UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

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

Julio Cesar Pedrassoli

**Habitação e Sensoriamento Remoto: uma análise da expansão urbana
na RMSP por meio de imagens de satélite aplicando o modelo linear de
mistura espectral**

São Paulo
2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

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

Habitação e Sensoriamento Remoto: uma análise da expansão urbana na RMSP por meio de imagens de satélite aplicando o modelo linear de mistura espectral

Julio Cesar Pedrassoli

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de doutor em Geografia Humana.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Paul Pérez Machado

São Paulo
2016

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

P371h Pedrassoli, Julio Cesar
 Habitação e Sensoriamento Remoto: uma análise da
expansão urbana na RMSP por meio de imagens de
satélite aplicando o modelo linear de mistura
espectral / Julio Cesar Pedrassoli ; orientador
Reinaldo Paul Pérez Machado. - São Paulo, 2016.
246 f.

Tese (Doutorado)- Faculdade de Filosofia, Letras
e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.
Departamento de Geografia. Área de concentração:
Geografia Humana.

1. Urbanização. 2. Sensoriamento Remoto. 3.
Habitação. 4. Segregação Urbana. 5. Verticalização. I.
Pérez Machado, Reinaldo Paul, orient. II. Título.

Julio Cesar Pedrassoli

Habitação e Sensoriamento Remoto: uma análise da expansão urbana na RMSP por meio de imagens de satélite aplicando o modelo linear de mistura espectral

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de doutor em Geografia Humana.

Área de concentração: Geografia Humana
Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Paul Pérez Machado

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Julgamento: _____

“A Geografia é importante demais para ser deixada apenas aos geógrafos. Mas ainda mais para ser deixada a cargo de militares, políticos e empresários”

David Harvey, sobre a Geografia.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos movimentos de luta pela moradia em todo o Brasil, os quais mantêm a luta e a resistência pela moradia como direito fundamental.

Lembro também dos estudantes secundaristas que ocuparam as escolas estaduais de São Paulo, os quais, na data de finalização desta tese, mostram a toda a sociedade brasileira que ainda há esperança.

Por fim, e mais importante, para Joice. Por tudo que passamos até aqui

Agradecimentos

Agradeço ao professor Reinaldo Paul Pérez Machado, por toda a orientação, paciência, ajuda e amizade ao longo dessa caminhada. Compartilho com ele a alegria da finalização deste ciclo.

I also would like to thank Professor Chris Small, for the great reception that I had in New York, for the help and guidance in my doubts about Spectral Mixture, for the opportunity to experience the academic life at Columbia University and for the chance to live in the Big Apple!

Aos professores Ligia Vizeu Barrozo e Ailton Luchiari pela revisão cuidadosa e pelas contribuições bastante significativas na banca de qualificação. Um agradecimento em especial ao professor Ailton, o qual me orientou durante o mestrado e, desde então, sempre esteve presente em meus momentos acadêmicos mais importantes, e que pelo carinho que tenho por ele envio, por meio desta tese, energias positivas e desejo de pronta recuperação. Ainda que ele não possa acompanhar a banca de defesa, suas contribuições se fazem presentes em todo o trabalho.

Ao Lamont-Doherty Earth Observatory/Columbia University em Nova York, pelo uso de espaços e equipamentos durante a elaboração desta tese.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia (DETG) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), agradeço pelo incentivo e pela valiosa ajuda.

À Universidade Federal da Bahia - UFBA, enquanto instituição, pela concessão do afastamento e consequente incentivo para finalização da tese.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou minha estadia em Nova York durante os anos de 2015 e 2016.

À todas as pessoas que de alguma forma contribuíram e torceram para que esta tese se realizasse.

À minha família, minha mãe Elizabeth pelo incentivo, meu irmão Vitor pela curiosidade e pelas risadas.

À Joice: auxiliar, revisora, incentivadora e noiva.

Sumário

Introdução.....	1
Capítulo 1: O problema	4
1. Progresso e crise, verticalização e favelização: o objeto de estudo e a problematização da hipótese	4
1.1. A verticalização em São Paulo e na RMSP	4
1.2. As favelas em São Paulo e na RMSP	11
1.3. Loteamentos irregulares e favelas: análises conjuntas e complementares.....	19
1.4. Hipótese	22
1.4.1. Desenvolvimento da hipótese.....	23
1.5. Objetivos.....	23
1.5.1. Objetivo principal:.....	23
1.5.2. Objetivos específicos:	24
1) Analisar a problemática em duas escalas distintas: RMSP para os lançamentos imobiliários verticais e o Município de São Paulo para as favelas e loteamentos irregulares;	24
1.6. Justificativa e área de estudo.....	24
1.6.1. Por que a mudança no uso do solo na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)?.....	24
1.6.2. Por que lançamentos imobiliários residenciais verticais e as favelas?.....	25
1.6.3. Por que o Sensoriamento Remoto (SR)?.....	27
1.7. Materiais, Métodos e Análise.....	28
1.7.1. Detalhamento do material utilizado	28
Capítulo 2: A expressão espaço-temporal do problema	33
Introdução ao capítulo	33
2.1. Geografia e urbanização: a abordagem científica no contexto político-econômico do problema	33
2.2. Contextualização do modelo e do processo de urbanização no Brasil e na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em mapas: primeira abordagem na construção de indicadores para a tese	35
2.3. A espacialidade do processo de verticalização na RMSP na perspectiva dos lançamentos imobiliários	46
Capítulo 3: A técnica	51
Introdução ao capítulo	51
3.1. A definição de Sensoriamento Remoto (SR).....	51
3.2. O sensoriamento remoto do espaço urbano	53
3.3. Considerações sobre o uso das resoluções de SR em ambientes urbanos:	55

3.3.1. O tempo	55
3.3.2. O espaço	56
3.3.3. O espectro.....	58
3.3.4. A imagem orbital como conceito geográfico	58
3.4. Mistura Espectral	60
3.5. Modelo Linear de Mistura Espectral.....	62
3.5.1. O Modelo Linear de Mistura Espectral em sua expressão matemática.....	64
3.5.2. Modelos multi-escalares e padronizados de mistura espectral.....	67
3.6. Aplicações.....	70
3.6.1. Estudos de caso em agricultura, vegetação e processos de degradação ambiental	70
3.6.2. A análise de mistura espectral aplicada a áreas urbanas	74
3.7. Os classificadores e a mistura espectral.....	82
Capítulo 4: Caracterização, modelagem e implementação.....	90
Introdução ao capítulo	90
4.1. A caracterização espectral da Metrópole Paulista: espectrometria por imagem orbital aplicado a RMSP	90
4.2. Base de dados para a construção das curvas de reflectância para os distritos da RMSP: sensor Hyperion	92
4.2.1 Fontes de interferência	95
4.2.2. Tratamento dos dados Hyperion e correção atmosférica	98
4.3. Análise dos dados Hyperion	103
4.4. O comportamento espectral das favelas nas amostras analisadas.....	112
4.5. Aplicação do modelo linear de mistura espectral com uso de <i>endmembers</i> (membros de referência) globais.....	125
4.6. Aplicação do modelo linear de mistura espectral nas imagens Landsat.....	129
4.7. Análise exploratória dos dados e mapeamento da variabilidade espaço-temporal	132
4.8. Análise exploratória dos dados no espaço-tempo.....	133
4.9. Mapeamento dasimétrico e correlação das frações.....	144
4.10. Modelagem da agregação multiescalar	146
Capítulo 5: Resultados e discussão	152
As sombras da metrópole: umas das faces da habitação regular em São Paulo e na RMSP a partir do modelo de mistura espectral	152
5.1. A escala temporal da verticalização promovida pela habitação formal.....	152
5.2. Verticalização e habitação formal na RMSP: Relações e correlações registradas na mistura espectral	156

Às sombras da metrópole: a precariedade e a outra face da habitação na cidade de São Paulo a partir do modelo de mistura espectral.....	183
5.3. A escala temporal das mudanças nas favelas e nos loteamentos irregulares da cidade de São Paulo	183
5.4. Favelas, Loteamentos Irregulares no Município de São Paulo: Relações e correlações registradas na mistura espectral	190
Conclusões	206
5.5. Primeiras conclusões: uma validação	206
5.6. Confirmação da hipótese principal	209
5.7. Bases para um Modelo Geral	217
5.8. Conclusões complementares: o uso de Isotimas na representação dos processos geográficos mapeados	225
5.9. Considerações finais	226
5.10. Agenda de pesquisa futura.....	222
6. Referências bibliográficas.....	229

Índice de tabelas

Tabela 1: imagens Landsat utilizadas na tese.....	29
Tabela 2: Revisão sobre a aplicação do modelo linear de mistura espectral.....	80
Tabela 3: Comparação Landsat 7 versus EO-1.	93
Tabela 4: Total de favelas na grade de amostras	114
Tabela 5: Imagens Landsat utilizadas e seus parâmetros básicos	126
Tabela 6: Composição percentual dos lançamentos residenciais e comerciais na RMSP entre 1985 e 2010	154
Tabela 7: Coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis extraídas do MLME entre 1986 e 2015 para os limites internos da RMSP.....	156
Tabela 8: Cálculo das mudanças nas frações dos pixels em SP e na RMSP.....	206
Tabela 9: Lançamentos imobiliários: 1986 - 2000/2001 - 2011.....	207

Índice de gráficos

Gráfico 1: Projeção do número de pessoas vivendo em favelas no mundo.	1
Gráfico 2: Verticalização em São Paulo: 1940 a 2011	9
Gráfico 3: Crescimento percentual de população em favelas em relação à população total nas duas últimas décadas no Brasil	36
Gráfico 4: Aumento bruto acumulado do valor do m ² em relação ao número de lançamentos na RMSP.....	37
Gráfico 5: Série histórica de lançamentos imobiliários residenciais agregados em períodos tri-anuais	38
Gráfico 6: Unidades lançadas por padrão no Itaim Bibi (2004 - 2008).	45
Gráfico 7: Áreas médias das unidades habitacionais lançadas por períodos e quantidades de lançamentos..	47
Gráfico 8: Média anual de lançamento de empreendimentos e média anual de andares por empreendimento	48
Gráfico 9: Curvas espectrais das dez amostras coletadas na cena Hyperion sobre a RMSP.	107
Gráfico 10: comportamento espectral de alvos urbanos no espectro do visível.....	108
Gráfico 11: Comportamento espectral da vegetação.....	109
Gráfico 12: Curvas das amostras alinhadas pela a posição geográfica.	110
Gráfico 13: Curvas espectrais individuais de cada amostra.	111

Gráfico 14: Curvas espectrais de todas as favelas presentes na grade amostral.....	115
Gráfico 15: Curvas espectrais das 16 favelas amostradas.	116
Gráfico 16: Distribuição da área de amostras de favela em função da posição	117
Gráfico 17: Favelas em relação a grade amostral 3.....	118
Gráfico 18: Favelas em relação a grade amostral 4.....	119
Gráfico 19: Favelas em relação a grade amostral 5.....	120
Gráfico 20: Favelas em relação a grade amostral 6.....	121
Gráfico 21: Favelas em relação a grade amostral 7.....	122
Gráfico 22: Favelas em relação a grade amostral 8.....	123
Gráfico 23: Curvas espectrais mixadas das 10 amostras gerais e das 16 favelas amostradas.	125
Gráfico 24: Média das três principais dimensões (98%) do espectro de cobertura do solo global.	131
Gráfico 25: Distribuições das frações na RMSP ao longo do tempo sem correção atmosférica.....	136
Gráfico 26: Distribuições das frações na RMSP ao longo do tempo com correção atmosférica.....	137
Gráfico 27: Projeção dos lançamentos imobiliários combinando dados dos censos e lançamentos imobiliários verticais levantados pelo CEM.....	153
Gráfico 28: aumento no número de andares nos empreendimentos no tempo.....	155
Gráfico 29: Relação entre os acumulados do número de lançamentos de empreendimentos verticais e andares entre 1985 e 2015.	155
Gráfico 30: Distribuição temporal das correlações entre os membros de referência extraídos a partir do MLME por setores censitários na RMSP.	163
Gráfico 31: Correlações temporais entre o censo e o MLME por distritos.....	164
Gráfico 32: Concentração dos valores de correlação entre andares e fração sombra para os setores censitários que apresentaram verticalização entre 1985 e 2015.	165
Gráfico 33: Distribuição dos valores de correlação entre andares e fração sombra para os setores censitários que apresentaram verticalização entre 1985 e 2015 na orientação norte/sul, a partir das coordenadas dos centroides dos setores censitários.....	166
Gráfico 34: Total histórico de andares produzidos por faixas de correlação entre as frações substrato e sombra.....	173

Gráfico 35: Comparação das correlações entre número de unidades habitacionais verticais (CEM, 2015) e frações substrato e sombra do MLME acumuladas no mesmo período.....	174
Gráfico 36: Comparação das correlações entre número de unidades habitacionais verticais (CEM, 2015) e frações substrato e sombra do MLME acumuladas no mesmo período.....	174
Gráfico 37: Surgimento de novas favelas por períodos decenais.....	184
Gráfico 38: Áreas totais de favelas por períodos decenais.....	185
Gráfico 39: Quantidade de loteamentos irregulares surgidos por décadas no Município de São Paulo.	187
Gráfico 40: Áreas atuais (em Km ²) ocupadas por loteamentos irregulares e sua data de surgimento na cidade de São Paulo.	188
Gráfico 41: Distribuição das correlações negativas entre substrato e vegetação para as favelas do município de São Paulo em três classes.	194
Gráfico 42: Distribuição das correlações negativas entre substrato e vegetação para loteamentos irregulares do município de São Paulo em três classes.	195
Gráfico 43: Distribuição das correlações entre as três frações do MLME (1985 – 2015) para loteamentos irregulares e favelas do município de São Paulo.....	196
Gráfico 44: Distribuição das áreas de favelas (em Km ²) segundo as zonas administrativas da cidade de São Paulo. Fonte: elaboração do autor.....	197
Gráfico 45: Distribuição das correlações temporais entre substrato e sombra dividida em valores positivos e negativos por área ocupada por favelas nas zonas de SP	198
Gráfico 46: Distribuição das correlações temporais negativas entre substrato e sombra dividida em faixas de correlação por área ocupada nas favelas nas zonas de SP.....	198
Gráfico 47: Distribuição das áreas de loteamentos irregulares (em Km ²) segundo as zonas administrativas no Município de São Paulo.	199
Gráfico 48: Distribuição das correlações temporais entre substrato e sombra dividida em valores positivos e negativos por área ocupada por loteamentos irregulares nas zonas de São Paulo.	199
Gráfico 49: Distribuição das correlações temporais negativas entre substrato e sombra dividida em faixas de correlação por área ocupada pelos loteamentos irregulares nas zonas de São Paulo.	200
Gráfico 50: Mudanças no uso do solo e lançamentos imobiliários residenciais.	207

Gráfico 51: Inversão entre verticalização e aumento de substrato no município de São Paulo.	208
Gráfico 52: Inversão entre verticalização e aumento de substrato na RMSP.....	208

Índice de figuras

Figura 1: Verticalização do centro da cidade de São Paulo entre os anos de 1911 e 1929. Da esquerda para a direita: Praça da Sé (1911), Rua Direita (1928) e Praça do Patriarca (1925)	5
Figura 2: Vista do centro da cidade de São Paulo. À esquerda, a Rua Tabatinguera, o Fórum João Mendes e as obras da Catedral. À direita, a Av. Rangel Pestana e a Igreja do Carmo	6
Figura 3: Esquema teórico de São Paulo integrante do Plano de Avenidas de Prestes Maia, 1930.....	7
Figura 4: Imagens da verticalização na cidade de São Paulo entre as décadas de 1950 e 2000	10
Figura 5: Favela da Várzea do Penteado, próxima a avenida do Estado e da área central da cidade de São Paulo. Década de 1940	13
Figura 6: Favela do Vergueiro entre 1965 e 1968. Legenda original “as chácaras conviveram com a favela”.	14
Figura 7: Favelados sendo retirados do Vergueiro (primeiro despejo) em 1962 e mandados de volta à origem em 1968	15
Figura 8: Distribuição temporal e sobreposição dos materiais utilizados na tese	31
Figura 9: Representação conceitual do modelo analítico	32
Figura 10: Parte do <i>skyline</i> de São Paulo.	46
Figura 11: Acima, terrenos limpos para loteamento em San Diego e residências em diferentes etapas de construção em Denver. Abaixo, construção de empreendimento imobiliário entre 2004 e 2007/Taboão da Serra, RMSP.....	55
Figura 12: Parque do Ibirapuera numa imagem GeoEye com resolução espacial de 0,40 m e numa imagem Landsat com resolução espacial de 30 m.....	57
Figura 13: Os pixels do parque Ibirapuera em São Paulo em uma imagem Landsat de 01/09/2013.....	61
Figura 14: Decomposição perfeita de um MLME supondo um pixel de 30 m de resolução espacial e com três componentes: vegetação, água e solo. Caso em que o resíduo do modelo é zero.....	63

Figura 15: Curva espectral ponderada resultante da mistura espectral linear	64
Figura 16: Sistema de equações ajustado aos componentes globais propostos por Small (2004) e Small & Milesi (2013)	68
Figura 17: Conjunto de sub cenas utilizadas por Small & Milesi, 2013.	69
Figura 18: Cubo espectral gerado a partir da imagem Landsat 8 de 2015	83
Figura 19: <i>ScatterPlot</i> 2D mostrando a rotação das dimensões no espaço de características espectrais.....	84
Figura 20: Representação dos métodos do Paralelepípedo e Distância Mínima.....	85
Figura 21: Limites de decisão calculados no classificador de MaxVer.	85
Figura 22: Comparação de classificadores	87
Figura 23: Sequencia ISODATA.....	88
Figura 24: Mancha urbana da aglomeração urbana, centro da Região Metropolitana de São Paulo. Landsat 8, composição colorida natural, 2015.	91
Figura 25: Comparação dos sensores OLI (Landsat 8, com 7 bandas espectrais) versus o sensor AVIRIS (224 bandas espectrais).	92
Figura 26: Resoluções espectrais comparadas dos sensores ALI e Hyperion.....	93
Figura 27: Comparação entre as cenas obtidas pelos sensores do EO-1 e Landsat 7.....	94
Figura 28: Faixa de imageamento do Hyperion sobre a RMSP	95
Figura 29: Totais de absorção, espalhamento e a formação de janelas atmosféricas na superfície terrestre.	96
Figura 30: Espalhamento atmosférico	96
Figura 31: Modelo geométrico simplificado BRDF.....	98
Figura 32: Leitura do sensor Hyperion sobre as órbitas/ponto Landsat que recobrem a RMSP.	99
Figura 33: Cubo espectral da região norte da RMSP	100
Figura 34: Parâmetros de entrada do módulo FLAASH no ENVI.....	102
Figura 35: Dez amostras de São Paulo, sensor Hyperion: 135, 78, 26 RGB, 2004.	105
Figura 36: Coleta de assinaturas espectrais no cubo hiperespectral do Hyperion.....	106
Figura 37: 16 favelas de São Paulo constituem o universo amostral	116
Figura 38: Favelas com presença de ruas de terra ou solo exposto em 2004: maior reflectância entre 1.100 e 1.200 nm.....	124
Figura 39: Os melhores pares a ser considerados aparecem destacados na cor ocre. O correspondente à barra na cor magenta não foi utilizado	128

Figura 40: Seis mosaicos com os resultados da desmixagem (<i>unimixing</i>) linear utilizando membros de referência globais: 1986 – 2015.....	129
Figura 41: Rotação das Principais componentes	130
Figura 42: <i>Scatter Plots</i> correlacionando os membros de referência nos mosaicos.....	132
Figura 43: Cubos temporais da região central de São Paulo	133
Figura 44: Variabilidade das frações no parque Ibirapuera: 1986 – 2015.....	134
Figura 45: Efeito do sombreamento acumulado sobre o substrato.....	143
Figura 46: Recorte dasimétrico dos limites de agregação das frações a partir dos grandes corpos d'água da RMSP	145
Figura 47: Visão geral do modelo de agregação multiescalar.....	146
Figura 48: Detalhe das operações no modulo 1 do modelo.....	147
Figura 49: Detalhes das operações no módulo 2 do modelo	148
Figura 50: Detalhes das operações no módulo 3 do modelo.	149
Figura 51: Interface de utilização do MLME_Agreg.	150
Figura 52: Distribuição da correlação entre substrato e sombra a partir da Densidade Kernel, mostrando os contrastes na Praça da República e sobrepondo as construções 3D	181
Figura 53: Distribuição da correlação entre substrato e sombra a partir da Densidade Kernel, mostrando os contrastes na Região do limite do bairro dos Jardins e sobrepondo as construções 3D	182
Figura 54: Evolução do empreendimento "Viver Bem" sob a perspectiva da troca entre as frações para comprovação da hipótese.....	211
Figura 55: Evolução do conjunto de empreendimentos na Vila Formosa sob a perspectiva da troca entre as frações para comprovação da hipótese.....	212
Figura 56: Evolução das frações em uma amostra da favela de Paraisópolis para comprovação da hipótese.....	214
Figura 57: Evolução das frações em uma amostra da favela Nova Esperança para comprovação da hipótese.....	215
Figura 58: Correlações temporais possíveis entre as frações	217
Figura 59: Evolução da construção do centro de convenções da USP entre 2010 e 2015	224

Índice de mapas

Mapa 1: Localização atual das favelas de São Paulo: Concentração em área ambientalmente sensíveis e próximas às reservas de água do município.....	18
Mapa 2: Lançamentos imobiliários, favelas e loteamentos irregulares na cidade de São Paulo.	21
Mapa 3: Favelas e loteamentos irregulares em São Paulo..	22
Mapa 4: Isotimas do aumento médio acumulado do valor do m ² (valores históricos corrigidos) e vetores de valorização imobiliária agregados por setor censitário (1985 a 2013, considerando datas de entrega previstas).....	40
Mapa 5: Localização das favelas de São Paulo em relação à valorização imobiliária acumulada agregada por distritos da RMSP.....	40
Mapa 6: Densidade de lançamentos por distrito na RMSP entre 1985 e 1990. Elaborado pelo autor a partir dos dados de CEM, HABISP e IBGE (2010).	42
Mapa 7: Densidade de lançamentos por distrito na RMSP entre 1990 e 2000.	43
Mapa 8: Densidade de lançamentos por distrito na RMSP entre 2000 e 2013..	44
Mapa 9: Distribuição tridimensional dos lançamentos imobiliários residenciais acumulados de 1985 a 2011 (extrusão dos pontos ponderados pelo número de andares) e as visadas do <i>skyline</i> acumulado pelo mesmo processo no mesmo período.	49
Mapa 10: Distribuição tridimensional dos lançamentos imobiliários residenciais acumulados de 1985 1990, 1991 a 2000, 2001 a 2008 e 2009 a 2011. (Extrusão dos pontos ponderados pelo número de andares) e as visadas do <i>skyline</i> acumulado.	50
Mapa 11: Leitura do Hyperion, distritos internos da amostragem de favelas	103
Mapa 12: Grade regular de amostras sobre a cena Hyperion.	104
Mapa 13: Método de amostragem dos limites de favelas.....	113
Mapa 14: Variabilidade temporal do substrato de 30 anos.	139
Mapa 15: Variabilidade temporal da vegetação de 30 anos.	140
Mapa 16: Variabilidade temporal da sombra/superfícies escuras de 30 anos	141
Mapa 17: Distribuição da fração substrato: 1989.....	158
Mapa 18: Distribuição da fração substrato: 2010.....	158
Mapa 19: Distribuição da fração vegetação: 1989.	159
Mapa 20: Distribuição da fração vegetação: 2010.	159
Mapa 21: Distribuição da fração sombra: 1989.....	160
Mapa 22: Distribuição da fração sombra: 2010.....	160

Mapa 23: Variação das frações entre 1989 e 2010 em Taboão da Serra/SP.	162
Mapa 24: Verticalização responsável pelo sombreamento do substrato em uma área de Taboão da Serra/SP..	163
Mapa 25: Acumulado de andares por setores censitários entre 1985 e 1990. Organizado a partir de CEM (2015) e IBGE (2010).	167
Mapa 26: Acumulado de andares por setores censitários entre 11991 e 2000. Organizado a partir de CEM (2015) e IBGE (2010).	168
Mapa 27: Acumulado de andares por setores censitários entre 2001 e 2005.	168
Mapa 28: Acumulado de andares por setores censitários entre 2006 e 2010.	169
Mapa 29: Acumulado de andares por setores censitários entre 2011 e 2015.	169
Mapa 30: Acumulado de andares por setores censitários entre 1985 e 2015 (acima de 50 andares).	171
Mapa 31: Distribuição dos pontos de lançamentos imobiliários verticais por períodos (1986-2015).	175
Mapa 32: Distribuição da correlação entre substrato e sombra na RMSP entre 1986 e 2015 por distritos.	177
Mapa 33: Comparação entre os pontos de lançamentos por períodos e o mapeamento das correlações entre substrato e sombra.	177
Mapa 34: Distribuição da correlação entre substrato e sombra na RMSP de 1986 a 2015 por setores censitários.	178
Mapa 35: Isotimas de correlação entre as frações substrato e sombra (1986 - 2015), geradas a partir dos centroides dos setores censitários e de uma grade regular de pontos para toda a RMSP.	180
Mapa 36: Favelas, loteamentos irregulares e áreas de proteção ambiental na cidade de São Paulo. HABISP, 2015 e IBGE, 2010.	189
Mapa 37: Distribuição percentual da vegetação nas favelas em 1986.	202
Mapa 38: Distribuição percentual da vegetação nas favelas em 2015.	203
Mapa 39: Distribuição percentual da vegetação nos lot. irregulares em 1986.	204
Mapa 40: Distribuição percentual da vegetação nos lot. irregulares em 2015.	205
Mapa 41: Coeficiente de correlação de Pearson (temporal) entre as frações substrato e vegetação: 1985, 1989, 2000, 2006, 2010 e 2015.	219
Mapa 42: Coeficiente de correlação de Pearson (temporal) entre as frações substrato e sombra: 1985, 1989, 2000, 2006, 2010 e 2015.	220

Mapa 43: Coeficiente de correlação de Pearson (temporal) entre as frações vegetação e sombra: 1985, 1989, 2000, 2006, 2010 e 2015.....	221
Mapa 44: localização do centro de convenções no campus da USP/SP.....	222
Mapa 45: Modelo de correlação aplicado à análise da construção do centro de convenções da USP: um exemplo de interpretativo.	223

Lista de siglas e abreviaturas

ALI	<i>Advanced Land Imager</i>
AVIRIS	<i>Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer</i>
BNH	Banco Nacional de Habitação
BRDF	<i>Bi-directional Reflection Distribution Function</i>
CASI	<i>Compact Airborne Spectrographic Imager</i>
CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
CEM	Centro de Estudos da Metrópole
EMBRAESP	Empresa Brasileira de Estudos do Patrimônio
ENVI	<i>Environmental for Visualize Images</i>
EO-1	<i>Earth Observer 1</i>
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FGTS	Fundo de Garantia por Tempo de Serviço
FLAASH	<i>Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
HABISP	Sistema de Informações Habitacionais do Município de São Paulo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	<i>Independent Component Analysis</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IRMSS	<i>Infrared Multispectral Scanner</i>
LAC	<i>Linear Atmospheric Correction</i>
LEISA	<i>Linear Etalon Imaging Spectrometer Array</i>
MESMA	<i>Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis</i>
MCMV	Minha Casa, Minha Vida
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MLME_Agreg	Modelo Linear de Mistura Espectral - Agregação Multi escalar
MNF	<i>Minimum Noise Fraction</i>
NDBI	<i>Normalized Difference Build-Up Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PC	<i>Principal Components</i>
PDE	Plano Diretor Estratégico
PPI	<i>Pixel Purity Index</i>
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SEBES	Serviço de Bem-Estar Social da Prefeitura de São Paulo
SFH	Serviço Financeiro de Habitação
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SR	Sensoriamento Remoto
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TOA	<i>Top of Atmosphere</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USP	Universidade de São Paulo
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WFI	<i>Wide Field Imager</i>

Resumo

Pedrassoli, Julio Cesar. **Habitação e Sensoriamento Remoto: uma análise da expansão urbana na RMSP por meio de imagens de satélite aplicando o modelo linear de mistura espectral**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

O objetivo desta pesquisa é analisar, em um período de 30 anos, a expansão urbana do Município de São Paulo e dos municípios da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) a partir do uso de imagens orbitais obtidas pela série Landsat nos anos de 1986, 1989, 2000, 2006, 2010 e 2015, aplicando o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) com uso de membros de referência globais. Os dados obtidos com o uso do MLME foram associados às informações de produção habitacional formal e informal, considerando os empreendimentos imobiliários verticais, as favelas e os loteamentos irregulares (desde 1985 até o ano de 2015), possibilitando a compreensão do comportamento espacial da produção habitacional dessa região ao longo do período analisado. Para cada cena Landsat, foram calculadas as imagens relacionadas à fração Substrato (alto albedo), à fração Vegetação (biomassa) e à fração Sombra (baixo albedo). Durante o desenvolvimento do trabalho, é proposta uma metodologia de modelagem das mudanças do uso e ocupação do solo associados à produção habitacional, partindo da correlação temporal entre as frações. Cada imagem fração foi agregada em três níveis de escala: a escala da própria imagem (pixel de 30m), a escala intraurbana (setores censitários e distritos) e a escala regional (limites da RMSP) o que possibilitou, na escala intraurbana, a associação das informações extraídas do MLME aos dados de produção habitacional e aos censos demográficos de 1991, 2000 e 2010. Os resultados do modelo demonstram que as áreas de produção habitacional verticalizada, no período analisado, são detectadas pelo modelo como uma correlação negativa entre as frações substrato e sombra, indicando que a produção de sombra dos empreendimentos é acompanhada de uma diminuição da detecção da fração substrato, enquanto nas áreas de habitação precárias (favelas e loteamentos irregulares), a mudança detectada pelo modelo é de correlação negativa entre as frações vegetação e substrato e também entre as frações sombra e substrato, sendo indicativo do aumento do substrato para ambos os casos, ao longo do tempo. Os resultados também demonstram alta fidelidade posicional e possibilidade de aplicação geral do modelo proposto para outras categorias de uso do solo, indicando frentes para generalização da técnica aqui proposta.

Palavras-chave:

Expansão Urbana, Sensoriamento Remoto, Habitação, Mistura Espectral, Verticalização, Favelas.

Abstract

Pedrassoli, Julio Cesar. **Housing and Remote Sensing: an analysis of urban sprawl in the SPMR using satellite images and applying the linear spectral mixture model**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

The objective of this research is to analyze, in a period of 30 years, the urban sprawl of São Paulo city and the municipalities of São Paulo Metropolitan Region (SPMR) using orbital images obtained by Landsat series in 1986, 1989, 2000, 2006, 2010, and 2015, applying the Linear Spectral Mixture Model (LSMM) and the use of global reference endmembers. The data obtained using the LSMM were associated to information on formal and informal housing production, considering the vertical real estate development, the slums and the informal neighborhoods (from 1985 to 2015), making possible to understand the housing production in the region in the time period analyzed. For each Landsat scene, image fractions were calculated in relation to the Substrate fraction (high albedo), Vegetation Fraction (biomass) and Shadow fraction (low albedo). In the development of the work, is proposed a methodology to modeling the changes in land use/land cover associated with the housing production through the temporal correlation between the fractions. Each image fraction was aggregated at three levels of scale: the scale of the image itself (30m pixel), the intra urban scale (census tracts and districts) and regional scale (limits of the SPMR) allowing, in the intra urban range, the association of information extracted from the LSMM, the housing production and the census demographic data from 1991, 2000 and 2010. The model results show that the vertical housing production areas, in the analyzed period, are detected by a negative correlation between substrate and shadow fractions, showing that the shadow increase in these areas are accompanied by a decrease in the substrate fraction detection, while in areas of precarious housing (slums and informal neighborhoods) the model detects a negative correlation between vegetation and substrate fractions and also between the substrate and shadow fractions, indicating the increase of substrate for both cases over time. The results also show high positional fidelity and possibility of a general application of the proposed model for other categories of land use/land cover changes, showing the possibility of generalization of the technique proposed here.

Key Words:

Urban Sprawl, Remote Sensing, Housing, Spectral Mixture, Verticalization, Slums.

Introdução

A habitação digna é um direito humano fundamental, e assim reconhece a declaração universal dos direitos do homem em 1948.

As cidades, apogeu do mundo civilizado, passaram a ser o lugar do trabalho e da moradia da maioria da população mundial, especialmente a partir da década de 1970. As pessoas chegaram, a cidade não, esta veio e continua vindo, muitas vezes, depois. Daí temos a imagem marcante da pobreza no sul do mundo, onde hoje mais de um bilhão de pessoas vivem em favelas. E mais viverão no futuro (Gráfico 1):

GRÁFICO 1: PROJEÇÃO DO NÚMERO DE PESSOAS VIVENDO EM FAVELAS NO MUNDO: 2005 - 2020. ONU, 2013.

A habitação, como coloca Harvey, deixou de ser um direito e tornou-se negócio, simples instrumento especulativo. Os reflexos dessa situação são extensos, visíveis e perversos sob o ponto de vista de seus impactos sociais.

São Paulo e sua região metropolitana, a exemplo de outras regiões metropolitanas no Brasil e no mundo, enfrentam hoje os desafios da moradia precária, da informalidade, da insegurança, do déficit habitacional e das falhas recorrentes e acumuladas da política habitacional no terceiro mundo.

A questão habitacional na cidade de São Paulo e em sua região metropolitana reflete com clareza a luta de classes pela sobrevivência no terceiro mundo e nos países rotulados “em via de desenvolvimento”.

Dito isso, a questão habitacional em São Paulo pode ser analisada em sua ruptura entre a formalidade e a informalidade. Muitos teóricos, cientistas e profissionais já fizeram e continuam fazendo esta análise a partir, especialmente, das premissas do urbanismo e do planejamento urbano.

Não obstante, a geografia no Brasil e no mundo, têm uma também vasta contribuição sobre os estudos urbanos e da segregação sócio espacial. Falo da geografia pois é nas bases conceituais e teóricas desta ciência que esta tese se apoia, especialmente na teoria do espaço e no acúmulo desigual de tempos no espaço geográfico. Além disso, a geografia conta hoje com um arcabouço ferramental que tem ampliado sobremaneira os estudos sobre as mudanças na superfície terrestre, entre estas ferramentas destacam-se notadamente os Sistemas de Informações Geográficas e os dados de Sensoriamento Remoto (SR).

Os dados de SR têm a capacidade de registrar de tempos em tempos as marcas do homem sobre a superfície terrestre, e esse acúmulo em conjunto tem a importante capacidade analítica de sintetizar os processos envolvidos, possibilitando sua modelagem e entendimento.

Para a questão habitacional aqui abordada o uso do SR parece inequívoco. A habitação precária e a habitação adequada registram em sua evolução histórica na superfície terrestre a temporalidade, as estruturas e os processos quais serão captadas pelos sensores imageadores a bordo dos satélites. É isto que esta tese propõe: avaliar a expansão urbana da cidade de São Paulo e da RMSP a partir do uso de imagens de satélite, buscando modelar, para o período compreendido entre 1985 e 2015, a reprodução desigual do espaço geográfico impressa na superfície pela dualidade da (re)produção da própria habitação. Para tanto esta tese se divide em cinco partes distintas.

Na primeira parte, compreendendo o capítulo um, desenvolvemos as bases históricas e geográficas para a verticalização, associada à habitação regular, e a favelização, associada a habitação precária, tanto para a cidade de São Paulo tanto quanto para toda a RMSP. Feito isso, desenvolvemos a hipótese e os objetivos propostos na tese.

Na segunda parte, compreendendo o capítulo 2, analisamos os dados referentes aos lançamentos imobiliários verticais na RMSP entre 1986 e 2013, a partir dos quais traçamos as tendências de expansão vertical no período, além da problemática do preço da terra, fator fundamental na periferização da moradia.

Na terceira parte, tratada no capítulo três, descrevemos e analisamos as técnicas a serem empregadas na fase analítica da pesquisa, com destaque para o SR e suas aplicações em áreas urbanas, e com maior detalhamento exploramos o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), o qual se constitui na base conceitual e estatística dos procedimentos técnicos aqui adotados.

A quarta parte, sendo o capítulo quatro, faz a análise espectral da RMSP, detalhando comportamento dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo através de dados hiperespectrais. Além disso, neste capítulo é desenvolvida toda a modelagem matemática aplicada aos dados no desenvolvimento subsequente do trabalho.

A quinta parte, capítulo cinco, conclui a tese, apresentando a aplicação do MLME e a análise dos resultados aplicada aos dois principais aspectos da pesquisa: a habitação vertical formal e as favelas e loteamentos irregulares, e por fim traz as principais conclusões da análise bem como faz indicações da aplicabilidade do método elaborado e avalia os encaminhamentos futuros.

Utilizamos para os experimentos e para a modelagem da hipótese nesta tese um duplo recorte territorial: A região Metropolitana de São Paulo (RMSP) como um todo e o limite correspondente apenas à cidade de São Paulo. Essa variação escalar se dá por três motivos:

- 1) é função dos dados disponíveis e com características comparáveis: no caso dos lançamentos imobiliários verticais temos uma base padronizada que recobre todos os municípios da Região Metropolitana e no caso das favelas e loteamentos irregulares, a falta de padronização, geométrica e de conceituação, limitou o uso dos dados apenas para o município de São Paulo;
- 2) é indispensável que se analise o processo de habitação regular verticalizada para o contexto da RMSP pois, em um processo diferenciado da habitação regular, a periferação deste uso do solo é metropolitana, ou seja, ainda central sob o ponto de vista de infraestruturas urbanas associadas. Isto será discutido e demonstrado no desenvolvimento da tese;
- 3) é objetivo desta tese desenvolver um modelo que seja aplicado em escalas múltiplas, tanto escalas geográficas quanto cartográficas.

Capítulo 1: O problema

Introdução ao capítulo

Este capítulo traz a problematização da habitação formal e informal na cidade de São Paulo e na RMSP que baliza a construção da hipótese desta tese.

São abordados os contextos históricos do surgimento, formação e desenvolvimento da verticalização e da favelização na região, bem como as relações históricas entre ambos.

Na sequência é elaborada a hipótese do trabalho a partir da problematização, são descritos os objetivos da tese, a justificativa do trabalho proposto, os materiais utilizados e os procedimentos técnicos adotados durante sua realização.

Ao final do capítulo é proposto um modelo de análise do problema descrito, o qual divide o trabalho em etapas distintas e conecta a hipótese às bases de dados utilizadas.

1. Progresso e crise, verticalização e favelização: o objeto de estudo e a problematização da hipótese

1.1. A verticalização em São Paulo e na RMSP

As discussões a respeito da verticalização das construções em São Paulo foram iniciadas no começo do século XX. Anterior a isso a questão das densidades urbanas restringia-se à superlotação das moradias nos subúrbios populares (Rolnik, 1997). Essa era a ideia de alto rendimento do solo com baixa “depreciação moral” (Rolnik, 1997) dos moradores.

A verticalização inicialmente era a “marca do progresso” da cidade de São Paulo. A região metropolitana como um todo ainda era alheia a esse processo, que se concentrou especialmente às áreas centrais da cidade de São Paulo. Entre os anos de 1920 e 1929, quando da crise¹, ainda que a altura e imponentia dos edifícios tivessem um papel

¹ Quebra da bolsa de Nova York em 1929

simbólico, imagético, existiam pouco mais de 50 edifícios com mais de quatro andares na cidade (Rolnik, 1997).

Somekh (1987) e Somekh & Gagliotti (2011) consideram o elevador como elemento importante no indicativo do processo de verticalização em São Paulo, e seu uso ocorre já na primeira década do século XX. Em 1920, a Lei Municipal nº 2.332 faz menção aos elevadores prescrevendo-se que a sua existência não elimina a necessidade de escadas (Somekh, 1987).

Em 1925, o número de elevadores já atinge um patamar razoável, levando o poder público a instituição da Lei Municipal nº 2.818/25, definindo a necessidade de obtenção de licença para uso de elevadores nos edifícios. Contudo, essa lei somente é implementada a partir da década de 1940 com a criação do registro de elevadores (Somekh & Gagliotti, 2011).

Na figura 1 a seguir, é possível observar os patamares de verticalização nas áreas centrais entre 1911 e 1929:

FIGURA 1: VERTICALIZAÇÃO DO CENTRO DA CIDADE DE SÃO PAULO ENTRE OS ANOS DE 1911 E 1929. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: PRAÇA DA SÉ (1911), RUA DIREITA (1928) E PRAÇA DO PATRIARCA (1925). ADAPTADO DE “HISTÓRICO DEMOGRÁFICO DO MUNICÍPIO² DE SÃO PAULO” (ONLINE).

Desde o início dos anos de 1930, havia uma preocupação com a limitação da altura dos edifícios para que esses não bloqueassem a luz solar, interrompessem a passagem de ar e, especialmente a partir do *boom* imobiliário do pós-guerra, a preocupação sobre o

² Durante o texto os termos município e cidade serão utilizados, no entanto, convém esclarecer que conceitualmente o município é a delimitação territorial da área como um todo, incluindo nestes limites zonas urbanas e rurais. Já o termo cidade refere-se basicamente a ocupação do contínuo urbano, a qual caracteriza a ocupação urbana em si. Assim, ao longo do texto o uso destes termos traduz as conceituações aqui definidas.

poder de controle da densidade em áreas verticalizadas, e isso dividiu os urbanistas, construtores e políticos quanto ao planejamento vertical da cidade (Rolnik, 1987).

A partir de 1937 (promulgação da Lei Municipal nº 3.571) foram definidas uma série de regras para a verticalização, como a definição da altura do edifício em função da largura da via, a limitação de altura em algumas vias específicas e a necessidade de recuo em relação a via. Esse ponto é considerado o marco introdutório da regulação da edificabilidade do terreno na legislação urbanística. Essas regras foram aplicadas até 1954.

Esse controle da verticalização mais intenso a partir da década de 1930 está, em algum grau, conectado a ideia de planejamento e zoneamento extensivo a toda a cidade que já vinha se configurando desde a promulgação do Código de Obras em 1929³ e da constituição da Comissão para Estudos de Zoneamento. A seguir, a Figura 2 mostra a situação da área central da cidade de São Paulo em 1940:

FIGURA 2: VISTA DO CENTRO DA CIDADE DE SÃO PAULO. À ESQUERDA, A RUA TABATINGUERA, O FÓRUM JOÃO MENDES E AS OBRAS DA CATEDRAL. À DIREITA, A AV. RANGEL PESTANA E A IGREJA DO CARMO. FONTE: “HISTÓRICO DEMOGRÁFICO DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO” (ONLINE).

³Código de Obras Arthur Saboya

O Plano de Avenidas de Prestes Maia, o qual em linhas gerais propunha um planejamento de crítica a centralidade absoluta, é composto por um conjunto de vias perimetrais concêntricas com artérias radiais, o qual poderia ser expandido indefinidamente⁴. Essa característica é importante, pois ativa a possibilidade de conexão metropolitana com grandes impactos sobre a verticalização (ver Figura 3).

FIGURA 3: ESQUEMA TEÓRICO DE SÃO PAULO INTEGRANTE DO PLANO DE AVENIDAS DE PRESTES MAIA, 1930. FONTE: LAZARINI & BRESCIANI, 2008.

Outra característica deste plano é a de que ele propõe “se moldar a estrutura social existente” (Rolnik, 1987), não havendo, portanto, nenhuma intencionalidade de mudança na estrutura de exploração do mercado imobiliário existente. Ao contrário, prevê a restrição das alturas dos edifícios nas áreas centrais, bem como a acomodação de indústrias e edifícios residenciais de “segunda classe” nos vãos industriais e nos círculos de irradiação exterior, basicamente a partir das margens externas do Tietê e do Pinheiros.

Contudo, apesar da Comissão de Zoneamento existente e dos planos propostos, uma proposta global de planejamento somente será apresentada nos anos 50.

Em relação a verticalização, a legislação que de fato interferiu foi aquela relacionada a potencialidade construtiva do terreno, no entanto São Paulo limitou-se apenas ao controle do limite de alturas máximas até 1957 (Somekh & Gagliotti, 2011).

Essa polemica acerca da altura dos edifícios é retomada no *boom* imobiliário dos anos 40. Até essa data, o circuito de operações imobiliárias, que compreende a produção,

⁴Existem críticas ao modelo, de base europeia, que aqui transplantado não implantou os passos básicos anteriores de estruturação da cidade, já existentes na Europa.

venda, compra e especulação, foi o destino de grande parte dos investimentos, com dinheiro auferido de operações industriais, mercantis e agrícolas.

Isso se deve ao fato de que, até 1965, a propriedade imobiliária era a aplicação de maior lucro, grande rentabilidade e liquidez. Soma-se a isso a estrutura conjuntural provocada pela guerra nesse período, onde os superávits comerciais positivos foram potencializados no Brasil pela diminuição forçada das importações e, em efeito cascata, houve uma grande expansão de crédito financeiro (companhias de capitalização, fundos previdenciários, etc.), o que gerou uma concentração do investimento do capital privado no setor imobiliário. O arranha céu se tornou o símbolo dessa era.

Para uma ideia mais clara da escala de investimentos, considerando o Brasil, São Paulo e Rio de Janeiro absorviam cerca de 60% do investimento nacional total. Considerando esse montante, nesses dois locais, em 1939 as novas construções respondiam por 20% do investimento nacional privado, e em 1947 esse valor já correspondia a 47% (Agamenon Magalhães apud Rolnik, 1987). Ressalta-se que, naquele momento, esses dois municípios abrigavam 20% da população total do país.

Sob o aspecto regulatório, em 1957 Anhaia Mello formulou a Lei Municipal nº 5.621, que propunha uma limitação do aproveitamento do solo urbano a quatro vezes a área do terreno para qualquer área da cidade. Contudo, a reação intensa e a pressão dos construtores alteraram o coeficiente da lei para seis vezes a área do terreno para os prédios comerciais. Essa brecha foi utilizada como artimanha que, na prática, sob alegação de uso comercial em prédios residenciais, se ampliou para todos as construções.

No entanto, a delimitação da altura em função do coeficiente de aproveitamento do terreno gerou o espraiamento das construções verticais.

A partir do ano de 1967 têm início as ações do Banco Nacional de Habitação (BNH), criado em 1964, e do Sistema Financeiro da Habitação (SFH), com o objetivo de viabilizar a aquisição da casa própria por famílias de baixa renda. Com a gestão dos recursos do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS), e a partir dessa data o BNH passou a ter acesso para implementação, isso impactou na evolução do crescimento vertical tanto na RMSP e em São Paulo quanto em outras cidades brasileiras, ainda que suas ações não tenham sido capazes de *“atender à demanda da população de baixa renda e as famílias que não tiveram acesso ao SFH continuaram produzindo sua moradia em loteamentos irregulares ou ocupações”* (Zuquim, 2012).

Em 1972, a Lei Municipal nº 7.805 reduziu os coeficientes de aproveitamento do solo, para duas vezes a área do terreno, com exceção de quatro vezes em

algumas zonas específicas. Com essa lei de zoneamento ocorreu uma nova onda de espraiamento vertical para outras áreas da RMSP, além de um aumento de demanda de áreas viáveis para o setor produtivo imobiliário, acarretando numa sobrevalorização excessiva da terra urbana.

Em 1986 o BNH foi extinto e logo em seguida a aprovação da Constituição Federal de 1988 estabeleceu os limites do direito de propriedade e também a possibilidade de operações urbanas. Esse marco é uma reversão na diminuição da verticalização imposta nas décadas anteriores, pois possibilitava o ganho vertical a partir da compra do direito de construir. Dessa maneira novas ondas de verticalização em áreas consolidadas são possibilitadas, e, além disso, o espraiamento de grandes empreendimentos verticais na RMSP se intensifica, especialmente no período subsequente. Entre 2000 e 2004 surge a figura do PDE (Plano Diretor Estratégico) associado a revisão do zoneamento urbano, o que consolida o transbordamento da verticalização em grande escala para além dos limites do município de São Paulo.

Há um forte componente da ação do poder público na periodização da verticalização na cidade de São Paulo, assim a curva correspondente a essa evolução pode ser entendida sob essa perspectiva (Gráfico 2):

GRÁFICO 2: VERTICALIZAÇÃO EM SÃO PAULO: 1940 A 2011. ADAPTADO DE SOMEKH & GAGLIOTTI, 2011.

Apesar da base histórica constituída para a verticalização a partir da década de 20 na cidade de São Paulo e na RMSP, pode-se dizer que região é verticalizada, mas não densa (Rolnik, 1995). Essa constatação é pautada nos estudos feitos pelos autores entre 1977 e 1987, onde o mapeamento sistemático das densidades de São Pulo à época mostra que as áreas de maior incremento de densidade não coincidem com as áreas de maior coeficiente de aproveitamento do solo. Fica claro que há a necessidade de distinção entre os conceitos de verticalização, densidade construtiva e a densidade demográfica, os quais não podem ser confundidos (Nakano, 2015).

Parte disso se deve à histórica opção feita pelo automóvel em São Paulo em detrimento do transporte coletivo, onde “as grandes intervenções viárias materializaram a opção por um modelo de desenvolvimento urbano baseado no transporte sobre pneus e no crescimento extensivo, retroalimentado pela liberalização dos loteamentos periféricos” (Silva, 2007). Junto a esse processo vieram os financiamentos direcionados para a classe média mais adimplente, resultando numa cidade difusa, associada a uma produção imobiliária elitizada, com exclusão das classes mais pobres. (Somekh & Gagliotti, 2011).

Essa estruturação tem conexão com o uso cotidiano do espaço urbano da metrópole. A denominada “densidade flutuante”, mensurada a partir dos dados de deslocamento diário da população aponta isso. Áreas detentoras de estrutura comercial e econômica, por exemplo, apresentam densidade alta às 12 horas com diluição no início e fim do horário comercial (Nakano, 2015).

Às áreas centrais da cidade de São Paulo são grandes polos geradores dessa flutuação. Como visto, historicamente a densidade construtiva vertical é acumulada no espaço dessa área. A figura 4 a seguir mostra diferentes momentos da verticalização na área central da cidade de São Paulo:

FIGURA 4: IMAGENS DA VERTICALIZAÇÃO NA CIDADE DE SÃO PAULO ENTRE AS DÉCADAS DE 1950 E 2000. ADAPTADO DE “ HISTÓRICO DEMOGRÁFICO DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO” (ONLINE).

No período atual, especificamente a partir de 2009, se inicia com a expectativa de que o programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV) pudesse representar em alguma escala a reversão desse processo de difusão periférica (Somekh & Gagliotti, 2011).

Contudo, a lógica imposta pelo programa revive as premissas de programas e políticas habitacionais anteriores onde a única via de aquisição dos imóveis do programa destinados à faixa de menor renda é através da compra (Rodrigues, 2013). A colocação do imóvel no mercado automaticamente inflaciona sua aquisição e tende a sua absorção por camadas de maior poder aquisitivo, replicando a lógica de periferação, em grande parte dos casos com alto grau de precariedade e irregularidade, e novos espraiaamentos verticais como tendência potencializada pela conjuntura legal/financeira/especulativa.

1.2. As favelas em São Paulo e na RMSP

Sem alternativas, a população de baixa renda potencializa a cidade ilegal, a qual assume proporções constantemente crescentes, especialmente nos grandes centros metropolitanos brasileiros. Esse é um dos princípios fundamentais da favelização e do surgimento de loteamentos irregulares na Metrópole de São Paulo e outras partes do Brasil e do mundo.

Mas afinal, o que é uma favela⁵? Não há uma definição global que consiga abarcar toda a complexidade das habitações precárias existentes em diferentes partes do mundo. De forma geral as favelas são locais de concentração e pobreza, com altas taxas de precariedade, informalidade, ausência de serviços básicos de infraestrutura e na maior parte dos casos, ausência histórica da presença do Estado.

Na cidade de São Paulo, Denaldi (2003) a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, aponta que em 1980, haviam sido contabilizados 480.595 domicílios em favelas, correspondendo a 1,89% do total dos domicílios brasileiros.

⁵ Em nível global, a definição do significado de uma favela é restrita às características físicas e legais do assentamento, excluindo as dimensões sociais mais complexas, visando nessa abordagem os objetivos de desenvolvimento do milênio (ONU, 2003). Tal abordagem pode ser alvo de crítica quando se pensa na grande heterogeneidade e diversidade de tipos e configurações de assentamentos precários, favelas, que se estabelecem e se consolidam em várias partes do mundo, associados a características físicas, sociais, econômicas e históricas próprias, e a própria disponibilidade de recursos para monitoramento e ações nestas áreas são diferenciadas no mundo. Segundo o relatório da ONU denominado “Slums of the world: the face of urban poverty in the new millennium? ”, a palavra *slum* (favela) foi originalmente usada na Inglaterra para denominar “locais de baixa reputação”, ou partes da cidade “mal frequentadas”. Ao redor do mundo diferentes termos são empregados e todos em algum ponto apresentam como ponto em comum a pobreza associada. A própria ONU adota como entendimento do termo as áreas deterioradas ocupadas por populações pobres, e cuja produção acrescenta uma cada vez maior divisão interna, caracterizada além disso por ausência de condições básicas em muitas dimensões da vida humana. Não obstante, considera ainda que a tal entendimento deve-se hoje pensar em agregar a este termo todas as áreas de ocupação informal, seja previamente construída e abandonada ou não, que representam a mesma ausência de condições e acessos, e tem se tornado a expressão mais visível da pobreza urbana. Mais detalhes sobre definições locais de favela podem ser encontrados em Pedrassoli, 2011.

Já em 1991, este número corresponde a 1,14 milhões de domicílios em favelas, representando 3,28% do total dos domicílios. Nesse período a taxa de crescimento anual dos domicílios em favelas é de 7,65%, quatro vezes maior que a taxa de crescimento anual do total domiciliar que era de 1,89%.

Em relação ao número de habitantes residentes nas favelas brasileiras, o IBGE apontou que a população moradora passou de 3,1%, em 1991, para 6% da população total em 2010. Atualmente, na RMSP, 18,9% da população residem em aglomerados subnormais (IBGE, 2010). As evidências sugerem que também a população cresce em ritmo mais acelerado em favelas do que em outras áreas da cidade. No Brasil, entre 1991 e 2010, a população brasileira teve um aumento de cerca de 20% enquanto os residentes nos aglomerados subnormais (ou favelas) aumentou na ordem de 61% (IBGE 1991, 2010).

Esse resultado tem relação com a periferização histórica das favelas, loteamentos irregulares e clandestinos, *“em algumas cidades do Grande ABC (Estado de São Paulo), como Santo André e Ribeirão Pires, a taxa de crescimento anual da população favelada chega a ser cerca de nove e 12 vezes maior, respectivamente, que o índice de crescimento total da população residente nas cidades”* (Denaldi, 2003).

Este breve panorama do crescimento das favelas e das áreas irregulares ocupadas tanto no Brasil, considerando o país como um todo, como no município de São Paulo e da RMSP demonstra que as favelas tendem a crescer e a se tornarem mais densamente populadas em um ritmo mais acelerado do que o restante da cidade formal, decorrendo na manutenção e no crescimento do déficit habitacional atual nas cidades brasileiras.

De acordo com o estudo “Censo de Favelas” (CEM, 2000), ao final do século XIX, no ano de 1896, a cidade de São Paulo registrou sua primeira favela, denominada “Chácara Chacrinha”, localizada no distrito do Sacomã. Já o registro de poligonal de favela ainda não urbanizada mais antigo encontrado no HABISP - Sistema de Informações para Habitação Social na Cidade de São Paulo data de 1934, a chamada “Palmas de Tremembé” no distrito de Tucuruvi. Se considerarmos os dados do HABISP das favelas do município que já foram urbanizadas, os registros mais antigos datam de 1918 e 1922, núcleos Bernardo da Fonseca Lobo e General José de Almeida Botelho, respectivamente. No entanto estas e outras 404 áreas, após receberem intervenções urbanísticas, são consideradas pelo HABISP, como “núcleos urbanizados” e passam a compor um banco de dados diferente daquele das favelas.

Esses dados corroboram a afirmação de Pérez Machado (2012), segundo o autor, *“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”. Essa datação do surgimento de favelas entre as décadas de 1930 e 1940 e sua extensão crescente nas décadas seguintes é factível ao contexto da produção habitacional historicamente definido. Além dos processos migratórios em busca de empregos nas grandes cidades, a moradia de acesso popular, até os anos 1940, era estritamente promovida pela iniciativa privada na forma de vilas operárias e ou habitações de aluguel em bairros centrais. Até esse momento, o Estado brasileiro não intervinha na moradia popular porque o mercado respondia à demanda habitacional de baixa renda sem grandes pressões sociais (Zuquim, 2012). Abaixo, a figura 5 mostra a situação de ocupação da antiga favela da Várzea do Penteado:

FIGURA 5: FAVELA DA VÁRZEA DO PENTEADO, PRÓXIMA A AVENIDA DO ESTADO E DA ÁREA CENTRAL DA CIDADE DE SÃO PAULO. DÉCADA DE 1940. FONTE: FOTO DE SEBASTIÃO PEREIRA DO ACERVO DA DIVISÃO DE ICONOGRAFIAS E MUSEUS APUD BONDUKI, 2011.

É a partir da década de 1940 que tem início a produção estatal de habitação social no Brasil (especialmente moradias verticalizadas unifamiliares), inicialmente com os fundos de aposentadorias e pensões, entre 1937 e 1946, e mais adiante com a Fundação da Casa Popular, entre 1946 e 1964 (Zuquim, 2012). Essas ações tangenciam o problema mas ficam longe de solucionar a questão da moradia popular.

Como alternativa, os trabalhadores começam a adquirir lotes clandestinos, geralmente periféricos e com uma dinâmica pautada pela autoconstrução da moradia. O transporte de massa, especialmente o ônibus, desempenhou um importante papel para a periferização nesse período, ao passo que promovia o acesso a regiões cada vez mais distantes da centralidade urbana. Ao mesmo tempo, isso significava a opção pela marginalização da pobreza em detrimento da ocupação das áreas mais estruturadas da cidade em função do capital acumulado. Esse é um quadro historicamente brasileiro, cujo funcionamento é localmente similar na cidade de São Paulo e na RMSP.

A conjunção de fatores como o final da Segunda Guerra Mundial, políticas habitacionais locais pouco efetivas, acesso às terras periféricas mais baratas em áreas restritas e sem segurança de posse e a autoconstrução descrevem a tendência histórica da favelização nas regiões metropolitanas brasileiras.

A década de 1950 marcou a transição das cidades do modelo agrário e exportador para o modelo urbano e industrial, pela atratividade de pessoas para as cidades em função de seu status de local de concentração da riqueza. Esse contingente desembocou na continuidade aprofundada do padrão de urbanização periférica da pobreza, especialmente de trabalhadores do campo que migraram para as cidades. Abaixo, a figura 6 mostra a situação de ocupação da antiga favela do Vergueiro:

FIGURA 6: FAVELA DO VERGUEIRO ENTRE 1965 E 1968. LEGENDA ORIGINAL “AS CHÁCARAS CONVIVERAM COM A FAVELA”. FONTE: LACOSTE, 1975 APUD DE LARA, 2012.

Essa política de periferização da pobreza tem traços marcantes nos anos 50. Exemplo disso é a área do atual parque do Ibirapuera onde até 1952 existia uma favela com 186 barracos e 204 famílias, a qual foi removida para construção do parque a sob pressão da elite paulistana⁶ (Barone, 2007). Esse exemplo não é único, outras áreas na cidade de São Paulo, que atualmente são altamente valorizadas, já foram ocupadas por favelas: exemplo como a Chácara Klabin onde existiu a favela Vergueiro durante 20 anos e de onde seus mais de 7.000 moradores foram retirados no final dos anos 60, entre outras áreas.

Em São Paulo, até 1970, as favelas não eram tão numerosas. Estas eram vistas como *“local provisório dos migrantes recém-chegados à cidade, os quais logo teriam a questão da moradia resolvida por loteamentos populares, conjuntos habitacionais promovidos pelo Estado ou mesmo por seu retorno ao lugar de origem”* (Zuquim, 2012). Havia uma forte política repressiva de desfavelamento. A figura 7, abaixo, mostra um dos despejos da antiga favela do Vergueiro:

FIGURA 7: FAVELADOS SENDO RETIRADOS DO VERGUEIRO (PRIMEIRO DESPEJO) EM 1962 E MANDADOS DE VOLTA À ORIGEM EM 1968. FONTE: FOLHA DE SÃO PAULO DE 18 ABRIL DE 1962 E DE 9 MAIO DE 1968, ADAPTADO DE DE LARA (2012).

Assim, ainda que a década de 1940 seja considerada como o marco inicial do surgimento de favelas na cidade de São Paulo e na RMSP é a partir da década de 1970 que este fenômeno se consolida (Pérez Machado, 2012). *“As sucessivas crises e reestruturações econômicas dos anos 1970 e 1980 promoveram o aumento do desemprego e, conseqüentemente, da precariedade urbana”* (Zuquim, 2012).

⁶ A remoção veio a cabo a pedido do industrial Ciccilo Matarazzo.

Para Davis (2006), os anos 1970 marcaram mundialmente o avanço das favelas nas cidades, pois, segundo o autor, foi o ano em que os governos do terceiro mundo abriram mão da luta contra as favelas ao perceberem que se tratava de um fenômeno que não poderia mais ser controlado.

Em 1970, o Serviço de Bem-Estar Social da Prefeitura de São Paulo (SEBES) recenseou 163 favelas, constituídas por 8.552 barracos e com população de 41.100 habitantes, representando 0,75% da população total da cidade de São Paulo (Sachs, 1999). Já em 1974 o mesmo SEBES faz o primeiro cadastro de favelas do município, contabilizando 542 favelas, 14.650 barracos e 71.840 residentes. No início dos anos de 1980, são realizados diversos levantamentos para mensurar a população moradora em favelas. Os dados, por vezes divergente, apontaram estimativas que variavam de, aproximadamente, 330.000 (IBGE) até 800.000 habitantes, equivalendo a 3,9 e 11% da população total, respectivamente (Sachs, 1999).

Pérez Machado (2012) aponta que em um novo censo de favelas realizado em 1987, na ocasião, foram contabilizados no município de São Paulo um total de 812.764 moradores em favelas, equivalendo a 8,9% da população, que à época era de aproximadamente nove milhões de pessoas. O mesmo autor apresenta novas pesquisas realizadas em 1991, pelo IBGE, onde são contabilizados 146.892 domicílios e 711.032 pessoas, sendo que, posteriormente, em 1993, levantamentos da FIPE⁷ apontam 1,9 milhão de pessoas vivendo nas favelas de São Paulo, o equivalente a 19,8% da população.

Essas discrepâncias nos números dos levantamentos se devem a diferenças e, em alguns casos, inconsistências metodológicas. Um exemplo disso é a consideração na década de 1970 da favela como ente homogêneo, o que refletiu em estimativas inferiores da taxa de ocupação dos barracos, por exemplo, (Sachs, 1999).

De qualquer maneira, esse período temporal foi marcante no processo de favelização da RMSP. Ainda que em números absolutos a população favelada possa parecer pouco representativa, seu ritmo de crescimento foi vertiginoso no tempo: o número de moradores de favelas aumentou cerca de 14,5 vezes no interstício de 10 anos entre 1970 e 1980, enquanto que a população total aumentou em 43% no mesmo período (Sachs, 1999; Taschner, 1984).

A partir de meados da década de 1960 a ação do estado se deu por meio do BNH e do SFH. No planejamento inicial os recursos tinham como destino previsto a

⁷ Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas e aplicadas

população de baixa renda, não obstante a ação de ambos foi falha ao longo do tempo, com destinação de recursos cada vez mais às classes de maior renda na aquisição dos imóveis. Esse desvio promoveu a continuidade da ocupação dos loteamentos irregulares e clandestinos.

Entre 1964 e 1973, as políticas do Banco Nacional de Habitação se concentraram na remoção da população favelada e sua migração para conjuntos habitacionais nas periferias metropolitanas (Zuquim, 2012). No momento seguinte, entre 1975 e 1986, as políticas promovidas pelo banco foram pautadas no paralelismo entre os programas de urbanização de favelas e produção e comercialização de habitação popular⁸ (Zuquim, 2012).

Conjuntamente, a ação do BNH que não atendia as famílias de baixa renda e as sucessivas crises e reestruturações econômicas entre 1970 e 1980 que geraram grande onda de desemprego, foram fatores determinantes para o aumento da precariedade urbana na RMSP.

A partir de 1979, a Lei Federal nº 6.766, conhecida como lei do parcelamento urbano, ainda que seja um marco legal para a ocupação urbana ordenada no Brasil, tornou ilegal o parcelamento do solo urbano sem infraestrutura e criminalizou o loteador clandestino (Zuquim, 2012). Essa medida dificultou o acesso aos lotes populares, pelos moradores de baixa renda, colocando, novamente, como única possibilidade para essa população a ocupação, autoconstrução e formação de favelas e aquisição de lotes clandestinos. Nesse momento, as ocupações de áreas ambientalmente protegidas e/ou sensíveis se agravaram.

Nos dias atuais, São Paulo, tem uma das problemáticas habitacionais mais complexas do país, onde as dificuldades da gestão habitacional, do financiamento habitacional e do mercado de terras para a população de baixa renda vem se agravando a cada dia em função do acúmulo de problemas econômicos e sociais. (Pérez Machado, 2012).

O mapa 1 abaixo mostra a concentração periférica atual das favelas no município de São Paulo, além de sua relação de localização com as principais fontes de água da cidade:

⁸ Financiamento de lotes urbanizados (Profilurb, 1975); Conclusão, ampliação e Melhoria de Habitação de Interesse Social (Ficam, 1977); Programa de erradicação de sub-habitação (Promorar, 1979)

MAPA 1: LOCALIZAÇÃO ATUAL DAS FAVELAS DE SÃO PAULO: CONCENTRAÇÃO EM ÁREA AMBIENTALMENTE SENSÍVEIS E PRÓXIMAS ÀS RESERVAS DE ÁGUA DO MUNICÍPIO. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HABISP, 2015.

No período histórico mais recente há uma retomada das políticas habitacionais que relembram um pouco do processo do BNH. A partir de 2009 ocorre a injeção de capitais nos produtores imobiliários através do programa habitacional federal “Minha casa, Minha Vida” (MCMV⁹). Novamente a aquisição do imóvel é a única via de moradia proporcionada, assim o processo inflaciona os preços dos imóveis ao virarem peça de mercado, e com isso uma nova onda de periferização, pois os adquirentes muitas vezes vendem os imóveis e retornam para áreas irregulares de ocupação.

⁹ Lançado pelo governo federal brasileiro em março de 2009 (2), o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) tem como finalidade criar mecanismos de incentivo à produção e à aquisição de novas unidades habitacionais pelas famílias com renda de até dez salários mínimos. Mais informações podem ser consultadas em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.133/3936>. Recentemente, em 30 de março de 2016, foi lançada a terceira etapa do MCMV.

No segundo semestre de 2015, um estudo encomendado pelo Ministério das Cidades deu origem à publicação chamada “Minha casa...e a cidade? ”, a qual faz a avaliação do programa MCMV em seis estados brasileiros cinco anos após o início do programa. Algumas questões são apontadas neste estudo, como a periferização dos empreendimentos e implantados muitas vezes, em locais sem qualquer infraestrutura básica como transporte para os postos de trabalho; a baixa destinação de unidades para a classe de mais baixa renda do programa, a alta inadimplência, pois famílias que viviam em favelas são levadas para a realidade totalmente distinta do condomínio, onde têm que pagar mensalmente pela manutenção; a alta taxa de retorno de pessoas para áreas precárias ou irregulares.

A reafirmação de políticas de periferização da pobreza na atualidade mantêm o processo histórico de favelização na RMSP. A transformação da moradia de um direito para um investimento continua a ditar as regras do jogo da habitação. A verticalização nas áreas centrais, símbolos da moderna e cosmopolita São Paulo deixa nas sombras sua periferia cada vez mais favelizada.

1.3. Loteamentos irregulares e favelas: análises conjuntas e complementares

O termo habitação tal qual tratado nesta pesquisa é abordado a partir de uma divisão que tenta englobar de forma mais geral os casos específicos possíveis no tema. Tratamos a habitação como adequada ou inadequada. A adequação habitacional pressupõe que a habitação seja atendida por um conjunto de condições que tornem possível seu uso digno.

A precariedade é entendida como a falta de algum requisito básico da moradia adequada, e na definição do Relatório das Cidades (2009) um domicílio para ser considerado totalmente adequado deve possuir simultaneamente: abastecimento pela rede geral de água; iluminação elétrica; ligação a rede geral de esgoto, atendimento por serviço de coleta de lixo; pelo menos um banheiro; ser um domicílio particular e permanente; não estar localizado em área de aglomerado subnormal; possuir uma densidade de moradores por cômodo menor ou igual a 2. A ausência combinada destes critérios aumenta o grau de inadequabilidade.

Tomando como base tais condições de adequabilidade podemos definir como inadequados, para interesse da tese aqui proposta, todos aqueles domicílios que se encontram em áreas de favelas na RMSP, pois estes apresentam algum grau de inadequabilidade. A extrapolação dessa premissa nos leva a considerar todos os

empreendimentos habitacionais formais (CEM, 2015) presentes em nossa base de dados como adequados, pois são formais sob o ponto de vista regulatório em todas as fases de sua concepção.

Um fator importantíssimo a ser considerado é a segurança jurídica da posse, seja ela coletiva ou individual, e neste sentido podemos ampliar as condições de inadequabilidade para as ocupações em loteamentos clandestinos e irregulares¹⁰, considerando as definições da Organização das Nações Unidas (ONU) (UN-HABITAT 1996; UN-HABITAT 2003) na agenda Habitat.

Este modelo aqui adotado para classificação das condições do uso habitacional do solo permite simplificar o processo de ocupação pela habitação na RMSP em duas categorias: formal e informal. Para este trabalho a fração formal corresponde aos lançamentos imobiliários residenciais legalizados que fazem parte da base de dados em análise, e a fração informal é aquela composta pelos assentamentos precários, ou mais livremente favelas, e áreas de loteamento irregular. A clareza desta opção é importante para que os procedimentos técnicos e as opções metodológicas adotadas nesta tese possam ser compreendidos durante a leitura.

No espaço urbano do município de São Paulo¹¹ esse modelo evidencia a maior concentração periférica da inadequabilidade habitacional, como podemos observar no Mapa 2 a seguir:

¹⁰ Ressaltamos que grande parte das favelas é também localizada em áreas irregulares, ou seja, com problemas fundiários.

¹¹ Podemos extrapolar o modelo para toda a RMSP, já que ele se reproduz de maneira muito similar em todos os municípios que a compõe.

MAPA 2: LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS, FAVELAS E LOTEAMENTOS IRREGULARES NA CIDADE DE SÃO PAULO. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HABISP DE 2015.

Neste cenário é esperado que as mudanças temporais nas frações extraídas pelo MLME estejam associadas mais intensamente com a moradia precária e irregular¹² na periferia da capital paulista, conforme mostra o Mapa 3, enquanto na área central do município de São Paulo a mudança esteja associada a habitação formal, em especial a verticalização acumulada.

¹² Vale lembrar que a lei federal que estabelece as bases da política urbana é a 6766 de 1979, sendo que loteamentos irregulares anteriores a lei não são contabilizados.

MAPA 3: FAVELAS E LOTEAMENTOS IRREGULARES EM SÃO PAULO. FONTE: ORGANIZADO PELO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HABISP, 2015.

1.4. Hipótese

A hipótese deste trabalho é a de que o processo de verticalização¹³ na RMSP (habitação formal) e a evolução das favelas/loteamentos irregulares na cidade de São Paulo (MSP) (habitação informal) entre 1985 e 2015, estabelecem uma relação mensurável com as alterações no uso e ocupação do solo da área em questão, medidos pelas proporções das frações de substrato¹⁴, vegetação e sombras extraídas utilizando o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).

A hipótese subjacente se divide em duas partes:

- 1) As mudanças na estrutura urbana causadas pelo adensamento e verticalização acumulados em função dos lançamentos imobiliários verticais na RMSP entre 1985 e 2015 poderão ser mapeadas pela correlação temporal entre as frações substrato e sombra do MLME, com

¹³ O conceito aqui adotado é definido por Somekh (1997): “a multiplicação do solo urbano, possibilitada pelo elevador” e os dados de origem desta tese fornecidos pelo Centro de Estudos da Metrópole a partir dos levantamentos da EMBRAESP já trazem a definição de atributo para as categorias “vertical” e “horizontal” na tabela de atributos.

¹⁴ A fração substrato inclui, simultaneamente, áreas construídas e solo exposto.

utilização de imagens Landsat que recubram regularmente o mesmo espectro temporal, sendo que as áreas de mais intensa verticalização concentrada apresentarão correlação negativa com variação de intensidade;

- 2) Por outro lado, as favelas da cidade de São Paulo, cada vez mais periféricas, apresentarão como principal característica de mudança no tempo a correlação negativa entre as frações substrato e vegetação/sombra no MLME, com tendência a apresentar características de correlação temporal negativa entre substrato e sombra, bem como também negativa entre vegetação e sombra. Também considerando aqui o recobrimento de imagens Landsat no mesmo espectro temporal.

1.4.1. Desenvolvimento da hipótese

A partir da validade da hipótese, se espera que:

- 1) Agregando os resultados obtidos através da aplicação do MLME (substrato, vegetação e sombra), no mesmo nível de agregação dos resultados obtidos pela análise dos lançamentos imobiliários residenciais dos limites de favelas, podemos mensurar e analisar a evolução das frações em cada caso;
- 2) Estabelecida a relação entre o MLME e os lançamentos imobiliários no período de tempo e escala considerados, espera-se que o modelo seja aplicável em outras regiões metropolitanas do Brasil e do mundo que apresentem características semelhantes de desenvolvimento.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo principal:

Analisar, modelar e mapear os processos de produção habitacional na RMSP sob o ponto de vista formal (lançamentos imobiliários verticais) e informal (favelas/lotamentos irregulares) usando Sensoriamento Remoto Orbital, a partir da correlação dos valores de mudança nas proporções das frações do MLME em imagens Landsat referentes ao período entre 1985 e 2015.

1.5.2. Objetivos específicos:

- 1) Analisar a problemática em duas escalas distintas: RMSP para os lançamentos imobiliários verticais e o Município de São Paulo para as favelas e loteamentos irregulares;
- 2) Gerar os índices de verticalização provocada pelos lançamentos imobiliários residenciais (RMSP) e os índices de ocupação do solo por favelas/loteamentos irregulares na (MSP) agregados por distritos e setores censitários entre 1985 e 2015;
- 3) Aplicar o modelo linear de mistura espectral nas imagens Landsat selecionadas datadas de 1986, 1989, 2000, 2005, 2006, 2010 e 2015, gerando as respectivas frações a partir do uso de membros de referências globais, propostos por SMALL e MILESI (2013);
- 4) Estabelecer a relação entre os resultados obtidos nos procedimentos adotados nos objetivos 1 e 2;
- 5) Estabelecer as bases para a elaboração de um modelo extensível para aplicação em outras áreas metropolitanas presentes em países com características de desenvolvimento similares ao Brasil;

1.6. Justificativa e área de estudo

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

Em primeiro lugar, a RMSP é representativa globalmente sob o ponto de vista da expansão e desenvolvimento urbano em países em via rápida de desenvolvimento econômico.

Em segundo lugar, analisar, mapear e descrever o processo de transformação das estruturas físicas das cidades ao longo do tempo revelam muito mais do que a simples quantificação de um fenômeno. Todas as modificações captadas sobre a RMSP a partir de imagens de satélite trazem em si o registro do acúmulo desigual dos tempos no espaço geográfico de forma crua. Assim, há uma conexão forte entre os dados registrados e o desenvolvimento econômico e social no tempo. Portanto, sendo a RMSP significativa como caso analítico e os dados físicos conexos com a realidade em outras dimensões, os resultados obtidos aqui podem gerar extrapolações para entender outras partes do país e até do mundo.

Em terceiro lugar, o acelerado processo de urbanização pelo qual passaram e passam diversas regiões em todo o mundo, principalmente aquelas localizadas nos países periféricos estão no alvo de muitas investigações em diversos campos da ciência. Essa preocupação é explicada, em grande parte, pela relação entre as dinâmicas do processo de urbanização e as mudanças ambientais globais.

Ainda que a produção agropecuária seja atualmente o setor mais impactante nas mudanças ambientais, a atenção se volta para as cidades por conta do modo de vida e da produção e reprodução do espaço que elas representam, modo esse que mantém em movimento todas as atividades potencialmente impactantes, como a própria produção agropecuária que atende aos moradores da cidade. Hoje é certo que mais da metade da população mundial vive nas cidades e que essa tendência é mais claramente observada nos grandes aglomerados urbanos, cada vez mais concentrados. Essa concentração de pessoas se traduz também na concentração desigual de acessos, recursos e infraestrutura a que são submetidas as populações urbanas.

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

Por fim, conhecer melhor a dinâmica de urbanização da RMSP por meio do uso de técnicas como o sensoriamento remoto é uma abordagem complementar e necessária, especialmente quando pensamos na capacidade de extração de informações que representam espacial e temporalmente a dinâmica recente de transformação da RMSP.

1.6.2. Por que lançamentos imobiliários residenciais verticais e as favelas?

A verticalização e a favelização são as duas faces mais explícitas da produção, formal e informal, da moradia na cidade de São Paulo e em sua região metropolitana. Além disso, ambos são movidos pela mesma lógica de mercado, a qual representa o capital especulativo imobiliário na construção de novos empreendimentos e ao mesmo tempo precariza e empurra a habitação informal, e também a formal de baixa renda, para periferias cada vez mais distantes em função de áreas desvalorizadas por este mesmo capital, incrementando as favelas e os conjuntos habitacionais desconexos da estrutura urbana.

Assim, o desenvolvimento econômico se configura como parte integrante da produção do espaço urbano, tendo base a produção e acumulação do capital, tornando o espaço sujeito às leis de valor (Lipietz, 1977).

Neste contexto, a produção da verticalização habitacional e a evolução das favelas funcionam como indicadores chave para análise do processo de reprodução do espaço urbano. Temos então estas duas camadas complementares e interligadas na questão habitacional: prédios e favelas.

Tratando das favelas localizadas no município de São Paulo, o registro de origem mais antigo no Sistema de Informações para Habitação Social na cidade de São Paulo – HABISP - é o da favela “Palmas do Tremembé”, sucedido por uma série de registros de origem de outras áreas a partir da década de 1940. No entanto, conforme aponta Pérez Machado (2012), foi na década de 1970 que o fenômeno das favelas se consolidou de fato.

Dados recentes demonstram que na última década o Brasil teve um aumento da população vivendo em condições de precariedade habitacional proporcionalmente superior ao aumento da população total nesse mesmo período. Considerando a cidade de São Paulo, por exemplo, a proporção da população morando em favelas em relação à população total saltou de 3,1% para 6% entre 1991 e 2010, mostrando que é um fenômeno ainda em curso e crescente nos registros atuais.

Não é possível precisar uma data para o início do processo de verticalização para fins habitacionais na cidade de São Paulo e na RMSP, contudo a utilização do elevador apresenta uma boa indicação do processo. Somekh (2011) aponta que nos anos de 1920 a legislação em São Paulo já tratava do assunto e demonstrava que havia já naquela época um número significativo de elevadores instalados.

Esse processo de verticalização a partir de então é moldado pelos próprios ciclos econômicos e legais sobre a regulação do território na RMSP, mas apresentaram crescimento contínuo, com maior aceleração na década de 70 e a partir daí apresentando quedas e retomadas nos períodos decenais subsequentes. Importante dado é que atualmente a RMSP passa por uma forte retomada desse processo de verticalização associada a repasse governamental para produção habitacional em grande escala e por variantes locais como, por exemplo, as permissividades legais atuais das intervenções urbanas em São Paulo.

Entre 1985 e 2015, os lançamentos imobiliários verticais representaram mais de 97% de toda a produção de unidades verticais de qualquer tipo na RMSP (CEM, 2015

e IBGE, 2010) e esse acúmulo de unidades e andares se mostrou mais intenso a partir de 2010.¹⁵

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

Estas duas faces de um mesmo aspecto da urbanização metropolitana podem explicar uma parcela importante das mudanças no uso do solo na RMSP e, se correlacionadas corretamente com dados de Sensoriamento Remoto, podem trazer alguma contribuição ao entendimento das dinâmicas envolvidas no espaço e no tempo referentes aos padrões de produção habitacional da área e, além disso, produzir subsídios importantes ao planejamento e à tomada de decisões.

1.6.3. Por que o Sensoriamento Remoto (SR)?

A simplificação do fenômeno em seu funcionamento básico é um dos passos chave na pesquisa científica e com uso de imagens de satélite multiespectrais podemos modelar os processos envolvidos nas mudanças do uso do solo, agregando toda a complexidade de alvos na superfície da terra em componentes básicos, os quais chamamos de frações, como vegetação, sombra (água e áreas sem iluminação) e substrato (solo exposto e construções) a partir de diversas técnicas, entre elas a aplicação de modelos lineares de mistura espectral (MLME). A partir da *separação*¹⁶ espectral é possível quantificar as trocas entre as frações e traçar as mudanças no uso do solo a partir desta simplificação.

Os produtos de SR são atualmente um dos maiores acervos globais de registros científicos de dados com caráter espaço-temporal sobre as mudanças no uso do solo na superfície da terra dos últimos 40 anos. Tomemos como exemplos as imagens geradas pela missão Landsat que efetuam registro contínuo da superfície a cada 16 dias desde 1973, quando foi lançado o primeiro satélite da série. Nesse período a população mundial se tornou

¹⁵ Os dados utilizados são uma organização das informações da EMBRAESP pelo CEM. Ressalte-se que a base de dados trata apenas de lançamentos imobiliários verticais (os mais lucrativos para o setor imobiliário). Contudo, existe também disponível a base de dados dos lançamentos comerciais verticais, os quais, como apontado, representam menos de 5% da verticalização total.

¹⁶ É uma tradução livre do processo de *unmixing* (do inglês). Caberia, alternativamente, o neologismo *desmixagem*.

urbana, as cidades se tornaram metrópoles, as metrópoles se tornaram megalópoles e as marcas do homem na superfície física e em toda a dinâmica que ela registra em sua estrutura, foram registradas pelos sensores a bordo dos satélites.

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

1.7. Materiais, Métodos e Análise

A base metodológica concentra-se na aplicação e análise do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) em um conjunto de imagens Landsat entre os anos de 1986 e 2015 que recobrem a RMSP, a partir dos resultados traçar um modelo de análise das mudanças do uso do solo associadas à produção habitacional. Para tanto é utilizado:

- 1) Processamento Digital de Imagens no software ENVI 5.1 para a aplicação do MLME;
- 2) Construção das curvas para caracterização espectral da RMSP a partir do sensor EOS/Hyperion, utilizando o software ArcGIS 10.1;
- 3) Análise geoestatística sobre os dados pontuais de lançamentos imobiliários, limites de favelas e dados censitários entre 1991 e 2010¹⁷ (IBGE, 1991 2000 e 2010);
- 4) Tabulação e análise estatística dos dados extraídos de todas as fontes;
- 5) Elaboração de gráficos, textos explicativos e mapas a partir dos resultados das análises.

1.7.1. Detalhamento do material utilizado

A metodologia empregada e os procedimentos técnicos adotados baseiam-se no processamento e análise de três bases de dados principais: A série temporal e georeferenciada dos pontos correspondentes aos lançamentos imobiliários residenciais na RMSP entre os anos de 1985 e 2015; O mapeamento das favelas no Município de São Paulo e a série histórica de imagens do satélite Landsat, correspondentes ao mesmo

¹⁷ Este período se refere apenas aos polígonos dos setores censitários, correspondentes a 1991, 2000 e 2010, enquanto a base de imagens vai de 1985 até 2015, compreendendo, portanto, também estes registros.

período dos lançamentos imobiliários, para geração das proporções de mistura espectral e sua evolução espaço-temporal. De forma complementar São utilizados os resultados dos censos por setores censitários dos anos de 1991, 2000 e 2010. Detalhadamente:

1) Quanto aos dados de lançamentos imobiliários residenciais verticais:

Consistem em um arquivo de pontos georeferenciados em formato *shapefile* contendo um total de 15.133 registros organizados pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM/EMBRAESP), com uma série de atributos associados a cada ponto, incluindo data de lançamento, valor do m² atualizado, quantidade de andares do empreendimento, entre outros;

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

Compreende o arquivo vetorial fornecido pela prefeitura municipal de São Paulo através do HABISP¹⁸, contendo as geometrias localizadas e informações sobre nomenclatura das favelas, data de surgimento, entre outras;

3) Quanto aos dados de Sensoriamento remoto:

São a série temporal de imagens Landsat, incluindo os sensores TM (Landsat 4 e 5), ETM+ (Landsat 7) e OLI (Landsat 8), adquiridas via EROS data center (NASA) e EarthExplorer (USGS), as quais são:

TABELA 1: IMAGENS LANDSAT UTILIZADAS NA TESE

Imagem	Satélite	Sensor	Aquisição		
			Data	Hora	Elevação solar
219076 & 219077 +1986218XXX04	Landsat 5	TM	06/08/1986	12:26 PM	33.22
21976 & 21977 + 1989298XXX03	Landsat 4	TM	25/10/1989	12:37 PM	56.66
219076 & 219077 +2000121EDC00	Landsat 7	ETM+	30/04/2000	12:57 PM	40.90
219076 & 219077 +2005214EDC00	Landsat 7	ETM+	02/08/2005	12:53 PM	36.97
219076 & 219077 +2006257CUB01	Landsat 5	TM	14/09/2006 ¹⁹	12:58 PM	49.90
219076 & 219077 +2010108CUB01	Landsat 5	TM	18/04/2010	12:55 PM	43.39
219076 & 219077 +2015266LGN00	Landsat 8	OLI	23/09/2015	13:04 PM	53.94

¹⁸ Os dados são obtidos via download direto pelo site do HABISP (atualmente integrado ao sistema conhecido como GeoSAMPa). Mais informações em:

http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx

¹⁹ O uso da imagem do ano de 2006 é para validação do ano de 2005, a qual apresenta “stripes” devido ao mau funcionamento do sensor do Landsat 7 no período, chamado de “SLC-OFF”

Outras bases de dados, como por exemplo os dados censitários disponibilizados pelo IBGE, incluindo os dados de 1991, 2000 e 2010, também são utilizadas na elaboração desta pesquisa (conforme a Figura 8).

FIGURA 8: DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL E SOBREPOSIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA TESE. ELABORADO PELO AUTOR.

O desenvolvimento e aplicação dos procedimentos técnicos referentes à metodologia seguem a sequência representada no esquema conceitual da Figura 9 a seguir:

FIGURA 9: REPRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO MODELO ANALÍTICO. ELABORADO PELO AUTOR.

Capítulo 2: A expressão espaço-temporal do problema

Introdução ao capítulo

Este capítulo faz uma breve síntese da abordagem conceitual da Geografia nos estudos sobre urbanização e as relações entre este tema e o contexto geral da problemática urbana.

Na sequência é apresentada uma análise da evolução do preço da terra em função da produção habitacional no período histórico mais atual da RMSP, entre 1985 e 2015, usando como parâmetros o mapeamento dos empreendimentos imobiliários lançados no período.

Por fim, o capítulo mostra a face “moderna” da RMSP geralmente ilustrada na alta verticalização atrelada à imagem de metrópole global. É construída uma representação da evolução espaço-temporal desse *skyline*, resultado do acúmulo histórico de períodos diferenciados expresso no espaço geográfico.

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

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

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

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

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

Com este propósito - a conquista da sustentabilidade – surgem mais marcadamente as considerações de vários pesquisadores, a partir da década de 1992, egressos de diversos ramos científicos, procurando explicar as possíveis relações, mediações, contradições e oposições, entre os componentes que contextualizam natureza e sociedade. No espaço urbano não foi diferente.

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

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

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

sem uma consideração sistêmica de seu caráter enquanto processo (Pedrassoli, 2008), reprodução capitalista do espaço geográfico, nomeada de urbanização.

Maricato (2003) destaca:

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

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

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

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

Nesse período de 20 anos a população brasileira teve um aumento de cerca de 20% enquanto a população residente nos aglomerados subnormais ou favelas aumentou na ordem de 61% (IBGE 1991, 2010), conforme o Gráfico 3:

GRÁFICO 3: CRESCIMENTO PERCENTUAL DE POPULAÇÃO EM FAVELAS EM RELAÇÃO À POPULAÇÃO TOTAL NAS DUAS ÚLTIMAS DÉCADAS NO BRASIL – ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO IBGE (1991, 2000 E 2010)

Somente na Região Metropolitana de São Paulo o número de moradores em favelas supera os 2,2 milhões de pessoas, o equivalente a 18,9 % da população total (IBGE, 2010). Esses patamares descompassados de crescimento da população urbana e de crescimento da precariedade urbana é uma característica comum a todas as grandes cidades brasileiras e as suas regiões metropolitanas e um indicador que revela não apenas a precarização da moradia, nesse exemplo específico, mas revela também o processo de urbanização perverso, seguido de forte irregularidade (Pasternak, 2010).

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

Para efeito de entendimento, entre 1985 e 2013, a Região Metropolitana de São Paulo acumulou um total de 16.935 novos lançamentos imobiliários. Em 2009 o valor médio do m² atingiu o maior valor já registrado na série considerada, sendo que a partir daí o

valor médio do m² retoma em um ritmo superior de incremento do que a quantidade de lançamentos por período. O Gráfico 4 mostra esse comportamento:

GRÁFICO 4: AUMENTO BRUTO ACUMULADO DO VALOR DO M² EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE LANÇAMENTOS NA RMSP. (VALORES HISTÓRICOS CORRIGIDOS) – ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO CEM.

Considerando a última década, podemos observar um aumento dos preços do m² excepcionalmente maior a partir 2009. Tendo como base a política habitacional nacional podemos associar tal supervalorização ao lançamento do programa *Minha Casa, Minha Vida*²⁰ (MCMV), o qual catapultou em algumas áreas o valor dos imóveis em função da procura elevada e do acesso ao crédito.

Ao analisarmos os lançamentos imobiliários residenciais na RMSP distribuídos em períodos tri-anuais constatamos, ao somarmos apenas os lançamentos posteriores do MCMV, entre 2009 e 2011, que estes representam um valor superior a 16% de todos os lançamentos acumulados na série histórica de 1985 a 2013 e que estas porcentagens apresentam tendência de crescimento a partir do início da década de 2000, como podemos ver no Gráfico 3 a seguir. Se considerarmos os lançamentos entre 2009 e 2013 a porcentagem em relação ao total chega a aproximadamente 27%:

²⁰ É um programa habitacional do Governo Federal do Brasil, anunciado no dia 25 de março de 2009, que consiste no financiamento da habitação.

GRÁFICO 5: SÉRIE HISTÓRICA DE LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS RESIDENCIAIS AGREGADOS EM PERÍODOS TRI-ANUAIS. ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO CEM.

Contudo, o valor do acesso à terra continua sendo um dos fatores definidores do tipo de ocupação na RMSP, e reflete a lógica espacial entre centro e periferia. Se considerarmos a média do aumento acumulado dos valores do m^2 em sua expressão espacial, verificamos que as áreas centrais do Município de São Paulo ainda representam os maiores incrementos de valor na série histórica. Não obstante, novos eixos de valorização imobiliária se apresentam no contexto dos 25 anos considerados no cálculo, conformando uma distribuição radial a partir do centro, com uma visível tendência de aumento dos valores médios do m^2 em quatro eixos principais: o eixo direcional partindo da cidade de São Paulo para Osasco e Santana do Parnaíba, o eixo direcional sentido Cotia, a Região do ABC paulista e a verticalização em direção à Zona Leste do município de São Paulo.

Cartograficamente, é possível a representação desse processo utilizando os valores médios dos preços dos lançamentos imobiliários verticais, mapeando o aumento médio entre a base e o limite da série histórica. Pérez Machado (2003) propõe a metodologia denominada de cálculo de “isotimas”. Segundo o autor, o termo isotimas é originado do radical grego *ektimo*, que equivale a avaliar, apreciar, calcular, estimar ou reconhecer, e sua derivação *timi*, que indica valor, preço ou custo. Esse conceito, em linhas gerais, traduz a transposição da aplicação de mapas de isolinhas, tradicionalmente utilizados para a representação espacial de fenômenos naturais, neste caso aplicado ao preço da terra. Para

tanto o autor aponta que são necessárias as bases cartográficas pontuais dos valores²¹ do preço da terra na área de estudo e a partir destes aplica-se o processo de interpolação para a estimativa da superfície contínua de valores do preço da terra.

Aplicando a metodologia de Pérez Machado aos lançamentos imobiliários verticais, fizemos o cálculo da diferença média de valores de venda²² por m² por setores censitários em 1985 e 2013, a calculamos a diferença. A partir do setor censitário extraímos o centroide de cada um deles e aplicamos a interpolação dos valores pelo método de *krigagem*²³ universal, conforme o Mapa 4:

²¹ Na metodologia Pérez Machado aponta a utilização dos valores “venais”, os quais são o valor definido poder público, de maneira mais simples, é o valor sobre o qual a prefeitura faz o cálculo de cobrança do Imposto Predial Urbano. Não obstante o autor aponta que o “valor de mercado”, que é aquele referente ao valor de venda dos imóveis na realidade e tende, em geral, a representar uma situação mais precisa, também podem ser utilizados. Podemos citar também o “valor de construção” que se refere ao valor total de insumos e mão de obra para a construção da unidade habitacional. Para esta tese, em função da base de dados, todos os mapas de valores apresentados utilizam o “valor de mercado” como referência.

²² Valores praticados pelas incorporadoras, os quais refletem o mercado. Além disso os valores estão corrigidos pela inflação no período, o que torna os números comparáveis.

²³ *Krigagem* (forma como o nome é utilizado no Brasil) pode ser entendido como uma *predição linear* ou uma forma da Inferência bayesiana. Parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados. A técnica assume que os dados recolhidos de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço. A origem do nome se deve ao criador do método, o engenheiro de minas Dani Gerdaus Krige.

MAPA 4: ISOTIMAS DO AUMENTO MÉDIO ACUMULADO DO VALOR DO M² (VALORES HISTÓRICOS CORRIGIDOS) E VETORES DE VALORIZAÇÃO IMOBILIÁRIA (1985 A 2013, CONSIDERANDO DATAS DE ENTREGA PREVISTAS). ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE IBGE (2010) E CEM.

Enquanto o mercado imobiliário acumula aumentos significativos nos lucros, conforme os dados, e investe em novas frentes de expansão na metrópole paulista, o outro dipolo dessa equação permanece como uma característica contraditória frente a aparente valorização do espaço que os lançamentos imobiliários apresentam. Contraditória no sentido de que o espaço acumula riqueza e valor, mas autoexplicativa e claramente correlacionada num outro sentido em que esse acúmulo de valor exige a manutenção de uma massa de espaço e gente desvalorizada.

Nessa lógica os espaços periféricos da metrópole ainda desvalorizados são delineados por processos de produção e reprodução do espaço geográfico calcados na inadequação habitacional, reflexo local e regional de processos multi escalares. As favelas estão à margem da valorização do mercado imobiliário, mas sob a ameaça da crescente valorização destas áreas pela saturação de áreas centrais, conforme o Mapa 5:

MAPA 5: LOCALIZAÇÃO DAS FAVELAS DE SÃO PAULO EM RELAÇÃO À VALORIZAÇÃO IMOBILIÁRIA ACUMULADA AGREGADA POR DISTRITOS DA RMSP. ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO IBGE (2010), CEM E HABISP/PMSP (1985 A 2013 CONSIDERANDO APENAS A DATA DE LANÇAMENTO). ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

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

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

Na dimensão espaço-temporal o processo aqui deduzido torna-se mais inteligível e evidente. Consideremos a densidade acumulada de lançamentos imobiliários (lançamentos por Km² em cada distrito da RMSP) entre 1985 e 1990, conforme o mapa 6 a seguir:

MAPA 6: DENSIDADE DE LANÇAMENTOS POR DISTRITO NA RMSP ENTRE 1985 E 1990. ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DE CEM, HABISP E IBGE (2010). ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Os distritos de Moema, Jardim Paulista e Vila Mariana tiveram a maior concentração de lançamentos imobiliários no período. Essas áreas são regiões do município de São Paulo de altíssima valorização acumulada do m² (Mapas 5 e 6).

Não obstante, na década subsequente, a densidade de lançamentos imobiliários residenciais nesses mesmos distritos, especialmente no distrito de Moema que foi o local com maior densidade na década de 1980, apresentou diminuição enquanto as áreas do entorno imediato apresentaram uma elevação na densidade, conforme o Mapa 7:

MAPA 7: DENSIDADE DE LANÇAMENTOS POR DISTRITO NA RMSP ENTRE 1990 E 2000. ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DE CEM, HABISP E IBGE (2010). ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

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

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

assim como os autores do artigo citado, o distrito de Itaim Bibi como o distrito de maior concentração de lançamentos no período, além disso, essas áreas de alta valorização apresentam crescimento demográfico positivo, mesmo em áreas centralizadas e consolidadas, o que podemos associar aos processos de adensamento e verticalização.

Mesmo em áreas distantes e mais pobres da cidade o mercado encontrou nichos para lançamentos voltados para população de rendimento mais elevado. Alcântara Filho (2009) analisando o comportamento do mercado imobiliário de alto padrão²⁵ em São Paulo entre 2003 e 2008 aponta que aproximadamente 80% dos lançamentos imobiliários enquadram-se entre categorias de padrão entre média e altíssima. Em áreas como o Itaim Bibi esses valores são ainda mais significativos, como vemos no gráfico 6:

GRÁFICO 6: UNIDADES LANÇADAS POR PADRÃO NO ITAIM BIBI (2004 - 2008). EMBRAESP E ALCÂNTARA FILHO, 2009.

A região do Grande ABC apresenta significativo aumento na densidade de lançamentos imobiliários residenciais nesse período, enquanto o processo de ocupação mais denso na área do centro expandido da cidade de São Paulo se mantém. Pretendemos caracterizar este fenômeno, associado aos dados de valorização imobiliária no período, como a tendência de novos vetores de especulação imobiliária na RMSP.

É nesse contexto, que relaciona a reprodução do espaço pelas forças do capital, que a presente pesquisa busca entender e correlacionar as mudanças no uso e ocupação do solo da RMSP, sob a perspectiva diatônica da especulação imobiliária e da

(apesar de compô-los ao final do processo). Esse cadastro oficial, que no caso do município de São Paulo teve origem com o chamado TPCL (cuja sigla refere-se aos impostos previstos: Territorial, Predial, Conservação e Limpeza), pode ser entendido detalhadamente em sua origem e evolução na tese de doutorado de Pérez Machado, 2000. (Referência presente na bibliografia).

²⁵ O autor usa uma definição dos padrões baseado no preço do m² (IPCA), sendo altíssimo padrão: preço entre R\$7.000,00 a R\$20.000,00; alto padrão: preços entre R\$4.500,00 e R\$6.999,00; médio-alto padrão: preço entre R\$3.300,00 e R\$4.499,00; médio padrão: preços entre R\$2.200,00 e R\$3.299,00; baixo padrão: preços entre 0 e R\$2.199,00.

moradia precária, através de análise espacial e modelos de mistura espectral em Sensoriamento Remoto.

2.3. A espacialidade do processo de verticalização na RMSP na perspectiva dos lançamentos imobiliários

O *skyline* de São Paulo impressiona. Os dados coletados pela *Emporis*²⁶ aponta a cidade como o sétimo maior *skyline* do mundo com mais de 5.700 edifícios cadastrados para o ranking, com alturas que se aproximam dos 190 metros. A Figura 10 ilustra o *skyline* de São Paulo:

FIGURA 10: PARTE DO SKYLINE DE SÃO PAULO.

FONTE: [HTTP://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LIST_OF_TALLEST_BUILDINGS_IN_SAO_PAULO](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_in_Sao_Paulo)

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

A constatação é simples, prédios mais altos, com unidades individuais cada vez menores. Na RMSP, entre 1985 a 1990, quando foram lançados, aproximadamente,

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

20.000 unidades residenciais por ano, a área útil média das unidades era de 85,40 m². Na década seguinte, essa média correspondeu a 70,70 m² enquanto o número anual de unidades residenciais lançadas por ano foi de quase 50 mil unidades. Uma diminuição média da área da unidade de, aproximadamente, 20% enquanto o aumento do número de lançamentos aumentou de forma expressiva no mesmo período considerando todos os padrões de imóveis lançados nas respectivas décadas para a composição do cálculo.

Entre 2001 e 2008, foram lançadas aproximadamente 40 mil unidades por ano com uma área útil média por unidade de 91 m². Após o lançamento do PMCMV, entre 2009 e 2013, a área útil média dos apartamentos foi de 84,03 m² e o número de unidades lançadas por ano quase dobrou em relação ao período anterior chegando a aproximadamente 61 mil, mesmo sendo este último período igual composto por apenas 5 anos. Essa evolução é ilustrada no Gráfico 7:

GRÁFICO 7: ÁREAS MÉDIAS DAS UNIDADES HABITACIONAIS LANÇADAS POR PERÍODOS E QUANTIDADES DE LANÇAMENTOS. FONTE: CEM, 2015. ORGANIZADO PELO AUTOR.

Há também um aumento concomitante entre o número médio de andares dos empreendimentos e a quantidade de novos lançamentos, especialmente a partir de 2010. Necessariamente essa conjuntura implica no aumento da densidade construtiva em algumas áreas da cidade, mas não necessariamente no aumento da densidade populacional. O Gráfico 8 mostra o processo na série temporal:

GRÁFICO 8: MÉDIA ANUAL DE LANÇAMENTO DE EMPREENDIMENTOS E MÉDIA ANUAL DE ANDARES POR EMPREENDIMENTO. FONTE: CEM, 2015. ORGANIZADO PELO AUTOR.

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

Para a visualização espacial dos dados aplicamos a extrusão²⁷ dos acumulados pontuais dos lançamentos imobiliários na RMSP. Em cada ponto ponderamos a extensão da extrusão vertical em função do número de pavimentos do empreendimento, assim buscando uma aproximação da ideia de *skyline* acumulado no tempo para a RMSP entre 1985 e 2015.

Como resultado foi gerada uma composição de mapas e perfis longitudinais da extrusão dos pontos, como podemos observar no Mapa 9²⁸:

²⁷ A extrusão foi feita utilizando o software ArcScene, componente do pacote ArcGIS. A extrusão define uma linha imaginária com ângulo de 90 graus em relação a a superfície a partir do ponto de origem, sendo que a extensão dessa linha é função de dados numérico previamente inserido na base de dados do arquivo vetorial.

²⁸ A nomenclatura “mapa” adotada para os Mapas 9 e 10 não se referem a definição estrita do conceito de mapa, haja visto que os resultados apresentados aqui têm distorções de escala por conta da inclinação do plano.

Visadas do *skyline* acumulado: 1985- 2015

MAPA 9: DISTRIBUIÇÃO TRIDIMENSIONAL DOS LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS RESIDENCIAIS ACUMULADOS DE 1985 A 2015 (EXTRUSÃO DOS PONTOS PONDERADOS PELO NÚMERO DE ANDARES) E AS VISADAS DO *SKYLINE* ACUMULADO PELO MESMO PROCESSO NO MESMO PERÍODO.

A contribuição periódica de verticalização e adensamento reestrutura o espaço urbano como reflexo de sua produção histórica, política e social. É o resultado do projeto de cidade que se escolheu, é também o resultado das mudanças desse projeto ao longo do tempo e pode traduzir em sua forma atual e ao longo do tempo as forças que produzem, muitas vezes contraditoriamente, a Região Metropolitana de São Paulo. O Mapa 10 mostra a

distribuição da verticalização dos empreendimentos imobiliários residenciais por períodos, entre 1985 e 2011:

MAPA 10: DISTRIBUIÇÃO TRIDIMENSIONAL DOS LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS RESIDENCIAIS ACUMULADOS DE 1985 1990, 1991 A 2000, 2001 A 2008 E 2009 A 2015. (EXTRUSÃO DOS PONTOS PONDERADOS PELO NÚMERO DE ANDARES) E AS VISADAS DO SKYLINE ACUMULADO.

Capítulo 3: A técnica

Introdução ao capítulo

Neste capítulo são abordados os conceitos básicos de Sensoriamento Remoto e as principais características de seus produtos, com especial atenção ao sensoriamento remoto aplicado aos estudos urbanos.

Na segunda parte do capítulo são definidos o conceito de mistura espectral e a ideia e funcionamento básico do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). A partir daí são analisados diversos estudos de caso de uso do MLME para mapeamento em diversas áreas de aplicação, tais como floresta e agricultura, e são descritos com maior profundidade os trabalhos que aplicaram o MLME para mapeamento de fenômenos urbanos.

Por fim é introduzida a ideia do uso dos membros de referência globais no MLME (Small & Millesi, 2013), além das diferenças e vantagens do MLME em relação a outros métodos de classificação do uso do solo a partir de imagens de satélite, bem como é definida uma abordagem geográfica do uso das imagens orbitais e do MLME.

3.1. A definição de Sensoriamento Remoto (SR)

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

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

Basicamente as imagens geradas pelos sensores tem quatro resoluções distintas:

- a) Espacial: está associada ao tamanho das feições que podem ser visivelmente diferenciadas do seu entorno numa imagem;

- b) Temporal: refere-se ao tempo cíclico de coleta de imagens por um determinado sensor sobre uma mesma área;
- c) Radiométrica: é a amplitude que um *pixel*²⁹ em uma determinada imagem pode assumir. Quanto mais valores possíveis de serem registrados num pixel, maior esta resolução;
- d) Espectral: descreve quais comprimentos de ondas, separados pelas imagens nas chamadas “bandas espectrais”, uma imagem é capaz de registrar, podendo subdividir um trecho do espectro eletromagnético em várias subpartes referentes a intervalos de comprimentos de ondas específicos, sendo estes comprimentos de onda visíveis pelo olho humano ou mesmo fora desta faixa visível.

A expressão Sensoriamento Remoto surgiu nos anos 60 (Jensen, 2009) e se refere à utilização de sensores capazes de captar a energia eletromagnética total ou parcialmente refletida ou emitida, por objetos e feições sobre a superfície terrestre, como construções (casas, edifícios, estradas, etc.), rochas, rios, matas e muitas outras.

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

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

“Os progressos técnicos que, por intermédio dos satélites, permitem a fotografia do planeta, permitem-nos uma visão empírica da totalidade dos objetos instalados na face da Terra. Como as fotografias se sucedem em intervalos regulares³⁰, obtemos, assim, o retrato da própria evolução do processo de ocupação da crosta terrestre. A simultaneidade retratada é fato verdadeiramente novo e revolucionário para o conhecimento do real e o correspondente enfoque das ciências do homem, alterando-lhes, assim, os paradigmas” (SANTOS, 2008).

²⁹ É a unidade fundamental de uma imagem. A resolução radiométrica é medida num exponencial de base 2: por exemplo, uma imagem de 8 bits equivale a 2^8 , ou seja, cada pixel consegue registrar 256 valores diferentes.

³⁰ Características de resolução temporal

3.2. O sensoriamento remoto do espaço urbano

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

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

Apesar da evidente qualidade de dados para estudos urbanos das imagens de altíssima resolução, algumas pesquisas pioneiras se utilizaram de sensores muito conhecidos como o Landsat e são referências básicas. Luchiari (2008) destaca os trabalhos realizados na Região Metropolitana de São Paulo por Foresti, Niero e Sanches (1981) com imagens Landsat de 1973, 1975, 1977 e 1978, que permitiram a verificação de áreas de expansão urbana, além do estabelecimento de classes de uso e revestimento da terra.

Lombardo (1984) também é um dos autores pioneiros ao utilizar dados do sensor MSS a bordo do Landsat 3 para o mapeamento das ilhas de calor na metrópole paulistana. Em seus trabalhos o faz o uso conjunto das classes de uso do solo a partir das imagens Landsat e dos dados de temperatura de superfície obtidos pelo satélite NOAA³¹ 7, verificando a maior temperatura de superfície nas áreas verticalizadas e setores industriais do município. Outros autores implementaram o uso de imagens Landsat, outras de média resolução espacial, para estudos na RMSP entre a década de 1980 e os dias atuais. Percebe-se que o uso de imagens com resolução espacial moderada vem constantemente se aprimorando e não teve seu uso suprimido pelo advento das imagens orbitais de altíssima resolução espacial. Isto reflete um dos pilares básicos do uso do Sensoriamento Remoto: a escolha do tipo de imagem a ser utilizada é função do problema ou processo a ser analisado, e não o oposto.

Um ponto importante então é a definição da aplicação, que envolve escala de detalhes, mas também a escala de visualização do conjunto. Pérez Machado (2012) lembra que:

³¹ *National Oceanic and Atmospheric Administration*

[...]“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” [...] (página 18).

Somado a isso, as imagens de média resolução como as do Landsat representam baixo custo e acessibilidade na aquisição de dados, tornando-o atrativo para o desenvolvimento de metodologias de estudos urbanos que possam utilizar estes sensores no desenvolvimento de processos para uso destas imagens em áreas urbanas nos dias atuais.

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

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

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

A dinâmica de produção e reprodução do espaço urbano tem características que tornam seu estudo, avaliação e monitoramento, processos com necessidades específicas na escolha de produtos de sensoriamento remoto destinado a estes fins. Existem em

sensoriamento remoto quatro tipos de resolução que devem ser consideradas no uso de seus produtos: a resolução espacial; a resolução espectral; a resolução temporal; e a resolução radiométrica (Jensen 2009, Lillesand & Kieffer, 2000). Destas, a configuração das resoluções espacial, espectral e temporal são essenciais para entendimento da dinâmica urbana.

3.3. Considerações sobre o uso das resoluções de SR em ambientes urbanos:

3.3.1. O tempo

Os fenômenos urbanos/periurbanos ocorrem em um determinado ciclo de desenvolvimento observável (Jensen, 2009) (analogicamente ao ciclo fenológico de uma planta, apenas para uma função didática) como é exemplificado na Figura 11. Este tempo é variável e em muitos casos tem especificidades, mas traz a primeira constatação importante referente ao uso de SR nas áreas urbanas: para poder analisar os fenômenos urbanos através de SR é preciso compreender o funcionamento dos processos e estruturas urbanas no tempo:

FIGURA 11: ACIMA, TERRENOS LIMPOS PARA LOTEAMENTO EM SAN DIEGO E RESIDÊNCIAS EM DIFERENTES ETAPAS DE CONSTRUÇÃO EM DENVER. ABAIXO, CONSTRUÇÃO DE EMPREENDIMENTO IMOBILIÁRIO ENTRE 2004 E 2007/TABOÃO DA SERRA, RMSP. JENSEN (2009) E PEDRASSOLI (2011). ORG. DO AUTOR.

Existem diferentes sensores com diferentes resoluções temporais. A escolha do tempo ideal coleta de informação sobre uma área é função do tempo de recorrência ou de desenvolvimento do fenômeno que se quer observar. As imagens coletadas pelo satélite Landsat, por exemplo, têm um tempo de revisita de 16 dias, e já vem coletando informações desde 1973, o que torna a escala temporal de análise em áreas urbanas com este sensor muito ampla³². Atualmente é possível trabalhar até mesmo com resolução temporal sob encomenda, como é o caso das plataformas sub-orbitais ou uso de veículos aéreos não tripulados (VANTS), os quais dependendo da área imageada podem ter revisita diária (Pedrassoli, 2011). Essa Tecnologia também já está disponível em sensores orbitais que funcionam em forma de constelação de satélites, como por exemplo o sistema Italiano COSMO SkyMed³³.

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

3.3.2. O espaço

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

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

³² A resolução temporal nos primeiros satélites da série (1, 2 e 3) era de 18 dias, além disso estes satélites possuíam o sensor MSS cuja resolução temporal era de 80m. O Landsat 4 e 5 trouxeram acoplado o novo sensor TM (mas ainda manteve a bordo também o antecessor MSS), e a partir daí a resolução temporal foi alterada para 16 dias (com mudança na altura da órbita) e a resolução espacial do sensor TM atingiu 30m. O Landsat 6 traz o novo sensor TM, com alterações na resolução espectral, mas este mantém as mesmas características temporais, assim como os sensores subsequentes (ETM+ no Landsat 7 e OLI no Landsat 8). O Landsat 8 incorpora novas bandas espectrais e há um aumento considerável na resolução radiométrica dos dados, de 8 para 11 bits.

³³ Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation. Seus dados são utilizados tanto para fins civis quanto militares.

De forma geral quanto maior é a resolução espacial de uma determinada imagem maior é a quantidade de informação presente e envolve a proporcional complexidade na interpretação, como compara a Figura 12:

FIGURA 12: PARQUE DO IBIRAPUERA NUMA IMAGEM GEOEYE COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 0,40 M E NUMA IMAGEM LANDSAT COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 30 M. GOOGLE MAPS E NASA (2014), ORG. DO AUTOR.

O critério para escolha da resolução espacial adequada para uso em áreas urbanas se relaciona ao tipo de informação que se deseja extrair. Por exemplo, assentamentos precários, conhecidos popularmente como favelas, em geral necessitam de uma resolução espacial muito elevada para análise visual, visto que o adensamento das construções é alto, de difícil delimitação entre uma unidade habitacional e outra e, além disso, as construções são pequenas, exigindo um tamanho de pixel que possibilite a observação de laterais de edificações pequenas, muitas vezes inferiores a 2,5 m e construídas a partir de materiais muito diversificados, gerando um padrão de reflectância³⁴ complexo (Pedrassoli, 2011).

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

³⁴ Reflectância é uma função da porção da energia emitida pelo sol que chega até a superfície terrestre e interage com os objetos nela existentes. Da energia total que chega, quanto maior for a parcela dessa energia que é refletida pelo objeto que a recebeu, dizemos que maior é a reflectância desse objeto. Esse conceito será melhor explorado em tópicos posteriores.

3.3.3. O espectro

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

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

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

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

3.3.4. A imagem orbital como conceito geográfico

As imagens de satélite registram em seus pixels o acúmulo desigual e concentrado dos tempos no espaço geográfico. Desigual, pois registra em números digitais ao longo do tempo e do espaço, captando as diferenças, rupturas e mudanças devido ao comportamento espectral diverso dos alvos.

Concentrado, pois traz a clareza das diferenças espectrométricas entre os alvos naturais não alterados, alvos que estão em processo de transformação ou em estado natural inalterados, e o que é obra do homem.

O acúmulo é registrado em quatro diferentes dimensões: ciclicidade, mudança, empilhamento e alteração:

A ciclicidade é uma das características básicas das áreas com vegetação por exemplo, cuja resposta espectral e em consequência a informação registrada nas imagens, tem resultados variáveis ao longo do tempo e se repetem ao longo de períodos intermediários. Esse processo é similar e intimamente associado ao que os climatologistas geográficos chamam de “sucessão habitual dos tempos” em que a vegetação muda seu espectro e repete sua mudança em intervalos regulares em função de sua fenologia e do clima.

A mudança é associada a ruptura no espaço geográfico. Mudanças nos padrões de ciclicidade, por exemplo, podem representar rupturas no sistema terrestre ora imageado. As transformações drásticas no uso do solo são bons exemplos de mudança, onde diferentes sistemas são sobrepostos por um determinado período, numa fase de transição, até a completa modificação do padrão estrutural e da ciclicidade de uma determinada região, como derrubadas de florestas e posterior ocupação urbana em todo o mundo, ou, para exemplificar situações mais extremas, o avanço da soja sobre a região da Amazônia legal. Além disso, as mudanças são contínuas e tendem a não voltar ao seu estado original, e isso diferencia a mudança da ciclicidade.

O empilhamento é o resultado do acúmulo diferenciado de mudanças sobre uma determinada porção do espaço. Áreas urbanas consolidadas e densamente urbanizadas, as quais já causaram profunda mudança na ciclicidade natural através de um processo de ruptura no espaço geográfico, tendem ao empilhamento de estruturas. Esse comportamento não apresenta mais a lógica da ciclicidade dos espaços naturais e ainda tem um comportamento temporal cumulativo.

O empilhamento obedece às lógicas cíclicas do mercado, da economia e da política e representa a fronteira entre os processos cíclicos e os processos cumulativos. Ainda que guarde em si um processo de diferenciação dos lugares, assim como os processos cíclicos naturais, suas causas e especialmente seus objetivos são diferentes: processos cíclicos naturais diferenciam-se no contínuo do espaço geográfico pela disponibilidade do substrato e da sucessão dos climas que o definem. O empilhamento antrópico dos tempos no espaço geográfico se define pelos investimentos que permeiam o espaço e objetiva a valorização, a

conquista, o planejamento ou qualquer outra ação social. Assim, representa o domínio do espaço em n dimensões.

A alteração é a linha transversal que conecta o espaço geográfico do passado com sua forma presente e dá indícios de cenários futuros. Rupturas geram mudanças, e no espaço urbano essa alteração num determinado intervalo de tempo é chave de leitura para entender a configuração atual desse espaço. As imagens de satélite carregam em seus pixels, de forma indireta, esses dados.

3.4. Mistura Espectral

Todos os elementos que compõe a superfície terrestre interagem com a energia proveniente do Sol³⁵, definida em termos físicos como Irradiância Solar Incidente, em todos os diferentes comprimentos de ondas que formam o espectro eletromagnético. Esse é o princípio fundamental de funcionamento do Sensoriamento Remoto.

O registro desta informação em uma imagem é o produto básico de um satélite imageador. No entanto imagens são um modelo simplificado de representação do contínuo da realidade física observada, e para isso as imagens são constituídas de uma unidade fundamental chamada “*pixel*”³⁶, que corresponde a menor unidade componente da imagem (figura 13). O pixel registra na forma de um número a parte da energia proveniente da fonte primária que interagiu com o objeto na superfície imageada e foi refletida, sendo possível seu registro pelo sensor a bordo de um satélite, por exemplo.

³⁵ A energia com a qual os elementos da superfície terrestre interagem podem também ser provenientes de fontes não naturais, por exemplo, os sensores orbitais do tipo RADAR, os quais produzem seu próprio pulso de energia para interação com os “alvos”. Neste caso, estamos falando de sensores ativos, enquanto que aqueles que registram as informações utilizando a energia proveniente do Sol estamos falando de sensores passivos.

³⁶ Do inglês: *Picture Cell* ou *Picture Element*

FIGURA 13: OS PIXELS DO PARQUE IBIRAPUERA EM SÃO PAULO EM UMA IMAGEM LANDSAT DE 01/09/2013. ADAPTADO DE NASA, 2013 (GROWTH OF SÃO PAULO, BRAZIL, JULY 9, 2014 - [HTTP://EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV/IOTD/VIEW.PHP?ID=83987](http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83987)).

Esse registro numérico, o qual dá o valor de representação do pixel na imagem, recobre uma determinada área da superfície terrestre que definimos como Campo de Visada Instantânea³⁷ (IFOV), e, portanto o valor registrado referente a um pixel em uma imagem é na verdade uma média integrada dos valores da energia refletida por um conjunto de elementos da superfície terrestre, com diferentes interações com esta ao longo do espectro eletromagnético, e que formam a área imageada e registrada num determinado pixel. Esse registro da complexidade do comportamento espectral dos alvos em uma média única num pixel é chamado de Mistura Espectral, e dá a base para o modelo de mistura espectral³⁸.

A mistura pode acontecer de duas maneiras: de modo linear ou não linear. O primeiro caso considera que a mistura de espectro registrada é uma combinação linear dos elementos presentes no IFOV ponderados por suas respectivas proporções. O segundo caso é mais complexo, considera que há uma interação da radiância de vários materiais distintos para composição do valor de determinado pixel. (Pérez Machado & Small, 2012). Se cada fóton proveniente da fonte de energia primária interage com um único tipo de cobertura do solo no

³⁷ Originalmente: *Instantaneous Field of View*

³⁸ Em alguns trabalhos aparece a expressão “*mixel*”, referente a mistura espectral que compõe o *pixel* não puro

IFOV do sensor, a mistura pode ser considerada linear e o espectro modelado neste caso pode ser considerado como a soma linear das proporções do espectro de cada tipo de cobertura do solo presente multiplicado pela fração de superfície ao qual corresponde (Settle & Drake, 1993; Adams *et al.*, 1995).

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

3.5. Modelo Linear de Mistura Espectral

O Modelo Linear de Mistura Espectral representa as medições de radiância como uma mistura linear dos **Componentes**³⁹ refletidas por diferentes materiais, e então captadas pelo IFOV do sensor (Small & Millesi, 2013), assumindo que os componentes da mistura são a maior fonte da variação espectral em uma cena (Shimabukuro, 1987; Toledo & Shimabukuro, 2005).

Vale ressaltar que a mistura espectral pode ocorrer tanto de forma linear quanto não linear. O cálculo e representação de processos de mistura não linear são mais complexos *“porque neste tipo de mistura a radiância interage com mais de um material podendo resultar em múltiplas interações”* (Kawakubo, 2010). Esse tipo de mistura ocorre com mais frequência em bandas espectrais de alta absorção e em combinações entre materiais com forte absorção de radiação com superfícies translúcidas. Um exemplo prático é quando jogamos água sobre uma superfície de concreto, e o resultado é o escurecimento, mesmo com a transparência da água, ocorrendo uma mistura espectral não linear.

Não obstante, a maior parte dos tipos de uso e ocupação do solo registrados nos pixels das imagens orbitais apresentam mistura espectral linear, cuja simplicidade proporciona a separação dos componentes da mistura. Assim, para a grande maioria de aplicações de Sensoriamento Remoto, a mistura espectral linear será a responsável pela resposta espectral registrada nas cenas captadas pelos sensores (Figura 14).

³⁹ *Endmembers*, do original em inglês

FIGURA 14: DECOMPOSIÇÃO PERFEITA DE UM MLME SUPONDO UM PIXEL DE 30 M DE RESOLUÇÃO ESPACIAL E COM TRÊS COMPONENTES: VEGETAÇÃO, ÁGUA E SOLO. CASO EM QUE O RESÍDUO DO MODELO É ZERO. (KAWAKUBO, 2010; PÉREZ MACHADO & SMALL, 2012; PÉREZ MACHADO, 2014).

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

Como já dito anteriormente, a ocorrência de misturas espectral não linear é mais frequente em comprimentos de onda com forte absorção de radiação incidente e também quando há presença de materiais com forte absorção combinados com a presença de material translucido (Kawakubo, 2010). Depreende-se daí que em alvos com grande absorção em determinados comprimentos de onda, como as bandas do vermelho e do infravermelho próximo dos sensores Landsat, associadas ao estudo da vegetação, tendem a apresentar maior ocorrência de mistura espectral não linear.

Sendo o modelo linear, o mais recorrente, na prática o que ocorre é que o valor de cada *pixel* e nas diferentes bandas espectrais da imagem assume um valor que

representa a curva espectral, em seu respectivo intervalo, que é a curva ajustada pelos pesos dos componentes presentes no IFOV, gerando uma curva síntese, linearmente derivada das curvas dos componentes, como mostra a figura 15:

FIGURA 15: CURVA ESPECTRAL PONDERADA RESULTANTE DA MISTURA ESPECTRAL LINEAR. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

3.5.1. O Modelo Linear de Mistura Espectral em sua expressão matemática

A reflectância espectral nesse modelo pode ser descrita como a combinação linear dos componentes do espectro (Settle & Drake, 1993; Roberts et al, 1996; Batistella et al, 2004; Small, 2005; Shimabukuro et al, 2005, Wenze et al, 2006; Kumar et al, 2013), como:

$$f_1 C_1(\lambda) + f_2 C_2(\lambda) + \dots + f_n C_n(\lambda) = R(\lambda)$$

Sendo:

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

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

f indica as frações correspondentes dos n Componentes;

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

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

Sendo:

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

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

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

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

$$f_j c_{ij} = r_i$$

Sendo:

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

O sistema das equações lineares b pode ser descrito como:

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

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

$$\mathbf{r} = \mathbf{Cf} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

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

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

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

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

Sendo os dados dos satélites multiespectrais gerados em múltiplas bandas espectrais, consideramos a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral como uma solução conjunta de equações, formando um sistema (ver Figura 16):

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

Uma etapa de grande importância no processo de modelagem da mistura espectral é a seleção dos componentes que farão parte do modelo. Em teoria, conhecendo-se de forma exata os espectros dos materiais presentes na paisagem, os valores das imagens-frações⁴⁰ geradas a partir do modelo de mistura espectral distribuem-se num intervalo de valores entre 0 e 1, sendo que a soma total das frações é igual a 1 (Kawakubo, 2010). A maior dificuldade reside na dificuldade de se conhecer com exatidão os materiais presentes na paisagem e o número exato de componentes contribuintes na mistura espectral, isto constitui um dos maiores desafios na aplicação desta técnica de análise.

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

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

Os múltiplos Componentes demonstram a complexidade espectral das paisagens. Podemos definir então o processo de seleção dos componentes que melhor se ajustarão ao modelo linear de mistura espectral como um processo de redução de

⁴⁰ São as imagens individualizadas, cujos números digitais dos pixels representam os valores proporcionais do componente referente que a originou. O número de imagens-frações são tantos quantos os componentes considerados no modelo, em geral se procura utilizar um número menor que q quantidade de bandas ou canais espectrais utilizados.

dimensionalidade dos dados, onde as dimensões mais representativas espectralmente, quando aplicadas ao modelo, produzirão o menor erro residual.

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

3.5.2. Modelos multi-escalares e padronizados de mistura espectral

A análise de mistura espectral vem tendo grande aplicação em imagens multiespectrais como as geradas pelos sensores TM e ETM+⁴¹ a bordo das missões Landsat. Contudo grande parte destes estudos, por razões técnicas e metodológicas, consideram a localização específica de suas áreas de estudo por conta da composição dos materiais componentes da paisagem local, onde a seleção de **Componentes** para a aplicação no modelo é sempre específica. Algumas implicações são as dificuldades de comparabilidade entre resultados obtidos por estudos que utilizam componentes específicos.

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

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

Small & Milesi (2013), tendo como base os resultados obtidos por Small (2004), ampliaram o rol de imagens e sub-cenas utilizadas para 100 (figura 17), além disso aplicaram além da conversão de radiância da superfície no bloco de imagens, a correção

⁴¹ TM = Thematic Mapper; ETM+ = Enhanced Thematic Mapper, referentes aos sensores a bordo dos satélites Landsat 5 e 7 respectivamente.

atmosférica para comparação. Neste estudo a análise global dos resultados demonstram que para o conjunto de dados analisado 99% da variância espectral pode ser representada num espaço de mistura espectral tridimensional. Os componentes **Solo**, **Vegetação** e **Superfícies Escuras** (SVD⁴²) retornaram um desajuste inferior a 0.05 nos testes realizados, apontando para o potencial global destes componentes em qualquer modelo linear de mistura espectral (equação 2).

$$\begin{array}{ccc|c|c}
 f_1 \mathbf{C}_1_{\lambda 1} & f_2 \mathbf{C}_2_{\lambda 1} & f_3 \mathbf{C}_3_{\lambda 1} & & \mathbf{R}_{\lambda 1} \\
 f_1 \mathbf{C}_1_{\lambda 2} & f_2 \mathbf{C}_2_{\lambda 2} & f_3 \mathbf{C}_3_{\lambda 2} & & \mathbf{R}_{\lambda 2} \\
 f_1 \mathbf{C}_1_{\lambda 3} & f_2 \mathbf{C}_2_{\lambda 3} & f_3 \mathbf{C}_3_{\lambda 3} & & \mathbf{R}_{\lambda 3} \\
 f_1 \mathbf{C}_1_{\lambda 4} & f_2 \mathbf{C}_2_{\lambda 4} & f_3 \mathbf{C}_3_{\lambda 4} & + & \mathbf{R}_{\lambda 4} \\
 f_1 \mathbf{C}_1_{\lambda 5} & f_2 \mathbf{C}_2_{\lambda 5} & f_3 \mathbf{C}_3_{\lambda 5} & + & \mathbf{R}_{\lambda 5} \\
 f_1 \mathbf{C}_1_{\lambda 6} & f_2 \mathbf{C}_2_{\lambda 6} & f_3 \mathbf{C}_3_{\lambda 6} & + & \mathbf{R}_{\lambda 6}
 \end{array} = \mathbf{R}_{\lambda}$$

FIGURA 16: SISTEMA DE EQUAÇÕES AJUSTADO AOS COMPONENTES GLOBAIS PROPOSTOS POR SMALL (2004) E SMALL & MILESI (2013). ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

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

⁴² Soil, Vegetation and Dark Surfaces

FIGURA 17: CONJUNTO DE SUB CENAS UTILIZADAS POR SMALL & MILESI, 2013.

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

Em primeiro lugar porque é mais palatável a qualquer analista o entendimento de presença de alvos sobre a superfície da terra e que contribuem para a formação da resposta espectral de um pixel em termos de proporção de contribuição, ou presença desses alvos em cada pixel, do que a leitura das grandezas físicas representadas no índice numérico (*digital number*) presente em cada *pixel* da imagem.

Em segundo lugar, se considerarmos os modelos com uso de componentes globais, a comparação entre proporções de componentes altamente representativos do ponto

de vista analítico de composição da superfície da superfície terrestre e de sua mudança, como por exemplo, a fração vegetação, há maior robustez dos resultados pela possibilidade de comparação experimental e pelo maior poder de comunicação que os resultados atingem pela diminuição da dimensionalidade.

3.6. Aplicações

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

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

3.6.1. Estudos de caso em agricultura, vegetação e processos de degradação ambiental

Moreira et al (1998) aplicaram o modelo linear de mistura espectral para avaliação e identificação de áreas de plantio de soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais. A metodologia consistiu na geração das frações de solo, vegetação e sombra das áreas em questão através do modelo de mistura linear para “desmixagem”⁴³ das respectivas proporções, e sobre essas imagens fração foram aplicados processos de segmentação para agrupamento de regiões com assinaturas espectrais homogêneas, comparando-se os resultados dessa classificação com os resultados obtidos na aplicação do mesmo método nas imagens Landsat TM originais. Como resultados do modelo proposto demonstraram que o a mistura espectral é mais eficiente no mapeamento de soja, comparativamente aos resultados obtidos nas imagens originais.

Outros tipos de plantio também aparecem como alvo das investigações utilizando modelos de mistura espectral. Fitzgerald et al (2004) aplicaram o MESMA em

⁴³ Literalmente *unmixing*, em Inglês.

dados multiespectrais coletados a partir de uma plataforma sub orbital em uma fazenda de algodão, cujo objetivo foi a comparação dos modelos testados com 3 ou 4 componentes (*endmembers*) e dados de campo, incluindo duas frações de sombra diferentes no modelo de 4 componentes: vegetação sombreada e solo ombreado. Os resultados indicaram que a inclusão das frações sombra aumentaram os valores de correlação entre a proporção de cobertura do cultivo e a altura das plantas, quando comparados com o modelo que usa apenas a fração vegetação.

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

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

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

No Brasil projetos de natureza mais contínua sobre o monitoramento dos padrões de uso do solo que utilizam a análise da mistura espectral como procedimento técnico são bastante eficazes. De maneira geral esses projetos têm iniciativa como políticas públicas e tem objetivo de combate às ilegalidades no desmatamento e avanço ilegal da agricultura em grandes áreas do centro-oeste e norte do Brasil (Kawakubo, 2010). O TerraClass é uma dessas iniciativas. O objetivo é o acompanhamento das mudanças de uso nas áreas monitoradas pelo PRODES⁴⁴ através da classificação do uso do solo com a aplicação do modelo de mistura

⁴⁴ Monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite, baseado em imagens Landsat e CBERS, quantifica o desmatamento. Conta ainda com o DETER que divulga os resultados, o QUEIMADAS e o DEGRAD, que tem função similar de acompanhamento e fiscalização dos processos de uso do solo.

espectral e segmentação de imagens. O TerraClass possibilita o acompanhamento das mudanças de uso do solo, incluindo a agricultura e pecuária e seu avanço sobre áreas de desmatamento na Amazônia legal.

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

Moran, Batistella e Lu (2004a), e Moran, Batistella, Lu e Mausel (2004b) realizaram classificações multi temporais em imagens Landsat com base na classificação das frações sombra, vegetação verde e solo seguindo as classes de mapeamento definidos pela metodologia *Land Use/Land Cover* (LULC)⁴⁵, cujo objetivo foi a geração de mapas de detecção de mudanças no uso e cobertura da terra em Rondônia, Brasil. Os resultados apresentados confirmam para o caso de estudo (2004a) que a abordagem das imagens fração derivadas do modelo de mistura espectral para classificação multi temporal em imagens multiespectrais é mais eficaz quando comparada a métodos de classificação tradicionais, além disso os resultados experimentais (2004b) demonstraram que a utilização de correção atmosférica nas imagens exerceu baixa interferência nos resultados finais, com uma acurácia de 86,6% na classificação baseada na análise de mistura espectral frente a 81,4% no classificador de máxima verossimilhança. Resultados semelhantes já haviam sido obtidos pelos mesmos autores em 2002 (Moran, Batistella e Lu, 2002).

Shimabukuro, Novo e Ponzoni (1998) também utilizaram imagens fração derivadas do modelo linear de mistura espectral num estudo para o monitoramento da cobertura do solo na região do Pantanal. O método consistiu na comparação dos resultados obtidos em duas imagens Landsat 5 dos anos de 1992 e 1993, referentes aos períodos seco e chuvoso respectivamente, da caracterização das mudanças com o NDVI e a fração vegetação do modelo linear. Os resultados deste estudo apontaram uma maior sensibilidade da imagem fração da vegetação às mudanças quando comparada aos resultados obtidos com o NDVI.

⁴⁵ LULC é uma legenda padrão, a qual derivou de um projeto desenvolvido pela Convenção das Nações Unidas no Combate à Desertificação (UNCCD) entre os anos de 2006 e 2010. A legenda LULC é descrita para uso em escalas regionais. (http://www.desertwatch.info/index.php?option=com_content&view=article&id=95:lulc&catid=34:project&Itemid=71).

Toledo e Shimabukuro (2005) compararam as frações vegetação advindas do modelo linear de mistura espectral aos índices NDVI e EVI⁴⁶ derivados de imagens dos sensores ETM+ e MODIS⁴⁷ referentes a amostras aleatórias da região Amazônica e regiões montanhosas do sul do Brasil. Novamente os resultados indicaram melhor desempenho do uso das frações em relação aos índices, e especificamente neste caso o modelo linear teve melhor funcionamento na amostra da região Amazônica. Estudos semelhantes em áreas montanhosas foram feitos por Roberts et al (1996), tendo como área teste a região montanhosa de Santa Mônica, na Califórnia, empregando múltiplos membros de referência em modelo linear de mistura espectral.

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

Freitas, Haertel e Shimabukuro (2008) trabalharam na perspectiva da dificuldade de aquisição de *pixels* puros para indicação dos membros de referência ou componentes em função da diminuição da resolução espacial do sensor utilizado. Os autores testaram uma proposta comparativa utilizando dados dos sensores CCD (20m de resolução espacial), IRMSS (80m de resolução espacial) e WFI (260m de resolução espacial), sendo que as reflectâncias espectrais dos membros foram estimadas para todas as imagens, vegetação, sombra e solo, e os resultados demonstraram que as curvas estimadas para o IRMSS⁴⁸ e o WFI⁴⁹ são muito próximas daquelas estimadas para o CCD.

Também debruçados sobre a região Amazônica, Adams et al (1995) utilizaram um modelo linear de mistura espectral com 4 componentes, numa área de expansão nas proximidades de Manaus em imagens com variação temporal. Os resultados obtidos somam-se a outros que sugerem que o uso do modelo de mistura espectral na classificação de imagens multi temporais é eficiente.

Kawakubo (2010) em sua tese de doutorado apresentou a aplicação de uma metodologia para mapeamento das mudanças do uso do solo e variação da vegetação também na região Amazônica, especificamente em São Felix do Xingu/PA. A metodologia do trabalho consistiu na utilização conjunta do modelo linear de mistura espectral com vistas a redução da dimensionalidade dos dados de imagens TM e a classificação por regiões, através de

⁴⁶ Do inglês: *Enhanced Vegetation Index*

⁴⁷ Do inglês: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

⁴⁸ *Infrared multispectral scanner*

⁴⁹ *Wide Field Imager*

processos de segmentação. Os resultados deste trabalho apontam para a adequabilidade e acurácia do modelo proposto além de indicar forte correlação entre as mudanças do uso do solo na área de estudo a o avanço da pecuária na região.

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

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

Okin et al (1998) também investigaram o processo de desertificação em Las Cruces, Novo México, utilizando a classificação dos dados do sensor AVIRIS⁵⁰ através do modelo linear de mistura espectral. A metodologia consistiu na utilização de múltiplos membros de referência (MESMA), comparando os resultados para modelos com 2,3 e 4 componentes. As conclusões deste trabalho também trazem indicações da aplicabilidade da análise de mistura espectral em áreas áridas e semiáridas.

3.6.2. A análise de mistura espectral aplicada a áreas urbanas

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

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

⁵⁰ *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*

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

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

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

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

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

e Small e Milesi (2013), com a sugestão de membros de referência padronizados e multi-escalares.

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

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

Na cidade de Indianapolis localizada no estado de Indiana, Estados Unidos, Lu e Weng (2004) examinaram as características urbanas do local através das classes definidas pelo LULC, tendo como objetivos a avaliação da classificação a partir das imagens fração, geradas para o estudo com testes de 3 e 4 componentes, ao método de máxima verossimilhança numa imagem ETM+ datada de 2000. A combinação de componentes foi definida a partir de diversos testes de combinação. Os resultados apresentam uma acurácia de 89,33% e índice Kappa de 0.8575 para os resultados obtidos com análise de mistura espectral, enquanto que os valores obtidos pela máxima verossimilhança foram de 80% de acurácia e índice Kappa de 0.7284. Outros apontamentos dos autores é a indicação de que estratificação da área em unidades homogêneas, como residencial, residencial e comercial, etc., possivelmente aumentem a riqueza das imagens fração. Estudos semelhantes foram feitos por Nogueira, Sanson e Pessoa (2007) objetivando o entendimento da expansão urbana da cidade de Manaus, Amazonas, e sua relação com as características demográficas utilizando a análise

de mistura espectral para classificação de séries temporais de imagens, além dos desenvolvidos por Sarapirome e Kulrat (2010).

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

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

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

Pérez Machado e Small (2012) publicaram a proposta e os primeiros resultados de um estudo urbano utilizando o modelo linear de mistura espectral na cidade de São Paulo, o maior aglomerado urbano da América do Sul. O objetivo do estudo foi avaliar as mudanças no uso da terra na área em questão utilizando imagens TM e ETM+ para identificação entre as décadas de 1986 a 2010. Os resultados demonstram que a aplicação do MLME com três membros de referência padronizados – substrato, vegetação e frações escuras - (Small & Milesi, 2013), e detectaram um valor global de 0,99% de mudança de cobertura

entre 1986 e 2005 e 1,32% entre os anos de 2000 e 2010, considerando ainda que tais valores são superiores quando observadas apenas as mudanças na cidade de São Paulo e não em todo o aglomerado urbano. Adicionalmente os autores desenvolvem uma proposta de utilização conjunta ao modelo linear de mistura espectral e os dados multi temporais (2000, 2006 e 2010) de radiância de focos de luminosidade gerados pelo sensor DMSP-OLS⁵¹ na mesma área para uma análise exploratória do processo de urbanização em São Paulo.

Lu et al (2014) realizaram o mapeamento das mudanças multi temporais em imagens Landsat na área de Jin-Jin-Tang, China, utilizando a redução de dimensionalidade dos dados através da geração de duas frações pelos métodos do NDVI⁵² para vegetação, e do NDBI⁵³ para áreas construídas. Utilizando o NDVI como parte do processo metodológico Morato (2008) apresenta um modelo de análise espacial para o mapeamento da desigualdade ambiental no município de São Paulo, onde a fração vegetação obtida pelo NDVI é associada a informações demográficas na modelagem da distribuição espacial do fenômeno da desigualdade.

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

Song (2005) também desenvolveu estudo de análise de mistura espectral tratando da vegetação urbana, discutindo no artigo a incorporação da variabilidade dos membros de referência, utilizando o NDVI para simulação de um modelo de 2 membros de referência. Anteriormente Small e Miller (1999; 2000) desenvolveram pesquisas sobre a quantificação de vegetação intraurbana na cidade de Nova York em imagens Landsat, utilizando o modelo linear de mistura espectral para extração da fração vegetação da área. Os autores enfatizam que o método da análise da mistura espectral quando comparado ao mais comumente método de extração de vegetação conhecido como NDVI, tem a vantagem de ser extremamente voltado a uma leitura física do ambiente além de poder ser associado a uma quantidade de área num pixel.

⁵¹ Defense Meteorological Satellite Program – Operating Linescan System

⁵² Normalized Difference Vegetation Index (índice da diferença normalizada de vegetação)

⁵³ Normalized Difference Build Up Index (índice da diferença normalizada de construções)

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

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

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

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

Rashed (2004) traz estudo abordando a questão urbana e a relação possível dos dados de sensoriamento remoto e das unidades de planejamento com dados socioeconômicos agregados através dos conceitos de métricas da paisagem, lógica *fuzzy* e MESMA. O autor propõe uma metodologia a testa na cidade de Los Angeles, Califórnia. O desenvolvimento do estudo envolve a utilização da MESMA para geração de 4 imagens fração: vegetação, área impermeável, solo e sombra, para imagens Landsat datadas de 1990 e 2000. As frações são normalizadas e então cruzadas com os setores censitários da área de estudo para a geração posterior de um índice de mudanças ocorridas na década agregadas ao setor censitário. Os autores concluem que as métricas apresentadas podem de fato explicar, em termos de expansão urbana e impermeabilização no período, a forma de aplicação de políticas públicas na área urbana de Los Angeles. Essa mesma metodologia é aplicada por

Rashed et al (2005) na região metropolitana da cidade do Cairo, Egito, e tecnicamente o trabalho apresenta resultados semelhantes.

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

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

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

TABELA 2: RESUMO DA REVISÃO SOBRE A APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL. FONTE: ORGANIZADO PELO AUTOR.

Legenda				
Vegetação	Vegetação urbana	Agricultura	Técnico/teórico	Urbano
<i>Autores</i>	<i>Ano de publicação</i>	<i>Abordagem adotada</i>		
KRESSLER et al	1996	MLME na avaliação da mudança multi temporal em áreas urbanas		
MOREIRA et al	1998	MLME na agricultura		
SIMABUKURO et al	1998	MLME no Pantanal		
SMALL et al	1999	MLME no estudo da vegetação urbana		
SMALL et al	2000	MLME no estudo da vegetação urbana		
POZZI et al	2001	MLME no estudo da relação entre demografia e vegetação urbana		
SMALL	2002	MLME e avaliação multi temporal da reflectância urbana		
KOSAKI e KOSUGI	2003	ICA, IC, AME na agricultura		

FITZGERALD et al	2004	MESMA na agricultura
MORAN et al	2004	LULC e MLME na vegetação de floresta
LU et al	2004	LULC e MLME na vegetação de floresta
BOUCEK	2004	MLME e LULC na Amazônia
SMALL	2004	MLME e membros de referência globais
ALBERT et al	2004	MLME multi temporal e multi escalar em áreas urbanas
LU et al	2004	LULC e MLME em área urbana
RASHED	2004	MLME associada a dados socioeconômicos em área urbana
TOLEDO et al	2005	Comparação NDVI, EVI, MLME na vegetação de floresta
ANDERSON et al	2005	MLME na vegetação de floresta
YU et al	2005	MLME, PPI e MNF em áreas urbanas
SONG	2005	MLME no estudo da vegetação urbana
RASHED	2005	MLME associada a dados socioeconômicos em área urbana
NOGUEIRA et al	2007	MLME e séries multi temporais em área urbana
POWEL et al	2007	MESMA e séries multi temporais em área urbana
KÄRDI	2007	MLME e séries multi temporais em área urbana
WENG	2007	MLME associada a dados socioeconômicos em área urbana
FREITAS et al	2008	Comparação dos membros de referência no CCD, IRMSS e WFI
SOMERS	2009	AME na agricultura
KAWAKUBO	2010	Uso do solo e MLME na vegetação de floresta
SARAPIROME et al	2010	MLME e séries multi temporais em área urbana
MYINT et al	2010	MESMA e comparação de membros de referência em área urbana
DAWEBAIT et al	2011	MLME para avaliar impactos de desertificação
PÉREZ MACHADO et al	2012	MLME, séries multi temporais e Irradiância noturna em área urbana
SMALL et al	2013	MLME e membros de referência globais
LU et al	2014	MLME, NDVI, NDBI e séries multi temporais em área urbana
ADAMS et al	1995	MLME na avaliação e expansão urbana em área de floresta
OKIN et al	1998	Avaliação do MESMA com diferentes quantidades de componentes

3.7. Os classificadores e a mistura espectral

O estudo do uso e cobertura do solo é desafiante, pois suas configurações, naturais ou antrópicas, que compõe a superfície terrestre são complexas sendo formadas por um grande número de materiais, formas, estruturas e processos distintos.

Padrões espaciais podem ser apreendidos por suas semelhanças, diferenças, continuidades ou discontinuidades no espaço geográfico em um determinado momento do tempo. Os fotos-intérpretes fazem isso. Baseando-se em padrões, texturas, formas e contexto dos objetos geográficos em fotografias, fotos aéreas e imagens orbitais eles simplificam todo o complexo do contínuo do espaço geográfico por meio de agrupamentos e classificações, reduzindo o aglomerado de dados a um número finito de informações organizadas e inteligíveis por sua simplificação.

O avanço das tecnologias de mapeamento e das informações geográficas, especialmente o desenvolvimento crescente dos Sistemas de Informações Geográficas – SIG e dos equipamentos de produção de informação de interesse geográfico tais como as imagens orbitais, vêm causando a adaptação de paradigmas atuais e o surgimento de novos paradigmas de interpretação e classificação de imagens.

A mudança mais marcante é a ampla transferência do trabalho da fotointerpretação para os meios computacionais, sobretudo a partir do uso dos classificadores pixel a pixel. As décadas de 1970 e 1980 representaram o avanço e consolidação dos métodos geostatísticos na classificação automática e semiautomática de imagens, os quais tentam traçar os mesmos agrupamentos de informação, num processo de simplificação dos dados, que ora eram feitos visualmente pelos técnicos, incluindo os geógrafos. Essa transição acompanha as novas formas de monitoramento da superfície disponíveis a partir de então para a comunidade científica, a exemplo da série Landsat que data seu primeiro satélite em órbita de 1973⁵⁴.

No entanto, a transição do meio analógico para o meio digital, embora o processo de classificação digital de imagens ainda preserve os mesmos objetivos da fotointerpretação, tem como fator limitador a capacidade analítica dos computadores e dos métodos geoestatísticos.

⁵⁴ Entre 1985 e 1992 o programa Landsat passou para o controle da iniciativa privada após indisponibilidade de fundos governamentais para manutenção do programa, na época sob controle do NOAA. Foi um período de difícil acesso aos dados, mas em 1992 o Landsat passou novamente a acesso público de baixo custo e atualmente tem livre acesso aos dados.

Na prática, as noções de contexto, padrões, textura, contiguidade, entre outros, passam a ser calculados a partir da similaridade ou dissimilaridade do número digital que representa o pixel em relação ao seu conjunto de dados.

A classificação envolve a compressão e redução dos dados para derivar informação útil sob a forma de imagem. As classificações podem ser orientadas ao valor do pixel em si ou orientadas a objetos geográficos formados por agrupamentos de pixels (Pedrassoli, 2011). Também podem assumir características paramétricas, não paramétricas e não métricas (esta última mais próxima da interpretação visual, bastante complexa).

As classificações temáticas colocam cada pixel em uma imagem e em apenas uma classe temática. A premissa subjacente é a de que cada classe temática possui um espectro característico que é distinto de todas as outras classes (Notas de aula do Prof. Chris Small, 2015).

No processo estatístico, o computador aplica os algoritmos em um espaço de representação e de dados distinto daquele que a lógica visual utiliza para interpretar as imagens. A imagem originalmente apresenta os dados em uma forma de matriz onde cada pixel tem uma posição única e se sobrepõe, apenas, em diferentes bandas espectrais (representado pela ideia do cubo espectral) (figura 18):

FIGURA 18: CUBO ESPECTRAL GERADO A PARTIR DA IMAGEM LANDSAT 8 DE 2015. O ESPAÇO GEOGRÁFICO E A PROFUNDIDADE ESPECTRAL.

Esse arranjo de dados visual, o qual a imagem representa, é o chamado “espaço geográfico⁵⁵”. Nesta representação, cada pixel está associado a um ponto único do “espaço geográfico” que se repete em valores diferentes sobrepostos na dimensão consistindo de N -valores medidos e correspondentes aos diferentes comprimentos de onda.

⁵⁵ Não se confunde com o conceito de espaço geográfico abordado pela geografia, mas é uma forma pictórica de representação deste.

No entanto, o funcionamento interno dos algoritmos classificadores funciona numa dimensão diferente de análise dos dados. Para abarcar espaços não visualizáveis de forma direta ou que apresentam variações que superam as dimensões ou limites do espaço amostral comum, costuma-se utilizar a noção de “hiperespaço”⁵⁶.

A dimensionalidade da imagem pode ser representada através de um “espaço de características espectrais”, onde mais dimensões são possíveis quando comparado ao “espaço geográfico” de representação da imagem. Neste espaço cada pixel ocupa um ponto em um N-dimensional espalho de características espectrais e os pixels com reflectância similar formam agrupamentos neste espaço. Nesta representação, feições espaciais geograficamente complexas podem ser facilmente isoladas no espaço de características espectrais, ilustrada pela Figura 19:

FIGURA 19: *SCATTERPLOT* 2D MOSTRANDO A ROTAÇÃO DAS DIMENSÕES NO ESPAÇO DE CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS, NO PRIMEIRO GRÁFICO A DIMENSÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS BANDAS 4 E 5 ENCONTRA-SE NO EIXO PERPENDICULAR, NO SEGUNDO A PLOTAGEM ROTACIONAL, MOSTRANDO ESSA DIMENSÃO. DADOS EXTRAÍDOS DA IMAGEM LANDSAT 8 (2015) UTILIZADA NA TESE.

Esse espaço amostral é a base de seleção de pixels utilizada pelos classificadores clássicos. A classificação do tipo supervisionada assume que um número limitado de amostra de treinamento dos pixels é capaz de representar as distintas propriedades espectrais de cada uma das classes amostradas. Assim, espera-se que os pixels componentes nas amostras de treinamento sejam capazes de caracterizar classes separadas no espaço de características espectrais.

Com base na similaridade aos pixels das amostras de treinamento, os pixels presentes no espaço de características espectrais são assinalados como pertencentes a uma determinada classe temática, sendo que a similaridade é usualmente baseada na proximidade do pixel aos clusters formados no espaço de características espectrais.

⁵⁶O espaço definido por 4 ou mais dimensões é chamado de **hiperespaço**. Um hipercubo seria, então, uma figura geométrica composta por 4 ou mais dimensões.

De forma geral, a covariância⁵⁷ dos dados corresponde a esta medida de dispersão em relação ao centro de gravidade da nuvem de pixels N-dimensional. Diferentes algoritmos usam diferentes estratégias para assinalar a cada pixel uma classe de pertencimento baseados nesta dispersão. Os classificadores mais utilizados são os conhecidos como Paralelepípedo, Distância Mínima e Máxima Verossimilhança, conforme a Figura 20:

FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO DOS MÉTODOS DO PARALELEPÍPEDO E DISTÂNCIA MÍNIMA. FONTE: NOTAS DE AULAS PROF. CHRIS SMALL.

Merece destaque o classificador Máxima Verossimilhança, por sua estratégia estatística mais sofisticada. Neste uma gaussiana N-dimensional de verossimilhança é definida para cada classe temática. A localização da função de verossimilhança é determinada a partir das médias dos valores dos pixels das amostras de treinamento em cada classe, e o formato da função é determinado pela covariância dos pixels de treinamento (Figura 21).

FIGURA 21: LIMITES DE DECISÃO CALCULADOS NO CLASSIFICADOR DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA. FONTE: NOTAS DE AULA DO PROF. CHRIS SMALL.

⁵⁷Basicamente, é uma medida de como os dados variam conjuntamente em relação à média e a mediana.

Assim cada pixel tem seu pertencimento assinalado a uma classe para qual o valor de verossimilhança é maior, de acordo com a seguinte função:

$$L(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Devido as diferentes abordagens, diferentes classificadores utilizando as mesmas amostras de treinamento produzirão diferentes resultados. A máxima Verossimilhança assume distribuições gaussianas⁵⁸ no espaço de características espectrais e como consequência suas fronteiras de decisão de classes são definidas por superfícies quadráticas.

Outros tipos de classificadores tais como *Support Vector Machine* (SVM) não assumem premissas sobre a forma de distribuição das classes, assim podem gerar fronteiras de decisão muito mais complexas e considerar múltiplos tipos de distribuição dos valores no espaço de características espectrais além da distribuição gaussiana nas amostras de treinamento.

Classificadores por redes neurais são semiparamétricos, algoritmos que podem acomodar complexos limites de decisão, mas são sensíveis ao "*overfitting*"⁵⁹ nas amostras de treinamento onde os valores são muito próximos, sendo que, nestes casos, os limites de decisão não podem ser generalizados para o restante do conjunto de dados.

Classificadores orientados a objeto utilizam o espaço de características espectrais para segmentar a imagem através de agrupamentos de pixels, por meio de contraste e liberdade de agrupamento, os quais são seus parâmetros de entrada (Pedrassoli, 2011). Esses agrupamentos formam objetos geográficos, sobre os quais novas regras de agrupamento de objetos em classes pode ser definida, criando uma maior complexidade topológica que os métodos anteriores. Esse método é limitado pela grande dependência dos dados e replicabilidade complexa. Veja a seguir, na Figura 22, algumas comparações de resultados de diferentes classificadores aplicados sobre os mesmos conjuntos de amostras:

⁵⁸ Também chamada de distribuição normal, é inteiramente descrita por seus parâmetros de média e desvio padrão, ou seja, conhecendo-se estes valores consegue-se determinar qualquer probabilidade em uma distribuição Normal.

⁵⁹Em estatística e aprendizado por máquina o "*overfitting*" acontece quando o modelo estatístico descreve o erro aleatório ou o ruído ao invés de descrever a relação entre os dados.

FIGURA 22: COMPARAÇÃO DE CLASSIFICADORES. FONTE: NOTAS DE AULA PROF. CHRIS SMALL, 2015.

A verificação da acurácia desses resultados é geralmente feita através de uma matriz de confusão. A matriz consiste no preenchimento num dos eixos com os valores da amostra (neste caso os pixels selecionados para compor cada amostra de cada classe) ou de dados de validação de campo (verdade de campo), e no outro eixo constam os pixels efetivamente agrupados em cada classe. No cruzamento de cada eixo em cada classe temática tem-se a contagem da quantidade de pixels que foram assinalados para aquela determinada classe. O outro eixo é constituído a partir da amostra ou a partir da verdade de campo e

apresenta quantitativamente quais destes pixels da amostra foram efetivamente classificados como pertencentes à mesma.

A partir desse ponto, é possível o cálculo geral da acurácia da classificação em relação ao dado de controle, a qual é a soma das frações dos pixels corretamente classificados.

O último método aqui abordado é a classificação não supervisionada. Basicamente, este tipo de classificação não utiliza amostras de treinamento, portanto tem interferência mínima externa. Nesse método, o algoritmo segmenta o espaço de características espectrais na tentativa de encontrar agregados de pixels e, a partir disso, estabelecer barreiras de decisão para as diferentes classes. Esse sistema é paramétrico, onde o usuário define os parâmetros do número de classes, a variância máxima de cada classe, número de iterações, entre outros, assim diferentes parâmetros geram diferentes resultados.

Na Figura 23 são apresentadas imagens da estrutura de funcionamento de um classificador não supervisionado, mais especificamente conhecido como ISODATA:

FIGURA 23: SEQUENCIA ISODATA. FONTE; NOTAS DE AULA PROFESSOR CHRIS SMALL, 2015.

As figuras apresentam a seguinte sequência: a) distribuição inicial do ISODATA para os cinco vetores médios hipotéticos a partir dos desvios padrão como ponto inicial e final; b) nas primeiras interações, cada pixel candidato é comparado à média de cada agrupamento e assinalado como pertencente ao agrupamento cuja média é mais próxima de seu valor numa distância euclidiana; c) durante a segunda interação, uma nova média é calculada para cada agrupamento baseada na localização espectral atual dos pixels assinalados em cada classe, ao invés do cálculo inicial arbitrário. Essa fase envolve a análise de diversos parâmetros para agrupar ou dividir os agrupamentos de pixels. Após a seleção do novo vetor médio de agrupamentos, cada pixel na cena é novamente assinalado a um novo agrupamento; d) esse processo de divisão, agrupamento e reagrupamento, continua até que a mudança de classe dos pixels seja mínima ou que o limite máximo de interações definido seja atingido.

Capítulo 4: Caracterização, modelagem e implementação

Introdução ao capítulo

Este capítulo traz a análise das curvas espectrais construídas a partir de dez amostras delimitadas sobre a cena Hyperion de 2004 que recobre a faixa central da RMSP, sendo que os resultados obtidos balizam as conclusões e inferências sobre o comportamento das mudanças no modelo espectral na RMSP que são calculadas na sequência do capítulo.

Além disso, capítulo mostra a modelagem da hipótese em meio computacional, destacando a modelagem matemática e a sua aplicação em SIG, e traz os resultados do mapeamento da variabilidade espectral espaço-temporal das três frações (substrato, vegetação e sombra) calculadas a partir do MLME.

4.1. A caracterização espectral da Metrópole Paulista: espectrometria por imagem orbital aplicado a RMSP

Com estruturas urbanas mais consolidadas concentradas na área central e alguns sub centros da cidade de São Paulo, a figura da Região Metropolitana de São Paulo, RMSP, tende a um formato de anéis concêntricos, com maior difusão de estruturas em função do afastamento do anel central.

A existência de sub centralidades dotadas de aparatos urbanos semelhantes ao centro de aglomeração presente na cidade de São Paulo agrupam-se, formando novas áreas de verticalização e densificação do solo urbano. Ironicamente, estes espaços de grande concentração do aparato urbano, os quais foram definidos por Milton Santos como “espaços luminosos” em função da concentração de estruturas urbanas associadas ao capital são, no registro captado por sensores remotos orbitais, os espaços com ausência de luz ou com maior incidência de sombras.

Esse modelo, que agrupa no centro estruturas e pessoas em função do capital envolvido, periferiza a pobreza e as pessoas em função de seu acesso ao capital, da mesma forma.

No município de São Paulo o projeto de periferização geográfica da pobreza, imposto pela elite, prosperou de forma mais efetiva do que em outras grandes cidades Brasileiras. Essa periferização, somada a outros, é um dos fatores que explicam o tamanho espraiamento da mancha urbana na RMSP. Esse contínuo urbano pode ser observado na figura 24:

FIGURA 24: MANCHA URBANA DA AGLOMERAÇÃO URBANA, CENTRO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO. LANDSAT 8, COMPOSIÇÃO COLORIDA NATURAL, 2015.

A mancha urbana espalha-se com maior extensão no eixo Leste/Oeste, visto que considerando o eixo Norte/Sul, temos os limitantes físicos impostos pela Serra da Cantareira a norte e a conexão com a Região Metropolitana de Campinas e ao sul as limitações físicas impostas pelos grandes corpos d'água, responsáveis pelo abastecimento de grande parte da RMSP, e a Serra do mar.

As evidências que as imagens orbitais apresentam visualmente sugerem que em ambos os sentidos, Leste/Oeste ou Norte/Sul, o comportamento espectral da RMSP obedecerá a padrões semelhantes, com um aumento da amplitude das curvas espectrais de amostras ao longo dos eixos em função do afastamento do centro estrutural da cidade de São Paulo.

Para analisar esta distribuição, adotamos o uso de imagens hiperespectrais. Em comparação com imagens multiespectrais, estas se diferenciam pela maior quantidade de bandas espectrais que recobrem uma mesma faixa do espectro eletromagnético imageado (ver exemplo à Figura 25).

FIGURA 25: COMPARAÇÃO DOS SENSORES OLI (LANDSAT 8, COM 7 BANDAS ESPECTRAIS) VERSUS O SENSOR AVIRIS (224 BANDAS ESPECTRAIS).

FONTE: [HTTPS://WWW.EXELISVIS.COM/DOCS/HYPERSPECTRALANALYSISTUTORIAL.HTML](https://www.exelisvis.com/docs/hyperspectralanalysis/tutorial.html)

Como resultado, sensores hiperespectrais geram um “cubo espectral”, que é o agrupamento dos valores de bandas espectrais que coletam informações do espectro eletromagnético em faixas estreitas. Tal habilidade permite o estudo do comportamento espectral dos objetos imageados com maior detalhe que as imagens multiespectrais. Uma aplicação possível, aqui aplicada, é a construção de curvas de reflectância para objetos imageados na superfície terrestre.

4.2. Base de dados para a construção das curvas de reflectância para os distritos da RMSP: sensor Hyperion

Os mais conhecidos e utilizados sensores hiperespectrais atualmente são o AVIRIS e o Hyperion, ambos norte-americanos. O AVIRIS não é um sensor orbital, este utiliza como plataforma um avião, os dados são restritos quase que totalmente ao território dos Estados Unidos.

Com uma configuração espectral muito semelhante, o Hyperion funciona acoplado a uma plataforma orbital, o que possibilita a aquisição de imagens em outras áreas

do globo. Os dados coletados pelo Hyperion são classificados como Espectroscopia por imagem orbital.

O Hyperion é um dos três principais instrumentos instalados no satélite *Earth Observing-1* (EO-1), lançado em 21 de novembro de 2000. Os outros dois instrumentos são o *Advanced Land Imager* (ALI) e o *Linear Etalon Imaging Spectrometer Array* (LEISA) *Atmospheric Corrector* (LAC). A plataforma EO-1 foi posicionada numa órbita com aproximadamente um minuto de atraso em relação ao *Thematic Mapper Plus* (ETM+) do sensor Landsat 7, e com a mesma altitude de 705 km. Com o fim da operação das plataformas Lewis e Orbview-4, o EO-1 oferece com exclusividade a capacidade de imageamento hiperespectral orbital na atualidade com acesso livre aos dados (Griffin et al., 2005). A Tabela 3 e a figura 26 comparamos características espaciais e espectrais essenciais do Landsat 7 ao do EO-1, e do sensor Hyperion ao sensor ALI, ambos instalados no EO-1:

TABELA 3: COMPARAÇÃO LANDSAT 7 VERSUS EO-1.

Comparação de instrumentos Landsat 7 e EO-1				
Parâmetros	Landsat 7 ETM+	EO-1 ALI	EO-1 Hyperion	EO-1 LAC
Alcance espectral	0.4–2.4 μm *	0.4–2.4 μm	0.4–2.5 μm	0.9–1.6 μm
Resolução Espacial	30 m	30 m	30 m	250 m
Largura da cena	185 km	37 km	7.5 km	185 km
Resolução espectral	variável	variável	10 nm	3–9 nm**
Cobertura espectral	discreta	discreta	contínua	contínua
Resolução da banda pancromática	15 cm	10	N	N
Número de bandas	7	10	220	256

*excluída a banda termal

**35/55 cm—1 resolução constante.

Fonte: adaptado de Griffin, et al. 2005, p. 272.

FIGURA 26: RESOLUÇÕES ESPECTRAIS COMPARADAS DOS SENSORES ALI E HYPERION. FONTE: [HTTP://EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV/FEATURES/EO1TENTH/PAGE3.PHP](http://earthobservatory.nasa.gov/features/EO1Tenth/page3.php)

Os sensores acoplados ao EO-1 desempenham importante papel na calibração das missões Landsat, pois, como é descrito, a posição de órbita casada e sensores de maior resolução espectral, permitem a validação cruzada dos dados (Figura 27):

FIGURA 27: COMPARAÇÃO ENTRE AS CENAS OBTIDAS PELOS SENSORES DO EO-1 E LANDSAT 7.
 FONTE: GRIFFIN, ET. AL. 2005. P. 273.

Sobre a cidade de São Paulo, existem atualmente disponíveis quatro cenas do sensor Hyperion no catalogo do *United States Geological Survey* (USGS), datadas respectivamente de maio, setembro e dezembro de 2003 e de março de 2004, todos correspondentes às órbitas/ponto 219/76 e 219/77 da série Landsat.

Para este experimento, a cena selecionada foi a datada de 08/03/2004 (EO1H2190762004068110PZ_HGS_01), por suas características de baixa cobertura de nuvens (0 – 9%) e inclinação solar próxima a 45 graus (50.6), utilizando a ferramenta EarthExplorer⁶⁰, disponibilizada online pelo USGS. A faixa de cobertura da imagem é caracterizada na Figura 28 a seguir:

⁶⁰www.earthexplorer.usgs.gov

FIGURA 28: FAIXA DE IMAGEAMENTO DO HYPERION SOBRE A RMSP. FONTE: USGS EARTHExplorer.

4.2.1 Fontes de interferência

Após a aquisição da cena Hyperion, o próximo passo foi a aplicação da correção atmosférica sobre a cena e a conversão dos valores dos números digitais para reflectância. Esse é um procedimento padrão aplicado segundo a necessidade, que tenta minimizar os efeitos sofridos pelo sinal registrado pelo sensor desde a fonte de energia primária, nesse caso o Sol, até sua passagem e retorno através da atmosfera.

Basicamente dois processos afetam a luz (em diferentes comprimentos de onda) na atmosfera: **absorção** e **espalhamento**. O primeiro é responsável pela retenção de determinados comprimentos de onda, em alguns casos importantes para a sobrevivência da espécie humana tais como os raios ultravioleta, e é o gerador do fenômeno conhecido como janelas atmosféricas (ver a Figura 29):

FIGURA 29: TOTAIS DE ABSORÇÃO, ESPALHAMENTO E A FORMAÇÃO DE JANELAS ATMOSFÉRICAS NA SUPERFÍCIE TERRESTRE.

FONTE: [HTTP://WWW.ASTRO.WASHINGTON.EDU/USERS/SMITH/ASTRO150/TUTORIALS/EM/](http://www.astro.washington.edu/users/smith/astro150/tutorials/em/)

Já o segundo é responsável pela dispersão de parte da energia proveniente da fonte, causando uma difusão de determinados comprimentos de onda em seu caminho pela atmosfera, que se somando à radiação refletida diretamente pelo topo da atmosfera sem contato direto com o alvo, causam os efeitos de amplificação do valor refletido (considerando a porcentagem que efetivamente chega ao alvo), conforme ilustrado à Figura 30.

FIGURA 30: ESPALHAMENTO ATMOSFÉRICO. FONTE: ADAPTADO DE MENEZES E ALMEIDA, 2012. ORGANIZADO PELO AUTOR.

Existem três tipos principais de espalhamento: *Rayleigh*, espalhamento MIE e espalhamento não seletivo.

O primeiro deles é o mais comum e algumas vezes também é chamado de espalhamento molecular, ocorre quando o diâmetro das partículas (por unidade de espaço) no meio de propagação é menor que o comprimento de onda incidente. Matematicamente este espalhamento pode ser descrito como sendo proporcional ao inverso da quarta potência do comprimento de onda, assim, como o comprimento de onda do azul é o menor do espectro do visível, seu espalhamento é maior e explica, por exemplo, a cor azul do céu:

$$R = \frac{1}{\lambda^4}$$

Esse tipo de efeito é maior em bandas espectrais de imagens orbitais correspondentes ao espectro do visível, pois estas registram os menores comprimentos de onda.

O espalhamento do tipo MIE se dá em situações onde o comprimento de onda incidente é similar ao tamanho das partículas atmosféricas por unidade de área de incidência.

Nesse caso, o coeficiente de espalhamento é um coeficiente de área definido como a razão da frente de onda afetada pela partícula e a seção de área transversal da própria partícula (Menezes & Almeida, 2012). Matematicamente, o espalhamento de MIE guarda a seguinte relação com o comprimento de onda:

$$M = \frac{1}{\lambda^{0,7-2,0}}$$

O terceiro mecanismo de espalhamento é o chamado “não seletivo”. Este ocorre em todos os comprimentos de onda quando o tamanho das partículas do meio é muito maior que os comprimentos de onda incidentes. Ocorre em atmosferas com alta densidade e é responsável, por exemplo, pela cor branca das nuvens, pois espalha todos os comprimentos não seletivamente, gerando assim a mistura aditiva que entendemos como branco. Em sensoriamento remoto, os espalhamentos *Rayleigh* e MIE aumentam o registro da reflectância real dos objetos, causando uma diminuição do contraste entre os objetos presentes na imagem.

O efeito conjunto da absorção e do espalhamento atmosférico responde pelos maiores efeitos de interferência atmosférica nos dados de sensoriamento remoto ótico.

Aproximadamente 47% do fluxo de radiação proveniente do Sol que incide na superfície terrestre é absorvido pelos materiais da superfície, 37% é refletido pela Terra (incluindo nuvens e atmosfera) e 17% é absorvido pela atmosfera (Menezes & Almeida, 2012), o que dá uma ideia da escala dos efeitos aqui discutidos.

Um terceiro processo que altera o registro da reflectância dos alvos no sensor é a chamada “Função de Distribuição Bidirecional da Reflectância (BRDF⁶¹)”. A função demonstra que a reflectância registrada é função combinada do ângulo de incidência da luz no objeto e do ângulo de observação da resposta da energia incidente. Para os sensores orbitais o ângulo de elevação solar e ângulo de visada do satélite respondem pelos componentes da função. Este fenômeno é ilustrado na Figura 31.

FIGURA 31: MODELO GEOMÉTRICO SIMPLIFICADO BRDF. FONTE: [HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/BIDIRECTIONAL_REFLECTANCE_DISTRIBUTION_FUNCTION#/MEDIA/FILE:BRDF_DIAGRAM.SVG](https://en.wikipedia.org/wiki/Bidirectional_Reflectance_Distribution_Function#/media/File:BRDF_Diagram.svg)

4.2.2. Tratamento dos dados Hyperion e correção atmosférica

A visada do Hyperion sobre as cenas 219/76 e 219/77 do Landsat correspondente a cidade de São Paulo é apresentada na Figura 32.

O uso dos dados do Hyperion foi projetado para a calibração espectral das cenas Landsat. Essa função, associada ao uso de dados terrestres de calibração, permite aos operadores do satélite, nesse caso a NASA e o USGS, aplicar a recalibragem periódica a partir dos dados multiespectrais, além da garantia de calibração cruzada entre os sensores presentes nas diferentes plataformas Landsat, procedimento essencial para que a análise temporal seja possível com uso das imagens.

A órbita/ponto do Hyperion coincide com a trilha de varredura do Landsat e além disso capta imagens em pontos estratégicos para calibração, além disso a coleta é posicionada na área de sobreposição entre duas cenas Landsat, conforme também mostra a Figura 32, no caso da RMSP.

⁶¹ Bidirectional Reflectance Distribution Function

FIGURA 32: LEITURA DO SENSOR HYPERION SOBRE AS ÓRBITAS/PONTO LANDSAT QUE RECOBREM A RMSP.

O sensor Hyperion tem uma resolução espectral de 220 bandas. Isso significa por exemplo que na mesma faixa em que o Landsat 7 registra os comprimentos de onda do visível utilizando três bandas (azul, verde e vermelho), o Hyperion utiliza 35 bandas espectrais diferentes neste mesmo intervalo espectral. O mesmo ocorre com as faixas espectrais do infravermelho (próximo, curto e médio), onde o Landsat 7 utiliza mais 3 bandas espectrais, uma para cada faixa, o Hyperion utiliza 35 bandas para o infravermelho próximo e 172 bandas no infravermelho curto, atingindo um alcance máximo de registro de 2.400 nanômetros (2,4 micrômetros).

Tais características de recobrimento espectral designam os dados produzidos como contínuos (do ponto de vista espectral) quando comparados aos de sensores como o ETM ou o TM, considerados discretos neste quesito (Figura 33):

FIGURA 33: CUBO ESPECTRAL DA REGIÃO NORTE DA RMSP. OBS.: CORES QUENTES REPRESENTAM MAIOR REFLECTÂNCIA (MENOR ABSORÇÃO). ELABORADO A PARTIR DA IMAGEM HYPERION, 2004.

Existem outras diferenças importantes como a resolução temporal do Hyperion de 200 dias, em comparação aos 16 dias da série Landsat⁶².

Considerando as características dos dados, as fontes de interferência relatadas em tópicos anteriores e o fim desejado para utilização dos dados, como primeira tarefa após a aquisição procedeu-se a conversão dos valores dos números digitais para reflectância, associada a correção atmosférica.

Existem alguns métodos e algoritmos aplicados para esse fim em diversos softwares. Neste caso optou-se pela utilização do pacote FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), existente no Módulo de Correção Atmosférica do software ENVI. O FLAASH baseia-se na utilização de modelos de transferência radiativa, especificamente implementando o algoritmo MODTRAN, atualmente na versão 4 (Adler-Golden Matthew, Bernstein, Levine, Berk, Richtsmeier, Acharya, Anderson, Felde, Gardner, Hoke, Jeong, Pukallb, Mello, Ratkowski, Burke: 1999; Kaiser, Miller: 2000)

⁶²Mais informações sobre podem ser encontradas em: EO-1 User Guide. Version 2.3. July 15, 2003
Materiais de apoio também disponíveis em: <http://eo1.usgs.gov><http://eo1.gsfc.nasa.gov>

Assim, o FLAASH parte de uma equação padrão para a radiância espectral do pixel no sensor, L , considerando a amplitude dos comprimentos de onda da imagem (comprimentos de onda na faixa do termal são negligenciáveis) (ITT, 2009):

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho e - S} \right) + \left(\frac{B\rho e}{1 - \rho e - S} \right) + La$$

Onde:

ρ é a reflectância da superfície do pixel;

ρe é a reflectância ponderada do pixel e de seu entorno de pixels;

S é o albedo esférico da atmosfera;

La é a radiância retroespalhada pela atmosfera;

A e B são coeficientes dependentes da atmosfera e da geometria do raio energético, mas não da superfície.

O primeiro termo dessa equação corresponde à energia que viaja diretamente da superfície até o sensor através da atmosfera, enquanto o segundo termo da equação corresponde ao montante de energia que sofre espalhamento pela atmosfera em seu caminho até o sensor. Os fatores ρ e ρe referem-se ao efeito de adjacência entre pixels que causam mistura pela proximidade, no entanto caso queira-se ignorar tal efeito pode-se igualar ambos os parâmetros, levando em conta possíveis erros em comprimentos de ondas curtas, especialmente em cenas com fortes plumas atmosféricas ou com alto contraste entre os elementos presentes na cena (ITT, 2009).

Observa-se que os membros descritos até aqui fazem referência aos processos básicos de absorção e espalhamento atmosférico descrito anteriormente.

As variáveis A , B , S e La são calculadas pelo MODTRAN4, considerando a elevação média da superfície da cena e assumindo um determinado modelo de atmosfera (Tropical, Desértica, etc.), tipo de aerossol presentes e a visibilidade da cena. Todos são parâmetros de entrada no modelo.

Calculados os montantes de aerossol e retenção de água, o FLAASH consegue computar o valor ponderado em reflectância para cada pixel da cena, em todas as bandas processadas, usando a seguinte solução:

$$Le \approx \left(\frac{(A + B)\rho e}{1 - \rho e - S} \right) + La$$

Uma ponderação espacial é aplicada através de uma função de espalhamento de pontos na superfície imageada, sendo estes pontos com diferentes distâncias da linha de visada do sensor (ITT, 2009). Essa fase final do processamento compreende o processo básico relacionado a função de distribuição bidirecional, apontado anteriormente.

Na prática, o uso do modelo no ENVI consiste da definição dos parâmetros que compõe as equações citadas:

FIGURA 34: PARÂMETROS DE ENTRADA DO MÓDULO FLAASH NO ENVI.

Os parâmetros utilizados para a imagem de entrada (Hyperion de 2004) foram assim definidos:

Sensor Type: **Hyperion;**

Flight date: neste caso, a cena é datada de **8/03/2004;**

Ground elevation: utilizou-se a altitude média da RMSP de **750m;**

Pixel size: **30m** (Hyperion);

Atmospheric model: **Tropical** (por conta da localização da cena);

Aerosol model: **Urban**, por conta da extensa mancha urbana na cena;

Initial visibility: **40 km**, pois a cena é livre de nuvens e considerou-se a visibilidade máxima padrão;

Para os outros parâmetros mantiveram-se as opções padrões do modelo. O resultado foi a imagem atmosféricamente corrigida, segundo tais parâmetros e aplicando o MODTRAN4, e calibrada para a reflectância dos alvos.

4.3. Análise dos dados Hyperion

Ao todo, 44 distritos da RMSP são recobertos em seu todo ou em parte pela cena Hyperion utilizada nesta análise, o equivale a 27% do total de distritos existentes na RMSP. Contudo, dos 44 distritos que estão em intersecção com a cena, 43 pertencem ao município de São Paulo e nesse caso, em relação ao município, a amostra equivale a aproximadamente 45% do total de distritos do município.

Essa amostra é consistente, pois além da representatividade do aglomerado urbano central e periférico nos extremos norte e sul, engloba uma imensa gama de limites de favelas em seu perímetro, conforme apresentado no Mapa 11.

MAPA 11: LEITURA DO HYPERION, DISTRITOS INTERNOS DA AMOSTRAGEM E AMOSTRAGEM DE FAVELAS.

O objetivo proposto aqui é a análise do comportamento espectral da área da RMSP recoberta pelo Hyperion como um todo, levando em conta a variação da resposta

espectral de acordo com diferentes tipos de cobertura do solo e sua relação com a centralidade da amostra. A partir destes dados, podemos comparar o comportamento das grandes amostras coletadas longitudinalmente, com a acepção do fenômeno centro – periferia, aos resultados das curvas espectrais calculadas nas amostras das áreas de favelas presentes no interior das amostras.

Considerando a homogeneidade dos dados e a intenção de medir o comportamento espectral em sua relação com a centralidade da metrópole, a estratégia adotada foi a criação de uma grade de polígonos de mesmas medidas. Considerando o tamanho padrão da cena Hyperion adotou-se um grid de amostras de 10 polígonos com medidas de 7.500 m no sentido leste/oeste e 9.500 metros norte/sul, que resultou na cobertura completa da cena, conforme o Mapa 12 e a Figura 35:

MAPA 12: GRADE REGULAR DE AMOSTRAS SOBRE A CENA HYPERION. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

FIGURA 35: DEZ AMOSTRAS DE SÃO PAULO, SENSOR HYPERION: 135, 78, 26 RGB, 2004.

Sobre essa grade principal, a qual gerou as dez curvas espectrais de referência, foram posteriormente selecionados os limites de favelas que contém seu centroide no interior da grade para posterior análise e comparação dos resultados.

O passo seguinte foi a coleta dos valores por amostra nas 220 bandas do cubo hiperespectral. É importante ressaltar que essas 220 bandas são as bandas que possuem registro, pois originalmente o Hyperion possui 242 bandas espectrais, sendo que alguns clusters de bandas não apresentam sensibilidade suficiente para captura de algum valor de radiância, são as chamadas *bad bands*⁶³ (bandas ruins). Note-se que quanto maior a capacidade dos instrumentos no que concerne à possibilidade de captura de comprimentos de onda além da faixa do visível, estendendo-se pela faixa do infravermelho, os chamados aparelhos *Short Wave Infra-red (SWIR)*, mais complexos estes instrumentos tendem a ser. Essa complexidade do instrumento encarece sua construção.

Essa diferença se dá por conta do sinal do infravermelho, pois este tem de ser amplificado pelo equipamento a fim de que possa ser registrado. Soma-se a isso o ruído eletrônico dos aparelhos, que além de ter de amplificar os sinais acima 0.7 micrometros, tem

⁶³Para mais informações consulte EO-1 User Guide. Version 2.3. July 15, 2003

Materiais de apoio também disponíveis em: <http://eo1.usgs.gov> <http://eo1.gsfc.nasa.gov>

também que minimizar os efeitos produzidos pelo ruído interno, calibrando-o por fonte interna⁶⁴.

Essa eliminação de bandas ruins pode ser observada nos resultados obtidos com as curvas espectrais, onde há faixas de não cobertura nos gráficos.

Todo o processo de coleta das assinaturas espectrais foi realizado através do software ArcGIS através da ferramenta *create signature files*, a qual extrai, para cada amostra previamente definida com um polígono, a matriz de covariância considerando a amostra de pixels e a média de valores para área em cada banda amostrada (Figura 36):

FIGURA 36: COLETA DE ASSINATURAS ESPECTRAIS NO CUBO HIPERESPECTRAL DO HYPERION. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

O arquivo resultante é do tipo “.sgs” (*spectral signatures*), o qual é nada mais que um arquivo do tipo “.txt” contendo a matriz de covariância e a médias de resposta espectral por amostra.

Próximo passo, procedeu-se a alteração manual do formato do arquivo de assinaturas para o tipo “.txt”, assim foi possível acessá-lo diretamente através de uma planilha eletrônica. Note-se que o uso da matriz de covariância se dá em processos de classificação, onde o algoritmo, de acordo com a função de classificação adotada, seleciona os pixels pertencentes as classes determinadas pelo usuário ou automaticamente em função de seu deslocamento ao centro de massa do espaço de cores tridimensional, e para isso os classificadores se baseiam na matriz de covariância, que dá a medida da dispersão conjunta dos dados nas três dimensões a partir do centroide geométrico da nuvem de pixels.

⁶⁴Para radiômetros fixos em laboratório a calibração se dá com o uso do *espectralon*, que é a “substância mais branca conhecida”. Na verdade, sua característica principal é a capacidade de reflexão difusão quase perfeita, ou seja, tem a capacidade de refletir todos os comprimentos de onda com a mesma intensidade em todas as direções. Em sensores em órbita, essa calibração é interna (usando material semelhante como referência no interior do sensor) e externa, usando capôs de prova, a exemplo do Salar de Uyuni, na Bolívia.

De posse dos valores médios da resposta espectral em radiância, advinda do uso do FLAASH, calculados em cada uma das dez amostras definidas, foi possível plotar graficamente, em função do valor médio nominal de registro do sensor em cada banda espectral, os valores calculados, conforme apresentado no Gráfico 9.

GRÁFICO 9: CURVAS ESPECTRAIS DAS DEZ AMOSTRAS COLETADAS NA CENA HYPERION SOBRE A RMSP. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

O gráfico mostra que há uma grande amplitude das respostas espectrais ao longo da cena, com uma maior separabilidade de regiões em comprimentos de ondas mais longos, na última faixa do infravermelho imageada. As áreas sem registro gráfico são as já mencionadas *bad bands*.

A análise do espectro do visível, compreendido entre 400 e 700 nanômetros, permite a identificação de três agrupamentos de reflectância distintos: um agrupamento de seis amostras (amostras 1, 2, 3, 8, 9, 10) que apresentam maior absorção de energia em todo o espectro do visível, especialmente nos comprimentos de onda dos canais do azul e do vermelho, mas que possuem marcadamente um aumento de reflectância no canal do verde. No espectro visível, essa característica é relacionada a presença de vegetação, a qual absorve mais os comprimentos de onda azul e vermelho enquanto apresenta menor absorção do verde, dando a característica visual perceptível aos olhos humanos. Esse agrupamento está associado as bordas da metrópole.

O segundo agrupamento observado na faixa visível do espectro mostra duas amostras intermediárias (amostras 6 e 7), as quais têm uma absorção menor que a apresentada

no primeiro agrupamento, contudo ainda apresentam distinção clara na absorção entre os canais azul e verde, com manutenção de menor absorção no verde. Contudo já apresenta pouca separabilidade entre o canal do verde e do vermelho, indicando que há uma menor presença de vegetação verde nas amostras, ainda que possuam grande quantidade de vegetação em relação às amostras centrais, além de objetos de grande absorção em todos os comprimentos de onda, os quais são presença de grandes corpos d'água, neste caso a represa Billings representa grande parte da superfície de ambas as amostras. Podemos classificar este agrupamento como uma transição.

O último agrupamento (ver Gráfico 10), composto pelas últimas duas amostras (amostras 4 e 5), possuem as menores absorções no espectro do visível e a menor separabilidade entre os três canais, denotando menor presença de vegetação verde. São características das áreas centrais da cidade de São Paulo, observando que a curva de reflectância destas áreas tem uma associação muito grande com a densidade de materiais utilizados na construção civil, a exemplo da similaridade da curva apresentada com a resposta espectral laboratorial do concreto.

GRÁFICO 10: COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS URBANOS NO ESPECTRO DO VISÍVEL. FONTE: SOUZA & KHUX, 2005.

Seguindo a análise do espectro pelo infravermelho, observa-se que todas as curvas apresentam a queda de absorção em aproximadamente 1450 nm e novamente em aproximadamente 2050 nm, comportamento que revela a presença de alguma quantidade de água em todas as amostras. O comportamento, já previamente esperado, mostra que as mesmas curvas que compõem o terceiro agrupamento, relativo às áreas mais centrais e de

maior densidade de estruturas urbanas, e o segundo agrupamento, relativo as amostras de transição, apresentam a menor absorção nestas faixas. O que denota daí é a ausência de grandes corpos d'água nestas amostras, com maior presença de substrato, e em alguma medida vegetação. São as áreas mais áridas do tecido urbano.

Analisando estas mesmas faixas de resposta para as curvas do agrupamento 1, observa-se que há maior decaimento nas faixas de absorção da água, sendo que ao norte isso se relaciona a maior presença de vegetação em relação a área central, e a vegetação contem grande quantidade de umidade armazenada, e ao sul o efeito nas três amostras que compõe essa região advém do efeito conjunto da presença de grandes corpos d'água, como a notável presença da represa Billings e o aumento de vegetação no vetor sul das amostras.

Na zona espectral de transição entre as bandas do visível (RGB) e do infravermelho próximo denominada de *red edge*⁶⁵, faixa característica para identificação de vegetação fotossinteticamente ativa, observa-se o aumento da reflectância muito marcado nas amostras periféricas e um aumento de reflectância em escala menor nas amostras centrais e de transição.

A apreensão lógica desse comportamento é a presença de vegetação fotossinteticamente ativa (ver Gráfico 11), como as faixas de absorção da água apontaram anteriormente:

GRÁFICO 11: COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO. FONTE: FILHO ET. AL., 2008.

Outras variações nas curvas espectrais da metrópole paulista podem ser melhor visualizadas individualizando-se as curvas. Na análise geral, é perceptível uma maior

⁶⁵ Limite da banda vermelha

absorção de energia no espectro do visível a qual é inversamente proporcional às quantidades de vegetação e superfícies de baixo albedo presentes na amostra, notadamente água. Também há um incremento de reflectância associado diretamente à presença de substrato, nesse caso notadamente estruturas urbanas como concreto, por exemplo.

Podemos estabelecer uma relação centro periferia nas respostas espectrais amostradas na metrópole. Essa relação é óbvia, porém absolutamente significativa sob o ponto de vista da geografia urbana, pois mostra a manifestação física, cujos impactos são amplamente discutidos, numa dimensão espectral de análise, demonstrando profundas correlações analíticas entre as bases da geografia crítica e os dados obtidos através de sensoriamento remoto.

Para melhor visualização dessa relação, apresentamos, no Gráfico 12, as curvas agrupadas por sua posição geográfica no conjunto de amostras:

GRÁFICO 12: CURVAS DAS AMOSTRAS ALINHADAS PELA A POSIÇÃO GEOGRÁFICA. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

As curvas das amostras centrais tendem a apresentar menor amplitude em todos os comprimentos (ver Gráfico 13), em função da grande presença de substrato. As outras curvas, periféricas ao sul e ao norte apresentam maior amplitude, comportamento no visível e no infravermelho próximo que se aproxima mais da curva padrão da vegetação saudável e o comportamento no infravermelho curto e médio que indica maior presença de umidade e superfícies de menor albedo.

GRÁFICO 13: CURVAS ESPECTRAIS INDIVIDUAIS DE CADA AMOSTRA. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

Outras observações em pontos específicos das curvas espectrais das amostras podem ser realizadas. Estas alterações em comprimentos de ondas específicos, por conta da altíssima resolução espectral do sensor utilizado, em diversas ocasiões estão associadas a presença de componentes químicos de comportamento espectral muito específicos na amostra e se constituem em uma nova hipótese não sendo objeto da presente pesquisa.

Exemplo disso é o comportamento singular da amostra 5, uma das componentes da área central, que é a única que apresenta aumento de reflectância na faixa de aproximadamente 1.130 nm, enquanto todas as outras amostras apresentam aumento de absorção que está associada a maior presença de solo exposto. Esta mesma amostra também se comporta de maneira distinta nas faixas de 1.340 nm e 1.460 nm, quando comparada às outras curvas, mostra um aumento de reflectância superior a todas elas.

Nota-se também que esta mesma curva é a que apresenta a menor amplitude na faixa do infravermelho médio, entre 1.900 e 2.400 nm, o que possivelmente denota relação com a baixa umidade da área da amostra, sendo a única que não possui extensos corpos d'água, com exceção da presença da lagoa do Parque do Ibirapuera. Assim, podemos construir uma tentativa de explicação dos comportamentos dessa área entre 1.340 e 1.460 nm ligada à um aumento de albedo de superfície na amostra associado ao baixo teor de umidade.

Ainda que uma aproximação simples, esse comportamento pode trazer informações importantes sobre a estrutura da área central da metrópole e mostra certo grau de separabilidade espectral em função desta estrutura.

Retomando aqui a proposição inicial da hipótese desta tese, buscamos observar os fenômenos sob a perspectiva da ocupação regular do território, mas também sob a perspectiva da ocupação irregular, representada pelas favelas. Assim, o que se segue é a análise do comportamento espectral das favelas pertencentes ao município de São Paulo presentes nas amostras até aqui analisadas.

4.4. O comportamento espectral das favelas nas amostras analisadas

No conjunto de amostras gerais, analisadas anteriormente, temos um total de 456 polígonos de limites de favelas, todos relativos a favelas do município de São Paulo (HABISP).

Dos 875 Km² que compõe as dez amostras anteriores, aproximadamente 5,7 Km² são ocupados por favelas, o que corresponde a aproximadamente 0,65% da área

Hyperion amostrada. Não obstante, considerando que a área efetivamente urbanizada presente na cena corresponde a cerca de 40% do total desta, a porcentagem ocupada por favelas neste caso se aproxima de 1,63% do total da área urbanizada amostrada (considerando que a imagem registra a mancha urbana existente em 2004).

Para efeito metodológico, consideraremos o valor de área total das amostras, mantendo o critério analítico utilizado nas análises anteriores.

Considerando que se trata de 456 amostras em contraponto as 10 amostras utilizadas anteriormente, a seleção das amostras dos limites de favelas se baseou em duas condições topológicas simples: a) estar contido no limite das amostras gerais utilizadas na primeira etapa desta análise; e b) foram selecionadas as três maiores favelas dentro de cada amostra geral (ver Mapa 13):

MAPA 13: MÉTODO DE AMOSTRAGEM DOS LIMITES DE FAVELAS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

A segunda condição relaciona-se ao fato de que o tamanho da amostra pode interferir nos resultados da curva obtida, pois a obtenção da assinatura espectral baseia-se na matriz de covariância e na média dos valores de cada pixel obtidos no cubo hiperespectral, assim, amostras maiores podem conter a maioria dos efeitos possíveis de interesse na curva.

O contraponto também é válido, a seleção da amostra e seu tamanho devem ter sua definição em função do objetivo da coleta, neste caso as grandes amostras para análise global da cena Hyperion feita anteriormente respondem ao problema levantado, que é a relação entre resposta espectral e centralidade da amostra. Assim, amostras muito grandes, a depender do objetivo da análise, também podem causar dificuldade, pois estarão sujeitas ao mesmo efeito de perda de informação associada ao processo de agregação, muito comum em SIG.

No Mapa 13 se pode observar que as amostras da grade geral 1, 2, 9 e 10 (as quais classificamos como amostras periféricas, em relação à grade de amostragem), não possuem nenhuma favela. Nas amostras 6 e 7 (as quais classificamos como transição, em relação a grade de amostras), possuem uma superamostragem de poligonais de favelas:

TABELA 4: TOTAL DE FAVELAS NA GRADE DE AMOSTRAS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Amostra geral	Número de favelas	Área total (m2)	% da Área
1	0	0,00	0,00
2	0	0,00	0,00
3	50	567236,60	0,65
4	31	139491,30	0,16
5	37	172503,00	0,20
6	222	2614635,80	2,99
7	97	1962836,00	2,24
8	19	260427,80	0,30
9	0	0,00	0,00
10	0	0,00	0,00

A seleção das três maiores favelas em cada área visa equalizar a amostragem de favelas e simplificar os resultados adequando-os à nossa capacidade de interpretação.

Para uma rápida ideia da quantidade de informação envolvida na superamostragem podemos observar as curvas espectrais conjuntas de todas as favelas topologicamente contidas na grade de amostras, conforme representado no Gráfico 14:

GRÁFICO 14: CURVAS ESPECTRAIS DE TODAS AS FAVELAS PRESENTES NA GRADE DE AMOSTRA GERAL. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

As curvas agrupadas mostram uma grande amplitude de respostas nas faixas do infravermelho, com algumas curvas apresentando comportamento espectral semelhante ao da vegetação e outras com comportamento semelhante a áreas intensamente urbanizadas e desprovidas de vegetação (conforme as análises obtidas das amostras da grade geral).

Muito deste comportamento se deve a presença de amostras pouco extensas, e que seus limites foram obtidos através de imagens de alta e altíssima resolução espacial (HABISP), ou seja, qualquer deslocamento mínimo em amostras desse tipo pode absorver características discrepantes da área real.

O oposto, de curvas com alta absorção em todos os comprimentos de onda registrados, pode indicar deslocamento da amostra para áreas corpos d'água, caso por exemplo das ocupações no entorno de reservatórios.

Além disso, o algoritmo de coleta de assinaturas espectrais utilizado, presente no software ArcGIS, apresenta limitações. Como exemplo, o gráfico apresentado acima, no qual buscava-se a coleta de 456 amostras (número total de limites de favelas na grade amostral), em função de características de tamanho mínimo e forma, obteve-se a coleta de apenas 91 amostras.

Desta feita, das 18 amostras previamente selecionadas (em decorrência da contenção e tamanho), 16 atenderam aos requisitos para a aquisição da assinatura espectral das favelas, sendo: i) Alfredo Dávila; ii) Guapira I; iii) Guapira II; iv) Nelson Cruz; v) Moinho; vi) Índio Peri; vii) Fazendinha I-P; viii) Boqueirão; ix) Guaicuri I; x) Jardim

Ernestina; xi) Nova Pantanal; xii) Paraguai; xiii) Jd. Noronha I, II, III; xiv) Nova Grajaú I e II; xv) Mariana Luz de Jesus/Chácara Dourado; e xvi) Domenico Lansete conforma a Figura 38:

FIGURA 37: 16 FAVELAS DE SÃO PAULO CONSTITUEM O UNIVERSO AMOSTRAL. FONTE: GOOGLE STREET VIEW E YOUTUBE.

O mesmo procedimento técnico descrito para a construção das curvas espectrais das 10 amostras da grade geral foi replicado no Gráfico 15 para as 16 favelas:

GRÁFICO 15: CURVAS ESPECTRAIS DAS 16 FAVELAS AMOSTRADAS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

Em primeira análise, observa-se que a amostragem sob os critérios definidos, produziu um conjunto de curvas espectrais com menor amplitude se comparado ao gráfico das curvas do total de favelas. Isso sugere que grande parte dos efeitos de superamostragem em algumas áreas e os efeitos de amostragem em áreas pouco extensas foram reduzidos, pois ainda que em número menor a amostragem é representativa de toda a área cobrindo a maior extensão possível no sentido norte/sul da cena Hyperion. Além disso, a amostra mantém a proporcionalidade observada de presença de favelas em São Paulo, com concentração maior nas áreas periféricas (Gráfico 16):

GRÁFICO 16: DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA DE AMOSTRAS DE FAVELA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

A premissa adotada para análise destas 16 favelas é a de que existe algum grau de separabilidade espectral em relação a grande amostra da análise inicial em que está inserida. Os gráficos a seguir mostram essa comparação, a começar com as favelas selecionadas na grade amostral 3 (ver Gráfico 17):

GRÁFICO 17: FAVELAS EM RELAÇÃO A GRADE AMOSTRAL 3. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

A grade amostral 3 contrasta nitidamente com as curvas das três favelas em seu interior na região do espectro visível, função da vegetação fotossinteticamente ativa que imprime a este trecho da curva sua menor absorção do canal verde. Essa é uma característica que vai se repetir nas outras grades de amostras periféricas 7 e 8, e constata espectralmente premissas urbanísticas prévias de que áreas de favela tem menor quantidade de vegetação.

Associada a baixa quantidade de vegetação, estas áreas tendem a possuir uma menor quantidade de umidade, salvo áreas de ocupação às margens de rios ou corpos d'água, exemplos presentes na realidade da RMSP.

Observa-se que das 16 curvas analisadas, apenas uma possui maior absorção na faixa completa do infravermelho médio entre 2.000 e 2.400 nm (favela Índio Peri) e duas apresentam oscilações próximas às suas respectivas amostras gerais nesta faixa (favelas Nelson Cruz e Fazendinha). Esse comportamento sugere que a ausência de vegetação interfere na presença de água nestas áreas, quando comparadas ao seu entorno regular.

Considerando as favelas analisadas na grade de amostra 4, temos o Gráfico 18 a seguir:

GRÁFICO 18: FAVELAS EM RELAÇÃO A GRADE AMOSTRAL 4. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

Os padrões de comportamento da vegetação e presença de umidade se repetem como na amostra anterior, agora acentuadamente uma dissolução da *red edge* tanto nas amostras das favelas quanto na amostra geral. Contudo a amostra geral ainda apresenta maior absorção no visível.

Neste caso fica ressaltado o comportamento da curva referente à favela do Moinho, muito similar ao da amostra geral no espectro visível. A explicação se dá pela posição da favela, incrustada em área densamente urbanizada e pela presença de grandes montantes de concreto e brita. Como se pode observar na fotografia da área, há um grande silo de concreto no interior de seus limites, o qual pode também contribuir com sombra, amplificando ainda mais a absorção no visível, no entanto no infravermelho curto e médio a ausência da vegetação e unidade fica clara em relação ao entorno.

Considerando as favelas avaliadas no interior da grade de amostras 5, temos a disposição gráfica dos resultados que é apresentada no Gráfico 19:

GRÁFICO 19: FAVELAS EM RELAÇÃO A GRADE AMOSTRAL 5. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

A favela Fazendinha apresenta grande convergência espectral com a amostra geral na faixa visível, sendo assim sua separabilidade espectral se dá mais incisivamente na faixa espectral entre 1.100 e 1.200 nm. Observa-se que nesta faixa a favela fazendinha diferencia-se tanto da amostra geral quanto do comportamento da favela Boqueirão, apresentando um aumento de absorção enquanto as outras duas curvas apresentam uma diminuição.

A explicação está provavelmente no entorno das áreas: a favela Fazendinha encontra-se cercada por um lado por uma grande rodovia e dos outros lados por áreas de barracões industriais explicando essa absorção pela mistura de borda dos pixels.

Já a favela do Boqueirão é ladeada por ruas com presença de vegetação de um dos lados e do outro lado por um grande campo de futebol com solo exposto, explicando tanto sua reflectância maior em 1.100 nm.

Para as favelas amostradas na região 6 temos o Gráfico 20:

GRÁFICO 20: FAVELAS EM RELAÇÃO A GRADE AMOSTRAL 6. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

Neste caso, A favela Guaicuri I apresenta menor separabilidade no visível e infravermelhos curto e distante, e isto se dá por sua semelhança com o grande entorno urbanizado ao seu redor em termos de material construtivo.

No entanto esta favela apresenta grande separabilidade no infravermelho próximo indicando grande absorção, o que pode ser explicado por sua maior densidade que o entorno, com maior incidência de sombras e ausência de áreas livres com solo exposto.

As curvas das favelas Jardim Ernestina e Nova Pantanal apresentam as clássicas diminuições de absorção no infravermelho curto e médio associadas a baixa vegetação e umidade.

No Gráfico 21 são apresentadas as amostras de favela selecionadas na região 7 da grade amostral:

GRÁFICO 21: FAVELAS EM RELAÇÃO A GRADE AMOSTRAL 7. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

Todas as favelas desta região apresentam clara separabilidade na região do visível com menor absorção nestes comprimentos de onda. Contudo apresentam alguma quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa, conforme se pode observar numa suave manutenção da *red edge*⁶⁶. Esse comportamento é esperado nas favelas presentes nas grades de amostra periféricas, uma vez que o entorno e as possibilidade de ocupação possuem áreas mais vegetadas que as regiões centrais.

Mas observando-se as curvas no infravermelho curto e médio temos novamente o comportamento típico de menor vegetação e unidade que o entorno.

A última área analisada (Gráfico 22) mostra as favelas na região da grade amostral 8:

⁶⁶ Região do limite inicial do infravermelho no espectro eletromagnético.

— Mariana Luz de Jesis/Chácara Dourado — Domenico Lansete ---- amostra geral 8
 GRÁFICO 22: FAVELAS EM RELAÇÃO A GRADE AMOSTRAL 8. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

Os comportamentos das curvas das favelas na região 8 são semelhantes aos da região 7, porém ainda mais acentuados: presença de vegetação ativa manifestando-se no visível associada a menor vegetação e umidade conforme o comportamento das curvas, apresentando menor absorção no infravermelho curto e médio.

Destaque para a curva da favela Domenico Lansete, a qual apresenta aumento de reflectância entre 1.100 e 1.200 nm, característica de áreas com solo exposto que no caso específico desta favela deve-se presença de ruas não pavimentadas à época de coleta da cena Hyperion.

A partir das análises em cada uma das áreas podemos traçar algumas características espectrais gerais das favelas analisadas, validas para a cidade de São Paulo:

- 1) Favelas que se formaram em áreas periféricas da metrópole tem maior presença de vegetação e umidade do que favelas nas áreas centrais;
- 2) Em todos os casos, as favelas sempre apresentam menor absorção nas faixas espectrais do infravermelho curto e médio, função quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa maior densidade:
- 3) Favelas com ruas de terra em seu interior ou com significativas áreas de solo exposto (conforme se pode ver na Figura 38), em geral campos de futebol, são facilmente distinguíveis das outras pelo seu aumento expressivo de reflectância entre 1.100 e 1.200 nm:

Nelson Cruz

Índio Peri

Domênico Lansete

Boqueirão

FIGURA 38: FAVELAS COM PRESENÇA DE RUAS DE TERRA OU SOLO EXPOSTO EM 2004: MAIOR REFLECTÂNCIA ENTRE 1.100 E 1.200 NM. FONTE: GOOGLE EARTH, IMAGENS DE 2004.

Estas características só se tornam perceptíveis a partir da comparação regionalizadas das amostras.

Esse é o processo de mistura espectral, já previamente apresentado nesta tese, que é intrínseco a imagem: todo pixel representa a curva espectral média dos objetos que compõe a imagem representada naquele pixel específico.

Analogamente, se tentamos comparar a curva espectral média das favelas de São Paulo com a curva espectral média da RMSP, a separabilidade espectral é mínima, ainda que a curva mixada das favelas guarde algum indício das características apontadas anteriormente para os comprimentos de onda no infravermelho curto e médio, relacionados a menor absorção em função de baixa vegetação e umidade associada a vegetação, conforme apresenta o Gráfico 23:

GRÁFICO 23: CURVAS ESPECTRAIS MIXADAS DAS 10 AMOSTRAS GERAIS E DAS 16 FAVELAS AMOSTRADAS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DOS DADOS DO HYPERION.

A resposta espectral mixada (misturada) não compreende a diversidade da estrutura interna das favelas ou mesmo das grandes amostras, pois sua variabilidade espacial é função da contribuição relativa que os diversos materiais presentes numa cena desempenharam. Assim, a possibilidade de fracionamento dessa contribuição subpíxel dessa contribuição relativa pode trazer informações que ajudem na separabilidade das áreas.

Além dos padrões espaciais de contribuição na mistura espectral, o padrão temporal da mudança destas contribuições também traz uma nova dimensão, a qual inclui variação de velocidade da mudança, aumento ou diminuição, acúmulo ou variações cíclicas no tempo e variação da contribuição entre os diferentes componentes da resposta espectral no tempo.

4.5. Aplicação do modelo linear de mistura espectral com uso de *endmembers* (membros de referência) globais

Para esta tese foram utilizadas 14 cenas, imagens da série Landsat, compondo sete mosaicos, sobre as quais foi aplicado o processo de desmixagem (*unmixing*) pixel a pixel utilizando membros de referência globais⁶⁷, conforme Tabela 5:

⁶⁷ Foram utilizados os “*global endmembers*” (membros de referência globais) desenvolvidos por Small & Millesi (2013).

TABELA 5: IMAGENS LANDSAT UTILIZADAS E SEUS PARÂMETROS BÁSICOS. A IMAGEM DE 2006 É UTILIZADA COMO VALIDAÇÃO DA IMAGEM DE 2005, DEVIDO AO PROBLEMA DO LANDSAT 7 “SLC OFF” À ÉPOCA DE COLETA. FONTE: ORGANIZADO PELO AUTOR.

satélite	sensor	data	orbital/ponto	elevação solar	amostra
Landsat 5	TM	06/08/1986	219/76 & 219/77	33.2
Landsat 4	TM	25/10/1989	219/76 & 219/77	56.6
Landsat 7	ETM+	30/04/2000	219/76 & 219/77	39.6
Landsat 7	ETM+	02/08/2005	219/76 & 219/77	36.9
Landsat 5	TM	14/09/2006	219/76 & 219/77	49.9
Landsat 5	TM	18/04/2010	219/76 & 219/77	43.3
Landsat 8	OLI TIRS	23/09/2015	219/76 & 219/77	53.9

A tabela 5, acima, mostra que há uma diversidade de datas de coleta, sensores e elevação solar. Relembrando, estes fatores são os que mais provocam alterações no registro das imagens nos sensores: interferência atmosférica e o efeito do BRDF.

O uso de modelos de mistura espectral tem se tornado crescente e, com isso, aumenta a necessidade de entendimento dos efeitos da interferência atmosférica nos resultados desta técnica de mapeamento.

Gong e Zang (2009) realizaram experimentos com dados do CASI (*Compact Airborn Spectrographic Imager*), sensor hiperespectral com 220 bandas, coletados sobre uma região do estado do Oregon nos Estados Unidos. Eles adicionaram ruídos simulados em diferentes frequências aos dados coletados pelo CASI com intuito de reproduzir os efeitos de espalhamento atmosférico.

Os pesquisadores aplicaram o processo de desmixagem (*unmixing*) espectral linear aos dados e compararam os valores obtidos de frações aos resultados obtidos pelo mesmo método no dado original. Seus resultados indicam que tanto nos processos de desmixagem (*unmixing*) “constrangido” (onde os resultados são forçados a somar um inteiro de 1) ou livre os resultados são muito sensíveis aos ruídos. Segundo os autores a adição de ruídos inferiores à 2,5% no nível de reflectância são suficientemente fortes para causar alterações maiores que 15% nos membros de referência estimados.

Os autores ainda indicam que a seleção correta de bandas pode reduzir drasticamente o efeito do ruído atmosférico. No entanto temos que ressaltar que os testes realizados pelos autores foram aplicados a dados multiespectrais, o que torna mais fácil a seleção de bandas com baixa incidência de ruído atmosférico. A realidade atual é a de que os sensores hiperespectrais não tem a capacidade de cobertura espacial e temporal que os sensores multiespectrais atualmente oferecem. Além disso, os mesmos testes em sensores multiespectrais podem acusar uma leitura de interferência menor em função de sua maior generalização do espectro eletromagnético.

Outra estratégia vem sendo adotada para minimizar os efeitos da sensibilidade das imagens orbitais aos efeitos atmosféricos e do BRDF. Essas estratégias baseiam-se nos processos existentes de calibração cruzada entre sensores ao longo do tempo. Ótimo exemplo disso, são os sensores presentes nas plataformas Landsat, os quais possuem calibração fina da sensibilidade dos seus sensores e correção geométrica e posicional das imagens cruzadas em diferentes sensores presentes em distintas plataformas. Essa é uma das premissas da missão de continuidade do Landsat.

Considerando os aspectos de interferência atmosférica e efeito de reflectância bidirecional, uma alternativa viável é a utilização de pares ideais de imagens. Estes pares consistem na utilização de imagens de sensores com calibração cruzada, tais como o Landsat, selecionando pares de imagens na linha temporal que possuam as características de

condição atmosférica e elevação solar o mais similar possível, calculando as mudanças no tempo a partir dos pares de imagens.

Os efeitos atmosféricos são minimizados para imagens coletadas em dias do ano próximos um do outro, ainda que em anos diferentes. Já as imagens com elevação solar semelhante terão efeitos de BRDF semelhantes devido a geometria da coleta da imagem. Ressalta-se que estes procedimentos não excluem os efeitos mas tendem a amenizá-los. Condições atmosféricas, ainda que em épocas e dias do ano semelhantes, são muito variáveis.

Este procedimento se aplica quando o objetivo principal é o computo de mudanças dos valores dos pixels ao longo do tempo.

Pérez Machado (2012) apresenta o uso da seleção de pares ideais como parte de sua metodologia para identificação de favelas através do uso do modelo linear de mistura espectral na cidade de São Paulo. Utilizando a plotagem das datas de coleta das imagens e suas características, o autor pôde identificar os pares com características mais adequados aos objetivos de sua pesquisa, como demonstra a Figura 39:

FIGURA 39: OS MELHORES PARES A SER CONSIDERADOS APARECEM DESTACADOS NA COR OCRE. O CORRESPONDENTE À BARRA NA COR MAGENTA NÃO FOI UTILIZADO. FONTE: PÉREZ MACHADO, 2012.

A gama de imagens disponíveis sobre a qual Pérez Machado fez sua seleção corresponde ao mesmo grupo de imagens utilizado nesta tese até a data de 2010, sendo acrescentadas novas cenas referentes à 2015 na base de dados utilizadas nesta tese, ampliando

a abrangência temporal entre 1986 e 2015. A seleção anterior feita por Pérez Machado resultou em pares com características de data de coleta e elevação solar que permitiram ao autor o cálculo das mudanças das frações substrato, vegetação e sombra por meio do modelo linear de mistura espectral entre os anos de 1986 e 2010, com a utilização total de quatro mosaicos, compostos por duas imagens cada totalizando oito cenas. Seus resultados demonstram a viabilidade do método.

Não obstante, a utilização de cenas em pares não ideais ainda apresenta maior complexidade.

4.6. Aplicação do modelo linear de mistura espectral nas imagens Landsat

Para o conjunto de seis mosaicos Landsat, excetuando as imagens de 2006, que compõe a base de análise espaço temporal desta tese, foram aplicados a desmistagem espectral linear com a utilização dos membros de referência globais propostos por Small e Millesi (2013), conforme mostram os resultados a seguir na Figura 40:

FIGURA 40: SEIS MOSAICOS COM OS RESULTADOS DA DESMIXAGEM (*UNIMIXING*) LINEAR UTILIZANDO MEMBROS DE REFERÊNCIA GLOBAIS: 1986 – 2015.

Conforme mostram os mosaicos apresentados anteriormente, os mapas gerados demonstram os resultados plausíveis com a distribuição dos usos do solo baseados nos três membros de referência globais utilizados: substrato, vegetação e sombra.

Todo o procedimento de aplicação de desmistagem (*unmixing*) linear foi feito no software ENVI 5.1. Os procedimentos para aplicação deste algoritmo são:

- 1) Calibração de todas as imagens, individualmente, para reflectância ao topo da atmosfera (TOA);
- 2) Mosaicagem das cenas calibradas;
- 3) Recorte do mosaico em função dos limites definidos pelo trabalho de Pérez Machado, 2012; e
- 4) Utilização do comando “*spectral unmixing*” do software ENVI.

Para utilização do “*spectral unmixing*” é necessária, a princípio, a coleta de membros de referência para a realização do processo. Essa coleta ocorre, geralmente, por meio do uso da ferramenta de Componentes Principais (PC).

A ferramenta PC é uma forma de transformação linear, tal como a transformada de Fourier, que converte o domínio observado (das imagens no espaço geográfico) em domínios de frequências e, por serem lineares, preservam adições e multiplicações.

No caso da PC, esta faz uso da covariância entre as variáveis num rol de dados multidimensional (espaço de características espectrais) para rotacionar e, algumas vezes, translacionar o rol de dados afim de que o as dimensões do novo grupo de dados rotacionado sejam ordenados pela variância, conforme demonstrado na Figura 41.

FIGURA 41: ROTAÇÃO DAS PRINCIPAIS COMPONENTES. FONTE: ADAPTADO DE WWW.CNX.ORG

A interpretação geométrica simplificada da ferramenta PC funciona da seguinte maneira: a partir da rotação baseada na covariância, a PC coloca a nuvem multidimensional de dados na melhor posição possível para visualização das dimensões mais

importantes dos dados. Há uma redução de dimensionalidade, as dimensões que explicam a maior parte do comportamento dos dados são aquelas que compõe a geometria do resultado.

Estatisticamente, a primeira dimensão da PC corresponde ao eixo de maior variância, enquanto as outras dimensões da PC estão associadas com menores variâncias sucessivamente, convertendo uma série de observações de variáveis possivelmente correlacionadas numa série de valores de Principais Componentes não correlacionados. A variância associada a cada dimensão da PC é dada pelos chamados *eigenvalores*⁶⁸ ou autovalores.

Small (2003) e Small & Millesi (2013), cujos trabalhos já foram mencionados em detalhe em capítulos anteriores, utilizaram uma composição de 100 imagens Landsat ao redor do mundo, espectralmente diversas, e as analisaram por meio do processo de Componentes Principais para o computo da dimensionalidade e da variabilidade do espectro desta composição global. Seus resultados demonstraram que em todos os casos no conjunto de cenas, pelo menos 98% da variância dos dados no espaço de características espectrais está associada com três dimensões de baixa ordem (mais significativas), as quais são: baixo albedo, alto albedo e vegetação. A maior variabilidade entre os três membros de referência é apresentada na fração de alto albedo, a qual, na prática, corresponde a superfícies de substrato (como áreas urbanizadas) e diferentes tipos de solo exposto, conforme o Gráfico 24:

GRÁFICO 24: MÉDIA DAS TRÊS PRINCIPAIS DIMENSÕES (98%) DO ESPECTRO DE COBERTURA DO SOLO GLOBAL. FONTE: SMALL & MILLESI, 2013.

⁶⁸ Autovalores são um conjunto especial de escalares associadas a um sistema de equações lineares (ou seja, uma equação de matriz) que são, por vezes, também conhecidos como raízes características, valores característicos (Hoffman e Kunze 1971), valores próprios, ou raízes latentes (Marcus e Minc 1988, p. 144) apud Weisstein.

Essa base de membros de referência foi utilizada no processamento das imagens desta tese. Suas vantagens são a padronização e a possibilidade e replicação dos resultados além da aplicabilidade global para uma vasta gama de situações de mapeamento. Ressalte-se que, em casos específicos tais como neve, novos membros de referência precisam ser adicionados.

4.7. Análise exploratória dos dados e mapeamento da variabilidade espaço-temporal

A variação dos padrões no espaço descreve a ideia básica da análise espacial. Como vimos anteriormente, enquanto os classificadores tradicionais buscam agrupar dados no espaço de características espectrais, o modelo de mistura espectral vai no sentido oposto e parte da concepção da seleção de dados com a menor correlação possível, ou seja, que apresentam a maior separabilidade espectral. Assim, enquanto uma classificação convencional é discreta, pois indica se um pixel pertence a uma única classe criando limites bruscos, o resultado do mapeamento da desmistagem (*unmixing*) espectral é contínuo, sendo que cada pixel é uma variação possível de cada classe. Neste sentido, o modelo de mistura espectral tem uma aderência maior ao significado físico da realidade onde existem uma imensa gama de transições entre membros de referência, o que se retrata na composição dos valores do próprio pixel em uma imagem.

A análise inicial dos dados resultantes dos seis mosaicos sobre a RMSP entre 1986 e 2015 é o entendimento das correlações entre as frações geradas pelos membros de referência em cada um dos anos de análise, como visto na Figura 42:

FIGURA 42: *SCATTER PLOTS* CORRELACIONANDO OS MEMBROS DE REFERÊNCIA PARA CADA MOSAICO. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

Os dados dos *Scatter plots* acima mostram que para cada ano, individualmente, os membros de referência são uma dimensão de rotação do espaço de características espectrais, como esperado. Além disso, os gráficos mostram que as três dimensões (substrato, vegetação e sombra) têm baixa correlação entre si.

A baixa correlação entre os membros de referência na dimensão espacial não traz nenhuma luz à análise em si, e isso representa o funcionamento esperado da desmixagem (*unmixing*) espectral, visto que o princípio aplicado no processo é o de menor correlação entre os membros, portanto de maior separabilidade possível. Em qualquer rotação das dimensões, cada membro de referência agrupa-se numa das pontas do triângulo. Formas mais abruptas indicam presença de membros não capitados corretamente pelo modelo, casos por exemplo das cenas de 1989 e 2000 onde há presença de nuvens sobre o oceano que compõe a parte inferior do mosaico.

4.8. Análise exploratória dos dados no espaço-tempo

A ideia básica da análise temporal em imagens digitais é a de que é possível detectar mudanças nos valores dos pixels em imagens geometricamente registradas ao longo de uma série temporal de imagens. Esta ideia está ancorada em premissas já tratadas anteriormente tais como a calibração cruzada entre sensores diferentes, para que a mensuração comparativa seja possível. Na abordagem metodológica aqui adotada, o fator tempo passa a compor mais uma dimensão no espaço de características espectrais analisado. Essa ideia pode ser representada pela substituição da dimensão espectral pela dimensão temporal no cubo espectral, criando uma nova representação dos dados a qual chamamos de cubo temporal (Figura 43):

FIGURA 43: CUBOS TEMPORAIS DA REGIÃO CENTRAL DE SÃO PAULO. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

Os cubos temporais foram construídos a partir do agrupamento das imagens fração de cada ano numa única composição para cada membro de referência.

Observa-se que em todos os cubos a fração vegetação é a que mostra menor variabilidade no tempo (Figura 44):

FIGURA 44: VARIABILIDADE DAS FRAÇÕES NO PARQUE IBIRAPUERA: 1986 – 2015. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

Esse comportamento da vegetação é esperado pelo conjunto de imagens. A distância temporal entre um dado e outro e a preocupação de coleta dos dados com características de data de coleta as mais próximas possíveis eliminam a maior parte do registro da variabilidade da vegetação pelos ciclos fenológicos.

Desta forma, locais como o Parque do Ibirapuera, por exemplo, tenderão a apresentar valores próximos ou constantes em todas as datas. Além disso, nas franjas da metrópole, onde o processo de expansão urbana do substrato avança ao longo do tempo de maneira mais significativa, não serão captadas mudanças fenológicas cíclicas consistentes da vegetação, mas uma variabilidade entre frações, mais expressivamente uma diminuição da fração vegetação e aumento de frações substrato e sombra, a depender do tipo de processo de ocupação.

Nas outras regiões dos cubos temporais, onde podemos analisar com maior detalhamento as áreas mais densamente urbanizadas, observamos o aumento da complexidade da análise. Em algumas áreas da região central da cidade de São Paulo, por exemplo, não há

uma variabilidade linear identificável. Presume-se que ao longo do tempo, nesta área, nos últimos 30 anos (1986 - 2015), deveria ser facilmente identificável um aumento progressivo da fração substrato. Não é o que se verifica com facilidade.

Muitos caminhos para esta interpretação dos dados são possíveis. As mudanças legais dos padrões do uso e ocupação do solo dessa área podem explicar parte do processo. As variações dos ciclos econômicos e de investimentos reflexos no solo urbano ao longo do tempo podem responder por outra parcela da análise. Enfim, saímos de uma explicação a partir de parâmetros físicos e adicionamos complexidade ao problema para dimensões adicionais.

Contudo, restringindo neste momento a proposta de análise dessas mudanças por meio do modelo linear de mistura espectral, a constatação lógica que se segue é a de que não é um processo de linearidade explícita. Sob o ponto de vista físico nas imagens podemos retomar as hipóteses dos fatores que podem interferir no registro dos valores dos pixels ao longo do tempo: interferência atmosférica e BRDF.

Quanto ao segundo (BRDF), considerando que existem pares ideais entre as imagens, podemos desconsiderar como interferência relevante. Quanto a interferência atmosférica, para testar sua influência, podemos calcular a variação de cada fração no tempo entre a série de imagens sem correção atmosfera às mesmas imagens corrigidas.

Afim de eliminar distorções estatísticas mais graves, consideramos para esta análise apenas os dados referentes aos limites da RMSP. Basicamente o processo consistiu no recorte por máscara de cada uma das imagens frações em toda a série temporal através do software ArcGIS e a posterior construção dos gráficos a partir dos dados obtidos. Observa-se que, nestes gráficos, utilizaram-se as imagens referentes ao ano de 2006 em substituição as imagens datadas de 2005, isto se dá em função da limitação do algoritmo de correção atmosférica em imagens “SLC OFF”⁶⁹. No Gráfico 25 são apresentadas para a toda a RMSP, as variações dos dados sem qualquer correção atmosférica:

⁶⁹ Existe a possibilidade de correção das imagens “SLC-OFF” com o uso de um algoritmo chamado *gapfill*, o qual pode ser incorporado ao software ENVI. Pérez Machado (2012), utilizou com sucesso a ferramenta para correção das imagens Landsat 2005 sobre a RMSP e obteve bons resultados com a aplicação do MLME.

GRÁFICO 25: DISTRIBUIÇÕES DAS FRAÇÕES NA RMSP AO LONGO DO TEMPO SEM CORREÇÃO ATMOSFÉRICA. OBSERVAMOS QUE A DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO TODO O LIMITE DA RMSP NÃO APONTA UMA TENDÊNCIA DE AUMENTO OU DIMINUIÇÃO CLARA DE NENHUMA DAS FRAÇÕES AO LONGO DO TEMPO. FONTE: DADOS PROCESSADOS DO CONJUNTO DE IMAGENS LANDSAT (1986-2015), ORGANIZADO PELO AUTOR.

A seguir mostramos os dados após o processo de correção atmosférica. Cada imagem foi corrigida individualmente e após a correção foi novamente aplicada a desmixagem (*unmixing*) espectral linear e o posterior computo das porcentagens das áreas totais de cada fração considerando a máscara dos limites da RMSP. A correção atmosférica foi realizada por meio do uso do algoritmo FLAASH, cujos princípios básicos foram apresentados em capítulos anteriores. Foram seguidas as mesmas regras para as imagens Landsat, e os resultados desse processamento são apresentados no Gráfico 26 a seguir:

GRÁFICO 26: DISTRIBUIÇÕES DAS FRAÇÕES NA RMSP AO LONGO DO TEMPO COM CORREÇÃO ATMOSFÉRICA. FONTE: DADOS PROCESSADOS DO CONJUNTO DE IMAGENS LANDSAT (1986-2015), ORGANIZADO PELO AUTOR.

A análise conjunta dos gráficos permite inferir que houve uma diminuição da fração sombra em todos os anos e um aumento da fração vegetação no mesmo período. Observamos, também, que a fração substrato sofreu poucas alterações e não apresentou um comportamento modificado após a correção atmosférica.

A constatação mais evidente é a de que não houve alteração na estrutura de distribuição das frações ao longo do tempo. A fração sombra continua sendo a de maior cobertura percentual, seguida por vegetação e substrato. Além disso, a visível correlação temporal negativa, considerando toda a RMSP, entre vegetação e sombra se manteve inalterada.

Essas constatações permitem afirmar que, na série temporal considerada e levando em conta todos os dados agregados para a RMSP, a correção atmosférica não altera a estrutura temporal dos dados, somado a isso, a comparação demonstra que as interferências atmosféricas não comprometeram a leitura da variabilidade temporal básica das frações.

Neste sentido, frente ao esforço computacional e tempo requerido para a correção atmosférica de uma série temporal, podemos dizer que a utilização dos dados sem correção atmosférica não compromete a análise dos dados.

Quanto a variação correlacionada entre vegetação e sombra na escala da RMSP, podemos especular uma explicação a partir de dois pontos: em primeiro lugar, em função de diferença de épocas do ano em algumas imagens da série de dados, podemos captar

alguma variação em função da fenologia vegetal, ainda que mínima pela grade diferença temporal entre as imagens; em segundo lugar, essa variação negativamente correlacionada pode estar associado à um processo urbano historicamente reconhecível na metrópole Paulista: a verticalização.

O processo de verticalização, em tese, vai transformar áreas efetivamente vegetadas ou com presença de substrato em sombra no computo da desmixagem (*unmixing*). Essa ideia será desenvolvida em breve.

Neste ponto, a questão lógica que se segue é: a RMSP é extensamente urbanizada, nesse caso porque existe mais sombra ou vegetação do que área de substrato? Para responder a esta pergunta o primeiro passo é refletir a respeito das relações de escala.

Ainda que a RMSP possua um alto índice de solo urbanizado, considerando seu limite geral, a região ainda apresenta extensa área vegetada principalmente a partir das franjas da metrópole. Mesmo a cidade de São Paulo, principal entidade da RMSP, possui diferenças significativas em seu comportamento espectral ao longo de seus eixos norte/sul, conforme demonstrado na análise do comportamento espectral da metrópole.

Assim, pensar a distribuição das frações calculadas a partir do modelo linear de mistura espectral na RMSP e na cidade de São Paulo, mostra-se como uma questão eminentemente localizada. Correlações e variabilidade entre as frações calculadas tendem a mostrar comportamentos muito diferentes em diferentes graus de agregação.

Um caminho analítico inicial interessante é pensar na variabilidade temporal dos padrões espaciais formados pelas frações substrato, vegetação e sombra na RMSP. Utilizando os cubos temporais de cada fração anteriormente descritos, podemos desenvolver uma “composição do momento temporal” para cada uma das frações.

Este mapa é formado pela composição RGB das médias, desvios-padrão e medianas-absolutas de cada espectro temporal entre 1985 e 2015. O método foi aplicado para as três frações e permite observar as áreas onde há invariabilidade da fração, alta variabilidade relacionada à fração e alta variabilidade não relacionada a fração, demonstrando as variabilidades do substrato, vegetação e sombra na série histórica, como apresentadas nos Mapas 14, 15 e 16 a seguir.

Vale ressaltar que mesmo com a seleção das cenas para que a análise sobre a área urbanizada da RMSP sofra a menor interferência atmosférica e geométrica possível, ainda existe a presença de nuvens no mosaico. Essas nuvens estão associadas a umidade acumulada pelo obstáculo físico da Serra do Mar e é, conseqüentemente, parte do funcionamento natural do ecossistema ali presente. Além disso, considerando o longo período

de tempo analisado, a possibilidade de se conseguir todas as cenas completamente livre de nuvens é muito baixa.

MAPA 14: VARIABILIDADE TEMPORAL DO SUBSTRATO DE 30 ANOS. A COMPOSIÇÃO MOSTRA ÁREAS CONSISTENTES DE SUBSTRATO NO TEMPO (VERDE), ALTA VARIABILIDADE DE ÁREAS DE SUBSTRATO (BRANCO) E ALTA VARIABILIDADE NÃO ASSOCIADA AO SUBSTRATO/BAIXO SUBSTRATO (MAGENTA). FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

MAPA 15: VARIABILIDADE TEMPORAL DA VEGETAÇÃO DE 30 ANOS. A COMPOSIÇÃO MOSTRA ÁREAS CONSISTENTES DE VEGETAÇÃO NO TEMPO (VERDE), ALTA VARIABILIDADE DE ÁREAS DE VEGETAÇÃO (BRANCO) E ALTA VARIABILIDADE NÃO ASSOCIADA À VEGETAÇÃO/BAIXA VEGETAÇÃO (MAGENTA). FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

MAPA 16: VARIABILIDADE TEMPORAL DA SOMBRA/SUPERFÍCIES ESCURAS DE 30 ANOS. A COMPOSIÇÃO MOSTRA ÁREAS CONSISTENTES DE SOMBRA/SUPERFÍCIES ESCURAS NO TEMPO (VERDE), ALTA VARIABILIDADE DE SOMBRA/SUPERFÍCIES ESCURAS (BRANCO) E ALTA VARIABILIDADE NÃO ASSOCIADA À SOMBRA/SUPERFÍCIES ESCURAS (MAGENTA). FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

Em conjunto, os três mapas demonstram que:

- 1) A área central da cidade de São Paulo apresenta maior variabilidade associada à fração sombra do que à fração substrato;
- 2) A variabilidade da vegetação aumenta em função do aumento da distância da mancha urbana da RMSP, sugerindo a evidência de que a proximidade das estruturas urbanas influencia na diminuição da atividade fenológica no entorno, considerando o intervalo de imagens de 5 anos adotado;

- 3) A fração substrato apresenta dimensões concêntricas de variabilidade, sendo que o geométrico central da mancha urbana não possui padrão de variabilidade associado à fração substrato, mas sim à sombra. Esse centro é cercado radialmente por uma mancha urbana com pouca variabilidade do substrato, indicando consolidação maior dessas estruturas no tempo e, por fim, nos limites externos dessa mancha de pouca variabilidade ocorre um aumento dessa variabilidade associada à fração substrato em alguns pontos. Essas manchas brancas sugerem os locais de retirada maciça de áreas vegetadas para urbanização, regular ou irregular, na série histórica.

O senso comum traz a ideia imediata de que as áreas centrais de centros metropolitanos, caso da cidade de São Paulo, são verticalizadas. Esse mesmo senso comum leva a interpretação em primeira instância de que a verticalização significa um aumento de substrato por área, constatação que de fato corresponde a lógica da análise.

Não obstante, essa lógica do senso comum precisa ser invertida quando consideramos tais centros: verticalização, na fração extraída da imagem, significa maior incidência de sombra em termos de resultado calculado. Reafirma-se aqui a expressão local dos fenômenos urbanos, que em conjunto refletem as características globais da cidade contemporânea.

Portanto, compreende-se que, para o modelo de mistura espectral e considerando o contexto da contiguidade física do *continuum* urbano da RMSP, uma maior incidência da fração sombra em áreas centrais significa, na realidade, uma maior incidência da fração substrato.

Essa interpretação pode ser expressa num modelo simplificado, demonstrado na seguinte sequência lógica:

- 1) Há um aumento tanto da ocupação horizontal quanto vertical ao longo do tempo;
- 2) Com o aumento da ocupação vertical há, necessariamente, um aumento de produção e acúmulo da fração sombra, a qual, ao longo do tempo, recobre parte da fração que antes poderia apresentar maior porcentagem de substrato (ver Figura 45);
- 3) Portanto, no acúmulo temporal há a diminuição do ritmo de crescimento da fração substrato em relação ao ritmo de crescimento da fração

sombra, e esta é uma constatação chave, pois ambas frações estarão respondendo por dois dos principais processos de reprodução do espaço urbano.

FIGURA 45: EFEITO DO SOMBREAMENTO ACUMULADO SOBRE O SUBSTRATO. ELABORAÇÃO DO AUTOR.

- 4) Essa dimensão em ritmo, e não simplesmente absoluta, se deve ao fato de que a fração substrato continua seu crescimento em direções periféricas e também pelo aumento, em menor escala, de fração substrato gerada pelas coberturas dos próprios edifícios que surgem e que por ventura não estejam sujeitos ao efeito do sombreamento do entorno, visto que áreas verticalizadas tendem a ser concentradas;
- 5) Assim, sugere-se que ocorra simultaneamente o aumento das frações sombra e substrato em áreas densamente urbanizadas, mas o aumento da fração sombra tende a crescer em ritmo maior. Consideramos que a RMSP é exemplo claro deste processo;
- 6) Isso sugere que na distribuição espacial de uma série temporal é de se esperar uma correlação negativa forte entre as duas frações, sombra e substrato nas áreas onde o processo de verticalização foi mais intenso no tempo. Esta correlação se dá em função dos ritmos de aceleração

diferenciados entre estas frações, e sua interpretação a partir dos dados que o modelo de mistura linear é capaz de captar:

Onde:

VertE é o indicador de correlação entre as frações substrato e sombra numa dada agregação representada por uma área delimitada no espaço geográfico:

Assim, se *VertE* ≤ -0.9 considera-se a área com alto incremento de verticalização ao longo do tempo;

Cov é a covariância entre as frações;

Var é a variância entre as frações.

A partir do modelo de simples correlação proposto efetuamos variados testes para o cálculo do índice considerando a área total da RMSP, compreendendo-se como área total os limites de todos os municípios que compõe a RMSP e suas subdivisões em limite total, limites de distritos e limites dos setores censitários. Esse modelo consiste na base do mapeamento das correlações aplicado as frações do Modelo Linear de Mistura Espectral apresentadas nos capítulos subsequentes.

4.9. Mapeamento dasimétrico e correlação das frações

A primeira referência ao mapeamento dasimétrico aparece nos trabalhos de Semenov-Thian-Shansky em 1911, no seu relatório para a *Russian Geographic Society* (Barrozo et. al., 2015). O autor aponta que a utilização dos perímetros de concentração humana sobre a superfície, podem traduzir a distribuição e concentração da população de uma forma mais realista. Assim, conforme indicam Barrozo et. al., a cartografia dasimétrica desenvolve-se muito ligada as representações da distribuição da população, e além disso, desempenha um importante papel pois altera a percepção das próprias populações no entendimento dos mapas, pois traz uma representação mais próxima da realidade quando comparada às representações coropléticas tradicionais.

Segundo Morato, Kawakubo e Machado (2010), o método dasimétrico propõe uma descrição mais realista, em que as áreas/taxas são modificadas de acordo com o critério de homogeneidade obtido a partir de informações complementares. Na pratica, o método pode ser considerado como um avanço dos mapas coropléticos na definição dos limites territoriais de um polígono para representação espacial e de um fenômeno agregado a ele.

O processo consistiu na utilização de uma máscara vetorial para extração das frações substrato e sombra, anteriormente calculadas a partir das imagens Landsat, aplicando-se a máscara em cada uma das imagens fração individualmente para cada data e agregando-se os valores para o nível desejado.

Contudo, essa máscara foi dasimetricamente corrigida a partir dos limites dos grandes corpos d'água presentes na RMSP (HABISP, 2015). Esta correção foi aplicada visando suavizar a interferência da fração sombra representada por estes corpos nas áreas mais periféricas da metrópole. O mapeamento da fração sombra demonstrou que estas áreas possuem baixa variabilidade temporal e, assim, podem influenciar numa possível correlação temporal entre substrato e sombra em pequenas áreas poligonais do entorno com algum deslocamento de limite sobre corpos d'água. Na prática, foram gerados três arquivos vetoriais de agregação distintos: o limite Geral da RMSP, os limites dos distritos da RMSP e os limites dos setores censitários de 2010, todos dasimetricamente corrigidos a partir dos grandes corpos d'água⁷⁰, como mostrado na Figura 46 abaixo:

FIGURA 46: RECORTE DASIMÉTRICO DOS LIMITES DE AGREGAÇÃO DAS FRAÇÕES A PARTIR DOS GRANDES CORPOS D'ÁGUA DA RMSP. FONTE: IBGE (2010) E HABISP (2016), ORGANIZADO PELO AUTOR.

⁷⁰ Considerando aqueles com maior área de lamina d'água

Estes arquivos vetoriais são as unidades de agregação utilizadas para o cálculo de correlação espacial entre as variáveis no tempo. A metodologia de dasimetria adotada foi relativa apenas aos corpos d'água, portanto se restringiu às áreas específicas do território, essencialmente nas regiões onde a contaminação de borda pela água no cálculo de fração sombra seria maior.

Algumas as características desta análise são a multiescalaridade comparativa (RMSP, distritos, setores censitários), a individualização dos cálculos proporcionais de cada fração de mistura espectral e a repetitividade do processo (análise temporal). Para que estas características fossem padronizadas e em função da grande quantidade de repetições necessárias (3 escalas X 3 frações distintas X 6 datas de imagens diferentes, totalizando 54 cálculos), foi elaborado um modelo de extração das frações em camadas matriciais individuais e conversões para o cálculo final agregado de cada fração na escala desejada. O modelo foi desenvolvido em *ModelBuilder*⁷¹ e é descrito em detalhes a seguir.

4.10. Modelagem da agregação multiescalar

O modelo de agregação é uma conexão sequencial de três submodelos intermediários, os quais constituem os módulos intermediários de processamento dos dados, sequenciados automaticamente. A seguir é apresentada a visão Geral do modelo, denominado MLME_Agreg, na Figura 47:

FIGURA 47: VISÃO GERAL DO MODELO DE AGREGAÇÃO MULTIESCALAR. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

⁷¹ Ferramenta para criação de modelos no software ArcGIS

Existem apenas duas entradas de dados na interface do usuário (MLME e polígonos de agregação) e um único arquivo de saída é mantido ao final dos processos intermediários, o qual é próprio limite vetorial dos polígonos de agregação definidos na entrada com os cálculos de proporção de área de cada fração já constante de sua tabela de atributos.

O Módulo 1 responde pela entrada da imagem fração do calculada pelo MLME e após isso, sequencialmente, pela:

- 1) Quebra desta imagem RGB composta em três camadas matriciais distintas (uma camada para cada fração);
- 2) Reconversão de cada nova camada para o formato TIFF, e;
- 3) Conversão dos valores de cada imagem fração separada da escala 0-1 para m^2 , a partir da segunda equação:

Onde:

$IMGm^2$ é a imagem fração individual em m^2 ;

IMG é a imagem fração individual em escala original 0-1⁷²

Na Figura 48 é apresentada a imagem detalhada do módulo 1 do modelo:

FIGURA 48: DETALHE DAS OPERAÇÕES NO MODULO 1 DO MODELO. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

⁷² Os valores 100 e 9 são constantes para as imagens Landsat a partir do Landsat 4, levando em conta a resolução espacial de 30m. Esses valores podem ser modificados para frações do modelo espectral calculadas em imagens com resolução espacial diferente. No ModelBuilder essa equação foi implementada a partir do *Raster Calculator* e assumiu a seguinte forma genérica: ("%imgX_copy.tif%" * 100) * 9

O módulo 2 sobrepõe os arquivos de saída do módulo 1 aos limites vetoriais de agregação carregados pelo usuário no início do processo e, a partir desta sobreposição, ocorre a agregação pela soma dos valores dos pixels topologicamente contidos em cada polígono. O processo é sequenciado nas seguintes etapas:

- 1) Os dados convertidos em m² são a entrada do módulo em conjunto os limites poligonais de agregação, utilizando o algoritmo *Zonal Statistics as Table*, com parâmetros de saída definido para agregação por soma. Os resultados são planilhas externas com os dados agregados e um campo com chave de ligação extraído dos limites poligonais;
- 2) Estas tabelas externas são novamente atreladas à tabela de atributos do arquivo vetorial das zonas de agregação através do campo chave de ligação através do algoritmo *Join Table*. O processo ocorre em cascata sendo a sequência do de junção na ordem substrato, vegetação e sombra. O dado de saída intermediário é um arquivo vetorial com os campos correspondentes aos totais das frações calculadas em m² para cada polígono.

Segue abaixo o detalhamento estrutural do módulo 2 detalhado na Figura

49:

FIGURA 49: DETALHES DAS OPERAÇÕES NO MÓDULO 2 DO MODELO. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

O terceiro e último módulo complementar do modelo é responsável pela criação e cálculo de quatro novos campos na tabela de atributos dos polígonos de agregação, os quais são três campos com os dados agregados convertidos de m² para valor percentual de área do polígono (um campo para cada fração do MLME) e o quarto campo é a soma dos três

campos anteriores para simples conferência da integralidade de 100% e validação do resultado. Para tanto o arquivo de saída do módulo 2 se torna o arquivo de entrada deste módulo e passa por dois processos sequenciais simples:

- 1) Criação dos campos para efetivação dos cálculos usando o algoritmo *add field*;
- 2) Com os campos criados utiliza-se o *field calculator* para implementação da equação a seguir⁷³:

Onde,

A_{prc} é a área percentual de determinada fração do MLME naquele polígono;

A_{gm^2} é a área agregada por polígonos em m²;

A é a área do polígono.

A seguir é apresentado o detalhamento dos processos indicados no módulo 3, conforme a Figura 50:

FIGURA 50: DETALHES DAS OPERAÇÕES NO MÓDULO 3 DO MODELO. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

⁷³ No *ModelBuilder*, para este conjunto de dados, a equação foi implementada na seguinte forma: $[(SUM) * 100] / [AREA]$

O resultado final de todo o processamento do modelo são os campos criados e calculados⁷⁴ no limite de agregação indicada na tela inicial de interação com o usuário (ver Figura 51):

FIGURA 51: INTERFACE DE UTILIZAÇÃO DO MLME_AGREG. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

A estrutura matricial é o limite de agregação mínima do cálculo proposto. No caso das imagens Landsat utilizadas nesta tese o limite mínimo é mesmo da resolução espacial nominal de 30m, ou 900 m² de área total.

No entanto Small & Millesi (2013) demonstram, entre outros resultados, a multiescalaridade do modelo linear de mistura espectral baseado em membros globais através da técnica que os autores chamam de validação vicária, sendo que esta validação consistiu na comparação dos resultados do modelo, considerando as frações vegetação e sombra, em imagens *WorldView 2* e Landsat. As imagens utilizadas têm data, hora e características de angulação muito semelhante em ambos os sensores e a comparação das frações citadas demonstrou uma correlação linear muito forte entre elas. Fica demonstrado que o mesmo modelo aplicado em escalas diferentes de agregação apresenta alta correlação dos resultados.

Essa demonstração de alta correlação entre os resultados em escalas diferentes adere a duas questões importantes da cartografia na geografia: diferentes níveis de

⁷⁴ O tempo de processamento para cada circuito do modelo é dependente diretamente da quantidade de polígonos presentes no arquivo de agregação e do poder de processamento da máquina utilizada. Para referência, os cálculos de agregação utilizados nesta tese para os setores censitários da RMSP (30.815 setores) utilizando um processador intel i7 (1.9 ghz) e 4gb de memória RAM, consumiu aproximadamente 4 horas, para cada imagem separadamente, sendo um tempo total de aproximadamente 24 horas de processamento para o conjunto temporal de 6 imagens.

agregação podem gerar diferentes resultados e interpretações na distribuição espacial do fenômeno e, tão importante quanto, a agregação mínima representada pelo pixel da imagem na maioria das vezes não possui significado territorial em si mesma.

Tendo estas questões em mente, o modelo descrito foi utilizado para a caracterização da distribuição espaço temporal das frações nos três níveis de agregação citados e também essa mesma distribuição no interior dos limites das favelas do município de São Paulo. Os resultados obtidos foram utilizados para o cálculo da correlação espaço-temporal interna entre as frações obtidas a partir do modelo MLME e também das correlações entre estas frações e dados externos, especificamente os lançamentos imobiliários verticais.

Capítulo 5: Resultados e discussão

As sombras da metrópole: umas das faces da habitação regular em São Paulo e na RMSP a partir do modelo de mistura espectral

5.1. A escala temporal da verticalização promovida pela habitação formal

Entre 1985 e 2015, foram registrados 13.964 lançamentos imobiliários verticais entregues na RMSP. Somados, estes empreendimentos totalizam uma área construída de 138.739.302,82 m² (aproximadamente cento e trinta e nove milhões de m² ou cento e trinta e nove Km²).

Estes dados revelam que a média histórica do tamanho de cada empreendimento vertical nestes 30 anos é de aproximadamente 9.900 m². A área total somada dos terrenos utilizados para a construção dos empreendimentos no período é de 36.957.245 m² (aproximadamente trinta e sete milhões de metros quadrados), contabilizando uma proporção histórica no período de que para cada m² de terreno disponível foram construídos 3,75 m², ou seja, o aproveitamento médio do terreno foi superior a 3,5 vezes.

Estes dados demonstram o alto grau de aproveitamento vertical do solo que a RMSP enfrentou nos últimos 30 anos, mas tão importante quanto esta constatação é a de que mais de 90% dessa verticalização encontra resposta na produção de unidades habitacionais.

Para demonstração dessa constatação, elaboramos o seguinte procedimento: considerando os dados dos censos demográficos de 1991, 2000 e 2010 (IBGE), agregamos os totais de domicílios do tipo apartamento contabilizados em cada período de coleta citado. Consideramos que em 1991 o levantamento censitário continha todos os lançamentos imobiliários (CEM) entregues até então e, a partir daí, projetamos o acumulado entre 1991 – 2000 e 2000 – 2010 somando estes acumulados ao dado base obtido no censo de 1991, conforme demonstra o Gráfico 27: abaixo:

GRÁFICO 27: PROJEÇÃO DOS LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS COMBINANDO DADOS DOS CENSOS E LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS VERTICAIS LEVANTADOS PELO CEM. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

Os dados projetados demonstram que os lançamentos imobiliários entregues correspondem a 96,3% do total de domicílios do tipo apartamento levantados pelo IBGE em 2000 e a 94,7% desse mesmo tipo de domicílio em 2010.

O gráfico mostra que, entre 1991 e 2010, aproximadamente 95% de toda produção habitacional do tipo apartamentos consta da base de dados do CEM e que esses representam a proporção de domínio de mercado imobiliário por grandes construtoras e suas subsidiárias.

Além disso, o CEM também disponibiliza o levantamento dos lançamentos de prédios comerciais nos mesmos períodos (entre 1985 e 2015) na RMSP. Levando em conta o grau de abrangência dos dados referentes aos lançamentos residenciais acima citados, podemos extrapolar este grau de abrangência também para o levantamento dos lançamentos comerciais.

Com esta ideia, pudemos projetar a participação dos lançamentos destinados à habitação em relação ao total de construções verticais na RMSP. Para este cálculo, consideramos todos os lançamentos comerciais com 3 pavimentos ou mais e os comparamos,

em números absolutos e percentuais aos lançamentos residenciais através de suas quantidades acumuladas no tempo, conforme mostra a Tabela 6 a seguir:

TABELA 6: COMPOSIÇÃO PERCENTUAL DOS LANÇAMENTOS RESIDENCIAIS E COMERCIAIS NA RMSP ENTRE 1985 E 2010. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

<i>Ano</i>	<i>1991</i>	<i>2000</i>	<i>2010</i>
Lançamentos comerciais acumulados	133	437	927
Lançamentos imobiliários verticais acumulados	109148	380928	718155
Totais brutos	109281	381365	719082
% dos lançamentos comerciais no total	0,1217	0,11459	0,12891
% dos lançamentos imobiliários no total	99,8783	99,8854	99,8711

Conclui-se que em todos os períodos censitários a participação da produção habitacional foi superior a 99,8% do total de verticalização produzida no espaço e tempo⁷⁵ na EMSP no período considerado. No período total, de 1985 a 2010, o percentual de verticalização pela habitação foi de exatos 99,87%.

Portanto aproximadamente 99% de toda a alta correlação negativa entre as frações substrato e sombra em áreas urbanizadas da RMSP é resultado da produção habitacional verticalizada na área. Vale frisar que essa parte do trabalho considera os dados relacionados ao mercado formal de habitação, que foi responsável por lançar o município de São Paulo e a sua região metropolitana às alturas, ao pensarmos no número de andares, nos últimos 30 anos.

Os dados mostram que a relação empreendimentos/andares tende a aumentar ao longo do tempo na RMSP apontando taxas de ritmo crescimento muito dispares entre os dois indicadores, conforme mostra o Gráfico 28 a seguir:

⁷⁵ Para generalização das diferentes definições que as legislações e planos municipais possam apresentar sobre verticalização, foram considerados como verticais todos aqueles empreendimentos que possuem mais de dois andares.

GRÁFICO 28: AUMENTO NO NÚMERO DE ANDARES NOS EMPREENDIMENTOS AO LONGO DO TEMPO. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

Essa tendência fica clara na comparação do acumulado entre os dados citados acima. O Gráfico 29 mostra com clareza o acúmulo histórico da verticalização em relação ao número de empreendimentos na RMSP:

GRÁFICO 29: RELAÇÃO ENTRE OS ACUMULADOS DO NÚMERO DE LANÇAMENTOS DE EMPREENDIMENTOS VERTICAIS E ANDARES ENTRE 1985 E 2015. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

A análise destas informações se constitui em evidências que suportam o modelo proposto de detecção da expansão urbana vertical a partir do mapeamento da correlação entre as frações substrato e sombra do MLME.

5.2. Verticalização e habitação formal na RMSP: Relações e correlações registradas na mistura espectral

Se pudéssemos empilhar todos os andares construídos entre 1985 e 2015 na RMSP, considerando um pé-direito estrutural (altura de piso a piso) igual a três metros, teríamos um edifício com altura aproximada de 600 km. Se considerarmos os empreendimentos que tem previsão de entrega até o ano de 2017 esse número pode alcançar 640 km de altura.

Para ter uma ideia aproximada dessa magnitude, basta mencionar que a altitude de órbita do Landsat 8, um dos satélites utilizados para coleta de informações nesta tese, é de 705 km. A verticalização na RMSP nos últimos 30 anos é, literalmente, exosférica! Essa dimensão ajuda a entender os efeitos da fração sombra sobre os métodos de classificação do uso do solo em áreas densamente urbanizadas e metropolitanas.

Calculando-se a correlação entre as frações substrato, vegetação e sombra para o conjunto da área da RMSP entre 1986 e 2015 (conjunto de imagens Landsat) observamos os seguintes valores na Tabela 7 a seguir:

TABELA 7: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS VARIÁVEIS EXTRAÍDAS DO MLME ENTRE 1986 E 2015 PARA OS LIMITES INTERNOS DA RMSP⁷⁶. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

Itens correlacionados	<i>r</i>
Substrato X vegetação	-0,58
Substrato X sombra	-0,27
Vegetação X sombra	-0,63

A correlação temporal agregada para toda a área da RMSP é negativa entre as três frações, comportamento esperado já que a mudança de classes de uso se dá, no tempo, pela migração de valores entre as frações mapeadas.

A correlação negativa entre a vegetação e as outras duas frações é mais intensa do que a correlação entre substrato e sombra, mostrando que, de maneira geral (para o

⁷⁶ A agregação espacial foi feita utilizando o MLME_Agreg.

agregado da RMSP), a vegetação é a fração de insumo para a criação das frações substrato e sombra.

Todavia, apesar da fraca correlação apresentada entre substrato e sombra não indicar, à primeira vista, mudanças importantes a serem captadas pela interação entre as duas frações a partir do MLME, a intensidade demonstrada do processo de verticalização e a concepção de concentração localizada desse processo, apontam para uma necessária análise localizada. Na prática, a correlação entre substrato e sombra será majoritariamente negativa em áreas urbanizadas e tende a ser mais forte quanto maior o grau de verticalização da área.

Um exemplo prático ajuda a entender o processo, e a confirmar empiricamente o modelo proposto. Para tanto realizamos os cálculos das frações percentuais extraídas do MLME e agregamos por setores censitários (utilizando o MLME_Agreg), no período exemplo de 20 anos, entre 1989 e 2010, como demonstrado nos Mapas 17 até 22 a seguir:

MAPA 17: DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO SUBSTRATO: 1989. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

MAPA 18: DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO SUBSTRATO: 2010. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

MAPA 19: DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VEGETAÇÃO: 1989. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

MAPA 20: DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VEGETAÇÃO: 2010. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

MAPA 21: DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO SOMBRA: 1989. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

MAPA 22: DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO SOMBRA: 2010. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Comparando os mapas e a variação de cada fração no tempo podemos afirmar que:

- 7) A fração substrato apresentou diminuição na área central da cidade de São Paulo e também se retraiu nas franjas do *cotinuuum* urbano, especialmente na faixa entre 30 e 50% de substrato em 1989, onde a maioria das áreas passou para a faixa entre 20 e 30% em 2010;
- 8) A fração vegetação teve uma variabilidade menor no *continuum* urbano se comparada à fração substrato, sendo a mais perceptível mudança no período o incremento de áreas com 0% de vegetação na zona Leste da cidade de São Paulo;
- 9) Por fim, a fração sombra foi a que apresentou a característica mais clara de expansão radial a partir do centro consolidado do *continuum* urbano no período de 20 anos, tanto nas áreas onde houve diminuição de substrato quanto de vegetação;

A questão retoma o modelo proposto para identificação da dinâmica de verticalização: por que o substrato diminuiu ao longo do tempo em extensas áreas da RMSP? A resposta está associada ao incremento de sombras pelos prédios residenciais e uma análise localizada permite a construção de uma evidência empírica.

Tomemos como exemplo o município de Taboão da Serra, localizado na divisa oeste da RMSP. O município, densamente urbanizado, com largas áreas de ocupações irregulares e favelas e paralelamente, por sua localização próxima a áreas mais valorizadas da cidade de São Paulo como os bairros do Morumbi e do Butantã, vêm recebendo um forte aporte de empreendimentos residenciais verticais de grande porte nos últimos 20 anos. O mapa a seguir mostra a localização e as mudanças das três frações com foco no município:

MAPA 23: VARIAÇÃO DAS FRAÇÕES ENTRE 1989 E 2010 EM TABOÃO DA SERRA/SP. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Fica evidente que no caso de Taboão da Serra, assim como no caso geral da RMSP, houve diminuição da fração substrato e aumento da fração sombra no mesmo período. A fração vegetação sofreu pouca alteração, isso porque, no exemplo de Taboão da Serra, o município apresentava baixos níveis de vegetação urbana já no início da série histórica considerada.

Detalhando a análise local (ver Mapa 24) é possível identificar os focos de verticalização que explicam a “falsa” diminuição de substrato na área, encoberto por sombras:

MAPA 24: VERTICALIZAÇÃO RESPONSÁVEL PELO SOMBREAMENTO DO SUBSTRATO EM UMA ÁREA DE TABOÃO DA SERRA/SP. IMAGENS ORBITAIS ADAPTADAS DO GOOGLE EARTH, 2016. FONTE: ORGANIZADO PELO AUTOR.

Para o conjunto da RMSP, a visualização dos dados mostra que a sombra, especialmente distribuída, tem correlação negativa tanto com o substrato quanto com a vegetação. No gráfico 30 a seguir podemos observar essa distribuição espaço temporal das correlações das frações calculadas para cada setor censitário da RMSP:

GRÁFICO 30: DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS CORRELAÇÕES ENTRE OS MEMBROS DE REFERÊNCIA EXTRAÍDOS A PARTIR DO MLME POR SETORES CENSITÁRIOS NA RMSP. OBS. DADOS AGREGADOS GERADOS A PARTIR DO MLME_AGREG.

Observamos que há na espacialização das correlações temporais uma troca entre as frações vegetação e substrato, mas ambas se correlacionam negativamente com a fração sombra ao longo do tempo.

A dedução lógica implica que a vegetação, desconsiderando suas variações fenológicas naturais, tende sempre a diminuir em relação à fração substrato no tempo quanto maior sua proximidade de áreas urbanizadas, extinguindo-se em alguns pontos intraurbanos. Todo acréscimo temporal de fração sombra em áreas cujo montante de vegetação é nulo só pode estar relacionado a verticalização, portanto ainda que indetectável sem esta conclusão lógica, é substrato.

Caso esse acréscimo de sombra ocorra em áreas “não urbanas” pode ser explicado pela presença de grandes corpos d’água, pois se houver variabilidade da fração sombra essa variabilidade será cíclica, diferente da variabilidade da sombra intraurbana que tende a ser cumulativa no tempo.

Relacionando esses aspectos às pesquisas censitárias entre 1991 e 2010 e ao levantamento e mapeamento dos empreendimentos imobiliários verticais entre 1985 e 2015 é possível verificar que os dados corroboram com a ideia de diminuição da fração substrato e aumento da fração sombra, conforme a urbanização se torna mais concentrada.

O gráfico 31 a seguir mostra que se comparando os fatores de correlação entre os domicílios do tipo apartamento indicados pelo IBGE e as frações substrato e sombra acumulados nos mesmos períodos de coleta obtemos duas curvas inversas. O afastamento das curvas indica as áreas centrais mais verticalizadas e o encontro ou a inversão das curvas indicam as áreas onde o processo de verticalização não ocorreu ou ocorreu com baixa intensidade:

GRÁFICO 31: CORRELAÇÕES TEMPORAIS ENTRE O CENSO E O MLME POR DISTRITOS. OS DADOS ESTÃO DISPOSTOS DE NORTE A SUL DE ACORDO COM A COORDENADA DO CENTROIDE DO POLÍGONO, NESTE CASO SÃO OS DISTRITOS DA RMSP. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Essa constatação se repete ao analisarmos a relação espaço-temporal entre o número de andares acumulados entre 1985 e 2015 e as frações substrato e sombra.

Considerando os quase 30.800 setores censitários do IBGE em 2010, 5.094 setores (aproximadamente 16,5% do total) tiveram algum incremento de andares no período analisado. Do montante de setores com incremento vertical, 4.703 setores apresentaram correlação entre aumento do número de andares e sombra diferente de zero.

Destes, 38,1% apresentaram correlação negativa com a fração sombra e 61,9% apresentaram correlação positiva com esta mesma fração extraída pelo MLME. O gráfico 32 a seguir mostra essa distribuição:

GRÁFICO 32: CONCENTRAÇÃO DOS VALORES DE CORRELAÇÃO ENTRE ANDARES E FRAÇÃO SOMBRA PARA OS SETORES CENSITÁRIOS QUE APRESENTARAM VERTICALIZAÇÃO ENTRE 1985 E 2015. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Tomando apenas os valores mais significativos de correlação, negativas menores que -0,6 e positivas maiores que 0,6, observamos que 9,9% dos setores censitários encontram-se na faixa negativa menor que -0,6 enquanto 28,7% encontram-se na faixa diametralmente oposta.

Visualizando os dados a partir do eixo norte/sul demonstra-se que o aumento da fração sombra no tempo tem forte componente do incremento de andares no espaço urbano, conforme se pode observar no Gráfico 33 a seguir:

GRÁFICO 33: DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE CORRELAÇÃO ENTRE ANDARES E FRAÇÃO SOMBRA PARA OS SETORES CENSITÁRIOS QUE APRESENTARAM VERTICALIZAÇÃO ENTRE 1985 E 2015 NA ORIENTAÇÃO NORTE/SUL, A PARTIR DAS COORDENADAS DOS CENTROIDES DOS SETORES CENSITÁRIOS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Observa-se que a concentração de correlações negativas se encontra ao sul, neste caso associada a baixa variabilidade de sombras no tempo por conta da maior presença de vegetação, mas, essencialmente, pela presença de grandes corpos d'água.

Esse conjunto de dados, referentes ao incremento de andares, unidades ou empreendimentos, são uma imagem da produção habitacional regular na RMSP. Essa produção habitacional histórica relaciona-se ao efeito do polo atrator representado pela concentração de empregos e estruturas urbanas da cidade de São Paulo dentro de seus limites.

Contudo, em função da valorização das áreas centrais, a moradia espalha-se pelas áreas mais periféricas e em conurbação contínua, essencialmente produzidas para o contingente de trabalhadores que se deslocam ao centro da cidade de São Paulo diariamente.

Ainda que seja regular sob o ponto de vista da formalidade, essa produção habitacional também se periferiza, caminhando, de certo modo, ao encontro dos limites periféricos de concentração da habitação irregular e precária na RMSP. Esse processo tende a empurrar as favelas para áreas cada vez mais periféricas da metrópole, como historicamente é percebido.

Essa atração central de São Paulo está impressa nos dados. Dos 4.703 setores censitários cuja verticalização está correlacionada à sombra e, portanto, são áreas mais densas, 3.551 estão no Município de São Paulo, lembrando-se que este é um dado acumulado de 30 anos.

No entanto, essa constatação simples não é capaz de assimilar a dinâmica espacial que estes dados apresentam no tempo. O que ocorreu foi o aumento da densidade dos empreendimentos em direção às áreas mais periféricas de São Paulo e aos outros municípios da RMSP, sendo que, esse aumento da densidade de empreendimentos fica ainda mais evidente quando observamos o aumento da quantidade de andares construídos acumulados por períodos distintos, mostrando o movimento de expansão vertical periférica também como um fenômeno importante.

Os Mapas 25 até 29 a seguir mostram esse processo através de uma sequência temporal:

MAPA 25: ACUMULADO DE ANDARES POR SETORES CENSITÁRIOS ENTRE 1985 E 1990. ORGANIZADO A PARTIR DE CEM (2015) E IBGE (2010). FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE CEM (2015).

MAPA 26: ACUMULADO DE ANDARES POR SETORES CENSITÁRIOS ENTRE 1991 E 2000. ORGANIZADO A PARTIR DE CEM (2015) E IBGE (2010). FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE CEM (2015).

MAPA 27: ACUMULADO DE ANDARES POR SETORES CENSITÁRIOS ENTRE 2001 E 2005. ORGANIZADO A PARTIR DE CEM (2015) E IBGE (2010). FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE CEM (2015).

MAPA 28: ACUMULADO DE ANDARES POR SETORES CENSITÁRIOS ENTRE 2006 E 2010. ORGANIZADO A PARTIR DE CEM (2015) E IBGE (2010). FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE CEM (2015).

MAPA 29: ACUMULADO DE ANDARES POR SETORES CENSITÁRIOS ENTRE 2011 E 2015. ORGANIZADO A PARTIR DE CEM (2015) E IBGE (2010). FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE CEM (2015).

A análise dos mapas permite dizer que a verticalização intensa se encontra totalmente concentrada no município de São Paulo na década de 80, especialmente na Zona Centro-Sul da cidade, com raros empreendimentos com algum grau de verticalização fora destes limites.

Na década de 90 esse processo de verticalização se intensifica em todas as bordas das zonas lindeiras a área central da cidade de São Paulo, mantendo o processo de intensificação vertical na Zona Sul, contudo já apresenta os primeiros aglomerados de alta verticalização no extremo da Zona Leste, ainda no município de São Paulo, e também fora dos limites do município especialmente nas divisas externas com a Zona Oeste e Zona Norte e especialmente o vetor de concentração vertical em direção ao ABC paulista.

No primeiro período da década de 2000, compreendido entre 2001 e 2005 há um processo de aglomeração vertical novamente nas zonas internas do município de São Paulo, que se manifesta com maior intensidade no vetor do ABC (Santo André, São Bernardo e São Caetano). Já o segundo período desta mesma década, que vai de 2006 a 2010, mantém a densidade vertical produzida nos setores internos da RMSP, mas atinge com a mesma intensidade, novamente, o ABC paulista. Além disso segue com forte incremento vertical na direção noroeste da RMSP, compreendendo Osasco e Barueri, e, também, nesse período, apresenta concentração de prédios verticais no extremo leste da cidade de São Paulo.

A partir de 2011, o avanço vertical é o mais expressivo de toda a série histórica. Há uma retomada das áreas centrais da cidade de São Paulo, com grande concentração de verticalização em escalas mistas (regulada pela Lei de Zoneamento), mas já em áreas consolidadas sob esse ponto de vista, contudo a concentração vertical é expressiva em direção à zona leste do município.

Do lado oeste, a verticalização avança no sentido de Osasco, Barueri e Taboão da Serra. Ao Norte, a conurbação com a cidade de Guarulhos também tem sua verticalização intensificada nesse período. O mesmo ocorre com a região do ABC, especialmente em São Bernardo do Campo. Ao Leste na RMSP a concentração vertical passa por Poá, Ferraz de Vasconcelos e chega com intensidade até Mogi das Cruzes. Focos de intensa verticalização chegam até Cajamar, no extremo norte da RMSP. Apenas a partir de 2011 há um novo incremento vertical intenso na área consolidada do centro de São Paulo, enquanto para todos os outros períodos e incluindo este último citado há um deslocamento periférico na densificação da verticalização. Portanto, conforme apontado inicialmente, pode-se afirmar que ocorre uma clara intensificação da densidade vertical na RMSP. O Mapa 30

mostra apenas os setores censitários em que o cúmulo de andares por período foi superior a 50 andares:

MAPA 30: ACUMULADO DE ANDARES POR SETORES CENSITÁRIOS ENTRE 1985 E 2015 (ACIMA DE 50 ANDARES). ORGANIZADO A PARTIR DE CEM (2015) E IBGE (2010). FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE CEM (2015).

Essa expansão radial foi intensificada a partir da primeira metade da década de 2010, provavelmente associada a programas habitacionais federais de grande escala como o “Minha Casa, Minha Vida”, mas é um processo histórico acumulado que já se pronunciava mesmo na década de 80.

Com essa tendência radial de distribuição da densidade vertical na RMSP, em todo o período analisado, há uma descentralização da moradia associada ao incremento vertical, mas não existe grande incremento de verticalização associado a outros usos em processo similar.

Esse processo de espraçamento é historicamente identificado em períodos anteriores onde a legislação urbana limitou o adensamento vertical na cidade de São Paulo (Somekh & Gigliotti, 2011). Contudo, essa nova fase da verticalização associada à possibilidade de compra do direito de construir (intervenções urbanas) e ao novo ciclo de injeção de capital nos agentes da construção imobiliária através de programas habitacionais de grande escala e o acesso ao crédito (Minha Casa, Minha Vida), criam a partir de 2010 a possibilidade desse adensamento vertical tanto interna quanto externamente ao município de São Paulo.

A exemplo disso, dos 1339 empreendimentos comerciais construídos na RMSP (CEM, 2015) entre 1985 e 2013, 79,7% deles (1067) encontram-se na cidade de São Paulo em áreas centrais e apenas 19,3% estão localizados em áreas onde também houve grande incremento vertical associado a habitação, majoritariamente em São Bernardo do Campo e Barueri.

Os dados mostram que a produção habitacional foi a maior responsável pelas alterações detectadas pelo MLME. Nesse período, considerando apenas o município de São Paulo, 39,8% dos setores apontados (1.415) apresentam correlação temporal negativa entre acúmulo de andares e sombra enquanto 60,2 % apresentam correlação positiva. Ou seja, no município de São Paulo, onde estão localizados 75,5 % dos setores censitários que tiveram algum incremento vertical entre 1985 e 2015 em mais de 60 % dos casos houve aumento de sombra, em algum grau, causado pela verticalização.

Aproximadamente 49,1% das áreas ocupadas por setores com lançamentos, incluindo os outros municípios da RMSP que totalizando 475,48 km², possuem correlação positiva entre incremento de andares e sombra extraída do MLME. Considerando apenas São Paulo, essa proporção sobe para 52,57 %. Contudo, ao calcularmos a densidade de andares por km² nos setores com correlação positiva e negativa entre andares e sombra separadamente, conclui-se que em setores com correlação negativa (situação onde o aumento de andares não gerou sombra) a densidade é de 364,02 andares/km², enquanto nos setores em que a correlação é positiva (situação onde o aumento de andares gerou sombra) o valor é de 448,74 andares/km². A partir de correlações mais significativas, essa diferença de densidade tende a aumentar: efetuando-se o mesmo cálculo apenas para setores com correlações superiores a 0,6 e inferiores -0,6 (para os mesmos dados anteriores) obtivemos uma densidade de 438,83 andares/km² para a correlação positiva e 299,45 andares/km² para a correlação negativa. Conclui-se que a correlação se intensifica em função do aumento da densidade da verticalização ao longo do tempo.

Assim, na ausência de dados primários disponíveis sobre o incremento vertical, em sua grande maioria associado à produção habitacional, sugerimos que a correlação interna entre as frações substrato e sombra, extraídas a partir de membros de referência global, são um indicador possível para o mapeamento e rastreamento desse processo no espaço e no tempo. Essencialmente, no espaço urbano, as correlações negativas entre substrato e sombra são cada vez mais negativas em função do adensamento vertical habitacional no tempo. Podemos observar esse comportamento no Gráfico 34 a seguir:

GRÁFICO 34: TOTAL HISTÓRICO DE ANDARES PRODUZIDOS POR FAIXAS DE CORRELAÇÃO ENTRE AS FRAÇÕES SUBSTRATO E SOMBRA. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE CEM (2015).

Em suma, espera-se que a fração sombra esteja correlacionada negativamente com a fração substrato em áreas de verticalização intensa, e como já demonstrado anteriormente, essa verticalização é explicada em índice superior a 98%, entre 1985 e 2015 pelo setor habitacional.

Desse modo, é previsível um padrão espaço-temporal em que a fração sombra extraída do MLME na RMSP apresente correlação positiva tanto com a contagem do IBGE de domicílios do tipo apartamento quanto com o acumulado de empreendimentos verticais lançados, pois ambos representam o mesmo montante no registro temporal de aumento.

Se a fração sombra correlaciona-se positivamente com a verticalização captada pelos censos demográficos e pelo mapeamento espaço temporal dos empreendimentos imobiliários verticais, conclui-se que a correlação temporal entre as frações sombra e substrato terá a mesma lógica nos setores onde houver verticalização, ou seja, majoritariamente negativa, sendo uma imagem invertida da correlação entre o número de andares dos lançamentos imobiliários verticais e a própria fração sombra.

Resumidamente, o número de andares correlaciona-se positivamente com a fração sombra e, quanto maior essa correlação maior é a verticalização acumulada no tempo. Em consequência, conforme previsto no modelo proposto de verticalização explicada pela

correlação negativa entre substrato e sombra, quanto mais verticalizada a área ao longo do tempo, menor a proporção de substrato captada no MLME, portanto o número de andares terá correlação majoritariamente negativa com a fração substrato. A partir disso, alheio a utilização do mapeamento pontual de empreendimentos habitacionais verticais, é possível estimar as áreas onde a verticalização causou maior transformação do uso do solo ao longo do tempo considerado simplesmente a correlação temporal interna do MLME entre substrato e sombra. Os Gráficos 35 e 36 a seguir demonstram a validade dessa hipótese:

GRÁFICO 35: COMPARAÇÃO DAS CORRELAÇÕES ENTRE NÚMERO DE UNIDADES HABITACIONAIS VERTICAIS (CEM, 2015) E FRAÇÕES SUBSTRATO E SOMBRA DO MLME ACUMULADAS NO MESMO PERÍODO. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

GRÁFICO 36: COMPARAÇÃO DAS CORRELAÇÕES ENTRE NÚMERO DE UNIDADES HABITACIONAIS VERTICAIS (CEM, 2015) E FRAÇÕES SUBSTRATO E SOMBRA DO MLME ACUMULADAS NO MESMO PERÍODO. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

A correlação entre substrato e sombra se revela mais uniforme no território e isso se dá porque ela capta toda a transformação associada às trocas entre substrato e sombra no período analisado, para além daquela causada apenas pela verticalização associada ao setor

habitacional. Ainda assim, é clara a influência que a verticalização causa nessa correlação, e os gráficos demonstram isso com clareza.

Uma característica básica deste modelo de detecção modificação vertical (não entendi) do uso do solo ao longo do tempo é que ele capta as áreas mais impactadas pela mudança. Isso significa que o mapeamento das correlações será mais intenso onde a mudança for mais contrastante em relação ao seu estado original.

Essa indicação já foi demonstrada nas imagens de variabilidade temporal das frações, mas significa que as maiores correlações negativas entre substrato e sombra não estão necessariamente associadas as áreas historicamente mais verticalizadas, como a Zona Sul e centro da cidade de São Paulo. Essa verticalização histórica faz com que o efeito de troca entre sombra e substrato seja menos perceptível ao longo do tempo, pois o adensamento vertical já concentrado nestas áreas tende a tornar essa variabilidade menor. Em outras palavras, a sombra em locais historicamente adensados verticalmente não se incrementa no mesmo ritmo de áreas de verticalização mais recente no período, ainda que com densidade menor. Na prática podemos rastrear o caminho tendencial da verticalização no espaço geográfico a partir do MLME.

O Mapa 31 mostra os lançamentos mobiliários verticais por períodos na RMSP:

MAPA 31: DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS VERTICAIS POR PERÍODOS (1986-2015). ADAPTADO DE CEM, 2015.

As áreas onde os quadrados azuis se sobressaem demonstram as áreas mais consolidadas verticalmente o longo do tempo, pois sua concentração se dá entre meados da década de 80 até meados da década de 90 e não há sobreposição significativa de verticalização nas duas décadas seguintes. São, portanto, áreas com menor variabilidade da fração sombra e consequentemente as correlações entre substrato e sombra são negativas, tornam-se áreas menos significativas para a análise.

As áreas onde se sobressaem uma mistura entre os quadrados azuis e os triângulos verdes apresentarão variabilidade de sombra em relação ao substrato maiores do que nas áreas cuja concentração de pontos é mais antiga e consolidada. Estas áreas, portanto, apresentam índices de correlação negativos entre as frações substrato e sombra mais significativos, pois, apresentam maior variabilidade temporal.

Nas regiões onde há uma mistura entre os três períodos, a tendência é a presença das correlações negativas entre substrato e sombra mais significativas da série temporal, e nas áreas onde a presença de círculos vermelhos é mais intensa, referentes a produção habitacional vertical da última década, é onde se localizam o vetor mais recente de verticalização, o qual, contudo, ainda não causou mesma variabilidade da mistura geral. É, entretanto, nestas áreas que se espera as maiores correlações negativas no futuro. O Mapa 32 mostra a distribuição das correlações por distritos na RMSP:

MAPA 32: DISTRIBUIÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA NA RMSP ENTRE 1986 E 2015 POR DISTRITOS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

A comparação entre os dois mapas anteriores mostra que o mapeamento das correlações indica a validade das premissas assumidas, conforme o Mapa 33 a seguir:

MAPA 33: COMPARAÇÃO ENTRE OS PONTOS DE LANÇAMENTOS POR PERÍODOS E O MAPEAMENTO DAS CORRELAÇÕES ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

A partir do uso do MLME_Agreg foi possível também detalhar o mapeamento das correlações por setores censitários. O resultado mostra a estrutura interna de cada distrito e ademais, mostra que algumas áreas muito grandes que sofreram perda de

informação pelo processo de agregação nos distritos, apresentam focos de verticalização não detectados anteriormente, conforme o Mapa 34 a seguir:

MAPA 34: DISTRIBUIÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA NA RMSP DE 1986 A 2015 POR SETORES CENSITÁRIOS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Observamos que a agregação dos valores em setores censitários gerou informação de detalhe, contudo o método coroplético de apresentação do mapa para esta escala tornou difícil a identificação imediata de padrões espaciais destacados.

Neste ponto retomamos a ideia do uso de isotimas proposto por Pérez Machado (2004). Ainda que o método coroplético seja extensamente utilizado, inclusive em vários trechos da presente tese, para alguns fenômenos e processos o uso de representações a partir de superfícies contínuas traz melhores resultados, especialmente em função da escala de representação dos dados.

O processo básico de geração das isotimas parte da aquisição de dados pontuais, sobre os quais aplica-se um método de interpolação para geração de curvas de igual valor. No caso aqui presente, a geração das isotimas teve a seguinte sequência:

- 1) Construção de uma grade pontual regular com equidistância de 30 m entre os pontos (resolução máxima advinda das imagens de origem sem incidência de superamostragem), e posteriormente a transferência dos valores de correlação entre as frações substrato e sombra para estes pontos (a partir da imagem correlação entre substrato e sombra original);
- 2) Seleção dos pontos interiores aos limites da RMSP;

- 3) Aplicação de interpolação por Densidade Kernel⁷⁷, especificando um arquivo de saída com tamanho de célula de 30 m;

Esses passos levaram em conta a baixa densidade de pontos advindos dos centroides em função do distanciamento de seu polígono de origem das áreas centrais da RMSP, pois áreas rurais ou com urbanização rarefeita serão sempre maiores. Assim, houve uma densificação considerável das amostras e com distribuição regular, conforme recomenda Pérez Machado para a produção das isotimas.

Como resultado, o método das isotimas gerou um mapa em que a identificação dos padrões na escala de setores censitários (já que estes deram origem a grade principal de pontos), tornou-se mais clara e precisa, como podemos ver no mapa 35:

⁷⁷ Em estatística, estimativa de densidade Kernel (EDK) é uma forma não-paramétrica para estimar a função de densidade de probabilidade de uma variável aleatória. Estimação da densidade Kernel é um problema fundamental de suavização de dados onde inferências sobre a população são feitas, com base numa amostra de dados finita. Em alguns campos, como o processamento de sinais e econometria é também denominado o método da janela de Parzen-Rosenblatt, recebendo o nome de Emanuel Parzen e Murray Rosenblatt. Em geral o uso da Densidade Kernel indica a Densidade do fenômeno, contudo sua interpretação extrapola estes limites, sendo utilizado na termodinâmica, por exemplo, para interpretação de concentração de calor. Os mapas de ilha de calor são bons exemplos de sua aplicação.

MAPA 35: ISOTIMAS DE CORRELAÇÃO ENTRE AS FRAÇÕES SUBSTRATO E SOMBRA (1986 - 2015), GERADAS A PARTIR DOS CENTROIDES DOS SETORES CENSITÁRIOS E DE UMA GRADE REGULAR DE PONTOS PARA TODA A RMSP. FONTE: IBGE (2010) E COLEÇÃO DE CENAS LANDSAT. ELABORAÇÃO DO AUTOR.

O mapa mostra que os efeitos da verticalização detalhados com mais clareza, pois as correlações negativas mais intensas podem ser verificadas em áreas urbanizadas coincidentes com os vetores de expansão da produção de empreendimentos verticais e as manchas de alta correlação negativa entre as frações substrato e sombra ao longo do tempo, as quais, em sua maioria, se concentram nas áreas centrais da cidade de São Paulo, coincidem com a verticalização historicamente consolidada.

Utilizando os recursos presentes no Google Earth que atualmente disponibiliza uma parte das construções do município de São Paulo em 3D, podemos fazer algumas checagens da sobreposição entre as manchas de correlação mapeadas e seu respectivo tipo de ocupação do solo. Com as atuais construções 3D disponíveis, dois exemplos para as áreas mais centrais do Município de São Paulo são apresentados. O primeiro refere-se a área da Praça da República, onde a figura 52 mostra a concentração de alta verticalização em áreas de alta correlação negativa entre as frações em contraste à mancha positiva que se sobrepõe à praça:

FIGURA 52: DISTRIBUIÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA A PARTIR DA DENSIDADE KERNEL, MOSTRANDO OS CONTRASTES NA PRAÇA DA REPÚBLICA E SOBREPONDO AS CONSTRUÇÕES 3D. FONTE: GOOGLE EARTH 2016. ADAPTADO PELO AUTOR.

O segundo exemplo mostra, na figura 53, pode-se ver o contraste entre a região pouco verticalizada dos Jardins em contraste com seu entorno mais verticalizado, como

o bairro de Pinheiros, mostrando que as manchas, em grande parte, coincidem com a ocupação:

FIGURA 53: DISTRIBUIÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA A PARTIR DA DENSIDADE KERNEL, MOSTRANDO OS CONTRASTES NA REGIÃO DO LIMITE DO BAIRRO DOS JARDINS E SOBREPONDO AS CONSTRUÇÕES 3D. FONTE: GOOGLE EARTH, 2016. ADAPTADO PELO AUTOR.

Desta forma, concluímos que é possível mapear a troca entre as frações substrato e sombra e que isto pode ser um indicador do processo de verticalização com uso do MLME. Contudo, uma observação importante é que, ao analisar o conjunto da mancha produzida pelas isotimas a partir da Densidade Kernel, vemos que o processo de verticalização nem sempre é determinado no MLME pelo aumento de sombra em detrimento do substrato nas áreas urbanas (correlações negativas), mas que em diversos pontos a presença de altas correlações positivas está associada à verticalização também.

Sugerimos uma explicação inicial associada a densidade da área verticalizada, ou seja, conjuntos habitacionais verticalizados, porém isolados, compostos por apenas alguns blocos que guardam distância de outras áreas com verticalização vão gerar sombras, contudo devido à pouca área que ocupam apresentarão também aumento de substrato relativo, em função da proximidade quantitativa entre suas áreas laterais e a sombra gerada e registrada em função da geometria de captação do sensor. Assim, haverá aumento conjunto de ambas as frações, portanto uma correlação positiva.

Com o aumento da densidade de área verticalizada, a qual tende a estar presente em áreas já historicamente mais consolidadas, a relação substrato/sombra muda bastante, com aumento da sombra associada à diminuição do substrato. Basta imaginar a ideia da densificação como um bloco tridimensional, onde a sombra aumenta e o substrato diminui, conjuntamente, proporcionalmente ao aumento da área desse bloco, portanto apresentando correlações negativas.

Não obstante, a verticalização está, em sua maior parte, associada a habitação formal na RMSP, mas a habitação não se produz apenas por meio desse processo. A seguir, analisaremos as relações entre a expansão vertical da habitação formal e as ocupações precárias na RMSP, também sob a ótica do sensoriamento remoto e do MLME.

Às sombras da metrópole: a precariedade e a outra face da habitação na cidade de São Paulo a partir do modelo de mistura espectral

5.3. A escala temporal das mudanças nas favelas e nos loteamentos irregulares da cidade de São Paulo

Entre os anos de 1985 e 2014, as informações disponíveis no banco de dados do HABISP apontam o surgimento de 513 novas favelas na cidade de São Paulo, o que representa aproximadamente 30,7% do total de favelas registradas na referida base de dados. É um número expressivo, especialmente pelo número de favelas implantadas durante as décadas de 1980 e 1990, os quais foram, respectivamente, o segundo e o terceiro maiores períodos de surgimento de novas favelas em toda a série histórica de dados (ver Gráfico 37):

GRÁFICO 37: SURGIMENTO DE NOVAS FAVELAS POR PERÍODOS DECENAIS. FONTE: HABISP, 2015. ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Como já observado de forma mais detalhada no Capítulo 1, 35% das favelas atualmente registradas no HABISP surgiram na década de 1970 no município de São Paulo sendo esse, portanto, o período que registra o maior número de favelas implantadas. Isso significa que o período temporal de imagens orbitais analisados nesta tese (1985 a 2015), já apresenta um intenso acúmulo de favelas desde a primeira imagem utilizada, pois acumula completamente o período de 1970 e parte do período de 1980, também de alta intensidade de favelização.

Se consideramos os dados em termos da área ocupada pelas favelas, a distribuição é semelhante (ver Gráfico 38):

GRÁFICO 38: ÁREAS TOTAIS DE FAVELAS POR PERÍODOS DECENAIS. FONTE: HABISP, 2015. ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Contudo, nessa distribuição, percebemos que as favelas surgidas na década de 1980 e 1990, individualmente, acumulam no tempo uma área semelhante à área produzida na década de 1960, por exemplo. Uma explicação para isso está no fato de que as favelas, ao longo do tempo, expandiram horizontalmente.

Dois pontos importantes para entender esse processo. O primeiro ponto é que as favelas são urbanizadas⁷⁸, retiradas ou atendidas por alguma outra política habitacional ao longo do tempo, ainda que apenas parte delas. O segundo ponto é que o registro no HABISP retrata o limite poligonal atual das favelas e não seu limite inicial. Assim favelas mais antigas, ainda que em números absolutos menores na série temporal, possuem hoje áreas maiores do que na época de seu surgimento.

Essa análise inicial dá indicações importantes do caminho analítico a ser adotado: espera-se que no cálculo de mudanças a partir das frações do MLME na série de imagens Landsat utilizadas capte o surgimento de novas favelas a partir de 1985, data da

⁷⁸ O HABISP também atualiza e disponibiliza para consulta um arquivo contendo os “núcleos urbanizados”, ou seja, favelas que passaram total ou parcialmente por programas de urbanização, os quais consistem, basicamente, em construção de infraestruturas básicas visando a adequação das moradias segundo os padrões definidos. Atualmente (março/2016), as áreas urbanizadas correspondem a aproximadamente 18,7% da área total ocupadas por favelas na cidade de São Paulo, ou seja, ainda que as favelas tenham crescido, seu ritmo de crescimento pode ser “atenuado” pela urbanização em outras áreas.

primeira imagem, assim como a expansão de favelas mais antigas e mais recentes do que esta data.

De fato, Pérez Machado (2012) demonstra que a utilização de limiares de mudança de frações do MLME entre períodos (1986 a 2000 e 2001 a 2010) na RMSP foi capaz de identificar áreas de expansão de substrato e sombra em relação à vegetação, e que grande parte dos resultados obtidos pelo mapeamento do autor correspondeu a partes dos limites poligonais dos assentamentos precários registrados no HABISP, refletindo a sua expansão ou adensamento.

A evolução dos loteamentos⁷⁹ irregulares no tempo segue uma trajetória similar às favelas. Contudo, seu processo de crescimento mais acentuado na década de 1970 se estende, com ainda maior intensidade, para as décadas de 1980 e 1990 (ver Gráfico 39):

⁷⁹ Dos 1934 loteamentos irregulares registrados no arquivo vetorial do HABISP na versão de fevereiro de 2016, 931 não possuíam informação da data do surgimento. Esse dado não compõe os gráficos de distribuição temporal visando uma melhor representação da escala dos dados com informação do surgimento. Além disso, o arquivo disponibilizado pela prefeitura do Município de São Paulo está em constante atualização, sendo que número de poligonais referentes aos loteamentos irregulares na cidade tende a aumentar à medida que novas bases de dados vão sendo acrescentadas. Além disso, com a regularização em andamento de várias áreas, loteamentos são retirados dessa base ao longo do tempo e compõe uma base de dados paralela chamadas “loteamentos excluídos”, contudo esse banco de dados de loteamentos excluídos não é disponibilizado para download no mapa online do HABISP. Uma consulta no próprio sistema de mapeamento online do HABISP permite observar que existem, aparentemente, algumas inconsistências: existem, por exemplo, loteamentos cujas poligonais aparecem como loteamento irregular e como loteamentos excluídos, gerando uma sobreposição e informações contraditórias.

Para esta tese, consideramos como loteamentos irregulares todos aqueles que constavam do shapefile “loteamentos irregulares” disponível para download no mapa online do HABISP em fevereiro de 2016, sendo que as inconsistências citadas não foram consideradas para fins analíticos, considerando então como correta a informação disponibilizada para download.

GRÁFICO 39: QUANTIDADE DE LOTEAMENTOS IRREGULARES SURGIDOS POR DÉCADAS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. FONTE: HABISP, 2016. ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Esse crescimento de loteamentos irregulares, a partir do final da década de 1970, e sua acumulação em larga escala nas duas décadas seguintes (ver Gráfico 40), se deu em decorrência da aprovação da lei federal n. 6766/79, que estabeleceu uma série de regras para a abertura de novos loteamentos tornando o acesso à terra regularizada mais restritivo para as classes de baixa renda (Maricato, 1995)

Considerando as áreas atuais ocupadas por loteamentos e o seu período de surgimento, podemos apontar três observações importantes:

- 4) Há uma significativa diminuição da irregularidade de loteamentos registrados a partir da década de 2000;
- 5) É marcante a existência de áreas irregulares surgidas entre as décadas de 1910 e 1960 e que permanecem irregulares até os dias atuais, e estas áreas assim permanecem por seu status de ocupação de áreas protegidas, em alguns casos, não havendo possibilidade de regularização e soma-se a isso a burocracia envolvida nos processos de regularização;
- 6) Considerando o impacto na ocupação do solo, as décadas de 1980 e 1990 são os períodos que mais contribuíram para a produção de loteamentos irregulares compondo o período temporal analisado nesta tese.

GRÁFICO 40: ÁREAS ATUAIS (EM KM²) OCUPADAS POR LOTEAMENTOS IRREGULARES E SUA DATA DE SURGIMENTO NA CIDADE DE SÃO PAULO. FONTE: HABISP, 2016. ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Para uma ideia mais clara, tratando da série histórica de 90 anos⁸⁰, aproximadamente 22,3% de todos os loteamentos irregulares surgiram nas décadas de 1980 e 1990 e, se levarmos em conta apenas os limites que possuem a informação do ano de surgimento, esse valor sobe para aproximadamente 43,7% do total. Se levarmos em conta a área atual ocupada pelos loteamentos, aqueles surgidos entre as décadas de 1980 e 1990 respondem por 27,8% da área total atual, e se tratarmos apenas dos dados com informação existente da data de origem chega-se a aproximadamente 84,5% da área total.

Aproximadamente 11% da área ocupadas pelos loteamentos clandestinos estão em áreas municipais protegidas (correspondendo a 16,9 Km²), sendo concentrados na zona Sul (aproximadamente 15,2 Km²) e na zona Leste (aproximadamente 1,73 Km²). As áreas de favelas em áreas de proteção ambiental, correspondem a, aproximadamente, 1 Km² ou 4,2% da área total, seguem a mesma distribuição: 0,45 km² na zona Sul e 0,55 Km² na zona Leste (ver Mapa 36):

⁸⁰ O primeiro registro de surgimento no HABISP é de 1906 e o último de 2006.

MAPA 36: FAVELAS, LOTEAMENTOS IRREGULARES E ÁREAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL NA CIDADE DE SÃO PAULO. HABISP, 2015 E IBGE, 2010. ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Essa presença de loteamentos irregulares e favelas em áreas de proteção ambiental ocorre em função da periferização de ambos. Esta ocupação avança sobre áreas mais distantes do centro valorizado onde, mesmo que não existam áreas ambientalmente protegidas, ainda apresentam concentração de vegetação e outros sistemas naturais em menor grau de alteração pela ocupação urbana. Essa constatação leva a outra comprovação mais evidente: com menor alteração pelo uso urbano, há uma menor infraestrutura mínima. Além disso a aprovação da lei estadual nº 989 de 1975, a qual vai disciplinar⁸¹ o uso do solo para proteção de áreas de mananciais e demais reservas hídricas de interesse da RMSP, provocou o desinteresse dos produtores imobiliários nestas áreas. A impossibilidade de uso formal para

⁸¹ Além da lei estadual 898/75, deve-se atentar às leis: 1176/76, a qual delimita as áreas de proteção nos mananciais; 7663/91, a qual estabelece as normas e orienta a política estadual de recursos hídricos; 9866/97, que dá as diretrizes e normas para proteção e recuperação de bacias hidrográficas nos mananciais do estado de São Paulo; 12183/05, a qual estabelece a cobrança pelo uso dos recursos hídricos no estado de São Paulo e a lei 12233/06, que trata da definição da área de proteção da bacia do Guarapiranga. Fonte: ISA (Instituto Sócio Ambiental: https://www.socioambiental.org/esp/agua/pgn/copy_of_index_html)

habitação em áreas de mananciais teve um efeito perverso ao desvalorizar tais áreas: gerou um grande processo de ocupação irregular.

Essa lógica de ocupação é demonstrada na “análise espectral da metrópole”, onde a presença de umidade e vegetação fotossinteticamente ativa aumentam em direção aos extremos norte e sul, contudo as favelas presentes nos mesmos quadrantes apresentam resposta espectral diversa: pouca vegetação, no geral.

Para o modelo de mistura espectral, essa periferização e ocupação em áreas, originalmente, com menor alteração antrópica, é um indicativo de que as mudanças ao longo do tempo esperadas entre os membros de referência calculados a partir do MLME sejam mais expressivas entre as frações vegetação e sombra transformando-se em substrato. Pérez Machado (2012) demonstra a validade dessa hipótese pela identificação de mudanças no uso da terra (urbanização) em São Paulo mapeando os limiares percentuais de transformação entre vegetação e sombra para a fração substrato entre 1986 e 2010.

Se compararmos aos resultados obtidos no mapeamento dos empreendimentos verticais através da correlação entre substrato e sombra, é interessante ressaltar que a lógica do modelo se inverte para o caso de favelas e loteamentos irregulares quando comparamos às premissas adotadas para a habitação formal e sua verticalização, pois no caso das favelas e loteamentos é o incremento de substrato em si que pode ajudar a identificar sua evolução, ainda que haja, em menor escala, a verticalização habitacional em favelas. Contudo a proporção de sombreamento sobre substrato não representa uma variação tão significativa quanto no caso da verticalização da habitação formal, pois pela própria premissa da autoconstrução e da falta de regulação urbanística não há uma linearidade facilmente determinável.

5.4. Favelas, Loteamentos Irregulares no Município de São Paulo: Relações e correlações registradas na mistura espectral

A soma dos limites atuais das favelas e loteamentos irregulares disponibilizados pelo HABISP, ocupam, aproximadamente, 12,5 % da área do município de São Paulo: 1,8% da área correspondente às favelas e 10,7 % correspondentes aos loteamentos irregulares.

Os percentuais não parecem muito significativos, mas se considerarmos o tamanho do município de São Paulo esses 12,5% equivalem a aproximadamente 190 km² de

área ocupada, ou 29.687,5 campos de futebol⁸². Além disso, grande parte destas ocupações precárias e irregulares estão em áreas ambientalmente sensíveis, muitas outras em áreas sujeitas a risco geotécnico e no geral distante de infraestruturas urbanas mínimas, como já discutido em capítulos anteriores.

Outra característica importante destas áreas é que seu aumento em termos de ocupação do solo urbano está necessariamente relacionado ao aumento de pessoas vivendo nestas áreas. É uma constante básica na habitação: na cidade formal, a infraestrutura antecede a chegada dos moradores enquanto que na cidade informal ocorre o inverso, os moradores chegam antes da infraestrutura.

Neste sentido, a cidade formal pode apresentar uma grande densidade construtiva, especialmente vertical, com baixa densidade populacional.

A respeito desse tema, densidade e verticalização, Nakano (2015) mostra que na cidade de São Paulo, nos períodos entre 1990 e 2000 e entre 2000 e 2010, houve uma “inversão demográfica” no centro antigo e no centro expandido da cidade concomitante a uma “periferização persistente”. O autor mostra que 15,6 % do total de distritos de São Paulo perderam população em ambas as décadas, 39,6 % perderam população na década de 1990 e retomaram o crescimento populacional na década de 2000 e que 40,6 % dos distritos apresentaram “periferização persistente” em ambas as décadas. Em alguns casos o autor aponta distritos que ganharam grandes quantidades de moradia verticalizada ao mesmo tempo em que perderam população, levando ao que o autor chama de “cidade oca”.

Para uma análise sob a terminologia de Milton Santos, vemos que os fluxos no espaço urbano não assumem correspondência diretamente proporcional e linear ao acúmulo histórico de fixos neste mesmo espaço ao compararmos a habitação formal e informal. Assim, a periferização das favelas e loteamentos irregulares apresentam uma dinâmica de crescimento sócio demográfica mais intensa do que as áreas de habitação regular, ou seja, o produto da divisão entre a densidade demográfica e a densidade de unidades habitacionais nestas áreas tende a ser maior.

Para um entendimento mais claro consideremos a quantidades de unidades contabilizadas pelos empreendimentos imobiliários verticais na RMSP, que é de 1.088.110 unidades, e o total de domicílios em favelas registrados no HABISP, os quais perfazem 404.914 unidades. Efetuando um cálculo simples para obtenção da densidade de unidades habitacionais das duas modalidades de ocupação do solo, basta dividirmos esse total de

⁸² Considerando as medidas oficiais mínimas (FIFA) de 100m x 64m.

unidades em ambos os casos por suas respectivas áreas totais ocupadas em hectare, resultando um valor de aproximadamente 0,022 unidades/m² no caso dos empreendimentos verticais⁸³ e 0,014 unidades/m² no caso das favelas. Fica evidente que as favelas possuem uma menor densidade construtiva.

Contudo, esse cálculo se inverte ao pensarmos na densidade demográfica. Considerando para os empreendimentos verticais (formais) a ocupação de uma única família por unidade e uma média de 3,3 pessoas por família (PNAD, 2010), chegamos a uma densidade demográfica de 742,06 habitantes/ha. Para as favelas, considerando uma média de pessoas por família igual ao dobro das áreas regulares⁸⁴, ou seja 6,6 pessoas por família, chegamos a uma densidade de 984,26 habitantes/ha. Assim, a relação densidade construtiva/densidade demográfica demonstra que favelas são lugares de alta concentração de pessoas em pouco espaço, a coabitação de famílias, por exemplo, é uma situação comum.

Esse resultado reflete diretamente na maneira como o MLME pode ser utilizado para entender o processo de mudança e evolução nas áreas de favelas e loteamentos irregulares. A fração sombra não se mostra neste caso como um forte indicador de incremento das áreas, pois o menor reduz em larga escala os efeitos do sombreamento. Assim, como já apontado por Machado (2012), o mapeamento temporal destas áreas pode se basear nas mudanças das frações vegetação e sombra para a fração substrato.

Para nossa análise realizamos os cálculos agregados das três frações do MLME (substrato, vegetação e sombra) utilizando os limites das favelas e dos loteamentos irregulares, ambos fornecidos pelo HABISP. A aplicação do cálculo foi feita a partir de uma versão adaptada do MLME_Agreg, já mostrado anteriormente. Em linhas gerais, a mudança no modelo restringiu-se apenas à alteração do dado de entrada dos limites de agregação, o

⁸³ Para este cálculo consideramos a metragem total dos empreendimentos, incluindo áreas de lazer e demais dependências, pois se considerarmos apenas a área útil das unidades, esse coeficiente de aproveitamento se eleva para incríveis 0,62.

⁸⁴ Para maiores detalhes sobre as estimativas de moradores em favelas na cidade de São Paulo consultar Marques et al, 2003. Além disso, diferente das áreas regulares, o tamanho das famílias dos habitantes de favelas não apresenta a mesma heterogeneidade das áreas formais, além da coabitação de famílias no mesmo domicílio com muita frequência, o que torna seu cálculo mais complexo, mas certamente há mais pessoas por domicílios em favelas do que em áreas formais.

qual para os setores censitários foi do tipo “vetorial” e para as favelas e loteamentos foi alterado para o tipo “matricial”⁸⁵.

Com estes resultados foi possível a realização dos cálculos das correlações temporais entre as frações, a exemplo do que foi feito nas áreas de verticalização. Tomando como base a ideia de que nas áreas de favelas e loteamentos irregulares o processo de mudança temporal da fração vegetação para a fração substrato é o mais recorrente, vemos que em 61,2 % das favelas (em relação a quantidade de favelas) a correlação entre as frações citadas é negativa, e para o conjunto dos loteamentos irregulares, considerando as mesmas variáveis correlacionadas, esse valor é 65,7 % (em relação ao total de loteamentos irregulares). Se considerarmos as proporções das áreas ocupadas, 68,8 % da área ocupada por favelas e 58,54 % da área ocupada por loteamentos irregulares apresentam correlação negativa entre substrato e vegetação, ou seja, houve teoricamente aumento de substrato associado a diminuição de vegetação.

Colocando uma lente de aumento sobre essa distribuição da correlação negativa entre substrato e vegetação podemos estimar com mais precisão a distribuição de sua força. Para tal dividimos a correlação negativa em três grupos: entre 0 e -0,6, entre -0,6 e -0,9 menor que -0,9. Para as favelas, obtivemos a seguinte distribuição (ver Gráfico 41), tanto em quantidade quanto em área (km²):

⁸⁵ Essa mudança foi necessária por dois motivos: 1) limitações do software ARCGis e 2) maximização dos resultados. A limitação do ARCGis se dá na incapacidade de extrair estatísticas a partir de *rasters* para um vetor sobreposto quando a área do polígono é inferior à 9 pixels (certificado experimentalmente) e para áreas cujo formato longilíneo se sobrepunha a mais de 9 pixels, mas apenas em uma orientação. Sendo assim, um grande número de favelas e loteamentos irregulares, com áreas inferiores a 9 pixels (8.100 m²) poderiam se perder no processo. Para o caso de extração de estatísticas de *raster* para *raster* o aplicativo se mostrou mais eficiente, pois qualquer área matricial com no mínimo o mesmo tamanho de pixel do *raster* referente ao dado a ser extraído, funciona. Assim, fizemos a conversão dos limites das favelas e loteamentos irregulares do formato vetorial para o formato matricial, garantindo na saída um tamanho de pixel mínimo de 30 m, e alteramos a entrada do modelo para aceitar este formato. Com a alteração, a proporção de áreas não calculadas que chegava a 70 % do total baixou para aproximadamente 6,5 %, sendo que esta porcentagem corresponde às favelas e loteamentos extremamente pequenos.

GRÁFICO 41: DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES NEGATIVAS ENTRE SUBSTRATO E VEGETAÇÃO PARA AS FAVELAS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO EM TRÊS CLASSES. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Observamos que, em relação ao número total de favelas, 32 % estão presentes em faixas de correlação negativa alta, maior que -0,6. Considerando a área ocupada por estas favelas, aproximadamente 47 % da área total ocupada por favelas na cidade de São Paulo encontra-se na faixa de correlação negativa entre -0,6 e -1.

Considerando que estes 47 % da área total das favelas que apresentam apenas correlação negativa, quando convertido em número absoluto de favelas que o compõe, observamos que são formados por um número absoluto de favelas inferior à metade da quantidade de favelas que se encontram na faixa de correlação entre 0 e -0,6 (totalizando 306 favelas mais precisamente). Isso mostra que favelas maiores (com limites poligonais mais extensos) apresentam correlação negativa mais intensa entre substrato e sombra. Assim, podemos traçar uma primeira conclusão: nas favelas o valor da correlação temporal negativa entre as frações substrato e vegetação tornam-se mais significativos em função do aumento da área ocupada pela favela.

Essa constatação pode ser explicada pelo fato de que as maiores favelas são, provavelmente, as que mais cresceram durante a série temporal analisada, e por isso apresentarão um incremento de substrato associado a perda de vegetação tanto em números absolutos quanto em números relativos, pois os limites existentes e disponibilizados pelo HABISP, retratam apenas as dimensões mais atuais de cada área. Ressalte-se que o que estamos observando aqui é a expansão ou mudança a partir de 1985, associada a série

temporal de imagens Landsat, e não aquelas já consolidadas e, em grande número, implantadas nos anos de 1970, como já discutido anteriormente.

Para o caso dos loteamentos irregulares, o processo captado é similar quanto a distribuição proporcional da correlação negativa substrato/vegetação (ver Gráfico 42), contudo, os loteamentos irregulares são mais homogêneos no quesito área individual ocupada quando comparados às favelas, assim a distribuição percentual das correlações negativas substrato/vegetação são similares tanto para a proporção em relação ao número absoluto de loteamentos quanto em relação à proporção das áreas ocupadas por faixas:

GRÁFICO 42: DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES NEGATIVAS ENTRE SUBSTRATO E VEGETAÇÃO PARA LOTEAMENTOS IRREGULARES DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO EM TRÊS CLASSES. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Podemos entender essa homogeneidade maior das mudanças entre vegetação e substrato nos loteamentos irregulares como uma função de sua estrutura urbanística. Se comparados às favelas, os loteamentos apresentam, de forma geral, irregularidades urbanísticas com menor grau de precariedade, e em muitos casos no estágio atual, as principais irregularidades em alguns loteamentos são de cunho fundiário. As favelas são, por definição, mais heterogêneas internamente e muito mais caóticas em seu processo de expansão, pela própria ausência inicial de qualquer regulação. Assim, complementamos a assertiva inicial: as favelas tendem a apresentar maior grau de correlação temporal negativa entre substrato e vegetação quanto maior for a área ocupada pela favela ao longo do tempo, já

os loteamentos irregulares possuem correlação temporal negativa entre substrato e vegetação mais homogênea, sem grandes interferências da área ocupada pelo loteamento.

Considerando as três correlações temporais possíveis – substrato/vegetação; substrato/sombra; vegetação/sombra – observamos que, ao distribuímos os valores de correlação em função do *benchmark* substrato/vegetação, a forma assumida pelas distribuições das correlações substrato/sombra e vegetação/sombra apresentam um delineamento de inversão em relação a distribuição substrato/vegetação. Em resumo, isto mostra que, em grande parte tanto das favelas quanto dos loteamentos irregulares, onde houve aumento de substrato com perda de vegetação, tanto a fração vegetação quanto a fração sombra, diminuíram conjuntamente. O Gráfico 43, mostra estas distribuições.

GRÁFICO 43: DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES ENTRE AS TRÊS FRAÇÕES DO MLME (1985 – 2015) PARA LOTEAMENTOS IRREGULARES E FAVELAS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. VALORES FORAM PLOTADOS EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DA CORRELAÇÃO ENTRE SUBSTRATO E VEGETAÇÃO, PARA AMBOS OS CASOS. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Não obstante, esse processo geral tem manifestação diferenciada no espaço geográfico. Em termos da distribuição de áreas ocupadas por favelas a Zona sul da cidade de São Paulo lidera com 41,1 % do total (11 Km²) seguida pela área favelada na zona Leste (Leste 1 e Leste 2) com 27,8 % da área (7,5 Km²), sendo estas as áreas que mais concentraram favelas na série histórica, conforme apresenta o Gráfico 44 a seguir:

GRÁFICO 44: DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS DE FAVELAS (EM KM²) SEGUNDO AS ZONAS ADMINISTRATIVAS DA CIDADE DE SÃO PAULO. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Considerando a premissa de crescimento das favelas indicado pela transformação temporal de parte da fração vegetação em fração substrato, verifica-se que a zona Leste do município se confirma como a de maior ocorrência desse processo, onde uma fração superior a 80 % da área ocupada por favelas apresentou correlação negativa entre substrato e vegetação entre 1985 e 2015, superando inclusive o processo ocorrido nas favelas da zona Sul, onde há maior área ocupada por favelas e áreas verdes mais extensas próximas a estas ocupações. O Gráfico 45 mostra esta distribuição⁸⁶:

⁸⁶ Considerando que a zona “Centro” possui apenas duas favelas, estas foram agregadas a Zona “Centro e Centro Sul”. O mesmo ocorre para os loteamentos irregulares.

GRÁFICO 45: DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES TEMPORAIS ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA DIVIDIDA EM VALORES POSITIVOS E NEGATIVOS POR ÁREA OCUPADA POR FAVELAS NAS ZONAS DE SÃO PAULO. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

O detalhamento das correlações negativas entre substrato e vegetação nas favelas joga ainda mais clareza sobre a concentração mais intensa do processo na zona Leste da capital, com incremento relativo à proximidade desta borda da cidade. O gráfico 46 mostra a distribuição das correlações negativas tratadas em três faixas distintas, em função de força, ou seja, de sua variação conjunta inversa, cujos casos mais extremos apresentarão os valores negativos mais baixos:

GRÁFICO 46: DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES TEMPORAIS NEGATIVAS ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA DIVIDIDA EM FAIXAS DE CORRELAÇÃO POR ÁREA OCUPADA NAS FAVELAS NAS ZONAS DE SÃO PAULO. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Para os loteamentos irregulares a distribuição de áreas nas zonas da capital paulista é semelhante ao que ocorre com as favelas (ver Gráfico 47):

GRÁFICO 47: DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS DE LOTEAMENTOS IRREGULARES (EM KM²) SEGUNDO AS ZONAS ADMINISTRATIVAS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Contudo, a proporção relativa de áreas com correlação temporal negativa entre substrato e vegetação no caso dos loteamentos irregulares, mostra que também a zona Sudeste do município de São Paulo apresenta grande área em que essa correlação é negativa, além da repetição do fenômeno observado com as favelas, com área desse tipo em maior proporção nas zonas Sul e Leste (Leste 1 e Leste 2), como mostra o Gráfico 48:

GRÁFICO 48: DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES TEMPORAIS ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA DIVIDIDA EM VALORES POSITIVOS E NEGATIVOS POR ÁREA OCUPADA POR LOTEAMENTOS IRREGULARES NAS ZONAS DE SÃO PAULO. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

No detalhamento da correlação negativa substrato/vegetação, os loteamentos irregulares nas zonas Leste (1 e 2) e Sul são, assim como no caso das favelas, áreas de maior concentração de correlações mais significativas por área ocupada. Além disso, os loteamentos irregulares localizados na zona Nordeste aparecem como locais de mudanças significativas entre substrato e vegetação, com comportamento próximo ao que ocorre na zona Leste. O Gráfico 49 a seguir mostra esta distribuição:

GRÁFICO 49: DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES TEMPORAIS NEGATIVAS ENTRE SUBSTRATO E SOMBRA DIVIDIDA EM FAIXAS DE CORRELAÇÃO POR ÁREA OCUPADA PELOS LOTEAMENTOS IRREGULARES NAS ZONAS DE SÃO PAULO. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Esse comportamento dos loteamentos irregulares em relação às trocas temporais entre as frações substrato e vegetação mostram que estes, em relação às favelas, apresentam, na série histórica, uma amplitude espacial de incremento da ocupação maior. Com isso, queremos dizer que os loteamentos irregulares aumentam de forma menos concentrada, com aumento das ocupações nas franjas mais periféricas, mas também nos anéis interiores imediatos a esta periferia. Com as favelas esse crescimento é, no tempo, confinado a situações periféricas mais extremas.

De modo geral, podemos afirmar que detectamos nos 30 anos da série histórica um avanço da verticalização, associada à habitação formal, que tende ao sentido leste da RMSP, especialmente concentrada no município de São Paulo. Essa tendência mapeada não é uniforme, pois apresenta outros vetores radiais de menor intensidade, mas que representam o aumento da verticalização de forma mais extensa em municípios contíguos à cidade de São Paulo. Não obstante, tanto para as favelas quanto para os loteamentos irregulares, as análises das premissas adotadas para a identificação de seu crescimento

indicam que, também na zona Leste da capital paulista, concentram-se as maiores tendências de crescimento de substrato.

O último aspecto abordado para as favelas e loteamentos irregulares, doravante habitação precária, e suas relações com as mudanças no MLME entre 1985 e 2015, é a demonstração da noção geral, e bastante difundida, do avanço periférico. Essa demonstração parte da premissa, já aqui aplicada, de que a vegetação diminui em função do surgimento do substrato associado ao crescimento da ocupação, tanto nas favelas quanto nos loteamentos irregulares. Para visualização desse processo fazemos aqui uma comparação entre os mapas de distribuição percentual da vegetação em 1985 e 2015, tanto para as favelas quanto para os loteamentos. Os Mapas 37 até 40 mostram o resultado da diminuição da vegetação nestas áreas ao longo do tempo.

% de vegetação nos limites de favelas - 1986

MAPA 37: DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA VEGETAÇÃO NAS FAVELAS EM 1986. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

% de vegetação nos limites de favelas - 2015

MAPA 38: DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA VEGETAÇÃO NAS FAVELAS EM 2015. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

% de vegetação nos limites de loteamentos irregulares - 1986

MAPA 39: DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA VEGETAÇÃO NOS LOTEAMENTOS IRREGULARES EM 1986. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

% de vegetação nos limites de loteamentos irregulares - 2015

MAPA 40: DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA VEGETAÇÃO NOS LOTEAMENTOS IRREGULARES EM 2015. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Observa-se que há, na comparação dos períodos, uma diminuição da fração vegetação em direção as periferias⁸⁷. Observa-se também que a Zona Sul, devido a sua alta concentração em números absolutos tanto de favelas quanto de loteamentos irregulares, é a que, visivelmente, tem o maior número de pontos com vegetação reduzida. Contudo, como já demonstrado anteriormente, em termos de impacto relativo, a zona leste possui a maior diminuição de vegetação associada ao surgimento de substrato em favelas.

De modo geral, o conjunto de modelos, aquele aplicado a verticalização (habitação formal e regular) e este último aplicado às favelas e loteamentos irregulares (habitação informal e/ou precária), corroboram com o entendimento de processos conjuntos e diferenciados no espaço geográfico.

Conclusões

5.5. Primeiras conclusões: uma validação

Pérez Machado e Small (2012), Pérez Machado (2012) e Small et al. (2015) já publicaram alguns resultados de suas pesquisas sobre o uso do modelo linear de mistura espectral para a análise das mudanças no uso do solo na Região Metropolitana de São Paulo.

Estes autores indicam que houve mudança na proporção de cobertura das frações vegetação e sombra convertidas para a fração substrato entre 1985 e 2010, tanto para o Município de São Paulo quanto para a RMSP como um todo. Parte dos resultados apresentados por eles estão compilados na Tabela 8 a seguir:

TABELA 8: CÁLCULO DAS MUDANÇAS NAS FRAÇÕES DOS PIXELS EM SP E NA RMSP PÉREZ MACHADO E SMALL, 2012.

Períodos	Área da RMSP (km ²)	Mudança (km ²)	Mudança (%)	Área do Município de SP (km ²)	Mudança (km ²)	Mudança (%)
1986 - 2000	7.942,3	105,2	1,32	1.525	18,6	1,22
2001 - 2010	7.942,3	68,3	0,86	1.525	10,2	0,67

⁸⁷ Vale lembrar que, tanto as favelas quanto os loteamentos irregulares são, em sua maioria, por concepção e localização, áreas já periféricas. Poderíamos então dizer que há uma periferização da diminuição da vegetação dentro da própria periferia.

Agregando os dados de lançamentos imobiliários residenciais nos mesmos períodos apresentados na tabela anterior, percebemos que o ritmo de crescimento dos lançamentos imobiliários apresenta valores pouco superior no período entre 2001 e 2010 quando comparados aos lançamentos entre 1985 e 2000, conforme a Tabela 9 a seguir:

TABELA 9: LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS EM DOIS PERÍODOS: 1986 - 2000 E 2001 - 2011. ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Períodos	Total de lançamentos na RMSP (1985 – 2011)	Lançamentos no período (Absoluto)	Lançamentos período (%)	Total de lançamentos na cidade de SP (1985 - 2011)	Lançamentos período (Absoluto)	Lançamentos período (%)
1985 - 2000	15.133	6.908	45,60	11.953	5.960	49,90
2001 - 2011	15.133	8.225	54,40	11.953	5.993	50,10

A análise conjunta dos dados permite destacar que, entre 1985 e 2000, houve mudanças perceptíveis no uso do solo, tanto no Município de São Paulo quanto na RMSP, superiores as mudanças registradas entre 2001 e 2010 pela aplicação do MLME, enquanto no caso dos lançamentos imobiliários residenciais houve um comportamento inverso na mesma análise temporal, tendências registradas no Gráfico 50 a seguir:

GRÁFICO 50: MUDANÇAS NO USO DO SOLO E LANÇAMENTOS IMOBILIÁRIOS RESIDENCIAIS. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

A primeira inferência é que nos períodos onde houve uma taxa de transformação de vegetação ou sombra para substrato, houve uma taxa maior de verticalização no mesmo período. Há uma inversão das curvas, como mostram os Gráficos 51 e 52:

GRÁFICO 51: INVERSÃO ENTRE VERTICALIZAÇÃO E AUMENTO DE SUBSTRATO NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

GRÁFICO 52: INVERSÃO ENTRE VERTICALIZAÇÃO E AUMENTO DE SUBSTRATO NA RMSP. FONTE: ORGANIZAÇÃO DO AUTOR.

Small et al. (2015) constatarem o mesmo processo em uma análise direta nas imagens sobre trechos da RMSP, comparando as frações do MLME em imagens Landsat datadas de 2000 e 2010 à composições em cores naturais de imagens QuickBird, de altíssima resolução espacial. Observam os autores que o aumento nas construções verticais observadas nas imagens QuickBird são captadas como um incremento da fração sombra ao longo do tempo no MLME extraído das imagens Landsat.

Assim, se o incremento de substrato detectado pelo MLME diminui seu ritmo ao longo do tempo com o aumento da verticalização, demonstra-se novamente a evidência de que a verticalização se correlaciona negativamente com o substrato ao longo do tempo nas áreas em que este processo foi mais intenso (e este ritmo diferenciado em escala, ao longo do tempo, terá impacto em todo o rol de dados). Temos uma validação cruzada dos resultados obtidos nesta tese e nos experimentos independentes realizados em experimentos externos. Esta validação é importante, pois demonstra que mesmo com procedimentos técnicos diferentes, há convergência na interpretação dos resultados.

Desta forma concluímos que, comparativamente aos resultados obtidos por outros pesquisadores na mesma área estudo e com os mesmos tipos de dados, a hipótese de mapeamento da expansão urbana em áreas formais da cidade a partir da correlação entre as frações substrato e sombra é plausível, e que esta correlação tenderá a ser negativa em áreas de mais intensa verticalização no período.

5.6. Confirmação da hipótese principal

A variedade possível de combinações de processos de transformação ao longo de 30 anos em cada uma das diferentes realidades urbanas da RMSP é grande. A dinâmica destas transformações é formada por sequências lineares de mudança do uso do solo em algumas áreas específicas, mas de forma geral, estas mudanças são não-lineares no sentido de considerar uma fração extraída do MLME como ponto de partida e, outra fração aumentando ou diminuindo de forma linear, como ponto de chegada.

E esta é a dinâmica esperada de fato, onde convivem rugosidades e modernidades, onde as mudanças avançam e muitas vezes retrocedem, voltando a um estágio anterior para dar lugar a novas estruturas físicas urbanas⁸⁸, podendo, inclusive, permanecer como rugosidades.

⁸⁸ Estes avanços, recuos e combinações são resultado de uma combinação de fatores complexos e interconectados: a legislação urbana e suas mudanças que pode, ao longo do tempo, modificar,

No entanto, sob o ponto de vista da simplificação máxima proposta pela ideia da correlação entre as frações extraídas do MLME, podemos afirmar que a correlação entre as frações substrato e sombra é capaz de indicar, espacialmente, a ocupação e avanço da mancha urbana (através da identificação da mancha produzida na correlação) e os padrões de troca entre estas frações para a RMSP, sendo que correlações negativas mais fracas, entre 0,01 e 0,6 coincidem, em grande parte, com áreas de ocupação horizontal e que fatores de correlação acima de 0,60 coincidem espacialmente onde a ocupação é verticalizada (conforme observado no mapa 35). Nas áreas vegetadas a correlação positiva entre sombra e substrato é predominante.

Potencialmente, para qualquer área densamente urbanizada em outros pontos da superfície terrestre com características similares, podemos esperar padrões similares de correlação, especialmente pela garantia do uso de membros de referência globais. Além disso, é possível concluir que nos locais onde o resultado final do processo final de troca, no período considerado, em que as correlações negativas entre as frações citadas indiquem aumento de sombra e diminuição de substrato, há indícios de incremento vertical mais recente. Alguns exemplos práticos demonstram a validade da hipótese.

O empreendimento vertical denominado Projeto Viver⁸⁹ no distrito de Belém (município de São Paulo), cuja matrícula de lançamento data de 1999, possui hoje, após a entrega, 10 blocos de prédios com 16 andares, sendo quatro apartamentos por andar, totalizando uma área útil aproximada de 68.000 m² (equivalente a 76 pixels de uma imagem Landsat de resolução espacial de 30 m).

Observando os dados brutos de variação das frações para um pixel de amostra na área referida, podemos, com precisão, observar as variações entre substrato, sombra e vegetação em função da “fenologia” de construção dos prédios.

Não obstante, após a preparação e limpeza do terreno (entre 1999 e 2002) que é onde ocorre o pico de detecção de substrato neste momento. A partir deste ponto no tempo, conforme a progressão das construções, o que se observa é o aumento da fração sombra associado a uma diminuição da fração substrato, sendo que para este caso de mudança de uso e ocupação do solo na RMSP, o fenômeno corresponde a hipótese prevista nesta tese.

restringir ou subitamente permitir mudanças complexas no espaço urbano, a informalidade e os reflexos da periferização sem ordem legal, a omissão ou o controle do poder público. As forças políticas também atuam fortemente nas mudanças do uso do solo urbano, tornando as possíveis combinações de alterações e mudanças ainda mais complexas, pois podem, em muitos casos, fugir a qualquer lógica urbanística.

⁸⁹ Empreendimento situado na Rua Celso Garcia, 1907. Construído pela Incorporadora Inpar. Fonte: CEM, 2015.

A vegetação, após sua retirada inicial, permanece com baixos índices e baixa variação, sendo o comportamento seguinte à imagem Landsat do ano 2000, para a área em questão, explicado apenas pelas trocas entre sombra e substrato. A Figura 54 ilustra o processo completo:

FIGURA 54: EVOLUÇÃO DO EMPREENDIMENTO "VIVER BEM" SOB A PERSPECTIVA DA TROCA ENTRE AS FRAÇÕES PARA COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE. FONTE: GOOGLE EARTH (VÁRIAS DATAS) E IMAGENS LANDSAT (1986 - 2015).

O mesmo processo pode ser observado em no conjunto de empreendimentos ilustrado abaixo na Vila Formosa (município de São Paulo), conforme a figura 55:

FIGURA 55: EVOLUÇÃO DO CONJUNTO DE EMPREENDIMENTOS NA VILA FORMOSA SOB A PERSPECTIVA DA TROCA ENTRE AS FRAÇÕES PARA COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE. FONTE: GOOGLE EARTH (VÁRIAS DATAS) E IMAGENS LANDSAT (1986 - 2015)

No caso dos empreendimentos da Vila Formosa o pico de detecção de substrato é registrado na imagem Landsat de 1989. Nessa data, o Google Earth não possui nenhuma imagem da área em questão. Contudo, baseando-se no comportamento observado do empreendimento Viver Bem, podemos inferir que no pixel amostrado, o início da década de 1990 foi quando ocorreu a preparação do terreno. Consultando a base de dados de lançamentos verticais (CEM) é possível verificar que a inferência é verossímil: os primeiros empreendimentos daquele aglomerado datam de 1985/86, sendo que existe uma série de empreendimentos lançados na década de 2000, entre 2002 e 2010⁹⁰.

Dessa forma, para o caso da habitação formal, fica demonstrada a validação da hipótese para as situações previstas, onde a correlação negativa entre sombra e substrato denota o aumento de sombra ao longo do tempo em áreas de mais intensa verticalização.

Para o caso das áreas precárias abordadas na hipótese (favelas e loteamentos irregulares), a relação de troca entre as frações tende a se dar, majoritariamente, entre vegetação e substrato/sombra, ou seja, espera-se uma diminuição gradual da vegetação e um aumento das frações substrato e sombra, conforme Pérez Machado & Small (2012, 2015) apontaram em publicações anteriores.

No geral, o comportamento das frações substrato e sombra nas favelas segue movimentos semelhantes, com tendência ao aumento. O comportamento da vegetação, no entanto, é a característica mais clara: diferente do que ocorre nas áreas urbanas de consolidação regular onde a vegetação em algum momento apresenta uma queda brusca e se torna uma fração muito menor e com pouquíssima variabilidade no tempo, nas favelas a vegetação apresenta uma diminuição muito mais gradual, mas que resulta em baixa concentração ao longo do tempo, conforme demonstram os dados.

Exemplificando, esse comportamento é observado em diversas favelas no Município de São Paulo. Trazemos aqui a Favela de Paraisópolis em função de seu apelo emblemático na configuração urbana de São Paulo. Podemos observar que a fração substrato apresenta um aumento relativamente constante ao longo do tempo, acompanhada por um comportamento menos linear da fração sombra. Enquanto a fração vegetação apresenta visível diminuição ao longo do tempo de forma gradual, até que atinja uma quantidade mínima e permaneça, a partir desse momento, com um ritmo de diminuição menos acentuado, em função da própria escassez. A Figura 56 ilustra a análise:

⁹⁰ Empreendimento Guarapari: 1985; Empreendimento Camboriu – Chácara Anália Franco: 1986; Condomínio Romulo e Remo: 1991; Condomínio Vila Nova de Gaia: 1995. E muitos outros, naquela concentração podem ser verificados na década seguinte. Também essa distribuição equitativa ao longo do tempo contribuiu para a detecção de correlação aqui apresentada,

FIGURA 56: EVOLUÇÃO DAS FRAÇÕES EM UMA AMOSTRA DA FAVELA DE PARAISÓPOLIS PARA COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE. FONTE: GOOGLE EARTH (2016) E IMAGENS LANDSAT (1986 - 2015)

Para outras favelas o processo detectado é o mesmo. Como exemplo usamos aqui a Favela Nova Esperança na divisa entre Taboão da Serra e Embu das Artes, com características do sitio do entorno totalmente distintas de Paraisópolis, conforme a Figura 57:

FIGURA 57: EVOLUÇÃO DAS FRAÇÕES EM UMA AMOSTRA DA FAVELA NOVA ESPERANÇA PARA COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE. FONTE: GOOGLE EARTH (2016), IMAGENS LANDSAT (1986 - 2015) E PEDRASSOLI (2011).

A análise do comportamento local das variáveis permite também validar a hipótese e concluir que, nas favelas e áreas precárias, a troca entre as frações se dá entre substrato/sombra → vegetação, com diminuição da vegetação ao longo do tempo.

5.6.1. Escala, resolução espacial, dados e método: o caso das favelas e os resultados da tese

Kuffer, Pfeffer e Sliuzas (2016) expuseram em recente artigo uma avaliação das publicações relacionadas ao mapeamento de favelas utilizando Sensoriamento Remoto entre os anos de 2000 e 2015. Os autores citados trabalharam na análise de quatro dimensões no mapeamento de favelas: 1) fatores contextuais; 2) características físicas das favelas; 3) acesso a dados e 4) métodos de extração de favelas.

Num breve resumo, os autores indicam algumas características importantes na pesquisa para o mapeamento de favelas. Para os mesmos, nossa compreensão atual da diversidade dos tipos de favela em todo o mundo ainda é um gargalo, além disso, entendemos que uma pesquisa mais sistemática é ainda requerida para o desenvolvimento de modelos mais robustos de detecção e mapeamento de favela. Os autores também citam a implementação de resoluções espaciais cada vez maiores que possibilitam a caracterização de estruturas internas das favelas no processo e, por fim, relatam que os métodos mais bem-sucedidos são aqueles que utilizaram abordagens complementares, tanto de dados quanto de escala e métodos. Os mesmos autores ainda colocam que o melhor entendimento intra-pixel ainda precisa de avanços.

Ainda que os objetivos desta tese não se concentrem especificamente no mapeamento de favelas per se, mas numa análise da expansão urbana comparando as áreas de habitação regulares e irregulares, cabe ressaltar que a metodologia aqui adotada vai ao encontro, ainda que de forma inicial e simples, aos desafios propostos por Kuffer, Pfeffer e Sliuzas, primeiro no que concerne ao desafio de uma exploração sistemática das características físicas das favelas para fins de sensoriamento remoto, o que nesta tese se buscou por meio da análise das correlações do MLME e de seu comportamento ao longo do tempo, tanto em trocas quanto oscilações, incluindo as áreas de favelas do Município de São Paulo. Um segundo ponto se refere ao entendimento intra-pixel do processo, e também nesse caso a abordagem desta tese tenta se aproximar, haja vista que o MLME busca quantificar características intra-pixel, por definição.

Outro ponto importante é a análise dos resultados em função da escala dos dados. Brito e Quintanilha (2012), em uma avaliação de artigos publicados entre 2001 e 2008

sobre métodos de classificação de características intraurbanas com uso de sensoriamento remoto, concluem que, para o período considerado, dos 110 artigos analisados apenas 20 deles utilizaram métodos de Análise Orientada a Objeto (OBIA) de forma isolada, método que, na maioria de aplicações para o mapeamento de favelas, está associado ao uso de imagens de altíssima resolução espacial. Contudo, os mesmos autores apontam que do total de artigos, 76 utilizaram métodos de classificação convencionais baseados nos valores dos pixels e que, além disso, uma grande quantidade de trabalhos ainda usa imagens Landsat, possivelmente, pela facilidade de acesso.

Neste sentido, a proposta desta tese traz, em nossa análise, resultados importantes, pois utiliza dados Landsat, ainda amplamente em uso para estes fins, e foca numa abordagem que tenta o entendimento intra-pixel a partir do MLME. Além disso, apresenta contribuições para uma proposta de mapeamento baseada nas características de variação temporal dos alvos em imagens de moderada resolução espacial e, em paralelo, mostra a análise estática dos alvos no tempo.

5.7. Bases para um Modelo Geral

A menor unidade espacial de cálculo da correlação temporal entre os membros de referência extraídos do MLME é o pixel da imagem de origem. A partir dessa generalização mínima, espera-se que o modelo consiga explicar as mudanças no uso e ocupação do solo da área urbana levando em consideração as três interações possíveis, como mostra a Figura 53:

FIGURA 58: CORRELAÇÕES TEMPORAIS POSSÍVEIS ENTRE AS FRAÇÕES. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Essas interações revelam os processos de mudança do uso do solo ao longo do tempo de forma simplificada. A partir das análises anteriores e dos resultados validados,

efetuamos o cálculo das correlações em nível de pixel para o conjunto de mosaicos Landsat utilizados na tese, entre 1986 e 2015, sendo os resultados apresentados nos Mapas 41, 42 e 43.

MAPA 41: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (TEMPORAL) ENTRE AS FRAÇÕES SUBSTRATO E VEGETAÇÃO: 1986, 1989, 2000, 2006, 2010 E 2015.

MAPA 42: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (TEMPORAL) ENTRE AS FRAÇÕES SUBSTRATO E SOMBRA: 1986, 1989, 2000, 2006, 2010 E 2015.

MAPA 43: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (TEMPORAL) ENTRE AS FRAÇÕES VEGETAÇÃO E SOMBRA: 1986, 1989, 2000, 2006, 2010 E 2015.

Em todos os casos, correlações positivas indicam que as frações envolvidas aumentaram ou diminuíram de forma conjunta, e no caso de correlações negativas, indicam que houve transferência entre uma fração e outra, ao longo da série histórica.

Uma análise localizada ajuda a entender a aplicabilidade interpretativa dos mapas anteriores, tomemos como exemplo o campus da Universidade de São Paulo na capital paulista e a construção do centro de convenções e o polêmico “parque dos museus”⁹¹, ambos construídos em uma grande área verde próxima a Faculdade de Medicina Veterinária, com início das obras no ano de 2011. O Mapa 44, a seguir, mostra a localização aproximada da área:

MAPA 44: LOCALIZAÇÃO DO CENTRO DE CONVENÇÕES NO CAMPUS DA USP CAPITAL. FONTE:WWW.PUSPC.USP.BR/WP-CONTENT/UPLOADS/UNTITLED-1-01.JPG (ADAPTADO PELO AUTOR).

Utilizando os mapas de correlação gerados anteriormente podemos observar quais processos são captados e, portanto, concluir com base no modelo, qual o tipo de mudança do uso do solo ocorreu. O mapa 45 mostra a mudança captada pela correlação em relação à referida construção na USP:

⁹¹ Para informações mais detalhadas consultar: <https://arvoresdesaopaulo.wordpress.com/2014/05/29/usp-destroi-raro-cerrado-em-sao-paulo-que-havia-sido-prometido-museu-vivo-em-2011/>

MAPA 45: MODELO DE CORRELAÇÃO APLICADO À ANÁLISE DA CONSTRUÇÃO DO CENTRO DE CONVENÇÕES DA USP: UM EXEMPLO DE INTERPRETATIVO. IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ADAPTADAS DE GOOGLE EARTH, 2016. FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR.

Observa-se que o prédio do centro de convenções é detectado nos três mapas, sendo que no mapa referente às correlações entre vegetação e sombra, o valor parece como positivo o que indica que ou não houve correlação entre estas duas frações ou elas variaram, para mais ou para menos, de forma conjunta. Depreende-se daí que houve remoção da vegetação no local, pois os ciclos fenológicos que indicariam de absorção de energia em função da presença de mais ou menos biomassa, não foram detectados.

Os outros dois mapas, correlações entre substrato e vegetação e entre substrato e sombra, indicaram altas correlações negativas no mesmo ponto, ou seja, para ambos os casos houve uma troca entre frações ao longo do tempo. No caso entre substrato e vegetação observa-se que entre 2010 e 2015 ocorreu a construção do prédio (ver Figura 53), e sequencialmente houve a remoção da vegetação da vegetação e exposição do substrato, no caso o solo exposto, com a finalização da construção, também contabilizada ao final como fração substrato:

FIGURA 59: EVOLUÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO CENTRO DE CONVENÇÕES DA USP ENTRE 2010 E 2015. FONTE: GOOGLE EARTH, 2016. ADAPTAÇÃO E ELABORAÇÃO DO AUTOR.

No caso do mapa que retrata a relação entre substrato e sombra, observamos que a construção, em função de sua verticalização, gerou sombra ao longo do processo, sendo responsável pela captação da diminuição da fração substrato.

Muitos outros exemplos ao longo da área de estudo poderiam ser apontados, tanto retratando processos urbanos quanto naturais, no caso dos parques e reservatórios, por exemplo. A demonstração aqui apresentada objetiva demonstrar a ideia central da modelagem proposta, bem como apontar os refinamentos possíveis de um modelo de detecção de mudanças a partir das premissas desenvolvidas e sintetizadas nesta tese.

O ajuste espacial alcançado, mesmo com a utilização de imagens de resolução espacial mediana, caso dos sensores a bordo da série Landsat, também merece destaque, conforme observamos nas comparações da detecção nas correlações e a correspondência em imagens de altíssima resolução espacial. Novamente, resultados correspondentes podem ser observados no trabalho de Pérez Machado (2012), onde o

incremento da fração substrato pôde ser calculada e posteriormente verificada a alta correspondência locacional dessa mudança em imagens de altíssima resolução. No exemplo citado, o autor foi capaz de detectar, por meio do cálculo de incremento da fração substrato, a construção individualizada do Colégio Visconde de Porto Seguro, nas proximidades do estádio do Morumbi⁹², mesmo utilizando abordagens metodológicas de cálculo e modelagem distintas desta tese.

5.8. Conclusões complementares: o uso de Isotimas na representação dos processos geográficos mapeados

Um método não previsto de antemão na proposta da tese, mas que gerou significativa melhora na visualização dos dados, tantos de valores do preço da terra quanto de correlação entre substrato e sombra, foi o emprego do método das Isotimas.

O método proposto por Pérez Machado (2003), originalmente, pressupõe o uso de curvas de igual valor para a representação de valores de preço da terra. Essa ideia foi aplicada inicialmente na presente pesquisa para a visualização da variação dos valores médios do preço do m² dos empreendimentos imobiliários verticais lançados entre 1985 e 2013 na RMSP, e pode ser visto no Mapa 4 desta tese. Comparativamente aos valores distribuídos por setores censitários (coroplético), os resultados apresentados pelas Isotimas mostram uma variação mais gradual da distribuição dos valores, gerando consideráveis ganhos na visualização e análise.

Para o caso das isotimas de variação do preço por m², o processo de elaboração passou pela geração dos centroides dos polígonos referentes aos setores censitários, atrelando-se o valor de variação a cada centroide. Na sequência, foi aplicada a interpolação de *Krige* ordinária, padronizando como arquivo de saída uma superfície de resolução espacial de 100 m de pixel.

Os bons resultados de visualização geraram o interesse de aplicação das Isotimas para variáveis não previstas inicialmente por Pérez Machado, mas as quais, por sua expressão geográfica, foram submetidas ao teste, caso do mapa 35 desta tese, que mostra a correlação entre as variáveis substrato e sombra ao longo do tempo.

Para este segundo caso, a utilização da agregação de valores por setores censitários e o posterior uso dos centroides para interpolação de *Krige* não se mostrou eficaz

⁹² Para maiores detalhes consulte o trabalho intitulado “Integração Geo-Escalar: proposta de uma metodologia de identificação de mudanças no uso, ocupação e cobertura do solo aplicando a tecnologia geoespacial”, referência presente na bibliografia desta tese.

por dois motivos básicos: 1) diferente do mapa de preço da terra, a expressão do fenômeno não tem restrição às áreas urbanizadas apenas; 2) a geração dos centroides causa neste caso, por conta das áreas dos polígonos muito extensas em regiões rurais, um efeito de sub-amostragem.

Senso assim, foi necessária uma adaptação da proposta de Pérez Machado: para a utilização das isotimas no mapeamento das correlações manteve-se a geração de uma grade regular de pontos amostrais em toda a área a ser mapeada (RMSP) e com a maior resolução possível sem que haja superamostragem, conforme propõe o autor. Na prática, a grade amostral gerada é composta por pontos equidistantes 30 m entre si e estes pontos são coincidentes aos centróides de cada pixel do mosaico Landsat utilizado na RMSP. É uma base de dados extensa, portanto adaptou-se o uso do estimador por densidade Kernel em detrimento de krigagem.

Por questões de capacidade de processamento, essa coleção de mais de 200.000 pontos amostrais não é capaz de ser interpolada por meio do método de Krigagem (considerando as configurações do computador utilizado na pesquisa), assim a opção mais viável e que demonstrou bons resultados de visualização, foi a aplicação do processo de Densidade Kernel nos pontos. O resultado é uma distribuição suavizada compatível com a imagem correlação original e com resolução espacial de 30 m.

Essa consideração, em nossa opinião, leva a alguns resultados complementares da tese referente à aplicação das Isotimas na visualização de variáveis geográficas: conforme demonstrado, a extrapolação das Isotimas, originalmente definidas para o uso em mapas de valor da terra, apresenta aplicabilidade com bons resultados em variáveis cuja expressão espacial não seja aleatória, caso das correlações.

A partir disso, podemos concluir que a aplicação do método das Isotimas apresenta um amplo campo de aplicação nos mapas da Geografia.

5.9. Considerações finais

Em síntese, o modelo analítico proposto conseguiu atingir os objetivos dessa tese e foi capaz de confirmar a hipótese principal do trabalho associada ao comportamento diferencial da correlação entre as frações extraídas do MLME na RMSP para os casos da habitação formal e da habitação informal.

Além disso, os resultados de sua aplicação corroboraram com os resultados apresentados por outros autores na mesma área de estudo (Pérez Machado e Small, 2012 e Pérez Machado, 2012, Small et al. 2015).

O resultado não previsto alcançado representa também uma significativa contribuição para o trabalho, caso, por exemplo, da adaptação e aplicação da Isotimas para outros fenômenos geográficos além dos mapas de valor da terra.

As bases de um modelo geral, aqui tangenciadas, mostram que a pesquisa tem à vista novos caminhos e que sua continuidade é necessária.

5.10. Agenda de pesquisa futura

Não obstante, outras possibilidades de continuidade da pesquisa já se alinham no horizonte de conclusão da tese, as quais são elencadas a seguir:

1) Refinamento do modelo, pensando na quantificação associada de áreas e alturas médias aos índices de verticalização representados pelos valores de correlação;

2) Ampliação dos experimentos para outras áreas metropolitanas no Brasil aplicando a mesma técnica e comparando os resultados, como sugestão inicial os casos das Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e de Salvador. Além disso, para experimentações na tentativa de proposição de um modelo geral, aplicar testes em áreas de países com características de concentração de pobreza e habitacionais, em alguns aspectos, similares ao caso da RMSP;

3) Comparação do modelo a outras variações físicas no tempo, a exemplo da temperatura de superfície no mesmo intervalo temporal trabalhado. Surge a possibilidade de analisar qual a relação entre as mudanças nas frações do MLME e a evolução da temperatura da superfície na RMSP ao longo do tempo, tendo, portanto, o modelo aplicado potencial para investigações em mudanças ambientais urbanas;

4) Utilização do modelo de correlações temporais das frações, com uso de compósitos Landsat multitemporais, os quais limitam o erro proveniente da mistura entre áreas urbanizadas e não urbanizadas que compõe a fração substrato, pois os compósitos amenizam as interferências nas áreas de substrato com grande variabilidade temporal no período intra-anual. Tais compósitos são elaborados a partir de imagens provenientes de diferentes estações do ano, com isso, áreas de substrato naturais podem ser separadas de áreas urbanizadas em função de suas características de variabilidade anual. Esta abordagem é proposta por Small, Pérez Machado, Barrozo e Luchiari, 2015.

5) Desenvolvimento da ideia de membros de referência temporais em áreas urbanas, sendo esta abordagem uma das possíveis vertentes futuras do uso dos modelos de mistura espectral em SR;

6) Organização de uma base temporal de imagens Landsat com características de elevação solar, inclinação do sensor e de condições atmosféricas com a maior proximidade possível para todas as imagens. Essa proposta se associa a utilização de compósitos multitemporais, mas como a coleta de dados da série Landsat continua no futuro, é possível que uma coleção de imagens com melhores características possa ser construída. Estas questões visam amenizar as oscilações temporais nas frações que não estejam associadas unicamente às mudanças de uso e ocupação do solo;

7) Absorção, nas pesquisas futuras e derivadas desta tese, das recomendações recentes de Kuffer, Pfeffer e Sliuzas (2016), as quais indicam uma necessidade de maior entendimento dos processos físicos internos ao pixel para os alvos em questão e a integração de métodos, como exemplo o OBIA, pois os melhores resultados, conforme descritos pelos autores, são aqueles em que houve a integração.

6. Referências bibliográficas

- ADAMS, SABOL, D. E.; KAPOV, V.; ALMEIDA FILHO, R.; ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R.; **Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land cover change in the Brazilian Amazon**. Remote Sensing of Environment, Elsevier Inc., 1995.
- ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, M. W.; BERNSTEIN, L. S.; LEVINE, R. Y.; BERK, A.; RICHTSMIEIER, S. C.; ACHARAYA, P. K.; ANDERSON G. P.; FELDE, G.; GARDNER, J.; HOKE, M.; JEONG, L. S.; PUKALL, B.; MELLO, J.; RATKOWSKI, A.; BURKE, H. H.; **Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery Based on MODTRAN4**. SPIE Proceeding, Imaging Spectrometry V, Volume 3753, July 1999
- ALAS, P.; **O fenômeno dos supercondomínios: verticalização na metrópole paulistana no início do século XXI**. Dissertação de mestrado. FAU/USP, 2013.
- ALBERTI, M., WEEKS, R., COE, S. **Urban Land-Cover Change Analysis in Central Puget Sound**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 70, No. 9, September 2004, pp. 1043–1052.
- ALCÂNTARA FILHO, F. G.; **Evolução nos preços imobiliários nas diferentes regiões da cidade de São Paulo**. Dissertação de mestrado em administração de empresas, Fundação Getúlio Vargas/FGV, São Paulo, 2009.
- AMORE, C. S.; SHIMBO, L. Z.; RUFINO, M. B. C.; **Minha casa... e a cidade? avaliação do programa minha casa minha vida em seis estados Brasileiros**. 1. ed. - Rio de Janeiro : Letra Capital, 2015. 428 p.
- ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; **Deteção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira**. ACTA AMAZONICA, VOL. 35(4) 2005: 445 – 456.
- ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D.; BLEI, A. M.; **Making room for a planet of cities**. Lincoln Institute of land Policy. Cambridge, MA. 2011.
- ANTONUCCI, D.; ACKEL, L. G. M; SILVA. T. N.; SCHWEIGERT, R.; **Verticalização, habitação social e multifuncionalidade. Edifícios dos IAPS em São Paulo**. III Fórum de pesquisa FAU/MACKENZIE, 2007.
- ARANHA, V. TORRES, H. G., **Lançamentos imobiliários e dinâmica demográfica recente no município de São Paulo**. 1º análise – número 15/Junho de 2014. Fundação SEADE, São Paulo, 2014.
- BALLING, B.; **A comparative study of the bidirectional reflectance distribution function of several surfaces as mid-wave infrared diffuse reflectance standard**. Dissertação de mestrado em engenharia elétrica: Air Force Institute of Technology. Ohio, Estados Unidos, 2009.

BALTRUSIS, N.; OTTAVIANO, M. C. L.; **Ricos e pobres, cada qual em seu lugar; a desigualdade sócio espacial na metrópole paulistana.** CADERNO CRH, Salvador, v. 22, n. 55, p. 135-149, Jan./Abr. 2009

BARONE, A.C. C.; **Ibirapuera: parque metropolitano (1926 – 1954).** Tese de doutorado. FAU/USP. 2007.

BARROZO, L. V.; PÉREZ MACHADO, R. P.; SMALL, C.; CABRAL-MIRANDA, W.; **Changing spatial perception: dasymetric mapping to improve analysis of health outcomes in a megacity.** JOURNAL OF MAPS, 2015
<http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2015.1101403>

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

BRITO, P. L.; QUINTANILHA, J. A.; **A literature review, 2001-2008, of classification methods and inner urban characteristics identified in multispectral remote sensing images.** Proceedings of the 4th GEOBIA, May 7-9, 2012 - Rio de Janeiro - Brazil. p.586

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

CARDOSO, A. L. (org.), **O programa Minha Casa Minha Vida e seus efeitos territoriais.** Rio de Janeiro: Letra Capital, 2013. MARICATO, E.; **Metrópole, legislação e desigualdade;** Estudos avançados, 17(48), 2003.

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

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

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

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

DAVIS, M.; **Planeta Favela.** São Paulo, editora Boitempo, 2006.

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

DENALDI, R.; **Políticas de urbanização de favelas: evolução e impasses**. Tese de doutorado. FAU/USP, 2003.

DYRÁN, G. Y. B.; PRADO, D. A.; FILHO, P. W.; **Caracterização da refletância espectral de materiais urbanos com uso de espectroradiômetro**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

ENVI (ITTS): **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide**. Atmospheric Correction Module Version 4.7 August, 2009 Edition. Copyright © ITT Visual Information Solutions.

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

FIX, M.; ARANTES, P.; TANAKA, G.; **Urban Slums Reports: The case of Sao Paulo, Brazil**. Urban Slums Reports, banco Mundial, 2010.

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

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

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

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

GOVERNO FEDERAL; **Lei 10.257 de 10 de julho de 2001. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências**. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm

GRIFFIN, M. K; HSU, S. M; BURKE, H. K; ORLOFF, S. M; UPHAM, C. A; **Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis**. Lincoln Laboratory Journal. Volume 15, número 2, 2005

GROSTEIN, M., D.; **Metrópole E expansão urbana: a persistência de processos “insustentáveis”**. São Paulo em Perspectiva. ISSN 1806-9452 São Paulo em Perspectiva. vol.15 no.1 São Paulo Jan./Mar. 2001.

HARVEY, D.; **From the right to the city to the urban revolution**. Editora VERSO, Londres, 2012.

HEROLD, M.; GARDNER, M.; HADLEY, B.; ROBERTS, D.; **The spectral dimension in urban land cover mapping from high resolution optical remote sensing data**. Anais do terceiro Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Junho de 2002, Istanbul, Turkey.

HAUTECOUER, O.; LEROY, M. M.; **Surface Bidirectional Reflectance Distribution Function observed at global scale by POLDER/ADEOS**. Geophysical Research Letters, VOL. 25, Número 22, páginas 4197-4200, 15/Novembro, 1998

HOSTERT, P.; DIENMAYER, E.; DAMN, A.; SCHIEFER, S.; **Spectral unmixing based on image and reference endmembers for urban change analysis**. New Strategies for European Remote Sensing, Oluic (ed.). Millpress, Rotterdam, 2005.

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

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

JUNIOR, O. A. C.; CARVALOHO, A. P. F.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; **Mistura espectral: (I) detecção dos membros finais utilizando a geometria simplex**. Espaço & Geografia, Vol.6, No 1 (2003), 147:173.

JUNIOR, W. B.; **Planejamento de urbanização de favelas: caracterização sócio-econômico-ambiental de favelas a partir de dados censitários do IBGE**. Dissertação apresentada à escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em engenharia. São Paulo, 2005.

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

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

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

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

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

KUFFER, M.; PFEFFER, K.; SLIUZAS, R.; **Slums from Space -15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing**. Remote Sens. 2016, 8, 455; doi:10.3390/rs8060455

KUMAR, U.; RAJA KUMAR, S.; MUKHOPADHYAY, C.; RAMACHANDRA, T.V.; **Assimilation of endmember variability in spectral mixture analysis for urban land cover extraction**. *Advances in Space Research* 52 (2013) 2015–2033.

LARA, L. G.; **Modernização e desenvolvimentismo: formação das primeiras favelas de São Paulo e a favela do Vergueiro**. Dissertação de mestrado em Geografia Humana, FFLCH/USP, São Paulo, 2012.

LAZARINI, K.; BRESCIANI, M. S. M.; **O plano de avenidas e os rumos do urbanismo paulistano**. XVI congresso de iniciação científica da Unicamp, setembro de 2008.

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

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

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

LIPIETZ, A.; **O capital e seu espaço**. Nobel editora, São Paulo, 1988.

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

LOMBARDO, M. A.; **A ilha de calor da metrópole paulistana: subsídio ao planejamento urbano**. Anais do III Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), Belo Horizonte, 1984. Páginas 143 a 149. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/17-ecad6a0d2889e4e7242b9e73c7244fbc.pdf>

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

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

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

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

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

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

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

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

MARQUES, E; TORRES, H., G; SARAIVA, C.; **Favelas no município de São Paulo: Estimativas de população para os anos de 1991, 1996 e 2000**. Revista Brasileira de estudos urbanos e regionais. V. 5, número 1. Maio de 2013.

MATTEUCCI, L. M.; **Histórico da verticalização de assentamentos precários no município de São Paulo: comparação das políticas de intervenção e o ponto de vista dos moradores**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), maio de 2014.

MATTHEW, M. W et al; **Status of atmospheric correction using a MODTRAN-4-Based algorithm**. Disponível em:
http://aviris.jpl.nasa.gov/proceedings/workshops/00_docs/matthew_web.pdf.

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

MEADOWS, D. H.; RANDERS, J.; MEADOWS, D. L; **The limits to growth**. Library of Congress, Estados Unidos, 1972.

MENESES, P. R.; ALMEIDA T. (org.): **Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília – UNB, 2012.

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

MORATO, R.; KAWAKUBO, F. S.; MACHADO, R. P. P.; **Mapa dasimétrico de densidade demográfica da área urbana do município de Alfenas (MG)**. Anais do segundo CartoGeo- simpósio Internacional de História da Cartografia, 2011 Páginas 1599 à 1609. São Paulo, 2011.

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

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

NAKANO, A. K.; **Elementos demográficos sobre a densidade urbana da produção imobiliária: São Paulo uma cidade oca?** Tese apresentada ao Instituto de Filosofia e Ciências Humanas (IFCH) para obtenção do título de doutor em Demografia. Unicamp, Campinas/SP, 2015.

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

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

OKANO, T. L.; **Verticalização e modernidade: São Paulo 1940 – 1957**. Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Mackenzie, 2007.

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

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

PASTERNAK, T. S.; **Favelas no município de São Paulo: resultados de pesquisa**. In BLAY, E; “A luta pelo espaço”. Editora Vozes, Petrópolis, 1978.

PASTERNAK, T. S.; **A cidade que virou favela**. Espaço e debates 12 (4), 37 – 65, 1984.

PASTERNAK, T. S.; VERAS, S.; VERAS, M.; **Evolução e mudança das favelas Paulistanas**. Espaço e debates 31, 1990.

PASTERNAK, T. S.; **Favelas em São Paulo: censos, consensos e contrassensos**. Cadernos Metrópole número 5. PUC, São Paulo, 2001.

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

PASTERNAK, S., **Loteamentos irregulares no município de São Paulo: uma avaliação espacial urbanística**. Planejamento e políticas públicas | ppp | n. 34 | jan./jun. 2010

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

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

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

PÉREZ MACHADO, R. P. **Isotimas: uma forma de representação cartográfica do valor utilizando técnicas de Geoprocessamento**. Conference Paper · April 2003. DOI: 10.13140/RG.2.1.1854.1684. IX Encontro de Geógrafos de América Latina - EGAL (Mérida - México, 2003). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303659898_Isotimas_uma_forma_de_representacao_cartografica_do_valor_utilizando_tecnicas_de_Geoprocessamento.

PÉREZ MACHADO, R. P. **Isotimas: uma Metodologia para a Representação Cartográfica do Valor da Terra e Imóveis nas Metrôpoles Latino americanas Utilizando Técnicas de Geoprocessamento**. In: Ana Fani Alessandri de Carlos; Ariovaldo Umbelino de Oliveira. (Org.). Geografias de São Paulo. Representação e crise da Metrôpole. 1 ed. São Paulo: Contexto, 2004, v. 1, p. 315-336.

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

PÉREZ MACHADO, R. P. **Integração Geo-Escalar: Proposta de uma metodologia de identificação de mudanças no uso, ocupação e cobertura do solo aplicando a tecnologia geoespacial**. Tese de Livre Docência em Geografia, FFLCH/USP, 2012.

PÉREZ MACHADO, R. P, BARROSO L. V, LUCHIARI A, SMALL, C.; **Identification of the urban continuum of São Paulo Metropolitan Agglomeration with people, lights and land use. First results of a methodological approach**. Annual Conference of the IGU Urban Commission, At Poznan, Poland, Volume: 1. 2014.

PÉREZ MACHADO, R. P, KUBRUSLY V. S, BARROSO L. V.; **Social cartography of São Paulo Metropolitan Region. Multivariate analysis applied to the urban continuum**. Second International Congress of Remote Sensing and GIS, At Casablanca. Marrocos, Volume: 1 2014.

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

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

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO; **Habitação de interesse social em São Paulo: desafios e novos instrumentos de gestão / Prefeitura do Município de São Paulo**, Cities Alliance – São Paulo, Janeiro Projetos Urbanos, 2008. 96 p. il.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO; **Plano Municipal de Habitação, PMH 2009 – 2024**. São Paulo, 2011.

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

RASHED, T.; WEEKS, J. R.; ROBERTS, D.; ROGAN, J.; POWELL, R.; **Measuring the Physical Composition of Urban Morphology Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models**. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 69, No. 9, September 2003, pp. 1011–1020.

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

RASHED, T.; WEEKS, J. R.; STOW, D.; FUGATE, D.; **Measuring temporal compositions of urban morphology through spectral mixture analysis: toward a soft approach to change analysis in crowded cities**. *International Journal of remote sensing*. 699-718, 2005.

ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O.; **Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using Multiple Endmember Spectral Mixture Models**. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/els/00344257;jsessionid=uahn9sdph4oc.victoria>, Volume 65, Number 3, September 1998, pp. 267-279(13).

RODRIGUES, E. L.; **A estratégia fundiária dos movimentos populares na produção autogestionária da moradia**. Dissertação em Arquitetura e Urbanismo, FAU/USP, 2013.

ROCHA, J.; TENEDÓRIO, J. A.; ESTANQUEIRO, R.; SOUSA, P. M.; **Classificação de uso do solo urbano através da análise linear de mistura espectral com imagens de satélite**. *Finisterra*, XLII, 83, pp. 47-62, 2007.

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

SACHS, C.; **São Paulo: Políticas públicas e habitação popular**. Editora da USP, São Paulo, 1999.

SANTOS, H. (Coord.): **Relatório Síntese Infância e violência: Cotidiano de crianças pequenas em favelas e cortiços de São Paulo Santa Cecília, Bela Vista, Jardim Pantanal, Pedreira, Parelheiros-Nova América e Pimentas-Água Chata (Guarulhos)**. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL - Centro de Análises Econômicas e Sociais (CAES-PUCRS), 2014.

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

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

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

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

SCHRAMM, V. F.; VIBRANS, A.; C; **Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí**. Dynamis revista tecno-científica (out-dez/2007) vol.13, n.1, 59-69

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

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

SILVA, L. O.; **A constituição das bases para a verticalização na cidade de São Paulo**. ARQUITEXTOS 080.05, Janeiro de 2007.

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

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

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

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

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

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

SMALL, C.; PÉREZ MACHADO, R. P.; BARROZO, L. V.; LUCHIARI, A.; **Mapping decades of urban growth and development with multi-temporal spectral mixture models**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. Páginas 7088 a 7095.

SOMEKH, N.; GAGLIOTTI, G.; **Metrópole e verticalização em São Paulo: exclusão e dispersão**. Anais do encontro nacional da ANPUR, v. 15, 3013.

SOMERS, B.; STUCKENS, J.; TITS, L.; VERREYNEE, S.; VERSTRAETEN, W.; W.; COPPIN, P.; **A solution for the mixture problem in agricultural remote sensing**. Anais do IGARSS 2009. Cape Town – Africa, 2009.

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

SOUZA, R. C. A.; KUX, H. J. H.; **Comportamento Espectral e Alvos Urbanos: simulação com as bandas espectrais do satélite CBERS**. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia Brasil, 16 a 21 de abril de 2005. P. 1099 a 1106.

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

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

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

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

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

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

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

YUE, W., XU, J., WU, J., **Improvement of Linear Spectral Mixture Analysis and experimentation in Estimation of Urban Vegetation Fraction**. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=10226>, (Volume: 8), 2005.

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

ZANG, A., GONG, P.; **Noise effect on linear spectral unmixing.** Journal of the Association of Chinese Professionals in Geographic Information Systems Volume 5, Issue 1, 1999

ZUQUIM, M. L.; **Urbanização de assentamentos precários no município de São Paulo: quem ganha e quem perde?** Anais do II Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Natal/RN, 2012.

Reportagens

A FAVELA DO PARQUE CIDADE JARDIM: UMA METÁFORA DA SÃO PAULO MODERNA. Jornal El País Brasil. 25/01/2016. Acessível em: http://brasil.elpais.com/brasil/2016/01/20/politica/1453318772_454529.html

CINCO LUGARES EM SÃO PAULO QUE ERAM FAVELA E VOCÊ NEM IMAGINAVA. Blastingnews. 04/11/2015. Acessível em: <http://br.blastingnews.com/saopaulo/2015/11/cincolugaresemsaopauloqueeramfavelaevocene mimaginava00637245.html>

DESILGUALDADE NO BRASIL LEMBRA EUROPA DO SÉCULO 19, DIZ LE MONDE. Jornal Le Monde. 02/02/2016. Acessível em: <http://br.rfi.fr/brasil/20160202desigualdadenobrasillembraeuropadoseculo19dizlemonde>

THE TRAGIC REBIRTH OF SÃO PAULO'S FAVELAS. Jornal Folha de São Paulo. 08/09/2015. Acessível em: <http://www.worldcrunch.com/sourcepartner/folhades.paulo7.html>)

VERTICALIZAÇÃO DA GRANJA VIANA CRIA CONFLITO ENTRE COTIA E CARAPICUIBA, Jornal Estadão, 14/09/2010. Acessível em: <http://saopaulo.estadao.com.br/noticias/geral,verticalizacaodagranjavianacriaconfrontoentrecotiaecarapicuibaimp>