalto, cerâmica, metal, vidro e outros materiais altamente refletivos. Porém, as probabilidades de isto acontecer no interior das cidades são muito menores, mesmo ponderando sua proporcionalidade em função da área. Por exemplo, terrenos preparados para as construções são rapidamente ocupados pelas fundações e outras estruturas; ruas e avenidas de novos loteamentos são asfaltadas em poucos dias, e assim por diante.

Então procuramos uma forma de restringir o território analisado de forma tal que se pudesse fazer ênfase na procura das mudanças indicativas do aumento da urbanização precária, um dos principais objetivos desta pesquisa. Para tanto, se utilizou o recurso de aplicar máscaras às imagens diferença já processadas (reduzidas às três componentes, Substrato, Vegetação e Sombra) pelo MLME. Especificamente aplicamos uma máscara criada com os limites da Região Metropolitana de São Paulo, e outra menor, restrita ao Município de São Paulo. Os resultados desses processamentos, já assumindo diretamente a aplicação de *Majority Analysis* para os dois limiares conhecidos (acima de 10% e 5% de incremento no substrato) foram detalhados nas tabelas 12 e 13, respectivamente.

A Figura 39 mostra a conformação gráfica das duas máscaras aplicadas, que reduzem a análise estritamente ao território especificado utilizando um critério dicotômico. Seguiu-se aqui a mesma forma de processamento binário relatada no item 4.4 (Classificador por Árvore de Decisão), ou seja, a máscara atua colocando valores de pixel igual a 1 (para sim ou verdadeiro) e zero (para não ou falso); sinalizando assim quais superfícies deveriam ser processadas e quais não.

No entanto, é importante ressaltar que não foi necessário criar fisicamente estas imagens mascaradas; bastou declarar, no momento da produção das estatísticas, que se pretendia gerar os dados na forma de histograma, indicando a imagem de

referência e a máscara a ser aplicada em cada caso. Desta forma foi possível ter somente arquivos de texto, contendo algumas linhas com os dados requeridos, no lugar de pesadas imagens que ocupariam milhões bytes no disco rígido do computador. A título de exemplo basta mencionar que o tamanho dessas imagens equivale a 375 Megabytes<sup>23</sup>, independentemente de serem mascaradas ou não. É essa uma das características típicas do modelo de dados gráfico matricial: as imagens nos arquivos usam todo o espaço, esteja ele ocupado por valores, ou preenchido com zeros. É evidente que para que as máscaras cumpram sua função elas devem estar perfeitamente georreferenciadas e ajustadas segundo a projeção cartográfica das imagens onde serão aplicadas.



Figura 39. Apresenta as duas máscaras (Região Metropolitana e Município de São Paulo) utilizadas para processar as estatísticas das imagens processadas nos dois períodos e com os dois umbrais selecionados. A linha de contorno mostra o limite exterior da cena. Ambas as figuras estão na mesma escala.

Detectamos pequenas diferenças entre a área oficial da Região Metropolitana de São Paulo (7.947,3 km<sup>2</sup>) e a calculada na imagem (7.942,3 km<sup>2</sup>) assim como entre a área oficial do Município de São Paulo (1.523,3 km<sup>2</sup>) e a calculada na imagem (1.525 km<sup>2</sup>)<sup>24</sup>. Porém entendemos que estas discrepâncias são naturais no processo de criação das máscaras (conversão de feições gráficas vetoriais para o modelo matricial), além de ser numericamente pouco significativas.

---

<sup>23</sup> A superfície total coberta pelas cenas é de 21.037,5 km<sup>2</sup>.

<sup>24</sup> Os dados oficiais (atualização 2011) foram obtidos no portal da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A (EMPLASA, 2012). Local visitado em 17/02/2012.

**Tabela 12. Os valores mostram a quantidade de superfície que alterou sua fração predominante de vegetação/sombra para substrato, discriminando a Região Metropolitana e o Município de São Paulo.**

Foi considerado, o limiar de 10% de mudanças, já aplicada a técnica de *Majority Analysis* para homogeneizar o produto gráfico e remover ruídos.

| Mudanças na Região Metropolitana e Município de São Paulo.<br>Cálculo com limiar de 10 % |                                    |                                       |                        |                                   |                                      |                        |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| IMAGEM DIFERENÇA   | SUPERFÍCIE RMSP (KM <sup>2</sup> ) | MUDANÇAS 10 % RMSP (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS | SUPERFÍCIE MSP (KM <sup>2</sup> ) | MUDANÇAS 10 % MSP (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS |
| 2005-1986  | 7.942,3                            | 317,0                                 | 3,99                   | 1.525                             | 56,6                                 | 3,71                   |
| 2010-2000  |                                    | 150,9                                 | 1,90                   |                                   | 22,88                                | 1,50                   |

Os resultados obtidos com o limiar de 10% (ou seja, com mais de 10% da superfície dos pixels indicando mudança de vegetação/sombra para substrato) indicaram que existiu um percentual de mudanças quase idêntico entre a Região Metropolitana e o Município de São Paulo, nos dois períodos avaliados, com pequenas variações apenas entre as décimas da alíquota. Por outra parte, apareceu sim uma diferença de praticamente o dobro, quando considerado o período mais longo (19 anos entre 1986 e 2005) em comparação com o mais curto (10 anos entre 2000 e 2010). Estes incrementos são consistentes com a lógica, visto que o período de tempo analisado é pouco menos que o dobro, também, nas duas superfícies estudadas.

**Tabela 13. Os valores mostram a quantidade de superfície que alterou sua fração predominante de vegetação/sombra para substrato, discriminando a Região Metropolitana e o Município de São Paulo.**

Foi considerado, também, o limiar de 5% de mudanças, já aplicada a técnica de *Majority Analysis* para homogeneizar o produto gráfico e remover ruídos.

| Mudanças na Região Metropolitana e Município de São Paulo.<br>Cálculo com limiar de 5% |                                    |                                       |                        |                                   |                                      |                        |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| IMAGEM DIFERENÇA   | SUPERFÍCIE RMSP (KM <sup>2</sup> ) | MUDANÇAS 05 % RMSP (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS | SUPERFÍCIE MSP (KM <sup>2</sup> ) | MUDANÇAS 05 % MSP (KM <sup>2</sup> ) | PERCENTUAL DE MUDANÇAS |
| 2005-1986  | 7.942,3                            | 728,3                                 | 9,19                   | 1.525                             | 124,91                               | 8,19                   |
| 2010-2000  |                                    | 394,9                                 | 4,97                   |                                   | 78,28                                | 5,13                   |

Os resultados obtidos com o limiar de 5% são similares aos obtidos com o limiar de 10%, e indicam que existiu um percentual de mudanças muito parecido entre a Região Metropolitana e o Município de São Paulo, nos dois períodos avaliados, com pequenas variações iguais ou menores a um ponto da alíquota. Novamente apareceu uma diferença levemente inferior ao dobro, quando considerado o período mais longo (19 anos entre 1986 e 2005) em comparação com o mais curto (10 anos entre 2000 e 2010). Isto é igualmente lógico, visto que o período de tempo analisado é quase o dobro, também, nas duas superfícies estudadas.

### **6.9.3) Pós-classificação: Conversão das manchas em polígonos vetoriais**

Há de considerar-se também que até esse momento na pesquisa estava-se trabalhando no modelo de dados gráfico matricial ou *raster*. Nesse ambiente os produtos de quaisquer processamentos são sempre imagens, e os objetos individuais, como as manchas de incremento de substrato que formaram os polígonos maiores, não são facilmente identificáveis. É possível sim gerar estatísticas globais de toda a superfície estudada (ver Tabela 11), ou parte delas; mediante a aplicação de máscaras (ver Tabelas 8 e 9), mas estas fornecerão somente o resultado total da análise, indicando qual seria a quantidade de pixels presentes em cada categoria da imagem classificada, como um todo.

Por esses motivos, o seguinte passo foi a aplicação de outro recurso da etapa de pós-classificação no tratamento de imagens em sensoriamento remoto, a conversão das manchas em polígonos vetoriais para permitir sua posterior análise num SIG, identificando e hierarquizando as maiores áreas.

Porém, antes de se executar o algoritmo de vetorização<sup>25</sup>, seria conveniente analisar os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8, que mostraram o aumento de substrato nos dois períodos analisados: 2005-1986 e 2010-2000, indicando a maior quantidade de mudanças no período mais longo, de 19 anos.

Esses incrementos foram confirmados tanto para os dois recortes espaciais (Região Metropolitana e Município de São Paulo), como para os dois limiares utilizados (10 e 5%). Contudo, conforme foi explicado no item 6.9 (Aplicação do classificador por Árvore de Decisão), quando se decidiu pelo uso destes valores limites, eles

---

<sup>25</sup> Conversão em vetores de feições ou objetos constituídos por pixels no ambiente *raster* ou matricial.

indicavam os dois extremos de um intervalo de classificação, indo do mais restritivo (acima de 10%) ao menos restritivo (acima de 5%). Assim sendo, decidimos aplicar o cenário mais conservador, adotando o limiar de 10%, no intuito de reduzir as probabilidades de ter falsos positivos na classificação da fração correspondente ao incremento do substrato.

Adicionalmente, consideramos que utilizar unicamente o recorte espacial correspondente aos limites do Município de São Paulo traria algumas vantagens ao processo de análise dos resultados da classificação, facilitando assim a pretendida identificação dos assentamentos precários: Primeiro, a superfície urbanizada está concentrada, ocupando dois terços do território municipal. Segundo, existiam dados de qualidade disponíveis<sup>26</sup> indicando a localização, tamanho, forma, e outras características relevantes de todos os assentamentos precários existentes no Município de São Paulo até a data, e ainda mantendo um registro do momento de início, população residente e outros muitos dados e informações relevantes ao estudo. Em terceiro e último lugar, fizemos a escolha por este recorte de menor tamanho porque em nenhuma das quatro cenas utilizadas (2010, 2005, 2000 e 1986) houve presença de nuvens no interior do Município de São Paulo. Conforme mencionado anteriormente, as nuvens, além de encobrir a superfície real da terra nas imagens satelitais, interferem na classificação gerando falsos positivos na fração substrato.

Nas Figuras 40 e 41 se mostram as imagens produzidas mediante aplicação da máscara do Município de São Paulo nas duas imagens diferença utilizando o limiar de classificação de 10%. Estes dois arquivos foram submetidos, na sequência, ao processo de vetorização. O comando requerido para completar a transformação em vetores funciona encontrando as bordas das áreas e delimitando-as com um polígono envolvente. Desta maneira todas as manchas de aumento de substrato foram convertidas em polígonos fechados. Assim elas viraram feições vetoriais, identificadas individualmente e com os atributos gráficos necessários: localização, forma, área e perímetro, o que permitiu a hierarquização e posterior identificação das manchas maiores onde ocorreram as mudanças nos dois períodos estudados.

---

<sup>26</sup> No cadastro de assentamentos precários inserido no mapa e no sistema de priorização (HABISP, 2008).

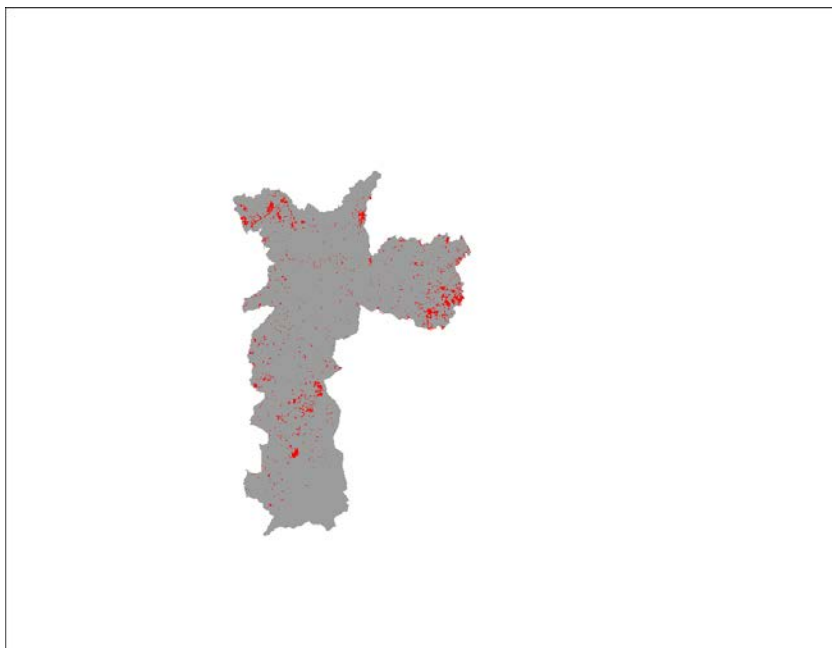


Figura 40. Resultado obtido com aplicação da máscara do Município de São Paulo à classificação com limiar de 10% na imagem do período 2005-1986. O contorno municipal delimita a área de processamento estabelecida pela máscara.

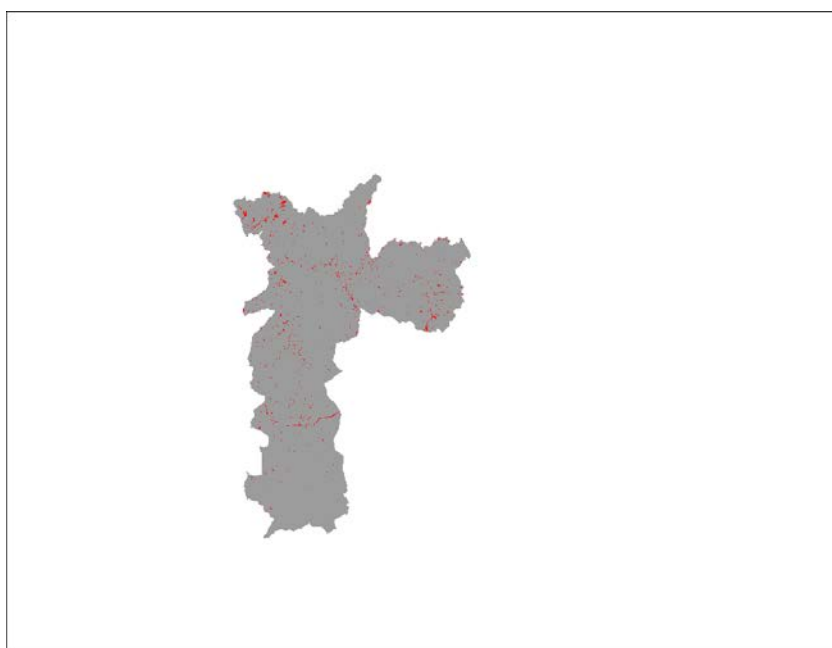


Figura 41. Resultado obtido com aplicação da máscara do Município de São Paulo à classificação com limiar de 10% na imagem do período 2010-2000. Note-se, ao comparar com a imagem da Figura 38, que a quantidade de superfície que mudou com incremento da fração substrato é visivelmente menor, mesmo na pequena escala utilizada.

O processo de vetorização pode ser realizado no software ENVI tanto na opção de classificação (*Post Classification, Classification to Vector*) como na de tratamento de vetores (*Vector, Raster to Vector*). Pelos dois caminhos se alcançaria o mesmo resultado. Caso se estivesse trabalhando com mais de uma classe na imagem fonte, ainda seria possível produzir vetores identificados por classe e contidos em camadas ou *layers*<sup>27</sup>, juntos ou separados.

Uma vez gerados os dois arquivos vetoriais (das cenas de 2005-1986 e 2010-2000) contendo os polígonos fechados, eles foram exportados a partir do formato padrão do ENVI (evf), para o formato vetorial do ArcGIS (shp), com o objetivo de facilitar a portabilidade para este e outros Sistemas de Informação Geográfica que têm adotado o formato *shape*<sup>28</sup> como modelo (ver figuras 42 e 43). Conforme foi especificado antes, este foi um passo fundamental para poder identificar, hierarquizar e distinguir quais dessas manchas correspondiam efetivamente ao aumento da fração substrato como consequência do surgimento ou crescimento de algum tipo de urbanização no período analisado.

---

<sup>27</sup> *Layer*, em Inglês significa camada. Palavra já consagrada no jargão técnico dos SIG, sinônimo também de nível temático, plano de informação e cobertura. Seu uso começou nos primeiros sistemas vetoriais.

<sup>28</sup> *Shapefile* (shp) é um arquivo vetorial de armazenamento digital onde se guarda a localização das feições geográficas e os atributos associados a elas. O formato *shape* tem se tornado um padrão de intercâmbio de dados espaciais, e foi desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute - ESRI* (companhia proprietária do SIG Arc/Info ou ArcGIS).

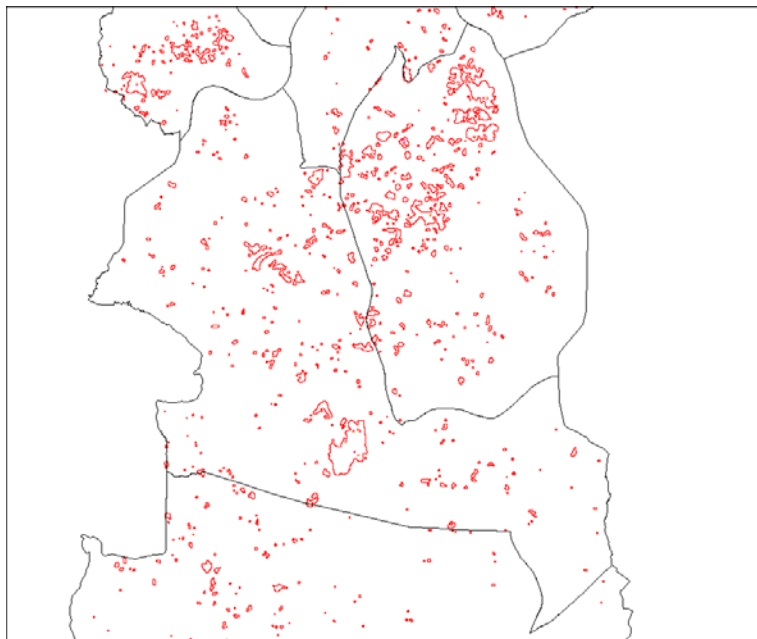


Figura 42. Produto da vetorização sobre as manchas indicativas de aumento de substrato no Município de São Paulo na imagem de 2005-1986. No sul resalta-se o polígono do loteamento Vargem Grande, que apresentou uma área de 1,66 km<sup>2</sup>.

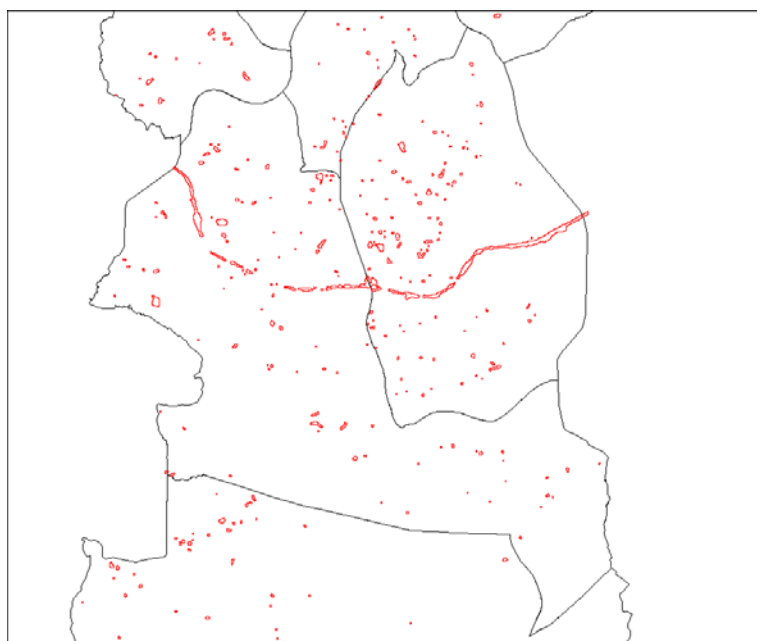


Figura 43. Produto da vetorização sobre as manchas indicativas de aumento de substrato no Município de São Paulo na imagem de 2010-2000. Em destaque os polígonos que marcam o trecho sul do anel rodoviário, uma das transformações mais importantes ocorrida nesses 10 anos na região.



A partir desse momento na pesquisa começou um forte trânsito de dados e informações entre os dois Sistemas de Informação Geográfica utilizados: ENVI e Maptitude. Cada um deles com uma "vocação" mais forte na forma de tratamento dos dados e execução da análise espacial; referimo-nos respectivamente aos modelos de dados gráficos matricial (*raster*) e vetorial. Por isto, embora ambos os sistemas possam trabalhar tanto com o modelo matricial como com o vetorial, quando a questão principal é mexer com vetores, o Maptitude leva vantagem. O contrário neste caso também é válido, ou seja, no ambiente *raster* o ENVI é o mais indicado.

No mapa-imagem representado à Figura 44 mostra-se a superposição dos vetores correspondentes aos dois períodos sobre a imagem de satélite mais recente utilizada nesta tese (18 de abril de 2010). Pode-se observar que há uma distribuição periférica entorno ao núcleo central urbanizado da cidade de São Paulo, com ênfase nas regiões sul, leste e norte para as manchas relativas ao período 2005-1986 (em vermelho). A distribuição das manchas do período 2010-2000 (em amarelo) é bem diferente, apresentando coincidência com as outras na zona noroeste e leste (parte sul) e discordâncias em vários locais do território municipal. A linha do anel rodoviário destaca-se muito, mesmo em escalas pequenas como a que se apresenta aqui.

Nas bases de dados geográficos geradas no processo de vetorização das manchas indicando aumento de substrato obtiveram-se os seguintes resultados: Período 2005-1986, do total de 2.557 polígonos, 887 com área superior a 8.100 m<sup>2</sup>. Período de 2010-200, total de 2.003 polígonos, 549 com área superior a 8.100 m<sup>2</sup>.

Esses valores indicaram a consistência no procedimento de aplicação do *Majority Analysis* e subsequente conversão das manchas geradas no ambiente *raster* para o vetorial. O produto apresentado na Figura 44 constitui o primeiro exemplo da utilização do SIG vetorial para gerar um resultado gráfico neste trabalho. Nele, procuramos incluir alguns dos principais atributos que um mapa deve conter: legenda, escala e indicação do Norte, porém sem esgotar todas as possibilidades. Ainda, note-se que a imagem, que foi mostrada em uma composição colorida, não aparece representada na legenda gerada pelo SIG Maptitude. O motivo desta ausência é uma limitação do software, que por ser vetorial não oferece o recurso de representar, na legenda, um elemento gráfico do modelo de dados matricial.

A exploração de todo o território do Município de São Paulo, aumentando a escala para poder perceber mais detalhes da maneira em que as áreas onde se comprovou o incremento de substrato estavam distribuídas, levou ao convencimento de que havia ainda muitas questões importantes a serem consideradas, especialmente no que diz respeito à localização das maiores manchas. Ainda, percebemos que a questão fundamental não era apenas analisar essas manchas e classificá-las em ordem decrescente de importância em virtude de uma ordem também decrescente em área. Notamos que em alguns locais era possível apreciar um agrupamento de áreas que consideradas individualmente não seriam das mais importantes, mas que em conjunto apontavam uma concentração de mudanças nesse local.

Na zona sul do município destacou-se o agrupamento dos polígonos localizados na Península do Córrego Cocaia (Complexo Cantinho do Céu) entre 2005 e 1986 (ver detalhe ampliado à Figura 45). No período 2010-2000 sobressaiu-se o traçado do anel viário Mário Covas, no limite com o município de São Bernardo do Campo e a presença e/ou coincidência de algumas mudanças em áreas já assinaladas para o intervalo maior. Isto indicou que tais transformações aconteceram efetivamente no período mais curto, de dez anos, ou ainda em um menor, entre o ano 2000 e 2005. Ou seja, o simples fato de aparecerem na cor amarela indicava que essas áreas tinham surgido como substrato entre o ano 2000 e 2010; caso houvesse sobreposição de polígonos amarelos e vermelhos, então apontaria que esse surgimento, ou alteração, tinha acontecido entre 2000 e 2005.

Depois de uma minuciosa análise visual dos resultados no ambiente vetorial, utilizando como fundo e referencial geográfico a imagem de satélite de abril de 2010, optamos por verificar quais das superfícies indicadas poderiam efetivamente ser consideradas como incremento de substrato em virtude de surgimento ou crescimento de urbanização precária. Para tal, utilizamos os arquivos vetoriais disponíveis no sistema Habisp (SECRETARIA MUNICIPAL DE HABITAÇÃO, 2008). Nesta fase, a utilização sistemática dos pontos de controle selecionados inicialmente (ver Tabela 7 no item 5.3, Metodologia de trabalho) foi de grande valia.

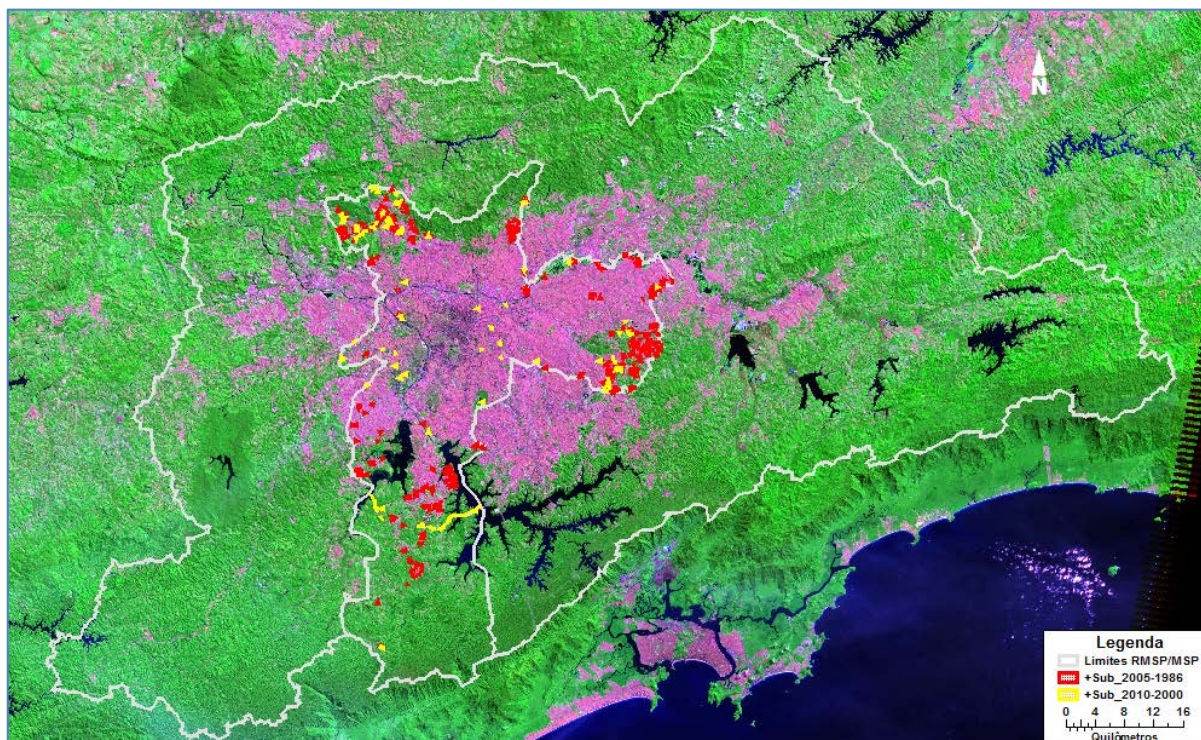


Figura 44. Mapa/imagem que mostra os três recortes espaciais utilizados: a Região Metropolitana e o Município de São Paulo, sobrepostos à composição colorida de Landsat 5, capturada em 18/04/2010.

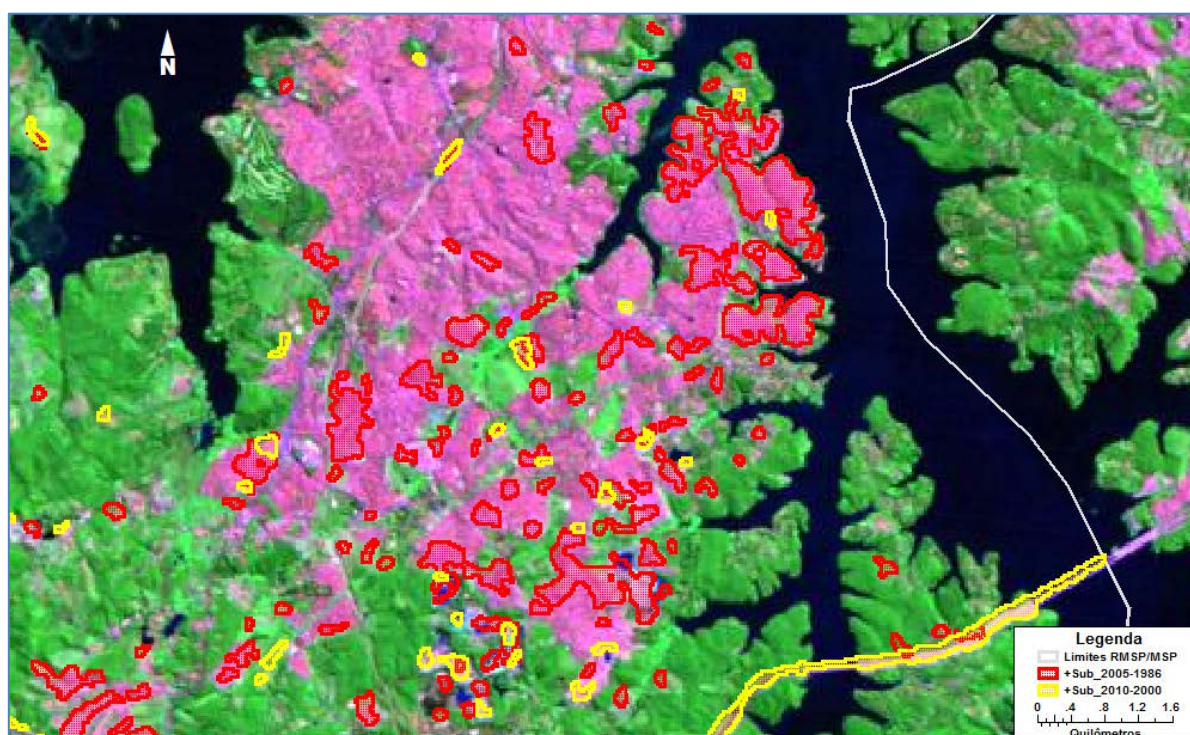


Figura 45. Detalhe ampliado do mapa-imagem anterior. Note-se o ajuste entre os polígonos vetoriais e a imagem capturada pelo satélite.

## 6.10) SOBREPOSIÇÃO DOS POLÍGONOS DOS ASSENTAMENTOS PRECÁRIOS

Conforme foi mencionado no item 3.5, (Sobre os dados e informações disponíveis no Sistema Habisp), existe a possibilidade de baixar os arquivos digitais gráficos (e seus atributos associados) diretamente da página web da Secretaria Municipal de Habitação da Prefeitura de São Paulo. Esses arquivos são oferecidos no formato *shape* (shp), e aparecem separados em capas ou *layers* de acordo com o tipo de urbanização precária que eles representam. Assim, decidimos utilizar os correspondentes a três dessas categorias: favelas, loteamentos irregulares e núcleos urbanizados. Os cortiços não foram incluídos porque em princípio não teriam uma manifestação espacial identificável numa imagem de satélite nem em área nem pelas suas propriedades de reflectância.

O objetivo era o de utilizar a localização dos assentamentos precários conhecidos como forma de verificação, ao sobrepor as áreas delimitadas pelos polígonos cadastrados no Habisp aos polígonos onde ocorreram as mudanças de aumento de substrato nos dois períodos analisados. Caso ocorressem coincidências, e os polígonos indicando alguma forma de habitação precária estivessem compreendidos no intervalo temporal indicado pelo polígono de incremento do substrato, a hipótese estaria demonstrada.

Evidentemente, procuraríamos encontrar tal evidência primeiro nas regiões onde os assentamentos precários têm maior representatividade tanto do ponto de vista social, como econômico e físico-ambiental. Neste intuito, utilizamos as áreas piloto. As seis áreas escolhidas como piloto estão localizadas em zonas estratégicas e dispersas no território municipal de modo a apresentar uma amostra de onde historicamente houve mudanças significativas, dentro da precariedade, na ocupação urbana; justamente por esses motivos elas ocuparam ou ainda ocupam lugar de destaque no índice de priorização utilizado pela Sehab para definir as áreas objeto de intervenção. É importante ressaltar que todas as áreas mencionadas foram objeto de projetos de urbanização por parte da administração municipal, o que facilitou o acesso ao registro histórico sobre esses empreendimentos de habitação social.

Então uma vez baixados os arquivos vetoriais correspondentes às três categorias anteriormente mencionadas (favelas, loteamentos e núcleos) fizemos uma compatibilização das colunas das tabelas de atributos para possibilitar a fusão

destes três arquivos em um só, porém mantendo um campo da base de dados onde se guardava a qual das categorias pertencia cada registro. Em seguida realizou-se a operação de fusão, ou soma algébrica espacial, na qual foi mantido o número total de elementos presentes em cada uma das bases de dados geográficos mencionadas. O número total de registros foi de 2.969, correspondendo 1.614 às favelas, 1.024 aos loteamentos irregulares e 331 aos núcleos urbanizados. Este foi o balanço geral mais atualizado, com a situação de 11/05/2012. Estes valores foram mudando ao longo do tempo em que trabalhamos com os dados obtidos no Habisp (desde junho de 2008), visto que essas bases cartográficas digitais, e seus atributos associados, foram sistematicamente atualizados nesses últimos anos.

É conveniente mencionar que existe superposição de polígonos de diferentes categorias (por exemplo, favelas e loteamentos), ou seja, pode vir acontecer que o mesmo território alocado ao um loteamento irregular demarcado nos cadastros esteja ocupado por favelas. Esta foi a razão principal para fazer a fusão das três bases, mantendo seus atributos, para poder fazer correlações espaciais, que são mais facilmente executáveis se as feições estiverem no mesmo *layer*, mas ainda mantendo as características originais, como por exemplo, ocupar posição semelhante no espaço (superposição parcial ou total).

Outro assunto importante na questão da inclusão do contorno dos polígonos dos assentamentos precários conhecidos no Município de São Paulo é que, supostamente, este procedimento permitiria obter valores de reflectância característicos a estas formas de ocupação urbana. Assim, procurar-se-ia realizar uma análise inversa, para verificar se existia algum atributo ou condição física nas manchas indicativas de aumento de substrato que permitissem diferenciar quais eram, efetivamente, as ocorrências atribuíveis a eles.

No mapa-imagem representado à Figura 46 mostra-se a superposição dos vetores correspondentes às três categorias de assentamentos precários (favelas, loteamentos e núcleos) que foram integrados em uma única base vetorial. Denominamos esta camada ou *layer* como "FavLotNucAgg" no intuito de concentrar em um nome curto as três categorias mencionadas junto com o conceito de agregação. A diferença dos mapas representando os polígonos de mudanças por período específico (2005-1986 e 2010-200), nesta base digital contém todos os elementos, de todos os anos, cadastrados no sistema Habisp.

Pode-se observar que há também uma distribuição em volta do núcleo central urbanizado da cidade de São Paulo, com ênfase nas regiões sul, leste e norte. Embora nesta imagem o anel periférico indicando a ocupação precária é bem evidente. Na visão geral que oferece a pequena escala utilizada pode-se observar que há vazios coincidentes com parte das áreas de proteção ambiental na zona norte e sul, assim como nas áreas ocupadas pelas superfícies aquáticas dos reservatórios Billings e Guarapiranga.

Na Figura 47 é mostrado um detalhe na região sul do Município de São Paulo, na mesma escala e janela de visualização utilizada à Figura 45, para facilitar sua comparação. As manchas em ciano representam os vetores correspondentes aos assentamentos precários cadastrados no Habisp relativos às favelas, loteamentos irregulares e núcleos urbanizados no local. Utilizou-se aqui um preenchimento semitransparente para possibilitar a visualização da imagem de fundo e também eventuais sobreposições. Ante essa ocorrência o preenchimento mudou em aparência, e passou a ser xadrez mais escuro. Exemplos desta situação são visíveis na metade leste da Península do Córrego Cocaia, em vários polígonos do Complexo Cantinho do Céu.

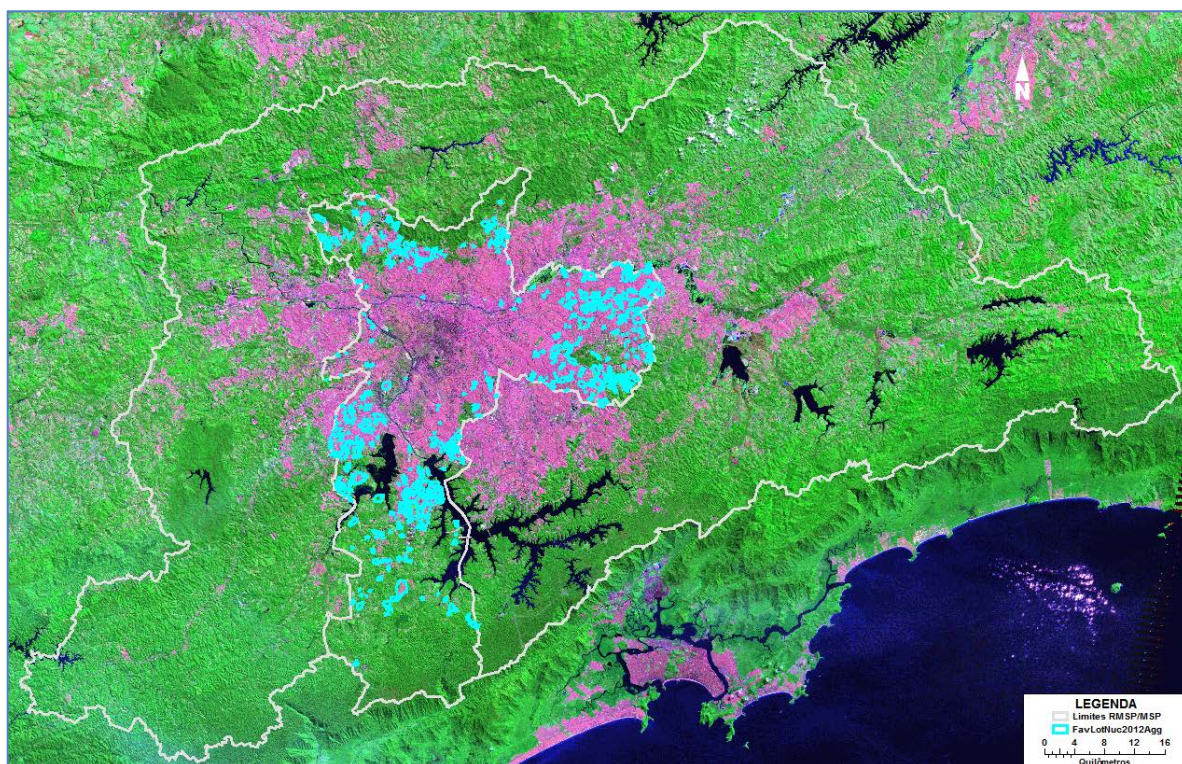


Figura 46. Mapa/imagem que mostra os vetores correspondentes aos assentamentos precários cadastrados no Habisp, sobrepostos à composição colorida de . Landsat 5, capturada em 18/04/2010.

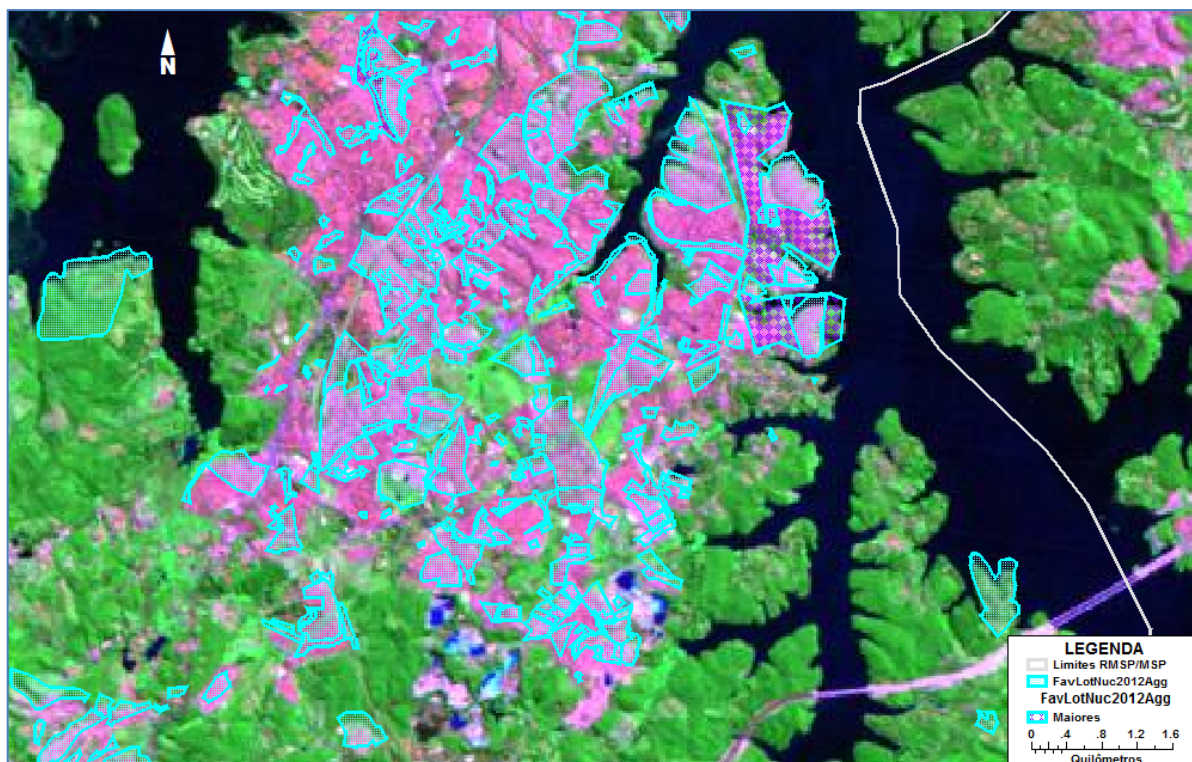


Figura 47. Detalhe ampliado do mapa-imagem anterior. Note-se a sobreposição de polígonos de favelas e loteamentos na margem leste da Península do Cocaia.

A partir daqui seguiu-se o procedimento de sobrepor, às duas camadas das áreas de incremento de substrato nos dois períodos estudados (2005-1986 e 2010-2000), os polígonos dos assentamentos precários agregados para o Município de São Paulo, elaborando-se as análises finais e os mapas com os resultados.

Foi dada preferência ao trabalho com escalas relativamente grandes, no limite da resolução das imagens satelitais de mediana resolução espacial (pixels de 30 x 30 m). Esse limite de ampliação, estaria situado em torno de 1: 35.000, antes que os pixels "estourem" na tela do computador. No entanto, o ajuste geométrico alcançado com as imagens e a concordância entre camadas espaciais chegou a ser tão alto, que foi tranquilamente possível apresentar imagens coerentes, inclusive, na escala de 1:20.000.

#### **6.11) MAPAS, IMAGENS E ANÁLISES FINAIS**

No processo de elaboração das análises finais da pesquisa aproveitou-se o ambiente gráfico já formatado no SIG Maptitude para produzir os mapas apresentados no fim do item 6.10 (Pós-classificação), e 6.11 (Sobreposição dos polígonos dos assentamentos precários cadastrados no Município de São Paulo). Conforme já foi assinalado, o objetivo era sobrepor às áreas delimitadas pelos polígonos cadastrados no Habisp os polígonos onde ocorreram as mudanças de aumento de substrato nos dois períodos analisados.

Caso ocorressem coincidências na localização, além de verificar o grau de similaridade entre as figuras comparadas, examinávamos o banco de dados do Habisp para ver se não havia incompatibilidade entre a suposta data de surgimento da superfície não vegetada e a data indicada nesse conjunto de dados e informações geográficas associadas aos assentamentos precários cadastrados no Habisp.



Obviamente procuraríamos encontrar essa evidência primeiro nas regiões onde os assentamentos precários têm maior tamanho e representatividade, ou seja, nas seis áreas piloto já mencionadas:

- 1) Condomínio Vargem Grande (Loteamento irregular)
- 2) Complexo Cantinho do Céu (Loteamento irregular e Favela)
- 3) Paraisópolis (Favela)
- 4) Heliópolis (Loteamento irregular/Favela e Núcleo urbanizado)
- 5) Jardim Pantanal (Loteamento irregular/Favela e Núcleo urbanizado)
- 6) Recanto dos Humildes (Loteamento irregular, Favela e Núcleo urbanizado)

#### **6.11.1) Condomínio Vargem Grande**

Assim, trabalhando com o primeiro caso, o loteamento irregular cadastrado no sistema Habisp com o nome “UNIFAG - Condomínio Vargem Grande” (COD 2497), deparamo-nos com várias situações muito especiais. Em primeiro lugar, este polígono é o maior de todos na lista unificada dos 2.969 assentamentos, com uma área de 2,78 km<sup>2</sup>. Segundo, no banco de dados geográfico dos polígonos com incremento no substrato para o período 2005-1986, há uma área com 1,64 km<sup>2</sup> com alto grau de coincidência em forma e posição, não apenas com o loteamento cadastrado no Habisp, mas também com a textura e coloração que indicam a urbanização na imagem de satélite (ver Figura 48). Esse polígono ocupa a quarta posição dentre os de maior área no conjunto identificado nas imagens satelitais para esse período. Por último, no cadastro do sistema da prefeitura consta que no loteamento de Vargem Grande há 4.615 lotes, e que 1989 foi o ano de implantação.

Pelas características acima relatadas, podemos afirmar que neste caso a hipótese se cumpriu, ou seja, comprovou-se que o polígono correspondente ao número 2.353 da base de dados de incremento de substrato no período de 2005-1986 corresponde ao surgimento e subsequente expansão do loteamento Vargem Grande nesse período. Ainda, observa-se que dentro do próprio polígono de aumento de substrato, destacado em vermelho, há uma mancha em amarelo, que se sobrepõe a este. Isso indica que nessa área de superposição, o aumento de substrato aconteceu entre o limite inferior do intervalo temporal mais curto (ano 2000) e o limite superior do intervalo mais comprido (ano 2005). Outras informações relevantes foram

deduzidas, compreendidas ou confirmadas, na análise realizada nesta parte do território.

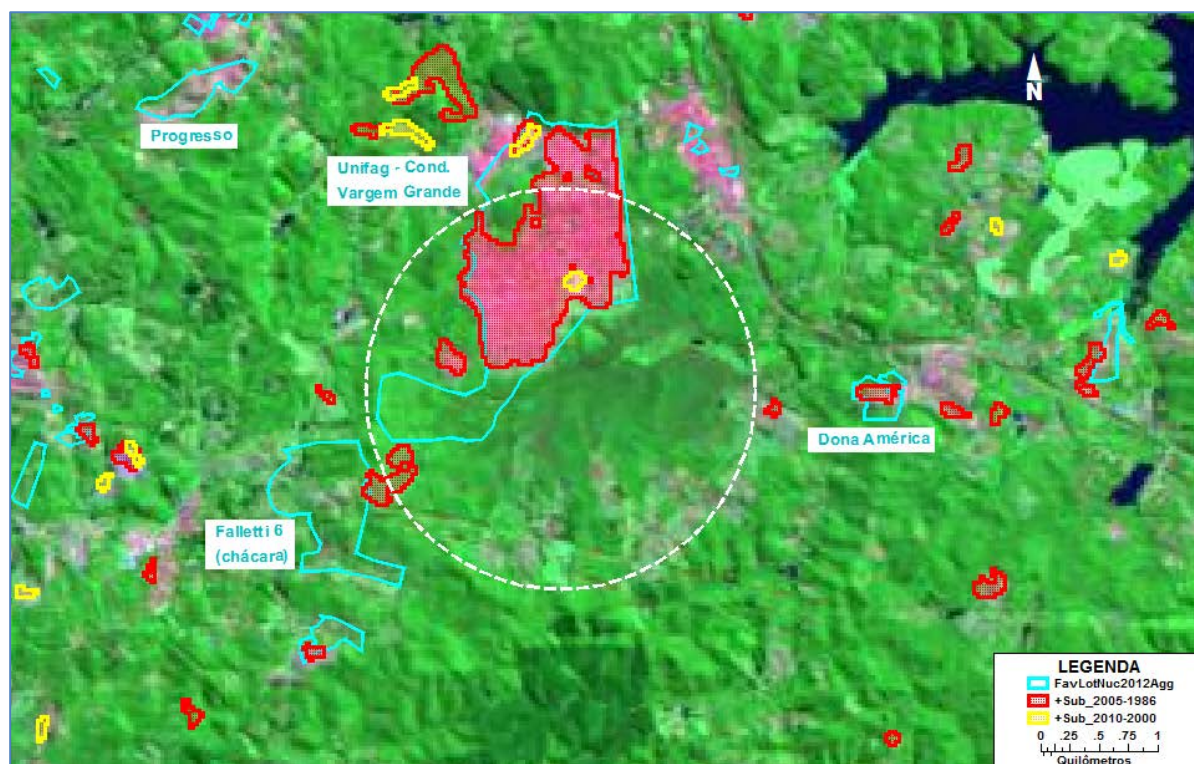


Figura 48. Na janela aparece a região da Cratera de Colônia (linha pontilhada em branco) na zona sul do Município de São Paulo, ao centro, o Loteamento de Vargem Grande. Observe-se o alto grau de coincidência entre os contornos da mancha de incremento de substrato para o período 2005-1986 (em vermelho), o fundo que indica a urbanização na imagem de satélite, e o limite do assentamento precário cadastrado no sistema Habisp (em ciano).

Na própria Figura 48 é possível observar que houve outros três assentamentos precários, que identificamos com seus nomes, ao redor de Vargem Grande. Mediante uma consulta interativa ao cadastro do Habisp (disponível no banco de dados associados no SIG), pudemos verificar seus atributos; assim, indo no sentido horário, apareceu em primeiro lugar o “Dona América” (COD 2437), com 99.000 m<sup>2</sup> de superfície e 50 lotes cadastrados, o ano de sua implantação é desconhecido. Este loteamento se mostrou contendo um polígono menor, com 38.700 m<sup>2</sup> de superfície e cor vermelha, ou seja, pertencente ao incremento do Substrato no período 2005-1986. O perímetro oficial do loteamento, em ciano, envolve totalmente esta área onde houve transformação indicada pela diminuição na superfície vegetada; adicionalmente, era claramente visível que no espaço compreendido entre

o limite exterior do polígono vermelho e o limite interior do polígono ciano existia vegetação, comprovando que mesmo que a área oficial do loteamento fosse quase duas vezes maior, o surgimento e ocupação efetiva no assentamento aconteceram apenas no interior da porção indicada pelo polígono de incremento de substrato.

O segundo assentamento pesquisado nesse entorno foi “Falleti 6” (COD 803), com 716.258 m<sup>2</sup> de superfície, no cadastro associado a ele no constam lotes cadastrados, e o ano de sua implantação também é desconhecido. Este loteamento foi cortado levemente por um polígono vermelho (2005-1986), de 101.700 m<sup>2</sup> de superfície. O perímetro oficial do loteamento, em ciano, aparece quase totalmente coberto por vegetação na imagem de satélite de fundo, e o polígono que o representa encontra-se muito próximo de uma região também sem cobertura de substrato do Loteamento Vargem Grande. A área representada pelo polígono vermelho de aumento de substrato se manifesta como uma ponte entre os loteamentos de Vargem Grande e Falleti, passando precisamente pelo divisor das águas na borda da cratera.

O terceiro assentamento rotulado na Figura 48 foi denominado “Progresso” (COD 803), apresentou uma superfície de 212.883 m<sup>2</sup>, com 201 lotes cadastrados, e sua implantação ocorreu em 1972. Este loteamento não mostrou transformações em nenhum dos dois períodos estudados. O perímetro oficial do loteamento, em ciano, aparece quase totalmente coberto por substrato na imagem de satélite de fundo. Pela data de ocupação registrada no cadastro (1972), e pela ausência de polígonos vermelhos ou amarelos, se confirma que não houve modificações indicando aumento significativo de substrato no período de 1986 a 2010.

Com base nas análises realizadas no exemplo da Figura 48 pudemos constatar vários fatos. Destaca a questão de que o banco de dados do Habisp, como qualquer outro cadastro, está sujeito a ausências e inconsistências de dados e informações. Mesmo os dados espaciais, como os contornos dos polígonos dos assentamentos precários listados estão sujeitos a esses percalços. Posteriormente, fizemos consultas diretamente junto à equipe técnica que criou o sistema e pudemos verificar esta condição. Eles relataram que, como o sistema Habisp integrou diversos cadastros que tinham sido criados de forma independente, surgiram no processo de fusão diversas dificuldades, como por exemplo, a superposição de loteamentos irregulares e favelas em territórios com limites muito parecidos, ocupando

praticamente a mesma superfície com dois processos diferentes. Também, era relativamente comum que houvesse um processo instaurado com um loteamento irregular (existia o registro dele), mas nunca aconteceu efetivamente a ocupação do território indicado na documentação. Em outras ocasiões, simplesmente não havia registro da data de implantação ou outros dados relevantes.

### **6.11.2) Complexo Cantinho do Céu**

A segunda área piloto estudada correspondeu ao território da Península do Cocaia, às margens do Reservatório Billings, também situada à zona sul do Município de São Paulo. Nesta região está localizado o denominado Complexo Cantinho do Céu, onde se constatou a presença de assentamentos precários dos três tipos considerados: favelas, loteamentos irregulares e núcleos urbanizados. Embora nenhum dos polígonos isoladamente acusasse uma superfície muito grande, como aconteceu no caso de Vargem Grande, surgiu sim uma região de destaque pela concentração das ocupações e pela sua relevância socioambiental (ver a Figura 49).

A península está marcada pelo traçado de uma linha de alta tensão que a corta no sentido noroeste-sudeste. Está caracterizada por uma superfície que mistura a ocupação formal, loteamentos irregulares, núcleos urbanizados e território ainda coberto com vegetação. A Figura 49 apresenta um detalhe ampliado na imagem de 2010 onde se pode observar a margem do reservatório Billings com centro na península.

Houve pouca presença de polígonos de alteração no período 2010-2000, e a área de abrangência destes perímetros em amarelo é bem pequena se comparada à extensão e superfície dos polígonos em vermelho que indicaram as mudanças no período 2005-1986. No entanto, sua ocorrência denota que as alterações no período mais recente aconteceram fora dos limites, ou encostando levemente, nos assentamentos precários cadastrados no local (em ciano). A mesma particularidade, quanto a sua localização, aplicou-se na relação com os polígonos vermelhos, indicadores das mudanças no período mais longo. Apenas em um caso, localizado ao sudeste da península, houve sobreposição de mudanças nos dois períodos, coincidente com a área delimitada pelo loteamento “Grajaú - R. Alziro P. Magalhães”.

Como já foi relatado antes, isto implica que a transformação ocorreu no período compreendido entre o ano 2000 e 2005. Na consulta ao cadastro do Habisp, verificou-se que o referido assentamento (identificado com o código 521), apresentava 112.194 m<sup>2</sup> de superfície, 50 lotes cadastrados, e o ano de sua implantação era, efetivamente, 2005. O loteamento “Grajaú” é vizinho ao o loteamento “Residencial Costa Branca” (COD 2596), que apresentou uma superfície de 51.319 m<sup>2</sup>, com 190 lotes cadastrados, e sua implantação ocorreu em 1995. Por sua vez, o loteamento “Residencial Costa Branca” é contíguo com a favela “Recanto da Alegria I e II” (COD 1717), que apresentou uma superfície de 4.928 m<sup>2</sup>, continha 47 domicílios, e sua implantação ocorreu em 1971. A área indicativa de transformação em substrato no período de 2005-1986 em vermelho, coincide com a mancha amarela do aumento de substrato no interior do loteamento “Grajaú”, se estende ocupando quase a metade do loteamento “Residencial Costa Branca” e não chega até a favela “Recanto da Alegria I e II”.

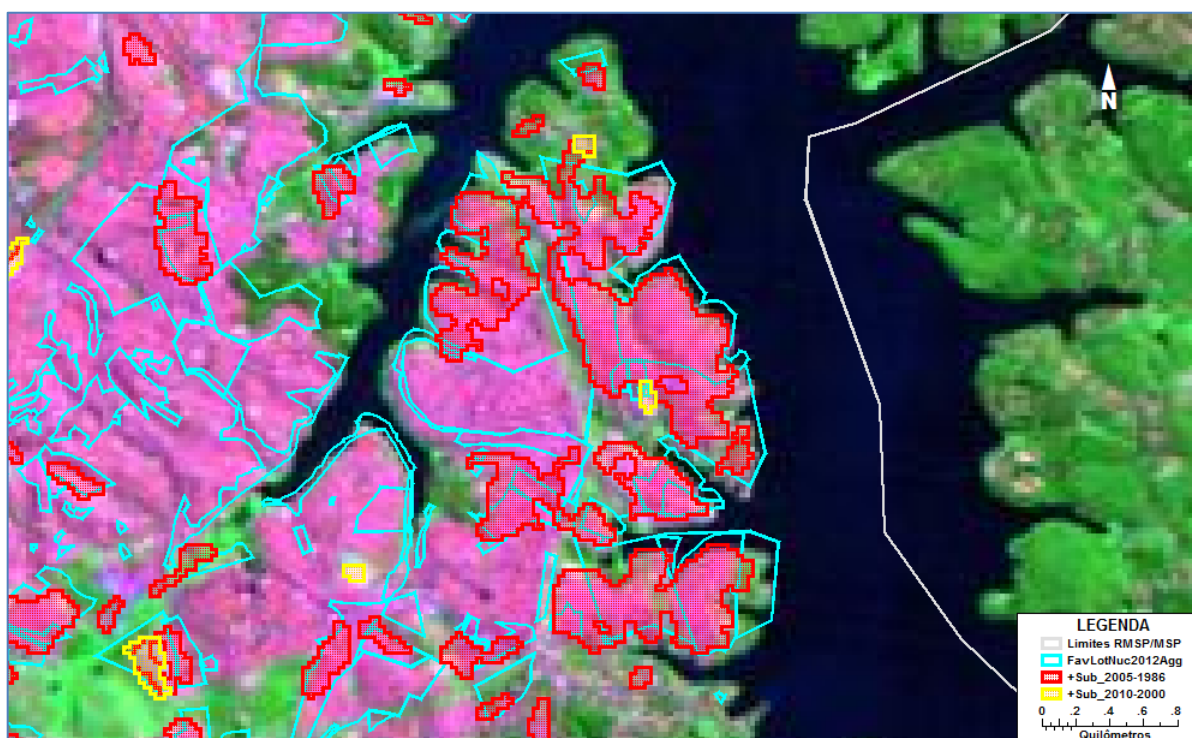


Figura 49. No centro a Península do Córrego do Cocaia, às margens do Reservatório Billings, na zona sul do Município de São Paulo. Nesta região está localizado o Complexo Cantinho do Céu.

Na análise e interpretação das informações aportadas pela superposição dos três bancos de dados geográficos utilizados verificou-se que, inicialmente, surgiu a

ocupação da favela “Recanto da Alegria” em 1971; depois apareceu o loteamento “Residencial Costa Branca” em 1995; e finalmente, em 2005, foi estabelecido o loteamento “Grajaú”. Os três assentamentos apresentam a peculiaridade de formar uma superfície contínua, o que fica evidenciado ao verificar no cadastro da prefeitura que os endereços dessas ocorrências indicam a mesma Rua Alziro Pinheiro Magalhães como referência principal nessa região do Município de São Paulo.

Na península do córrego Cocaia aparecem algumas áreas não marcadas por nenhum dos três limites apresentados no mapa-imagem onde foi realizada a pesquisa. A ausência dos polígonos em ciano (assentamentos precários) sugere que a ocupação urbana que aparece claramente na imagem de satélite é considerada uma ocupação formal, e a ausência dos polígonos de mudanças (em vermelho ou amarelo) indicam que essa ocupação é anterior ao ano 1986, e que até 2010 não houve transformações significativas referentes às perdas na superfície vegetada. Como exemplo desta manifestação consta o loteamento regular "Parque Cocaia", um dos assentamentos formais surgidos antes de 1972, momento em que se promulgou a Lei de Proteção aos Mananciais. Todos os outros polígonos apontados como assentamentos precários no cadastro do Habisp (sendo eles favelas, loteamentos irregulares ou núcleos urbanizados), manifestaram-se consistentes, tanto em área como em suas datas de início com os polígonos definidos em ambos os períodos produzidos pela metodologia.

Então, os estudos realizados nesta localidade, referendados com trabalho de campo aqui e em outras zonas da cidade, serviram para apontar duas conclusões importantes: Primeiro, que há um alto grau de consistência espacial e temporal nas informações produzidas pelos arquivos geográficos das mudanças calculadas nos intervalos de tempo analisados. Segundo, em alguns casos, não é possível distinguir entre a ocupação formal e as superfícies cobertas por assentamentos precários utilizando, exclusivamente, a metodologia proposta nesta tese.

### **6.11.3) Paraisópolis**

A terceira área piloto estudada correspondeu ao território da favela Paraisópolis, também situada à zona sul do Município de São Paulo, no distrito de Vila Andrade. Este assentamento precário originou-se de um loteamento privado, destinado à construção de residências realizada em 1921, como resultado da divisão da antiga Fazenda do Morumbi em 2.200 lotes com quadras regulares e ruas. A partir do final

da década de 1950 iniciou-se a ocupação dos terrenos, na época não habitados, e já no final do século XX Paraisópolis era a segunda maior favela paulistana.

O assentamento está localizado em uma das regiões mais ricas da cidade, e faz limite com os luxuosos condomínios Jardim Vitória Régia, Paço dos Reis e Portal do Morumbi, entre outros. Conhecida pelos fortes contrastes produzidos pela presença desses prédios de alto padrão construtivo que a rodeiam por todas as partes, em Paraisópolis há uma unidade, existe um bairro delimitado pelo polígono contínuo de 0,79 Km<sup>2</sup>. Na consulta ao cadastro do Habisp, verificou-se que o referido assentamento (código 649), apresentava 789.915 m<sup>2</sup> de superfície, 17.159 domicílios cadastrados, e o ano de sua implantação era 1960.

Na região analisada neste item observa-se pouca presença de polígonos de alteração no período 2005-1986; a área de abrangência destes perímetros em vermelho é bem menor se comparada à extensão e superfície dos polígonos em amarelo que indicaram as mudanças no período 2010-2000. As ocorrências indicaram que as alterações, nos dois períodos, aconteceram fora dos limites, ou encostando levemente, nos assentamentos precários cadastrados no local (em ciano). A mesma particularidade, quanto a sua localização, verificou-se na relação com os polígonos vermelhos, indicadores das mudanças no período mais longo. Aconteceram três casos de sobreposição de mudanças nos dois períodos, mas nenhum deles ocorreu no interior de Paraisópolis; o registro de aumento de substrato afetando a superfície do assentamento está limitado a duas ocorrências, uma em cada período contemplado, que se produziram na periferia da área, na porção sul e sudeste conforme pode se apreciar na Figura 50.

A dispersão e baixa presença de polígonos de mudanças no entorno de Paraisópolis sugerem que tanto esse assentamento, como os vizinhos, teve seu início marcado em algum momento anterior à data de coleta da imagem mais antiga (1986). Na Figura 48 pode-se observar também outro assentamento precário, quase encostado em Paraisópolis. Mediante consulta, pudemos verificar os atributos do perímetro de “Jardim Colombo” (COD 2508), com 3.244 domicílios; o ano de sua implantação (1942) o registra como a terceira favela entre as mais antigas da cidade (ver Tabela 1). A cerca de 500 metros ao noroeste deste local observa-se um polígono amarelo ocupando a superfície de 126.900 m<sup>2</sup>, indicando mudanças entre os anos 2000 e 2010 em área contígua ao Cemitério Gethsêmani.



Figura 50. No centro a favela de Paraisópolis, conhecido assentamento precário localizado no Bairro Morumbi, na zona sul do Município de São Paulo. Quase se encostando ao assentamento, se observa a presença de Jardim Colombo, uma das favelas mais antigas da cidade de São Paulo.

Perto de 600 metros ao norte de Paraisópolis apareceu um dos casos de superposição dos polígonos vermelhos e amarelos aos que nos referimos antes. As mudanças aconteceram no interior de uma extensa área verde que coincide com a localização do Colégio Visconde de Porto Seguro. Maiores Detalhes deste território se podem observar na Figura 51, produto da exportação dos vetores contidos na janela do de visualização de mapas do SIG Maptitude diretamente para o navegador do *Google Earth*. Esta possibilidade, que infelizmente só foi disponibilizada na última versão do software a que tivemos acesso, facilitou muito o manuseio dos dados, aumentando drasticamente a capacidade de se analisar o território onde as mudanças ocorreram. O navegador do Google Earth, aliado aos atributos das bases de dados geográficas (que também são exportados e ficam acessíveis para consulta interativa), fez toda a diferença na hora de verificar detalhes do tecido urbano, como o nome de ruas e avenidas, assim como para conhecer locais e eventos que certamente não eram visíveis no limite da resolução espacial utilizada.



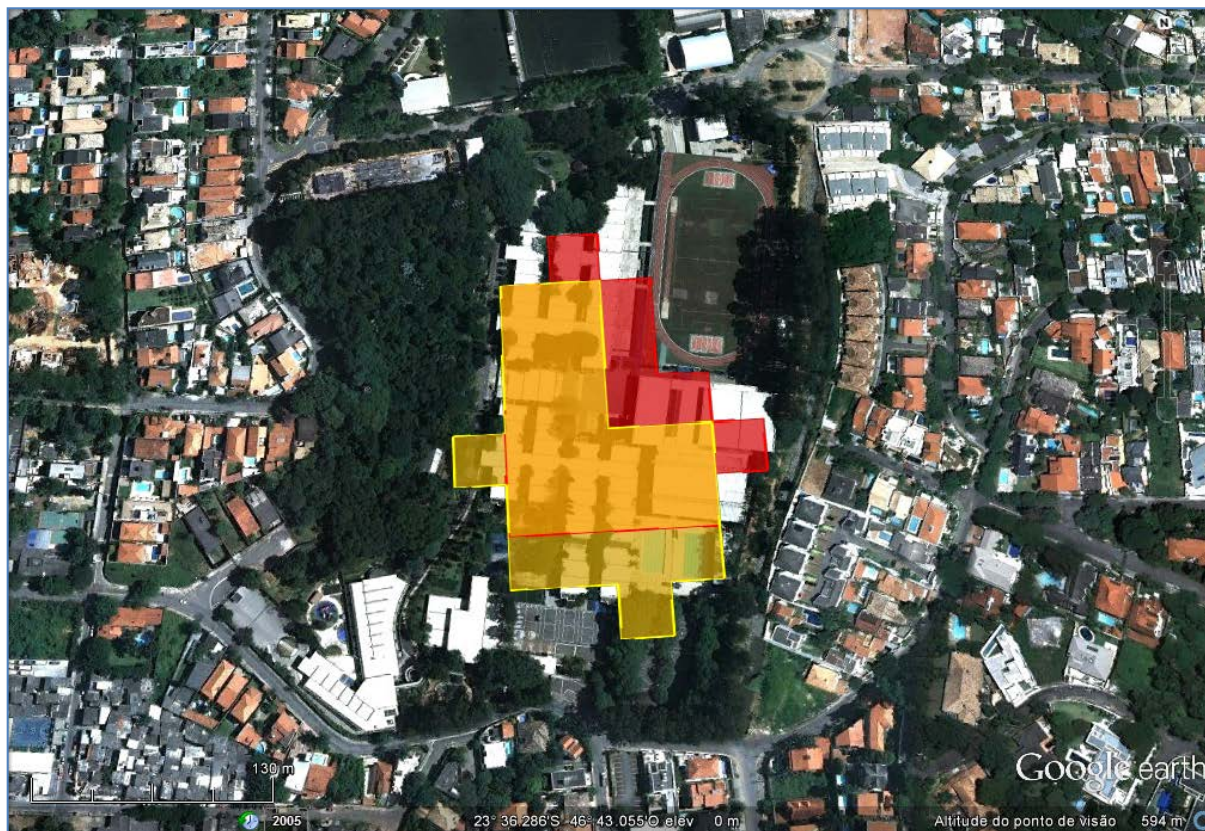


Figura 51. Ampliação mostrando a localização do Colégio Visconde de Porto Seguro, nas proximidades do estádio do Morumbi. Observe-se a notável coincidência, mesmo na grande escala, entre os polígonos indicando incremento de substrato e a área construída desta instituição de ensino privada. O contorno recortado em quadrados aponta a procedência e posição dos pixels (de 30 x 30 m) que deram origem aos polígonos. Fonte *Google Earth*, consultado em 26 de julho de 2012.

A região de entorno ao assentamento precário de Paraisópolis é bem conhecida pelos profundos contrastes sociais. A ausência de loteamentos irregulares sinaliza a localização central à cidade e em um bairro de alto padrão construtivo, onde a ocupação do território formal se deu há muito tempo. Ali as favelas se instalaram em terrenos (principalmente públicos) que não estavam ocupados por diversas razões, em geral por serem zonas íngremes ou sujeitas a enchentes. Assim surgiram as favelas de “Vila Praia”, com 250 domicílios, que foi criada em 1962; “Parque Morumbi”, com 300 domicílios e ano de implantação 1983; um pouco mais distante na direção nordeste, e bem perto da marginal do Rio Pinheiros, consta no cadastro “Real Parque”, com 1.350 domicílios, que fora iniciada em 1956 e “Jardim Panorama”, com 576 domicílios, implantada em 1957. Esses assentamentos, que

estavam localizados nas imediações de Paraisópolis, foram assinalados também na Figura 50.

#### **6.11.4) Heliópolis**

A seguinte área piloto analisada correspondeu ao território da Cidade Nova Heliópolis, situada à zona sudeste de São Paulo, no distrito de Sacomã, na divisa com o distrito de Ipiranga. Composta por catorze glebas, Heliópolis chegou a ocupar uma superfície total de quase um milhão de metros quadrados. Já foi avaliada como a maior favela de São Paulo, mas hoje tem estatuto de bairro.

A área de Heliópolis foi adquirida em 1942 pelo Instituto de Aposentadoria e Pensões dos Industriários - IAPI. O IAPI tinha a intenção de construir ali casas para residência dos associados do Instituto. Porém aquela área foi dividida, pois em 1966 unificaram-se os diversos Institutos no INPS. A gleba passou por diversos fracionamentos e alterações na sua titularidade. Em 1978 a companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP ficou com uma parte depois da desapropriação para a construção da Estação de Tratamento de Esgotos do ABC, que só começou a funcionar 20 anos depois e se encontra ainda ativa.

E em abril de 1969 com a construção do Hospital de Heliópolis e o Posto de Assistência Médica – PAM (hoje AME Heliópolis) houve um aumento no afluxo de pessoas que participaram das obras e acabaram permanecendo por lá. Também muitos trabalhadores se estabeleceram no local entre 1970 e 1980, pois trabalhavam nas metalúrgicas das cidades vizinhas do ABC; nessa época havia uma crise de oferta de imóveis para a população de baixa renda e os altos preços dos aluguéis acabaram estimulando a ocupação precária nessa região (BONDUKI, 2004). Até o final da década de 1990, Heliópolis era considerada a maior favela de São Paulo, se não a maior do Brasil. Em 2006, foi rebatizada pelos moradores e reconhecida pela prefeitura como bairro oficial, que é denominado de Cidade Nova Heliópolis. O assentamento está próximo de algumas das principais vias de acesso de São Paulo como a Rodovia Anchieta e Avenida dos Estados e fica a apenas 8 km do centro da cidade. Esses fatores contribuíram também para seu rápido crescimento populacional.

Pelas próprias características que marcaram o surgimento e evolução da antiga favela de Heliópolis, não houve no sistema Habisp uma única área que abarcasse

todo o assentamento. Verificou-se no cadastro que no local existem vários polígonos que estão relacionados às glebas em que o terreno foi dividido. Ainda, se observou que ali coexistiam empreendimentos das três tipologias estudadas (favelas, loteamentos e núcleos), mais ou menos concentradas porém configurando uma superfície descontínua, entremeada por manchas de vegetação segundo se pode observar à Figura 52.



Figura 52. No centro, o assentamento Cidade Nova Heliópolis, hoje o território conforma o bairro que substituiu a antiga favela. Note-se a quantidade de polígonos com a referência ao nome Heliópolis concentrados na localidade.

Foram colocadas etiquetas naqueles polígonos que formaram parte do assentamento precário inicial. O maior deles, denominado “S/D Complexo Heliópolis - Gleba K” estava formado por um loteamento (código 1991) que apresentou 642.270 m<sup>2</sup> de superfície, 1.032 lotes cadastrados, e ano de implantação desconhecido. Em segundo lugar em área apareceu “Heliópolis Gleba N”, um núcleo urbanizado (antiga favela) com 35.842 m<sup>2</sup> de superfície e 1.211 famílias, seu ano de início também era desconhecido para o cadastro. Este local está localizado no distrito do Ipiranga, cuja divisa nessa região está marcada pela Avenida Almirante Delamare. O assentamento beira também a Av. das Juntas Provisórias e a Rua Comandante Taylor. Em terceiro lugar, em ordem decrescente em área ocupada,

consta no cadastro do Habisp a própria favela de “Heliópolis”, com 9.446 m<sup>2</sup> de superfície, 15.843 famílias, e 1972 como ano de implantação. O assentamento encontra-se ao outro lado da Av. Almirante Delamare, o que o situa no distrito de Sacomã. Cabe ressaltar que nesta região é visível um deslocamento de 50 a 60 m na direção sudoeste entre a posição dos polígonos dos assentamentos precários e a imagem do mapa configurado para o Google Earth. Essa deformação ficou confirmada ao verificar o endereço de referência citado nos dados do cadastro. Outros polígonos menores correspondentes a assentamentos ligados à antiga favela foram: “Heliópolis Gleba A”, núcleo urbanizado com apenas 1.312 m<sup>2</sup> de superfície e 1.044 domicílios, implantado no ano 2000; a favela “Heliópolis - Ilha”, com 1.666 m<sup>2</sup> de superfície e 300 domicílios, que fora iniciada, também, no ano 2000; e “Heliópolis - Viela das Gaivotas”, favela com 1.400 m<sup>2</sup> de superfície e 600 domicílios, cujo ano de implantação for 1980.

Na região analisada neste item, nas imediações de Heliópolis, se observa também pouca presença de polígonos de alteração nos dois períodos (2005-1986 e 2010-2000); eles se manifestaram fora dos limites, ou quase encostando nos assentamentos precários cadastrados no local (em ciano). Só houve um caso de sobreposição de mudanças (polígono em vermelho e verde), e este ocorreu 400 metros ao sudeste da Viela das Gaivotas, conforme pode se observar na Figura 50, no terço inferior central da imagem.

Uma ocorrência que pode acontecer é a superposição de polígonos de loteamentos irregulares e favelas. Por exemplo, nas imediações da Gleba K de Heliópolis, 900 m na direção sudeste, encontramos a favela “Chácara Chacrinha”, uma estreita franja de 9.949 m<sup>2</sup> e 300 domicílios que se estende paralela à Rua Heminia Chimenti a partir da confluência com a Estrada das Lágrimas. Este assentamento se iniciou em 1966 sobre o território do loteamento “Cristalia 2”, com 99.018 m<sup>2</sup> e 244 lotes, que já existia ali em 1992. Ambos os assentamentos precários estão assinalados na parte sul, ao centro da Figura 52.

### 6.11.5) Jardim Pantanal

A seguinte área piloto correspondeu ao território centrado no assentamento denominado Jardim Pantanal, localizado no distrito de Vila Jacuí, na divisa com o distrito de São Miguel na zona leste do Município de São Paulo e também limítrofe com o Município de Guarulhos. Suas dimensões unidas à localização próxima ao Complexo Viário Jacú-pêssego e à Rodovia Ayrton Senna da Silva a coloca num lugar de destaque no cadastro de assentamentos precários do Município de São Paulo. Do mesmo modo, o fato deste território estar situado na parte mais baixa da várzea do Rio Tiete nessa zona, o converte no alvo principal das enchentes periódicas a que os vários assentamentos precários desse local são submetidos.

Jardim Pantanal é na realidade a sobreposição da favela “Pantanal 2” (COD 1543, com 631.327 m<sup>2</sup> de superfície, 6.800 domicílios, e 1987 como ano de início), ao loteamento “Vila Jacui AB” (COD 2414, com 827.855 m<sup>2</sup> de superfície, 534 lotes, e ano de implantação desconhecido). Praticamente toda a superfície da favela coincide em seus limites com o loteamento que a contém, conforme apresentado na Figura 51. “Vila Jacui AB” se projeta na direção noroeste, até encostar-se à favela “Ventura Branco”, uma estreita franja de 9.643 m<sup>2</sup> com 120 domicílios que se estende paralela à Rua Ventura Branco a partir da confluência com a Estrada de Cumbica; o assentamento se iniciou ali em 1990. Na sequência na mesma direção aparece o loteamento “Godoy” (COD 491), com 42.471 m<sup>2</sup> de superfície, 156 lotes, e 1989 seu ano de implantação. A pouco mais de 100 m da porção sudoeste de Jardim Pantanal e separado pela Av. Dr. Assis Ribeiro encontramos “Nossa Senhora de Aparecida”, núcleo urbanizado com 165.876 m<sup>2</sup> de superfície e 3.187 domicílios, implantado no ano de 1986.

Conforme pode-se apreciar pela Figura 53, houve pouca presença de polígonos de alteração no período 2010-2000, e a área de abrangência destes perímetros em amarelo é pequena se comparada à extensão e superfície dos polígonos em vermelho que indicaram as mudanças no período 2005-1986. No entanto, sua ocorrência denota que as alterações no período mais recente aconteceram várias vezes, no interior dos assentamentos precários cadastrados no local. A mesma particularidade, enquanto a sua localização, se aplicou na relação com os polígonos vermelhos, indicadores das mudanças no período mais longo. O caso mais notável aconteceu sobre o próprio Jardim Pantanal, com o surgimento de uma extensa área

de 45.900 m<sup>2</sup>, que forma um arco incidente tanto na superfície correspondente à favela “Pantanal 2” como ao loteamento “Vila Jacui AB”. Sobre este polígono aconteceram duas ocorrências de incremento de substrato urbano para o período 2010-2000.



Figura 53. A área em destaque corresponde à favela Pantanal 2, esse território se sobrepõe a ao loteamento Vila Jacui AB, de superfície muito maior. A combinação de ambos é conhecida como Jardim Pantanal.

A mesma situação de superposição de mudanças nos dois períodos se manifestou no local ocupado por dois assentamentos que não se sobrepõem: a favela “Eldorado” (COD 2171), com 34.438 m<sup>2</sup> de superfície e quantidade de domicílios e ano de início desconhecidos; e o loteamento “Residencial Eldorado” (COD 504), com 141.924 m<sup>2</sup> de superfície, 1.423 lotes, e 1990 como ano de implantação. Eles são contíguos, e a área de coincidência apresentada pelo aumento de substrato urbanizado no período 2010-2000, está circunscrita a uma superfície de 20.700 m<sup>2</sup> localizada no interior do “Residencial Eldorado”. Já o polígono correspondente ao aumento de substrato urbanizado no período 2005-1986 se manifestou numa superfície maior, de 117.000 m<sup>2</sup>, que se estendeu pelo loteamento e também pela favela. Ambos os assentamentos aparecem identificados, também, na Figura 53.

Como já foi mencionada antes, essa a superposição indica que a transformação ocorreu no período compreendido entre o ano 2000 e 2005. Assim como a presença exclusiva de polígonos em amarelo indica que a transformação aconteceu somente no período compreendido entre o ano 2005 e 2010.

Nas imediações do Jardim Pantanal aparecem grandes extensões não marcadas por nenhum dos três limites apresentados no mapa-imagem onde foi realizada a pesquisa. A ausência dos polígonos em ciano (assentamentos precários) sugere que a ocupação urbana que aparece claramente na imagem de satélite é considerada uma ocupação formal, e a ausência dos polígonos de mudanças (em vermelho ou amarelo) indicam que essa ocupação é anterior ao ano 1986, e que até 2010 não houve transformações significativas referentes a perdas na superfície vegetada.

Todos os outros polígonos apontados como assentamentos precários no cadastro do Habisp na região (sendo eles favelas, loteamentos irregulares ou núcleos urbanizados), manifestaram-se consistentes, tanto em área como em suas datas de início com os polígonos definidos em ambos os períodos produzidos pela metodologia. Provavelmente haverá exceções em outros locais, e elas deverão ser analisadas, já que as informações provenientes dos cadastros, quaisquer que sejam suas origens, não podem ser aceitas per se. É necessário realizar visitas ao campo para verificar a verdade de terreno, pois caso contrário, se comprometeria a qualidade de todo o processo de pesquisa.

#### **6.11.6) Recanto dos Humildes**

A última área piloto apresentada correspondeu ao território do Recanto dos Humildes, situado à zona norte de São Paulo, no distrito de Perus, próximo à divisa com o distrito de Jaraguá. A situação neste local guarda certa semelhança com o caso de Heliópolis, no sentido de que há uma série de polígonos representativos de ocupação precária (nas três tipologias analisadas), cuja somatória define uma superfície considerável (ver Figura 54). Há coincidência também na forma de denominação dos assentamentos, onde as palavras Recanto dos Humildes, ou Recanto aponta várias ocorrências. No entanto, o que é notável nesta região, é a presença de grande número de polígonos indicativos de incremento de substrato urbanizado ocupando amplas áreas.

No caso específico do Recanto dos Humildes, pode-se apreciar claramente que as manchas de aumento de substrato, sobretudo as correspondentes ao período 2005-1986, cobrem quase toda a superfície ocupada pelos assentamentos nessa região, e as do período 2010-2000 indicam que praticamente não houve alterações, nesse intervalo, para as favelas, loteamentos irregulares e núcleos urbanizados que ali existiam (ver Figura 55). Encontramos também na região todo tipo de combinações entre os polígonos de aumento de substrato urbanizado, e grandes superfícies onde não existia registro de assentamentos precários no cadastro do sistema Habisp (nas três categorias aqui consideradas). Utilizando um forte incremento na escala de visualização, facilitado pelos recursos de navegação do *Google Earth* em combinação com as três camadas vetoriais, conseguimos perceber grande número de detalhes e obter informações diretamente na tela do computador. Ou seja, empregamos o mesmo procedimento que já havíamos utilizado quando pesquisávamos nas imediações de Paraisópolis. A heterogeneidade do território estudado, assim como as implicações decorrentes da aplicação da metodologia de identificação de mudanças aqui proposta, confirmou que de fato a integração de diferentes modelos e escalas de análise geográfica é necessária para poder chegar ao entendimento da complexa realidade dos territórios urbanizados. É a este enfoque que chamamos de integração geo-escalar.

Pelas próprias características que marcaram o surgimento e evolução da antiga favela do Recanto dos Humildes, não houve no Habisp uma área contínua que abarcasse todo o assentamento. Verificou-se que no local existem vários polígonos que se encontravam muito próximos sem se sobrepor. Ainda, observou-se que ali coexistiam empreendimentos das três tipologias estudadas (favelas, loteamentos irregulares e núcleos), sendo que destes os que ocupam maior superfície eram os núcleos urbanizados, segundo se pode observar à Figura 54.



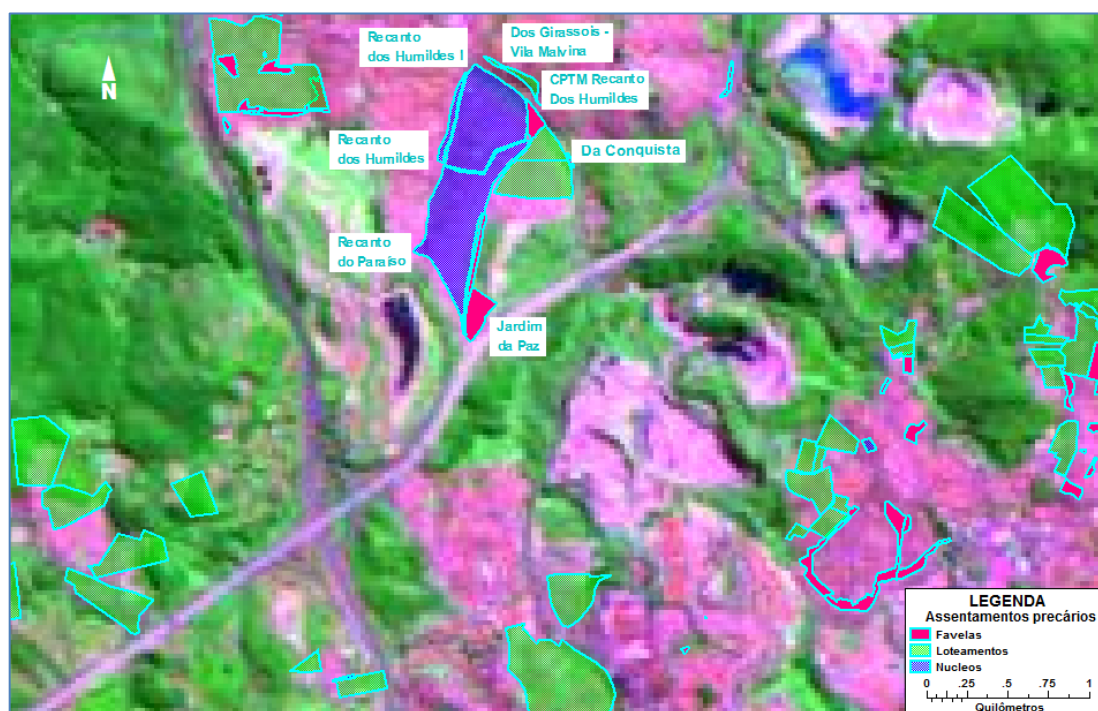


Figura 54. A área na parte superior corresponde ao Recanto dos Humildes, mostram-se identificados, apenas, os assentamentos precários no local.

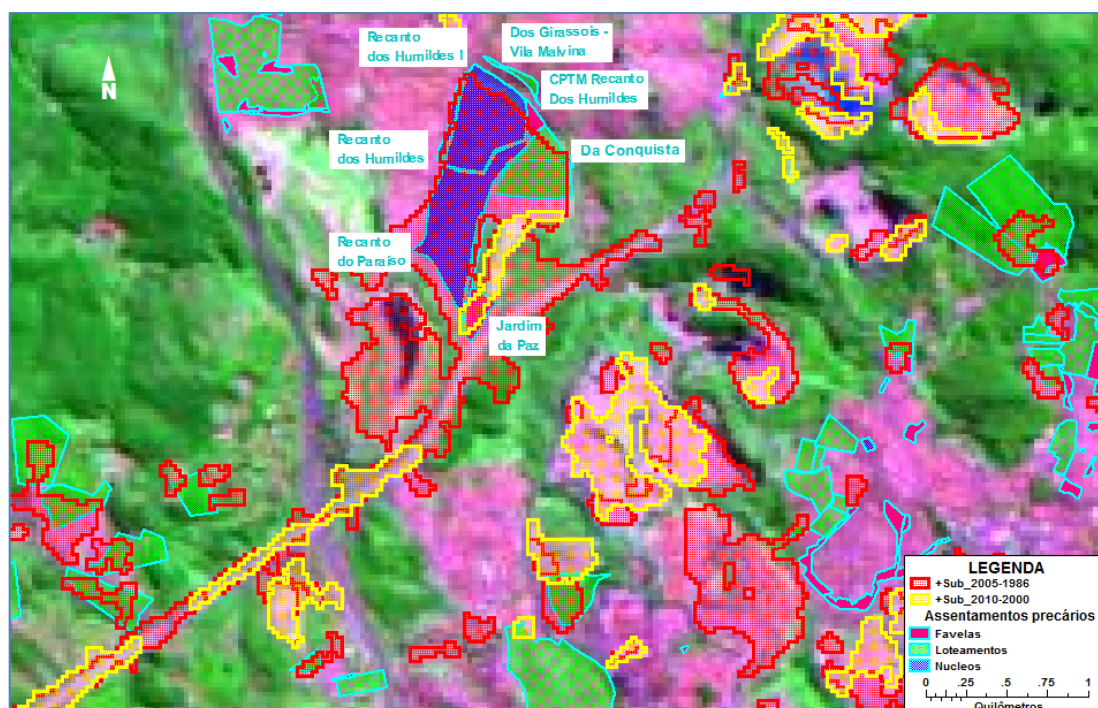


Figura 55. A mesma janela e escala de visualização, agora com os polígonos de incremento de substrato urbanizado nos dois períodos. Note-se a linha do Rodoanel.

Nas referidas figuras colocamos etiquetas naqueles polígonos que formaram parte do maior conjunto de assentamentos no local, onde predomina a denominação Recanto dos Humildes. O maior deles, chamado “Recanto do Paraíso” (COD 339), estava formado por um núcleo urbanizado (antiga favela) que apresentou 246.890 m<sup>2</sup> de superfície, 4.000 domicílios cadastrados e ano de implantação em 1992. Em segundo lugar apareceu “Recanto dos Humildes I” (COD 237), outro núcleo urbanizado com 211.843 m<sup>2</sup> de superfície e 2.370 famílias, com ano de início em 1981. Estes dois assentamentos estão separados pela Travessa dos Manacás. Em terceiro lugar, em ordem decrescente em área ocupada, consta no cadastro o loteamento “Da Conquista” (COD 245), com 131.647 m<sup>2</sup> de superfície, 436 lotes, e 1994 como ano de implantação. O assentamento encontra-se separado dos núcleos antes relacionados pela Rua Salmistas.

Em quarto lugar em área consta “Jardim da Paz”, favela com 34.139 m<sup>2</sup> de superfície e 350 domicílios, implantado no ano 2000. Le segue a favela “CPTM Recanto dos Humildes” (COD 879), com 14.544 m<sup>2</sup> de superfície e 400 domicílios, que fora iniciada no ano de 1994; este assentamento está separado do núcleo “Recanto dos Humildes I” pela Rua Violeta Silvestre e limitado ao norte pela linha férrea da CPTM, de ai seu nome. Outros polígonos de menor área ficaram como remanescentes: “Córrego da Mina” (COD 235), favela com 13.276 m<sup>2</sup> de superfície e 255 domicílios, cujo ano de implantação fora 1992; “Papagaios” (COD 235), favela com 6.629 m<sup>2</sup> de superfície e 70 domicílios e ano de implantação desconhecido; e a favela “Rua Índia”, com 1.335 m<sup>2</sup> e 30 domicílios, que fora implantada em 2002. As três últimas ocorrências descritas não foram rotuladas nas figuras 54 e 55 por limitações na escala de representação.

Na região analisada neste item, nas imediações do Recanto dos Humildes, se observou a situação inversa aos casos anteriormente mencionados de Heliópolis e Paraisópolis. Aqui aconteceram enormes transformações no tecido urbano, que foram registradas nos dois períodos (2005-1986 e 2010-2000). Ressalta-se o traçado do Rodoanel Mário Covas, com porções que denotam a história de sua construção neste local.

Um caso que chamou muito à atenção foi a presença de um loteamento de forma quase retangular cujo centro se localiza a uns 1.000 metros do Recanto dos Humildes na direção leste, muito próximo da Rodovia dos Bandeirantes. Este

assentamento, que limita ao sul com o Aterro Sanitário Bandeirantes, é denominado “Do Russo”, e no cadastro do Habisp constam para ele os seguintes atributos: Seu código (391), 294.080 m<sup>2</sup> de superfície, 941 lotes, e data de implantação desconhecida. No seu interior, e também rodeando, se contabilizaram nove favelas de diversas dimensões, cuja data de implantação oscilava entre 1972 e 1985. Pois bem, mesmo que a data do loteamento seja desconhecida (às vezes é muito difícil obter informações detalhadas nos registros antigos), as datas registradas pelas favelas cadastradas no local foram corroboradas pela ausência de polígonos indicadores de mudanças nas datas compreendidas entre 1986 e 2010. A consistência desta informação deduzida da análise espacial resultou de grande valia na hora de confirmar o sucesso da metodologia proposta.

## 7) CONCLUSÕES

Chegamos à fase final deste estudo com a proposta de uma metodologia de trabalho que subsidie a identificação e monitoramento de mudanças relevantes no uso e cobertura do solo no tecido urbano utilizando imagens satelitais de mediana resolução espacial. Assim, consideramos a hipótese principal demonstrada. Ainda, o método é também aplicável na detecção de alterações que incidam sobre superfícies não urbanizadas, como regiões de culturas agrícolas ou pastoris, matas, áreas ambientalmente protegidas e, inclusive, corpos d'água. Por esse motivo empregamos, ocasionalmente, os termos uso e cobertura da terra no lugar de uso e ocupação do solo.

No entanto, as superfícies ocupadas por assentamentos precários não foram sempre identificadas e sobressalentes nos territórios da cidade, com a utilização desta técnica, o que tornou incipiente a comprovação de nossa hipótese complementar ou secundária. Afirmamos que esta não comprovação ocorreu pela inadequação das imagens e escalas de trabalho adotadas nesta pesquisa a este objeto de estudo mais específico e complexo, em sua espacialidade e conformação, tanto tipológica quanto temporal.

A combinação das técnicas aplicando o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), o classificador por Árvore de Decisão e o *Majority Analysis*, seguidos da conversão das manchas obtidas em polígonos georreferenciados, revelou-se como uma opção viável na identificação e avaliação das áreas onde houve mudanças significativas, indicando a redução da superfície vegetada com aumento do substrato urbano<sup>29</sup>. Estas propriedades passam a ter maior relevância quando o modelo é aplicado em imagens de mediana resolução espacial e ambientes espectralmente complexos, como é o caso das áreas urbanas e periurbanas.

Desta forma, a análise do espaço urbanizado utilizando o método aqui proposto pode se apresentar como uma conveniente alternativa na produção de estudos sobre transformações no tecido urbano, em especial, quando seja possível contar com imagens satelitais da mesma região, inseridas numa série histórica temporal. Assim as transformações e mudanças no uso e ocupação do solo, que ocorrem em porções desse espaço urbanizado, são identificáveis e mensuráveis utilizando-se a

---

<sup>29</sup> Fração Substrato, ver a definição no item 6.6 (Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME).

tecnologia geoespacial. Como vantagem adicional surge a possibilidade de se cobrirem grandes superfícies em uma visão de conjunto, característica a se considerar quando são analisadas extensas aglomerações urbanas como, por exemplo, a cidade de São Paulo.

Os estudos realizados nas regiões da cidade onde houve mudanças significativas indicando aumento na classe Substrato e/ou onde existem assentamentos precários cadastrados dentro dos limites do Município de São Paulo serviram para avaliar as seguintes conclusões importantes:

- Verificou-se um alto grau de consistência espacial e temporal entre as informações produzidas pelos arquivos geográficos das mudanças calculadas nos intervalos de tempo analisados, os cadastros da Secretaria Municipal da Habitação - Sehab e a verdade de terreno.
- Essas informações poderiam ser utilizadas para completar, conferir e melhorar os cadastros, auxiliando na tomada de decisões e no planejamento urbano e habitacional de interesse social no âmbito municipal.
- Em alguns casos não é possível distinguir entre a ocupação formal e as superfícies cobertas por assentamentos precários utilizando-se a metodologia proposta nesta tese. Em consequência, outras fontes de dados deverão ser consideradas (por exemplo, imagens satelitais e fotografias aéreas, com alta resolução espacial) quando o objetivo principal for a identificação de mudanças em territórios específicos, analisados com grande detalhe.

Mesmo que a distinção entre ocupação formal e informal/precária não tenha sido completamente possível, houve um alto grau de coincidência entre a localização das alterações verificadas pelo método de separação de componentes no Modelo Linear de Mistura Espectral e a ocorrência dos assentamentos precários cadastrados no Habisp, sistema de informações sobre habitação social da Sehab. Basta observar os mapas-imagens apresentados nas Figuras 42 e 44 para verificar esta afirmação. Uma comprovação desta ideia incluindo métodos geoestatísticos e de correlação espacial seria a complementação natural no futuro imediato.

Como subproduto da aplicação do MLME nas imagens utilizadas obteve-se uma forma de combinação de canais em falsa cor que evidenciou características do

tecido urbano, do sistema viário e do relevo, que poderia ser uma contribuição atraente para outras aplicações, como por exemplo, o planejamento de transportes e interligação viária. Esta possibilidade poderá produzir futuramente uma nova pesquisa ou a continuação desta.

Da mesma maneira, é viável dar continuidade a este estudo por meio de pesquisa sobre as diversas fontes de imagens de mediana resolução espacial, para procurar novos pares compatíveis, de acordo com a data juliana. Assim, seria possível verificar outros intervalos de tempo onde, comprovadamente, aconteceram alterações significativas no uso e ocupação do solo urbano. Ainda, a inclusão desses novos pares de imagens traria o benefício adicional de se reduzir o período de tempo de identificação no qual as alterações aconteceram. Isso se consegue adotando o limite superior do intervalo mais antigo e o inferior do mais recente, no caso de superposição de áreas destacadas, em dois intervalos distintos. Da mesma maneira, quando numa área só aparecem manchas indicativas de alterações no intervalo mais recente, isso indica que a transformação ocorreu entre o final do período mais antigo e o final do mais recente. Sempre considerando intervalos temporais que se sobreponham.

Uma forma de explorar outros caminhos e alternativas que surgiram durante a execução da pesquisa seria adicionar novos passos na classificação por árvore de decisão, incorporando, por exemplo, a utilização de mapas e imagens em escalas mais detalhadas, assim como atributos qualitativos, e não apenas quantitativos, na hora de se aplicar a decisão dicotômica. Aproveitando o ensejo, poder-se-ia analisar a possibilidade de aplicação da metodologia de identificação de mudanças em outros setores estratégicos da gestão municipal e metropolitana, como por exemplo, na gestão dos transportes, no gerenciamento ambiental e de recursos hídricos.

É importante ressaltar que a metodologia indicada não constitui um substituto a outros métodos consagrados pela prática do planejamento urbano e o sensoriamento remoto. Apresenta-se como um instrumento integrador escalar e, talvez, uma alternativa de baixo custo para que outras cidades brasileiras, ou do mundo, possam identificar zonas onde aconteceram drásticas alterações no uso do solo que, eventualmente, apontariam o surgimento de algum tipo de assentamento precário; ou, simplesmente, seja utilizado para auxiliar na tomada de decisões nos complexos territórios que hoje constituem as aglomerações metropolitanas.

## 8) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. B. et al. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, 52, 1995. 137-154.

ADAMS, J. B.; GILLESPIE, A. R. **Remote Sensing of Landscape with Spectral Images: a physical modeling approach**. Nova York: Cambridge University Press, 2006.

ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis. **Remote Geochemical Analysis**, Cambridge, 4, 1993. 145-166.

AGUIAR, A. P. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; MASCARENHAS, N. D. A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, 20, 1999. 647-657.

ANDERSON, L. O. et al. Assessment of deforestation in near real time over the Brazilian Amazon using multitemporal fraction images derived from Terra MODIS. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2, n. 3, 2005. 315-318.

BARROS FILHO, M. N.; SOBREIRA, F. J. A. **Accuracy of lacunarity algorithms in texture classification of high spatial resolution images from urban areas**. XXI Congress of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Beijing: [s.n.]. 2008. p. 417-422. On line. [21 de dezembro de 2008].

BLAMANNEN. Destripe Landsat-7 ETM+. **geoNotes Earth Science teaching and research**, 12 jul. 2011. Disponível em: <<http://blamannen.wordpress.com/2011/07/12/destripe-landsat-7-etm-some-thoughts/>>. Acesso em: 17 Agosto 2011.

BONDUKI, N. G. **Origens da habitação social no Brasil. Arquitetura moderna, lei do inquilinato e difusão da casa própria**. 4a edição. ed. São Paulo: Estação Liberdade, 2004. 344 p. ISBN ISBN 978-85-85865-91-7.

CANDEAUX DUFFAT, R.; PÉREZ MACHADO, R. P.; NÚÑEZ VÉLIZ, P. **Sistemas Automatizados de Cartografía Temática como Caso Particular de Sistemas de Información Geográfica**. Anales de la II Conferencia Latinoamericana sobre Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes - ULA. 1989. p. 211-235.

CAPEL, H. Quo vadis Geographia? La geografía española y los concursos para la habilitación del profesorado universitario. **Biblio 3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales**, Barcelona, VIII, nº 469, 10 Abril 2006. 1-19.

CARNEIRO, A. M. C. **Uso do Modelo de Mistura MESMA e Imagens ASTER para Construção de um Mapa de Conforto Urbano para Belo Horizonte – MG**. Instituto de Geociências da UFMG. Belo Horizonte, p. 98. 2009.

CARREIRAS, J. M. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; PEREIRA, J. M. C. Fraction images derived from SPOT-4 Vegetation data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, 23, n. 23, 2002. 4979-4983.

CEM. Base das Favelas de São Paulo. **Centro de Estudos da Metrópole**, São Paulo, 2001. Disponivel em: <[http://www.centrodametropole.org.br/index.php?section=content&subsection\\_id=4&content\\_id=716](http://www.centrodametropole.org.br/index.php?section=content&subsection_id=4&content_id=716)>. Acesso em: 03 Setembro 2009. On line.

CHUVIECO, E. et al. “ Son las tecnologías de la Información Geográfica (TIG) parte del núcleo de la Geografía? **Boletín de la Asociación Espa ola de Geógrafos**, Madrid, n  40, 2005. 35-55.

COCHRANE, M. A.; SOUZA JR., C. Linear mixture model classification of burned forest in the eastern Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, 19, n. 17, 1998. 3433-3440.

COELHO, E. C. R.; PÉREZ MACHADO, R. P. **O Sistema de Prioriza o do Habisp**: um estudo de caso. 12 Encontro de geógrafos da América Latina. Montevideo: [s.n.]. 2009. p. 15. Disponivel em: <http://egal2009.easyplanners.info/area>. Acesso em: 18 de Fevereiro, 2011.

COELHO, E. C. R.; PÉREZ MACHADO, R. P. **O Sistema de Prioriza o do Habisp**: um estudo de caso. 12 Encontro de geógrafos da América Latina. Montevideo: [s.n.]. 2009. p. 15. Disponivel em: <http://egal2009.easyplanners.info/area>. Acesso em: 12 Mar. 2011.

DA SILVA, E. A. A cartografia municipal. **A Mira Agrimensura e Cartografia. Se o Técnica Cartografia**, Rio de Janeiro, Ano XIX – 152, 2009. 58-61.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia para Geoprocessamento. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRA, A. M. V. **Introdu o   Ciência da Geoinforma o**. INPE-10506-RPQ/249. ed. São José dos Campos: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, v.  nico, 2001. Cap. 6, p. 141-172. On line. [21 de Novembro de 2009].

DONG, Y. Landsat ETM+ Destripe. **Exelis Visual Information Solutions**, 16 mar. 2010. Disponivel em: <<http://www.exelisvis.com/language/en-US/UserCommunity/CodeLibrary.aspx>>. Acesso em: 17 Agosto 2011.

EMPLASA. EMPLASA. Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A. **Site da EMPLASA. Secretaria de Desenvolvimento Metropolitano. Governo do Estado de São Paulo**, 2012. Disponivel em: <<http://www.emplasa.sp.gov.br/emplasa/gsp/gsp.asp>>. Acesso em: 17 Fevereiro 2012. Dados oficiais da RMSP para 2011.

ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei Complementar N  1.139, de 16 de Junho de 2011**. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. Secretaria Geral Parlamentar. São Paulo, p. 8. 2011..

FERREIRA BUARQUE DE HOLLANDA, A. **Novo Dicionário da Língua Portuguesa**. 2a Edi o. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.

FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, 25 (10), 2004. 1837-1860. D.O.I.: 10.1080/0143116031000101530.



FERREIRA, M. C. Considerações Teórico-metodológicas sobre as origens e a inserção do Sistema de Informação Geográfica na Geografia. In: VITTI, A. C. **Contribuições à história e à epistemologia da Geografia**. Primeira. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. Cap. 4, p. 101-125. ISBN 8528612678.

FRANÇA, E. **Favelas em São Paulo (1980-2008): Das propostas de desfavelamento aos projetos de urbanização. A experiência do Programa Guarapiranga**. São Paulo. 2009. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie.

FUCKNER, M. A.; ROSEMBACK, R.; ROSA, V. G. C. **Comparação de transformações radiométricas e técnicas de fusão de imagens CBERS-2/CCD e IRS-P6/LISS-IV: aplicação no município de Campinas – SP**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. [S.I.], p. 13. 2005.

HEROLD, M.; GOLDSTEIN, N. C.; CLARKE, K. C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modelling. **Remote Sensing of Environment**, 86, 2003. 286–302.

HOLBEN, B. N.; SHIMABUKURO, Y. E. Linear mixing model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensors. **International Journal of Remote Sensing**, 14, n. 11, 1993. 2231-2240.

IÑIGUEZ ROJAS, L. B. Seducción de los mapas temáticos en salud y limitantes de la dimensión cuantitativa. In: BUZAI, G. D. **Métodos cuantitativos en Geografía de la Salud**. Luján: Universidad Nacional de Luján, v. Único, 2007. p. 49-72.

INSTITUTO AGRONÔMICO. Instruções Agrícolas para o Estado de São Paulo. **Boletín do Instituto Agrônômico**, Campinas, 200, n. 5, 1990. 233.

JENSEN, J. **Introductory Digital Image Processing: a remote sensing perspective**. Old Tappan: Prentice Hall, v. Único, 1996. 368 p. OSTI ID: 5166368.

KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. **The tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT**. Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Indiana: Purdue University of West Lafayette. 1976. p. 4B-41 to 4B-51.

KAWAKUBO, F. S. **Metodologia de Classificação de Imagens Multiespectrais aplicada ao Mapeamento do Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Amazônia: Exemplo do Caso na Região de São Félix do Xingu, Sul do Pará**. Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 113. 2010. Tese apresentada em 5 de Agosto de 2010 como requisito na obtenção do grau de Doutor em Ciências, pelo programa de pós-graduação em Geografia Física.

KAWAKUBO, F. S. et al. Land use and vegetation-cover mapping of a indigenous land are in the state of Mato Grosso (Brazil) based on spectral linear mixing model, segmentation and region classification. **Geocarto International**, 25, n. 2, 2009. 165-175.

KRESSLER, F.; STEINNOCHER, K. Change detection in urban areas using satellite data and spectral mixture analysis. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, XXXI(B7), 1996. 379–383.

LU, D. et al. Comparison of land-cover classification methods in the Brazilian Amazon Basin. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 70, 2004. 723-731.

MATSUOKA, J. V.; HAERTEL, V. Investigação do processo de segmentação multiresolução utilizando o critério de ponderação de formas e cores aplicadas às imagens de áreas urbanas de alta resolução espacial do satélite Ikonos. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, 21 a 26 Abril 2007. 589-596.

MINARI, M. Landsat\_Gapfill. **Exelis Visual Information Solutions**, 04 jun. 2009. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/language/en-US/UserCommunity/CodeLibrary.aspx>>. Acesso em: 17 ago. 2011. The two-file methodology for filling gaps was adapted from the USGS article "SLC Gap-Filled Products, Phase One Methodology".

MINISTÉRIO DAS CIDADES; ALIANÇA DE CIDADES. **Ações Integradas de Urbanização de Assentamentos Precários**. 1ª Edição — Edição Bilingue. ed. Brasília: Publisher Brasil Editora, v. Único, 2010. 210 p. ISBN ISBN: 978-85-60133-91-8. Disponível em:

NUNES, S. S.; JÚNIOR, C. S. Avaliação de modelos de mistura de pixel para áreas urbanas. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, 21-26 Abril 2007. 6885-6892.

ONU-HABITAT. ONUBR Nações Unidas no Brasil. **ONU-HABITAT Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos**, 2000. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/onu-no-brasil/onu-habitat/>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2011.

PASTERNAK, S. **Espaço e População nas Favelas de São Paulo**. XIII Encontro da Associação Brasileira de Estudos Populacionais. Ouro Preto: [s.n.]. 2002. p. 18. Disponível em. Acesso em 15 Ago. 2012.

PÉREZ MACHADO, R. P.; SMALL, C. **Monitoring diachronic changes of the City of Sao Paulo with multi-temporal Spectral Mixture Analysis**. Conference Proceedings. Regional Geographic Conference - International Geographic Union. Santiago: UGI. 2011. p. Section 33. Urban Geography and Emerging Urban Transformations.

PMSP-SEHAB-HABI. **HABISP: Mapeando a Habitação na Cidade de São Paulo**. 1ª. ed. São Paulo: Boldarini Arquitetura e Urbanismo, v. Único, 2008. 119 p. CDD: 353.550981611.

PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; ALIANÇA DE CIDADES. **Sistema de Caracterização, Classificação, Elegibilidade e Priorização para Intervenções em Assentamentos Precários no Município de São Paulo/ Brasil**. Secretaria Municipal de Habitação. São Paulo, p. 181. 2007. Disponível em: [http://www.habisp.inf.br/theke/documentos/priorizacao/Per\\_Review\\_oficial.PDF](http://www.habisp.inf.br/theke/documentos/priorizacao/Per_Review_oficial.PDF).

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Município em Mapas. **Município em Mapas - Série Temática**, 2006. Disponível em: <[http://www9prefeitura.sp.gov.br/sempla/mm/index.php?texto=corpo&tema\\_cos=5](http://www9prefeitura.sp.gov.br/sempla/mm/index.php?texto=corpo&tema_cos=5)>. Acesso em: 28 Maio 2012.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Plano Municipal de Habitação**. Secretaria Municipal de Habitação. São Paulo. 2011. Disponível em: xxxx. Acesso em: 15 Jan. 2012.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO; SECRETARIA DE HABITAÇÃO; SUPERINTENDÊNCIA DE HABITAÇÃO POPULAR. **Habisp**: mapeando a habitação na cidade de São Paulo. São Paulo: [s.n.], 2008. 120 p.

RESENDE, M. R. **Investigação do uso de imagens de sensor de sensoriamento remoto hiperespectral e com alta resolução espacial no monitoramento da condição de uso de pavimentos rodoviários**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 128. 2010.

ROBERTS, D. A. et al. Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, 65, 1998. 267-279.

ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. Green vegetation, nonphotosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, 44, 1993. 255-269.

RODRÍGUEZ, A. C. M.; MARTINS, E. R. C. **EVOLUÇÃO DE ÁREAS VERDES E URBANAS A PARTIR DO USO DE IMAGENS-FRAÇÃO VEGETAÇÃO, SOLO E SOMBRA NA CIDADE DE SÃO PAULO – SP**. Anales del XII Encuentro de Geógrafos de América Latina. Montevideo: [s.n.]. 2009. p. 1-6. On line. [17 de Fevereiro de 2009].

ROGAN, J.; FRANKLIN, J.; ROBERTS, D. A. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. **Remote Sensing of Environment**, 80, 2002. 143-156.

SABOL, D. et al. **Temporal variation in spectral detection thresholds of substrate and vegetation in AVIRIS images**. JPL, Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Miami: CSA Illumina. 1992. p. 132-134. SEE N94-16666 03-42.

SCARAMUZZA, P.; MICIJEVIC, E.; CHANDER, G. **SLC Gap-Filled Products. Phase One Methodology**. USGS - United States Geological Survey. Reston, Virginia, p. 5. 2004.

SECRETARIA MUNICIPAL DE HABITAÇÃO. HABISP. **HABISP. Sistema de Informações para Habitação Social**, 10 Março 2008. Disponível em: <<http://habisp.inf.br>>. Acesso em: 5 Fevereiro 2012.

SHIMABUKURO, Y. E. et al. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, 19, n. 3, 1998. 535-541.

SHIMABUKURO, Y. E. et al. Fraction images derived from Terra Modis data for mapping burnt areas in Brazilian Amazônia. v. **International Journal of Remote Sensing**, 30, n. 6, 2009. 1537-1546.

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**, 33, 1998. 1729-1737.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing model to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, Janeiro 1991. ISSN 0196-2892. D.O.I.: 10.1109/36.103288.

SLIUZAS, R. et al. **Background for the expert group meeting on slum identification/mapping using geo-information technology**. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation - ITC. Enschede, p. 4. 2008. On line. [10 de setembro de 2008].

SLIUZAS, R.; MBOUP, G.; DE SHERBININ, A. **Report Expert Group Meeting on Slum Identification and Mapping**. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation - ITC. Enschede, p. 36. 2008. On line. [2 de dezembro de 2008].

SMALL, C. **Multiresolution analysis of urban reflectance**. Proceedings of The IEEE Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. Rome: [s.n.]. 8 November 2001.

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

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**, 26, n. 4, 20 Fevereiro 2005. 661-681.

SMALL, C.; LU, J. W. T. Estimation and vicarious validation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, 4, 2006. 441-456.

SOUZA JR., C. et al. Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, 87, 2003. 494-506.

UN-HABITAT. **The Habitat Agenda. Istanbul declaration on Human Settlements**. United Nations Center for Human Settlements - HABITAT. Estambul, p. 3. 1996. On line. [21 de novembro de 2008].

UN-HABITAT. **The Habitat Agenda Goals and Principles, Commitments and the Global Plan of Action**. United Nations Center for Human Settlements - HABITAT. Nairobi, p. 109. 2003. On line. [21 de novembro de 2008].

USGS. Science for changing World. NASA. **Landsat Product Type Descriptions**, 15 Janeiro 2009. Disponível em: <[http://edcsns17.cr.usgs.gov/helpdocs/landsat/product\\_descriptions.html](http://edcsns17.cr.usgs.gov/helpdocs/landsat/product_descriptions.html)>. Acesso em: 04 Dezembro 2009.

USGS. Science for a changing World. NASA. **Landsat Product Type Descriptions**, 30 dez. 2010. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/products\\_slcoffbackground.php](http://landsat.usgs.gov/products_slcoffbackground.php)>. Acesso em: 14 nov. 2011.

VOGELMANN, J. E. et al. **Preliminary Assessment of the Value of Landsat 7 ETM+ data following Scan Line Corrector Malfunction. Views from the Sciences**. USGS - United States Geological Survey. Sioux Falls, p. 19-52. 2003.

WATTS, P. M. **Nicolaus Cusanus: A Fifteen-Century Vision of Man (Studies in the History of Christian Thought, 30)**. 1. ed. Leiden: E.J. Brill, v. X, 1982. 248 p.

WESSEL, P.; SMITH, W. H. F. Home Page of GMT. **The Generic Mapping Tools - GMT**, 07 nov. 1991. Disponível em: <<http://gmt.soest.hawaii.edu/>>. Acesso em: 27 ago. 2010.

WU, C. S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM plus imagery. **Remote Sensing of Environment**, 4, 2004. 480-492.

## 9) ANEXOS

### 9.1) ARQUIVO DE METADADOS L5219076\_07619860315\_MTL.TXT

Se apresenta a título de exemplo, o conteúdo do arquivo de metadados, correspondente à cena L5219076\_07619860315 do satélite Landsat 5, coletada em 15/03/1986. Este arquivo de texto, que vem incluso no pacote de dados compactados onde o USGS entrega as imagens solicitadas, utiliza a mesma denominação que a cena, seguida pelas letras MLT e a extensão TXT, indicativa de um arquivo de texto: L5219076\_07619860315\_MTL.txt. Na penúltima página aparece grifada, em cinza, a elevação solar no momento de captura da imagem.

GROUP = L1\_METADATA\_FILE

GROUP = METADATA\_FILE\_INFO

ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"

REQUEST\_ID = "0800904020324\_00001"

PRODUCT\_CREATION\_TIME = 2009-04-09T14:12:44Z

STATION\_ID = "EDC"

LANDSAT5\_XBAND = "1"

GROUND\_STATION = "XXX"

LPS\_PROCESSOR\_NUMBER = 0

DATEHOUR\_CONTACT\_PERIOD = "8607412"

SUBINTERVAL\_NUMBER = "01"

END\_GROUP = METADATA\_FILE\_INFO

GROUP = PRODUCT\_METADATA

PRODUCT\_TYPE = "L1T"

ELEVATION\_SOURCE = "GLS2000"

PROCESSING\_SOFTWARE = "LPGS\_10.0.0"

EPHEMERIS\_TYPE = "PREDICTIVE"

SPACECRAFT\_ID = "Landsat5"

SENSOR\_ID = "TM"

SENSOR\_MODE = "SAM"

ACQUISITION\_DATE = 1986-03-15

SCENE\_CENTER\_SCAN\_TIME = 12:30:26.1490750Z

WRS\_PATH = 219

STARTING\_ROW = 76

ENDING\_ROW = 76

BAND\_COMBINATION = "1234567"

PRODUCT\_UL\_CORNER\_LAT = -22.1702142

PRODUCT\_UL\_CORNER\_LON = -47.6201696

PRODUCT\_UR\_CORNER\_LAT = -22.1910541

PRODUCT\_UR\_CORNER\_LON = -45.2755080

PRODUCT\_LL\_CORNER\_LAT = -24.0543611

PRODUCT\_LL\_CORNER\_LON = -47.6570217

PRODUCT\_LR\_CORNER\_LAT = -24.0771824

PRODUCT\_LR\_CORNER\_LON = -45.2793884

PRODUCT\_UL\_CORNER\_MAPX = 229800.000

PRODUCT\_UL\_CORNER\_MAPY = -2454000.000

PRODUCT\_UR\_CORNER\_MAPX = 471600.000

PRODUCT\_UR\_CORNER\_MAPY = -2454000.000

PRODUCT\_LL\_CORNER\_MAPX = 229800.000

PRODUCT\_LL\_CORNER\_MAPY = -2662800.000

PRODUCT\_LR\_CORNER\_MAPX = 471600.000

PRODUCT\_LR\_CORNER\_MAPY = -2662800.000

PRODUCT\_SAMPLES\_REF = 8061

PRODUCT\_LINES\_REF = 6961

PRODUCT\_SAMPLES\_THM = 4031

PRODUCT\_LINES\_THM = 3481

BAND1\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_B10.TIF"

BAND2\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_B20.TIF"

BAND3\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_B30.TIF"

BAND4\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_B40.TIF"

BAND5\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_B50.TIF"

BAND6\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_B60.TIF"

BAND7\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_B70.TIF"

GCP\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_GCP.txt"

METADATA\_L1\_FILE\_NAME = "L5219076\_07619860315\_MTL.txt"

CPF\_FILE\_NAME = "L5CPF19860101\_19860331\_04"

END\_GROUP = PRODUCT\_METADATA

GROUP = MIN\_MAX\_RADIANCE

LMAX\_BAND1 = 169.000

LMIN\_BAND1 = -1.520

LMAX\_BAND2 = 333.000

LMIN\_BAND2 = -2.840

LMAX\_BAND3 = 264.000

LMIN\_BAND3 = -1.170

LMAX\_BAND4 = 221.000

LMIN\_BAND4 = -1.510

LMAX\_BAND5 = 30.200

LMIN\_BAND5 = -0.370

LMAX\_BAND6 = 15.303

LMIN\_BAND6 = 1.238



LMAX\_BAND7 = 16.500

LMIN\_BAND7 = -0.150

END\_GROUP = MIN\_MAX\_RADIANCE

GROUP = MIN\_MAX\_PIXEL\_VALUE

QCALMAX\_BAND1 = 255.0

QCALMIN\_BAND1 = 1.0

QCALMAX\_BAND2 = 255.0

QCALMIN\_BAND2 = 1.0

QCALMAX\_BAND3 = 255.0

QCALMIN\_BAND3 = 1.0

QCALMAX\_BAND4 = 255.0

QCALMIN\_BAND4 = 1.0

QCALMAX\_BAND5 = 255.0

QCALMIN\_BAND5 = 1.0

QCALMAX\_BAND6 = 255.0

QCALMIN\_BAND6 = 1.0

QCALMAX\_BAND7 = 255.0

QCALMIN\_BAND7 = 1.0

END\_GROUP = MIN\_MAX\_PIXEL\_VALUE

GROUP = PRODUCT\_PARAMETERS

CORRECTION\_METHOD\_GAIN\_BAND1 = "CPF"

CORRECTION\_METHOD\_GAIN\_BAND2 = "CPF"

CORRECTION\_METHOD\_GAIN\_BAND3 = "CPF"

CORRECTION\_METHOD\_GAIN\_BAND4 = "CPF"

CORRECTION\_METHOD\_GAIN\_BAND5 = "CPF"

CORRECTION\_METHOD\_GAIN\_BAND6 = "IC"

CORRECTION\_METHOD\_GAIN\_BAND7 = "CPF"

CORRECTION\_METHOD\_BIAS = "IC"

SUN\_AZIMUTH = 68.3329123

SUN\_ELEVATION = 44.9577311

OUTPUT\_FORMAT = "GEOTIFF"

END\_GROUP = PRODUCT\_PARAMETERS

GROUP = CORRECTIONS\_APPLIED

STRIPING\_BAND1 = "NONE"

STRIPING\_BAND2 = "NONE"

STRIPING\_BAND3 = "NONE"

STRIPING\_BAND4 = "NONE"

STRIPING\_BAND5 = "NONE"

STRIPING\_BAND6 = "NONE"

STRIPING\_BAND7 = "NONE"

BANDING = "N"

COHERENT\_NOISE = "N"

MEMORY\_EFFECT = "Y"

SCAN\_CORRELATED\_SHIFT = "Y"

INOPERABLE\_DETECTORS = "N"

DROPPED\_LINES = "N"

END\_GROUP = CORRECTIONS\_APPLIED

GROUP = PROJECTION\_PARAMETERS

REFERENCE\_DATUM = "WGS84"

REFERENCE\_ELLIPSOID = "WGS84"

GRID\_CELL\_SIZE\_THM = 60.000

GRID\_CELL\_SIZE\_REF = 30.000

```
ORIENTATION = "NUP"  
RESAMPLING_OPTION = "CC"  
MAP_PROJECTION = "UTM"  
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS  
GROUP = UTM_PARAMETERS  
ZONE_NUMBER = 23  
END_GROUP = UTM_PARAMETERS  
END_GROUP = L1_METADATA_FILE  
END
```

## 9.2) PROGRAMA PARA GERAR O CALENDAR PLOT.

Exemplo do programa produzido para gerar o Calendar Plot, compilado pelo Dr. Christopher Small:

```
psxy      MonthDelta      -JX6/4      -R0/365/1982/2009      -Bf10a30:"Julian
Day":/f1a2:"Year":::"NYC clear p13-14r32":nSWe -W2 -P -K >NYCall2x.ps
```

```
#awk '{if($5==7) print $2,$1}' NYCdates.yjmdspr | psxy -JX -R -Sc0.1 -G0/255/0 -K -
O >>SatCal.ps
```

```
#awk '{if($5==5) print $2,$1}' NYCdates.yjmdspr | psxy -JX -R -Sc0.1 -G0/0/255 -O
>>SatCal.ps
```

```
awk      '{if(substr($1,3,1)      ==      7)      print      substr($1,14,3),substr($1,10,4)}'
/Users/Small/Documents/Text/Change/QLs/QL_NYS/p14r32/A.txt | psxy -JX -R -
Sa0.18 -G0/0/255 -K -O >>NYCall2x.ps
```

```
awk      '{if(substr($1,3,1)      ==      7)      print      substr($1,14,3),substr($1,10,4)}'
/Users/Small/Documents/Text/Change/QLs/QL_NYS/p13r32/A.txt | psxy -JX -R -
Sa0.18 -G200/0/200 -K -O >>NYCall2x.ps
```

```
awk      '{if(substr($1,3,1)      <=      5)      print      substr($1,14,3),substr($1,10,4)}'
/Users/Small/Documents/Text/Change/QLs/QL_NYS/p14r32/A.txt | psxy -JX -R -
Sc0.08 -G0/0/255 -O -K >>NYCall2x.ps
```

```
awk      '{if(substr($1,3,1)      <=      5)      print      substr($1,14,3),substr($1,10,4)}'
/Users/Small/Documents/Text/Change/QLs/QL_NYS/p13r32/A.txt | psxy -JX -R -
Sc0.08 -G200/0/200 -K -O >>NYCall2x.ps
```

```
#cat CompPairs/ETMmeta.ydaesp CompPairs/TMmeta.ydaesp | awk '{print $2,$1}' |
psxy -JX -R -Sc0.28 -W2 -O >>NYCall2x.ps
```

```
awk '{print $1,$2}' QB_NYC.dat | psxy -JX -R -Sx0.15 -W10 -G0/0/0 -K -O
>>NYCall2x.ps
```

```
cat CompPairs/TM_ETMmeta.dyaesp | awk '{print $1,$2}' | psxy -JX -R -Sc0.28 -W3
-O >>NYCall2x.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 3) print substr($1,21,3),$7}' MetmNYC.fdea4 | psxy -JX6/3 -
R1/365/110/160 -Bf10a30:"Julian Day":/f10a20:"Azimuth (deg.)":nSWe -Sa0.15 -
G255/0/255 -K -P >NYCsolarAz.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 4) print substr($1,21,3),$7}' MetmNYC.fdea4 | psxy -JX -R -
Sa0.15 -G0/0/255 -K -O >>NYCsolarAz.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 3) print substr($1,21,3),$7}' mTMnyc.fdea4 | psxy -JX -R -
Sc0.1 -G255/0/255 -K -O >>NYCsolarAz.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 4) print substr($1,21,3),$7}' mTMnyc.fdea4 | psxy -JX -R -
Sc0.1 -G0/0/255 -K -O >>NYCsolarAz.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 3) print substr($1,21,3),$10}' MetmNYC.fdea4 | psxy -JX6/3
-R1/365/20/70 -Bf10a30:"Julian Day":/f10a20:"Elevation (deg.)":nSWe -Sa0.15 -
G255/0/255 -K -P >NYCsolarEl.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 4) print substr($1,21,3),$10}' MetmNYC.fdea4 | psxy -JX -R
-Sa0.15 -G0/0/255 -K -O >>NYCsolarEl.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 3) print substr($1,21,3),$10}' mTMnyc.fdea4 | psxy -JX -R -
Sc0.1 -G255/0/255 -K -O >>NYCsolarEl.ps
```

```
awk '{if(substr($1,3,1) == 4) print substr($1,21,3),$10}' mTMnyc.fdea4 | psxy -JX -R -
Sc0.1 -G0/0/255 -K -O >>NYCsolarEl.ps
```