

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA**

**ARTHUR ROLIM MARQUES**

**Distribuição espacial das Superfícies Impermeáveis (SIs) na cidade de Belém,  
Pará**

São Paulo  
2019

**ARTHUR ROLIM MARQUES**

**Distribuição espacial das Superfícies Impermeáveis (SIs) na cidade de Belém,  
Pará**

**Versão Original**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia Física do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de Pesquisa: Informação Geográfica, Tratamento, Representação e Análise.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Shinji Kawakubo.

São Paulo

2019

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

M357d Marques, Arthur  
Distribuição espacial das Superfícies Impermeáveis  
(SIs) na cidade de Belém, Pará / Arthur Marques ;  
orientador Fernando Kawakubo. - São Paulo, 2019.  
79 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia,  
Letras e Ciências Humanas da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Geografia. Área de  
concentração: Geografia Física.

1. Superfícies Impermeáveis. 2. Modelo Linear de  
Mistura Espectral. 3. Distribuição espacial. I.  
Kawakubo, Fernando, orient. II. Título.

Nome: MARQUES, Arthur Rolim.

Título: Distribuição espacial das Superfícies Impermeáveis (SIs) na cidade de Belém, Pará.

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Assinatura:

Prof. Dr: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Assinatura:

Prof. Dr: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Assinatura:

Aos meus pais, Fernando Marques e Cinthya Rolim,  
meus espelhos, minhas forças, meu amor.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me deu forças nos momentos de fraqueza e que ilumina minhas decisões.

Aos meus pais, Fernando Marques e Cinthya Rolim, e ao meu irmão Victor Marques, que sempre me apoiaram, certamente sabem o quanto eu os amo e admiro e são os maiores exemplos de caráter, justiça, perseverança e sabedoria que eu tenho na vida.

Ao amor da minha vida, Larissa Moraes, por ser minha maior companheira nesta trajetória, compartilhar alegrias e tristezas, e me ajudar a sempre levantar depois da queda.

Às grandes amizades, principalmente ao meu irmão por insistência mútua, Rafael Davi Melém da Costa, que esteve comigo em todos os momentos importantes desde 2004 e sabe o quanto foi importante sua amizade para a conclusão destas etapas em minha vida.

Aos amigos que fiz no curso de Geografia que muito me ensinaram e certamente levarei sua amizade para sempre, sobretudo Lucas Macedo, meu amigo de todas as horas e que é uma das muitas provas de que a amizade verdadeira sempre puxa pra cima.

Ao meu orientador, professor e amigo Fernando Kawakubo, grande caráter, exemplo de profissionalismo e competência em Geografia, pelos diversos ensinamentos ao longo destes anos e possibilitar a realização deste trabalho.

Os meus mais sinceros agradecimentos.

“Hold your own, know your name, and go your own  
way...and everything will be fine”

Jason Mraz – Details in the fabric

## RESUMO

Uma das principais alterações do processo de urbanização é o aumento da impermeabilidade na paisagem urbana, através da substituição de áreas naturais por feições antropogênicas. Este processo impede a infiltração de água no solo urbano e, assim, estas feições são conhecidas como Superfícies Impermeáveis (SIs). Além de relacionar-se ao desenvolvimento da paisagem urbana, é possível atribuir à expansão das SIs boa parte dos impactos ambientais urbanos por ser uma variável quantificável do processo de urbanização. Sua identificação espacial é abordada pelo Sensoriamento Remoto há décadas, permitindo estudo de áreas extensas e acessibilidade remota aos dados. O presente trabalho consiste na análise da distribuição espacial das SIs na paisagem urbana da cidade de Belém, Pará, através do processamento digital de imagem multiespectral de média resolução espacial (Landsat 8). O sensor possui média resolução espacial, ocorrendo o fenômeno da “pixel mistura” devido à incompatibilidade entre escala de observação do sensor e as características espaciais do alvo. Apesar da diversidade espectral existente, é possível modelar o ambiente urbano utilizando um número reduzido de espectros de referência para estimar as SIs. No presente estudo, assim como em vários estudos publicados, foram utilizando três espectros de referência (*endmembers*) para modelar as variações de SIs, a saber: alto albedo, baixo albedo e vegetação verde. Este conjunto de *endmembers* mostrou-se suficiente para modelar a variabilidade espectral da paisagem urbana, uma vez que os erros observados (erros de extrapolação das frações e erro RMS) foram baixos. As estimativas de SIs na imagem do Landsat 8 foram avaliadas a partir das estimativas de SIs derivadas das imagens *Planet Scope* com 3 metros de resolução espacial que serviram como referência. Os resultados mostraram uma forte aderência entre os dois modelos de SIs gerados, com correlação de 84%, embora de forma não linear. O modelo de SIs da L8 superestimou os valores de impermeabilização do solo urbano. Por fim, foram selecionados alguns bairros do município de Belém para evidenciar os diferentes níveis de impermeabilização em virtude da heterogeneidade do uso do solo urbano na cidade.

**Palavras-chaves:** Superfícies Impermeáveis; Modelo Linear de Mistura Espectral; Distribuição Espacial.



## ABSTRACT

One of the main changes in the urbanization process is the increase of impermeability in the urban landscape, by replacing natural areas with anthropogenic features. This process prevents water infiltration into urban soil and therefore these features are described as Impervious Surfaces (IS). In addition to being related to urban landscape development, it is possible to attribute to the expansion of IS a large part of the urban environmental impacts as it is a quantifiable variable of the urbanization process. Its spatial identification has been addressed by Remote Sensing for decades, allowing the study of large areas and remote accessibility to data. The present work aims the analysis of the spatial distribution of the IS in the urban landscape of the city of Belém, Pará, through the multispectral digital image processing of medium spatial resolution (Landsat 8). The spatial resolution results, in the “mixture pixel” phenomenon due to incompatibility between sensor observation range and spatial characteristics of the target. Despite the existing spectral diversity, it is possible to model the urban environment using a small number of reference spectra to estimate SIs. In the present study, as well as in several published studies, three reference spectra (endmembers) were used to model the variations of IS: high albedo, low albedo and green vegetation. This set of endmembers proved to be sufficient to model the spectral variability of the urban landscape, since the observed errors (fractions overflow and RMSE) were low. The IS estimates on the Landsat 8 image were evaluated from the SI estimates derived from the Planet Scope images with 3 meters of spatial resolution that served as reference. The results showed a strong relationship between the two IS models generated, with a correlation of 84%, although nonlinearly. The L8 model overestimated the IS in the urban landscape. Lastly, some areas of Belém were selected to highlight the different levels of IS due to the heterogeneity of urban land use in the city.

**Key-words:** Impervious Surfaces; Linear Spectral Mixture Model; Spatial Distribution

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01.</b> Mapa de localização da cidade de Belém .....	21
<b>Figura 02.</b> Relação entre o percentual de impermeabilidade de uma bacia hidrográfica e a qualidade dos seus corpos hídricos.....	25
<b>Figura 03.</b> Alterações no ciclo hidrológico à medida que ocorre o aumento do percentual de SIs em substituição às feições naturais.....	26
<b>Figura 04.</b> Relação do Escoamento Superficial e o percentual de impermeabilidade e o Coeficiente do Escoamento Superficial (C) em mais de quarenta bacias hidrográficas.....	27
<b>Figura 05.</b> Impactos da impermeabilidade nas comunidades de macro invertebrados em canais urbanos .....	30
<b>Figura 06.</b> Relação entre o NDVI e a TS (em Kelvin) apresentando mudanças sazonais evidentes para a região metropolitana de Minneapolis-Saint Paul.....	34
<b>Figura 07.</b> Forte correlação entre o percentual de Sis e a TS (em Kelvin) da região metropolitana de Minneapolis-Saint à despeito das variações sazonais.....	35
<b>Figura 08.</b> Comportamento espectral médio da água vegetação e solo exposto .....	39
<b>Figura 09.</b> Índice de publicações e citações a partir da base de dados bibliográficos Scopus .....	42
<b>Figura 10.</b> Representação da paisagem urbana enquanto uma combinação linear de suas feições elementares: vegetação, SIs e solo.....	44
<b>Figura 11.</b> Imagem Landsat 8 em composição colorida R(6)G(5)B(4) apresentando a diferença entre a área total do município de Belém (A) e sua porção continental (B), analisada neste trabalho .....	52
<b>Figura 12.</b> Imagem Landsat 8 em composição colorida R(6)G(5)B(4) sem máscara (A) e a mesma imagem com a máscara aplicada a partir do índice MNDWI (B).....	54
<b>Figura 13.</b> Imagens originais e da normalização para as bandas do visível (BS-B4), infravermelho próximo (B5) e infravermelho de ondas curtas (B6-B7).....	56

<b>Figura 14.</b> Imagens componentes principais (PCs) utilizando as imagens brutas e com normalização .....	58
<b>Figura 15.</b> A) <i>endmembers</i> das imagens originais; B) <i>endmembers</i> das imagens normalizadas .....	58
<b>Figura 16.</b> Imagem frações derivados do modelo de mistura espectral: A) Alto albedo; B) Baixo albedo; C) Vegetação verde; D) Imagem erro RMS .....	63
<b>Figura 17.</b> Modelo de Superfície Impermeável (Si) gerado a partir da soma das frações de alto e baixo albedo decomposto do modelo de mistura espectral utilizando imagens multiespectrais do L8 .....	64
<b>Figura 18.</b> Espacialização da <i>fraction overflow</i> negativa e positiva .....	65
<b>Figura 19.</b> Estimativa de SI gerada a partir do satélite Planet Scope, com 3 metros de resolução espacial.....	66
<b>Figura 20.</b> Relação entre as estimativas de Sis geradas a partir das imagens L8 e Planet Scope.....	67
<b>Figura 21.</b> Resíduo dos valores de SI gerado a partir das estimativas do Planet Scope e L8 .....	67
<b>Figura 22.</b> Imagem Resíduo gerada a partir das estimativas do Planet Scope e L8 (SIs Planet Scope - SIs L8) .....	68
<b>Figura 23.</b> Grau de impermeabilidade nos bairros de Belém (0 à 1) .....	69

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01.</b> Concentração dos poluentes nas principais Sis, a partir de doze amostras de Sis em áreas urbanas de Winsconsin.....	29
<b>Tabela 02.</b> Estudos sobre a influência das Sis na biodiversidade de canais urbanos e seus parâmetros biofísicos.....	31
<b>Tabela 03.</b> Principais regiões do Espectro Eletromagnético utilizada pelo Sensoriamento Remoto.....	38
<b>Tabela 04.</b> Características da imagem multiespectral proveniente do satélite Landsat 8. ....	50
<b>Tabela 05.</b> Autovalores das imagens PCs geradas a partir das imagens brutas e com normalização .....	57

## LISTA DE SIGLAS

ACP – Análise por Componentes Principais  
DAOUT – Distrito Administrativo do Outeiro  
BITS – Dígitos binários  
EEM – Espectro Eletromagnético  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IFOV – *Instant Field of View*  
H-RESOLUTION – Alta resolução  
L-RESOLUITON – Baixa resolução  
LASRC – *Landsat 8 Surface Reflection Code*  
MME – Modelo de Mistura Espectral  
MNDWI – Modified Normalized Difference Water Index  
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index  
NIR – Infravermelho próximo  
OLI – *Operational Land Imager*  
PDI – Processamento Digital de Imagem  
REM – Radiação Eletromagnética  
RMB – Região Metropolitana de Belém  
RMSE – *Root Mean Square Error*  
SR – Sensoriamento Remoto  
SIs – Superfícies Impermeáveis  
SWIR – Infravermelho de ondas curtas  
TS – Temperatura de Superfície  
USGS – United States Geological Survey

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	15
2. Objetivos .....	18
3. Justificativa.....	19
4. Fundamentação Teórica.....	21
4.1. Caracterização da área de estudo .....	21
4.1.1. Aspectos gerais.....	21
4.1.2. Histórico da área de estudo.....	22
4.2. Superfícies Impermeáveis .....	23
4.2.1. Superfícies Impermeáveis e ciclo hidrológico.....	25
4.2.2. Superfícies Impermeáveis e a poluição nos corpos hídricos.....	28
4.2.3. Superfícies Impermeáveis e a biodiversidade .....	29
4.2.4. Superfícies Impermeáveis e temperatura.....	32
4.3. Uso do Sensoriamento Remoto das SIs.....	35
4.3.1. Espectro eletromagnético e comportamento espectral dos alvos .....	37
4.3.2. Resoluções dos sensores .....	40
4.3.3. Sensoriamento Remoto das Superfícies Impermeáveis.....	41
4.3.4. Mistura espectral .....	46
5. Metodologia.....	49
5.1. Materiais utilizados .....	49
5.2. Método .....	51
5.2.1. Pré-processamento (USGS).....	51
5.2.2. Recorte da área de estudo .....	51

5.2.3. Máscara da água.....	52
5.2.4. Modelagem de Mistura Espectral e estimativa de SIs.....	55
5.2.4.1. Seleção dos <i>endmembers</i> .....	55
5.2.4.2. Estimativa das frações de mistura de SIs.....	58
5.2.4.3. Avaliação dos resultados.....	60
6. Resultados e Discussão .....	62
7. Conclusão .....	72
8. Referências .....	74

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização é um dos principais fenômenos da humanidade, iniciado, principalmente, a partir da primeira Revolução Industrial, ocorrida no continente europeu, no século XVIII. Desde este período até os dias atuais, diferentes níveis deste processo foram sendo produzidos pela sociedade nas mais diversas partes do globo, ocasionando uma alteração da paisagem a nível mundial.

Os países desenvolvidos, de modo geral, apresentaram seu processo de urbanização mais lentamente, com um maior tempo para o estabelecimento das etapas desta nova condição espacial – a urbana. Entretanto, nos países subdesenvolvidos (como o Brasil), a urbanização é mais recente e ocorreu de modo bem mais acelerado, no qual as diversas etapas aconteceram concomitantemente.

No Brasil, existe, ainda, uma intensa disparidade regional interna relacionada ao processo de urbanização no seu território. Este modo recente e acelerado é ainda mais evidente em regiões do país com desenvolvimento tardio, como as cidades amazônicas, cujo crescimento urbano foi intensificado após a metade do século XX, a partir dos sucessivos projetos de integração nacional através da expansão da malha viária brasileira.

Sobre a urbanização, uma das principais consequências deste processo é o aumento da impermeabilidade do solo presente na paisagem urbana, decorrente da substituição de áreas naturais permeáveis por feições antropogênicas. De uma maneira geral, esta alteração impede ou dificulta a infiltração de água no solo urbano e, por isso, estas feições são conhecidas como Superfícies Impermeáveis (SIs).

Nos primeiros estudos, as SIs eram utilizadas para abordar principalmente análises relacionadas ao desenvolvimento urbano da paisagem. Com o passar do tempo, este conceito tornou-se um dos principais indicadores dos impactos ambientais decorrentes da urbanização por se tratar de uma variável deste processo passível de quantificação em cada etapa desta alteração da paisagem.

Além disso, trata-se de um conceito unificador, que permite relevar fatores específicos dos impactos decorrentes da urbanização, concentrando a complexidade destes agentes em um único elemento – no caso, as SIs. Ou seja, é possível atribuir a sua expansão problemas como: impactos no ciclo hidrológico, alteração dos habitats aquáticos e biodiversidade da água, qualidade dos recursos hídricos, influência direta e indireta no clima urbano, dentre outros.



Uma vez que o aumento e distribuição das SIs tem relação direta com o processo de urbanização de uma determinada paisagem, tal qual uma cidade, é importante utilizar ferramentas que tenham a capacidade de análise de grandes extensões de área. Para tal, o uso de dados de Sensoriamento Remoto representa um apreciável recurso por permitir o estudo de uma área considerável de modo menos oneroso e com tempo hábil em relação a uma análise de campo desta área.

Dentre os dados de Sensoriamento Remoto, é importante destacar a escolha de imagens multiespectrais com média resolução espacial para análise das SIs em área urbana – no caso deste trabalho, imagens do satélite Landsat 8. O motivo decorre da gratuidade para obtenção destas imagens no site da USGS (*United States Geological Survey*, ou Departamento de Geologia dos Estados Unidos). Além disso, estes dados já são disponibilizados com um pré-processamento padrão para todas as imagens, reduzindo a necessidade de padroniza-las por parte do usuário.

Inicialmente, será apresentada a caracterização da área de estudo, com um breve histórico de ocupação da cidade de Belém e sua respectiva alteração da paisagem urbana. Além disso, é apresentada a fundamentação teórica, com o conceito de SIs, e os principais efeitos destas feições antropogênicas na paisagem, e o uso do sensoriamento remoto na análise das SIs, enquanto principal ferramenta de análise deste fenômeno em áreas urbanas. Para tal, foi realizado um levantamento de diversos artigos científicos que abordam estes temas.

Nesta etapa, foram selecionados os artigos que melhor representem o estado da arte destes estudos, com destaque para os que apresentem análises similares às apresentadas neste trabalho. Além disso, foram considerados alguns trabalhos que permitem uma visão mais generalizada da evolução do conceito das SIs, evidenciando sua importância enquanto parâmetro analítico.

Em seguida, é apresentada a metodologia deste trabalho, dividida em duas etapas fundamentais: materiais e método. Na primeira etapa são apresentadas as características das imagens utilizadas, tais como: resolução espacial e resolução espectral; data de aquisição das imagens; azimute e elevação solar dos dados; etc. É importante destacar estes pontos, uma vez que a natureza dos dados utilizados constitui um papel fundamental no resultado e análise das SIs neste trabalho.

Na segunda etapa são abordados aspectos referentes ao método e, por isso, apresenta algumas subdivisões. A primeira delas diz respeito ao pré-processamento

realizado nas imagens multiespectrais visando sua correção geométrica e aplicação de correção atmosférica com refletância para superfície. Conforme já mencionado, este processamento por parte da USGS padroniza os dados, atenuando algumas interferências atmosféricas.

Outra subdivisão desta etapa da metodologia está relacionada ao recorte da área de estudo nas imagens multiespectrais. Para tal, foi utilizado um arquivo vetorial com o limite administrativo do município e dos bairros da cidade de Belém. Além disso, utilizou-se de uma normalização para criação de uma máscara dos corpos hídricos urbanos e do entorno da cidade – no caso, o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (ou, em inglês, *MNDWI – Modified Normalized Difference Water Index*).

A última subdivisão dos métodos diz respeito à modelagem da mistura espectral presente no *pixel*, com o objetivo de selecionar os pixels homogêneos (espectros puros, ou *endmembers*) representativos – isto é, aqueles que apresentam propriedades espectrais invariáveis ao longo da imagem. A seleção destes elementos foi possível a partir da Análise por Componentes Principais (ACP), que permite reduzir a dimensionalidade dos dados concentrando a variância em um menor número de bandas.

Após a seleção dos *endmembers*, é possível, a partir do Modelo de Mistura Espectral (MME), decompor os *pixels* das imagens multiespectrais de acordo com a proporção dos componentes dominantes na paisagem analisada. Uma das vantagens do uso deste modelo é a possibilidade de estimar os valores de mistura por meio de modelagem matemática. A avaliação da mistura é avaliada a partir dos histogramas das imagens-fração e pelo erro médio quadrático.

Em seguida, a informação de SIs é estimada a partir da soma das frações de alto e baixo albedo, geradas na etapa anterior. Além disso, é apresentada uma avaliação qualitativa e quantitativa dos dados gerados, com base na imagem multiespectral do satélite *Planet Scope*. Por fim, é apresentado o capítulo “Resultados e Discussão”, abordando os dados provenientes das imagens multiespectrais. São selecionados bairros com disposições, então, são explorados visando estabelecer uma relação entre as SIs e a urbanização de Belém. Para tal, são selecionados alguns bairros com diferentes concentrações de impermeabilidade.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a distribuição espacial das Superfícies Impermeáveis (SIs) na paisagem urbana da cidade de Belém, Pará, através do processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto. A análise baseou-se na imagem multiespectral captada pelo sistema-sensor ótico OLI (*Operational Land Imager*), do ano de 2017, a bordo do satélite Landsat 8.

Este objetivo será alcançado mediante o cumprimento dos seguintes objetivos específicos: (1) quantificar as proporções de SIs nos pixels das imagens de satélite a partir do Modelo de Mistura Espectral (MME); (2) gerar os dados de Áreas de Superfícies Impermeáveis (ASIs); (3) avaliar, na imagem multiespectral, a distribuição espacial das SIs em bairros com características distintas.

### 3. JUSTIFICATIVA

Uma vez que a maior parte da população mundial vive em áreas urbanas, a análise destes espaços representa um importante campo de estudo à sociedade como um todo. E, por se tratar de um fenômeno complexo, com múltiplas características e presente em escala global, o uso de variáveis analíticas unificadoras deste processo, tal como as SIs, é de considerável relevância para sua compreensão.

Ademais, é importante considerar os inúmeros indícios da relação prejudicial entre o aumento do percentual de SIs e os diversos impactos no ambiente (qualidade do ar, temperatura urbana, qualidade dos ecossistemas, etc.) e nas sociedades (problemas respiratórios, doenças cardiovasculares, doenças provenientes da poluição de abastecimentos de água, proliferação de bactérias, etc.), conforme apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho. Assim, o estudo desta variável analítica transcende uma simples análise da estrutura da paisagem urbana.

A escolha da área de estudo está relacionada, primeiramente, à importância histórica da cidade de Belém, uma das principais metrópoles brasileiras – sobretudo no final do século XIX e início do XX, com o ciclo da Borracha. Tal fato proporcionou um crescimento econômico considerável da cidade a nível regional e nacional, o que resultou em diversas alterações em sua paisagem urbana do ponto de vista da impermeabilização na primeira metade do século passado.

Outro motivo desta escolha está relacionado à expansão urbana para alguns eixos afastados do centro, sobretudo após a segunda metade do século XX, integrando algumas áreas antes pouco interligadas – o que contribuiu com o aumento da impermeabilidade de Belém em áreas periféricas. Além disto, nas áreas centrais, o aumento significativo da verticalização na segunda metade do século XX e início do século atual na paisagem urbana explicitam mais um contraste espacial na cidade.

Por se tratar de uma análise espacial e em escala considerável, fica evidente a necessidade de instrumental adequado para estas grandes dimensões, tal como o Sensoriamento Remoto. A partir deste tipo de informação, é possível considerar as particularidades da distribuição das SIs ao longo dos bairros, incluindo os com

diversas características distintas (relevância histórica, tipo de uso do solo urbano, densidade demográfica, etc).

Além dos quesitos mencionados anteriormente, o fato das imagens utilizadas serem disponibilizadas de modo gratuito e com pré-processamentos padronizados pela USGS nas imagens são fatores atrativos para a escolha dos dados. Por fim, é importante lembrar que estas imagens contemplam diferentes comprimentos de onda, permitindo a identificação e realce de feições distintas, tais como as SIs.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Caracterização da Área de Estudo

#### 4.1.1. Aspectos Gerais

A cidade de Belém, localizada entre as coordenadas 48° 30' 23,42" e 48° 21' 55,16" de longitude oeste e 1° 16' 31,51" e 1° 28' 46,82" de latitude sul, é margeada ao sul pelo rio Guamá e oeste pela Baía do Guajará. Ao norte, localiza-se a ilha de Caratateua, sede do Distrito administrativo do Outeiro (DAOUT), e a leste, a cidade encontra o município de Ananindeua, o qual integra a RMB, Região Metropolitana de Belém (RMB).

A capital paraense, bem como uma boa parte das cidades amazônicas, conta com grandes massas de água em seu entorno (figura 01), tais como a Baía do Guajará e Rio Guamá, e apresenta diversos corpos hídricos urbanos (a maioria, aterrada). É fundamental destacar os mananciais localizados na porção sudeste da cidade, os lagos Bolonha e Água Preta, uma vez que são responsáveis pelo abastecimento de uma grande parcela da população presente na RMB, considerados os mais importantes corpos hídricos urbanos da cidade.

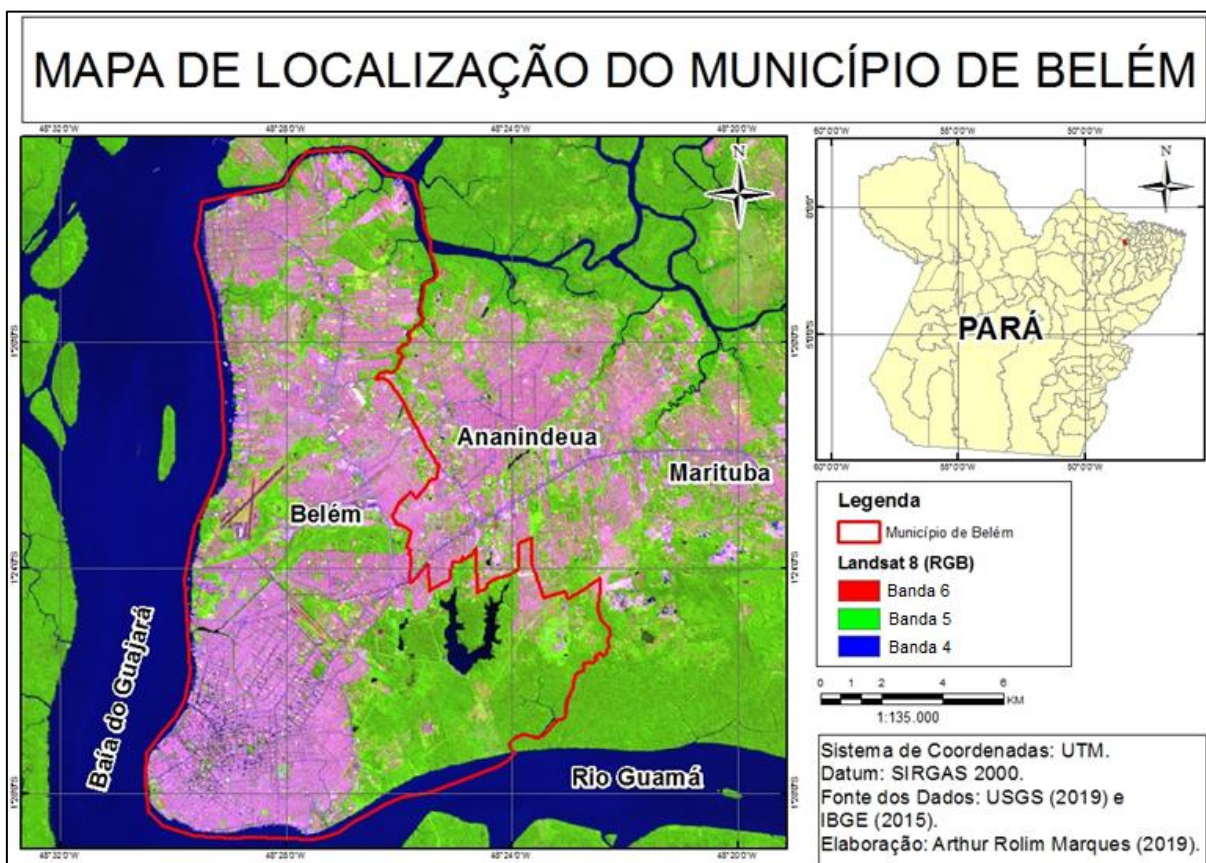


Figura 01. Mapa de localização da cidade de Belém.

O município de Belém está dividido em oito distritos administrativos, tanto em sua porção continental quanto na insular. Sua área continental compreende seis distritos administrativos: DABEL (Belém), DAGUA (Guamá), DASAC (Sacramenta), DAENT (Entrocamento), DABEN (Benguí) e DAICO (Icoaraci). Estes distritos abarcam quarenta e oito dos setenta e um bairros existentes no município.

#### **4.1.2. Histórico da Área de Estudo**

A área de estudo diz respeito à cidade de Belém, capital do estado do Pará. O início da demarcação de seu sítio urbano localiza-se em uma área descoberta em 1616. A ocupação, por parte dos portugueses, teve origem em um terraço fluvial, protegido do fenômeno das marés (ARAUJO JUNIOR & AZEVEDO, 2012) no início do século XVII, onde se localiza, atualmente, o bairro da Cidade Velha, no chamado “Centro Histórico” da cidade.

Nos dois primeiros séculos de sua existência, algumas intervenções foram realizadas na cidade, ainda sem contar com o impacto efetivo do processo de urbanização na cidade – que, ao final do século XVIII contava com dois núcleos bem definidos, de relativa expressão e limitados por um alagadiço de grandes proporções – o Piri de Juçara (PENTEADO, 1968). Este alagadiço, por sua vez, foi um dos responsáveis para o impasse da expansão da malha urbana.

Embora no século XIX, em sua primeira metade, algumas obras estruturais importantes foram realizadas na cidade, como o aterro deste igarapé (nome dado a pequenos rios na Amazônia brasileira), que tinha papel de demarcador de uma porção da cidade, somente a partir de seu último quarto foi possível evidenciar um crescimento urbano exponencial. Isto se deu em decorrência do *boom* da borracha, que fomentou o período áureo de sua história (1880-1915), com diversas intervenções urbanísticas (arruamento, edificações de grande porte, expansão da malha urbana, aterramentos, etc.) e crescimento populacional abrupto (Penteado, op. cit.).

Com a queda das exportações e o fim do chamado *Ciclo da Borracha*, a cidade de Belém apresentou seus primeiros sinais de estagnação no período entre guerras (1918-1935), onde passou a atingir, inclusive, níveis de decréscimo populacional. Uma vez que a cidade foi fundada com limitações físicas (marguada pela Baía do Guajará e pelo Rio Guamá), suas áreas de expansão apresentavam limitações de crescimento.

A partir da década de 70 do século passado, a cidade passou a crescer em três vetores, em direção a sua periferia urbana: rodovia BR-316 (principal via de acesso rodoviário à cidade de Belém); rodovia Arthur Bernardes; e, por fim, rodovia Augusto Montenegro. Esta espacialização em direção às extremidades incorre tanto em um aumento populacional e crescimento de SIs na cidade (maior número de arruamentos, edificações para serviços e moradia, etc.).

Além disso, a partir de 1980, a cidade de Belém passou a vivenciar o crescimento exponencial do processo de verticalização, sobretudo em áreas centrais – já existiam alguns prédios com altura significativa, mas não com tanta densidade. Do ponto de vista da análise de SIs através de SR, isto pode representar uma subestimação destas feições antropogênicas, em virtude do sombreamento provocado por estes edifícios.

#### **4.2. Superfícies Impermeáveis**

As SIs geralmente são exemplificadas como ruas ou telhados, embora também sejam apresentadas em outras tipologias conhecidas, tais como: calçadas, pátios, estacionamentos, afloramentos rochosos, solos compactados, lajes, dentre outros (ARNOLD & GIBBONS, 1996). Por apresentarem uma diversidade considerável de exemplos, estas feições são classificadas em dois grandes grupos: Coberturas e Sistemas Viários (SCHUELER, 1994).

Em geral, as SIs que estão relacionadas ao grupo “Coberturas” são constantemente utilizadas em planejamentos e zoneamentos enquanto parâmetros analíticos. Em outras palavras, boa parte destes estudos condiciona a densidade populacional máxima para uma determinada área de acordo com medidas relacionadas a esse tipo de SI, tais como as unidades habitacionais presentes.

Entretanto, as SIs relacionadas com o grupo “Sistemas Viários” também merecem destaque, pois podem apresentar, em determinadas situações, impactos ambientais ainda maiores do que as demais (WENG, 2011). Isto porque, em áreas residenciais, o escoamento proveniente das áreas de cobertura pode ser distribuído em áreas permeáveis (como quintais), aumentando o percentual de infiltração – fato que não costuma ocorrer com ruas e estacionamentos, uma vez que estes geralmente são conectados aos sistemas artificiais de drenagem.

Estes tipos de ordenamentos tendem a basear sua escala de atuação de acordo com alguns limites político-administrativos – apesar da tendência, atualmente

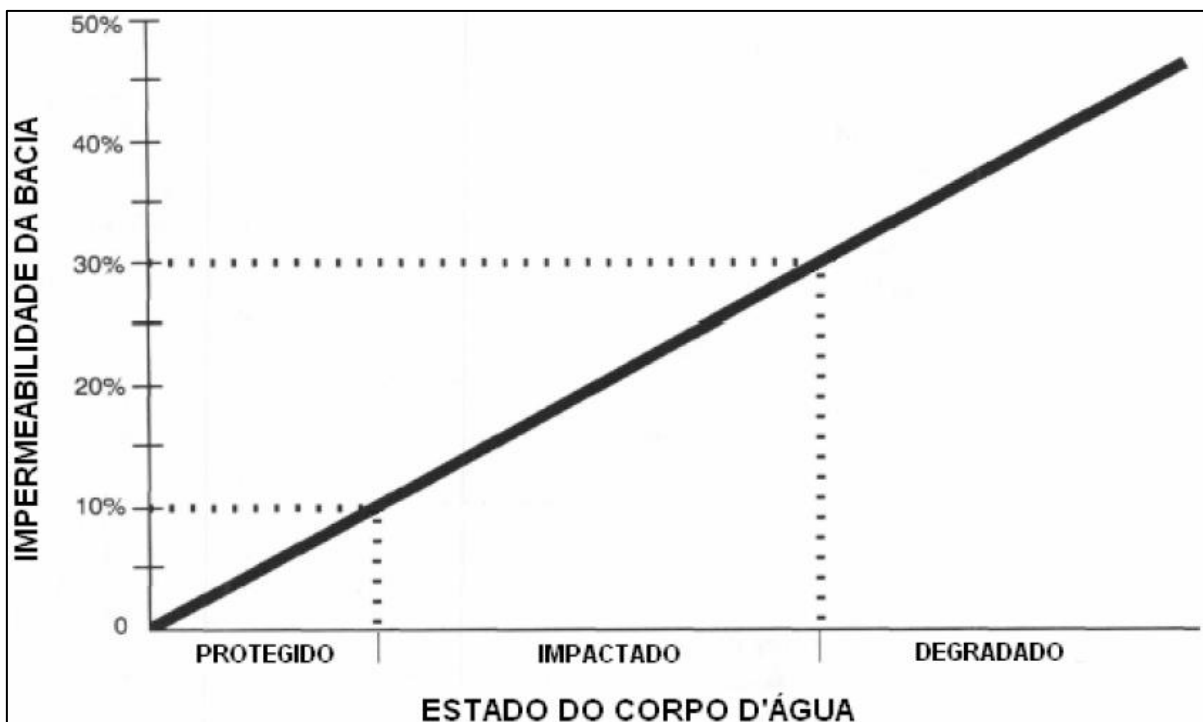


aplicada em nível mundial, de utilizar alguns dos sistemas naturais para tal finalidade, tais como as bacias hidrográficas (ANDREOLI & SOUZA, 1992). O crescimento da utilização destas feições naturais para planejamentos e zoneamentos é justificado, uma vez que as mesmas podem ser compreendidas enquanto unidades geográficas.

As bacias hidrográficas começaram a ser utilizadas na ciência, enquanto categorias analíticas, a partir da metade do século XX, principalmente através de autores renomados como Robert Horton e Arthur Strahler (CHRISTOFOLETTI, 1980). Estes autores são considerados pioneiros na utilização de bacias hidrográficas enquanto unidades sistêmicas de análise (OLIVEIRA, 2002 apud MACHADO & TORRES, 2012).

A composição da bacia hidrográfica totaliza um sistema que abarca um grande volume de materiais líquidos e sólidos próximo à superfície terrestre, sendo delimitado interna e externamente pelos processos que interferem no fluxo de matéria e de energia de um rio ou uma rede de canais a partir do fornecimento de água pela atmosfera (RODRIGUES & ADAMI, 2005). Desta forma, a bacia hidrográfica é compreendida como uma unidade de análise espacial de grande estíma, principalmente para a Ciência Geográfica.

Logo, devido sua importância, cabe ressaltar os diversos estudos voltados para a avaliação desta relação direta, entre o aumento das SIs em uma bacia hidrográfica e sua consequente perda de qualidade (figura 02). A conclusão dos dados indica uma divisão em três grupos, com base em seu percentual de impermeabilidade: de 0-10% de impermeabilidade, a bacia é considerada “Protegida”; de 11-29%, “Impactada”; e, a partir dos 30%, “Degradada” (com seus parâmetros em níveis críticos).



**Figura 02.** Relação entre o percentual de impermeabilidade de uma bacia hidrográfica e a qualidade dos seus corpos hídricos. **Fonte:** adaptado de ARNOLD & GIBBONS, op. cit. apud ESTEVES, 2006

No primeiro grupo, os canais da bacia apresentam estabilidade, com índices expressivos de qualidade da água e de biodiversidade em sua extensão. A partir da classificação intermediária, o grau de instabilidade já se torna perceptível, embora ainda apresentem considerável heterogeneidade de espécies no habitat aquático e qualidade relativa da água até os 30% de impermeabilidade. Contudo, desse percentual em diante, estes parâmetros se intensificam negativamente, apresentando condições alarmantes nos canais e adentrando no estágio do terceiro grupo.

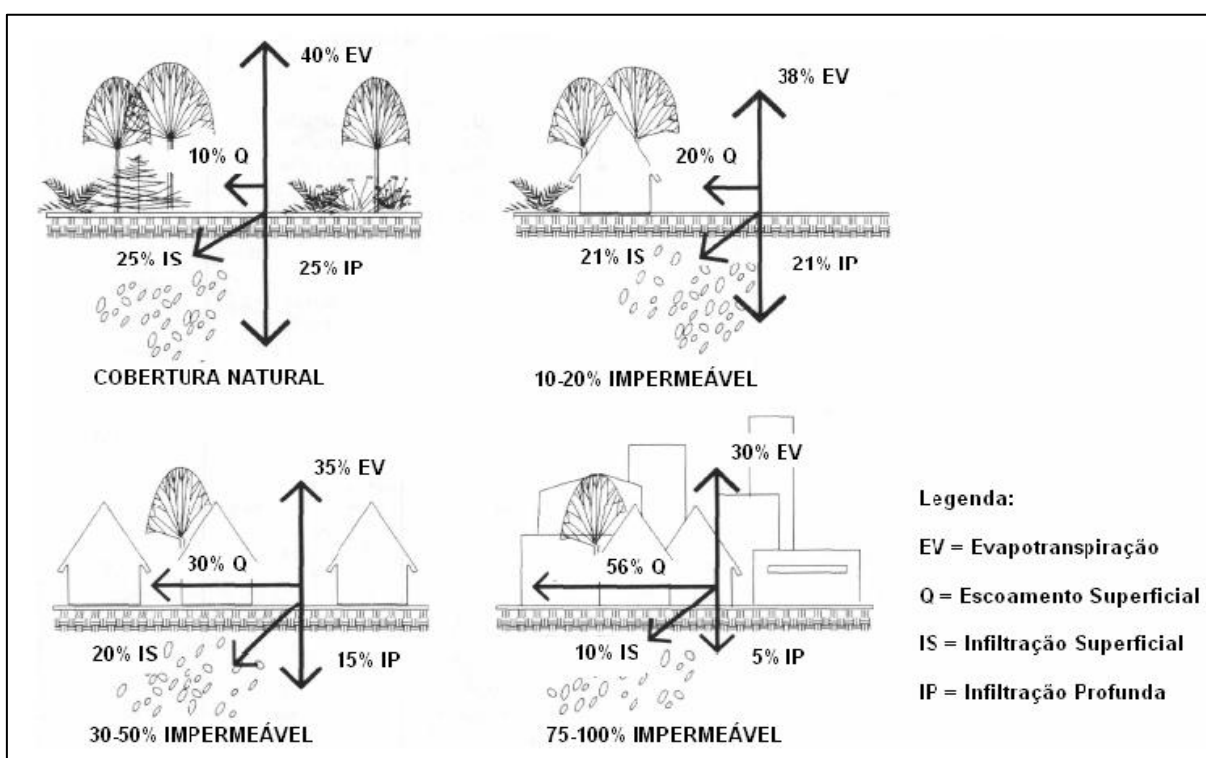
#### 4.2.1. Superfícies Impermeáveis e Ciclo Hidrológico

Dentre os inúmeros problemas ocasionados pelo crescimento de SIs, o aumento do escoamento superficial parece ser um dos mais lógicos, uma vez que a base do seu conceito, conforme já apresentado, refere-se à determinada quantidade de água impossibilitada de infiltrar o solo. O fato deste volume de água não apresentar mais percolação (passagem lenta de um líquido através de um meio de propagação) tende a aumentar na quantidade e velocidade de concentração na superfície.

Quando isto ocorre, há o aumento da velocidade e, em consequência, do volume e magnitude do escoamento ocasionado na superfície, bem como

inundações de maior intensidade (BRUN & BAND, 2000). Após isto, este processo reduz o nível do lençol freático, o que resulta na alteração significativa das reservas hídricas e das demais etapas do ciclo hidrológico (figura 03).

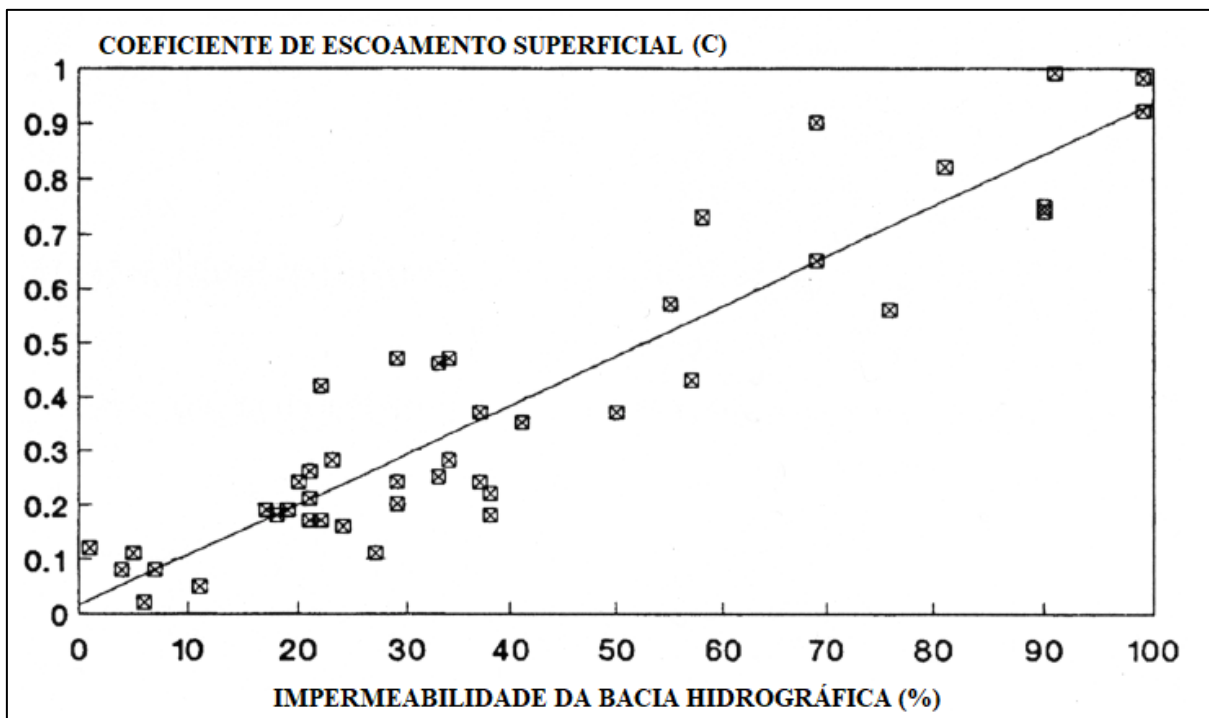
Este aumento da velocidade do escoamento ocorre não apenas pela impossibilidade (ou redução) de infiltração da água no solo, como também pela redução das irregularidades do terreno presentes na paisagem natural por conta da “pavimentação” ocasionada pelas SIs, o que reduz consideravelmente a resistência ao escoamento. Desta forma, seu aumento continua ocorrendo ainda que em precipitações de menor expressão, pelo menor número de depressão presente na paisagem (ESTEVES, 2006).



**Figura 03.** Alterações no ciclo hidrológico à medida que ocorre o aumento do percentual de SIs em substituição às feições naturais. **Fonte:** adaptado de ARNOLD & GIBBONS, op. cit. apud ESTEVES, op. cit.

Os primeiros estudos de escoamento superficial focavam suas análises na importância apenas do ponto de vista da segurança, com estudos voltados exclusivamente para escoar, de modo cada vez mais rápido e eficaz, a água da chuva presente nas superfícies pavimentadas. Somente com o tempo, as preocupações destes estudos foram direcionadas, também, para questões de erosão, qualidade da água, aumento da temperatura de superfície e impactos diretos na biodiversidade dos canais.

Baseado no monitoramento de mais de quarenta escoamentos nos Estados Unidos, foi possível identificar que há uma forte relação entre o coeficiente de escoamento (fração do volume de águas pluviais que é diretamente escoado) e o percentual de SIs (figura 04). Entretanto, em níveis mais baixos, outros fatores, tais como solos e declive também são consideravelmente importantes para o escoamento.



**Figura 04.** Relação do Escoamento Superficial e o percentual de impermeabilidade e o Coeficiente do Escoamento Superficial (C) em mais de quarenta bacias hidrográficas. **Fonte:** adaptado de Schueler, op. cit.

Estes impactos no ciclo hidrológico, decorrentes da urbanização e da alteração da paisagem estão presentes em todo o processo (KIBLER, 1982 apud WENG, 2001). No início, há uma redução da evapotranspiração e aumento da sedimentação nos canais, provenientes da remoção da vegetação. Na fase intermediária, ocorre a redução da infiltração (e o conseqüente enfraquecimento da recarga do lençol freático), por causa da construção das feições antropogênicas.

Após a implantação destas edificações, onde o nível de impermeabilidade é maior, a duração do escoamento é reduzida e os picos passam a ocorrer quando inicia a precipitação – o que acarreta no aumento do volume e dano por inundação. O uso de galerias e esgotos pode contribuir no aumento da velocidade do escoamento (GOUDIE, 1990 apud WENG, op. cit.).

#### **4.2.2. Superfícies Impermeáveis e a Poluição nos Corpos Hídricos**

Outro impacto deste fenômeno da urbanização é o aumento considerável de poluição nos canais fluviais, principalmente os urbanos. Entretanto, ainda que esta poluição não seja produzida diretamente pelas SIs, estas feições representam as principais classes dos usos antropogênicos atuais, que contribuem com o aumento desta poluição difusa, reforçando, conseqüentemente, a dificuldade do uso social da água para abastecimento da população.

Ou seja, os poluentes depositados da atmosfera, através da fumaça de veículos, de chaminés, fábricas, ou outros tipos de fontes de emissão, são depositados e armazenados nas SIs até a próxima chuva. Quando esta ocorre, estas impurezas coletadas são levadas adiante pelo fluxo da água e posteriormente depositadas nos diversos corpos hídricos (SCHUELER, op. cit.).

Isto ocorre porque parte do processamento natural dos poluentes, que deveria ocorrer no solo após o processo de infiltração, é impossibilitado de ocorrer. Assim, as SIs se transformam em um sistema eficiente de transporte dos poluentes, destinando-os aos rios, canais, córregos, etc. (ARNOLD & GIBBONS, op. cit.), afetando ainda mais as outras etapas do ciclo hidrológico.

Desta forma, é possível assumir que os diversos tipos de uso antrópico contribuem de maneira distinta para a contaminação dos recursos hídricos. Por exemplo, o escoamento superficial em uma área próxima a um posto de gasolina não transporta a mesma quantidade de poluentes advindos desta atividade do que o escoamento proveniente de gramados residenciais, ou de outras áreas com maior infiltração.

Estes fatores conduziram o conceito de SIs a um outro patamar, tornando-o um dos principais parâmetros utilizados pela comunidade hidrológica para modelar o escoamento de poluentes e avaliar a qualidade água. Alguns estudos de monitoramentos realizados em Winsconsin, EUA (BANNERMAN et al, 1993 apud SLONECKER et al, 2001) identificaram a relação de determinados poluentes com alguns tipos de SIs, tais como: a bactéria E. Coli com ruas residenciais, fósforo com gramados residenciais, metais com zonas industriais, dentre outros (tabela 01).

Ainda que os estudos apresentados tenham sido realizados fora do Brasil, apresentam dados bem alarmantes em relação aos poluentes presentes nas SIs. Por exemplo, as cargas destas substâncias no escoamento urbano, decorrentes de

poeira, detritos de SIs ou até mesmo lavagem do solo, estão entre os principais responsáveis pelo comprometimento da qualidade de água dos EUA (NOVOTNY & OLEM, 1993 apud BRUN & BAND, op. cit.).

O resultado evidencia que as SIs relacionadas com o grupo “Sistemas Viários” apresentou os maiores índices de poluentes dentre as SIs analisadas no estudo – corroborando com o que já foi mencionado anteriormente. O fato de só haver um tipo de SI do grupo “Coberturas” presente na tabela (“Telhados Industriais”) também evidencia o equívoco comum nos primeiros estudos sobre as SIs: considerar as feições deste grupo como as que mais afetam os corpos hídricos.

<b>Poluentes</b>	<b>Concentração Principal</b>	<b>Concentração Secundária</b>	<b>Concentração Terciária</b>
E. Coli (patógenos)	Ruas de Acesso Residencial	Ruas Coletoras Residenciais	Gramados Residenciais
Sólidos (sedimentos)	Ruas Coletoras Industriais	Ruas Arteriais Industriais	Ruas de Acesso Residencial
Fósforo Total (P)	Gramados Residenciais	Ruas Coletoras Industriais	Ruas de Acesso Residencial
Zinco (Zn)	Telhados Industriais	Ruas Arteriais Industriais	Ruas Comerciais Arteriais
Cádmio (Cd)	Ruas Coletoras Industriais	Ruas Arteriais Industriais	Ruas Comerciais Arteriais
Cobre (Cu)	Ruas Coletoras Industriais	Ruas Arteriais Industriais	Ruas Coletoras Residenciais

**Tabela 01.** Concentração dos poluentes nas principais SIs, a partir de doze amostras de SIs em áreas urbanas de Winsconsin, EUA. **Fonte:** adaptado de ARNOLD & GIBBONS, op. cit.

#### **4.2.3. Superfícies Impermeáveis e Biodiversidade**

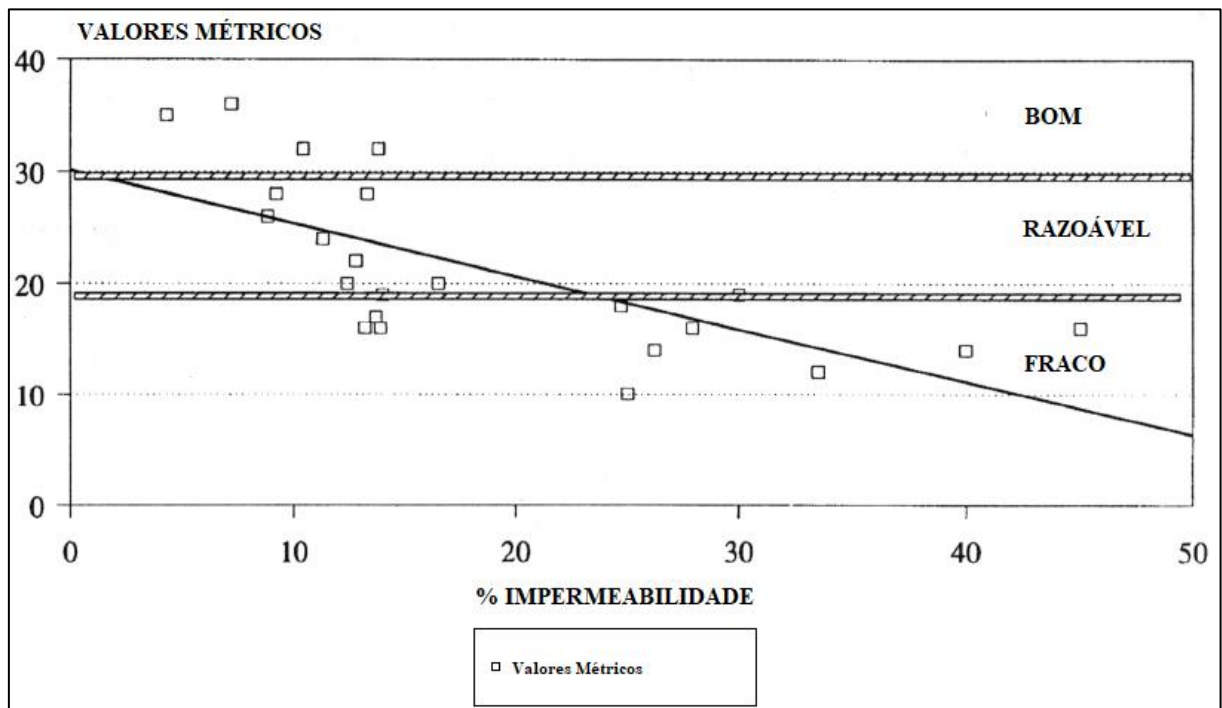
Outro ponto afetado pelo incremento de SIs na paisagem urbana diz respeito à biodiversidade dos ecossistemas aquáticos, um dos principais indicadores de qualidade ambiental em bacias hidrográficas. Uma vez que o processo de erosão nas margens do rio se intensifica, ocorre a degradação (e conseqüente perda) do habitat ripário (SCHUELER, op. cit.).

Aliás, a primeira consequência ecológica do aumento das SIs em uma bacia hidrográfica ocorre no perfil dos canais, que, com o aumento de fluxo e volume,

apresentam uma desestabilização considerável, devido ao processo erosivo. Esta instabilidade dos canais repercute em uma perda significativa das estruturas ecológicas inerentes ao canal e às zonas ripárias (SLONECKER et al, op. cit.).

Diversos estudos já evidenciaram os efeitos do aumento da impermeabilidade em comunidades de peixes e insetos em canais urbanos. Em relação aos insetos, os resultados apontaram para um padrão: a queda relativa dos índices de biodiversidade – redução de espécies sensíveis ao estresse hídrico (e diversos poluentes) e proliferação das mais tolerantes a estes impactos (figura 05).

A análise foi realizada no Rio Anacostia, localizado nos EUA, mais precisamente em Washington D.C. Os parâmetros utilizados para estes resultados basearam-se em diversidade genérica média, abundância de mosquitos da família *Chironomidae* (presentes em ambientes poluídos e pouco oxigênio), riqueza taxonômica, dentre outros.



**Figura 05.** Impactos da impermeabilidade nas comunidades de macro-invertebrados em canais urbanos. **Fonte:** adaptado de SCHUELER, op. cit.

No que se refere às comunidades de peixes, os resultados também foram equivalentes. E o fato da abundância e diversidade destas espécies representarem excelentes indicadores ambientais, aumenta ainda mais a preocupação sobre o crescimento deste fenômeno em bacias hidrográficas e demais canais urbanos.

Para demonstrar isto, diversos estudos relacionados às SIs foram compilados por SCHUELER (op. cit.), analisando os impactos na comunidade aquática, sobretudo em espécies de peixes. Estes foram os parâmetros biofísicos utilizados, visando compreender a biodiversidade dos canais (tabela 02). Embora no artigo supracitado o autor também tenha abordado estudos com outros parâmetros, tais como insetos aquáticos, anfíbios e plantas de pântano, os peixes representaram a maioria dos casos analisados.

<b>Referência</b>	<b>Ano</b>	<b>Localização</b>	<b>Parâmetros Biofísicos</b>
Klein	1979	Maryland	Peixes Diversos
Benke et al.	1981	Atlanta	Insetos Aquáticos
Steward	1983	Seattle	Salmão
Garie & McIntosh	1986	New Jersey	Insetos Aquáticos
Pedersen & Perkins	1986	Seattle	Insetos Aquáticos
Jones & Clark	1987	Northern Virginia	Insetos Aquáticos
Steedman	1988	Ontario	Insetos Aquáticos
Limburg & Schimdt	1990	New York	Criadouros de Peixes Diversos
Booth	1991	Seattle	Habitat de Peixes Diversos/Estabilidade de Canais
Yoder	1991	Ohio	Peixes Diversos
Schueler & Galli	1992	Maryland	Insetos Aquáticos
Schueler & Galli	1992	Maryland	Peixes Diversos
Luchetti & Fuersteburg	1993	Seattle	Peixes Diversos
Taylor	1993	Seattle	Plantas de Pântano/Anfíbios
Black & Veatch	1994	Maryland	Peixes Diversos
Galli	1994	Maryland	Truta Marrom
Shaver et al.	1994	Delaware	Insetos Aquáticos
Shaver et al.	1994	Delaware	Qualidade do Habitat

**Tabela 02.** Estudos sobre a influência das SIs na biodiversidade de canais urbanos e seus parâmetros biofísicos. **Fonte:** adaptado de SCHUELER, op. cit.



Mais uma vez, a tendência apresentada para os níveis de estresse hídrico se confirma, pois, no geral, as conclusões dos estudos acima apontaram para o declínio acelerado da qualidade dos habitats dos peixes a partir dos 10% de impermeabilização. Ademais, algumas análises mencionadas apresentaram índices críticos de integridade biótica em toda sua amostragem (YODER, 1991 apud SCHUELER, op. cit.).

#### **4.2.4. Superfícies Impermeáveis e Temperatura**

As SIs também são responsáveis por algumas alterações nas propriedades termais dos ambientes urbanos, uma vez que retêm mais calor do que as tipologias naturais por elas substituídas. Este relativo aumento da temperatura é transferido de montante para jusante, através do escoamento superficial urbano, e aquece os demais canais por consequência (SLONECKER et al, op. cit.). Um fator que contribui para isso é a perda da absorção da radiação pela vegetação devido a sua retirada.

Do ponto de vista mais generalista, as SIs também afetam as propriedades térmicas da superfície e da atmosfera terrestre (MATHEW et al, 2016). Isto ocorre porque o modelo de distribuição das SIs e sua extensão espacial afetam o clima urbano através da alteração na troca dos fluxos de calor sensível e latente presentes no dossel urbano (YANG et al, 2003), pela redução de superfícies capazes de realizar a evapotranspiração (WENG & LU, 2008).

Esta redução da evapotranspiração acarreta na queda considerável da umidade relativa do ar, o que gera consequências negativas para a saúde da população, devido à maior incidência de doenças cardiorrespiratórias. Além do aumento da temperatura afetar o conforto térmico da população, também ocasiona um potencial aumento no consumo de eletricidade.

Cabe ressaltar, entretanto, que estes efeitos térmicos não são sentidos homogeneamente na superfície terrestre, sendo mais intensos nas áreas urbanas, devido não somente à perda da absorção da radiação pela vegetação, bem como alguns outros fatores, tais como o calor do tráfego e edificações industriais e residenciais (YUAN & BAUER, 2007).

As características físicas das superfícies são as principais responsáveis pela diferença térmica entre áreas urbanas e rurais. Além disso, a redução de umidade para evapotranspiração, mudanças nos fluxos de calor (pelas propriedades

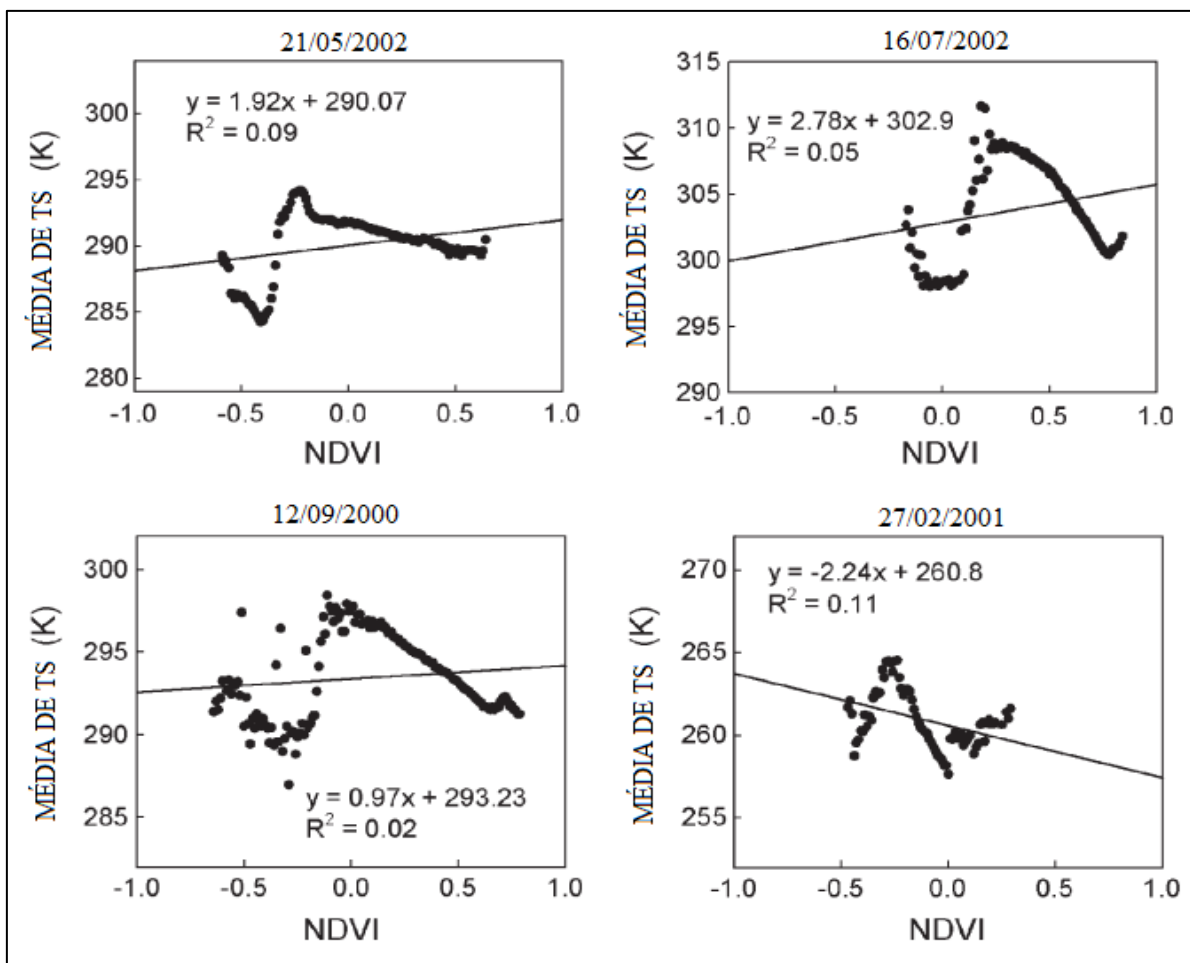
geométricas dos arruamentos e edificações) e emissões de calor antropogênico também são motivos que desencadeiam esta variação termal (XIAO et al, 2007).

A intensidade da temperatura nestes ambientes é influenciada por diversos fatores, como por exemplo: clima local e genérico, estação do ano, hora do dia, área de abrangência (ou tamanho da cidade) e sua localização geográfica, forma da cidade (morfologia urbana), calor antropogênico, dentre outros (KIM & BAIK, 2005). Por isso, as considerações sobre a escala temporal e espacial da impermeabilidade devem ser levantadas com precisão (ESSA et al, 2013).

Estudos recentes, sobretudo a partir do SR, mostram que a relação entre o período do dia e a intensidade da temperatura na superfície do terreno pode variar de acordo com as estações do ano, características fisiográficas e outros parâmetros intrínsecos da localização do fenômeno. Para este conceito, é dado o nome de Temperatura de Superfície (TS).

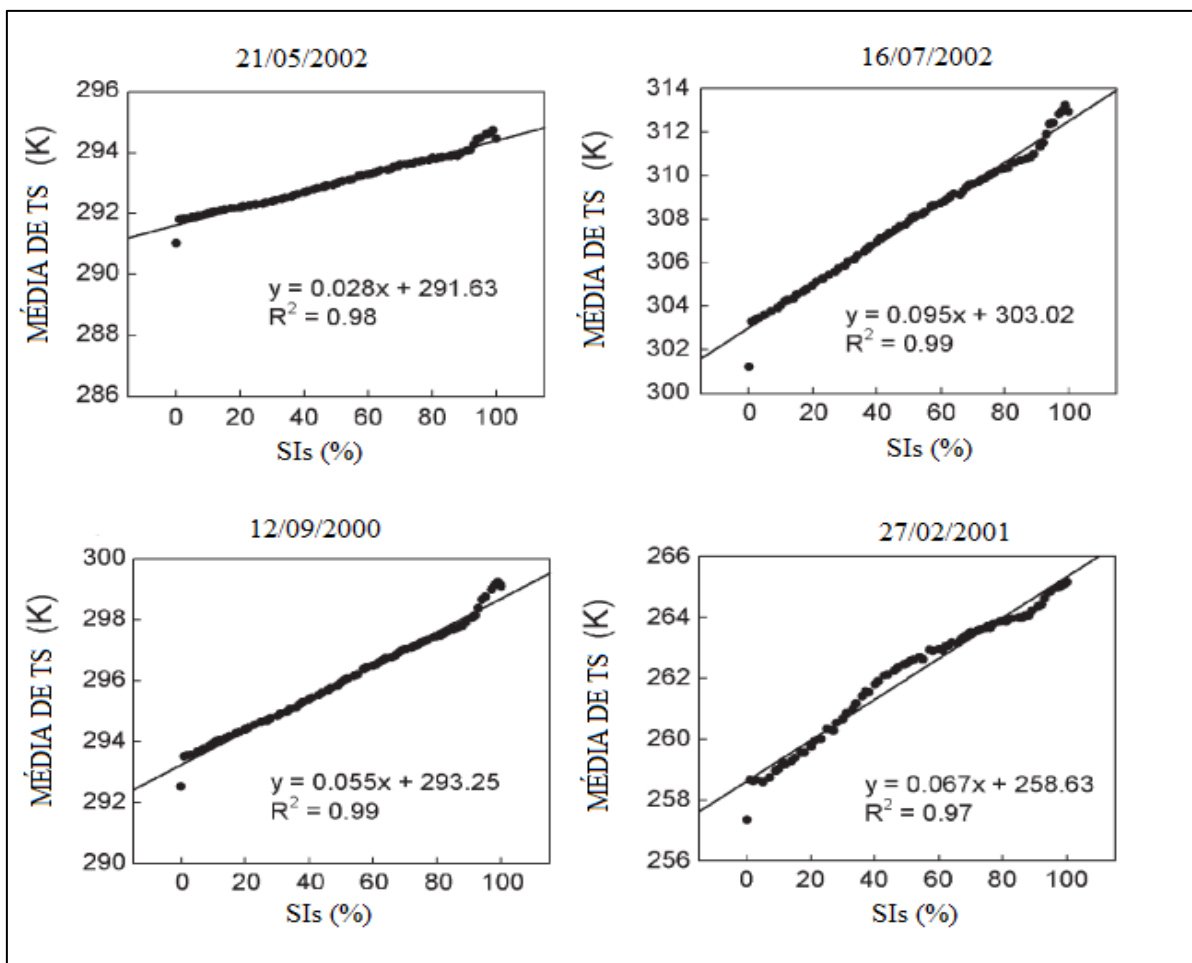
As análises sobre TS permitem compreender esta variação dos fluxos de calor (e balanço energético da superfície) enquanto uma função da variação do conteúdo de água no solo e cobertura vegetal (OWEN et al, 1998). Além disso, este conceito é um dos principais parâmetros dos processos químicos, físicos e biológicos da Terra – além de fundamental à compreensão dos climas urbanos e suas áreas de influencia, como zonas de transição (MATHEW et al, op. cit.).

Inicialmente, as alterações sentidas da temperatura das áreas urbanas eram correlacionadas com alguns índices de vegetação, por exemplo, o NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index* (ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada). Ainda que este índice fosse um dos principais indicadores de clima urbano, sua correlação com a temperatura apresentava algumas variações em virtude de mudanças sazonais e índices relacionados à precipitação (figura 06), sugerindo que índices de vegetação podem não servir de constantes para o estudo quantitativo de TS (YUAN & BAUER, op. cit.).



**Figura 06.** Relação entre o NDVI e a TS (em Kelvin) apresentando mudanças sazonais evidentes para a região metropolitana de Minneapolis-Saint Paul. **Fonte:** adaptado de YUAN & BAUER, op. cit.

A partir da utilização das SIs como indicadores do clima urbano, alguns estudos foram utilizados para provar a linearidade desta relação. YUAN & BAUER (op. cit.) identificaram uma forte correlação entre a média de TS e o percentual de SIs da região metropolitana de Minneapolis-Saint Paul para quatro datas distintas, categorizando estas feições enquanto excelentes indicadores dos efeitos do aumento da temperatura em ambientes urbanos (figura 07).



**Figura 07.** Forte correlação entre o percentual de SIs e a TS (em Kelvin) da região metropolitana de Minneapolis-Saint Paul à despeito das variações sazonais. **Fonte:** adaptado de YUAN & BAUER, op. cit.

### 4.3. Uso do Sensoriamento Remoto das SIs

Uma das principais ferramentas para a análise da composição e dos fenômenos que se manifestam na superfície terrestre é através de imagens de satélite, adquiridas por meio do Sensoriamento Remoto (SR). Esta ciência tem como base a detecção e mensuração dos fenômenos espaciais estudados através da interação da Radiação Eletromagnética (REM) com os objetos (ou alvos) que compõem a superfície terrestre de maneira remota – ou seja, sem a necessidade do contato físico com os objetos presentes na área de análise (JENSEN, 2009). A REM pode ser compreendida enquanto a oscilação de um campo elétrico e magnético, a partir de um padrão harmônico de ondas – isto é, dispostas a partir de repetições em um determinado tempo (NOVO, 2008).

Inicialmente, o conceito não abordava somente as interações com a REM, pois consideravam as diversas alterações que um determinado alvo acarretava nos campos de força circundantes, como acústicos, potenciais, eletromagnéticos, etc.

(ELACHI, 1987 apud NOVO, op. cit.). Entretanto, esta definição é muito abrangente em relação ao conceito de SR utilizado atualmente na área de Tecnologia Espacial, que somente utiliza sensores para a medição e o registro da radiação eletromagnética dos objetos, fenômenos e processos que compõem e ocorrem na superfície terrestre.

Desta maneira, o SR não se resume à análise de imagens de satélite, (SR Orbital), uma vez que a terminologia foi criada no início da era espacial, e se utilizava, quase que exclusivamente, de fotografias aéreas (SR Aéreo). O fato da REM não necessitar de um meio de propagação permitiu que, ao longo dos anos, os sensores fossem colocados cada vez mais distantes dos alvos, até que passaram a ser alocados em satélites, aumentando a área de observação do fenômeno e permitindo análises em áreas de estudo maiores.

As informações do SR podem ser categorizadas em dois grandes grupos, que permitem abarcar os demais processos deste ramo científico: aquisição de dado e produção de informação (NOVO, op. cit.). O primeiro é formado por: fonte de radiação; plataforma (aeronave, satélite, drones); características do sensor; e centro de dados (estação de revelação e de processamento e fornecimento de dados de satélite). Já o segundo grupo é composto por: sistemas em solo para calibragem (espectroradiômetros); sistemas de processamento de imagem; e sistemas de informações geográficas.

Do ponto de vista dos sensores, estes podem ser classificados em relação a sua fonte de energia (FITZ, 2008). Os sensores que dependem de uma fonte de radiação externa para obtenção de dados (ou registro da REM) são denominados Sensores Passivos. Em geral, utilizam-se da radiação emitida pelo Sol e/ou emitido pela Terra (pelos objetos em sua superfície). Já os Sensores Ativos são os que produzem sua própria radiação para a obtenção de dados, como os radares e lasers, por exemplo.

Outra forma de classificar os sensores diz respeito ao tipo de produto gerado a partir dos mesmos (Fitz, op. cit.). Para estes, a divisão remete aos Sensores Imageadores, que produzem uma imagem bidimensional a partir da interação da REM com seus alvos (permitindo a análise espacial) e os Sensores Não-Imageadores, que não apresentam esta característica resultante, tais como os espectroradiômetros ou as sondas terrestres e atmosféricas.

#### **4.3.1. Espectro Eletromagnético e Comportamento Espectral dos Alvos**

O sol é a principal fonte de radiação eletromagnética no sensoriamento remoto. O sol emite radiação em vários comprimentos de onda. O total destes conjuntos de ondas eletromagnéticas conhecidos pelo homem intitula-se Espectro Eletromagnético (EEM), que pode apresentar variação dos comprimentos de onda desde os raios gama a ondas de rádio (NOVO, op. cit.).

Um fator a se considerar na interpretação dos produtos de sensoriamento remoto é a transmissividade da atmosfera em relação à radiação, uma vez que, em diversas regiões do EEM, ocorre sua absorção por conta de diversos componentes presentes na atmosfera, como vapor d'água e dióxido de carbono (SCHOWENGERDT, 2006). As regiões onde a absorção da radiação solar não ocorre (ou a faz parcialmente) são chamadas de janelas atmosféricas, permitindo a utilização do SR.

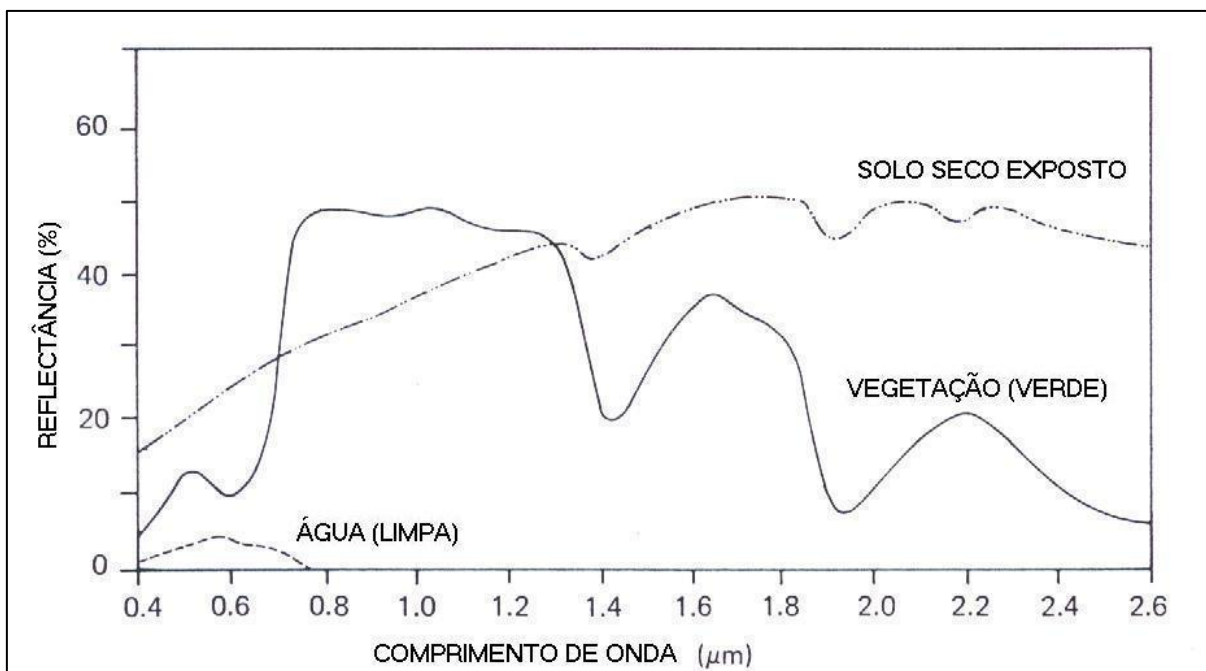
Dentre as regiões espectrais, as mais utilizadas pelo SR são as do visível, infravermelha (próximo, médio e termal) e das micro-ondas – seus intervalos estão dispostos na tabela 03. É importante destacar que os limites dos comprimentos de onda apresentados podem ser dissonantes, ainda que minimamente, com as diversas literaturas específicas, em virtude da origem dos dados apresentados.

Região do EEM	Nome do Comprimento de Onda ( $\lambda$ )	Comprimento de Onda ( $\lambda$ )
Visível	Violeta	0,38 – 0,45 $\mu\text{m}$
	Azul	0,45 – 0,49 $\mu\text{m}$
	Verde	0,49 – 0,56 $\mu\text{m}$
	Amarelo	0,56 – 0,59 $\mu\text{m}$
	Laranja	0,59 – 0,63 $\mu\text{m}$
	Vermelho	0,63 – 0,76 $\mu\text{m}$
Infravermelha	Infravermelho Próximo ( <i>NIR</i> )	0,80 – 1,50 $\mu\text{m}$
	Infravermelho de Ondas Curtas ( <i>SWIR</i> )	1,50 – 3,00 $\mu\text{m}$
	Infravermelho Médio	3,00 – 5,00 $\mu\text{m}$
	Infravermelho Termal	5,00 – 300,00 $\mu\text{m}$
Micro-ondas	Micro-ondas	0,01 – 100 cm

**Tabela 03:** Principais regiões do Espectro Eletromagnético utilizadas pelo Sensoriamento Remoto.  
**Fonte:** adaptado de CHEN, 1985 apud NOVO, op. cit.

Os sensores remotos registram a intensidade do fluxo de energia refletido ou emitido dos objetos dentro de intervalos dos comprimentos de onda, denominados bandas espectrais, para definir as imagens que serão geradas por ele. Ou seja, o sensor não registra um comprimento de onda único específico, mas intervalos de comprimentos de onda para caracterizar a assinatura espectral dos objetos.

A relação entre a REM e os alvos permite determinar os comprimentos de onda emitidos e/ou refletidos por estes objetos em dadas condições e para esta designação é dado o nome de assinatura espectral (ou comportamento espectral dos alvos). Isto permite a identificação e caracterização física de objetos como vegetação, solos, minerais, rochas e água (figura 08). Em outras palavras, diz respeito à intensidade relativa da reflexão (refletância) ou da emissão (emitância) de REM por um determinado alvo.



**Figura 08:** Comportamento espectral médio da água, vegetação e solo exposto. **Fonte:** adaptado de SWAIN & DAVIS, 1978 apud LILLESAND et al, 2004.

É válido considerar que o valor apresentado diz respeito ao comportamento espectral médio (dentro do intervalo espectral da banda) refletido ou emitido por determinado alvo (curva espectral). Contudo, é necessário levar em consideração também informações adicionais do processo de coleta dos dados (como aspectos climáticos, posição solar, relação sinal/ruído da imagem, etc.) para análise destes dados.

Na figura 08, é possível observar, a partir do seu comportamento espectral, que a vegetação verde, por exemplo, apresenta um baixo índice de refletância (razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno) na região do visível – à exceção de 0,56  $\mu\text{m}$ , onde ocorre a refletância responsável pela percepção da coloração verde deste alvo.

Já no NIR (infravermelho próximo), apresenta alta refletância devido à estrutura celular, permitindo estudos de biomassa por conta da interação da REM com a porosidade presente na camada interna da folha denominada de parênquima lacunoso do mesófilo. Por fim, no SWIR (infravermelho de ondas curtas), a refletância da vegetação está diretamente condicionada a maior absorção da energia provocada pelo conteúdo de água presente nas folhas.

Para os solos, cabe ressaltar que as características química e físicas do solo influenciam e muito a apresentação de sua assinatura espectral, como a



concentração de ferro, percentual de drenagem, quantidade de matéria orgânica, textura, dentre outras. A refletância média deste tipo de cobertura aumenta à medida que transita da região do visível para o infravermelho.

Em relação à água, é importante destacar que ela pode se apresentar em diferentes estados físicos e isto altera significativamente sua assinatura espectral – entretanto, na figura 08, somente seu estado líquido está representado. Neste estado físico, este alvo apresenta baixa refletância em quase toda região do visível e absorve toda a radiação acima de 0,78  $\mu\text{m}$ .

Para a água no formato de neve, a refletância se mantém alta na região do visível até o NIR, quando passa a apresentar um decréscimo acentuado, com picos a partir do SWIR e depois se aproxima de zero. Para a água no formato gasoso (como nuvens), a refletância é bem expressiva nas regiões do visível, com bandas de absorção em 1,00  $\mu\text{m}$ , 1,30  $\mu\text{m}$  e 1,70 a 2,00  $\mu\text{m}$ .

Por fim, é importante destacar o comportamento espectral médio para as algumas SIs, como o concreto e o asfalto, presentes em diversas feições antropogênicas. O primeiro apresenta um aumento de refletância à medida que o comprimento de onda aumenta, embora apresente algumas faixas de absorção no visível (0,30, 0,60-0,80  $\mu\text{m}$ ) e no NIR, em 1,10  $\mu\text{m}$  (MOREIRA et al, 2007). O asfalto também apresenta um aumento da refletância a partir da região do visível, principalmente a partir de 0,40  $\mu\text{m}$ , até chegar ao NIR, com 1,30  $\mu\text{m}$ .

#### **4.3.2. Resoluções dos Sensores**

Quando um dado é produzido por SR orbital, ele é condicionado a partir de algumas características do sensor, tais como: medições relacionadas à área do campo de visada de um sensor; pela sensibilidade aos diferentes comprimentos de ondas e suas respectivas faixas espectrais; pelos valores numéricos da radiância do alvo; pela frequência que um sensor revisita uma determinada área. Para estas características, é dado o nome de resolução.

A resolução espacial diz respeito à capacidade do sensor de reconhecer objetos, a partir de seu *Instant Field of View* (IFOV), ou campo de visada instantâneo (ângulo de visibilidade), e pela distância do sensor até a área observada. Esta propriedade determina, assim, o menor objeto passível de monitoramento pelo instrumento em sua menor unidade de área (para as imagens digitais, em resolução plena, esta corresponde ao *pixel*). Contudo, em alguns casos, pode ocorrer de

objetos menores que a área vista pelo IFOV e, ainda assim, são passíveis de detecção pelo sensor. Isto ocorre devido a sua refletância média que, por ser maior que a dos objetos próximos (ou vizinhos), faz com que estas feições sejam passíveis de serem identificadas pelo sistema-sensor.

A resolução espectral envolve alguns parâmetros de medidas, como a quantidade e largura de bandas espectrais que um sensor apresenta; a largura (em comprimento de ondas) destas; e as regiões do EEM nas quais elas se encontram dispostas. Estes parâmetros da resolução espectral servem para capturar de maneira mais ampla o comportamento espectral de um alvo, ou a sua curva espectral. Em outras palavras, quanto maior o número de bandas e menor for o seu intervalo, maior é a sua resolução espectral (CROSTA, 2002).

A resolução radiométrica refere-se à capacidade do sensor em distinguir as diversas variações da intensidade de radiância (valor de brilho registrado na imagem) registrada em cada pixel. Ela determina, assim, o intervalo de valores possível para a representação em uma imagem digital (estas medidas são associadas à amplitude dos valores correspondentes aos níveis de cinza passíveis de serem representados na imagem).

A medida desta resolução pode ser chamada de quantização, e converte os valores de radiância em um número digital. Esta medida usualmente é apresentada em termos de números de dígitos binários (*bits*), necessários para seu armazenamento – ou seja, em uma imagem de 8 bits ( $2^8$ ), existem 256 níveis de cinza relacionados à quantidade de detalhes perceptíveis na imagem.

Por fim, a resolução temporal está relacionada à frequência de revisita do sensor em uma mesma área da superfície terrestre – ou seja, a periodicidade do imageamento. Seu valor depende do tamanho da área analisada e da órbita do satélite. Esta resolução é importante para análises de evolução ou mudanças de determinado fenômeno, como ciclo fenológico de culturas, desmatamento, etc.

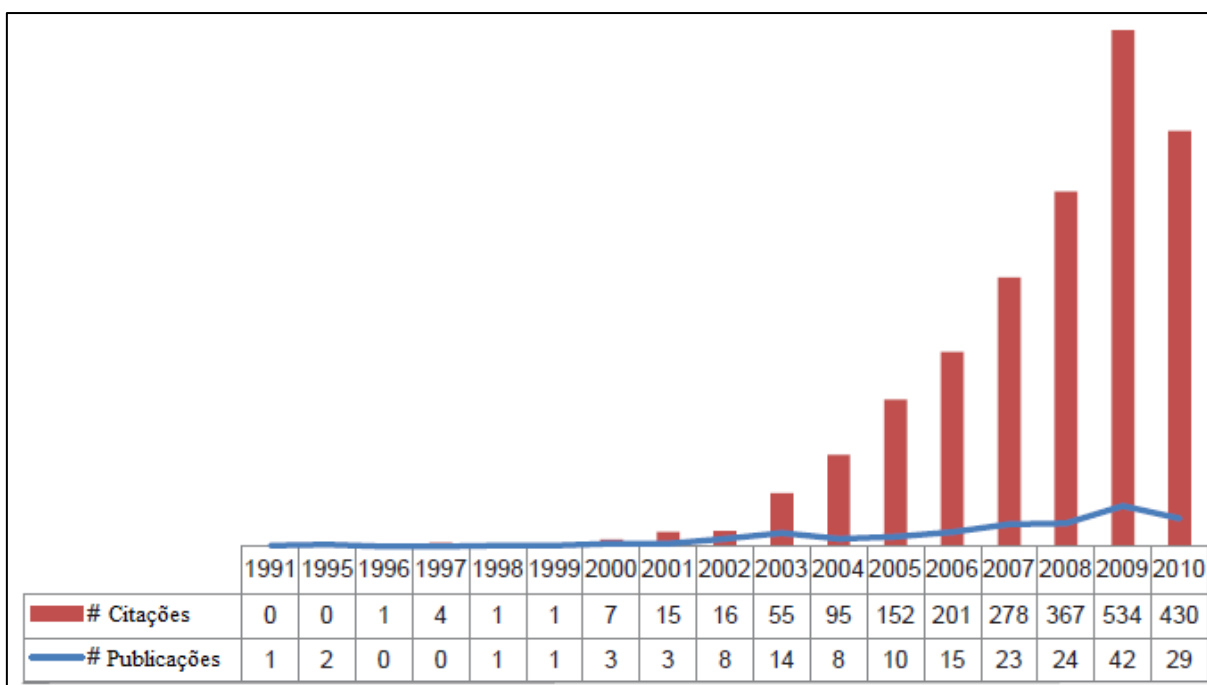
#### **4.3.3. Sensoriamento Remoto das Superfícies Impermeáveis**

A lógica que subsidia a utilização de SR abarca, nas áreas com maior dificuldade de acesso (em razão dos obstáculos ou pela sua extensão), a possibilidade de análises multi-temporais, o baixo custo e celeridade na aquisição de informações e as suas possibilidades de processamento. Esta lógica também se

aplica para os estudos de SIs – por se tratar de um fenômeno com feições reconhecíveis, possibilita sua caracterização a partir das técnicas de SR.

Aliás, um dos principais problemas para a difusão de estudos nesta linha decorria das limitações técnicas e tecnológicas, pois seu mapeamento era baseado em uma classificação geral de uso da terra ou através de extensivo trabalho em fotografias aéreas, geralmente parte de um projeto ainda maior (SLONECKER et al, op. cit.). As melhorias na disponibilidade dos dados e dos avanços tecnológicos que possibilitaram o aumento das resoluções dos sensores (através do progresso tecnológico) permitiram a mudança de paradigma do imageamento, mapeamento e análise espacial deste fenômeno.

Por conta destas limitações (falta de sensores adequados para mensuração das diversas variações de SIs, técnicas de PDI ainda incapazes de realizar tais procedimentos e restrição da tecnologia computacional), as publicações em periódicos sobre o SR de SIs eram ainda escassas até meados dos anos 90. WENG (2011) demonstrou isto, através de buscas na base de dados bibliográficos *Scopus* (figura 09).



**Figura 09:** Índice de publicações e citações a partir da base de dados bibliográficos *Scopus* (consulta realizada em 16/02/2011). **Fonte:** adaptado de WENG, 2011.

O principal fator para esse crescimento exponencial apresentado no século XXI foi o aprimoramento da tecnologia computacional e expansão da rede internacional de computadores – a partir disto, ocorreram também avanços nas técnicas de PDI e

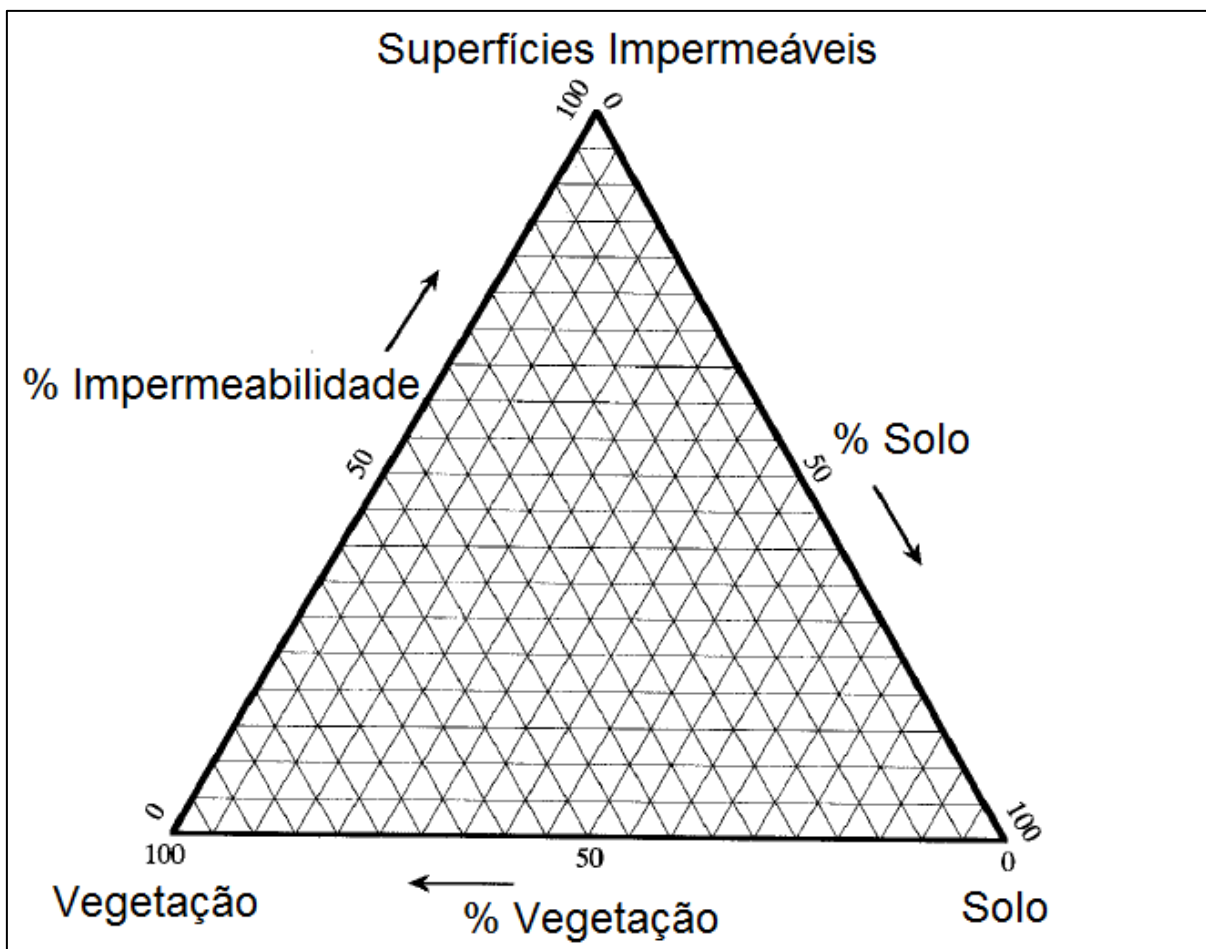
no desenvolvimento de imagens de SR com melhores resoluções. Aliado a estes processos, a preocupação com as mudanças ambientais atingiu a escala global, ajudando a tornar este campo um dos mais dinâmicos da ciência do SR.

Importante destacar que o estudo proposto por WENG (op. cit.) é um recorte temporal, de 2011, da análise de publicações e citações sobre SIs em periódicos de SR. Entretanto, durante a realização do presente trabalho, não foi encontrado outro estudo nestes moldes, impossibilitando, portanto, uma análise atualizada sobre a relevância do estudo das SIs para a comunidade de SR.

Um dos principais objetos analisados a partir do SR das SIs foi a qualidade dos corpos hídricos afetados pela urbanização. No início do século XXI, ainda havia um índice pequeno de análises comparativas dos métodos utilizados para análise das SIs a partir do SR. Além disso, não havia estudos sobre estas feições antropogênicas que considerava as vantagens e limitações dos sensores e seus dados (SLONECKER et al, op. cit.).

Por caracterizar um grupo de feições, um dos principais entraves da identificação das SIs pelo SR está relacionado aos diversos materiais que pertencem a este grupo. Isto porque, conforme já mencionado, passa a apresentar uma curva espectral considerável, em virtude da complexidade presente na paisagem urbana – além disso, algumas áreas podem apresentar confusão, como vias com asfaltamento escuro e telhados de baixo albedo, evidenciando que nenhuma superfície com impermeabilidade específica pode representar perfeitamente as demais SIs.

RIDD (1995) propôs um modelo que considera a paisagem urbana uma composição linear de três elementos fundamentais: vegetação, SIs e solo. Este modelo objetiva decompor a heterogeneidade das áreas urbanas em elementos principais, a fim de facilitar sua compreensão (figura 10). Para o autor, este modelo pode ser aplicado universalmente para caracterização dos ambientes de áreas urbanas e adjacentes.



**Figura 10:** Representação da paisagem urbana enquanto uma combinação linear de suas feições elementares: vegetação, SIs e solo. **Fonte:** adaptado de RIDD, 1995.

Entretanto, este modelo não consegue explicar elementos presentes na paisagem urbana como a água ou áreas com sombreamentos. Para solucionar esta deficiência, LU & WENG (2004) propuseram adicionar um quarto elemento, tornando o modelo adequado para analisar as demais coberturas da paisagem, composto por sombra, vegetação verde, SIs e solo.

É importante ressaltar que, conforme mencionado, as SIs apresentam uma variação de assinaturas espectrais muito alta, desde alguns objetos com alto albedo (como telhados claros) a objetos opacos (vias com baixo albedo). Para reduzir esta variação inerente, pode-se caracterizar as SIs enquanto uma combinação das frações de alto e baixo albedo (LU et al, 2014).

O processo da caracterização das SIs através do SR também precisa levar em consideração alguns outros fatores que podem afetar seu desempenho e, conseqüentemente, o resultado desta análise. Um destes condicionantes diz respeito às condições biofísicas da área de estudo e complexidade dos elementos

presentes. Em outras palavras, compreender as especificidades da paisagem urbana e do ambiente no qual está inserida.

O fator cultural é outro elemento que precisa ser considerado na análise das SIs, sobretudo em relação a variação espectral de seus elementos constituintes. Isto porque as diferenças culturais podem influenciar na tipologia dos materiais de construção utilizados nas edificações, bem como cores – inclusive no padrão espacial destas feições, afetando sua assinatura espectral (LU et al, op. cit.).

Neste processo, é de fundamental importância a seleção de instrumental adequado para o mapeamento, considerando todos os aspectos inerentes às resoluções dos sensores. Ou seja, considerar a área de estudo a partir das especificações do sensor utilizado (do ponto de vista geométrico, espectral, radiométrica, temporal espacial).

Do ponto de vista da resolução espectral, a quantidade de bandas influencia diretamente na informação sobre a natureza e propriedades físicas dos diversos materiais presentes na SIs – ainda que aumente a redundância decorrente da alta correlação entre as bandas. Este é um dos principais requisitos para o mapeamento dos elementos constituintes das SIs, considerando suas três entidades inter-relacionadas passíveis de análise na superfície terrestre: material, uso da terra (tipos de manipulação dos atributos biofísicos e seus propósitos) e cobertura da terra como o estado biofísico da superfície, considerando a variabilidade intraclasses e separabilidade espectral (WENG, op. cit.).

Alguns fatores causados por certos elementos na paisagem (carros, marcações no solo, sombreamentos, etc.) podem influenciar a resposta as SIs, aumentando sua variação espectral. Para alguns destes problemas, a utilização de informação auxiliar pode reduzir a confusão (dados de elevação para reduzir a similaridade entre algumas vias de circulação e áreas adjacentes, como edifícios e estacionamentos) ou algoritmos que considerem informação espacial e espectral de modo combinado.

A resolução temporal, ou um intervalo de tempo (ciclo repetitivo) entre aquisição de duas imagens sucessivas, é fundamental para análise da evolução de determinados processos (vegetação, SIs, etc.). Por depender da órbita de cada satélite, pode apresentar diferentes respostas espectrais para um mesmo material

em sensores distintos (em virtude da orientação solar no horário de aquisição da imagem).

Para áreas tropicais (ou costas), que tendem a apresentar nuvens mais persistentes nos períodos de estação chuvosa, este tipo de resolução apresenta um papel fundamental pela necessidade de considerar períodos com condições climáticas favoráveis a obtenção de dados. Assim, as análises sobre a imagem podem ser menos afetadas pela incidência de nuvens em determinados períodos.

A resolução espacial pode apresentar alguns problemas para o produto, como mistura no pixel (para imagens de baixa a média resolução espacial) e sombreamento (decorrente da topografia, edifícios ou até árvores) e custo de sua aquisição (para imagens de alta resolução espacial). O primeiro caso demanda uma atenção especial, sobretudo por se tratar de um problema que será especialmente abordado nesta pesquisa.

#### **4.3.4. Mistura Espectral**

A ocorrência da mistura em imagens de baixa e média resolução espacial se dá pela incompatibilidade entre a escala de observação do sensor e as características espaciais do alvo. Em outras palavras, quando as feições presentes em uma área são inferiores ao tamanho do pixel, a refletância medida no sensor passa a apresentar a soma das interações entre os diversos tipos de elementos, através de suas respectivas proporções (WENG, 2011).

Cabe ressaltar, contudo, que este conceito não é recente. De acordo com SHIMABUKURO & PONZONI (2017), a mistura presente em imagens orbitais era um dos fatores que limitavam a utilização de dados multiespectrais. A falta de técnicas de processamento digital de imagens mais rebuscadas à época e tecnologia computacional em estágio incipiente eram as principais razões que não permitiam ultrapassar esta limitação.

Além disso, STRAHLER (1986) já havia proposto a adoção de dois modelos para explicar a complexidade das áreas urbanas e a capacidade dos sensores de discernir os objetos presentes nesta paisagem heterogênea. O *H-resolution* (ou alta resolução), no qual os objetos são identificados de modo direto, por serem mais largos que a resolução da célula do sensor, e o *L-resolution* (ou baixa resolução), onde os objetos não são considerados em sua individualidade por serem menor do que a resolução da célula.

Inicialmente, o problema da mistura espectral do pixel era classificado enquanto um uso (ou cobertura) da terra misto, ou era caracterizado erroneamente em uma das classes consideradas no processo de classificação, desconsiderando as proporções dos demais elementos que constituem esta mistura. Atualmente, foram desenvolvidas técnicas de PDI específicas que buscam decompor o pixel em suas partes componentes (SLONECKER et al, op. cit.), identificando (ou estimando) proporções de cada categoria elementar da paisagem no interior do pixel.

Outra consequência da ocorrência do “pixel-mistura” neste tipo de imagem multiespectral é a tendência para superestimação dos resultados de impermeabilidade em áreas urbanas e subestimação em paisagens periurbanas ou rurais. Este fator decorre da limitação de sua resolução espacial e da heterogeneidade dos ambientes urbanos (LU et al, op. cit.).

As imagens de alta resolução espacial são indicadas para reduzir, de modo significativo, o percentual de “pixel-mistura” presentes na imagem. Além disso, estas imagens apresentam resultados mais eficazes na extração de feições cartográficas, no que se refere à geometria da superfície urbana, através de métodos automatizados de processamento digital de imagens.

Entretanto, fatores de sombreamento causados pela topografia, edifícios e árvores mais altas são potencializados, ocasionando em uma subestimação das SIs por parte do sensor. Por isso, é importante considerar o ângulo de visada para alguns sensores de alta resolução espacial, como os que se encontram a bordo dos satélites IKONOS e QuickBird, por exemplo (WENG, op. cit.).

Além disso, as imagens de média resolução espacial (como as do satélite Landsat) são as mais utilizadas para as análises de SIs em escala regional (como no caso do objeto de estudo desta pesquisa). Isto se deve pela disponibilidade histórica dos dados, bem como resoluções espectrais e espaciais adequadas, ainda que com certas ressalvas, como já mencionado anteriormente – além disso, são dados de acesso público, sem custos.

Estas informações podem ser aprimoradas com a utilização de dados auxiliares, como já mencionado no caso da resolução espectral. Sua inserção pode ser conduzida de três maneiras distintas: no início da análise, a fim de ajudar na estratificação das principais coberturas presentes na imagem; durante a modelagem



das SIs, enquanto novas variáveis; e, por fim, no pós-processamento, para ajustar e qualificar o produto (LU et al, 2014).

Diversos métodos foram utilizados ao longo dos anos para a análise de SIs através do SR, desde classificadores de verossimilhança, redes neurais, correlação com NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), dentre outros. Entretanto, o Modelo de Mistura Espectral (MME) têm se mostrado um método especialmente eficaz na detecção de materiais presentes em paisagem urbana em imagens de média resolução espacial (WENG & LU, 2009).

Este tipo de abordagem permite a extração quantitativa da informação presente no pixel de modo contínuo e com acurácia significativa por se tratar de uma análise baseada nos aspectos físicos da imagem. Por isto, é considerado um dos principais métodos para o SR de SIs uma vez que compreende-as como um material de superfície, diretamente relacionado com as informações espectrais do sensor (WENG, 2011).

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. Materiais Utilizados

Para a realização da presente pesquisa, foram utilizadas duas imagens multiespectrais, ambas do ano de 2017, com finalidades distintas para este trabalho, sendo uma destinada a análise da distribuição de SIs propriamente dita, e a segunda para validação das estimativas geradas.

A primeira é proveniente da plataforma (satélite) Landsat-8 (L8) e seus dados são gerados a partir do sensor OLI (*Operational Land Imager*). A segunda imagem utilizada é gerada pela câmera Bayer Mask CCD instalada no satélite Planet Scope (*Planet*). Esta imagem, utilizada para validação qualitativa e quantitativa da estimativa de SI é proveniente de um mosaico de imagens Planet, com o intuito de abarcar a totalidade da área de Belém.

Na tabela 04, são apresentadas algumas características importantes, que se encontram descritas nos metadados da imagem. Este trabalho não visa analisar temas relacionados ao infravermelho termal (como temperatura, por exemplo), portanto as informações da L8 apresentadas abaixo se limitam ao intervalo da luz visível e infravermelho (próximo e o de ondas curtas).

<b>Atributos</b>	<b>Landsat 8 (L8)</b>	<b>Planet Scope</b>
Data de aquisição (dd/mm/aaaa)	06/07/2017	28/07/2017
Hora local (hh:mm:ss)	10:22:53	09:50:33
Bandas espectrais (nm)	Violeta – B1 (430-450); Azul – B2 (450-510); Verde – B3 (530-590); Vermelho – B4 (640-690); Infravermelho próximo – B5 (850-880); <i>SWIR</i> 1 – B6 (1570-1650); <i>SWIR</i> 2 – B7(2110-2290)	Azul (455-515); Verde (500-590); Vermelho (590-670); Infravermelho próximo (780-860)
Resolução espacial	15 metros (pancromático – B8); 30 metros (multiespectral – B1 a B7); 100 metros reamostrada para 30 metros (termal)	3 metros (em todas as bandas)
Azimute Solar	47,26°	59,55°
Elevação Solar	53,35°	48,27°

**Tabela 04.** Características das imagens multiespectrais utilizadas no trabalho. **Fonte:** www.earthexplorer.com. Acesso em 05 jan 2019.

É importante destacar a escolha da imagem L8 a partir de sua data de aquisição por parte do sistema-sensor. Esta preocupação na seleção da imagem está relacionada à cobertura de nuvens presentes na cidade de Belém (decorrentes da dinâmica climática da região amazônica) e sua influência no imageamento através do sensoriamento remoto.

De acordo com BASTOS et al (2002), o regime de chuvas de Belém pode ser dividido em três grupos ao longo do ano: época mais chuvosa (dezembro a maio), final do período chuvoso (junho a agosto) e estiagem (setembro a novembro). Logo, este último período tende a apresentar o menor percentual de chuvas e de cobertura de nuvens no ano – e, por consequência, menor a influência das nuvens na análise da cobertura da terra em imagens de satélite.

Uma vez que a imagem Planet Scope, utilizada para validação devido a sua maior resolução espacial, foi captada em julho/2017, é importante que a imagem L8 analisada no trabalho tenha sido coletada no mesmo período, buscando apresentar dinâmicas climáticas semelhantes. Assim, as respostas espectrais dos materiais

urbanos apresentam uma influência sazonal semelhante em imagens de sensores distintos.

As informações relativas à hora de passagem dos satélites sobre a área de estudo, azimute e elevação solar (ângulo do sol sobre o horizonte) permitem compreender a iluminação dos objetos na captura da imagem. Além disso, devido à proximidade dos valores nas imagens, é possível assemelhar, nas imagens, os efeitos de sombreamento na paisagem.

## **5.2. Método**

### **5.2.1. Pré-processamento (USGS)**

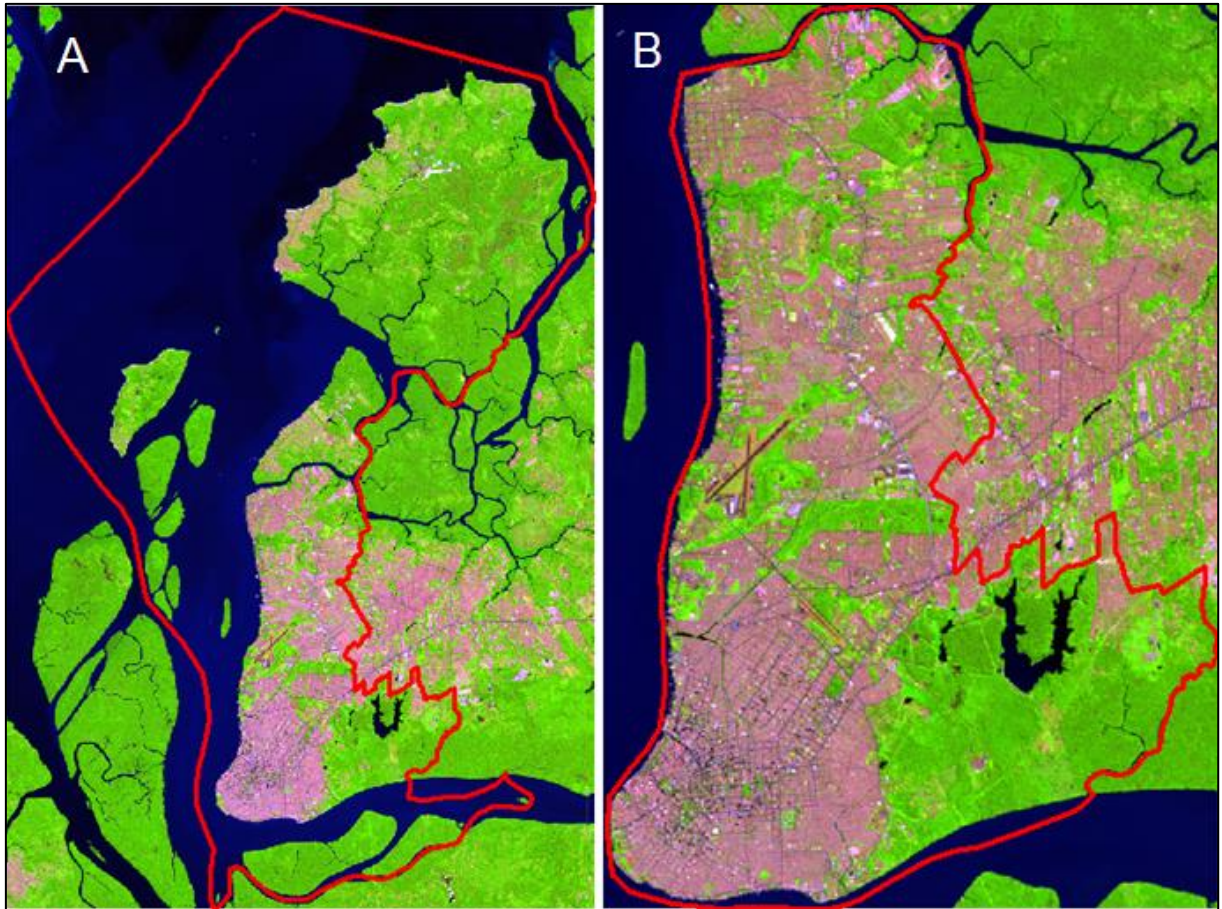
As imagens L8 disponibilizadas no site da USGS contam com um pré-processamento padrão da instituição, com correção atmosférica e convertida para valores de refletância em superfície e seus dados são produzidos a partir de um algoritmo especializado presente no *software* LaSRC (Landsat 8 *Surface Reflection Code*). O principal objetivo deste procedimento é atenuar, nas imagens de satélite do seu banco de dados, os efeitos da dispersão da REM na atmosfera.

Além disso, a USGS disponibiliza estas imagens ao usuário com correção geométrica, buscando minimizar as distorções espaciais através do seu processamento digital. Para a cena utilizada neste trabalho, de acordo com os dados descritos no arquivo de metadados, este procedimento utilizou 304 pontos de controle em terreno para ajustar a precisão da imagem e apresentou um valor de RMSE (*Root Mean Square Error*, ou Raiz do Erro Médio Quadrático) de 8,8 metros.

### **5.2.2. Recorte da Área de Estudo**

O recorte da cidade de Belém na imagem L8 foi realizado a partir de um dado vetorial referente ao limite da cidade de Belém produzido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e datado do ano de 2015. Este dado, em formato *shapefile*, é disponibilizado no sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000.

Este dado vetorial foi, então, adaptado à área de estudo, uma vez que ele abarca o município inteiro de Belém (incluindo sua porção insular), enquanto que este trabalho analisa somente a distribuição das SIs na porção continental da capital paraense. Na figura 11, é possível perceber a diferença da área total do município (A) e a área de estudo deste trabalho (B).



**Figura 11:** Imagem Landsat 8 em composição colorida R(6)G(5)B(4) apresentando a diferença entre a área total do município de Belém (A) e sua porção continental (B), analisada neste trabalho.

### 5.2.3. Máscara da Água

O processo de máscara da água constitui uma etapa fundamental em análises urbanas, principalmente em cidades com corpos hídricos tão presentes em sua paisagem, como no caso da capital paraense. Este procedimento consiste em atribuir um valor que será ignorado na imagem, no caso a água. A máscara, portanto, trata-se de uma imagem binária, com valor “1” para os elementos considerados e “0” para os que serão excluídos.

Na análise de SIs, esta etapa apresenta uma maior relevância, uma vez que as SIs de baixo albedo (como estradas asfaltadas e telhados mais escurecidos) podem apresentar similaridade às assinaturas espectrais da água (LU et al, op. cit.). Assim, a fim de minimizar a confusão entre estes elementos, o uso da máscara da água se faz necessário.

Uma das muitas formas de construir uma máscara de água é utilizar o NDWI (*Normalized Difference Water Index*, ou Índice de Vegetação da Diferença

Normalizada). Este índice, proposto por MCFEETERS (1996), visa identificar os corpos hídricos a partir de sua assinatura espectral e é expresso na fórmula abaixo:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Como é possível perceber na fórmula acima, este índice utiliza os comprimentos de onda do verde (*Green*) e do infravermelho próximo (*NIR*) que correspondem, no caso da L8, às bandas 3 e 5, respectivamente. O NDWI amplifica a refletância da água a partir do comprimento de onda da banda 3 e minimiza a sua baixa refletância no intervalo do NIR, realçando os corpos hídricos na imagem (XU, 2007).

Entretanto, embora este índice já esteja amplamente difundido nos processamentos de máscara da água em imagens de satélite, não apresenta tanta eficácia em corpos hídricos localizados em áreas com alta densidade de superfícies construídas. Isto decorre da confusão entre estas duas feições, uma vez que as áreas construídas apresentam comportamento espectral similar ao da água nestas bandas – maior refletância no comprimento de onda verde e baixa refletância no comprimento de onda do NIR (XU, op. cit.).

XU (2005), então, apresentou uma adaptação do índice NDWI na tentativa de atenuar as similaridades entre as respostas espectrais da água e de áreas construídas. Este novo índice, chamado MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*, ou Índice Modificado de Vegetação da Diferença Normalizada) é expresso a partir da seguinte fórmula:

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1}$$

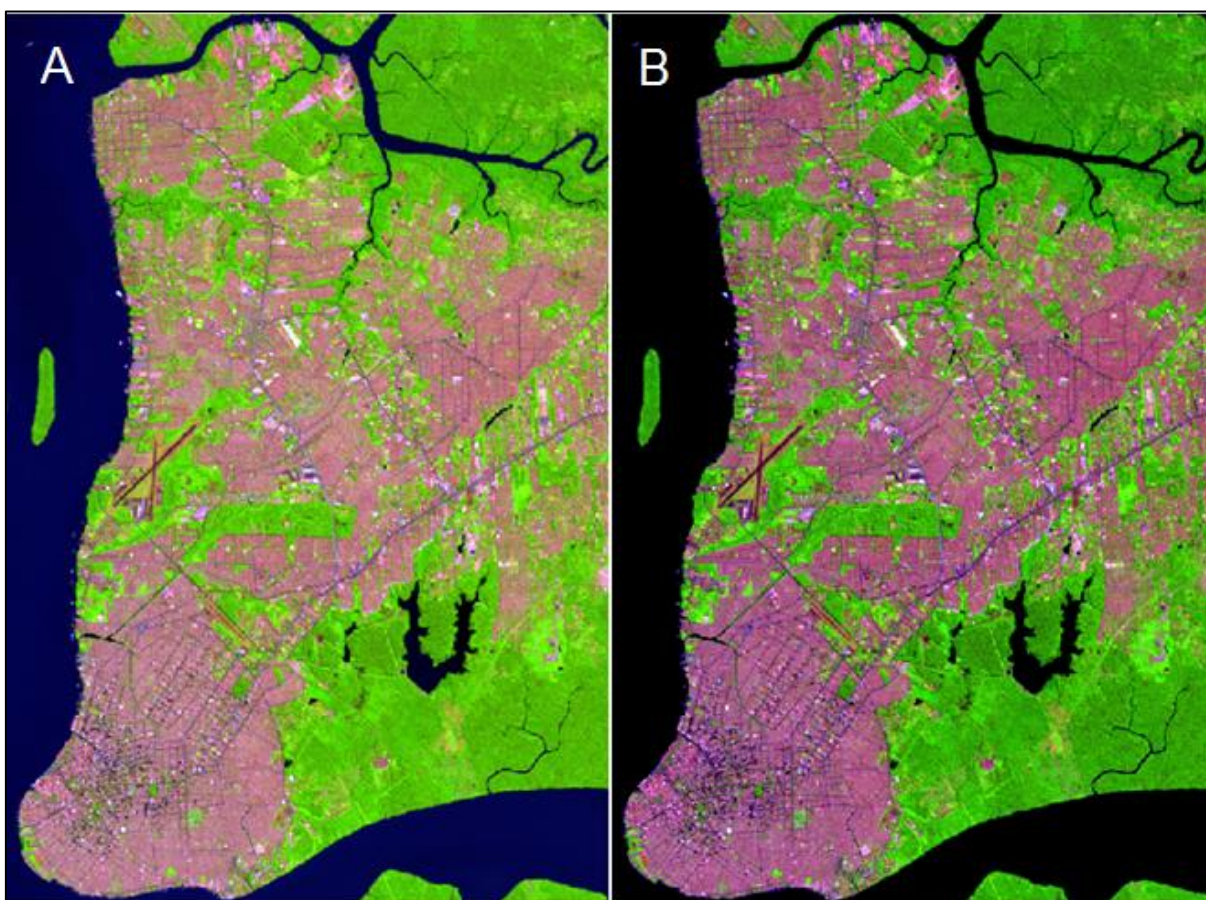
Neste novo índice, nota-se que o comprimento de onda verde continua sendo considerado, enquanto que o NIR, utilizado na fórmula antiga, é substituído pelo infravermelho de ondas curtas 1 (SWIR1). Esta alteração é justificada, principalmente, pela elevada refletância das áreas construídas no infravermelho de ondas curtas, enquanto que os corpos hídricos pouco refletem neste comprimento de onda, evitando, assim, a confusão entre estas feições.

Para o presente trabalho, foram feitos testes com os dois índices, a fim de encontrar a melhor eficácia no processo de máscara da água. O índice MNDWI



apresentou melhores resultados para a cidade de Belém, que apresenta diversos corpos hídricos próximos a porções densamente urbanizadas e, por consequência, com maiores confusões com as áreas construídas a partir da resposta espectral destas feições.

Na figura 12 mostra a aplicação da máscara de água a partir do MNDWI, excluindo os rios que circundam a capital paraense, a Baía do Guajará e o rio Guamá. Além destes, é possível notar que os principais mananciais de abastecimento de água, localizados na porção sudeste do município, e diversos canais urbanos no centro-sul da cidade foram abarcados pela máscara de água.



**Figura 12:** Imagem Landsat 8 em composição colorida R(6)G(5)B(4) sem máscara (A) e a mesma imagem com a máscara aplicada a partir do índice MNDWI (B).

Importante destacar que, mesmo utilizando a composição colorida RGB nas bandas 6, 5 e 4 da L8, a figura 12 apresenta imagens com tonalidades diferentes, com a 12-B apresentando maior contraste entre os diversos elementos encontrados na paisagem. Esta diferença está diretamente relacionada à exclusão da água que, por apresentar tonalidade escura, atenua a intensidade das cores atribuídas aos demais materiais presentes na área em destaque.

#### 5.2.4. Modelagem de Mistura Espectral e Estimativa de SIs

A estimativa de SIs foi feita adotando a metodologia do modelo de mistura espectral. Ao invés de realizar uma classificação separando as classes permeáveis e impermeáveis, optou-se em estimar a proporção de materiais impermeáveis presentes em cada pixel da imagem por meio de um modelo linear de mistura espectral. Tal opção se deve à aderência do modelo de mistura na estimativa de SIs, conforme já descrito na revisão bibliográfica.

##### 5.2.4.1. Seleção dos *Endmembers*

A seleção do conjunto de espectros de referência (*endmembers*) a ser utilizado na modelagem de mistura espectral é uma etapa crucial no sucesso das estimativas. Como regra geral, os *endmembers* selecionados devem ser representativos da composição de mistura da paisagem analisada (ADAMS & GILLESPIE, 2006). Para realizar a seleção dos *endmembers*, adotaram-se dois procedimentos prévios de análise com o objetivo de reduzir a variabilidade espectral das classes de interesse (variabilidade interna de cada classe e entre as classes) e de reduzir a subjetividade no processo de seleção dos espectros de referência.

O primeiro procedimento consistiu na normalização das imagens. Tal procedimento foi proposto por WU (2004) com o objetivo de realçar assinaturas espectrais de componentes dominantes e minimiza ao mesmo tempo os efeitos dos valores da refletância absoluta. O autor (*op cit.*) propõe a normalização pela média de brilho do conjunto de imagens multiespectrais.

No presente estudo, optou-se em realizar a normalização pela soma do brilho com o objetivo de evitar valores maiores do que 1 no resultado da normalização (KAWAKUBO et al, 2019). Ou seja, com esta pequena modificação, todos os valores foram normalizados para o intervalo de 0-1.

A fórmula adota consistiu na seguinte expressão:

$$R_{bn} = \frac{R_b}{m}$$

Sendo que:

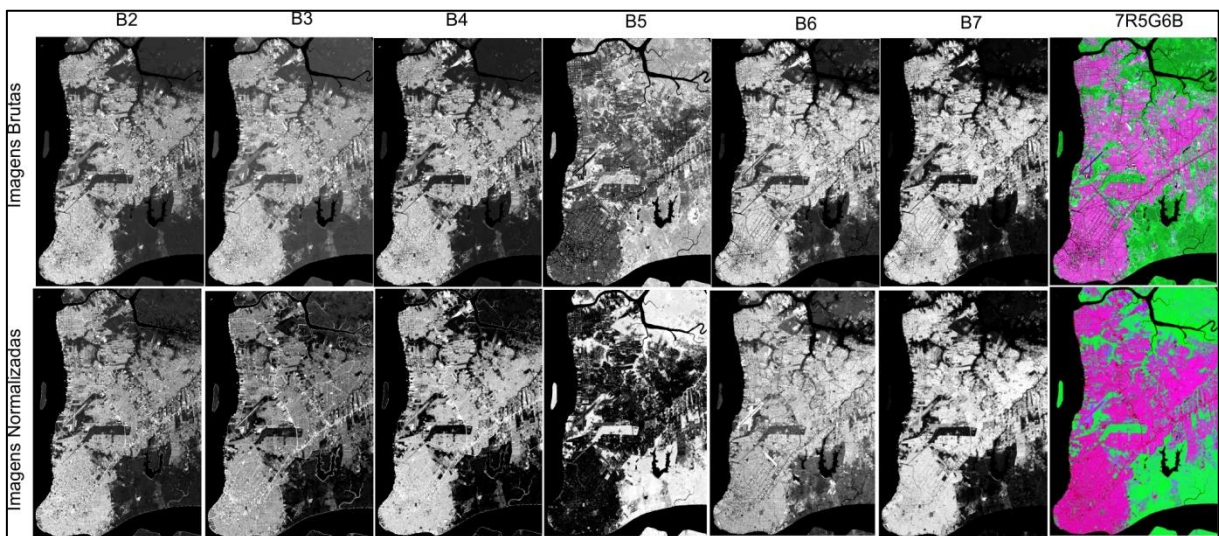
$$m = \sum_{b=1}^m R_b$$



$R_{bn}$  é a refletância da banda normalizada;

$R_b$  é a refletância da banda original.

A figura 13 ilustra o conjunto de imagens originais e após a aplicação do procedimento de normalização. É possível observar de forma mais evidente o contraste dos sistemas viário (B3 e B4) e da vegetação (B5) com a aplicação da normalização. A redução da variabilidade interna das classes é destacada na composição colorida 7R5G6B exibida.



**Figura 13.** Imagens originais e após a aplicação da normalização para as bandas do visível (B2-B4), infravermelho próximo (B5) e infravermelho de ondas curtas (B6-B7).

O segundo procedimento adotado consistiu na redução da dimensionalidade dos dados por meio da Análise por Componentes Principais - ACP (ou PC de Principal Components). A vantagem de utilizar esta técnica é que ela permite concentrar a variância do conjunto de imagens nas primeiras componentes de transformação (LILLESAND et al. 2004; JENSEN, 2009). Assim, enquanto as primeiras PCs tendem a conter as informações de maior correlação entre as bandas, as últimas PCs concentram informações mais específica e de menor variância.

A tabela 05 apresenta a contribuição de cada PC gerada a partir do conjunto de imagens brutas e normalizadas. Conforme pode observado, apesar das três primeiras PCs contribuírem com mais de 99% da variância, o procedimento de normalização aumentou a concentração da variância na PC1. Isto ocorreu provavelmente em virtude da redução da variabilidade interna das classes e do aumento de contraste entre classes distintas.

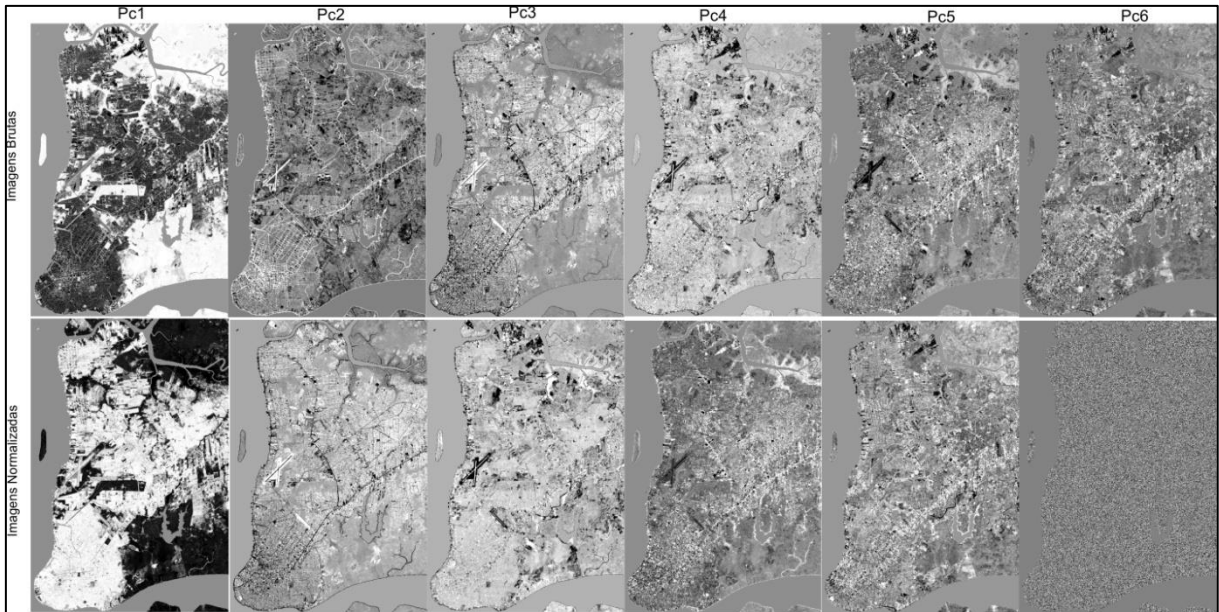
	Imagem bruta		Imagem Normalizada	
	Auto valores	Variância (%)	Auto valores	Variância (%)
PC1	0,020668	82,98	0,030708	96,56
PC2	0,00336	13,49	0,000921	2,90
PC3	0,00072	2,89	0,000084	0,26
PC4	0,00008	0,32	0,000069	0,22
PC5	0,00006	0,24	0,000019	0,06
PC6	0,00002	0,08	0,00	0,00

**Tabela 05.** Autovalores das imagens PCs geradas a partir das imagens brutas e com normalização.

A figura14 ilustra as imagens PCs geradas. Em ambos os conjuntos, é possível observar a concentração de algum tipo de informação em determinadas PCs e a redução progressiva da variância com o incremento das PCs. Nas PCs geradas pelas imagens brutas, a primeira componente (PC1) destacou especialmente as áreas de vegetação verde em contraste com as áreas urbanas impermeáveis. Já a segunda (PC2) e a terceira componente (PC3) realçaram, respectivamente, o sistema viário e áreas de vegetação seca (esta última, incluído também áreas urbanas).

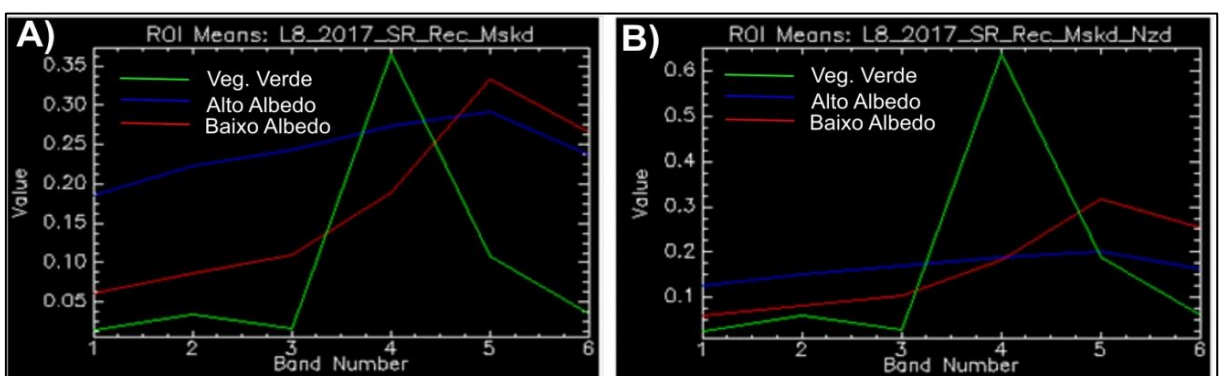
Por outro lado, quando analisada as três componentes geradas pelas imagens normalizadas, a primeira componente (PC1) realçou as áreas urbanas (incluído solo exposto,) a segunda componente (PC2) realçou a presença de vegetação seca, e a terceira componente (PC3) destacou as feições de baixo albedo (como a pista de aeroporto) e mata de igapó.

A utilização da Análise por Componente Principais é importante para o presente trabalho porque, ao projetar as três primeiras componentes em gráficos de dispersão por pares (PC1 x PC2, PC1 x PC3 e PC2 x PC3), os pixels localizados na extremidade da nuvem de pontos são considerados potenciais candidatos a *endmembers*.



**Figura 14.** Imagens componentes principais (PCs) utilizando as imagens brutas e com normalização.

Assim, por meio do recurso da ACP foram selecionados 3 *endmembers* representando os espectros puros de objetos escuros (baixa albedo), objetos claros (alto albedo) e vegetação verde. A figura 15 ilustra os *endmembers* obtidos a partir das imagens originais (A) e após a normalização (B). Conforme pode ser observado, a normalização amplificou o contraste principalmente da vegetação verde com os espectros de alto e baixo albedo. Estes, por sua vez, tiveram seus valores amplificados principalmente na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR1 e SWIR2).



**Figura 15.** A) *endmembers* das imagens originais; B) *endmembers* das imagens normalizadas.

#### 5.2.4.2. Estimativa das Frações de Mistura e de SIs

A estimativa de abundância de um pixel mistura parte do princípio que a mistura é resultado de uma combinação linear dos diferentes componentes

espectrais (*endmembers*) presentes dentro da dimensão mínima do terreno detectado pelo sensor ponderado pelas suas respectivas proporções areais.

Matematicamente o modelo é expresso por:

$$R_k = \sum_{i=1}^M f_i r_{i,k} + e_k$$

Onde:

$R_k$  é o valor de um pixel mistura na banda  $k$ ;

$M$  é o número de *endmembers* considerado;

$f_i$  é o valor fracional do *endmember*  $i$ ;

$r_{i,k}$  é o valor de referência do *endmember*  $i$  na banda  $k$ ;

$e_k$  é o erro residual na banda  $k$ .

Em um modelo bem ajustado, ou seja, utilizando um numero adequado de *endmembers* que representam a composição de mistura da paisagem, as frações variam de 0 à 1 e as somas das frações é igual a 1. Assim, o modelo é expresso por:

$$\sum_{i=1}^M f_i = 1.$$

$$0 \leq f_i \leq 1.$$

O erro médio quadrático (RMSE) é dado por:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2},$$

Pelo fato das informações relacionadas à impermeabilização do solo se concentrar nas feições antropogênicas de cobertura e sistema viários ((Schueler, 1994), informações estas decompostas nas frações de alto e baixo albedo, respectivamente, adotou-se o seguinte procedimento: ambas as imagens foram somadas com o objetivo de agregar em um única imagem as informações de SIs, gerando a imagem de ASIs (Áreas de Superfícies Impermeáveis na cidade de Belém)

### 5.2.4.3. Avaliação dos Resultados

Tanto a avaliação dos resultados da modelagem de mistura espectral quanto a estimativa final do modelo de SIs foi feita de forma qualitativa e quantitativa. Para esta análise, imagens de alta resolução do *Google Earth* e do *Planet Scope* foram utilizadas como apoio direto (validação) e indireto (como referência para análise e dos diversos padrões espaciais de uso e cobertura vegetal).

A avaliação qualitativa considerou especialmente a compatibilidade dos valores de frações com as estruturas físicas das classes analisadas. Essa compatibilidade foi verificada de forma qualitativa baseando-se nos elementos de reconhecimento da fotointerpretação. É esperado, por exemplo, que nas áreas centrais urbanas, seja observado um alto valor da fração de alto albedo e média proporção de baixo albedo, que resultará em valores elevados de SIs. A presença de vegetação nas ruas também influencia na distribuição dessas frações, sendo a fração vegetação maior nos bairros mais nobres economicamente e com maior presença de arborização. Nesses bairros, é esperado, portanto, uma menor fração de alto albedo e conseqüentemente, menores valores de SIs.

Para a avaliação quantitativa, considerou-se a distribuição dos valores de extrapolação das frações e o erro médio quadrático (RMSE). É esperado que as imagens frações tenham baixa porcentagem de valores fora do intervalo de 0-1 e baixo RMS, indicando, assim, a aderência dos *endmembers* de referência na decomposição da mistura. É importante destacar, todavia, que, mesmo havendo extrapolação, isto não significa que os valores de SIs tenham sido modelados erroneamente. Para verificar a real aderência do modelo, é preciso que este seja confrontado com outros modelos de referência.

No presente estudo, a verificação da concordância do modelo de SI gerado foi feito confrontando-o com um segundo modelo de SI derivado a partir de imagens de alta resolução espacial do *Planet Scope*. Os procedimentos adotados na geração deste segundo modelo de SI seguiu, de forma geral, os mesmos procedimentos adotados com as imagens do L8. Todavia, ao invés de selecionar *endmembers* nas extremidades das distribuições das PCs, optou-se em selecionar os espectros dentro das nuvens das distribuições (*interior endmember*) com o objetivo de evitar a subestimativa de áreas impermeáveis. Este procedimento gera valores de extrapolação das frações e de erro RMS maiores do que utilizando *endmembers* de

canto, todavia, ele tende a fornecer melhores estimativas de frações de impermeabilização do solo (WU, 2009).

Após a geração do modelo de SI com 3 metros de resolução espacial, a resolução do pixel foi degradada para 30 metros de resolução utilizando um fato de agregação de 10 pixels. O valor resultante foi a média dos pixels considerados na agregação. Este procedimento possibilitou uma comparação direta entre os dois modelos, adotando como referência, os valores de SIs estimados a partir das imagens do satélite *Planet Scope*. O maior detalhamento geométrico e de discretização da variabilidade de impermeabilização possibilita que esta seja utilizada como referência para avaliação de um modelo mais genérico de detalhe como aqueles gerados pelo Landsat. Tal avaliação também foi realizado por SMALL (2006) ao validar a abundancia de vegetação estimada por modelo de mistura espectral confrontando estimativas derivadas das imagens Landsat com imagens de alta resolução do *Quick Bird*.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de mistura espectral gerado a partir das imagens L8, utilizando o conjunto de três *endmembers* (vegetação verde, alto albedo e baixo albedo) respondeu bem as variações de reflexão de energia dos diferentes materiais disposto no município de Belém, PA. No geral, os valores das frações foram condizentes com as variações dos materiais dispostos na superfície e com as estruturas físicas da paisagem.

Conforme pode ser observado na figura 16, nas áreas urbanas observou-se a predominância das frações de alto albedo (A), representando principalmente as áreas construídas, e de baixo albedo (B), destacando as vias de circulação e as áreas de sombreamento resultantes das edificações verticais. A fração vegetação (C) é predominante nas áreas rurais cobertas por mata e vegetação de gramínea verde, observando-se também valores mais elevados em bairros urbanos com a presença mais expressiva de arborização.

Em termos de erros gerados na modelagem, observou-se baixa porcentagem de extrapolação do intervalo de 0-1 (*fraction overflow*) e baixos valores do erro RMS. Na imagem de erro RMS (D) é possível observar que os erros mais expressivos (com tonalidades mais claras na imagem) correspondem às áreas de vegetação seca, espectro este não incorporado na modelagem por ter sido pouco representativo do padrão de mistura encontrado na área de estudo.



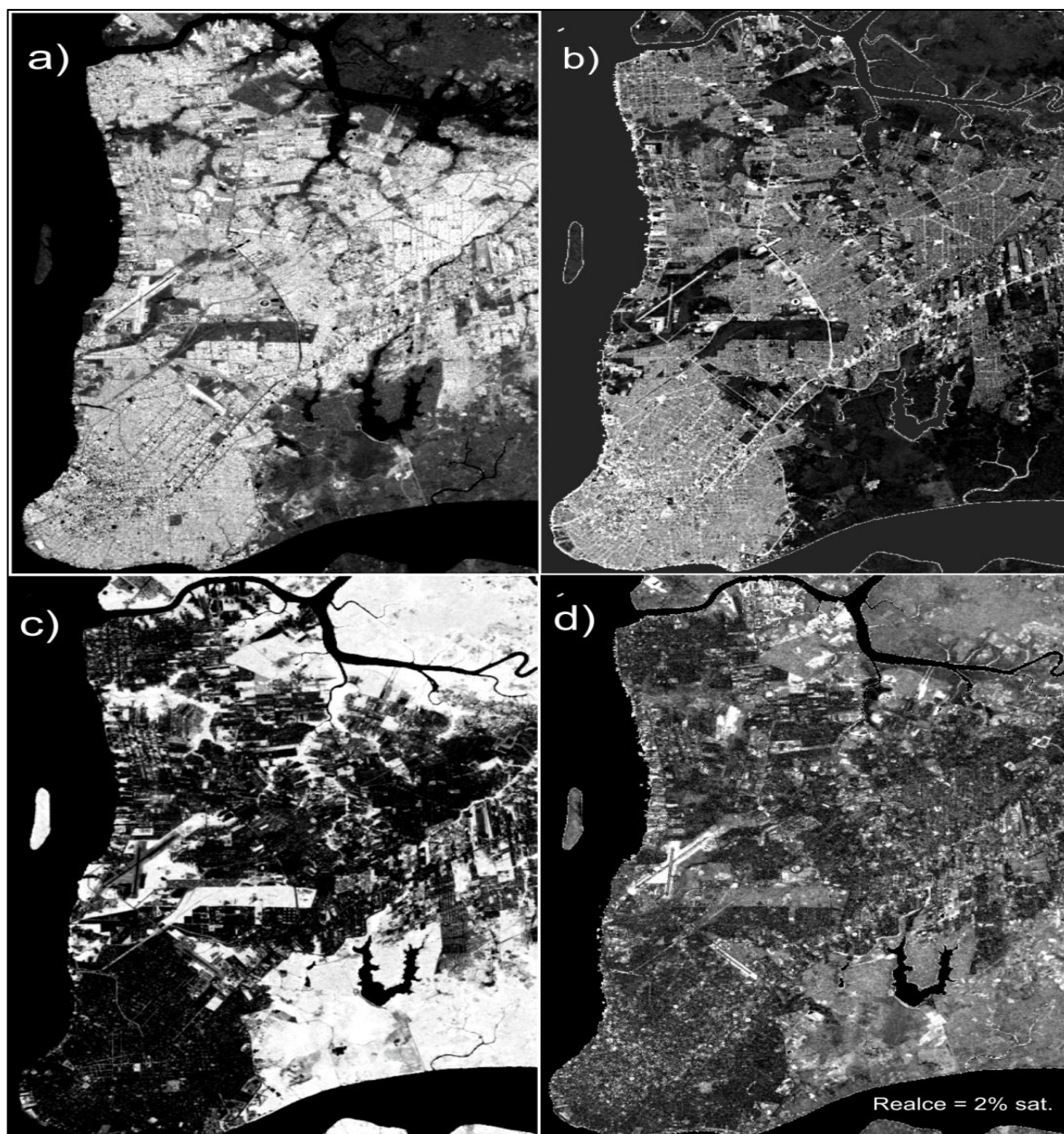


Figura 16. Imagens frações derivados do modelo de mistura espectral: A) Alto albedo; B) baixo albedo; C) Vegetação verde; D) Imagem erro RMS.

Conforme descrito na metodologia, as feições de SIs foram realçadas somando as imagens frações de alto e baixo albedo. A figura 17 ilustra o resultado final do modelo de SI gerado. Ao analisar qualitativamente a imagem, com base em imagens de alta resolução (*Google Earth* e *Planet Scope*), observa-se que o modelo revelou estimativas de impermeabilização do solo bastante consistente com a estrutura urbano do município de Belém.

Áreas com valores mais elevados de SIs nas porções centrais do município variando de acordo a presença de arborização nas ruas, e que diminuem em direção as zonas periféricas e rurais. Nestas áreas, observa-se maior presença de



vegetação de gramínea seca e de vegetação verde (gramínea, mata de várzea e floresta de terra firme).

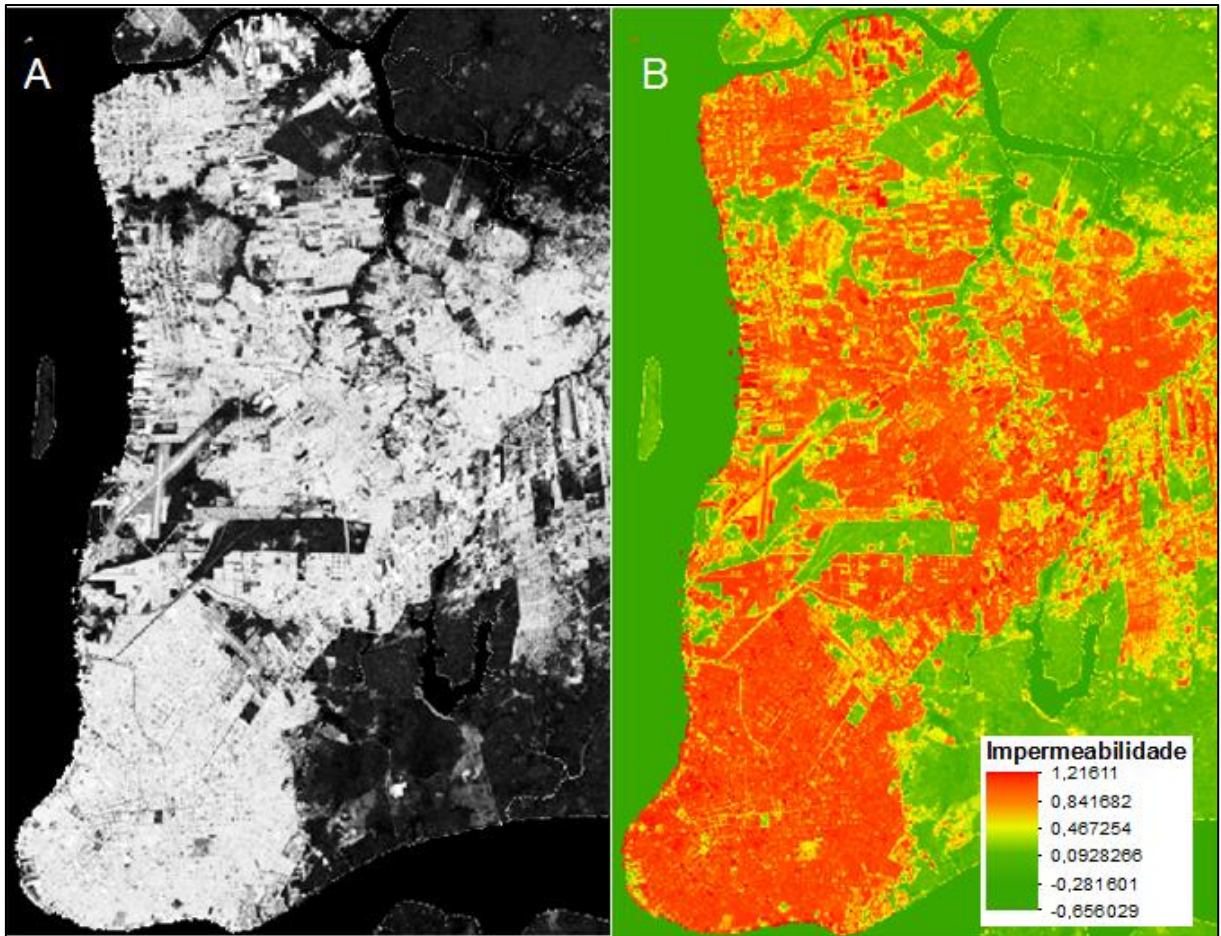
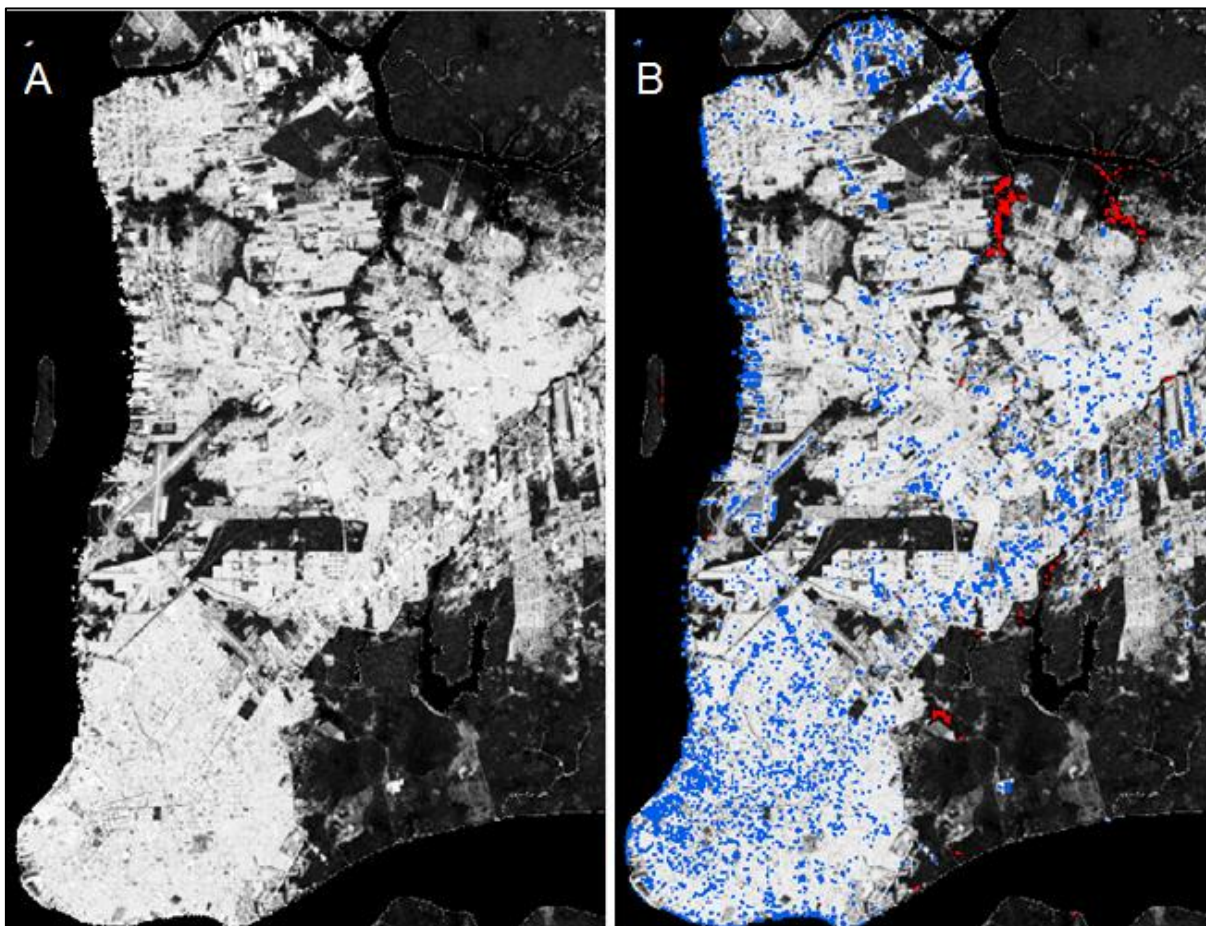


Figura 17. Modelo de Superfície Impermeável (SI) gerado a partir da soma das frações de alto e baixo albedo decomposto do modelo de mistura espectral utilizando imagens multiespectrais do L8.

Valores negativos e maiores do que 1 de SIs foram observados em menos de 2% da imagem, comprometendo, portanto, pouco os resultados obtidos. Valores negativos se aglutinaram sobre pequenas áreas ocupadas especialmente por mata de várzea (0,12% da imagem); valores maiores do que 1 (1,5% da imagem), por sua vez se espelharam sobre as áreas urbanas por representar materiais de alto albedo (telhas de amianto) cujos espectros apresentam refletância maior do que o *endmember* de alto albedo empregado na análise. Tais feições não foram selecionadas para modelagem porque se considerou, após a realização de vários testes, que estes materiais são pouco representativos da composição de mistura existente na paisagem analisada e a sua utilização pouco agregaria em termos de melhoria nos resultados. Isto porque ao utilizar estes “espectros extremos”, outros materiais impermeáveis seriam subestimados no modelo final.

A figura 18 mostra a localização dos valores negativos (com a cor vermelha) e maiores do que 1 (com a cor azul) sobre o modelo de SI gerado. Conforme pode ser observado, os valores negativos concentram-se na porção norte e os valores positivos, sobre a área urbana de forma dispersa.



**Figura 18.** Espacialização da *fraction overflow* negativa (vermelho) e positiva (azul).

Para uma avaliação mais precisa da adequação do modelo de SI, uma análise quantitativa foi realizada comparando os valores estimados da L8 com valores de referência. No presente estudo, adotou-se como referência, os valores de SIs obtidos a partir de produtos de alta resolução espacial do satélite *Planet Scope* com 3 metros de resolução espacial.

Apesar dos resultados obtidos com as imagens do *Planet Scope* não representar necessariamente a real variação de impermeabilização do solo, a alta resolução espacial proporcionada (10 vezes maior do que a imagem do L8) por este produto melhorou significativamente a distribuição dos valores de impermeabilização.



A figura 19 ilustra o resultado da modelagem de SI gerada a partir das imagens do *Planet Scope*. Conforme pode ser observado, a alta resolução espacial permitiu maior discretização espacial das feições, resultando, portanto, em uma menor generalização das estimativas.

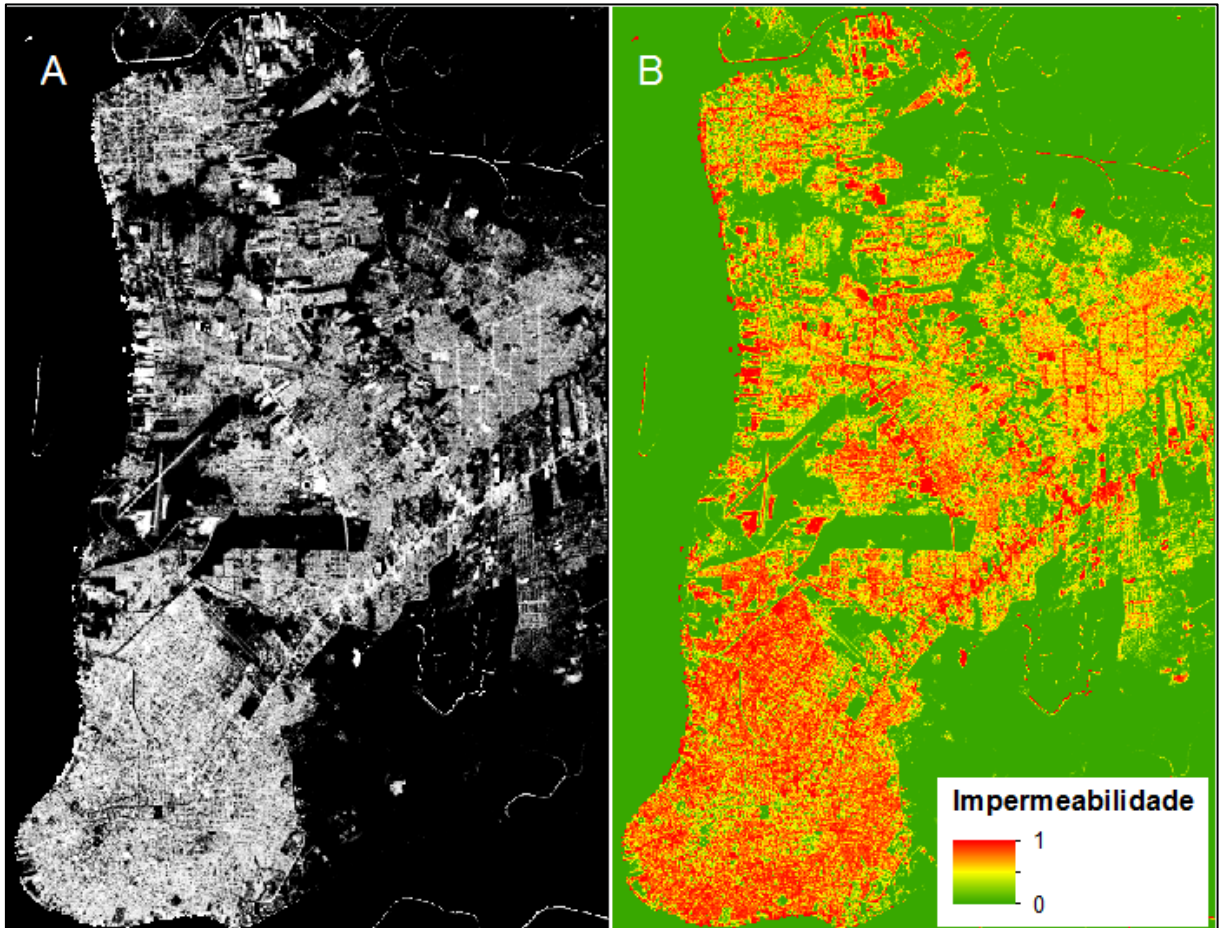


Figura 19. Estimativa de SI gerada a partir do satélite Planet Scope, com 3 metros de resolução espacial. Observar o maior detalhamento geométrico das feições e conseqüentemente, maior poder de discriminação que reduz as generalizações nas estimativas.

Confrontando os valores de SIs gerados a partir das imagens L8 com a do *Planet Scope*, observou-se uma boa aderência estatística entre os dois modelos, com valor de correlação igual a 0,84 (figura 20). Esta aderência, por sua vez, não se mostrou linear, evidenciando a complexidade de se analisar a heterogeneidade do ambiente urbano em razão da variabilidade espectral dos materiais encontrados e múltiplos espalhamentos da energia com os objetos urbanos (MITRAKA et al. 2016). O gráfico em destaque mostra uma forte relação não linear entre os dois modelos com tendência para superestimativa do modelo utilizando as imagens do L8.

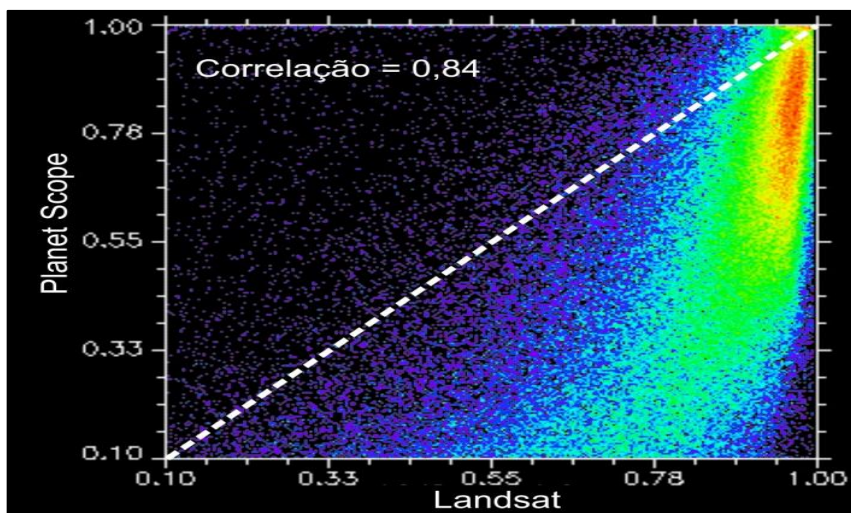


Figura 20. Relação entre as estimativas de SIs a partir das imagens L8 e *Planet Scope*, na qual a linha pontilhada corresponde à relação perfeita (1:1) entre os dois modelos. No gráfico, a escala de cores representa o aumento de densidade de pixels com o aumento da temperatura da cor.

Para analisar espacialmente a concordância e discrepância entre os valores obtidos com os dois modelos de SIs, realizou-se a análise do resíduo subtraindo a imagem SI do *Planet Scope* pela imagem SI do L8. Nesta operação, valores negativos e positivos representam respectivamente superestimativa e subestimativa da imagem SI gerada pelo L8.

Valores próximos de zero, por sua vez, expressam forte aderência entre as imagens L8 e *Planet Scope*. A figura 21 mostra o gráfico de resíduo presente nesta comparação, evidenciando a superestimativa já mencionada – é possível observar a assimetria presente no histograma com maior variação nos valores negativos (canto esquerdo da imagem).

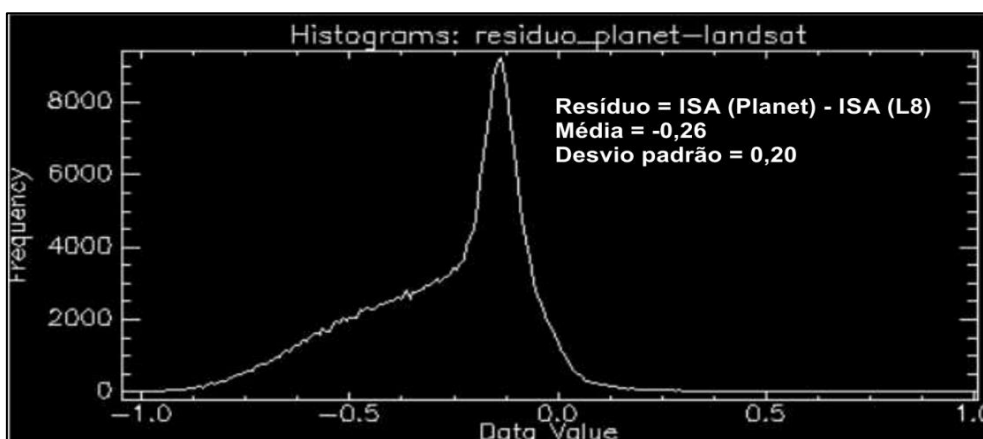


Figura 21. Resíduo dos valores de SI gerado a partir das estimativas do *Planet Scope* e L8

A figura 22 ilustra a imagem resíduo, onde observa-se a nítida dominância da superestimativa das SIs. Os valores mais altos de superestimativa foram

encontrados especialmente em áreas de pasto ou gramínea seca (cor azul), o que evidência de certa forma, a falta de um espectro de vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV) no conjunto de variabilidade da análise de mistura.

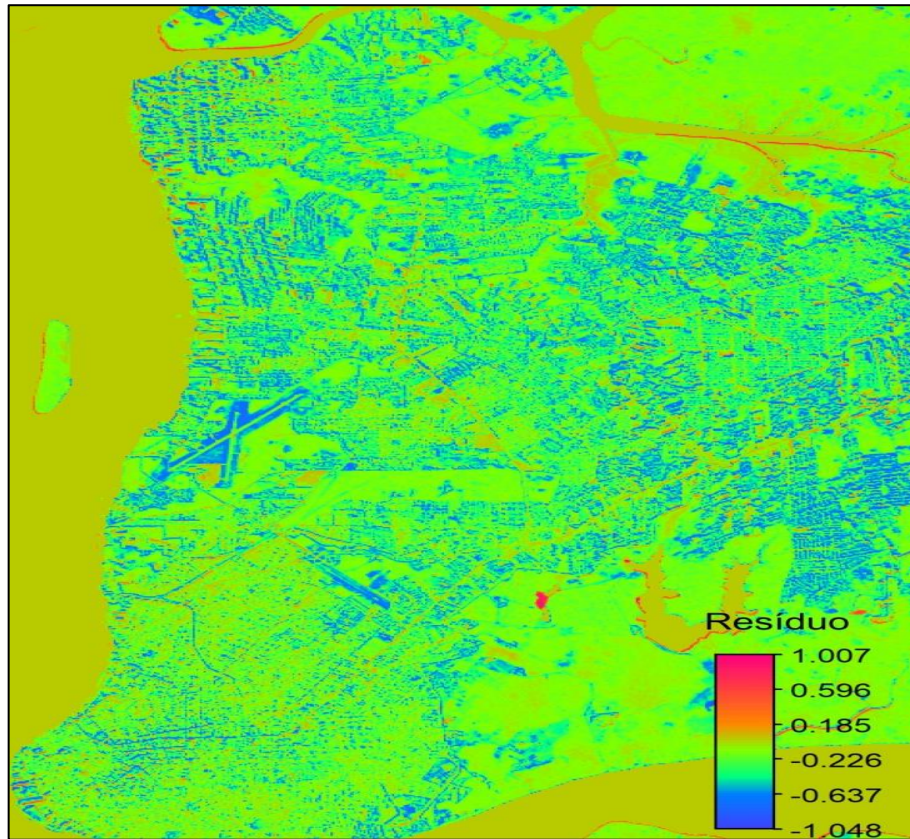


Figura 22. Imagem resíduo gerada a partir das estimativas de SI do Planet Scope e L8 (ou seja,  $SI_{\text{Resíduo}} = SI_{\text{Planet Scope}} - SI_{L8}$ )

A figura 23 apresenta, por sua vez, a distribuição da impermeabilidade na cidade de Belém, individualizada a partir de seus bairros. Ou seja, cada linha branca representa o grau de impermeabilidade presente nos quarenta e oito bairros pertencentes à porção continental belenense – quanto mais distante da origem, maior este percentual.

É possível perceber que a maior parte dos bairros apresenta uma porcentagem considerável de impermeabilidade em sua área, uma vez que apresentam elevada concentração dos valores de SIs na parte direita do gráfico. Entretanto, ainda é possível identificar, também, áreas verdes na paisagem belenense – bairros onde a amplitude dos níveis de SIs localiza-se próxima à origem do gráfico.

A partir das informações sobre SIs na cidade de Belém, foram selecionados quatro bairros: Guamá, Montese (Terra-Firme), Reduto e Tapanã. Estes quatro bairros apresentaram diferentes formas de distribuição da impermeabilidade em seu



interior em virtude de suas estruturas espaciais distintas – estas diferenças decorrem, principalmente, do seu processo de urbanização.

Além disso, é preciso destacar que estes bairros apresentam uma configuração espacial diferente, sendo possível diferencia-los em 3 grupos: o Reduto é um bairro da área central da cidade, enquanto que os bairros Guamá e Terra Firme são considerados bairros periféricos. Por ultimo, o Tapanã faz parte de um processo de expansão urbana recente, cuja ocupação ainda encontra-se em crescimento.

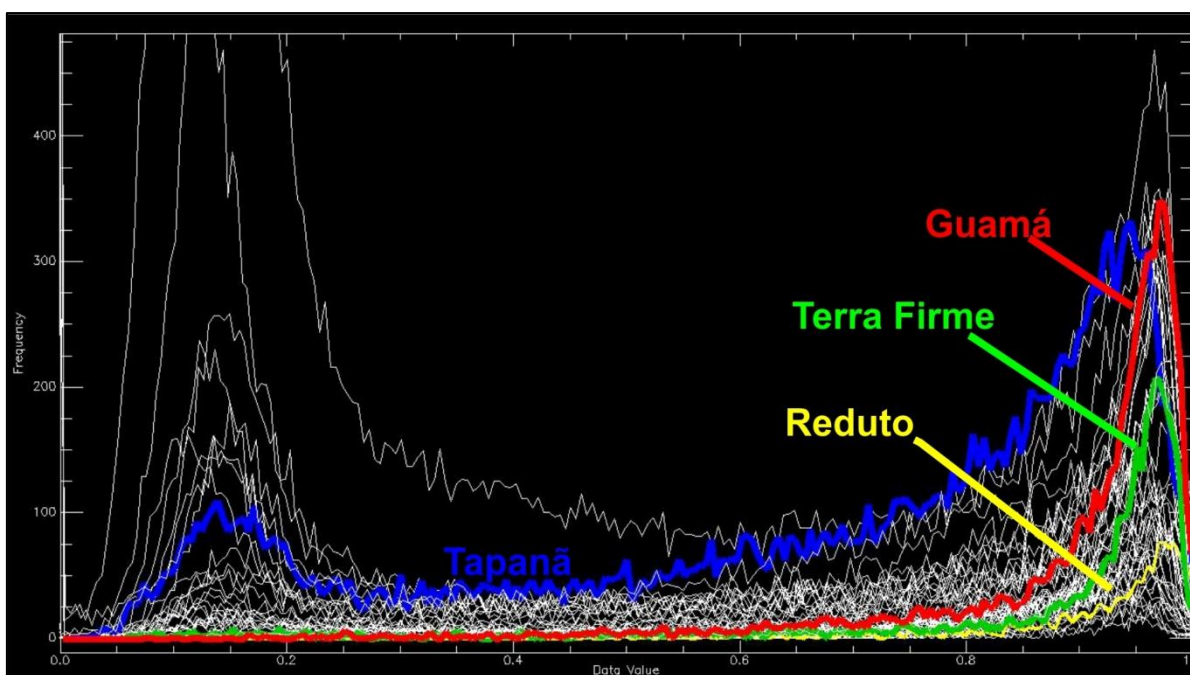


Figura 23 Grau de impermeabilidade (0 a 1) nos bairros de Belém, a partir das SIs na L8.

Os bairros do Guamá, Terra Firme e Reduto apresentam um comportamento semelhante no que se refere à concentração de impermeabilidade nos valores próximos a 1, embora em níveis distintos. No caso do bairro do Tapanã, é possível perceber que sua paisagem apresenta uma quantidade considerável de impermeabilidade, embora possua, também, áreas permeáveis expressivas.

Sobre esta análise, é importante considerar as diferenças presentes em suas paisagens, do ponto de vista do uso do solo urbano. Estas podem ser explicadas, por exemplo, com base nos tipos de uso preconizados no Plano Diretor do município de Belém, do ano de 2008, para cada bairro – este dispositivo legal apresenta um modelo de ordenamento territorial a partir de zonas (BELEM, 2019), com previsão de usos distintos para o solo urbano (as chamadas Zonas do Ambiente Urbano, ou ZAUs).

O bairro do Guamá e Terra Firme, por exemplo, encontram-se na ZAU 5, caracterizada, principalmente, pelo uso residencial do solo urbano. Estas áreas apresentam alta densidade populacional (habitantes/km<sup>2</sup>) a partir de um crescimento desordenado e se localizam próximas aos canais fluviais urbanos, o que resulta em uma alta impermeabilização do solo. Em virtude da proximidade dos corpos hídricos e da falta de infraestrutura, estas áreas apresentam riscos de alagamento.

Ainda que estejam em uma mesma zona urbana, é possível identificar na figura 23 diferentes níveis de impermeabilização do solo. O bairro do Guamá apresenta uma média de 84% de impermeabilidade em seu interior, enquanto que o bairro da Terra Firme apresenta 86%. Esta diferença ocorre, principalmente, porque no bairro do Guamá ocorre *fraction overflow* para valores negativos, reduzindo o valor da sua média, enquanto que este fator não ocorre no bairro da Terra Firme.

Do ponto de vista espacial, existe uma diferença considerável nas áreas destes bairros: o Guamá apresenta 4,19 km<sup>2</sup> e a Terra Firme, 2,24km<sup>2</sup>. Além disso, o nível de ocupação dos bairros é diferente, pois de acordo com o censo do IBGE de 2010 (o último censo demográfico realizado), a população do bairro do Guamá era de aproximadamente 94.610 habitantes, enquanto que na Terra Firme havia 61.439 habitantes (CENSO DEMOGRÁFICO 2010, 2011).

O bairro do Reduto, em contrapartida, não apresenta uma área expressiva e é um dos cinco bairros de menor área da porção continental do município, com 0,82 km<sup>2</sup> – este bairro apresentava, em 2010, 6.373 habitantes (CENSO DEMOGRÁFICO 2010, op. cit.). Seu percentual médio de impermeabilidade é de 90%, mas este valor não condiz com o gráfico apresentado na figura 23. Isto porque ocorre *fraction overflow* para valores positivos acima de “1”, não estando estes valores, portanto, representados na figura.

Este bairro localiza-se na ZAU 7 (nos setores I e II) e apresenta, de modo geral, uma infraestrutura consolidada, principalmente para uso do solo comercial, ruas mais estreitas (pela proximidade com a parte histórica da cidade) e diversidade arquitetônica considerável, com destaque para a renovação da paisagem urbana a partir da verticalização da ocupação do solo (BELEM, op. cit.).

Devido a esta renovação da paisagem, o bairro do Reduto apresenta, na L8, o menor índice de impermeabilidade dos quatro selecionados no intervalo condizente com a realidade (entre 0 e 100% de impermeabilidade). Isto porque esta

verticalização causa sombreamento e, conseqüentemente, uma subestimativa da impermeabilidade na paisagem urbana. Além disso, nesta área estão presentes alguns canais urbanos, reduzindo a impermeabilidade da área total.

O bairro do Tapanã é o segundo maior bairro em área da porção continental do município de Belém, com 10,06 km<sup>2</sup>, e contava, em 2010, com 66.669 habitantes (CENSO DEMOGRÁFICO 2010, op. cit.), indicando uma densidade populacional inferior aos demais bairros ora apresentados. O percentual médio de impermeabilidade nesta área é de 65%, apenas com *fraction overflow* positiva – e ainda assim, com mínima influência na estimativa de SIs (2% acima de 1).

Este bairro faz parte da ZAU 4, zona que apresenta um uso predominantemente residencial e com atividades econômicas dispersas, com núcleos industriais isolados – além da carência de equipamentos públicos de infraestrutura (BELEM, op.cit.). Estes fatores ajudam a compreender o baixo percentual de impermeabilidade nesse bairro.

Além disso, é possível identificar na figura 23 uma distribuição considerável de baixa impermeabilidade. Isto se dá, principalmente, pela presença de grandes terrenos subutilizados, com ociosidade de grandes áreas. Assim, existe a presença de áreas de vegetação em maiores proporções se comparados com os outros bairros selecionados.



## 7. CONCLUSÃO

A heterogeneidade espectral encontrada no ambiente urbano e as múltiplas interações de energia causada pela diversidade de materiais e estrutura geométrica presentes, faz com que o mapeamento de superfícies impermeáveis (SIs) constitua um dos principais desafios utilizando sensoriamento remoto orbital. A análise de mistura espectral constitui um dos recursos mais eficiente para o mapeamento de SIs. Isto porque tal recurso permite investigar o ambiente urbano como um modelo contínuo de variação de impermeabilização do solo, evitando generalizações comuns nas classificações de imagens, e, por conseguinte, a propagação de erros na quantificação de SIs.

Para imagens de resolução moderada, como as do Landsat (30 metros no terreno), a análise de mistura espectral tem se mostrado bastante eficiente nos vários trabalhos publicados na literatura especializada que trata do mapeamento das SIs. Considerando que em cada unidade de resolução (pixel), o sinal registrado pelo sensor corresponda a média da energia refletida pelos objetos dentro de uma área de 900 m<sup>2</sup> no terreno, é muito provável que no ambiente urbano, o sinal registrado seja uma mistura de materiais dispostos na superfície de resolução. A aderência do modelo de mistura espectral deve-se ao fato de que a técnica possibilita incorporar o conceito de mistura em sua análise.

Apesar da diversidade espectral existente, é possível modelar o ambiente urbano utilizando um número reduzido de espectros de referência para estimar as SIs. No presente estudo, assim como em vários estudos publicados, foram utilizando três espectros de referência (*endmembers*) para modelar as variações de SIs, a saber: alto albedo, baixo albedo e vegetação verde.

Enquanto o *endmember* de alto albedo tende a isolar as feições de SIs de alta reflexão, como as edificações urbanas, o *endmember* de baixo albedo incorpora as variações de brilho de materiais escuros, como o asfalto e os sombreamento das edificações. Assim, as SIs podem ser estimadas integrando as informações de alto e baixo albedo em um único modelo. As informações de vegetação verde, por sua vez, complementa a análise trazendo informações de espaços vegetados dentro da trama urbana.

No presente estudo, o conjunto de *endmembers* utilizado mostrou-se eficiente para modelar a variabilidade espectral registrada no município do Belém, Pará. Além

das frações apresentarem valores condizentes com a estrutura física da paisagem, os erros observados (erro de extrapolação das frações e erro RMS) mostraram-se baixos, evidenciando, portanto, a adequação das referências utilizadas na modelagem das SIs.

A validação quantitativa da estimativa da SIs utilizando imagens L8 foi realizada confrontando seus valores com as estimativas de SIs derivadas das imagens *Planet Scope* com 3 metros de resolução espacial. As estimativas derivadas do *Planet Scope* foram utilizadas como referência pelo fato desta incorporar maior variabilidade nas estimativas finais de SIs em função do maior poder de discriminação das feições. Os resultados mostraram forte aderência entre os dois modelos de SIs gerados (correlação = 0,84), porém, de forma não linear. De maneira geral, o modelo de SIs gerado pelo L8 superestimou os valores de impermeabilização do solo.

Por fim, percebe-se como a impermeabilidade se apresenta nos bairros da cidade de Belém, principalmente em áreas com características espaciais distintas. É possível perceber a influência dos diversos tipos de uso do solo urbano (e sua consequente espacialização), bem como a compreensão do processo de mistura na estimativa de SIs em imagens de resolução espacial moderada, como a Landsat 8.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, J.; GILLESPIE, A. **Remote sensing of landscape with spectral images: a physical modelling approach**. Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2006.
- ANDREOLI, C.; SOUZA, M. Gestão ambiental por bacias hidrográficas. In: MAIMON, D. **Ecologia e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: APED, p. 99-118, 1992.
- ARAUJO JUNIOR, A.; AZEVEDO, A. **Formação da cidade de Belém (PA): área central e seu papel histórico e geográfico**. In: Espaço Aberto, 2(2), p. 151-168, 2012.
- ARNOLD, C.; GIBBONS, C. **Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator**. In: Journal of the American Planning Association, 62(2), p. 243-258, 1996.
- BASTOS, T.; PACHECO, N.; NECHET, D.; ABREU SA, T. **Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002.
- BELEM. Prefeitura Municipal. Plano Diretor do Município de Belém – Pará (2008). Disponível em: <<http://www.belem.pa.gov.br/planodiretor/>>. Acesso em 01 agosto 2019.
- BRUN, S.; BAND, L. **Simulating runoff behaviour in an urbanizing watershed**. In: Computers, Environment and Urban Systems, 24, p. 5-22, 2000.
- CENSO DEMOGRÁFICO 2010. **Características da população e dos domicílios: resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edigard Blucher, 1980.
- CROSTA, A. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 2002.
- ESSA, W.; KWAST, J.; VERBEIREN, B.; BATELAAN, O. **Downscaling of thermal images over urban areas using the land surface temperature-impervious percentage relationship**. In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23, p. 95-108, 2013.
- ESTEVES, R. **Quantificação das superfícies impermeáveis em áreas urbanas por meio de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, p. 120. 2006.

FITZ, P. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

JENSEN, J. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

KAWAKUBO, F.; MORATO, R.; MARTINS, M.; MATAVELI, G.; NEPOMUCENO, P.; MARTINES, M. **Quantification and Analysis of Impervious Surface Area in the Metropolitan Region of São Paulo, Brazil**. In: Remote Sensing, 11, 944, 2019.

KIM, Y.; BAIK, J. **Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul**. In: Journal of Applied Meteorology, 44, p. 591-605, 2005.

LILLESAND, T.; KIEFER, R.; CHIPMAN, J. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Nova Iorque: John Wiley & Sons Ltd, 2004.

LU, D.; WENG, Q. **Spectral Mixture Analysis of the urban landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ imagery**. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70(9), p. 1053-1062, 2004.

LU, D.; LI, G.; KUANG, W.; MORAN, E. **Methods to extract impervious surface areas from satellite images**. In: International Journal of Digital Earth, 7(2), p. 93-112, 2014.

MACHADO, P.; TORRES, F. **Introdução à hidrogeografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

MATHEW, A.; KHANDELWAL, S.; KAUL, N. **Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land surface temperature: study of Chandigarh city, India**. In: Sustainable Cities and Society, 26, p. 264-277, 2016.

MCFEETERS, S. **The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features**. In: International Journal of Remote Sensing, 17(7), p. 1425-1432, 1996.

MITRAKA, Z.; DEL FRATE, F.; CARBONE, F. **Nonlinear spectral unmixing of Landsat imagery for urban surface cover mapping**. In: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(7), p. 3340-3350, 2016.

MOREIRA, R.; GALVAO, L.; CASTRO, R. **Caracterização da refletância espectral de materiais urbanos com imagens do sensor HSS**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. *Anais...* São

José dos Campos: INPE, 2007, p. 6489-6496. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: < <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.12.04/doc/6489-6496.pdf>>.

NOVO, E. **Sensoriamento Remoto**: princípios e aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

OWEN, T.; CARLSON, T.; GILLIES, R. **An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization**. In: International Journal of Remote Sensing, 19(9), p. 1663-1681, 1998.

PENTEADO, A. **Belém do Pará**: estudo de Geografia Urbana Volume 1º. Belém: Universidade Federal do Pará, 1968. 2 v. (Coleção Amazônica, série José Veríssimo).

RIDD, M. **Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing**: comparative anatomy for cities. In: International Journal of Remote Sensing, 16(12), p. 2165-2185, 1995.

RODRIGUES, C; ADAMI, S. Técnicas fundamentais para o estudo de bacias hidrográficas. In: VENTURI, L. A B. (Org.). **Praticando Geografia**: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, p. 147-166.

SCHOWENGERDT, R. **Remote Sensing**: models and methods for Image Processing. Londres: Academic Press, 2006.

SCHUELER, T. **The importance of imperviousness**. In: Watershed Protection Techniques, 1(3), p. 100-111, 1994.

SHIMABUKURO, Y.; PONZONI, F. **Mistura espectral**: modelo linear e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SMALL, C. **Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature**. In: Remote Sensing of Environment, 104, p. 168-189, 2006.

SLONECKER, E.; JENNINGS, D.; GAROFALO, D. **Remote sensing of impervious surface**: a review. In: Remote Sensing Reviews, 20, p. 227-255, 2001.

STRAHLER, A.; WOODCOCK, C.; SMITH, J. **On the nature of models in remote sensing**. In: Remote Sensing of Environment, 20(2), p. 121-139, 1986.

WENG, Q. **Modelling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS.** In: Environmental Management, 28, p. 737-748, 2001.

WENG, Q. **Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: requirements, methods and trends.** In: Remote Sensing of Environment, 117, p. 34-49, 2011.

WENG, Q.; LU, D. **A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States.** In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10, p. 68-83, 2008.

WENG, Q.; LU, D. **Landscape as a continuum: an examination of the urban landscape structures and dynamics of Indianapolis City, 1991-2000.** In: International Journal of Remote Sensing, 30(10), p. 2547-2577, 2009.

WU, C. **Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery.** In: Remote Sensing of Environment. 93, p. 480-492, 2004.

WU, C. **Quantifying high-resolution impervious surfaces using spectral mixture analysis.** In: International Journal of Remote Sensing, 30(11), p. 2915-2932, 2009.

XIAO, R.; OUYANG, Z.; ZHENG, H.; LI, W.; SCHIENKE, E.; WANG, X. **Spatial pattern of impervious surface and their impacts on land surface temperature in Beijing, China.** In: Journal of Environmental Sciences, 19, p. 250-256, 2007.

XU, H. **A study on information extraction of water body with the Modified Normalized Difference Water Index.** In: Journal of Remote Sensing, 9(5), p. 511-517, 2005.

XU, H. **Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique.** In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73, p. 1381-1391, 2007.

YANG, L.; HUANG, C.; HOMER, C.; WYLIE, B.; COAN, M. **An approach for mapping large-scale impervious surfaces: synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery.** In: Canadian Journal of Remote Sensing, 29, p. 230-240, 2003.

YUAN, F.; BAUER, M. **Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery.** In: Remote Sensing of Environment, 106, p. 375-386, 2007.