

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

REBECA GONÇALVES CAMPOS CARVALHO

**MONITORAMENTO DOS IMPACTOS DO COMPLEXO PETROQUÍMICO DO RIO
DE JANEIRO (COMPERJ) UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO
REMOTO**

Rio de Janeiro
2016

REBECA GONÇALVES CAMPOS CARVALHO

MONITORAMENTO DOS IMPACTOS DO COMPLEXO PETROQUÍMICO DO RIO DE
JANEIRO (COMPERJ) UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia, do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (Meteorologia).

Orientador: Prof. Dr. Leonardo de Faria Peres

Rio de Janeiro
2016

C331m Carvalho, Rebeca Gonçalves Campos.
Monitoramento dos impactos do Complexo
Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ) utilizando dados de
sensoriamento remoto/ Rebeca Gonçalves Campos Carvalho. – Rio de
Janeiro, 2016.
100f.

Orientador: Leonardo de Faria Peres.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Programa
de Pós Graduação em Meteorologia, 2016.

1. NDVI. 2. IBI. 3. ISA. I. Peres, Leonardo de Faria, oriente. II. Título.

REBECA GONÇALVES CAMPOS CARVALHO

**MONITORAMENTO DOS IMPACTOS DO COMPLEXO PETROQUÍMICO DO RIO
DE JANEIRO (COMPERJ) UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO
REMOTO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Meteorologia.

Examinada por:

Prof. Leonardo de Faria Peres, D.Sc.

Prof. Andrews José de Lucena, D.Sc.

Prof. Renata Libonati dos Santos, D.Sc.

Rio de Janeiro
2016

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos e Contribuições.....	16
1.3	Organização da Dissertação.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Ilhas de Calor Urbana.....	19
2.2	Sensoriamento Remoto.....	22
2.3	Plataforma Landsat.....	27
3	ÁREA DE ESTUDO	30
3.1	Visão Geral.....	30
3.2	Aspectos Socioeconômicos.....	37
3.3	Aspectos Físicos.....	41
3.3.1	<i>Clima</i>	42
3.3.2	<i>Geologia</i>	43
3.2.3	<i>Hidrologia</i>	44
3.2.4	<i>Ambiente Biológico</i>	44
4	METODOLOGIA	46
4.1	Pré-Processamento.....	47
4.1.1	<i>Correção radiométrica</i>	51
4.1.2	<i>Mascaramento de Nuvens</i>	54
4.2	Mapas de Uso e Cobertura do Solo.....	57
4.3	Temperatura da Superfície Continental (TSC).....	58
4.4	NDVI.....	60
4.5	IBI.....	61
4.6	ISA.....	62
4.7	Análise do Campo Térmico.....	66
5	RESULTADOS	68
5.1	O Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo: Análise Temporal.....	68
5.2	Média do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	70
5.3	Média do Índice de Área Construída (IBI).....	71
5.4	Índice de Área Impermeável (ISA).....	73
5.4.1	<i>Cálculo do ISA Através do NDVI</i>	73
5.4.2	<i>Cálculo do ISA Através do Modo de Mistura Linear</i>	74
5.5	Temperatura da Superfície Continental (TSC).....	78
5.5.1	<i>Média da TSC</i>	78
5.5.2	<i>Relação da TSC Com os Demais Parâmetros</i>	79
5.6	Caracterização da TSC, NDVI, IBI e ISA para as Classes de Uso e Cobertura de Solo.....	83
6	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores que contribuem para formação de Ilha de Calor.	19
Figura 2 - Linha do tempo das plataformas Landsat	28
Figura 3 - Localização da RMRJ dentro do Estado do Rio de Janeiro e sua divisão política mostrando as regiões de governo e municípios Regiões, governos e municípios do estado do Rio de Janeiro.	30
Figura 4 - Municípios da RMRJ.	31
Figura 5 - Traçado do Arco Metropolitano e seus segmentos.	33
Figura 6 - Localização do COMPERJ na RMRJ.	33
Figura 7 - Obras do COMPERJ em 2014.	35
Figura 8 - Imagem do Landsat-8 de 02/08/2013 em composição RGB das bandas 7, 5 e 3 representando a área do COMPERJ.	36
Figura 9 - Uso e Cobertura do COMPERJ em 2009.	37
Figura 10 - Relevo da RMRJ.	41
Figura 11 - Órbita-ponto 217-76.	47
Figura 12 -- Imagem do Landsat-7 de 06 de junho de 2012 apresentando falhas.	49
Figura 13 -- Número de amostras válidas por pixel na RMRJ para o período pré-construção	50
Figura 14 -- Como na Figura 13, mas para o período pós-construção	50
Figura 15 - Mapa de uso e cobertura do solo da RMRJ (à direita) e da área do COMPERJ (à esquerda) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	69
Figura 16 - Como na Figura 15, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	70
Figura 17 - Média de NDVI para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	71
Figura 18 - Como na Figura 17, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	71
Figura 19 - Média de IBI para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	72
Figura 20 - Como na Figura 19, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	72
Figura 21 - Média de ISA para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	74
Figura 22 - Como na Figura 21, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	74
Figura 23 - Imagem fração urbano para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	75
Figura 24 - Como na Figura 23, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	76
Figura 25 - Imagem fração urbano para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	76
Figura 26 Como na Figura 25, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	76
Figura 27 - Imagem fração vegetação para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	77

Figura 28 - Como na Figura 27, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	77
Figura 29 - Diferença entre ISA com base no modelo de mistura linear e com base no NDVI para ao período anterior (à esquerda) e posterior (à direita) à construção do COMPERJ.	78
Figura 30 - Média de TSC para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).	79
Figura 31 - Como na Figura 30, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).	79
Figura 32 - Gráfico de dispersão entre a TSC e o NDVI mostrando a relação entre as duas variáveis para o período anterior (à esquerda) e posterior (à direita) à construção do COMPERJ. Os pontos verdes, vermelhos e amarelos indicam respectivamente pixels classificados como vegetação, urbano e solo exposto.	81
Figura 33 - Como na Figura 32, mas para o IBI.	81
Figura 32 - Como na Figura 32, mas para o ISA com base no NDVI.	82
Figura 33 - Como na Figura 32, mas para o ISA com base no modelo de mistura linear.	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferentes abordagens para o estudo da ICU.....	21
Quadro 2 - Classificação do espectro eletromagnético de acordo com o comprimento de onda e frequência.....	23
Quadro 3 - Trabalhos sobre Sensoriamento Remoto publicados com destaques para o uso da plataforma Landsat.....	24
Quadro 4 - Valores de albedo para materiais utilizados em meio urbano..	27
Quadro 5 - Características e condições das plataformas do programa Landsat.....	29
Quadro 6 - Produto Interno Bruto de Itaboraí.....	38
Quadro 7 - Destaques do censo agropecuário 2006.....	38
Quadro 8 - Datas das imagens por satélite.....	48
Quadro 9 - Constantes de calibração para o sensor TM a bordo do Landsat-5.....	52
Quadro 10 - Constantes de calibração para o sensor ETM+ a bordo do Landsat-7.....	53
Quadro 11 - Valores das constantes K1 e K2.....	54
Quadro 12 - Características das bandas dos sensores OLI e TIRS e TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat-5, 7 e 8.....	56
Quadro 13 - Coeficientes de correlação dos gráficos de dispersão para o período pré..	82
Quadro 14 - Coeficientes de correlação dos gráficos de dispersão para o período pós..	83
Quadro 15 - Média e desvio padrão de TSC, NDVI, IBI e ISA referentes às classes urbano, solo e vegetação para o período pré-construção do COMPERJ.....	84
Quadro 16 - Como no Quadro 15, mas para o período pós-construção do COMPERJ...84	
Quadro 17 - Índice M de separabilidade referentes às classes urbano, vegetação e solo exposto para cada índice no período pré-construção do COMPERJ.....	85
Quadro 18 - Como no Quadro 17, mas para o período pós-construção do COMPERJ.	85

LISTA DE SIGLAS

ACP - Análises de Componentes Principais
AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer
CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
COMPERJ - Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro
DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito
DNOS - Departamento Nacional de Obras e Saneamento
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENSP - Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca
ETM+ - Enhanced Thematic Mapper
FVC - Fração de Cobertura Vegetal
IBI - Índice de Área Construída
ICU – Ilhas de Calor Urbanos
IFOV - Fenômeno Dentro do Campo de Visada Instantâneo
INPE - Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
ISA - Área de Superfície Impermeável
LANDSAT - Land Remote Sensing Sattelite
LST – Land Surface Temperature
MLME - Modelo Linear de Mistura Espectral
MNF - Fração de Ruído Mínimo
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS - Multispectral Scanner System
NASA - National Aeronautics e Space Administration
ND - Números Digitais
NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
OLI - Operational Land Imager
PAC - Programa de Aceleração do Crescimento
PIB - Produto Interno Bruto
PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RBV - Retum Bean Vidicom
RMRJ - Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSE - Root Mean Square Error
TIROS 1 - Television IR Operational Satellite
TIRS - Thermal Infrared Sensor
TM - Thematic Mapper
TSC - Temperatura da Superfície Continental
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
USGS - United States Geological Survey

RESUMO

Este trabalho estuda a variação da temperatura da superfície continental (TSC) associada à alteração da cobertura e do uso do solo, apoiados nos índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI), de área construída (IBI) e de área de superfície impermeável (ISA) para a região de instalação do COMPERJ, com objetivo de identificar, nos arredores do Complexo, alterações que podem contribuir para uma possível formação de ilha de calor urbana no município de Itaboraí, levando-se em consideração que este localiza-se na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), alvo de diversos estudos acerca do seu processo de urbanização favorecer a ocorrência de Ilha de Calor Metropolitana. Através do sensoriamento remoto, utilizou-se séries temporais de imagens provenientes dos satélites Landsat-5, 7 e 8, referente aos anos de 2002 a 2013, subdivididos em dois grupos, a saber: período pré e período pós, ambos demarcados pelo ano de 2007 quando foi dado início as obras do COMPERJ, portanto, o período pré refere-se aos anos de 2002 a 2007 e o período pós, refere-se aos anos de 2008 a 2013, totalizando uma série de 12 anos correntes contando com 58 imagens. Dos dados de sensoriamento remoto foram eleitas duas imagens que serviram de base para confecção de dois mapas de uso do solo, um para cada período. A partir das classes definidas neste trabalho, nomeadamente, classe urbano, classe solo, classe vegetação e classe água, notou-se uma superestimação de áreas urbanas em toda RMRJ, inclusive na área do COMPERJ. Percebe-se, também uma confusão entre áreas urbanas e áreas de solo exposto, o que é esperado pelas características espectrais de alguns solos e material urbano, que apresentam valores altos de albedo. Vale ressaltar que os tipos de solo da região e sua condutividade térmica, bem como sua composição química, não foram levados em consideração neste trabalho, considerando-se apenas solo exposto, todas e quaisquer áreas sem cobertura vegetal. Os dados também serviram para o cálculo da média para cada período dos parâmetros, TSC, NDVI, IBI e ISA, este último, realizado sob dois métodos, através do NDVI e através do modelo linear de mistura (MLM). O MLM consistiu em fracionar a região em fração urbano, fração solo e fração vegetação e nomeou a fração urbana como ISA, devido ao fato desta, realmente, representar áreas impermeáveis. Posteriormente, a TSC foi relacionada com cada índice, mostrando que a TSC é inversamente (diretamente) proporcional ao NDVI (IBI e ISA). A maior correlação absoluta para o período pós ($R = 0,85$) foi obtida com o IBI, indicando que este índice pode ser o melhor entre os analisados para mapear áreas construídas. Apesar de falhas na classificação, realizou-se uma caracterização (média e desvio padrão) dos parâmetros TSC, NDVI, IBI e ISA de acordo com cada classe para o período pré e pós. Para o período pré (pós) a diferença de TSC entre a área do COMPERJ e área de vegetação foi de $1,9^{\circ}\text{C}$ ($3,2^{\circ}\text{C}$). A diferença entre esses dois valores mostra uma intensificação de $1,3^{\circ}\text{C}$ entre os períodos pré e pós. O IBI, o ISA com base no NDVI e o ISA com base no MLM aumentaram seus valores respectivamente de -0,16 para 0,05, 0,63 para 0,96 e 0,26 para 0,38, enquanto o NDVI diminuiu de 0,49 para 0,15. Adicionalmente, utilizou-se o índice M de separabilidade para analisar a distinção dos parâmetros entre as diferentes classes. Para o período pré, todos os parâmetros mostraram valores de $M < 1$ quando se compara a área do COMPERJ com as demais, enquanto que após a construção todos os parâmetros, exceto o ISA com base no MLM, apresentam $M > 1$.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, COMPERJ, TSC, NDVI, IBI, ISA.

ABSTRACT

The present work studies the land-surface temperature (LST) variation associated to the land cover change, supported by normalized difference vegetation (NDVI), based built-up (IBI) and impervious surface area (ISA) indices for the COMPERJ installation region, in order to identify, in the vicinity of the complex, physical alterations that can contribute to a possible urban heat island (UHI) formation in Itaboraí. It is worth noting, that this region is located within the Metropolitan Area of Rio de Janeiro (MARJ), which has been studied along the last year by several researches trying to show how its urbanization process may contribute to the UHI occurrence. This study is based on remote sensing data, namely image time series from the Landsat-5, 7 and 8 satellites, for the years 2002 to 2013, which as divided into two groups: pre-construction and post-construction period, both marked by 2007 when COMPERJ construction has started, therefore the pre-period refers to the years 2002-2007 and the post-period refers to the years 2008-2013, totalizing 12 years with 58 images available. Two images was selected as the basis for making two land cover maps, one for each period. Based on the land cover classes defined in this work, namely urban, soil, vegetation and water, it is observable a overestimation of urban areas in the whole MARJ, including COMPERJ area. It is worth noting, a mistake between urban and exposed soil areas that may be explained by the spectral characteristics of some soils and construction materials, both presenting high albedo values. It is noteworthy that the different soil types and their thermal conductivity as well as their chemical composition, were not considered in this work, considering only one class for soil. The images were used to compute the LST, NDVI, IBI and ISA average for the two periods. The ISA was computed based on the NDVI and a linear mixing model (LMM), which has fractioned the region into urban, soil, vegetation fraction images where the urban fraction image was considered as ISA. Subsequently, LST was correlated with each index, exhibiting a relation inverse (direct) proportional to NDVI (IBI and ISA). The highest correlation for the post-period ($R = 0.85$) was found with IBI, suggesting that this index could present the best performance between the analyzed indices to identify urban areas. Despite, drawbacks in the land cover classification, an LST, NDVI, IBI and ISA characterization (average and standard deviation) was performed in accordance with each class for both pre and post-period. The LST difference between COMPERJ and vegetated areas was 1.9°C (3.2°C) for the pre-period (post). The comparison between these two values shows an intensification of 1.3°C for the post-period. The IBI and ISA based on the NDVI and based on the LMM have respectively increased from -0.16 to 0.05, 0.63 to 0.96, and 0.26 to 0.38, whereas NDVI has decreased from 0.49 to 0.15. In addition, the separability index M was used to analyze the parameters distinction between the classes. All parameters has shown $M < 1$ for the pre-construction period when the COMPERJ area is compared with the surrounding region whereas all parameters (except the ISA based on the LMM) has M values > 1 for the post-construction period.

Key words: Remote sensing, COMPERJ, LST, NDVI, IBI, ISA.

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios para a compreensão da dinâmica do sistema Terra – Atmosfera é uma avaliação exata das relações entre a população humana e os diferentes componentes do sistema climático. Segundo projeções das Nações Unidas, realizadas em 2011, a população mundial terá um crescimento de 2,3 bilhões entre o período de 2011 e 2050, passando de 7,0 para 9,3 bilhões de pessoas no mundo. Concomitantemente, espera-se que a população residente em áreas urbanas cresça em 2,6 bilhões de pessoas, passando de 3,6 bilhões em 2011 para 6,2 bilhões em 2050. Para a zona rural estima-se que sua população sofra uma redução de 0,3 bilhões de habitantes em 2050. Um novo documento emitido pelas Nações Unidas (2014), a saber: Prospectos da Urbanização mundial (*World Urbanization Prospects*) – Destaques, logo em sua primeira página, aponta que 54% da população mundial vivem atualmente em áreas urbanas e que em 1950 eram apenas 30%. Além disto, a maior parte do crescimento populacional em áreas urbanas se concentrará em cidades localizadas em países em desenvolvimento.

Atualmente, apenas 48% dos habitantes de regiões menos desenvolvidas vivem em áreas urbanas, enquanto que nas regiões mais desenvolvidas este número chega a 78% da população. A urbanização continuará crescendo em ambas as regiões, mas com taxas bastante distintas, de forma que em 2050, residentes urbanos somarão 84% da população em regiões mais desenvolvidas e 64% em regiões menos desenvolvidas. De modo geral cerca de 70% da população mundial residirá em áreas urbanas em 2050. Adicionalmente, o número de megacidades, aquelas com populações maiores que 10 milhões, aumentará de 23 em 2011 para 37 já em 2025.

No caso do Brasil, a produção do espaço urbano sofreu uma forte intensificação a partir da década de 40, quando ocorreu o processo de industrialização no país, causando um cenário de migração populacional da zona rural para as zonas urbanas (CARVALHO *et al.*, 2010). Em um estudo publicado pelo IBGE (2013), mostra-se que 89,4 milhões de pessoas no Brasil (46,9% da população brasileira) vivem atualmente em regiões pertencentes às regiões metropolitanas.

No que tange o surgimento das Regiões Metropolitanas no Brasil, destaca-se que estas foram definidas em 1973, através de legislação federal (Lei Complementar nº 14). Na época, as regiões metropolitanas possuíam o objetivo primeiro de promover um planejamento cooperado entre os diferentes municípios relacionados, porém a partir da Constituição de

1988, tornou-se responsabilidade das Unidades da Federação definirem suas respectivas regiões metropolitanas. Dentre elas, atualmente, as que mais geram empregos são as de São Paulo e Rio de Janeiro (IBGE, 2013), além de figurarem, segundo o Prospecto emitido pelas Nações Unidas (2014), como pertencentes ao grupo de megacidades. Especificamente, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) foi criada com a Lei Complementar Federal nº 20 de 1 de julho de 1974, que fundiu os Estados da Guanabara e do Rio de Janeiro. Contendo 21 municípios, possui aproximadamente 11.835.708 habitantes (Observatório das Metrôpoles, 2010), equivalendo a 74% do total da população do Estado, e com abrangência territorial de aproximadamente 12% de todo Estado do Rio de Janeiro. Segundo dados do CEPERJ (2009), predomina na RMRJ o Produto Interno Bruto (PIB) proveniente do setor de serviços e, em segundo lugar, do setor industrial. O Estado possui como capital a Cidade do Rio de Janeiro que detém 50% do PIB do Estado e 69% do PIB da RMRJ.

Por um lado, toda infraestrutura física e social encontradas nas cidades mais desenvolvidas traz diferentes benefícios para as populações, fornecendo abrigo, emprego, serviços, desenvolvimento tecnológico, educação, renda e interações sociais e culturais. Portanto, as cidades se tornaram essenciais para o estilo de vida e bem-estar dos seres humanos. Por outro lado, regiões urbanas são locais onde há grande influência dos seres humanos sobre o ambiente natural e alguns problemas, como poluição do ar, extremos térmicos, movimentos de massa e inundações devem-se, em muitos casos às profundas transformações ocorridas no espaço natural original, que comprometem em grande parte, o funcionamento e equilíbrio do sistema ambiental físico (LUCENA *et al*, 2013).

O crescimento populacional e a expansão da área urbana geram impactos ambientais que podem ser intensificados pelas constantes modificações do espaço. Por exemplo, o processo de urbanização, a partir das alterações no uso e cobertura da terra, pode modificar a partição da radiação líquida disponível à superfície, de modo que possa acontecer um aumento nos valores de temperatura do ar (GARTLAND, 2008). Esse comportamento é explicado pelo fato de materiais de construção urbanos possuírem diferentes capacidades e condutividades térmicas que facilitam ou não a condução de calor mais rapidamente que o solo e a vegetação das áreas rurais, contribuindo para um aumento no contraste de temperatura (OKE, 1982).

A geometria dos prédios e seus arranjos podem aprisionar radiação e poluentes, criando uma superfície com alta rugosidade que influencia o escoamento do ar e a dispersão; as estruturas de engenharia podem remover água da superfície e subsuperfície modificando

redes naturais de drenagem e a topografia natural, portanto alterando os regimes de escoamento e umidade (OKE, 1982). A consequência é uma mudança nas características radiativas, térmicas, aerodinâmicas e de umidade das superfícies pré-existentes, resultando em alterações no balanço natural de energia, massa e momento. Adicionalmente, a cobertura da superfície em áreas urbanas tende a mudar mais drasticamente num curto período de tempo do que em qualquer outra região devido à incessante urbanização (ZHA; GAO; NI, 2003).

Desta forma, segundo Imhoff *et al.* (2009) e Trenberth *et al.* (2007), existe um interesse e uma necessidade cada vez maior em estudar e entender as implicações da urbanização em diferentes parâmetros ambientais e em diversas áreas (tempo e clima) e escalas (local, regional e global). Com efeito, o crescimento da urbanização tem sido alvo de diversas pesquisas a respeito do impacto meteorológico e climático que este crescimento pode acarretar, pois sabe-se que mudanças no uso e cobertura da terra em áreas extensas podem resultar em alterações significativas no albedo, nos fluxos de calor latente e sensível e na turbulência da atmosfera (PIELKE; AVISSAR, 1990).

1.1 Justificativa

Atenção redobrada tem sido dispensada às grandes cidades e regiões metropolitanas, como a RMRJ, visto que seu grande porte pode desencadear uma diversidade de problemas ambientais que podem se tornar irreversíveis. Portanto, monitorar mudanças espaço – temporais em grandes zonas urbanas está se tornando cada vez mais importante a medida que a proporção de residentes nessas regiões continua aumentando (Nações Unidas, 2011). Adicionalmente, a taxa de crescimento urbano pode ser ainda mais elevada regionalmente devido à instalação de novos empreendimentos que acarretem na atração de pessoas ou populações com a intenção de trabalho como é o caso do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), um dos principais empreendimentos da história da Petrobras, que estava previsto para entrar em operação em 2014 no município de Itaboraí, no Leste Fluminense. O COMPERJ ocupará uma área de 45 km², e terá como objetivo estratégico expandir a capacidade de refino da Petrobras para atender ao crescimento da demanda de derivados no Brasil, como óleo diesel, nafta petroquímica, querosene de aviação, coque e GLP (gás de cozinha). A previsão de entrada em operação da primeira refinaria é agosto de 2016, com capacidade para refino de 165 mil barris de petróleo por dia. Prevê-se que diferentes empresas sejam atraídas e se instalem também nos municípios vizinhos e ao longo do Arco

Metropolitano, que liga Itaboraí, no leste da RMRJ, ao Porto de Itaguaí, no extremo oeste da RMRJ. Espera-se que a construção do COMPERJ aumente a pressão sobre as áreas urbanas e urbanizáveis fruto da atração de novos grupos populacionais em busca de trabalho (RIMA – COMPERJ, 2007). A eventual urbanização resultante dos processos acima descritos pode ter como impacto uma significativa deterioração ambiental.

De fato, atualmente existe uma necessidade crítica de entender as implicações da urbanização em diferentes parâmetros ambientais. Deste modo é importante monitorar e criar uma base de dados com informações a respeito do ambiente urbano que colabore para o planejamento do desenvolvimento e da gestão de risco da RMRJ, com especial enfoque em áreas onde o crescimento urbano possivelmente será mais intenso, como os municípios do entorno do COMPERJ, a saber: Itaboraí, Guapimirim, Cachoeiras de Macacu.

O aquecimento urbano e a formação do fenômeno ilha de calor é um atributo da transformação urbana que é de interesse em diferentes áreas de estudos, visto que o sinal da ilha de calor urbana reflete uma vasta gama de mudanças importantes na superfície terrestre que impactam a saúde humana, funções de ecossistemas, tempo local e até o clima (IMHOFF *et al.*, 2010). Este fenômeno pode ser entendido como uma medida da diferença da temperatura entre a área urbana e seus arredores, apontando para formação de isotermas concêntricas a núcleos mais aquecidos, nessas isotermas se identifica um gradiente térmico elevado entre o limites das áreas rurais e urbanas ou até mesmo dentro do próprio espaço urbano, formando, assim, uma aparência de uma ou várias Ilhas, sugerindo a nomenclatura Ilha de Calor Urbana (VOOGT, 2002). Estudos sobre tal fenômeno são geralmente conduzidos de duas formas: a) detecção da ilha de calor urbana através de medidas *in situ* de temperatura do ar por meio da utilização de estações meteorológicas e b) detecção da ilha de calor urbana através de medidas de temperatura de superfície do continente por meio da utilização de instrumentos de sensoriamento remoto a bordo de satélites. Streutker (2003) aponta que a vantagem da coleta de dados *in situ* é a alta resolução temporal e um longo acervo de dados, mas possui uma pobre resolução espacial. Por outro lado, o sensoriamento remoto possui uma alta resolução e cobertura espacial, mas uma pequena resolução temporal e um pequeno banco de dados quando comparado com os dados *in situ*. Imhoff *et al.* (2009) apontam a contribuição do uso do sensoriamento remoto nos estudos sobre ilhas de calor. Enquanto a temperatura de superfície do continente pode ser tanto mais elevada como mais variável espacialmente e temporalmente devido à complexidade dos tipos de superfícies presentes nos ambientes urbanos, ela é mais facilmente

relacionada com as próprias condições de superfície. Assim, Imhoff *et al.* (2009) alegaram que a utilização da temperatura de superfície consegue acompanhar bem um conjunto mais amplo de processos físicos e biofísicos relacionados a intensidade do uso e alteração do solo. Adicionalmente, o sensoriamento remoto ambiental é uma ciência que almeja a obtenção de informações sobre o sistema terra-atmosfera através da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com o fenômeno de interesse. Por isso, não há necessidade de contato físico entre o sensor e alvo (MENESES; ALMEIDA, 2012). Sobre a questão do contato físico, Jensen (2007) afirma que um cientista *in situ* pode causar alterações no fenômeno que está sendo medido. Por outro lado, o sensoriamento remoto, em seu elemento sensor, faz a coleta de informação sobre o fenômeno dentro do campo de visada instantâneo (IFOV) sem estar em contato. Trabalhos como o de Roth, Oke e Emery (1989), Gallo e Tarpley (1996), Owen, Carlson e Grillies (1998) utilizaram dados de *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) para estudos realizados no Estados Unidos.

Devida as características das medidas obtidas através do sensoriamento remoto, e pela possibilidade de se estimar a temperatura da superfície do continente com base nesses dados, e ainda pelo campo de visada suficientemente grande para a região de estudo, este trabalho optou pelo uso de informações provenientes de sensores a bordo de satélites, nomeadamente o Landsat que possui uma base de dados extensa, totalizando mais de 30 anos de dados.

1.2 Objetivos e Contribuições

Este trabalho se insere no âmbito do termo de cooperação nº 14494 celebrado em 26/07/2011 entre a UFRJ e a Petrobras, nomeadamente o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), cujo edital número 118 UFRJ/PR-2 objetivava apoiar o desenvolvimento de dissertações de mestrado relacionadas à capacitação na cadeia do conhecimento de petróleo, gás e energia e seus impactos econômicos, sociais e ambientais.

Trabalhos anteriores como o do Brros *et al.*, 2013 utilizaram dados de sensoriamento remoto, nomeadamente os satélites Landsat-5, 7 e 8 para analisar o impacto do COMPERJ em seu entorno. Dados de sensoriamento remoto foram utilizados para estimar a 1) temperatura da superfície continental (TSC), 2) índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), 3) índice de área construída (IBI), permitindo observar a evolução temporal destes parâmetros

antes e depois da construção do COMPERJ. Particularmente em relação à TSC, os trabalhos acima citados não conseguiram provar estatisticamente que a TSC aumentou após a construção.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho consiste na utilização de um conjunto de dados semelhantes ao utilizado no trabalho de Barros *et al.* (2013), isto é, dados dos satélites Landsat-5, 7 e 8 para um período de aproximadamente 12 anos, para analisar a variação do campo térmico na região da construção do COMPERJ, apoiada no NDVI, IBI, na classificação de uso e cobertura da terra e na Área de Superfície Impermeável (ISA).

Desta forma, podemos destacar como principais contribuições da presente dissertação os seguintes tópicos: a) Correlacionar a TSC com o NDVI, IBI, classes de uso do solo e ISA; b) Criar mapas de uso do solo para a região do COMPERJ; c) Desenvolver uma metodologia para o cálculo do ISA e d) Analisar a variação termal. Assim, os objetivos específicos traçados podem ser divididos da seguinte forma:

- Agrupar as imagens em dois períodos com o mesmo número de anos, 2002 a 2007 e 2008 a 2013, com o intuito de representar as condições ambientais antes à construção e após a construção do COMPERJ, respectivamente, permitindo analisar a evolução temporal dos parâmetros utilizados, nomeadamente TSC, NDVI e IBI e, por conseguinte monitorar o impacto do COMPERJ;
- Criar dois mapas de uso de solo que representem a região do COMPERJ antes à construção e após a construção do COMPERJ;
- Calcular o ISA para o período anterior e posterior à construção do COMPERJ com base no NDVI;
- Calcular o ISA para o período anterior e posterior à construção do COMPERJ com base no método linear de mistura espectral;
- Comparar as duas metodologias utilizadas para o cálculo do ISA;
- Correlacionar a TSC com o NDVI, IBI, classes de uso do solo e ISA e analisar a espacialização da TSC apoiada nestes índices;

1.3 Organização da Dissertação

A estrutura adotada para apresentação desta pesquisa fundamenta-se em 7 seções.

Seção 1 - Introdução: apresenta considerações iniciais introdutórias para compreensão dos assuntos abordados ao longo do presente trabalho. Discorrendo sobre o processo de urbanização no Brasil e no mundo.

Seção 2 - Revisão bibliográfica: apresenta conceitos fundamentais sobre Ilhas de Calor, sensoriamento remoto, índices de vegetação e uso do solo, resumo de trabalhos nacionais e internacionais publicados, bem como, os objetivos traçados para este estudo e sua contribuição científica.

Seção 3 – Área de estudo: apresenta Itaboraí, com suas características geográficas, socioeconômicas, biológicas, história e juntamente, ressalta o local específico que é o alvo deste estudo. O COMPERJ é o local específico deste estudo e também pode ser encontrado neste capítulo com suas delimitações, características e conteúdos informativos a respeito da sua atual situação.

Seção 4 – Metodologia: apresenta o sistema metodológico adotado para a realização deste trabalho, como mensuração da variação termal e alteração do uso do solo na região do COMPERJ, ferramentas utilizadas, a saber: processamento e pré-processamento dos dados, mascaramento de nuvens, composições, cálculos dos índices adotados como parâmetro para a análise dos resultados, cálculo do índice M de separabilidade.

A Seção 5 – Resultados: apresentam figuras, tabelas e resultados encontrados mediante aplicação das ferramentas descritas neste trabalho.

Seção 6 – Conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A RMRJ tem sido alvo de discussões e estudos devido à sua complexidade em virtude de seu sítio, morfologia e ocupação urbana e de circulação atmosférica com aspectos singulares que merecem ser mais bem conhecidas (LUCENA et al, 2013). O fórum brasileiro de mudanças climáticas sugere que a RMRJ passe a integrar uma rede mundial de pesquisas em clima urbano.

2.1 Análises do Campo Termal

De acordo com Rizwan, Dennis e Liu (2008), as variações do campo termal são consideradas um dos maiores problemas do século XXI, sendo um resultado do processo de urbanização e industrialização da civilização. A grande quantidade de calor gerado (absorvido e lançado) pelas estruturas urbanas e o calor lançado pela movimentação urbana, conhecido como calor antropogênico, são as principais causas da geração de ilhas de calor, fruto de vários fatores, inclusive as variações termais. Este fenômeno pode ser um grande indicador da intensidade da urbanização de determinada região. Estudos acerca deste tema iniciaram-se na Europa no século XIX com o cientista inglês Luke Howard, todavia, somente em meados do século XX este fenômeno foi denominado como “ilha de calor” (LUCENA, 2013).

Devido à remoção das árvores e construção de edifícios altos, bem como a pavimentação dos solos; durante o dia, diferentes materiais feitos pelo homem, como asfalto e alguns tipos de telhados, absorvem e armazenam calor. Após o pôr do sol, estes materiais mantêm a temperatura dos sítios urbanos mais alta do que as áreas rurais. Este fenômeno é peculiar em áreas urbanas, e é caracterizado por um aumento rápido da temperatura na atmosfera urbana, um aumento da concentração dos poluentes atmosféricos e uma diminuição na umidade relativa. O comportamento térmico de uma região urbanizada é diferente do que pode ser observado em ambientes rurais. A energia radiante de um espaço urbano é resultado de uma interação da energia incidente com as mais variadas superfícies que compõem o meio urbano, alterando-se, portanto, a distribuição de temperatura local propiciando a formação da Ilha de Calor Urbana.

Rizwan *et al* (2008) subdividem as causas da ilha de calor como fatores incontroláveis e fatores controláveis. Neste último encontram-se subfatores como áreas verdes e materiais de construção, como pode ser notado na Figura 1.

Figura 1 – Fatores que contribuem para formação de Ilha de Calor.



Fonte: Adaptado de Rizwan *et al* (2008). Marcações do autor.

Segundo Voogt (2002), a ilha de calor urbana é uma medida de diferença, e não uma medida absoluta da temperatura. Assim, a ilha de calor remete-se ao padrão espacial do contorno das isotermas que formam uma ou várias “ilhas”, onde pode ser identificada um gradiente térmico elevado no limite entre as áreas rurais e urbanas, ou até mesmo dentro do próprio espaço urbano.

Corroborando com este aspecto, vários estudos sobre a variação de temperatura entre o centro e seus arredores e o clima urbano foram feitos para algumas cidades e/ou regiões brasileiras (ANDRADE *et al*, 2006; BRANDÃO, 1996; CACHO-LIMA, ANUNCIÇÃO, 2009; LOMBARDO, 1985, LORENA; MARCHIORO; HOLZ, 2013; LUCENA, 2013; MONTEIRO, MENDONÇA, 2003). Boa parte destes trabalhos analisaram a mudança no uso e cobertura do solo através da metodologia de sensoriamento remoto, série temporal de dados de estações meteorológicas, e modelagem numérica.

Como por exemplo, o trabalho de Lorena, Marchioro e Holz (2013) analisou o campo térmico da área urbana de Vitória, no estado do Espírito Santo usando imagens do Landsat-5 juntamente com documentos criados por informações do Plano Diretor da cidade e concluiu que a maior temperatura média do ar de Vitória ocorre na área classificada como “Industrial” com temperatura de 23,76°C. Enquanto a menor temperatura foi verificada na área classificada como “Área Verde”, com 20,21°C.

A temática sobre ilha de calor tem sido abordada, de modo intensivo, pelos dados de sensoriamento remoto na faixa do infravermelho. Isto pode ser visto através dos esforços da

comunidade científica no desenvolvimento de sensores termais com diferentes tipos de resoluções espaciais e espectrais (TM, ETM+ e ASTER) (CAMARGO *et al*, 2006).

A modelagem numérica é outra importante ferramenta de suporte com uma ampla área de aplicação em estudos de Ilha de Calor. A aplicação desta ferramenta pode cobrir alguns fatores como: velocidade do vento, calor antropogênico lançado e algumas propriedades radiométricas como albedo e fluxos de energia como calor latente e sensível.

Lemonsu e Masson (2004) usaram modelagem numérica e concluíram que a condução de calor em construções é o maior contribuinte na equação do balanço energético.

Embora a aplicação da modelagem numérica cubra uma vasta área, é pontuado que a confiança neste método não é completamente válida para estudos de Ilhas de Calor e climas urbanos, pois, em particular, algumas propriedades da superfície não têm sido adequadamente incorporadas aos modelos (RIZWAN, 2008).

No Quadro 1 pode ser visto diferentes estudos realizados utilizando-se modelagem numérica, sensoriamento remoto, dados de estações meteorológicas entre outros.

Quadro 1 - Diferentes abordagens para o estudo da ICU.

Área ^a	Método	Tipo	ICU (° C)
Tóquio ^a	Transecto (obtido por automóvel)	Temperatura de superfície	8,0
Tóquio ^b	Dados de satélite	Temperatura de superfície	12,0
Atlanta, EUA ^b	Modelagem	Temperatura de superfície	1,2
Atlanta, EUA ^b	Modelagem	Temperatura do ar	0,6
Seoul ^c	Estação meteorológica	Temperatura do ar.	3,4
Seoul ^a	Dados de satélite	Temperatura de superfície	8,0
Fairbanks ^d	Estação meteorológica	Temperatura do ar	1,0
Polônia ^d	Estação meteorológica	Temperatura do ar	12,0

^a A mesma área e tipos de ICU com diferentes métodos de recolhimento de dados; ^b A mesma área e métodos de recolhimento de dados com diferentes e ICU; ^c A mesma área com diferentes métodos de recolhimento de dados e ICU. ^d Diferentes áreas com mesmo método de recolhimentos de dados e mesmo tipo de ICU.

Fonte: Adaptado de Rizwan *et al* (2008).

2.2 Sensoriamento Remoto

O termo Sensoriamento Remoto surgiu a partir de um artigo não publicado da década de 1960 elaborado pelo grupo do *Office of Naval Research*. A era espacial estava sendo iniciada com o lançamento do primeiro satélite, o Sputnik pela U.R.S.S. e do *Explorer* dos E.U.A. Esta técnica, para muitos pode também ser considerada uma arte, não apenas ciência (JENSEN, 2007).

Porém algumas definições como a que segue pode ser encontrada: Sensoriamento Remoto é uma ciência que almeja a obtenção de dados através da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os objetos/fenômenos de interesse. Por isso, não há necessidade de contato físico entre o sensor e alvo (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Sobre a questão do contato físico, Jensen (2007) afirma que um cientista *in situ* pode causar alterações no fenômeno que está sendo medido, como por exemplo, alterar dados de refletância espectral, pois alteraria o dossel antes da coleta dos dados.

Os sistemas de sensoriamento remoto podem ser classificados com passivos e ativos. O sistema passivo registra a energia refletida pelo alvo, com, por exemplo, a luz azul, verde, vermelha e infravermelho próximo; e radiação infravermelha termal (energia emitida), sem que haja emissão de energia por parte do equipamento; enquanto o sistema ativo recebe dados que são respostas de sinais previamente enviados para seu alvo, como: micro-ondas, laser e acústico (JENSEN, 2007).

A radiação eletromagnética é gerada toda vez que uma carga elétrica é acelerada. E pode ser entendida como ondas que se propagam à velocidade da luz, consistindo de dois campos flutuantes (elétrico e magnético ortogonais entre si e em relação à direção de propagação). Suas características mais importantes são: o comprimento de onda e a frequência. O comprimento de onda da radiação depende da duração do tempo pelo qual a partícula carregada é acelerada. Sua frequência depende do número de acelerações por segundo. A frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda. O sol e a terra representam as fontes de energia eletromagnética registrada pelos sistemas de sensoriamento remoto passivo, pois segundo a Lei de Stefan – Boltzmann, o total de radiação emitida por um corpo negro (que possui temperatura acima de 0 K) é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta medida em Kelvin. Assim, quanto maior a temperatura, maior a quantidade de energia emitida pelo corpo. A fusão termonuclear que ocorre na superfície do

Sol, que possui uma temperatura de 6000 K, gera um espectro contínuo de energia eletromagnética que produz uma radiação que varia desde ondas muito curtas de extrema alta frequência até as ondas de muito baixa frequência, conhecidas como ondas curtas. Cada região particular do espectro identificado por um comprimento de onda (ou frequência) final e inicial é chamado de banda, faixa, canal ou região. O Quadro 2 aponta as bandas do espectro eletromagnético emitido pelo Sol (JENSEN, 2009)

Quadro 2 - Classificação do espectro eletromagnético de acordo com o comprimento de onda e frequência.

Tipo de Onda	Comprimento de Onda (m)	Frequência (Hz)	Comparação do comprimento de onda
Rádio	$10^3 - 10^{-1}$	$10^6 - 10^{10}$	Prédios
Microondas	$10^{-1} - 10^{-3}$	$10^{10} - 10^{12}$	Formiga
Infravermelho	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{12} - 10^{15}$	Buraco de agulha
Visível	$10^{-6} - 10^{-7}$	$10^{15} - 10^{16}$	Protozoários
Ultravioleta	$10^{-7} - 10^{-8}$	$10^{16} - 10^{17}$	Proteína
Raios X	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^{17} - 10^{21}$	Átomo
Raios Gama	$10^{-11} - 10^{-15}$	$10^{21} - 10^{24}$	Núcleo atômico

Fonte: Jensen, 2007.

A produção de ondas longas por parte da Terra também é captada pelos sensores de sensoriamento remoto. O espectro termal refere-se ao conjunto de energias eletromagnéticas emitidas pelos objetos terrestres e encontram-se no intervalo espectrais correspondentes ao infravermelho médio e distante.

Como esta energia não pode ser captada pelo nosso sentido da visão (vide Quadro 2), os engenheiros criaram detectores que são sensíveis a este tipo de radiação. Os sistemas de infravermelho termal de sensoriamento remoto podem ser usados para a determinação de: 1) o tipo de material com base nas suas características de emissão térmica e 2) mudanças significativas nas características termais em um fenômeno ao longo do tempo.

O infravermelho termal consiste em uma subdivisão da banda do infravermelho. Este, o infravermelho, é uma porção do espectro eletromagnético limitada pelo visível do lado de

menor comprimento de onda e pelas micro-ondas no lado de maior comprimento de onda. Esta região pode ser subdividida da seguinte maneira: 1) infravermelho próximo que se encontra na faixa de 0,7 – 1,2 μ m; 2) infravermelho médio que se encontra na faixa de 1,2 – 2,5 μ m; 3) o infravermelho de ondas curtas que está em 2,5 – 5 μ m e 4) infravermelho longo entre 5 – 14 μ m. Dentro desta faixa encontra-se o infravermelho termal.

Os sistemas de sensoriamento de remoto possuem sensores que atuam em bandas distintas. Os canais são dispostos de maneira que possam atuar na faixa do termal (capta radiação emitida pela terra), na faixa do espectro solar e outros no infravermelho próximo e médio que captam tanto radiação solar e terrestre (CHANDER *et al.*, 2009). Com isso obtém-se informações sobre as propriedades da superfície investigada, como: albedo, emissividade, temperatura etc.

Com isso, muitos trabalhos nacionais e internacionais têm abordado a temática sobre Ilha de Calor Urbano e Alteração do uso do solo através de dados de sensores a bordo de satélites. O trabalho de Rao (1972) foi o pioneiro no tema Ilha de Calor Urbano utilizando sensores. Este autor mapeou a temperatura de superfície das cidades ao longo da costa do médio Atlântico a partir da banda termal (10.2-12.5 μ m) do satélite TIROS 1 (Television IR Operational Satellite).

A partir disto foram publicados muitos outros trabalhos como pode ser notado no Quadro 3.

Quadro 3 - Trabalhos sobre sensoriamento remoto publicados com destaques para o uso da plataforma Landsat.

Autor (es)	Plataforma: sensor	Aplicação
Balling e Brazel (1988)	NOAA: AVHRR	Relação entre padrões da temperatura da superfície e uso da terra.
Dousset (1989)	NOAA: AVHRR	Classificação multiespectral do uso do solo e sua relação com a temperatura
Henry et al (1989)	Satélite HCMM	Análise de ilha de calor urbana usando sensoriamento remoto, observação de superfície e modelagem.
Carnahan e Larson (1990)	Landsat: TM	Diferença das taxas de aquecimento e resfriamento entre a zona rural e urbana
Caselles <i>et al.</i> (1991)	NOAA: AVHRR	Análise da ilha de calor com base em dados de superfície e satélite
Dousset (1991)	NOAA: AVHRR e SPOT	Classificação multiespectral do uso do solo e sua relação com a temperatura da superfície
Johnson <i>et al.</i> (1991)	Termômetro infravermelho (IRT)	Modelo de ilha de calor de superfície.
Eliasson (1992)	Aeronave AGEMA	Correlação entre a temperatura de superfície e o fator de visão do céu (Sky-view-factor)
Kim (1992)	Landsat TM	Modelo de balanço de energia para uma área urbana.
Stoll e Brazel (1992)	Aeronave e termômetro infravermelho (IRT)	Avaliação detalhada das relações da temperatura de superfície e do ar para diferentes tipos de superfície urbana.
Gallo <i>et al.</i> (1993a, 1993b)	NOAA: AVHRR	Uso do NDVI para avaliar a ilha de calor urbana.
Lee (1993)	NOAA: AVHRR	Avaliação da ilha de calor a partir da temperatura de superfície e do ar para cidades coreanas.
Johnson <i>et al.</i> (1994)	Satélite: TOVS	Estimativa da temperatura do ar em zona rural através de dados de sondagem de satélites pela derivação das taxas de temperatura do ar urbano.

Quattrochi e Ridd (1994)	Aeronave com scanner multispectral no infravermelho termal (TIMS)	Resposta térmica diurna e noturna para diferentes superfícies urbanas
Shoshany <i>et al.</i> (1994)	Aeronave Scanner termal	Extração de temperatura da parte superior de telhado para a análise da ilha de calor urbana.
Aniello <i>et al.</i> (1995)	Landsat TM, MSS	Distribuição especial de temperaturas de superfícies urbanas e das árvores.
Epperson <i>et al.</i> (1995)	NOAA: AVHRR, DMSP	Estimativa da temperatura do ar urbana utilizando dados de NDVI e luz noturna.
Gallo <i>et al.</i> (1995)	NOAA: AVHRR	Revisão dos procedimentos e prospecções futuras para avaliação por satélite dos efeitos urbanos na ilha de calor.
Gallo e Tarpley (1996)	NOAA: AVHRR	Uso do NDVI para avaliar ilha de calor urbana.
Iino e Hoyano (1996)	Aeronave com scanner multispectral (MSS)	Modelagem para o balanço de energia urbana usando o sensoriamento remoto e o SIG.
Lougeay <i>et al.</i> (1996)	Landsat TM	Padrões de temperatura associados ao uso da terra e a alteração no uso da terra.
Nichol (1996)	Landsat TM	Padrão especial da temperatura da superfície com relação à morfologia urbana.
Ben-Dor e Saaroni (1997)	Aeronave com scanner infravermelho termal (TIRS)	A ilha de calor analisada a partir da temperatura do ar e da superfície.
Lo <i>et al.</i> (1997)	Aeronave ATLAS	Relação de dados termais para cobertura do solo e o NDVI
Voogt e Oke (1997)	Aeronave AGEMA	
Gallo e Owen (1998)	NOAA: AVHRR, DSMP/ Landsat MSS	Identificação multiespectral de áreas urbanas para estimativas de ilha de calor.
Nichol (1998)	Landsat TM	Incorporação das temperaturas de superfície da parede com o sensoriamento remoto para criar a representação tridimensional de temperaturas urbanas.
Owen <i>et al.</i> (1998)	NOAA: AVHRR	Utilização de dados termais e de NDVI, juntamente com o modelo SVAT para investigar interações climáticas associadas com a urbanização.
Voogt e Oke (1998)	Aeronave AGEMA	Anisotropia térmica de superfícies urbanas.
Carlson e Sanchez-Azofeifa (1999)	NOAA: AVHRR	Mudança microclimática associada com a urbanização.
Hafner e Kidder (1999)	NOAA: AVHRR	Padrão da ilha de calor urbana e da ilha de calor da superfície urbana associada com a inércia térmica e a disponibilidade de umidade.
Hoyano <i>et al.</i> (1999)	Scanner termal em superfície	Cálculo de fluxo de calor sensível dos prédios.
Parlow (1999)	Landsat TM	Modelagem do balanço de energia para áreas urbanas utilizando dados multiespectrais.
Wald e Baleynaud (1999)	Landsat TM	Avaliação da qualidade do ar utilizando sensoriamento remoto termal.
Quattrochi <i>et al.</i> (2000)	Aeronave ATLAS	Uso do sensoriamento termal em uma estrutura “SIG” para avaliar a ilha de calor urbana.
Soux <i>et al.</i> , 2000	Tower/IRT	Uso de sensor tridimensional para modelar a superfície urbana
Voogt (2000)	Aeronave AGEMA	Representatividade da temperatura da superfície urbana para diferentes escalas.
Voogt e Grimmond (2000)	Ac: AGEMA	Modelagem do fluxo de calor sensível e avaliação da rugosidade térmica da superfície de uma área urbana usando o sensoriamento remoto termal e as observações em superfície.
Voogt e Soux (2000)	Tower/Thermal Scanner, termômetro de infravermelho (IRT)	Escala local de anisotropia termal urbana.
Ghedira et al (2012)	MODIS, ASTER E LANDSAT SENSER	Conversão do fenômeno de ilha de calor em áreas desérticas em Abu Dhabi.
Ho et al (2014)	Landsat TM/ETM	Mapeamento da temperatura do ar em regiões urbanas no verão em Vancouver, Canadá.
Liang et al (2015)	Landsat TM	Análise temporal sobre alteração do uso do solo em Pequim, China.

Fonte: adaptada de Voogt; Oke, 2003, grifo nosso.

Neste quadro encontram-se em negrito os trabalhos publicados utilizando dados do sensor TM a bordo de alguns satélites Landsat, sendo estes, publicados a partir 1990, num

total de 7 artigos até o ano de 2002/2003. Todos voltados para estudo do uso do solo, e sua correlação com formação de ilha de calor e anomalias de temperatura, balanço energético etc.

Dentre as pesquisas internacionais pode-se destacar:

- Voogt e Oke (2003): revisaram o uso do sensoriamento remoto em seus estudos de clima urbano, focando primariamente na formação de Ilhas de Calor e seus efeitos e crescimento. Analisando dados da publicação de Roth *et al* (1989), que questionou algumas metodologias aplicadas ao sensoriamento remoto, notaram um lento progresso nos estudos nessa temática
- Imhoff *et al* (2009): utilizaram dados do Landsat/TM e do MODIS durante três ciclos anuais (2003 – 2005) para fazerem a análise espacial da Ilha de Calor Urbana e suas amplitudes de temperaturas em 38 das mais populosas cidades americanas com climas diferentes e urbanização intensa, apoiando-se em índices como ISA e NDVI. Os autores concluíram que o ISA é um bom indicador de TSC para diversos tipos de biomas, exceto para áreas desérticas, explicando até 70% do total da variância na LST. Notou-se que esta relação é válida para áreas urbanas de pequeno, médio e grande porte e que para a maioria dos biomas, a TSC é linearmente proporcional ao ISA.
- Streutker (2003): analisou o crescimento da TSC em Houston (Texas) comparando dois locais de formação de Ilha de Calor durante 12 anos. Foram utilizados dados do sensor AVHRR a bordo de satélites em órbita polar do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Tendo posse de 82 cenas do período noturno captadas entre os anos de 1985 a 1987 e 125 cenas noturnas obtidas entre 1999 e 2001, as análises revelaram que houve uma correlação positiva entre o crescimento populacional identificado no Texas com o aumento da Ilha de Calor Urbana local e a alteração de sua assinatura. Notou-se que não apenas houve um aumento na magnitude de temperatura (em torno de 0,82 K) mas também na extensão da Ilha de Calor, sendo este identificado através de métodos de determinação de área, como o método Gaussiano.
- Weng e Quattrochi (2006): Introduzem o uso do sensoriamento remoto para estudos de parâmetros biofísicos de uma região, provendo uma excelente descrição dos parâmetros dos materiais utilizados em construções e a composição da camada urbana. Este artigo revisa as bibliografias que abordam este tema, como: Steininger, 1996; Nichol, 1996; Balling e Brazell, 1988; Gallo e Owen, 1998; Gallo *et al.*, 1993; Kidder e Wu, 1997; Roth *et al.*, 1989; Streutker, 2003; Voke e Oke, 2003; Lo *et al.*, 1997;

Byrne, 1979; Quattrochi *et al.*, 2000; Camahan e Larson, 1990; Weng *et al.*, 2004, entre outros. Como pode ser observado, estes trabalhos constam na Tabela 3 e formam um excelente acervo sobre o tema.

Dentre os trabalhos nacionais, pode-se citar o Bias *et al.* (2003) que utilizou uma cena em 10 de junho de 2001 do Landsat-5 para mapear o comportamento de temperatura e mais uma cena em 10 de dezembro de 2001 do Ikonos para entender os efeitos da Ilha de Calor dentro das cidades. Este trabalho teve com área de estudo a capital federal que possui um crescimento populacional acima do esperado pelo planejamento da cidade, ocasionando a formação de ilha de calor. Pois os diversos tipos de materiais utilizados nas construções possuem padrões distintos de reflectividade. O Quadro 4 possui informações retiradas do trabalho do Bias et al (2003) e mostra alguns exemplos de albedo extraídos do site da *Environmental Protection Agency*.

Quadro 4 - Valores de albedo para materiais utilizados em meio urbano.

MATERIAL	REFLECTÂNCIA	MATERIAL	REFLECTÂNCIA
Asfalto	0,05 - 0,20	Pintura colorida	0,15 - 0,35
		Pintura branca	0,50 - 0,90
Telhado Rugoso	0,10 - 0,15	Telhado vermelho/marrom	0,10 - 0,35
Árvores	0,14- 0,18	Gramma	0,25 - 0,30
Concreto	0,10- 0,35	Telhado de alta reflectividade	0,60 - 0,70

Fonte: Adaptado de Bias *et a.* (2003).

2.3 Plataforma Landsat

A habilidade de detectar e quantificar mudanças no desenvolvimento da terra e seu balanço de energia depende dos sensores que estão a bordo dos satélites (CHANDER, 2003). Dentre os satélites que orbitam o Planeta Terra, está o Landsat (*Land Remote Sensing Sattelite*). O programa Landsat foi desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics e Space Administration*) com o intuito de adquirir informações espaciais, espectrais e temporais dos recursos terrestres em escala global. O primeiro representante deste programa foi lançado em

1972, o Landsat-1, três anos após este lançamento, o Landsat-2 foi colocado em órbita, sendo sucedido pelo Landsat-3, Landsat-4 e pelo Landsat-5 em 1978, 1982 e 1984, respectivamente. Sendo que o Landsat-5 ficou em operação até final de 2013. Nove anos mais tarde, em 1993, o Landsat-6 foi lançado, porém não atingiu a órbita devido falhas no lançamento e após este vieram o Landsat-7 (1999) e o mais atual Landsat-8 (2013). A linha do tempo das plataformas Landsat é exibida na Figura 2.

Figura 2 - Linha do tempo das plataformas Landsat.



Fonte: USGS, 2015.

Atuante em órbita polar heliossícrona, as plataformas 1, 2 e 3 orbita à uma altitude de 919 Km e, as demais plataformas, estão a uma altitude de 705 Km, com inclinação orbital de 98°, área imageada de 185 Km e resolução temporal de 16 dias. Nestas plataformas, quatro sensores atuaram nas suas operações, a saber: *Multispectral Scanner System* (MSS), o *Retum Bean Vidicom* (RBV), o *Thematic Mapper* (TM), o *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+), o *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). O MSS e o RBV operaram nas plataformas Landsat-1, 2 e 3; o MSS e o TM nos Landsat-4 e 5; e o ETM+ no 6 e no 7, e por fim, no Landsat-8, os sensores OLI e TIRS. As principais diferenças desses sensores dão-se pelas características de resolução espectral e espacial, e pela sensibilidade radiométricas nas bandas. As principais características e diferenças das plataformas Landsat são resumidas no Quadro 5.

Os dados dos satélites da série Landsat são disponibilizados gratuitamente e virtualmente aos usuários nacionais através do INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais) bem como através do USGS (*United States Geological Survey*) que se trata de um

Instituto de Ciência dedicado ao estudo aprofundado dos recursos naturais, desastres ambientais e prover informação científica que fomentam pesquisas a respeito de geografia, geologia, biologia, geomática, etc.

Quadro 5 - Características e condições das plataformas do programa Landsat.

SATÉLITE	LANDSAT 1	LANDSAT 2	LANDSAT 3	LANDSAT 4	LANDSAT 5	LANDSAT 6	LANDSAT 7	LANDSAT 8
LANÇAMENTO	23/07/1972	22/01/1975	05/03/1978	16/07/1982	01/03/1984	05/10/1993	15/04/1999	11/03/2013
ÓRBITA	POLAR HELIOSSÍNCRONA							
SITUAÇÃO ATUAL	Inativo 06/01/1978	Inativo 25/02/1982	Inativo 31/03/1983	Inativo 1993	Ativo	Inativo 05/10/1993	Ativo	Ativo
ALTITUDE	917 KM	917 KM	917 KM	705 KM	705 KM	705 KM	705 KM	705 KM
INCLINAÇÃO	99,2°	99,2°	99,2°	98,2°	98,2°	98,2°	98,2°	98,2°
TEMPO DE DURAÇÃO EM ÓRBITA	103,3 min	103,3 min	103,3 min	99 min	99 min	98,9 min	98,9 min	98,9 min
HORÁRIO DE PASAGEM	9:30 am	9:30 am	9:30 am	9:45 am	9:45 am	10:00 am	10:00 am	10:00am
PERÍODO DE REVISITA	18 dias	18 dias	18 dias	16 dias	16 dias	16 dias	16 dias	16 dias
TEMPO DE VIDA PROJETADO	1 ano	1 ano	1 ano	3 anos	3 anos	s.d.	5 anos	n.d.
SENSORES	RBV/MSS	RBV/MSS	RBV/MSS	MSS/TM	MSS/TM	ETM	ETM+	OLI e TIRS

Fonte: Lucena, 2012.

Para as finalidades deste trabalho, os sensores TM e ETM+ apresentam um canal cobrindo a faixa espectral do infravermelho termal, canal 6, no intervalo de 10,40 μm - 12,50 μm , que se destina, portanto, ao mapeamento da temperatura dos alvos presentes na imagem, somado à resolução espacial de 120 m para o Landsat-5 e de 60 m para o Landsat-7. No Landsat-8, a faixa termal encontra-se nas bandas 10 e 11 do sensor TIRS com 100m de resolução espacial. Essas características tornam-se fundamentais para os estudos de variação do campo termal (BARROS *et al*, 2013) e desta forma os referidos sensores serão utilizados no presente estudo.

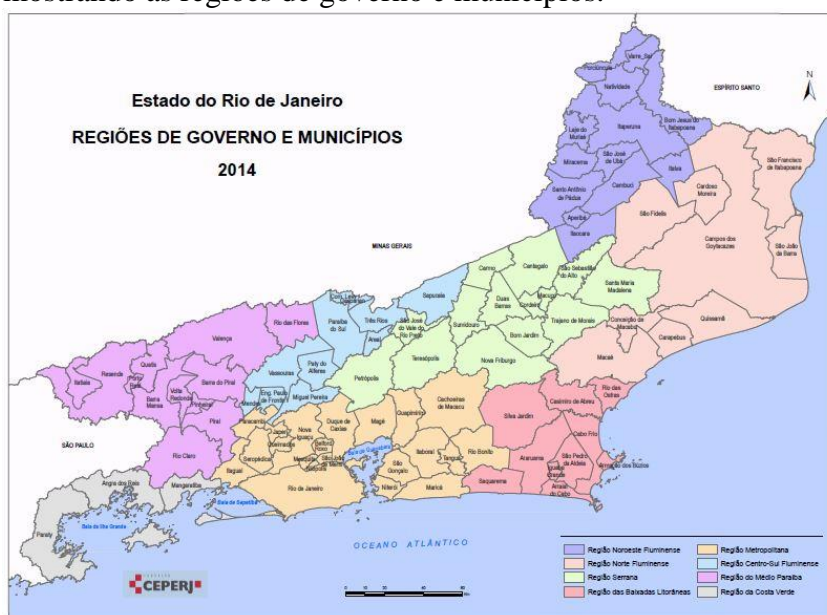
3 ÁREA DE ESTUDO

Localizado em um município pertencente a RMRJ, nesta seção detalha-se aspectos relevantes sobre a área de estudo.

3.1 Visão Geral

O observatório das Metrôpoles da UFRJ, em seu relatório sobre o Rio de Janeiro informou que a RMRJ foi criada a partir da fusão do Estado do Rio de Janeiro e do Estado da Guanabara, ambos antes conhecidos como região do Grande Rio no ano de 1974 sob a lei complementar nº 20 - "Lei da Fusão", que incorporou todos os dispositivos que estavam presentes na lei nº 14 que, anteriormente, havia regulamentado as outras regiões metropolitanas. A Figura 3 exibe a localização da RMRJ dentro do Estado do Rio de Janeiro.

Figura 3 - Localização da RMRJ dentro do Estado do Rio de Janeiro e sua divisão política mostrando as regiões de governo e municípios.

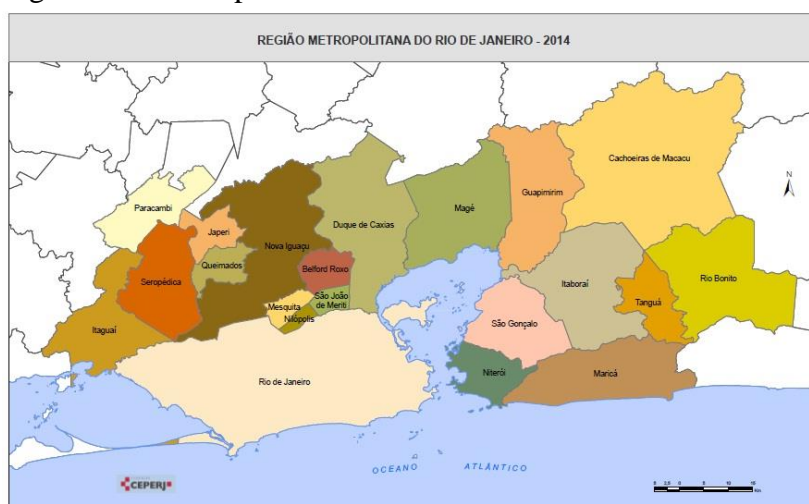


Fonte: CEPERJ, 2015.

Inicialmente, quando a RMRJ foi criada, possuía 14 municípios, num total de 6.464 km², eram estes: Duque de Caxias, Itaboraí, Itaguaí, Magé, Mangaratiba, Maricá, Nilópolis, Nova Iguaçu. A partir de 1990, a RMRJ sofreu um esvaziamento político-institucional, com a saída de alguns municípios integrantes da sua formação original, a saber: Petrópolis, Mangaratiba, Itaguaí e Maricá; sendo estes três últimos ainda presentes em diversos estudos

devido suas fortes relações com a dinâmica metropolitana. Porém, com a emancipação de 7 distritos (Belford Roxo, Guapimirim, Queimados, Tanguá, Seropédica e Mesquita), a composição original da RMRJ ficou composta pelos seguintes municípios: Rio de Janeiro, Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Japeri, Magé, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Queimados, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica, Mesquita, Maricá, Itaguaí e Tanguá. Em 2013, com a aprovação da lei complementar 158, os municípios de Rio Bonito e Cachoeiras de Macacu foram incorporados à RMRJ devido à localização do COMPERJ que está sediada em Itaboraí, resultando num total de 21 municípios, os quais podem ser observados na Figura 4.

Figura 4 – Municípios da RMRJ.



Fonte: CEPERJ, 2015.

Além dos municípios supracitados, a RMRJ também pode ser analisada sob seus aspectos sociais, conforme pode ser notado através da regionalização feita por Souza (2007) que aponta quatro grandes tipos de espaços sociais, a saber:

- O núcleo metropolitano que compreende a área central, a zona sul da cidade do Rio de Janeiro e parte da cidade de Niterói;
- A periferia (ou subúrbio), espaço este dominado por loteamentos irregulares, que abrange parte da cidade do Rio de Janeiro, a Baixada Fluminense e o eixo conturbado Niterói-Tanguá;
- O espaço atraído pela auto-segregação metropolitana, Barra da Tijuca, Jacarepaguá e Recreio dos Bandeirantes, a nova zona sul;

- A franja rural-urbana (ou espaço periurbano) - uma faixa de transição entre o uso da terra tipicamente rural e o urbano, mas que se insere cada vez mais forte dentro de uma lógica urbana, isto é, a especulação imobiliária, as residências de fim de semana, atividades de lazer, algumas favelas, entre outras configurações, localizadas principalmente no extremo oeste da cidade do Rio de Janeiro e nas cidades de Itaguaí, Paracambi, Japeri, Itaboraí e Tanguá.

Nesta região da periferia da RMRJ está abrigada uma expressiva rodovia e um grande empreendimento a saber: o arco metropolitano e o COMPERJ. O arco metropolitano - oficialmente nomeado de Rodovia Raphael de Almeida Magalhães - é uma autoestrada, inaugurada em junho de 2014, que liga o Porto de Itaguaí ao município de Itaboraí. Foi construída com o objetivo de facilitar o trânsito de cargas entre as empresas localizadas nesta região e provenientes de outros estados como Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo. A rodovia subdivide-se em quatro trechos: Itaguaí - BR 040, BR 040 (Washington Luís) - BR 116 (Magé), BR 493/Manilha - Magé e BR 101 - BR 116 (Rio-Teresópolis) (RIMA, 2007; MELLO, 2010). Passando, portanto pelos seguintes municípios: Itaboraí, Guapimirim, Magé, Duque de Caxias, Nova Iguaçu, Japeri, Seropédica e Itaguaí.

Segundo o Relatório de Impacto Ambiental do Arco Metropolitano (RIMA – Arco Metropolitano, 2007) esta obra desvia o tráfego de veículos comerciais de longa distância, aliviando os principais corredores metropolitanos, bem como a Avenida Brasil, Ponte Rio Niterói e a BR 101 que liga Manilha a Ponte. Isso amplia a acessibilidade ao porto de Itaguaí e Rio de Janeiro, conseqüente ao COMPERJ que se localiza na extremidade do segmento A do Arco. A Figura 5 mostra o traçado do Arco Metropolitano e seus diferentes segmentos.

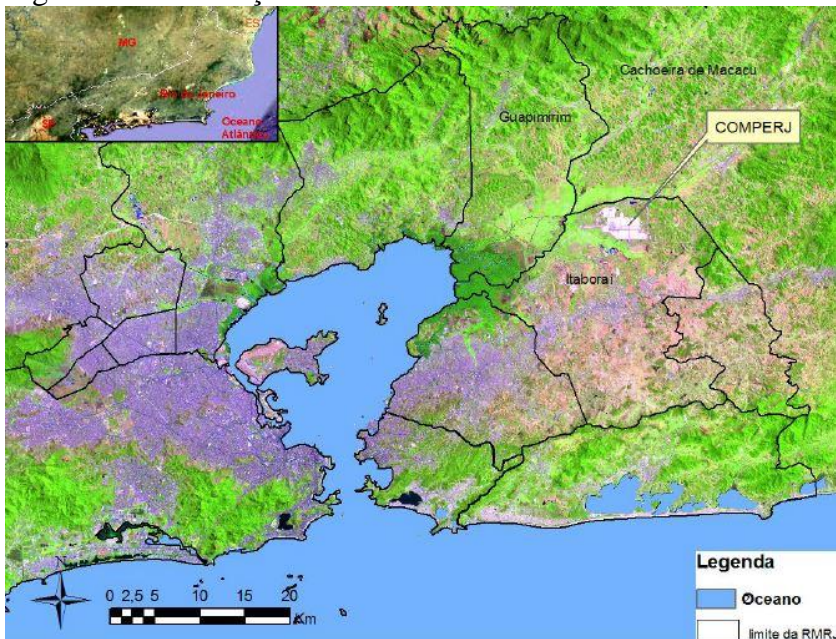
Figura 5 - Traçado do Arco Metropolitano e seus segmentos.



Fonte: RIMA do Arco Metropolitano (2007).

O COMPERJ, que ainda se encontra em processo de construção, com alguns atrasos devido a diversas razões, está localizado no município de Itaboraí, no leste fluminense, como pode ser observado na Figura 6. Esta figura foi confeccionada com base em dados do Landsat-5.

Figura 6 - Localização do COMPERJ na RMRJ.



Fonte: Barros, 2013.

Esse grande empreendimento fez com que o município passasse por um processo de transformação territorial e econômica como pode ser confirmado em seu RIMA. O estado do Rio de Janeiro tem hoje a possibilidade de reverter um processo de esvaziamento econômico que começou com a mudança da capital federal para Brasília, acentuou-se na fusão com o Estado da Guanabara e aprofundou-se com a fuga de investimentos, aumento da criminalidade e perdas ambientais no interior. Este empreendimento pode dar oportunidade de crescimento econômico de forma positiva para o estado (RIMA-COMPERJ, 2007).

Segundo este mesmo documento, este é o maior investimento individual da história da Petrobras, com um investimento de R\$ 15 bilhões e estava previsto, a priori, para iniciar sua operação em 2012. Incluindo-se também, no PAC (Programa de aceleração do crescimento), programa proposto pelo governo federal e lançado no ano de 2006. Estima-se que este empreendimento gerará em torno de 200 mil empregos direto, indiretos e efeito de renda em âmbito nacional, e estimulará a instalação de outras empresas (e/ou indústria de bens de consumo) na região de influência do polo.

O complexo foi criado com o objetivo de refinar em torno de 150 mil barris diários de óleo pesado trazidos do Campo de Marlim, na Bacia de Campos, com a utilização de uma nova tecnologia, jamais usada anteriormente que, conseqüentemente, poderá ser uma alternativa competitiva para promover o crescimento da indústria petroquímica no país. Ressaltando que o Brasil exporta justamente este tipo de óleo. O RIMA do COMPERJ (2007) aponta as razões pelas quais o município de Itaboraí foi eleito para abrigar esta obra, a saber:

- Proximidade com a Bacia de Campos, de onde vem a matéria-prima;
- Fácil acesso ao maior mercado consumidor de produtos da segunda geração, formada por São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro;
- Disponibilidade de infraestrutura adequada por possuir terminais portuários, malhas rodoviárias e ferroviárias.
- Proximidade a diversas universidades, incluindo a cidade universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro onde está localizado o CENPES (Centro de Pesquisa Leopoldo Miguez de Mello) cujo um dos seus maiores papéis é o aprimoramento de tecnologias empregadas no empreendimento.

A Figura 7 mostra uma foto que retrata o atual estágio das obras de construção do COMPERJ.

Figura 7 - Obras do COMPERJ em 2014.



Fonte: Site da Petrobras (2015).

Embora as previsões fossem que a obra finalizasse em 2013, os atrasos fizeram com que houvesse uma postergação de tempo indeterminado desta conclusão, conforme pode ser conferido na página da Petrobras (2015) que mostra que o andamento das obras foi para 82% em fevereiro de 2015.

O espaço destinado ao Complexo é de 45 km², com área industrial ocupando 26% da área total. Este terreno é constituído de pastos e culturas agrícolas enfraquecidas e mal conduzidas. Sua vegetação apresenta fragmentos florestais e sinais claros de erosão. Os rios estão em grau avançado de assoreamento e as matas ciliares estão degradadas. Encontra-se mais precisamente no distrito de Porto das Caixas, no município de Itaboraí que, por sua vez, localiza-se na região limítrofe com os municípios de Cachoeiras de Macacu e Guapimirim.

Os portos que estão próximos ao COMPERJ são: Porto de Itaguaí e do Rio de Janeiro. Os terminais próximos são: Angra dos Reis, Ilhas d'água e Redonda, Refinaria de Duque de Caxias, sendo também amparado por rodovias e refinarias das plantas petroquímicas do Rio Polímeros e da Suzano, servindo de excelente canal de escoamento dos produtos (RIMA – COMPERJ, 2007). A Figura 8 mostra a região ocupada pela construção do COMPERJ visualizada como uma mancha mais clara e foi confeccionada a partir de imagens Landsat-8, de 02/08/2013, da órbita-ponto 217-76, com região extraída através de ferramenta *zoom*, após composição RGB das bandas 7, 5 e 3 no *software* ENVI 4.7. Nitidamente, o local da construção se diferencia do seu arredor que apresenta vegetação preservada.

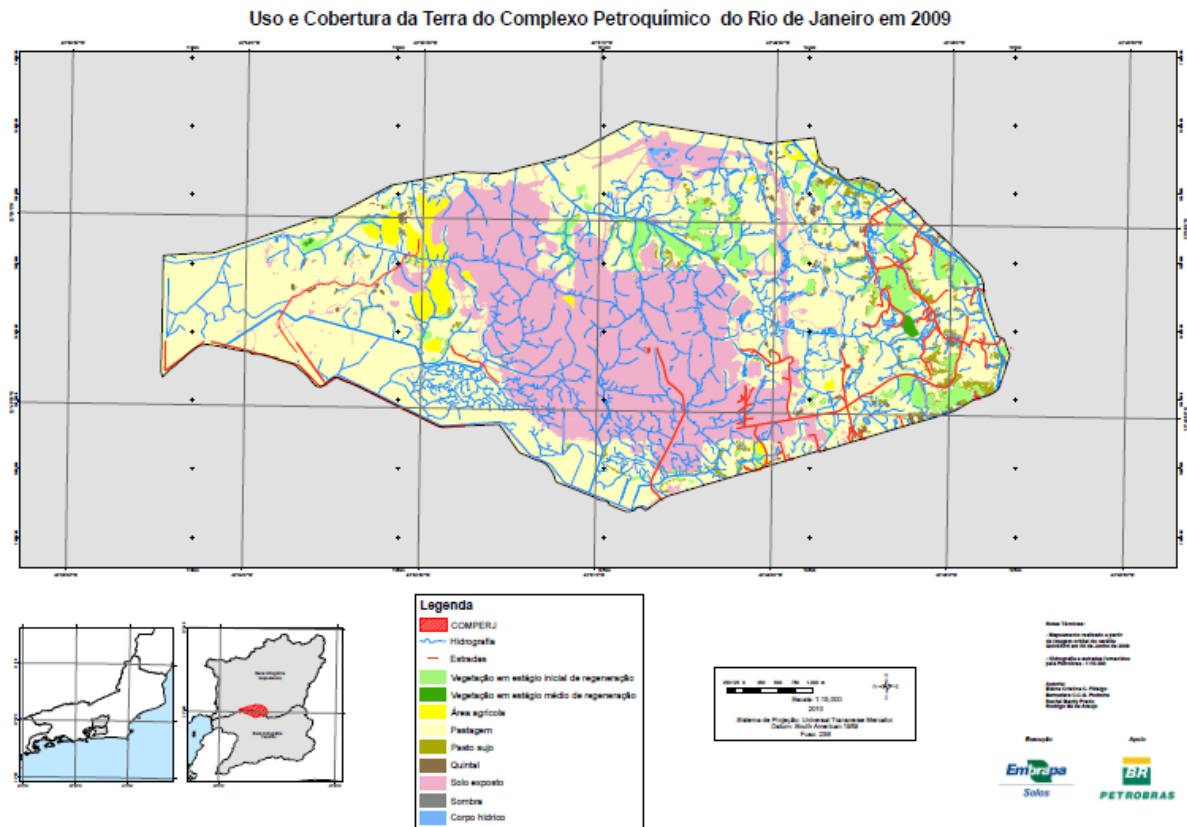
Figura 8 - Imagem do Landsat-8 de 02/08/2013 em composição RGB das bandas 7, 5 e 3 representando a área do COMPERJ.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) caracterizou e mapeou o uso e cobertura da terra na região do COMPERJ utilizando métodos de classificação, classificação de mapa de uso do solo e verificação *in loco*. Foram classificadas 9 classes: pastagem, pasto sujo, vegetação em estado médio, vegetação em estado inicial, área agrícola, solo exposto, quintal, corpo hídrico e sombra, que apresentaram respectivamente, os valores de: 58,90%, 2,67%, 0,13%, 4,55% 2,51% 29,91%, 0,67%, 0,53% e 0,13%. Podendo ser verificado no mapa de uso e cobertura abaixo (Figura 9), presente no Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da EMBRAPA publicado em 2011, que há uma predominância de solo exposto e pastagem.

Figura 9: Uso e Cobertura do COMPERJ em 2009.



Fonte: EMBRAPA (2011)

3.2 Aspectos socioeconômicos

De acordo com dados fornecidos pelo IBGE, no censo realizado em 2010, a população de Itaboraí contava com 218.008 habitantes, (106.190 homens e 111.181 mulheres) com uma estimativa de aumento para 227.168 habitantes em 2014. Seu território possui 430.374 km² com 506, 55 habitantes por km². Ao todo são 69.422 domicílios ocupados e crescimento populacional de 16,33% na última década.

Sua população urbana é a grande maioria da população total, contando com 215.412 pessoas, ao passo que a população rural é de apenas 2596 pessoas. Isso faz com que um PIB de 1.702.231 reais seja gerado e distribuído da seguinte maneira: 1) valor adicionado bruto da agropecuária a preços correntes de 5.363 reais; 2) valor adicionado bruto da indústria a preços correntes de 197.780 reais; 3) valor adicionado bruto dos serviços a preços correntes de 1.400.303 reais; 3) imposto sobre produtos líquidos de subsídios a preços correntes de 98.785 reais e 5) PIB per capita de 7.555,10 reais.

O Quadro 6 elaborado pelo IBGE em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus resume estes dados.

Quadro 6 - Produto Interno Bruto de Itaboraí.

Produto Interno Bruto de Itaboraí 2012	
Valor adicionado bruto da agropecuária a preços correntes	7.642mil reais
Valor adicionado bruto da indústria a preços correntes	512.062mil reais
Valor adicionado bruto dos serviços a preços correntes	2.255.560mil reais
Impostos sobre produtos líquidos de subsídios a preços correntes	321.813mil reais
PIB a preços correntes	3.097.077mil reais
PIB per capita a preços correntes	13.912,07mil reais

Fonte: IBGE, 2012.

O Censo de 2012 ainda aponta que a população Itaboraiense conta com um total de 84 estabelecimentos de saúde, 36.776 alunos matriculados no Ensino Fundamental, 7.618 no Ensino Médio, 4.774 na pré-escola; 131 escolas de Ensino Fundamental, 29 escolas de Ensino Médio e 107 escolas de Ensino pré-escolar (INEP, 2012). De acordo com pesquisa feita pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2013), a frota veicular possui 66.154 veículos ao todo. Dados referentes ao censo agropecuário realizado em 2006, podem ser observados na Quadro 7.

Quadro 7 - Destaques do censo agropecuário de 2006.

DESTAQUES DO CENSO AGROPECUÁRIO 2006	TOTAL
Propriedade individual	236
Cooperativas	3
Sociedade anônima ou por cota de responsabilidade limitada	11
Lavouras permanente	160
Lavouras temporárias	92
Pastagens naturais	148
Matas e/ou florestas - naturais destinadas à preservação permanente ou reserva legal	17

Matas e/ou florestas - naturais (exclusive área de preservação permanente e as em sistemas agroflorestais)	34
Área cultivada com espécies florestais também usada para lavouras e pastejo por animais	6
Terras degradadas (erodidas, desertificadas, salinizadas, etc.)	1
Terras inaproveitáveis para agricultura ou pecuária (pântanos, areais, pedreiras)	15
Cultivo convencional (aração mais gradagem) ou gradagem profunda	49
Cultivo mínimo (só gradagem)	39
Plantio direto na palha	1
Número de estabelecimentos agropecuários com tratores	65

Fonte: IBGE,2006.

Era previsto que o COMPERJ mobilizasse aproximadamente 22.000 trabalhadores no período de pico das obras. Embora houvesse uma prioridade para contratação de pessoas e empresa próprias do município e da região de influência direta e indireta, este empreendimento aumentaria a pressão sobre as áreas urbanas e urbanizáveis, devido à busca por emprego por parte de novos grupos populacionais. Também era previsto que o impacto sobre o uso do solo e sobre a infraestrutura da região acontecesse caso não houvesse medidas governamentais adequadas para absorver a mão de obra, ampliar a infraestrutura e o controle do uso do solo (RIMA – COMPERJ, 2007).

De fato, podem ser encontradas reportagens publicadas nos anos de 2013, 2014, 2015 e 2016 que retratam a situação atual do município de Itaboraí, como por exemplo: O site O Fluminense alega que comerciantes e empresários da cidade amargam prejuízos gerados pelas recentes demissões e diminuição de investimentos no Complexo (O FLUMINENSE, 2015).

O site da Rádio Globo publicou, em 2015, matéria mostrando casos de pessoas que foram para Itaboraí com esperança de atuar no COMPERJ e acabaram exercendo outras funções: “José Roberto, por exemplo, se mudou em 2008, de Nova Iguaçu, na Baixada Fluminense, para Itaboraí, com o objetivo de trabalhar no Complexo. Quando o serviço de terraplanagem acabou, ele decidiu ficar na cidade, vendendo cachorro quente. Para ele, este foi um bom negócio”.

A Revista Exame da Editora Abril publicou em 2013 uma reportagem intitulada como: “A obra mais enrolada do Brasil é o COMPERJ”. Trecho da reportagem: “Um dos problemas que mais atrasaram o empreendimento é de ordem ambiental [...] Era de esperar que um

projeto como o COMPERJ passasse por um rigoroso processo de licenciamento ambiental. Além das unidades de processamento de petróleo, o empreendimento depende de várias obras de infraestrutura, entre elas um gasoduto, um oleoduto, uma usina de geração de energia e um emissário de efluentes. [...] A estatal também arcará com 1 bilhão de reais em compensações ambientais. Entre elas a recuperação de 4 800 hectares de mata Atlântica da região, devastados no século 19, que receberão 7 milhões de árvores nativas. Outra obrigação assumida é levar o serviço de saneamento básico a 78000 pessoas em Itaboraí”.

Estas reportagens vieram ao encontro da previsão de comportamentos antissociais (comportamentos caracterizados por desprezo ou transgressão das normas da sociedade) presentes no RIMA do COMPERJ (2007), pois, segundo consta no documento, estas pessoas poderão buscar ocupações nas obras, ou tentar estabelecer formas de comércio para atender os operários. A decisão do COMPERJ de não permitir alojamentos no local visa atenuar este impacto.

Contudo, em publicação recente no site do jornal O Fluminense alega que o Centro de Referência Especializado para a população em situação de rua de Itaboraí aponta que das, aproximadamente, 200 pessoas que vivem na rua, 70% dos casos são de ex-funcionários do COMPERJ. Além disso, mais de mil famílias de funcionários demitidos serão despejadas das pensões por não terem condições de retornarem para seus estados de origem. A prefeitura de Itaboraí juntamente com o Centro especializado está conseguindo enviar em torno de 20 pessoas por mês de volta para seus estrados.

O secretário de Habitação, Wolney Trindade, diz que a situação está cada vez pior com as constantes demissões por parte das empreiteiras do COMPERJ. Segundo ele, o programa Minha Casa, Minha Vida, que está construindo moradias para três mil famílias, não será o suficiente para resolver o problema de todas as pessoas que necessitam de um lar (O FLUMINENSE, 2015).

Além dessas situações desagradáveis, o RIMA (2007) também aponta outras questões:

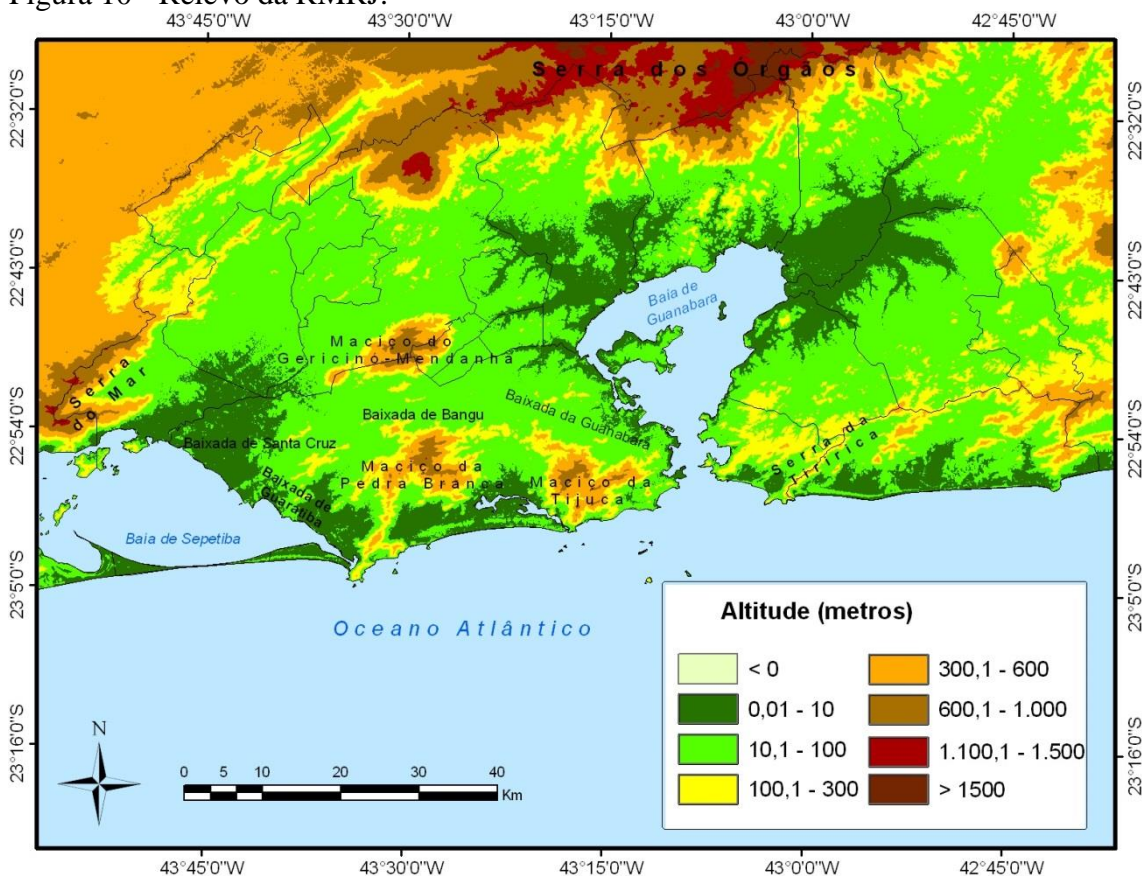
- Aumento da ocupação irregular das áreas vizinhas do COMPERJ;
- Impactos no tráfego devido à utilização de estradas municipais não pavimentadas em volta do COMPERJ;
- Dinamização temporária das atividades de comércio e de prestação de serviços pois serão beneficiadas no período de construção da obra devido ao fluxo adicional de emprego e renda.

3.3 Aspectos físicos

Para conhecimento do ambiente de estudo desta pesquisa, os seguintes temas serão abordados: clima, geologia, condições hidrológicas e ambiente biológico. Estes temas presentes no RIMA do COMPERJ (2007) servem como pauta para a Lei Municipal nº 2176/10 que aborda a política de proteção do meio ambiente de Itaboraí. Todos têm direito ao Meio Ambiente Equilibrado, bem como de titularidade difusa, indispensável e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as gerações presentes e futuras. (Art.3º da Lei Municipal nº 2176/10).

A Figura 10 exibe a fisiografia da região metropolitana do Rio de Janeiro. Nota-se as diversas feições e formas do relevo metropolitano, que incluem os maciços costeiros, as baías e as baixadas, importantes no processo de urbanização pretérita e atual, como a própria região do COMPERJ, uma das novas fronteiras de ocupação da RMRJ.

Figura 10 - Relevo da RMRJ.



Fonte: Lucena, 2012.

3.3.1 *Clima*

A Região Sudeste, devido à sua posição latitudinal, caracteriza-se por ser uma região de transição entre os climas tropicais quentes e os climas do tipo temperado das latitudes médias (DIAGNÓSTICO DEO CLIMA, 2009).

O clima da região de Itaboraí enquadra-se na categoria tropical relativamente uniforme durante todo o ano. No verão, devido ao forte calor e umidade, acontecem chuvas fortes, enquanto o inverno, mais seco, as chuvas e a média de temperatura são mais baixas (RIMA – COMPERJ, 2007).

A região também pode ser classificada climatologicamente como Tropical Quente, com temperatura média superior a 18°C e subquente, com temperaturas médias variando entre 15 e 18°C. Já segundo a classificação climática de Köppen, a região de Itaboraí apresenta um clima tropical do tipo Aw. A influência da Massa Polar Atlântica (mPa) na primavera faz com que esta estação também apresente elevadas taxas de pluviosidade e temperatura, enquanto no verão estas características sejam dadas pela presença da Massa Equatorial Continental (mEc). O clima da região também sofre influência de sua presença entre a vertente atlântica da Serra do Mar e da zona dos Maciços Costeiros (Diagnóstico do clima, 2009).

Segundo o Diagnóstico do clima (2009), o município apresenta um regime tropical, com um período seco no inverno. A maior parte das chuvas concentra-se no período de primavera-verão, entretanto não chegam a alcançar 180 mm mensais. Os totais pluviométricos tendem a aumentar em direção aos maciços costeiros, evidenciando uma nítida tendência de tropicalidade. Já nas localidades mais influenciadas pelos ventos oceânicos possuem uma distribuição mais regular de chuvas, não havendo um período seco bem definido. Este mesmo documento afirma que os maiores índices pluviométricos acontecem nos meses de novembro a março, quando a intensidade de chuvas vai diminuindo gradativamente, chegando a valores mínimos entre junho e setembro (CONCREMAT, 2007).

O RIMA do COMPERJ (2007) afirma que a associação relevo-altitude-maritimidade é responsável pelo aumento da turbulência do ar, podendo induzir a formações com consequentes chuvas nas cotas mais elevadas da serra do Mar e da Mantiqueira.

A qualidade do ar em uma determinada região é avaliada segundo as condições atmosféricas dominantes no local, a partir da interação entre os processos físicos e químicos da atmosfera. A localização rural afastada das principais rodovias proporciona níveis de concentração de poluentes atmosféricos baixos, típicos dessas áreas (RIMA – COMPERJ,

2007). Mas um estudo publicado pela ENSP (Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca – Fundação Oswaldo Cruz) em 2011 concluiu que a asma tem sido um problema de saúde pública ao longo dos anos em Itaboraí devido às suas altas taxas de internação. A região do COMPERJ foi agrupada à um cluster, chamado 1, cuja localidade obteve maior concentração de fontes de emissão de poluentes atmosféricos. Concluindo-se, portanto, que essa região necessita de atenção prioritária no desenvolvimento das ações de prevenção e controle da asma na cidade.

3.3.2 Geologia

As feições geológicas-geomorfológicas mais significativas da região são: a serra do Mar e o Gráben da Guanabara. A serra do Mar é um conjunto de escarpas (monte muito íngreme) com cerca de mil quilômetros de extensão. A serra do Mar teve sua origem em movimentos de placas que compõem a crosta terrestre, promovendo modificações no relevo da terra como, por exemplo, o Gráben da Guanabara na qual é identificada como uma depressão que engloba a Baixada Fluminense a região do entorno da Baía.

Nas Áreas de Influência Indireta e Direta há predominância de sedimentos ou depósitos que foram carregados pelos rios transitórios ou permanentes e também por chuva. Estes depósitos são compostos principalmente por areias e por outros sedimentos nas áreas mais baixas.

A Área de Influência Direta é constituída de solos minerais relativamente novos, pouco evoluídos, e que tem origem de sedimentos recentes. Nesta área, ocorrem solos constituídos de matéria orgânica e minerais, muito mal a mal drenados, pouco profundos. Já na borda debaixo da área, encontram-se solos de mangue. São terras sem aptidão agrícola, recomendadas para proteção da vegetação e dos animais. Nas áreas em torno das zonas urbanas de Itaboraí, observam-se solos com coloração amarelada, em geral profundos, bem drenados e com certo potencial erosivo.

Além das escarpas, essa região possui: morrotes, colinas e tabuleiros. Especificamente na Área de Influência Direta o relevo é bem plano, com elevados graus de alteração nos canais dos rios por conta de obras anteriores (nas décadas de 30 e 40) de dragagem e construção de canais, empreendidas pela Comissão de Saneamento da Baixada Fluminense e, posteriormente, pelo Departamento Nacional de Obras e Saneamento – DNOS. Por isso, o

nível do lençol freático foi rebaixado e apresenta indícios de forte escoamento em forma de enxurradas (RIMA – COMPERJ, 2007)

3.3.3 Hidrologia

O Município de Itaboraí possui uma rede hidrográfica extensa, que nasce nas encostas da Serra do Mar, formada pelos rios: Macacu, Casserebu, Iguá, Aldeia e Várzea. Os rios mais expressivos encontram-se nas bacias do Caceribu, com 846,7 km² e do Macacu, com 256 km², com destaque para os rios Duques, contribuinte do Caceribu e o rio Aldeia, contribuinte do rio Macacu. Quanto ao rio Macacu, é importante ressaltar que ele, o maior desta bacia hidrográfica é o principal rio da região e tem como afluentes mais expressivos os rios Guapiacú, à direita e Casseribú, Aldeia e Imbú, à esquerda (IBGE, 2010)

O COMPERJ está localizado dentro de duas bacias dos rios Macacu e Caceribu ao leste da Baía de Guanabara. O empreendimento encontra-se sob influência direta das planícies de inundação das bacias dos rios Macacu e Caceribu e indiretamente pelas bacias dos rios Guapiaçu, Guapimirim e Porto das Caixas.

No COMPERJ, as águas subterrâneas são significativas, como na formação Macacu. Dos levantamentos realizados para a confecção do RIMA (2007), somente o Aquífero Macacu encontra-se na área do projeto. O aquífero Macacu é composto por areias, argilas e matéria orgânica. Este aquífero é importante por causa de usos futuros e, assim, merece atenção especial pelos riscos de contaminação das atividades humanas.

Análises realizadas nos pontos: montante e jusante do rio Macacu, córrego “Lavapé”, não identificaram concentrações acima do limite de detecção. As concentrações de alguns metais nas amostras de água subterrânea apresentaram-se abaixo do limite. Com relação à qualidade das águas dos rios, as péssimas condições são evidentes principalmente pela deficiência de saneamento básico (RIMA – COMPERJ, 2007).

3.3.4 Ambiente biológico

O município de Itaboraí apresenta vegetação diversificada, onde pode ser encontrada:

- Grande área verde de manguezal (APA de Guapimirim);
- O maciço de Barbosão onde espécies de flora e fauna remanescentes de Mata Atlântica são abrigadas e onde localizam-se várias nascentes de rios de pequeno curso que

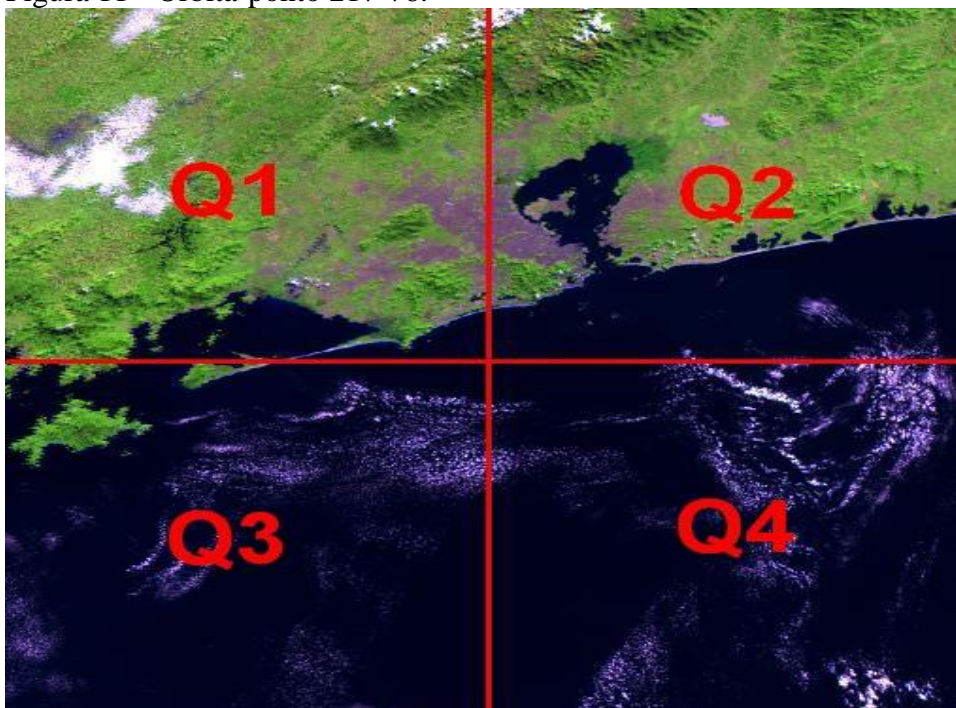
contribuem para a bacia do rio Caceribu, constituindo-se em verdadeiro patrimônio paisagístico local;

- Parque Paleontológico de São José de Itaboraí;
- O Bioma Mata Atlântica: A região dos municípios de Guapimirim, Cachoeiras de Macacu e parte dos municípios de Itaboraí e Rio Bonito teria sua cobertura vegetal original perdida em função do extrativismo (exploração) de madeiras, que remonta a pelo menos o século XVIII. A área é dominada por extensas pastagens, sendo encontradas áreas nas quais podem ser encontrados fragmentos de vegetação sob a forma de arbustos ou árvores.

4 METODOLOGIA

Para analisar a variação do campo térmico na região da construção do COMPERJ, apoiada na TSC, no NDVI, IBI, na classificação de uso e cobertura da terra e na ISA, utilizou-se um banco de dados formado por imagens do Landsat-5, 7 e 8 para um período de aproximadamente 12 anos, cobrindo os anos de 2002 a 2013. As imagens foram agrupadas em dois períodos com o mesmo número de anos, 2002 a 2007 e 2008 a 2013, com o intuito de representar as condições ambientais antes à construção e após a construção do COMPERJ, respectivamente, permitindo analisar a evolução temporal dos parâmetros utilizados e, por conseguinte monitorar o impacto do COMPERJ. Posteriormente, compósitos de imagens de TSC, NDVI e IBI foram calculados com base na média. As composições resultantes consistem em mapas de média dos parâmetros mencionados para o período anterior (2002-2007) e posterior (2008-2013) à construção. Vale ressaltar que em geral, para o caso específico do NDVI, utiliza-se a composição de valores máximos, pois considera-se que a vegetação não sofreu alteração no período de tempo escolhido. Portanto, após comparar temporalmente pixel a pixel, aquele com valor máximo de NDVI seria o mais condizente com a realidade, pois valores mais baixos seriam por conta de fatores externos como a contaminação atmosférica e de nuvens, e não por conta de mudanças intrínsecas da vegetação. Porém, neste trabalho optou-se por construir compósitos de médias de NDVI, como para a temperatura a fim de não perder informações sobre a variabilidade dos parâmetros analisados durante o período escolhido para a obtenção da média de cada parâmetro. Com base nas médias é possível, posteriormente, calcular o desvio padrão para ser aplicado em um teste estatístico para confirmar se houve alteração com um determinado nível de significância (não realizado no presente trabalho). Portanto, as composições resultantes consistem em mapas de média dos parâmetros mencionados para o período anterior e posterior à construção. Todas as imagens estão situadas na órbita-ponto 217-76 (Figura 11), que abrange a RMRJ, e correspondem ao período matutino.

Figura 11 - Órbita-ponto 217-76.



Fonte: Lucena, 2012.

4.1 Pré-processamento

Segundo Florenzano (2011), o pré-processamento refere-se à um tratamento inicial dos dados brutos das imagens, com a finalidade de atenuar os efeitos da atmosfera, reduzir ou remover ruídos, corrigir distorções geométricas decorrentes do processo de aquisição dos dados e deslocamento das plataformas e fazer a calibração radiométrica.

As imagens provenientes do Landsat cobrem uma área de 185 km x 185 km (INPE, 2009) e foram selecionadas as que possuíam a menor cobertura de nuvens possível (até em torno de 12%) e foram georreferenciadas, reamostradas e recortadas nos softwares SPRING versão 4.3 e ENVI versão 4.7. O georreferenciamento levou em consideração 8 pontos com um erro geral menor que 0,2. Devido a fato das bandas 6 do TM e ETM+ possuírem respectivamente resolução de 120 e 60 m, foi realizada uma reamostragem da banda 6 para 30 m afim de que esta pudesse ser utilizada em conjunto com as demais bandas. A reamostragem leva em consideração os fatores de correção da imagem $Xfac$ e $Yfac$ com base na quantidade de linhas e colunas das bandas com 30 m e da banda 6. Para a banda 10 do sensor TIRS a bordo do satélite Landsat-8 com resolução espacial de 100 m não foi necessário realizar a reamostragem, pois esta já é disponibilizada reamostrada para 30 m pelo USGS. A equação (1) e (2) mostram os fatores de correção:

$$Xfac = \left(\frac{c_b30}{c_b6} \right) \quad (1)$$

$$Yfac = \left(\frac{l_b30}{l_b6} \right) \quad (2)$$

Onde c_b30 (l_b30) e c_b6 (l_b30) são respectivamente o número de colunas (linhas) das bandas com resolução de 30 m e da banda 6.

Para o recorte foi selecionada uma área que englobasse a área de análise – COMPERJ e RMRJ. Em seguida, as imagens foram salvas e geraram arquivos no formato “geotiff” que serviram para a elaboração dos mapas do uso do solo com base no SPRING e para converter os números digitais (ND) em radiância, reflectância, temperatura de brilho, e posteriormente fazer o mascaramento de nuvens e oceano e calcular os índices e a TSC através do MATLAB.

Segunda o autor supracitado, as imagens digitais são representadas em números digitais em cada pixel, que representa a energia média refletida (emitida) pelos objetos contidos na área, onde os pixels que absorvem (emitem) mais energia são representados por cores escuras, e, por outro lado, os pixels que absorvem (emitem) menos energia, isto é, refletem mais, são representados por cores claras. Deste modo, pixels contaminados com nuvens podem alterar o valor médio dos pixels, gerando falhas e dificuldades posteriores no decorrer da utilização dos dados provenientes da imagem não tratada.

A lista de imagens utilizadas por data e por satélite são mostradas no Quadro 8, ressaltando-se que, para o período pré foram utilizadas 29 imagens e para o período pós foram utilizadas também 29.

Quadro 8 – Datas das imagens por satélite.

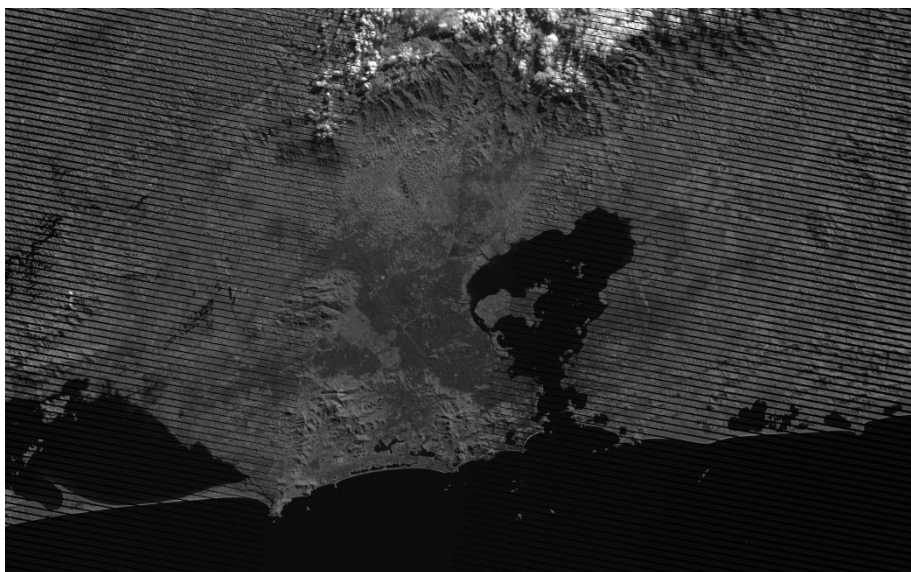
Landsat-5	Landsat-7	Landsat-8
09/06/2002	23/10/2008	28/04/2013
27/07/2002	10/12/2008	14/05/2013
12/08/2002	28/02/2009	17/07/2013
04/02/2003	19/05/2009	02/08/2013
20/02/2003	04/06/2009	03/09/2013
06/07/2003	20/06/2009	-
22/07/2003	08/09/2009	-
23/08/2003	15/02/2010	-
26/10/2003	19/03/2010	-
29/12/2003	20/04/2010	-

30/01/2004	07/06/2010	-
02/03/2004	09/07/2010	-
03/04/2004	26/08/2010	-
31/12/2004	11/09/2010	-
09/06/2005	09/05/2011	-
11/07/2005	12/07/2011	-
28/08/2005	13/08/2011	-
16/11/2005	30/09/2011	-
04/02/2006	29/02/2012*	-
27/05/2006	04/06/2012*	-
31/08/2006	06/07/2012*	-
23/02/2007	22/07/2012*	-
11/03/2007	07/08/2012*	-
27/03/2007	23/08/2012*	-
12/04/2007	-	-
15/06/2007	-	-
02/08/2007	-	-
19/09/2007	-	-
05/10/2007	TOTAL	58 imagens

Fonte: Elaborado pelo autor.

As imagens do Landsat-7 referentes ao ano de 2012 apresentaram falhas que podem ser observadas na Figura 12, a qual corresponde a uma imagem de 06 de junho de 2012.

Figura 12 - Imagem do Landsat-7 de 06 de junho de 2012 apresentando falhas.

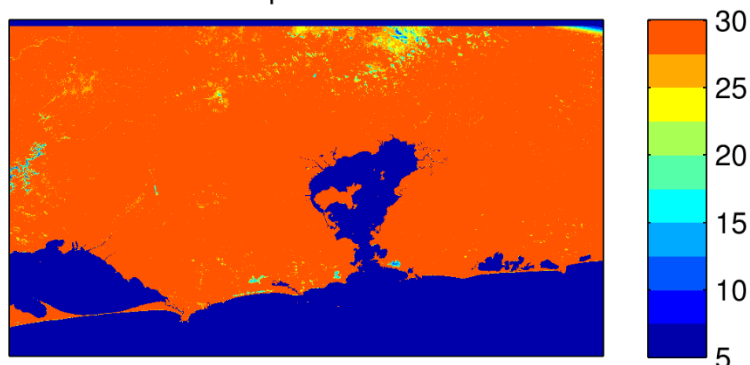


Fonte: USGS (2015).

É importante notar que apesar de termos 29 imagens para o período pré-construção, entre 2002 e 2007, e o mesmo número para o período pós-construção, entre 2008 e 2013, o número de informações para cada pixel pode ser diferente. O número disponível de imagens deve ser tratado como a quantidade máxima de dados para cada período, visto que em algumas datas e para alguns pixels pode ter acontecido perdas de informação devido a cobertura de nuvens e problemas radiométricos, como os apresentados nas imagens provenientes do ETM+ a bordo do Landsat-7 (Figura 12). Portanto, a quantidade de informações utilizadas para o cálculo da média de cada parâmetro é diferente para cada pixel. Desta forma, as Figuras 13 e 14 exibem o número de amostras por pixel utilizado para o cálculo da média para o período pré (2002-2007) e pós-construção (2008-2013), respectivamente. Podemos observar em ambas as Figuras, que por conta de uma maior presença de nuvens, a Região Serrana do Rio de Janeiro apresenta, por exemplo, um número menor de amostras, com valores em torno de 15.

Figura 13 – Número de amostras válidas por pixel na RMRJ para o período pré-construção.

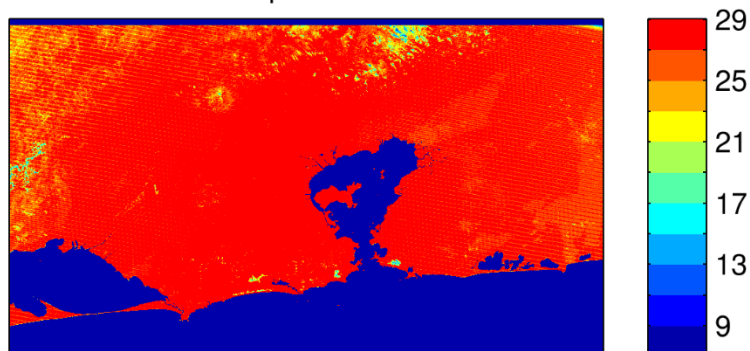
Número de Amostras por Pixel RMRJ 2002–2007



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Como na Figura 13, mas para o período pós-construção.

Número de Amostras por Pixel RMRJ 2008–2013



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1 Correção radiométrica

A correção radiométrica consiste em transformar dados brutos, inicialmente em números digitais (ND), em dados de radiância, pois os dados das imagens provenientes de vários sensores e plataformas precisam ser colocados na mesma escala radiométrica e esta transformação para um valor físico permite posteriormente obter variáveis quantitativas de interesse. Esta correção foi feita com base nas equações e constantes de calibração propostas no trabalho de Chander e Markham (2003). Para o cálculo da radiância espectral utilizou-se a equação (3).

$$L_i = \left(\frac{LMAX_i - LMIN_i}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \right) (Qcal - Qcal_{min}) + LMIN_i \quad (3)$$

Onde:

L_i é a radiância espectral no canal i em $W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}$;

$LMAX_i$ é o valor de radiância máxima na banda i em $W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}$;

$LMIN_i$ é o valor de radiância mínima na banda i em $W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}$;

$Qcal$ é o valor de ND;

$Qcal_{max}$ é o valor máximo de ND;

$Qcal_{min}$ é o valor mínimo de ND;

Com base na equação (3) podemos definir os fatores em $W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}.DN^{-1}$ e em $W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}$ para cada banda da seguinte forma:

$$Grescale = \frac{LMAX_i - LMIN_i}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \quad (4)$$

$$Brescale = LMIN_i - \left(\frac{LMAX_i - LMIN_i}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \right) Qcal_{min} \quad (5)$$

Para os canais: 2 (0,525 - 0,605 μm), 3 (0,630 - 0,690 μm), 4 (0,750 - 0,900 μm) e 5 (1,55 - 1,75 μm), a radiância foi posteriormente transformada em reflectância utilizando a equação (6) a seguir:

$$\rho_i = \frac{\pi L i d^2}{ESUN_i \cos \theta_s} \quad (6)$$

Onde:

ρ é a reflectância no canal i ;

d é a distancia Terra-Sol em unidades astronômicas;

$ESUN_i$ é o valor médio da irradiância solar no canal i em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$;

θ_s é o ângulo zenital solar.

As constantes de calibração para cada banda são mostradas nos Quadros 9 e 10, para os sensores TM (a bordo do Landsat-5) e ETM+ (a bordo do Landsat-7), respectivamente. As constantes referentes aos sensores OLI e TIRS a bordo do Landsat-8, vem especificados para cada imagem num arquivo de parâmetros. No caso do canal 6 (11,5 μm) a radiância foi transformada em temperatura de brilho (TB), através da inversão da função de Planck.

$$Tb = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{Li} + 1\right)} \quad (7)$$

Onde Tb é a temperatura de brilho em Kelvin (K) e K1 e K2 são as constantes de calibração do Landsat em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ e Kelvin, respectivamente, onde seus valores são exibidos no Quadro 11.

Quadro 9 - Constantes de calibração para o sensor TM a bordo do Landsat-5.

Banda	Faixa espectral	Comprimento de onda	LMIN λ	LMAX λ	Grescale	Brescale
1	0,452-0,518	0,485	-1,52	169	0,671339	-2,19
			-1,52	193	0,765827	-2,19
2	0,528-0,609	0,569	-2,84	333	1,322050	-4,16
			-2,84	365	1,441890	-4,29
3	0,626-0,693	0,660	-1,17	264	1,043976	-2,21
4	0,776-0,904	0,84	-1,51	221	0,876024	-2,39

5	1,567-1,784	1,676	-0,37	30,2	0,120354	-0,49
6	10,45-12,42	11,435	1,2378	15,3032	0,055376	1,18
7	2,097-2,349	2,223	-0,15	16,5	0,065551	-0,22

Fonte: Adaptada de Chander et al, 2007.

As constantes de calibração do sensor TM, nas bandas 1 e 2 sofreram, no período de 1984-1991, mudanças para otimizar a faixa dinâmica e preservar a sensibilidade dos dados das missões anteriores (Chander et al, 2007).

Quadro 10 - Constantes de calibração para o sensor ETM+ a bordo do Landsat-7.

Banda	Faixa espectral	Comprimento de onda	LMIN λ	LMAX λ	Grescale	Brescale	ESUM λ
LOW GAIN							
1	0.519-0.601	0,483	-6,20	293.70	1.180.700	-7.38	1987
2	0.631-0.692	0,56	-6,40	300.90	1.200.843	-7.61	1812
3	0.772-0.808	0,662	-5,00	234.40	0.942520	-5.94	1533
4	1.547-1.748	0,835	-5,10	241.10	0.969291	-6.07	1039
5	10.31-12.36	1,648	-1,00	47.57	0.191230	-1.19	230.8
6	10,45-12,42	11,335	0,00	17.04	0.067087	-0.07	N/A
7	2.065-2.346	2,206	-0,35	16,54	0.066406	-0.42	84.90
PAN	0.515-0.896	0.706	-4,70	343.10	0.975591	-5.68	1362
HIGH GAIN (LPGS)							
1	0.452-0.514	0.483	-6.20	191.60	0.778740	-6.98	1987
2	0.519-0.601	0.560	-6.40	196.50	0.798819	-7.20	1812
3	0.631-0.692	0.662	-5.00	152.90	0.621664	-5.62	1533
4	0.772-0.808	0.835	-5.10	157.40	0.639764	-5.74	1039
5	1.547-1.748	1.648	-1.00	31.05	0.126220	-1.13	230.8
6	10.31-12.36	11.335	0.00	12.65	0.037205	3.16	N/A
7	2.065-2.346	2.206	-0.35	10.80	0.043808	-0.39	84.90
PAN	0.515-0.896	0.706	-4.70	158.30	0.641732	-5.34	1362

Fonte: Adaptada de Chander et al. (2007).

O sensor ETM+ geram imagens adquiridas através de dois estados do ganho alto e baixo. O objetivo disto é maximizar a resolução radiométrica em 8 bits sem saturar os detectores. Para todas as bandas, o baixo ganho da faixa dinâmica é de aproximadamente 1,5 vezes o alto ganho da faixa dinâmica. Entretanto, o baixo ganho é usado para imagens de superfície com alto brilho e alto ganho é usado para superfícies de baixo brilho (Chander et al, 2007).

Quadro 11 - Valores das constantes K1 e K2.

Sensor	K1	K2
Landsat-4 TM	671,62	1284,30
Landsat-5 TM	607,76	1260,56
Landsat-7 ETM+	666,09	1282,71

Fonte: Adaptada de Chander *et al*, 2007.

É importante mencionar que todas as equações de calibração radiométrica apresentadas no trabalho são referentes as bandas dos sensores TM e ETM+.

4.1.2 Mascaramento de Nuvens

Locais situados em regiões tropicais, como a RMRJ, frequentemente apresentam sua superfície marítima e continental encobertas pela presença de nuvens. A classificação de uso e cobertura da terra assim como os cálculos da TSC, NDVI, IBI e ISA, com base em dados do Landsat se tornam inadequados quando o pixel está coberto com nuvem. As nuvens influenciam tanto a radiação termal emitida como a radiação solar refletida de forma a prejudicar os resultados e os parâmetros de superfície devido à falhas na identificação prévia dos pixels cobertos (LUCENA, 2012). Embora, para a TSC, NDVI e IBI, seja aplicada a técnica de composição com base no valor médio que minimizam os efeitos das nuvens, diversos estudos como o Gutman (1991) e Gutman e Ignatov (1996), demonstraram que as composições, geralmente, incluem pixels contaminados que podem afetar a análise de dados e até levar à falsas conclusões. Portanto, a obtenção de resultados mais confiáveis depende da identificação e separação de pixels cobertos por nuvens através do uso de algoritmos de mascaramento de nuvens em imagens diárias antes de se realizar as composições.

França e Cracknell (1995) desenvolveram um método simples para detecção de nuvem com os dados do sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). O método é desenvolvido para o período diurno de áreas equatoriais-tropicais, como a região nordeste do Brasil. As áreas equatoriais-tropicais, devido à maior espessura óptica e quantidade de vapor de água, diferenciam-se significativamente das latitudes médias. Cinco diferentes técnicas de mascaramento de nuvens foram empregadas, com base no espectro visível e infravermelho, e mostraram-se eficientes por detectar pixels contaminados por nuvens, especialmente para as

nuvens que são mais difíceis de detectar, como as finas e quentes. Chen *et al.* (2002) examinaram métodos de mascaramento com a intenção de desenvolver um algoritmo de detecção automática de nuvem para os dados do AVHRR - NOAA-14 no Texas. O algoritmo foi capaz de identificar a maioria dos pixels contaminados, exceto para pixels com sombra de nuvens numa precisão global de 89%. O algoritmo utiliza três técnicas principais que se baseiam na reflectância no topo da atmosfera para o canal 1, centrado no vermelho (0,6 μm), na diferença de temperatura dos canais 3 e 4, centrados respectivamente no infravermelho médio (3,9 μm) e longo (10,5 μm), e numa combinação da temperatura de brilho no canal 4 com a técnica da razão Q entre os canais 2, localizado no infravermelho próximo (0,8 μm), e 1.

Ao baixar as imagens do site da USGS foi escolhido como critério o valor máximo de 20% de cobertura de nuvens que pôde ser constatado no arquivo de metadado que vem junto ao arquivo das imagens. Os metadados mostraram imagens variando entre 0,16% e 15% de cobertura de nuvens. Com base nos trabalhos de França e Cracknell (1995) e Chen *et al.* (2002) foram adotadas três técnicas de mascaramento de nuvens no presente estudo, as quais são descritas a seguir para as bandas dos sensores TM e ETM+ a bordo do Landsat-5 e 7, respectivamente: 1) técnica com base em limiar do valor da reflectância na banda 3. No presente trabalho foi definido um limiar de 0,3, assim, qualquer pixel que apresentar um valor de reflectância na banda 3, maior que 0,3 é considerado como coberto por nuvem; 2) técnica com base em limiar do valor de temperatura de brilho na banda 6. Esta técnica é também conhecida por *Técnica de Gross Threshold*. Estabeleceu-se um limiar de 278 K de forma que o pixel que apresentar valor de temperatura de brilho na banda 6 menor ou igual a 278 K, será classificado como nuvem. 3) técnica da razão Q entre as bandas 4 e 3. Os valores de Q para pixels cobertos por nuvens são aproximadamente iguais a 1,0, uma vez que há um efeito similar do espalhamento de energia refletida para ambos os canais. Superfícies continentais e marítimas apresentam diferentes respostas. No continente e em áreas vegetadas o valor de Q é, geralmente maior que 1,0, por causa dos maiores valores de reflectância na banda 4 em relação a 3. Enquanto na superfície marítima ρ_3 é bem maior que ρ_4 por causa do efeito de absorção do infravermelho próximo pela água. Uma vez aplicado a técnica para o continente e para a superfície marítima, foi determinado que pixels com valor de Q maior ou igual a 0,8 e menor ou igual a 1,6, são classificados como nuvem. Quando Q for menor que 0,8 o pixel é classificado como água, e quando for maior que 1,6 é classificado como continente. Os valores de limiares estabelecidos para estas técnicas foram obtidos através da análise de

diferentes imagens da RMRJ e desta forma, considera-se que esses valores são apropriados para a região de estudo.

Para as bandas do sensor OLI e TIRS a bordo do satélite Landsat-8 basta fazer a correspondência espectral com base nos Quadros 9, 10 e 12.

Quadro 12 - Características das bandas dos sensores OLI e TIRS e TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat-5, 7 e 8.

Sensores OLI e TIRS		
Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (m)
Banda 1 - aerossol	0,43 - 0,45	30
Banda 2 - azul	0,45 - 0,51	30
Banda 3 - verde	0,53 - 0,59	30
Banda 4 - vermelha	0,64 - 0,67	30
Banda 5 - IV próximo	0,85 - 0,88	30
Banda 6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	30
Banda 7 - SWIR 2	2,11 - 2,29	30
Banda 8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
Banda 9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
Banda 10 - IV termal 1	10,60 - 11,19	100
Banda 11 - IV termal 2	11,50 - 12,51	100
Sensor ETM+		
Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (m)
Banda 1 –azul	0,45 a 0,52	30
Banda 2 – verde	0,52 a 0,60	30
Banda 3 – vermelha	0,63 a 0,69	30
Banda 4 - IV próximo	0,76 a 0,90	30
Banda 5 – IV médio	1,55 a 1,75	30
Banda 6 – IV Termal	10,4 a 12,5	60
Banda 7 – IV distante	2,08 a 2,35	30
Banda 8 - pancromática	0,52 a 0,90	15
Sensores TM		
Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (m)
Banda 1 –azul	0,45 a 0,52	30
Banda 2 – verde	0,52 a 0,60	30
Banda 3 – vermelha	0,63 a 0,69	30
Banda 4 - IV próximo	0,76 a 0,90	30
Banda 5 – IV médio	1,55 a 1,75	30
Banda 6 – IV Termal	10,4 a 12,5	120
Banda 7 – IV distante	2,08 a 2,35	30

Fonte: USGS, 2015.

4.2 Mapas de uso e cobertura do solo

O mapa de uso e cobertura do solo é de grande importância pois permite uma análise conjunta com mapas de TSC e dos demais índices. Existem métodos diferentes para a confecção destes mapas, e por isso, há uma demanda de rigorosidade na escolha do método de classificação utilizado. Testes para comparação do desempenho de alguns métodos foram realizados e demonstrou que o método que obteve os melhores resultados foi o Bhattacharya.

O mapeamento foi realizado com o auxílio do *software* Spring. Foram selecionadas duas imagens que serviram de base para a confecção dos dois mapas – um para o período pré e outro para o período pós. Para o período pré a imagem base foi a de 23/08/2003 e a para o período pós a imagem selecionada foi a de 13/08/2011. Ambas escolhidas por apresentarem a menor cobertura de nuvens dentre todas as imagens tratadas. Em seguida, selecionou-se a projeção UTM WGS 84 23 S e as bandas utilizadas para geração das imagens, a saber: banda 3, banda 4 e banda 5 (foram realizados alguns contrastes nas bandas para melhor visualização). Feita a composição RGB das bandas, foi possível selecionar a similaridade e o pixel para segmentação, a saber: 15 30 respectivamente. Diversas segmentações foram testadas (15 15, 30 30, 15 30, 25 25) pois estas auxiliam na delimitação de áreas consideradas semelhantes e que podem se agrupar numa mesma amostra. Florenzano (2011) alega que a segmentação permite dividir a imagem em regiões espectralmente homogêneas. Nessas regiões são colhidas amostras para o treinamento e em seguida, aplicação das técnicas de classificação.

Após o processo de segmentação, iniciou o processo de treinamento com a coleta das amostras. Uma análise visual da imagem foi feita pelo autor, pois tanto a coloração da região quanto a sua rugosidade indica que tipo de cobertura o local possui. Portanto, seguindo o que fora descrito por vários autores, incluindo o Florenzano (2011), as cores referentes a locais de cobertura vegetal, urbana, água e solo exposto são, respectivamente, verde, magenta escuro, preto, magenta claro tendendo ao branco. Ao identificar tais áreas, 5 amostras de cada foi coletada e salva com uma cor selecionada pelo autor para que gerasse o mapa temático do uso e cobertura do solo. As amostras foram agrupadas em classes nomeadas pelo autor. Assim, foram extraídas quatro classes, urbano, solo exposto, vegetação e água, consideradas as mais relevantes para análise temporal – espacial do uso do solo. Por fim, a classificação, de caráter automático, foi realizada de maneira supervisionada utilizando o método Bhattacharya.

A classe urbano foi definida como áreas de maior densidade construída, incluindo-se áreas residenciais e comerciais, horizontais ou verticais, áreas pavimentadas e alteradas artificialmente provocando dificuldades em absorção de água, tornando a região impermeável, com necessidade de intervenção da engenharia para criar uma logística de escoamento das águas (seja da chuva ou proveniente de outras fontes). A classe solo exposto foi estabelecida como qualquer tipo de solo nu sem distinção entre os diferentes tipos, composição química ou biológica. A classe vegetação foi estabelecida como toda e qualquer área verde sem distinção de tipo ou espécie vegetal ou de bioma. Desse modo, áreas de mata nativa, como em encostas e topos de morro, assim como áreas de parque e praças urbanas com vegetação foram assim classificadas. Por último, a classe água também leva em conta qualquer tipo de cor de água, incluindo oceano, rios, lagos entre outros.

4.3 Temperatura da superfície continental (TSC)

Atualmente, a detecção remota por satélite na faixa espectral do infravermelho termal possui capacidade de examinar a TSC de forma repetitiva possibilitando a extração de séries temporais com adequadas resoluções espacial e temporal para estudos do clima urbano. Entretanto, uma estimativa adequada de TSC a partir de dados de satélite requer levar em conta não só a influência atmosférica, mas também o efeito da emissividade da superfície na radiação medida no topo da atmosfera pelo sensor a bordo do satélite. Os sensores TM e ETM+ utilizados no presente estudo apresentam somente um canal cobrindo a faixa espectral do infravermelho termal, i.e., canal 6, e, portanto a única forma possível de estimar a TSC é com base em métodos mono-canal. Apesar do instrumento TIR a bordo do Landsat-8 apresentar duas bandas posicionadas na janela atmosférica entre 10 e 12 μm (bandas 10 e 11) possibilitando a utilização de outros métodos (e.g., split-window), a TSC foi estimada com base unicamente no canal 10 com o intuito de se manter a coerência entre as estimativas. Desta forma, a TSC neste estudo foi estimada utilizando a banda 6 do Landsat-5 e 7 e a banda 10 do Landsat-8, com base em diferentes hipóteses e parametrizações (QIN; KARNIELI; BERLINER, 2001; SOUZA; SILVA, 2005), onde a correção atmosférica é realizada utilizando-se dados medidos na rede convencional de estações meteorológicas presentes na RMRJ de acordo com a seguinte equação:

$$T_s = T_b + \Delta T \quad (8)$$

onde T_s é a TSC em Kelvin (K), T_b é a temperatura de brilho e ΔT é o fator de correção que possibilita a estimativa de TSC a partir da temperatura de brilho na banda 6 e 10, dado por

$$\Delta T = \frac{B_i(T_b) \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} B_i(T_a)}{\frac{\partial B_i(T_b)}{\partial T_b}} \quad (9)$$

Onde, $B_i(T)$ é a função de Planck descrevendo a radiância emitida por um corpo negro com temperatura T e α_1 e α_2 são definidos como

$$\alpha_1 = \tau_i \varepsilon_i \quad (10)$$

$$\alpha_2 = (1 - \tau_i) [1 + (1 - \varepsilon_i) \tau_i] \quad (11)$$

É importante notar que o fator de correção ΔT leva em conta tanto a influência atmosférica como da emissividade no sinal registrado pelo instrumento a bordo do satélite. Desta forma, com o intuito de obter a TSC com base nas Equações (8)-(11) é necessário conhecer diferentes parâmetros atmosféricos, nomeadamente a transmitância atmosférica τ_i e a temperatura média da camada atmosférica, T_a , e também a emissividade da superfície continental ε_i . A temperatura média da camada atmosférica foi obtida de acordo com Quin *et al.* (2001), da seguinte forma

$$T_a = 19,73 + 0,909T_0 \quad (12)$$

onde T_0 é a temperatura do ar a 2 m da superfície. A transmitância atmosférica τ_i foi calculada com base numa relação empírica obtida por Souza e Silva (2005)

$$\tau_i = 0.951 - 0,01 \cdot w \cdot \exp\left(\frac{3w}{1+w}\right) \quad (13)$$

onde w é o conteúdo de vapor de água que foi avaliado pela equação de Leckner (IQBAL, 1983), a qual utiliza como entrada valores de umidade relativa e pressão de saturação de vapor d'água. Valores de temperatura do ar a 2 m e umidade relativa foram obtidas de estações meteorológicas presentes na RMRJ.

Para a obtenção da TSC, é necessário ainda o conhecimento da emissividade da superfície. Como o sensor TM e OLI possuem canais localizados na região de 0,6 μm (canal 3) e 0,8 μm (canal 4), optou-se por adotar a seguinte relação entre a emissividade da superfície e o índice de vegetação NDVI de acordo com Van de Griend e Owe (1993).

$$\varepsilon_i = 1,009 + 0,047 \ln(\text{NDVI}) \quad (14)$$

onde o NDVI é obtido conforme a seguinte equação (HUETE *et al*, 2002)

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (15)$$

onde ρ representa a reflectância e os subscritos indicam as bandas dos sensores TM e ETM+. Além da utilização do NDVI para o cálculo da emissividade, este parâmetro também foi utilizado para avaliar o impacto do COMPERJ, pois é um índice que permite identificar a presença de vegetação verde na superfície e caracterizar sua distribuição espacial bem como a evolução de seu estado ao longo do tempo, sendo um importante parâmetro para analisar áreas que foram urbanizadas. Informações mais detalhadas são fornecidas na próxima seção.

4.4 NDVI

Segundo Zha, Gao e Ni (2003), o sensoriamento remoto tem sido uma boa ferramenta para monitoramento do uso de cobertura do solo e suas alterações. As imagens fornecidas pelos satélites podem ser interpretadas manualmente ou através de métodos padronizados como é o caso do uso de índices. Na literatura, diversos tipos de índices de vegetação têm sido propostos com o objetivo de explorar as propriedades espectrais nas regiões do visível e do infravermelho próximo da vegetação. Isso se dá devido a propriedade que a vegetação possui de ter uma alta reflectância na região do infravermelho próximo (0,8 μm) devido à estrutura

celular. Já na região do visível (vermelho – 0,6µm) encontra-se uma baixa refletância devido à absorção da radiação solar pela ação dos pigmentos fotossintetizantes. Sendo este comportamento antagônico da reflectância o fundamento para a proposição desses índices. Em princípio, quanto maior for a densidade da cobertura vegetal em uma área, menor será a refletância no visível e maior será no infravermelho próximo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

Criado a partir de outro índice (Índice de Vegetação da razão simples), o NDVI foi proposto por Rouse *et al* (1974) que normalizou a razão simples para o intervalo de -1 a +1. Para alvos terrestres o limite inferior torna-se aproximadamente zero e o limite superior torna-se 0,80. O NDVI, conforme Yuan *et al* (2007), tem sido considerado o maior indicador de clima urbano. Altos valores de NDVI indicam uma grande fração de vegetação em um pixel. Assim, existe uma correlação negativa da temperatura de superfície com o NDVI. Baixos valores de TSC estão associados com altos valores de NDVI. Essa relação entre NDVI – temperatura tem sido usada em vários estudos para avaliar duas variáveis: cobertura vegetal e água contida na superfície do solo.

4.5 IBI

Outro parâmetro utilizado no presente estudo é o índice IBI proposto por Xu (2008) que permite a identificação automática de áreas construídas em imagens de satélite. O IBI se distingue dos demais índices convencionais por utilizar índices temáticos derivados de dados de satélite em vez de usar diretamente bandas originais dos sensores. Três índices temáticos, NDVI, índice de água por diferença normalizada modificado (MNDWI) e índice de áreas construídas por diferença normalizada (NDBI), são utilizados pelo IBI com o intuito de representar os três principais componentes da paisagem urbana: 1) vegetação; 2) água e 3) áreas construídas. Como pode ser observado no trabalho proposto pelo Xu (2008), o IBI pode ser calculado utilizando diretamente o NDVI, MNDWI e o NDBI. O MNDWI consiste numa modificação do índice proposto por McFeeters (1996), o índice de água por diferença normalizado (NDWI) e pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$MNDWI = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5} \quad (16)$$

onde, mais uma vez, os subscritos representam as bandas dos sensores TM e ETM+. O NDBI proposto por Zha *et al* (2003) foi desenvolvido com base na resposta espectral de áreas construídas e pode ser calculado a partir da seguinte fórmula

$$NDBI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (17)$$

Em posse das equações (15)-(17), o IBI pode ser obtido da seguinte forma

$$IBI = \frac{\left[\frac{NDBI - \frac{(NDVI + MNDWI)}{2}}{2} \right]}{\left[\frac{NDBI + \frac{(NDVI + MNDWI)}{2}}{2} \right]} \quad (18)$$

O IBI pode ser calculado de uma única vez sem ser necessário gerar os três índices antes de calcular o IBI com base na seguinte equação

$$IBI = \frac{2\rho_5/(\rho_5 + \rho_4) - [\rho_4/(\rho_4 + \rho_3) + \rho_2/(\rho_2 + \rho_5)]}{2\rho_5/(\rho_5 + \rho_4) + [\rho_4/(\rho_4 + \rho_3) + \rho_2/(\rho_2 + \rho_5)]} \quad (19)$$

Como um índice normalizado, os resultados variam entre -1,0 e +1,0, sendo os valores positivos e próximos a 1,0 indicativos de área urbana, enquanto valores negativos e próximos a -1,0 indicativos de área menos urbanizada.

4.6 ISA

O ISA tem sido largamente utilizado como um forte indicador para projetos de desenvolvimento sustentável e planejamento de recursos naturais (ANORLD e GIBBONS, 1996), pois segundo Oke (1976) e Weng (2004) a urbanização (impermeabilidade) está ligada à TSC. A impermeabilidade é uma marca do crescimento urbano na paisagem e é composta por dois componentes: telhados e a pavimentação (LUCENA, 2012). O ISA consiste em uma medida fornecida na forma de porcentagem uma vez que este é um termo que se refere à fração da superfície que é coberta artificialmente por estradas, prédios, calçadas e estacionamento, cujo material não permite absorção da água, tornando seu escoamento mais

rápido e mais custosa sua evaporação para a atmosfera (HEBBLE *et al.*, 2001). Diversos estudos vêm sendo realizados com o auxílio do ISA, como, por exemplo, Ridd (1995) que utilizou o ISA como uma aproximação para densidade demográfica, renda média, valores imobiliários, condições sociais entre outros fatores que refletem as condições de vida humana. No trabalho de Xian e Crane (2006) o ISA foi utilizado para análise de campos térmico em cidades da Flórida (E.U.A) associado ao uso do solo com auxílio de imagens do Landsat-5 e 7. Os resultados comprovaram que a densidade urbana gera efeitos na TSC. Pesquisas relacionadas à extração do ISA com base em dados de sensoriamento remoto têm atraído bastante atenção desde os anos 1970, especialmente nas décadas mais recentes. Diferentes abordagens têm sido desenvolvidas para a extração quantitativa do ISA.

Neste contexto, visto que existe uma correlação inversa alta entre a cobertura vegetal e o ISA em paisagens urbanas, o ISA pode ser estimado quantitativamente, por exemplo, através da fração de cobertura vegetal que pode ser obtida a partir do NDVI. Como o NDVI já é calculado no presente trabalho decidiu-se utilizar o método acima para a obtenção do ISA. Neste caso, para atingir a determinação do ISA, é necessário o cálculo de dois parâmetros de superfície: 1) fração de cobertura vegetal do pixel (FVC) e 2) classificação categórica do pixel com base no mapa de uso e cobertura de solo. O FVC pode ser calculado com base no NDVI da seguinte maneira

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_v + NDVI_0} \right)^2 \quad (20)$$

Onde $NDVI$, $NDVI_v$ e $NDVI_0$ são os valores de NDVI para um pixel qualquer da imagem, um pixel completamente coberto com vegetação, e um pixel com 0% de cobertura vegetal, respectivamente. Como aproximação, assume-se que o $NDVI_v$ ($NDVI_0$) é igual ao valor mais alto (baixo) de NDVI presente na imagem. Os valores de NDVI acima citados são obtidos somente para pixels classificados como urbanos no mapa de uso e cobertura do solo, visto que o ISA é calculado apenas para pixels urbanos. Finalmente, o valor de ISA é facilmente obtido através da seguinte equação

$$ISA = 1 - FVC \quad (21)$$

Dois mapas de ISA foram obtidos a partir das médias do NDVI para o período anterior à construção (2002-2007) e posterior (2008-2013). Esta abordagem possui a desvantagem no fato de que a atividade fotossintética da vegetação varia com as estações do ano, o que pode resultar em grandes incertezas na estimativa do ISA.

Neste contexto, o ISA também será calculado com base na técnica de modelo linear de mistura espectral (MLM), visto que essa técnica surgiu recentemente como uma abordagem importante para a extração do ISA a partir de dados multiespectrais. A mistura espectral trata-se de da mistura de diferentes objetos ou elementos da cobertura superficial contidas num pixel, considerando, desta forma, que a resposta espectral de um pixel da imagem é resultante da combinação da resposta espectral dos componentes que formam o pixel. O valor associado a cada pixel de uma imagem representa a radiância média de objetos presentes na superfície em uma dada faixa espectral, mais a interferência da atmosfera, que pode ser expressa pelos fenômenos de absorção e de espalhamento dependendo da região espectral que se esteja estudando. A radiância registrada pelo sensor depende basicamente então das características específicas do próprio sensor, das propriedades físico-químicas dos objetos contidos dentro do pixel e da interferência atmosférica. Diz-se, portanto que a radiância medida será explicada pela mistura de diferentes matérias, mais a contribuição atmosférica. O MLM pode ser representado matematicamente através da reflectância da seguinte forma

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + e_i \quad (22)$$

Onde:

i corresponde ao número da banda espectral usada;

k corresponde ao número de componentes “puros” que compõem o pixel;

R_i é a reflectância espectral da banda i de um pixel que contém um ou mais componentes, os quais são dados por k ;

f_k corresponde a proporção do componente k dentro do pixel;

R_{ik} é a como reflectância espectral do componente k dentro do pixel na banda i ;

e_i é o erro da banda i .

Para uma solução de mínimos quadrados com restrição, f_k está sujeito as seguintes delimitações:

$$\sum_{k=1}^n f_k = 1 \text{ e } 0 \leq f_k \leq 1 \quad (23)$$

O RMSE (*root – mean square error*) é utilizado para se obter o ajuste do modelo e seu cálculo é efetuado da seguinte forma:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^m e_i^2 / m} \quad (24)$$

A equação (24) é utilizada para todos os pixels da imagem e quanto maior o RMSE, pior é o ajuste do modelo. Este erro pode ser utilizado para saber se os componentes foram adequadamente selecionados e se o número de componentes selecionados é suficiente.

A maior dificuldade associada à técnica de mistura espectral está relacionada matematicamente ao problema da identificação de um pixel dito puro (aquele que possui exclusivamente um tipo de objeto imageado, como por exemplo, uma vegetação homogênea), do qual pode ser extraído o comportamento espectral (SHIMABUKURO; PONZONI, 2009). Com o intuito de identificar efetivamente um pixel puro e alcançar um conjunto de pixels puros de alta qualidade, diferentes técnicas de transformação de imagens, como análises de componentes principais (ACP) e fração de ruído mínimo (MNF), podem ser utilizadas para transformar imagens multiespectrais em um novo conjunto de dados. No presente trabalho, planeja-se utilizar a técnica de MNF para a seleção de pixel puros.

Alternativamente, pode-se assumir que a paisagem urbana é composta de quatro componentes: 1) coberturas com valores altos de albedo; 2) coberturas com valores baixos de albedo; 3) solo; e 4) vegetação. Todos os tipos de cobertura serão considerados como uma composição destes quatro componentes com um comportamento linear. Imagens fração de alto albedo destacam coberturas como solo nu seco e áreas urbanas brilhosas, como telhados de prédios e áreas de concreto, enquanto que imagens fração de baixo albedo destacam coberturas como sombras, água e áreas urbanas escuras, como asfalto. Imagens fração de solo destacam a presença de solos, como em terras agrícolas e as imagens fração de vegetação destacam a presença de florestas e plantações. O ISA é concentrado principalmente nas imagens fração de alto e baixo albedo e, portanto, pode ser obtido a partir da soma destas imagens fração (WENG et al, 2006). Entretanto, as imagens fração de baixo albedo incluem, como mencionado anteriormente, também informações sobre água e sombras enquanto que as de alto albedo incluem informações sobre solos secos. De fato, o comportamento espectral de

superfícies urbanas se confunde com água e sombra, e com solo seco nas imagens fração de baixo e alto albedo, respectivamente. Desta forma, informações sobre a TSC serão utilizadas no presente trabalho para diferenciar superfícies permeáveis das superfícies impermeáveis nas imagens fração urbano (baixo albedo), enquanto que a própria imagem fração solo servirá para estabelecer limiares na imagem fração de alto albedo.

Com base na técnica de modelo linear de mistura espectral, serão também produzidos dois mapas de ISA, antes e depois do COMPERJ, os quais serão comparados com os mapas obtidos a partir do NDVI.

4.7 Análise Estatística do Campo Térmico

A partir da obtenção dos parâmetros acima citados, os valores foram agrupados de maneira a poder correlacioná-los, visando integrar a TSC aos diferentes parâmetros estabelecidos neste trabalho. Assim, foram gerados gráficos de dispersão com auxílio do *software* Matlab onde é possível analisar o comportamento da TSC mediante cada índice, a saber: TSC X NDVI, TSC X IBI, TSC X ISA (com base no NDVI), TSC X ISA (com base no modelo de mistura), todos para o período pré e pós.

Também foi realizada a caracterização da TSC, NDVI, IBI e ISA para as classes de uso e cobertura de solo através dos valores das médias e seus respectivos desvios padrão que possibilitaram a obtenção do índice M de separabilidade, utilizando-se a seguinte equação:

$$M_{p,c1,c2} = \frac{|\mu_{c1} - \mu_{c2}|}{\sigma_{c1} + \sigma_{c2}} \quad (25)$$

Onde:

$M_{p,c1,c2}$ = Índice M para um determinado parâmetro p (TSC, NDVI, IBI e ISA com base no NDVI e no modelo linear de mistura) quando se compara duas classes distintas $c1$ e $c2$;

μ_{c1} = o valor médio em uma determinada classe (vegetação, urbano ou solo exposto);

μ_{c2} = o valor médio em uma outra classe (vegetação, urbano ou solo exposto).

σ_{c1} = o valor de desvio padrão em uma determinada classe;

σ_{c2} = o valor de desvio padrão em uma outra classe.

Exemplificando, para o cálculo do índice M para a TSC entre as classes urbano e vegetação, teremos a seguinte equação:

$$M_{TSC_{u_v}} = \frac{|\mu_{TSC_u} - \mu_{TSC_v}|}{\sigma_{TSC_u} + \sigma_{TSC_v}} \quad (26)$$

O cálculo do índice M foi realizado com o objetivo de verificar a separabilidade entre as classes. Quando o valor de M for maior que 1 ($M > 1$), é considerada alta separabilidade, quando M for menor que 1 ($M < 1$) é considerada baixa a separabilidade.

Vale ressaltar que o termo M se trata do estimador da razão sinal ruído, ou seja, consiste na diferença absoluta entre os valores médios das duas classes que representam o sinal e a soma dos desvios padrão representam o ruído.

5 RESULTADOS

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise temporal da variação termal da área do COMPERJ em dois períodos, a saber: antes e depois da construção do COMPERJ, chamados de período pré e pós, sendo estes compreendidos em 2002 a 2007 e

2008 a 2013. Os resultados estão embasados na TSC, nos índices NDVI, IBI e ISA (realizado sob dois métodos), bem como a variação do uso e cobertura do solo. Primeiramente são apresentados os dois mapas de uso e cobertura do solo, com seus respectivos recortes para enfoque na região do Complexo, seguido pelas imagens que mostram as médias dos índices analisados com seus, também, respectivos recortes. Sequencialmente estão as imagens fração como uma alternativa de análise do ISA com seus respectivos recortes, após, as imagens das médias de temperatura (TSC). Os gráficos de dispersão vêm como apoio à análise de correlação entre a TSC e os demais índices, sendo seguido pelas tabelas comparativas que mostram os valores de média e desvio padrão de cada índice abordado, bem como a TSC em cada classe de uso do solo, finalizando com os valores do índice M de separabilidade que mostra quão alta é a separação de um determinado parâmetro entre as classes. Os valores obtidos apresentaram alterações para os períodos analisados. A seguir, são detalhados os resultados encontrados nessa pesquisa.

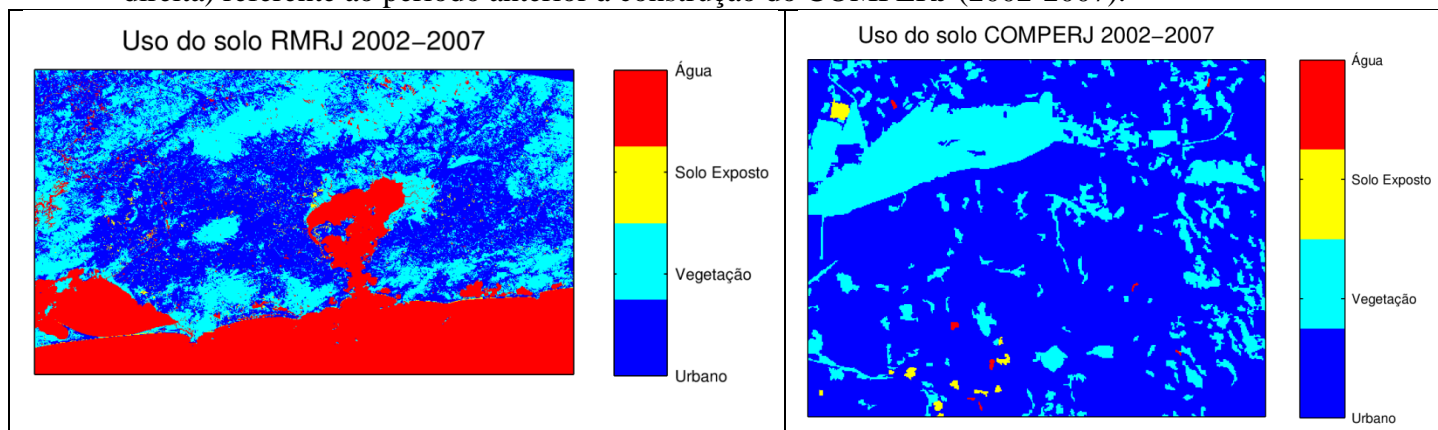
5.1 O mapeamento do uso e cobertura do solo: análise temporal

A Figura 15 à esquerda mostra o mapa de uso e cobertura do solo obtido com uma imagem que representa a condição anterior à construção do COMPERJ (2002-2007) para toda a RMRJ, enquanto que à esquerda exibe uma ampliação para a região do COMPERJ. É possível perceber de acordo com a classificação à esquerda, que extensas áreas da RMRJ foram classificadas como “classe urbano”, ocupando regiões como o centro do Rio de Janeiro, Ilha do Governador, o município de Niterói, incluindo o município de Itaboraí. A região destinada ao COMPERJ - ao leste fluminense - fora classificada como área urbana rodeada por vegetação. Fazendo com que seja notada uma superestimação da área urbana, visto que a área destinada ao COMPERJ era tomada por área de pastagem de gado e cultivo de laranjas (EMBRAPA, 2011). A Figura à direita mostra que a região onde destinava-se a construção do COMPERJ foi erroneamente classificada como urbana. Desta forma, a análise conjunta de ambas aponta uma superestimação da área urbana na classificação realizada no presente trabalho. Ocorrendo, semelhantemente à classificação da classe solo exposto, uma confusão entre áreas urbanas e áreas de solo exposto, o que é esperado pelas características espectrais de alguns solos e material urbano, que apresentam valores altos de albedo. Portanto, notou-se que, pela complexidade das áreas urbanas, se torna relevante levar em conta um número

maior de classes, como rural ou urbano de baixa densidade para que se adeque à realidade da localidade que possui pastos, áreas agrícolas e setores de solo exposto por erosão.

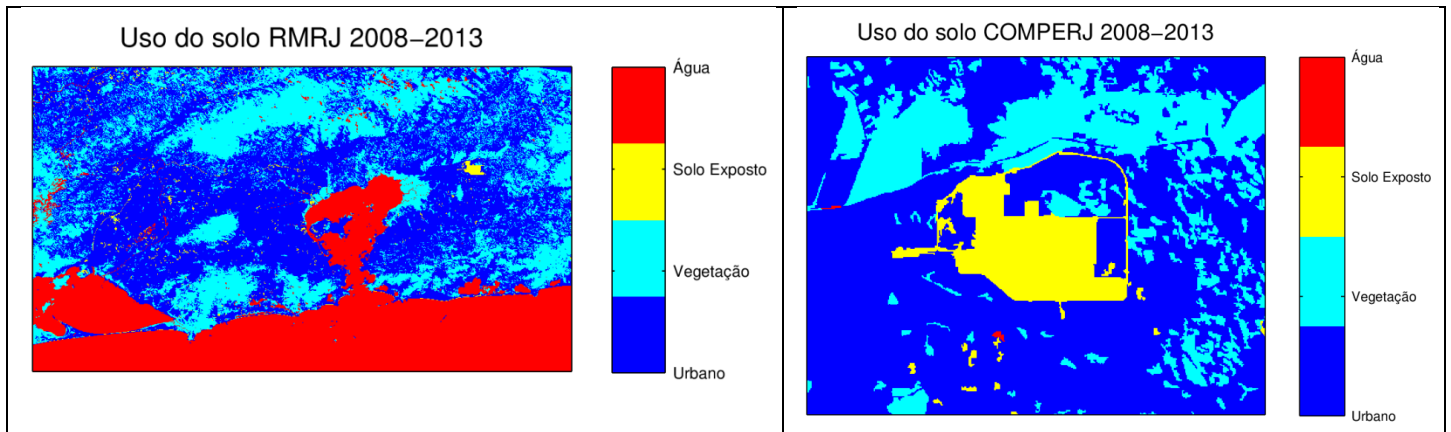
Para o período pós-construção, nota-se na Figura 16 (à esquerda) uma intensificação na área urbana em toda RMRJ, notadamente no noroeste, nordeste e sudeste da RMRJ. Na Figura 16 à direita é mostrado que o COMPERJ passa a ser classificado totalmente como solo exposto o que corresponde ao processo de terraplanagem para implantação do Complexo. Dependendo do estágio da obra, este resultado pode ser considerado também como uma superestimação da classe solo exposto, o que deve ser levando em conta na interpretação dos resultados posteriores, principalmente, a se comparar com os resultados da fração urbana.

Figura 15 - Mapa de uso e cobertura do solo da RMRJ (à esquerda) e da área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Como na Figura 15, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



Fonte: Elaborado pelo autor.

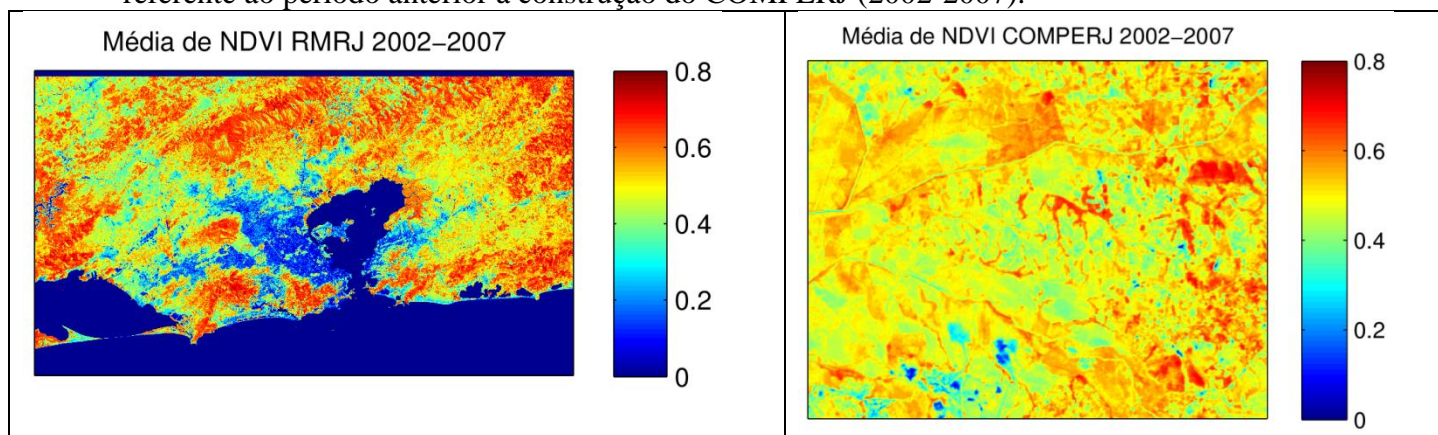
5.2 Média do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

A Figura 17 à esquerda exibe a média de NDVI para o período anterior à construção do COMPEJ para toda área da RMRJ, enquanto que a Figura 17 à direita mostra a ampliação para a região do COMPERJ. Os resultados indicam valores de NDVI entre 0 e 0,2 para a regiões urbanas na RMRJ, como as zonas sul, norte e oeste da cidade do Rio de Janeiro, e na cidade de Niterói. O que já era esperado pois são regiões que possuem intensa urbanização e, portanto, valores mais baixos de NDVI. Vale ressaltar que quanto menor o valor do NDVI menor é a cobertura vegetal da localidade. A ampliação mostra que a região do COMPERJ apresenta valores entre 0,4 e 0,7 indicando a presença de vegetação na região no período anterior à construção, o que se diferencia do resultado que seria esperado analisando somente o mapa de uso do solo que classifica predominantemente a área como urbana e pouquíssimos fragmentos vegetais, reafirmando a sobreestimação da classe urbana. Também é válido ressaltar que os pequenos locais a sudoeste classificados como solo exposto possuem valores próximos a 0 de NDVI.

A Figura 18 mostra o mesmo resultado, só que para o período pós-construção. Observa-se (à esquerda) que tanto os valores como o padrão espacial de NDVI são bem semelhantes aos encontrados para o período pré-construção. A exceção ocorre para as regiões vegetadas que aparecem com valores levemente superior, apontando uma intensificação da vegetação, e para a região do COMPERJ no leste fluminense. Como pode ser observado, a região do COMPERJ (à direita) que antes apresentava uma certa composição de massa vegetal, com valores predominantes próximos entre 0,4 e 0,7, tornou-se escassamente vegetada, com valores predominantes próximos a 0 (zero), indicando a presença de área urbana e/ou solo exposto, neste último caso, correspondente, tanto em valores quanto ao

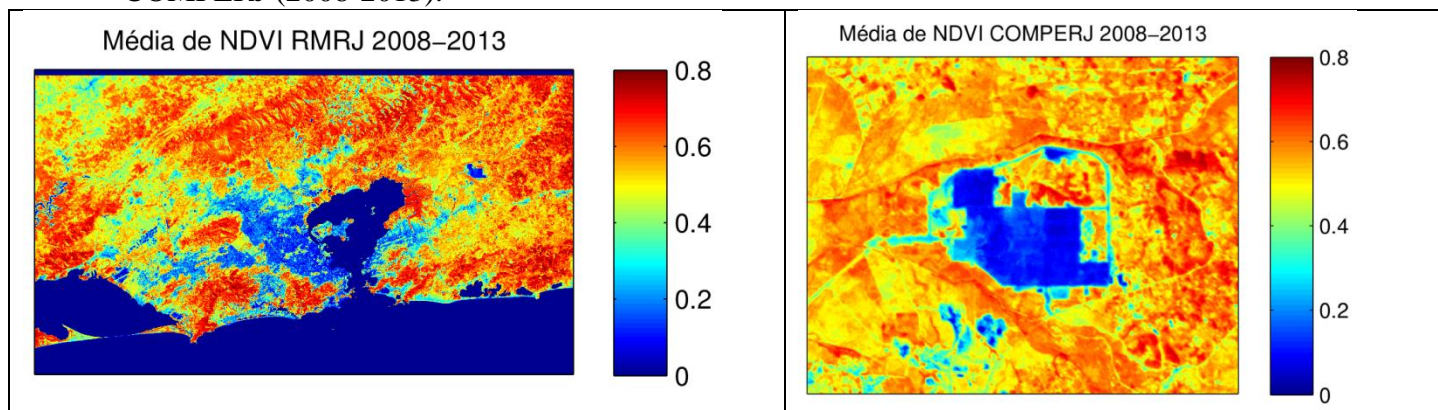
padrão espacial da classificação encontrada no mapa de uso de solo. Pode ser notado, também, pequenas áreas com valores levemente superiores a 0 nas regiões de contorno do Complexo.

Figura 17 - Média de NDVI para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Como na Figura 17, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



Fonte: Elaborado pelo autor.

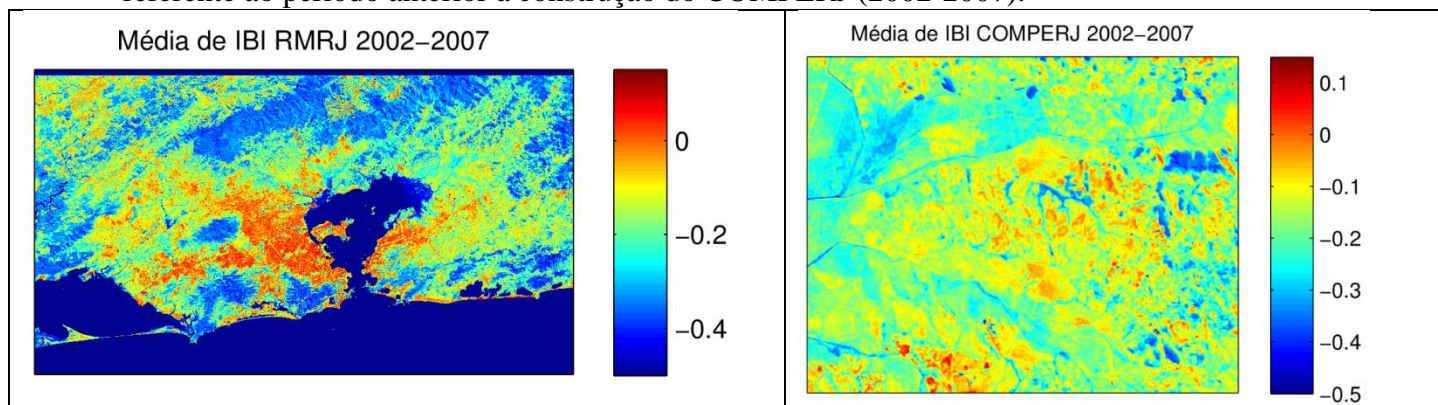
5.3 Média do Índice de Área Construída (IBI)

As Figuras 19 e 20 são similares às figuras de NDVI, mas são referentes ao IBI, que apontam as áreas construídas. É interessante observar que os valores de IBI apresentam o mesmo padrão espacial que o NDVI. Valores de IBI em torno de 0,1 predominam em regiões urbanizadas, como às regiões do Centro do Rio de Janeiro e Niterói. Nota-se também a presença de urbanização no recorte do COMPERJ, com valores entre -0,2 e 0,1, com

predominância de valores entre -0,2 e -0,1 o que pode ser interpretado como regiões de forte urbanização, mas com alguma cobertura vegetal.

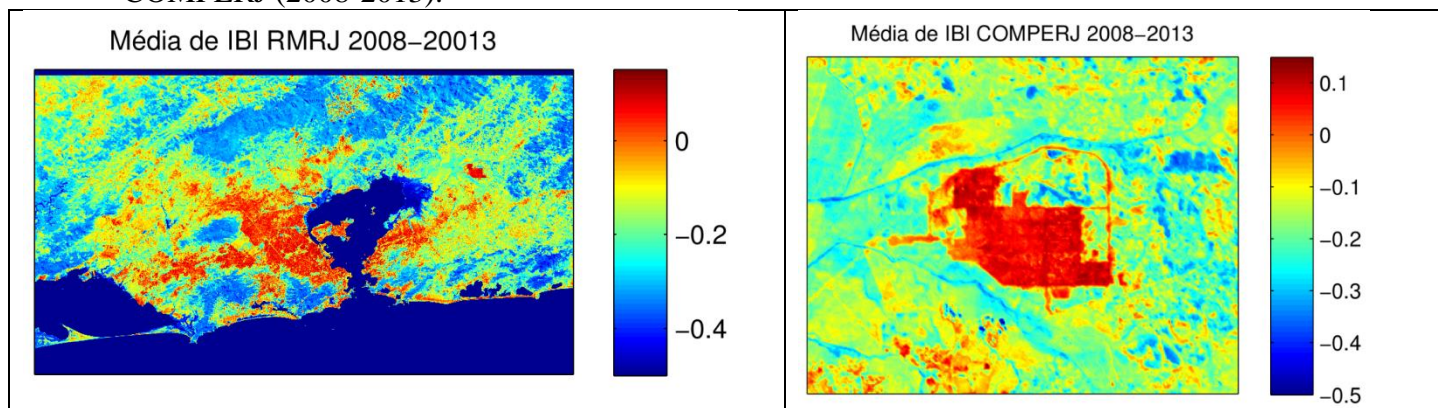
Percebe-se, que para o período mais recente há uma intensificação dos valores de IBI nas regiões conhecidamente urbanas na RMRJ e quase nenhuma variação do padrão espacial dessas regiões com exceção do local destinado ao COMPERJ. Similar ao NDVI, na Figura 20 (à direita) fica visível o aumento do IBI na região do COMPERJ. Este aumento é melhor observado quando se compara as Figuras 19 e 20 (à direita), quando a região do COMPERJ passa de valores em torno de -0,1 antes da construção para valores maiores que 0,1 após a construção, semelhantes àqueles encontrados nas regiões urbanas da Cidade do Rio de Janeiro e Niterói, apontando um comportamento esperado do IBI mediante ao processo de alteração do uso do solo para implementação da obra.

Figura 19 - Média de IBI para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Como na Figura 19, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



Fonte: Elaborado pelo autor.

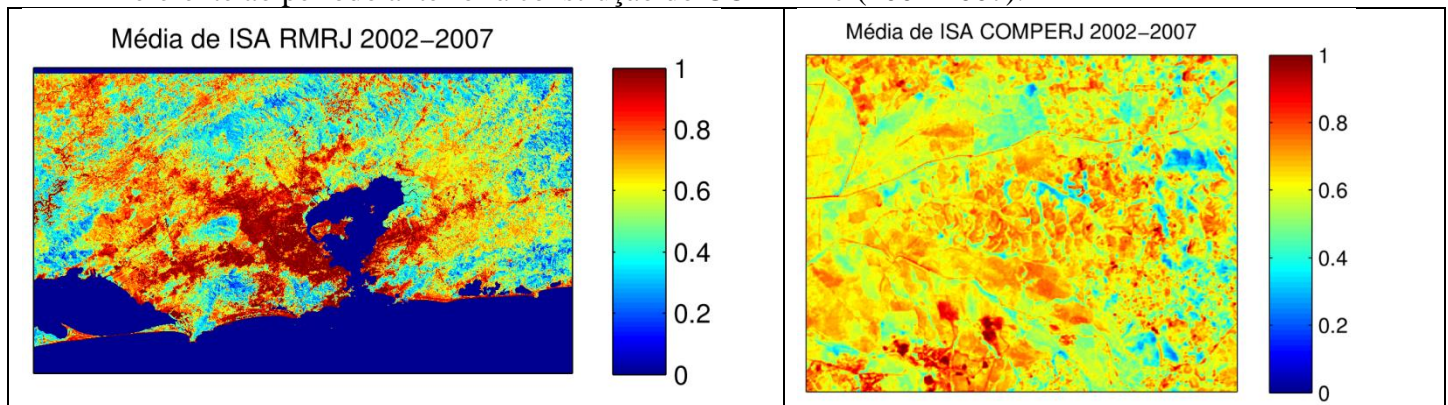
5.4 Índice de Área Impermeável (ISA)

No presente trabalho foram consideradas duas formas para calcular o ISA de maneira que o comparativo entre os valores de ambos pudesse apontar para uma resposta final que mitigasse falsos resultados. São eles: ISA com base no NDVI e o ISA calculado através do método de mistura linear realizado no *software* Spring.

5.4.1 Cálculo do ISA através do NDVI

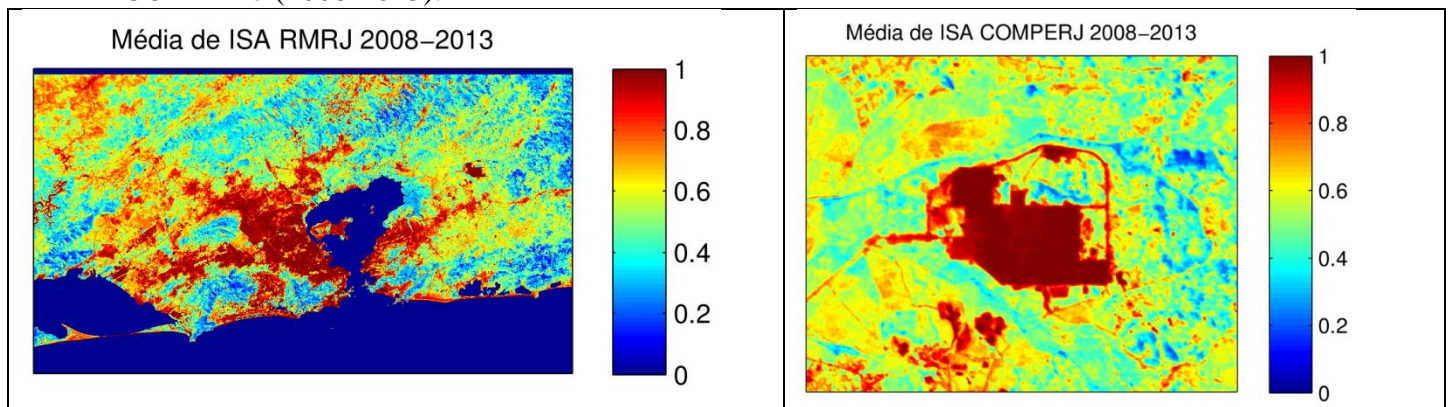
Os resultados mostrados nas Figuras 21 e 22 são bem semelhantes aos encontrados para o NDVI e IBI. Apontando uma redução da área impermeável no oeste fluminense, antes em torno de 70% e na imagem mais recente, 60%. Entretanto comparando-se a área do COMPERJ para o período pré e pós-construção, observa-se que antes à construção os valores de ISA são relativamente elevados entre 50% e 80%, apontando uma certa urbanização no local e que apresenta resultados muito superiores aos encontrados em áreas vegetadas da cidade do Rio de Janeiro (por volta de 20%). E após à construção os valores da região do complexo se assemelham com os valores dos grandes centros, em torno de 100%. Os resultados de ISA nessa seção corroboram com o que fora discorrido na sessão 5.1 sobre a dificuldade entre definir a região como sendo área urbana e/ou solo exposto. Como o ISA é calculado com base no NDVI, valores baixos de NDVI produzem necessariamente valores altos de ISA, o que não, necessariamente, corresponde à uma área impermeável, visto que um solo exposto também apresentará valores baixos de NDVI. Desta forma, no presente trabalho verificou-se a necessidade de uma reanálise realizada com outras ferramentas, no caso, o modelo de mistura linear.

Figura 21 - Média de ISA para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Como na Figura 21, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



Fonte: Elaborado pelo autor.

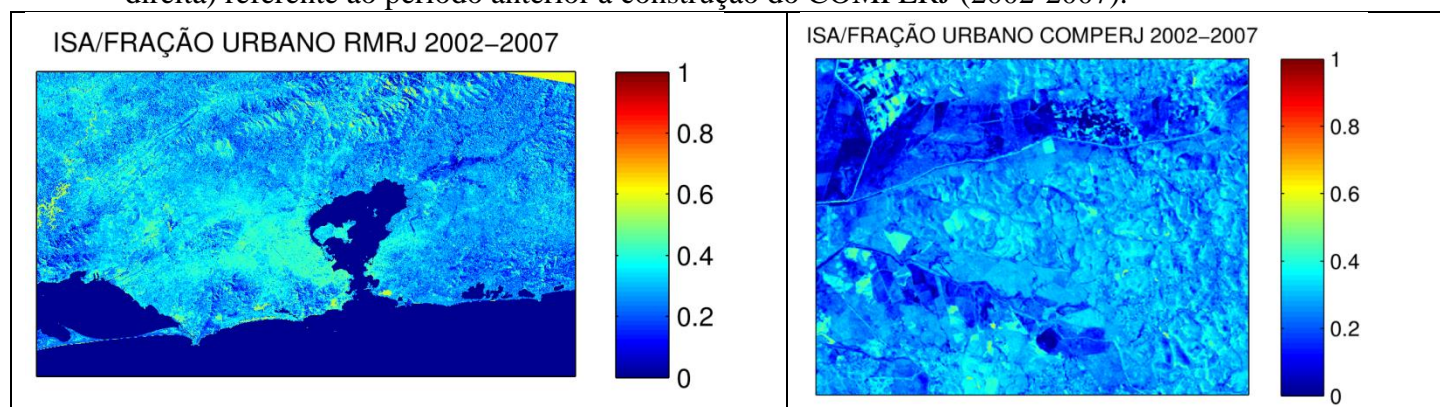
5.4.2 Cálculo do ISA através do modelo de mistura linear

O modelo de mistura linear foi utilizado para separar imagens da RMRJ em frações, a saber: fração urbano, fração solo e fração vegetação; possibilitando uma análise com maior consistência para o ISA. Nesse caso, a imagem fração urbano corresponde a fração de área impermeável, entretanto as outras imagens fração ajudam a compreender melhor os tipos de superfícies que formam a região do COMPERJ, visto que o resultado se refere à escala sub-pixel indicando a porcentagem de cada tipo de superfície, nomeadamente urbana, solo e vegetação, presente no pixel. As Figuras 23 e 24, 25 e 26, e 27 e 28 são referentes às frações urbano, solo e vegetação para o período pré e pró-construção, respectivamente. Para o período pré: As imagens fração urbano, para toda RMRJ mostra valores em torno de 0,4 e 0,5 para regiões mais urbanizadas como o centro do Rio. A fração solo apresentou valores bastante baixos, em torno de 0,4 e 0,3. E a fração vegetação apresentou valores entre 0,3 para as

regiões mais urbanizadas, apontando uma predominância de área urbana. A região do COMPERJ para a fração urbana apresentou valores entre 0,3 e 0,2 mostrando que a região anterior ao início das obras não possuía uma intensidade de urbanização como que a foi vista no mapa do uso do solo, a fração solo apresentou valores em torno de 0,4 e a fração vegetação apresentou valores mais altos entre 0,4 e 0,5. Apontando a predominância de área vegetada e solo exposto, diferentemente do que pode ser notado no mapa de uso do solo, reafirmando a sobrestimação da classe urbana. Para o período pós: Em toda RMRJ nota-se, na fração urbana uma alteração no município do Rio de Janeiro, no oeste fluminense e na região de Niterói. Com valores próximos a 0,5 nos grandes centros urbanos. Para a fração solo, nota-se valores mais inferiores, próximos a 0,2 em toda RMRJ. E, para a fração vegetação nota-se um aumento de 0,1 (de 0,4 para 0,5) principalmente ao longo de toda RMRJ. Para o recorte do COMPERJ, nota-se que a área se dá pela combinação das frações, sendo a fração urbana próximo a 0,5, a fração solo em 0,5 e fração vegetação em 0,0. O que sugere fortemente que o COMPERJ de fato é formado por solo exposto e área urbana.

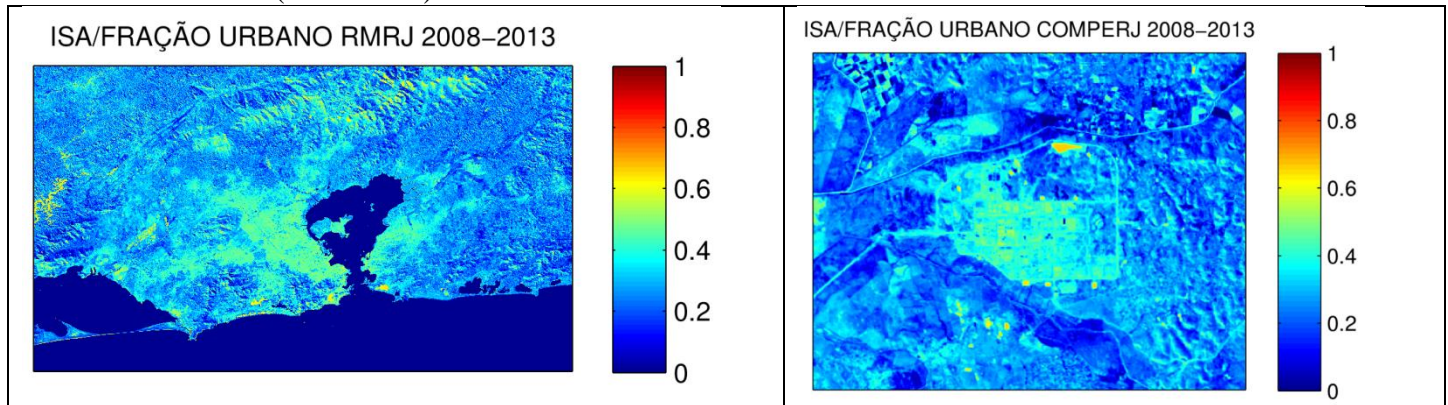
Corroborando com os resultados para fração urbano e solo, os valores da fração vegetação sofreram diminuição após a construção do COMPERJ. Anteriormente, a região possuía valores mais altos em torno de 0,4, inclusive se comparado à outras regiões. Já no período pós-construção, os valores de vegetação atingiram valores muito baixos, por volta de 0,0, semelhantemente à locais de densa urbanização como no município do Rio de Janeiro.

Figura 23 - Imagem fração urbano para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



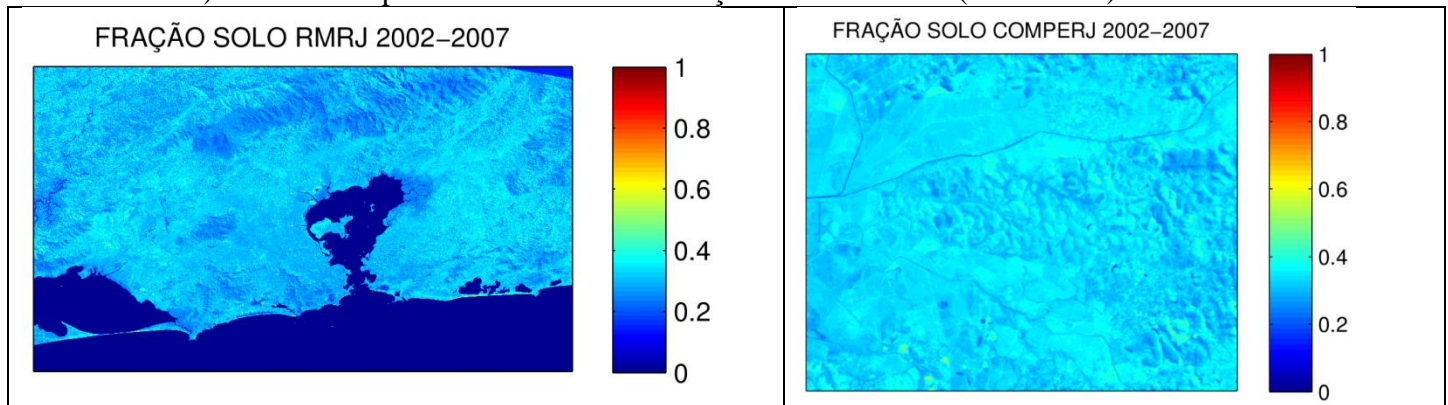
Fonte: Do autor.

Figura 24 - Como na Figura 23, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



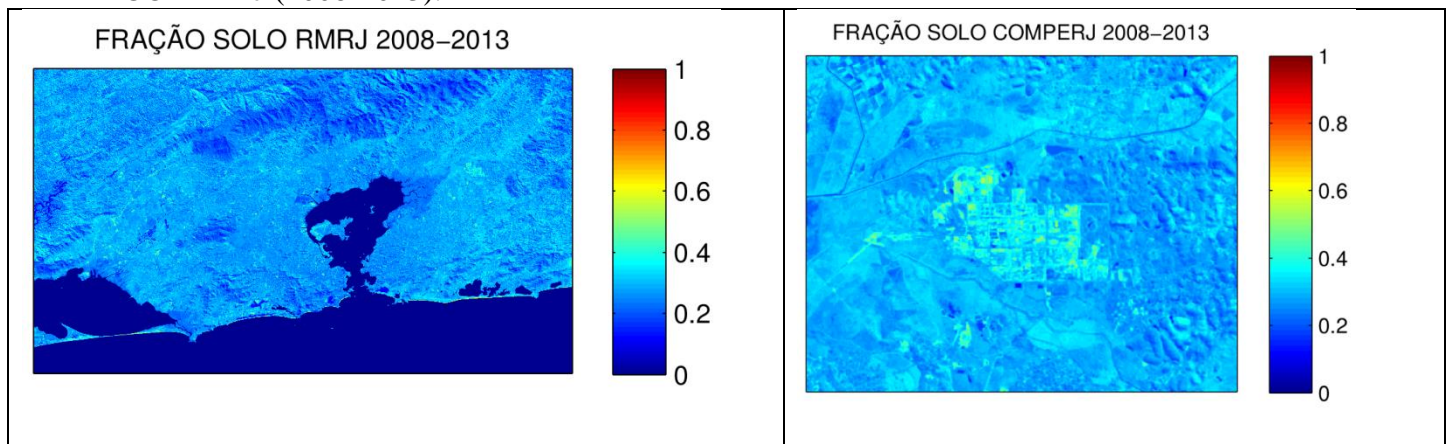
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Imagem fração urbano para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



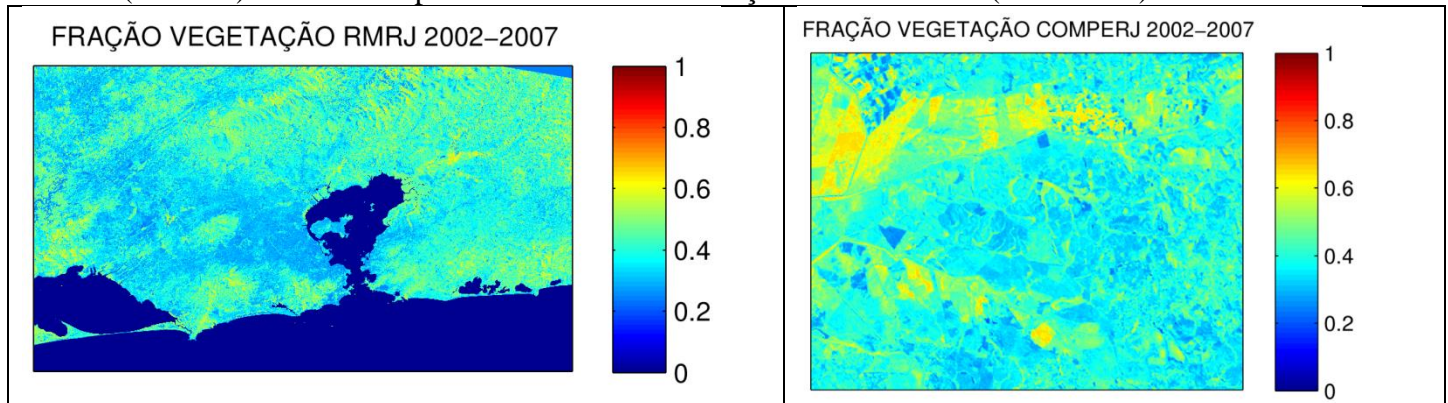
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Como na Figura 25, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



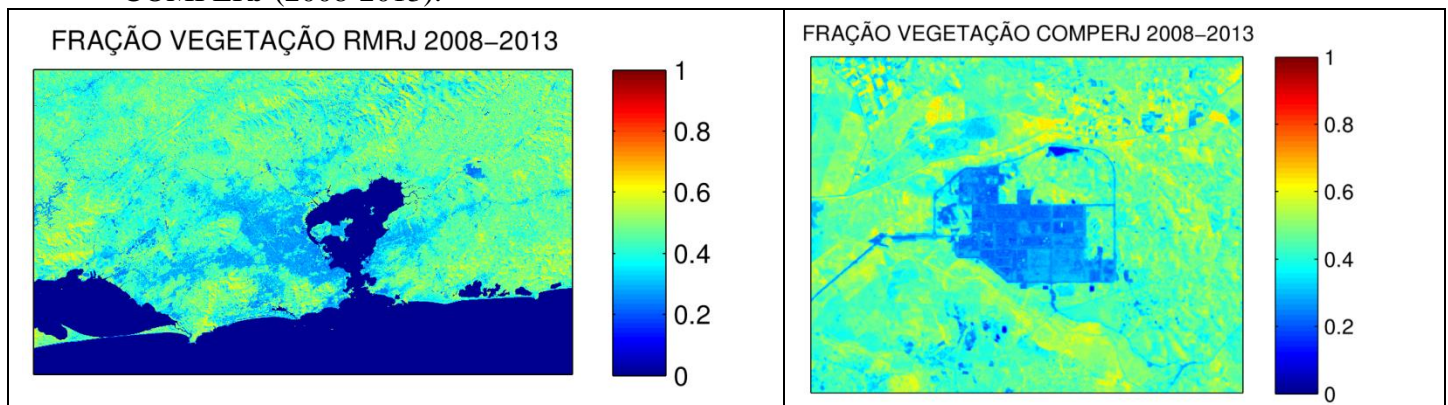
Fonte: Elaborado pelo o autor.

Figura 27 - Imagem fração vegetação para a RMRJ (à esquerda) e para a área do COMPERJ (à direita) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



Fonte: Elaborado pelo autor.

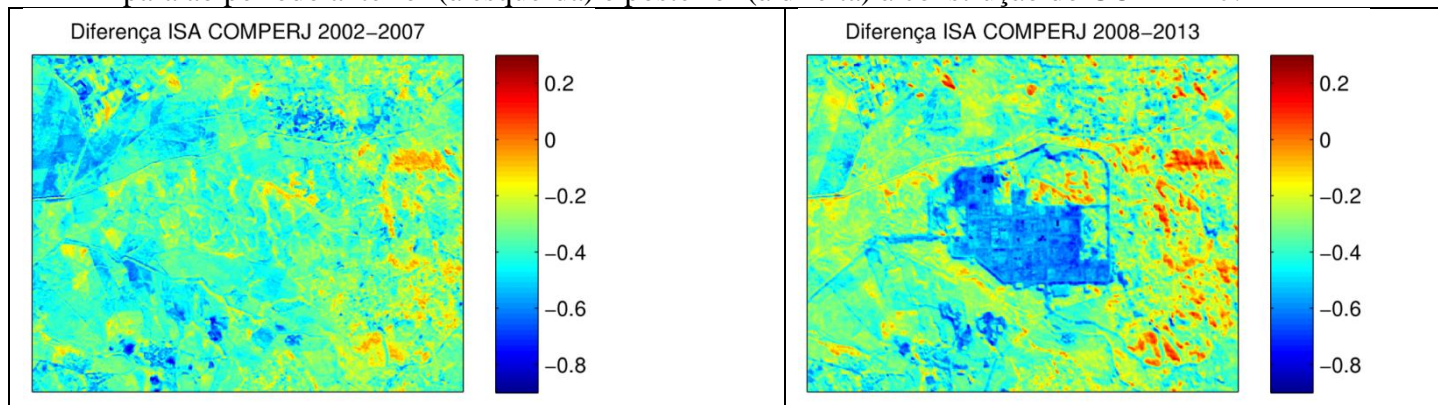
Figura 28 - Como na Figura 27, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Deste modo, foi possível realizar a diferença entre o ISA com base no NDVI e o ISA com base no modelo de mistura linear. A Figura 29 mostra espacialmente esta diferença para o período pré-construção (à esquerda) e pós-construção (à direita). Comparando a fração urbano do modelo de mistura linear (próximo à 0,5) e o ISA com base no NDVI (próximo à 1), observa-se que esta diferença é em torno de -0,5 para o período pós-construção conforme mostrado pela Figura 29, ressaltando a relevância deste método aplicado para averiguação do ISA.

Figura 29 - Diferença entre ISA com base no modelo de mistura linear e com base no NDVI para ao período anterior (à esquerda) e posterior (à direita) à construção do COMPERJ.



Fonte: Elaborado pelo autor.

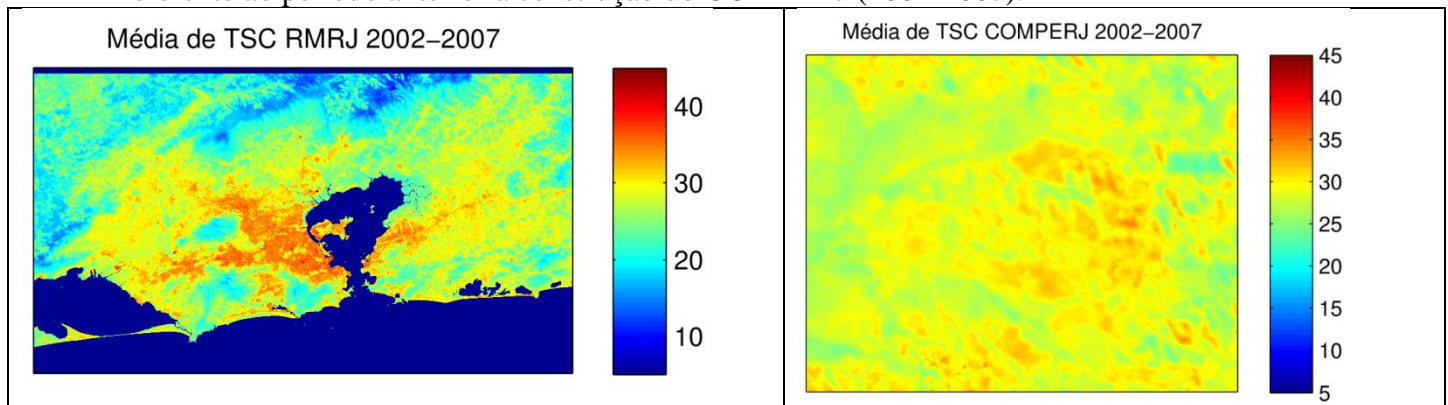
5.5 Temperatura da Superfície Continental (TSC)

As imagens referentes as médias de TSC para os períodos pré e pós mostrando alteração na temperatura e no padrão espacial conforme pode ser visto a seguir.

5.5.1 Média da TSC

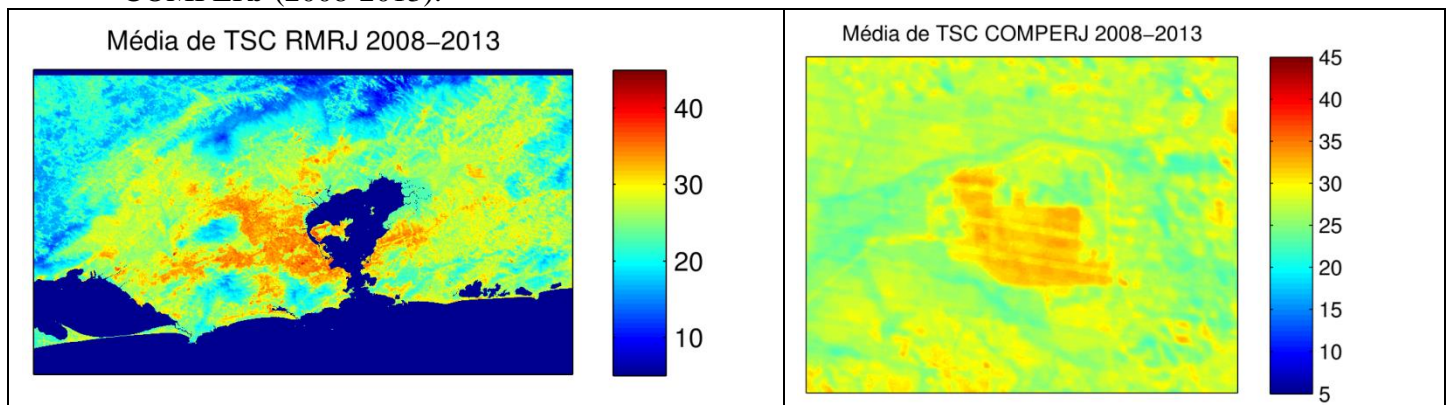
As Figuras 30 e 31 mostram a média de TSC para o período pré e pós-construção do COMPERJ, respectivamente. Os resultados não mostram nenhuma variação significativa da TSC sobre a RMRJ quando se comparar os dois períodos analisados. De fato, o período mais recente apresenta valores de TSC ligeiramente menores que o período mais antigo. Em termos espaciais, observa-se valores de TSC por volta de 35°C e 25°C em regiões urbanas e vegetadas, respectivamente. A região do COMPERJ é a única localidade que apresenta valores ligeiramente mais elevados e mais bem definidos espacialmente quando se compara os dois períodos. Pelos dois períodos analisados podemos concluir que a área do COMPERJ antes da construção não era formada inteiramente por vegetação, haja visto que os valores de TSC são bem elevados quando comparados com regiões vegetadas presentes na RMRJ (como a floresta da Tijuca que apresenta valores em torno de 20°), com valores em torno de 30° no período pré, assume valores próximos a 35° no período pós. Esse fato aponta a ligação entre a variação de temperatura da superfície mediante alteração do uso do solo, com um aumento de, aproximadamente, 5°.

Figura 30 - Média de TSC para a RMRJ (à direita) e para a área do COMPERJ (à esquerda) referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Como na Figura 30, mas referente ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.2 Relação da TSC com os demais parâmetros

Nesta seção mostra-se a correlação entre a TSC e os demais índices, com as Figuras 32 a 35 mostrando a relação, em forma de gráficos de dispersão, entre a TSC e o NDVI, IBI, ISA com base no NDVI e ISA com base no modelo linear de mistura, respectivamente, para antes e após a construção do COMPERJ, os gráficos apresentam cores que se referem aos pixels das classes vegetação, urbana e solo exposto, ou seja, pixels vermelhos representam áreas urbanas, pixels verdes representam áreas vegetadas, pixels amarelos representam solo exposto. Em seguida as correlações são encontradas descritas nos Quadros 13 e 14.

A Figura 32 refere-se a TSC em relação ao NDVI. Conforme esperado, identificou-se uma correlação negativa entre a TSC e NDVI com valor de $R = -0,56$, os pixels verdes acumulam-se próximos aos valores mais altos de NDVI, entre 0,4 e 0,7 e, conseqüentemente, a valores mais baixos de TSC, entre 24° e 30° , em oposição aos pixels vermelhos que

representam áreas urbanas que encontram-se com uma aglomeração maior próximos a valores de 32° e 34° , indicando que áreas mais (menos) vegetadas apresentam menores (maiores) valores de TSC, corroborando com o importante papel da vegetação na mitigação da variação do campo termal e conseqüentemente o favorecimento a formação da Ilha de Calor Urbana. É visível também que essa relação (também negativa) é bem definida para o período após a construção, com valor de $R = -0,78$, e nota-se o surgimento de uma aglomeração maior de pixels amarelos, indicando solo exposto próximos a valores mais altos de TSC, entre 28° e 34° e, conseqüentemente, à valores menores de NDVI, entre 0,1 e 0,3.

Na Figura 33, por outro lado, observa-se uma correlação positiva muito bem definida, com valor de $R = 0,74$ para o período pré e $R = 0,86$ para o período pós, entre a TSC e o IBI. Na figura 33 à esquerda, nota-se uma aglomeração maior de pixels verdes, que indica áreas vegetadas associadas à valores mais baixos de IBI, entre -0,4 e -0,1 e nota-se poucos pixels associados à solo exposto, conforme esperado e visto no mapa de uso do solo (Figuras 15 e 16). Para o período pós-construção novamente é notada a expansão do solo exposto, com pixels relacionados a valores mais altos de IBI, entre 0 e 0,1, bem como à valores mais altos de TSC, entre 28° e 34°. Também pode ser notado uma redução de pixels associados à áreas urbanas, possivelmente relacionado ao processo de terraplanagem efetuado para o preparo da região para alocação do Complexo que ainda permanece em obras.

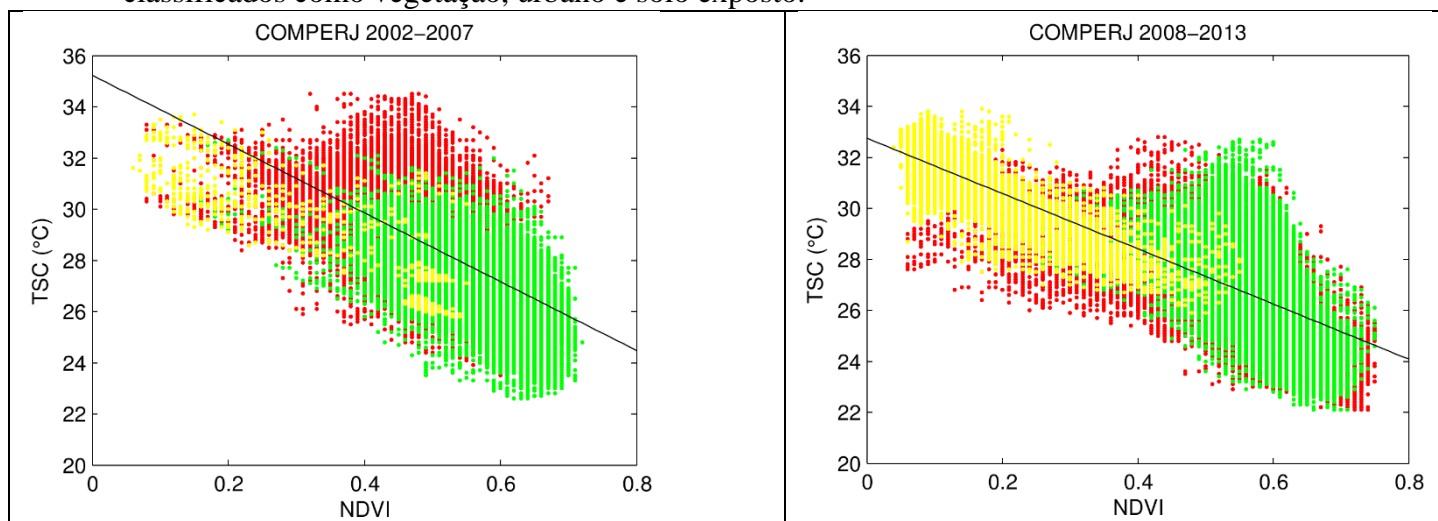
A Figura 34 mostra o comportamento do ISA, que como é estimado com base no NDVI, o padrão de comportamento entre a TSC e o ISA mostrado na Figura 34 é bem parecido com o observado entre a TSC e o NDVI (Figura 32), exceto pelo fato da correlação ser positiva neste caso ($R = 0,57$ para o período pré e $R = 0,79$ para o período pós).

Por último, a Figura 35 exhibe a relação entre a TSC e o ISA com base no modelo de mistura linear e os resultados indicam uma relação não tão bem definida se comparado aos outros índices. Valores de R mais baixos foram encontrados tanto para o período pré quanto para o período pós, sendo eles $R = 0,36$ e $R = 0,34$, respectivamente, entre as duas variáveis. O que pode ser explicado pelo fato do modelo linear de mistura considerar a região do COMPERJ uma combinação entre diferentes materiais e com uma porcentagem de área urbana de no máximo de 50% em grande parte dos pixels presentes na região. Nota-se uma aglomeração de pixels referentes às áreas vegetadas próximos aos valores de 26° e 29° de TSC. O que se observa de interessante, como nas demais relações, é um aumento do número de pixels associados à altos valores de solo exposto, e uma redução de pixels associados à área urbana, que são os que, de fato, representam áreas impermeáveis, apontando, portanto, a

falha em se estimar o ISA com base no NDVI que indicou as áreas de solo exposto como sendo impermeáveis, situação não verdadeira.

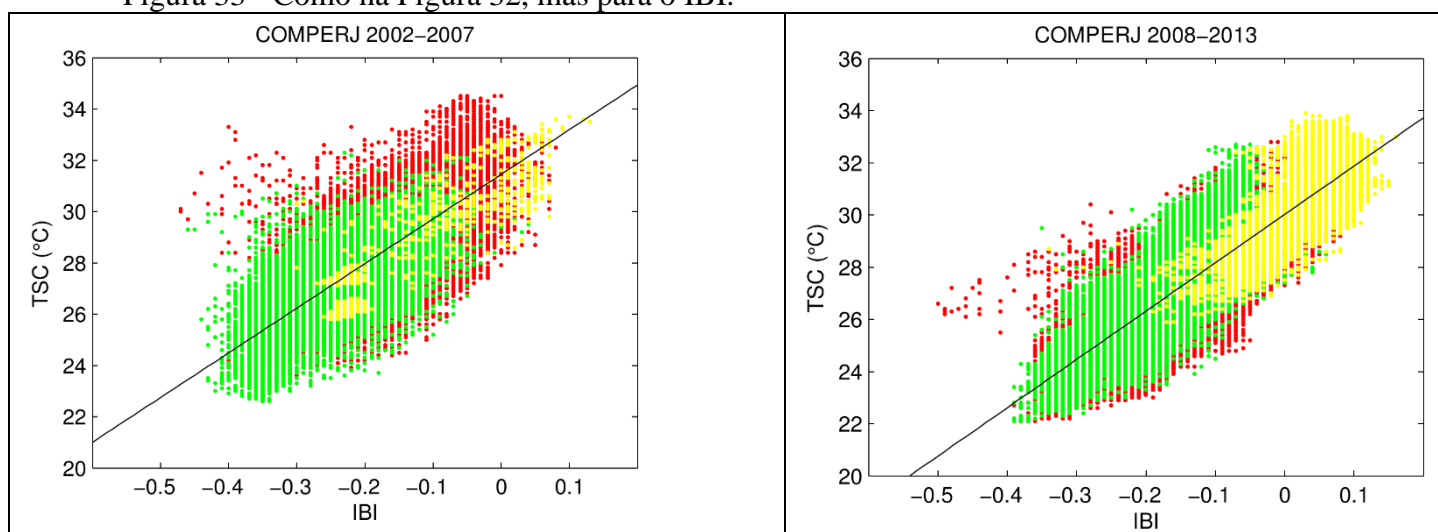
Deste modo os resultados mostram que a TSC se relaciona melhor com o IBI, principalmente para o período pós-construção, o que pode indicar indiretamente que o IBI é um bom índice para mapear regiões urbanas, já que a TSC é um parâmetro físico. Unindo-se à análise de ISA com base no modelo de mistura para averiguação da diferenciação entre área construída e áreas de solo nu.

Figura 32 - Gráfico de dispersão entre a TSC e o NDVI mostrando a relação entre as duas variáveis para o período anterior (à esquerda) e posterior (à direita) à construção do COMPERJ. Os pontos verdes, vermelhos e amarelos indicam respectivamente pixels classificados como vegetação, urbano e solo exposto.



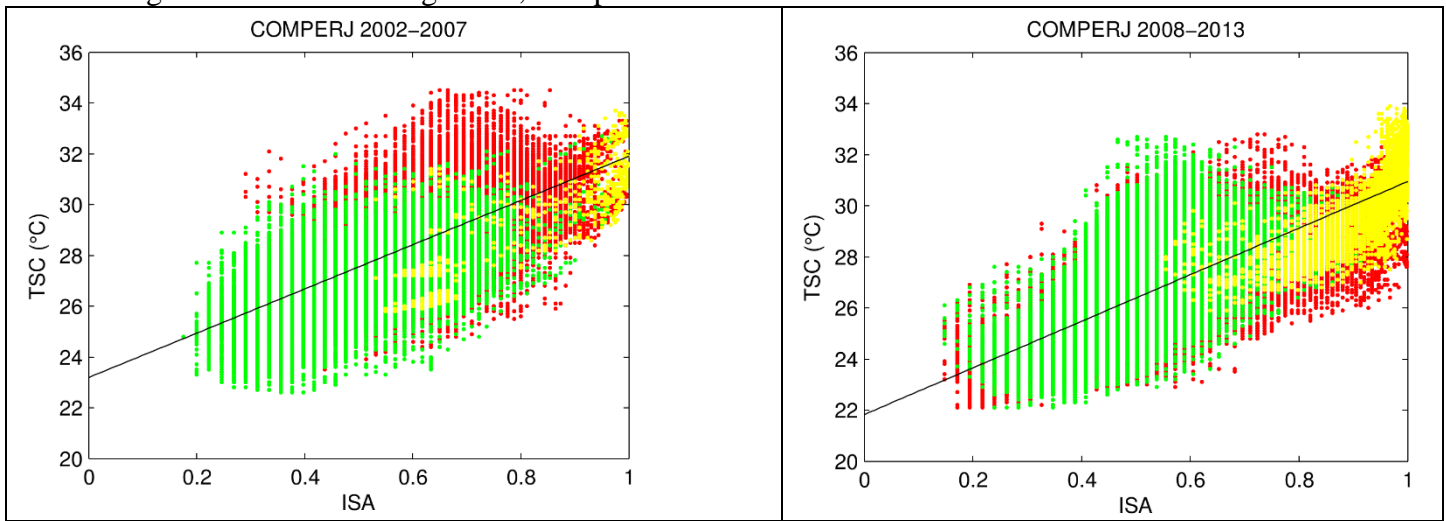
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Como na Figura 32, mas para o IBI.



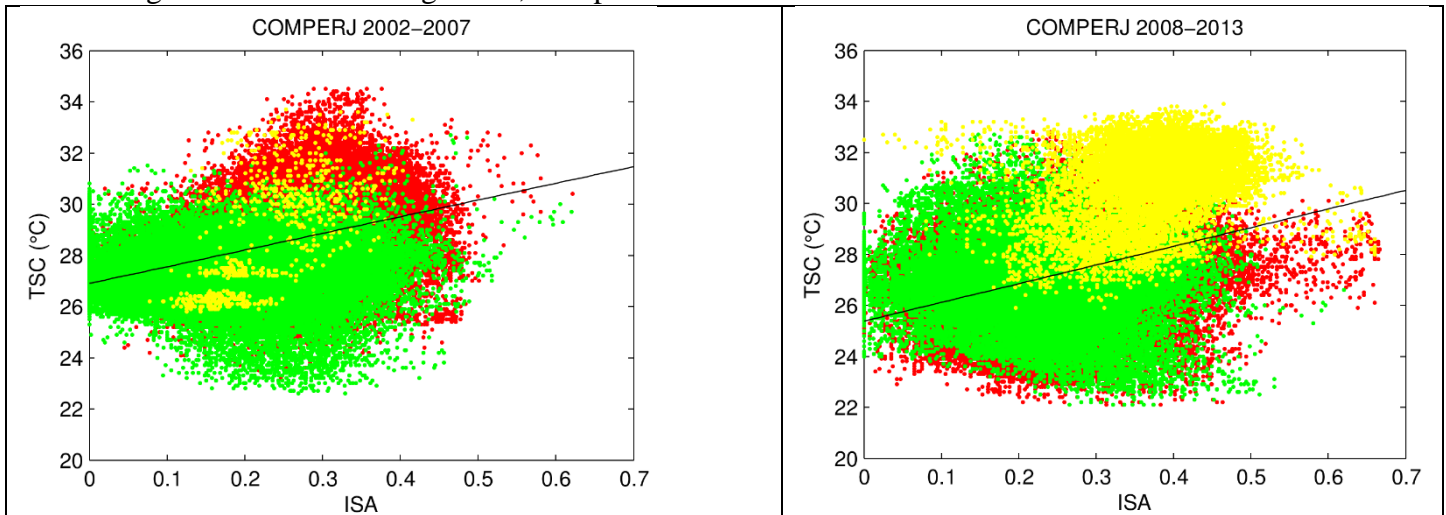
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Como na Figura 32, mas para o ISA com base no NDVI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Como na Figura 32, mas para o ISA com base no modelo de mistura linear.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 13: Coeficientes de correlação dos gráficos de dispersão para o período pré.

		2002 - 2007	
		TSC (°C)	
X	Y	Equação	Correlação (R)
		NDVI	A = - 13, 4365 B = 35,2269
	IBI	A = 17,4098 B = 31,4499	R = 0,7406

ISA_NDVI	A = 8,7092 B = 23,1912	R = 0,5680
ISA_MLM	A = 6,5163 B = 26,9006	R = 0,3587

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 14: Coeficientes de correlação dos gráficos de dispersão para o período pós.

2008 - 2013		
X \ Y	TSC (°C)	
	Equação	Correlação (R)
NDVI	A = - 10,8329 B = 32,7479	R = - 0,7860
IBI	A = 18,5218 B = 30,0189	R = 0,8598
ISA_NDVI	A = 9,1206 B = 21,8258	R = 0,7882
ISA_MLM	A = 7,3309 B = 25,3781	R = 0,3448

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Caracterização da TSC, NDVI, IBI e ISA para as Classes de Uso e Cobertura de Solo

Os Quadros 15 e 16 mostram os valores de média e desvio padrão de TSC, NDVI, IBI e ISA, referentes às classes urbano, solo e vegetação, para a região do COMPERJ antes e após a construção, respectivamente. Para o período pré, quando se compara as médias de Temperatura entre as classes percebe-se que a TSC é menor na classe vegetação, que, conforme esperado possui o valor mais alto de NDVI e que a diferença da classe solo e urbano entre a média da classe vegetação é de 1,9 e 1,6 °C, respectivamente. Mais uma vez é

importante notar, que a classe com menor valor de NDVI, i.e., solo exposto, apresenta maior valor de TSC, mostrando a importância da vegetação no controle da TSC.

No período pós-construção, como a área de construção do COMPERJ foi classificada como solo exposto, as diferenças entre essa classe e as demais são mais marcantes. Para esse período, por exemplo, a diferença da classe solo e urbano entre a média da classe vegetação é de 3,2 e 0,0°C, respectivamente. Quando se compara esses valores com o período anterior, percebe-se que há uma intensificação da diferença de temperatura entre solo e vegetação em 1,3°C. Os demais parâmetros referentes à classe solo para o período pós-construção apresentam uma variação acentuada. O IBI, o ISA com base no NDVI e o ISA com base no MLM aumentaram seus valores respectivamente de -0,16 para 0,05, 0,63 para 0,96 e 0,26 para 0,38, enquanto o NDVI diminuiu de 0,49 para 0,15.

Quadro 15 - Média e desvio padrão de TSC, NDVI, IBI e ISA referentes às classes urbano, solo e vegetação para o período pré-construção do COMPERJ.

2002-2007	Urbano		Vegetação		Solo	
	$\bar{\mu}$	σ	$\bar{\mu}$	σ	$\bar{\mu}$	σ
TSC (°C)	28,9	1,4	27,3	1,2	29,2	2,2
NDVI	0,49	0,06	0,54	0,06	0,33	0,16
IBI	-0,16	0,06	-0,23	0,06	-0,11	0,11
ISA_NDVI	0,63	0,09	0,55	0,11	0,80	0,16
ISA_MLM	0,26	0,06	0,18	0,10	0,24	0,07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 16 - Como no Quadro 15, mas para o período pós-construção do COMPERJ.

2008-2013	Urbano		Vegetação		Solo	
	$\bar{\mu}$	σ	$\bar{\mu}$	σ	$\bar{\mu}$	σ
TSC (°C)	26,9	1,5	26,9	1,5	31,1	1,3
NDVI	0,53	0,08	0,56	0,06	0,15	0,09
IBI	-0,16	0,06	-0,18	0,06	0,05	0,05
ISA_NDVI	0,57	0,12	0,53	0,10	0,96	0,05
ISA_MLM	0,26	0,08	0,22	0,09	0,38	0,07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os quadros 17 e 18 abaixo, mostram os resultados do índice M encontrado para analisar a separabilidade entre as classes acima para ambos os períodos. Sabendo que é considerado como alta separabilidade os valores de M maiores que 1 ($M > 1$) e que é considerado como baixa separabilidade os valores de M menores que 1 ($M < 1$), pode-se

afirmar que para o período pré, as classes não apresentaram valores de separabilidade elevados, apontando parâmetros não tão bem definidos de acordo com as diferentes classes, com exceção das classes vegetação e solo que apresentaram valores mais próximos de 1 para NDVI e ISA com base no NDVI, 0,95 e 0,93 respectivamente. Entre urbano e solo, a TSC demonstrou uma pobre distinção por classe, que pode ser explicado pelos altos valores de desvio padrão (1,4°C e 2,2°C respectivamente – vide Quadro 17).

Quadro 17 – Índice M de separabilidade referentes às classes urbano, vegetação e solo exposto para cada índice no período pré-construção do COMPERJ.

Índice M			
2002 - 2007	Urbano X Vegetação	Urbano X Solo	Vegetação X Solo
TSC	0,62	0,08	0,56
NDVI	0,42	0,72	0,95
IBI	0,58	0,29	0,71
ISA_NDVI	0,40	0,68	0,93
ISA_MLM	0,50	0,15	0,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o período pós, nota-se definições maiores entre as classes urbano e solo e vegetação e solo, principalmente na TSC, NDVI, IBI e ISA com base no NDVI. Apontando para a expansão da área que ocorreu para alocação do Complexo, a qual foi classificada como solo exposto, e que anteriormente tinha sido classificada como urbana no período pré-construção. Nota-se uma baixa definição entre as classes urbano e vegetação, pois a área classificada como urbana não é de fato uma região urbanizada, o que pode ser observado principalmente na TSC que apresentou $M = 0,0$, apresentando mesmo valor de média (26,9°C) e de desvio padrão (1,5°C) para ambas as classes, o que aponta para um resultado proveniente de uma classificação falha.

Quadro 18 – Como no Quadro 17, mas para o período pós-construção do COMPERJ.

Índice M			
2008 - 2013	Urbano X Vegetação	Urbano X Solo	Vegetação X Solo
TSC	0,00	1,50	1,50
NDVI	0,21	2,23	2,73
IBI	0,17	1,90	1,18
ISA_NDVI	0,18	2,30	2,87
ISA_MLM	0,23	0,80	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

O objetivo do presente estudo foi analisar a variação da TSC associada a alteração da cobertura e uso do solo ao redor da região de construção do COMPERJ utilizando dados de sensoriamento remoto nomeadamente, dos sensores TM, ETM+, e OLI e TIRS a bordo dos satélites Landsat-5, 7 e 8, respectivamente. Neste contexto, um total de 58 imagens da RMRJ cobrindo os anos de 2002 a 2013 foram utilizadas no trabalho. Esta série temporal de imagens foi dividida em dois conjuntos referentes ao período anterior (2002 a 2007) e posterior (2008 a 2013) à construção do COMPERJ, com o intuito de averiguar as mudanças causadas pela implementação do Complexo. Os dois conjuntos possuem o mesmo número de anos (6) e imagens (29) e para cada período calculou-se a média da TSC e também de diferentes índices como o NDVI, IBI e ISA, que foram posteriormente correlacionados com a TSC e deram suporte para a análise da variação desta entre os dois períodos. Adicionalmente, duas imagens de cada período foram escolhidas para a confecção de mapas de uso do solo representando a região antes e depois da construção. Vale ressaltar que o cálculo do ISA foi realizado com base no NDVI e também com base no MLM, os quais foram posteriormente comparados.

A análise desenvolvida no trabalho demonstra que a classificação de uso e cobertura do solo realizada apresentou resultados inconsistentes, onde áreas extensas da RMRJ foram classificadas como área urbana para o período anterior à construção, inclusive a região destinada ao COMPERJ. Desta forma, foi notada uma superestimação da área urbana em toda a RMRJ, e de forma marcante, por exemplo, na área destinada ao COMPERJ, onde a EMBRAPA (2011) classificava esta região como tomada por pastagem de gado e cultivo de laranjas. Apesar da superestimação no período pré-construção, nota-se ainda assim uma intensificação na área urbana em toda RMRJ para o período pós-construção, notadamente no noroeste, nordeste e sudeste da RMRJ. Por outro lado, o COMPERJ passa a ser classificado como solo exposto, apontando erroneamente que esta área era urbana e que posteriormente foi transformada para solo. Percebeu-se uma confusão entre áreas urbanas e áreas de solo exposto, o que pode se esperado pelas características espectrais de alguns solos e material urbano, que apresentam valores altos de albedo. Portanto, pela complexidade de áreas urbanas, se torna relevante levar em conta um número maior de classes, como rural ou urbano de baixa densidade para que se adeque principalmente à realidade da localidade estudada que possui pastos, áreas agrícolas e setores de solo exposto por erosão. Neste contexto, a análise

da própria TSC, em conjunto com os demais índices permitiram um exame mais consistente sobre a cobertura local e o efeito desta na TSC. Por exemplo, os resultados de NDVI para toda a RMRJ indicam valores característicos entre 0 e 0,2 para a região urbana e entre 0,6 e 0,8 para região de vegetação densa, e.g. Floresta da Tijuca e Região Serrana. Para o período pré-construção verificou-se que a região do COMPERJ apresentava valores de NDVI intermediários entre 0,4 e 0,6 indicando justamente a presença de uma área mista, nem correspondente a uma área urbanizada e nem a uma área completamente vegetada, diferenciando-se do resultado apresentado pelo mapa de uso do solo que classifica a área predominantemente como urbana. Posteriormente, a região do COMPERJ torna-se escassamente vegetada, com a predominância de valores próximos a zero, indicando a presença de área urbana e/ou solo exposto, neste último caso, correspondente ao indicado pelo mapa de uso de solo. O IBI mostrou comportamento semelhante ao NDVI, com valores intermediários para a região do COMPERJ durante o período pré-construção, passando a valores típicos de áreas urbanas após a construção. Como esperado, no caso do ISA com base no NDVI, os resultados foram bem semelhantes aos encontrados para o NDVI. Isto é, com valores intermediários entre 50% e 80% para o período pré-construção (superiores aos valores em torno de 20% encontrados em regiões vegetadas da RMRJ) e um aumento para 100% após a construção (semelhantes aos valores dos grandes centros).

Esta análise conjunta nos permitiu concluir que é extremamente difícil definir a região de construção tanto para o período pré-construção como para o período pós-construção, visto que para o primeiro, a região apresenta valores intermediários para todos os índices, indicando que esta pode ser constituída por uma mistura de vegetação mais escassa e solo exposto, enquanto que para o segundo período, todos os índices indicam valores típicos de área urbana e/ou solo exposto. Neste contexto, o MLM foi também utilizado para se obter o ISA, já que este separa as imagens em diferentes frações (urbana, solo e vegetação), onde a fração urbana corresponde a fração de área impermeável. Adicionalmente, as outras imagens fração ajudam a compreender melhor os tipos de superfícies que formam a região do COMPERJ, visto que o resultado se refere à escala sub-pixel indicando a porcentagem de cada tipo de superfície, nomeadamente urbana, solo e vegetação, presente no pixel. Anteriormente a obra, a região do COMPERJ apresentou valores entre 0,2 e 0,3, em torno de 0,4, e entre 0,4 e 0,5 para a fração urbana, solo e vegetação, respectivamente, mostrando que inicialmente a região era principalmente composta por vegetação e solo. Posteriormente, observa-se um aumento mais expressivo na fração urbana e um menos expressivo no solo e uma diminuição drástica na

vegetação, sendo a fração urbana próximo a 0,5, a fração solo também em torno de 0,5 e a fração vegetação passando para 0,0. Desta forma, resultados com base nos índices analisados e no MLM sugerem que anteriormente, a região do COMPERJ era formada por vegetação e solo exposto e que atualmente é formada por solo exposto e área urbana.

A análise da variação da TSC também corrobora os resultados obtidos com os índices, visto que os valores de TSC para área do COMPERJ antes da construção são bem mais elevados do que aqueles encontrados em regiões vegetadas presentes na RMRJ, o que nos leva a crer que a região não era formada inteiramente por vegetação. Por outro lado, a região do COMPERJ apresenta valores ligeiramente mais elevados e bem definidos espacialmente quando se compara os dois períodos, com valores em torno de 30°C no período pré-construção e valores próximos a 35°C no período pós.

A TSC também foi relacionada com cada índice, mostrando que a TSC é inversamente (diretamente) proporcional ao NDVI (IBI e ISA), indicando que áreas mais (menos) vegetadas apresentam menores (maiores) valores de TSC, confirmando o importante papel da vegetação na mitigação da variação do campo termal e conseqüentemente do favorecimento da formação do fenômeno de ICU.

A maior correlação absoluta ($R = 0,85$) foi obtida com o IBI para o período pós-construção, o que pode indicar indiretamente que este índice pode ser o melhor entre os analisados para mapear áreas construídas, visto que a TSC é um parâmetro físico. Apesar das falhas na classificação realizou-se uma caracterização com base na média e desvio padrão dos parâmetros TSC, NDVI, IBI e ISA de acordo com cada classe para o período pré e pós. Por esta razão, vale ressaltar que neste caso a análise foi realizada dando ênfase à localização espacial do COMPERJ visto que a classificação produziu resultados inconsistentes. Para o período pré (pós) a diferença de TSC entre a área do COMPERJ e área de vegetação foi de 1,9°C (3,2°C). A comparação entre esses dois valores mostra uma intensificação de 1,3°C entre os períodos pré e pós. O IBI, o ISA com base no NDVI e o ISA com base no MLM aumentaram seus valores respectivamente de -0,16 para 0,05, 0,63 para 0,96 e 0,26 para 0,38, enquanto o NDVI diminuiu de 0,49 para 0,15. Adicionalmente, utilizou-se o índice M de separabilidade para analisar a distinção dos parâmetros entre as diferentes classes. Para o período pré, todos os parâmetros mostraram valores de $M < 1$ quando se compara a área do COMPERJ com as demais, enquanto que após a construção todos os parâmetros, exceto o ISA com base no MLM, apresentam $M > 1$.

Apesar da dificuldade encontrada em estabelecer a composição da área do COMPERJ para ambos os períodos analisados e, portanto, a dinâmica no uso do solo na região, os resultados indicam que inicialmente a região do COMPERJ era formada por vegetação e solo exposto e posteriormente essa vegetação é substituída principalmente por área urbana resultando numa mistura de solo exposto e área construída. Essa conclusão é corroborada pela análise em conjunta dos diferentes parâmetros utilizados no presente trabalho, onde observa-se aumentos na TSC, IBI e ISA, e uma diminuição no NDVI. Os resultados também mostram de forma inequívoca o impacto da construção do COMPERJ no meio ambiente local.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. L. et al.; Análise comparativa do fenômeno Ilha Urbana de Calor no verão e inverno por meio de dados termais do satélite Landsat 5 em São José dos Campos SP. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10 e ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA, 6, 2006, São José dos Campos. Programas e Resumos, São José dos Campos: Univap, 2006. p. 1819-1822. Disponível em: <http://www.univap.br/univap/pro_reitorias/int_uni_soc/revista/RevistaUnivap24.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2016.

BARROS, L. R. L., PERES, L.F. LUCENA, A. J. **Impactos do complexo petroquímico do rio de janeiro no leste da região metropolitana do Rio de Janeiro utilizando dados de sensoriamento remoto.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BIAS, E.; BAPTISTA G. M. M.; LOMBARDO, M. A. Análise do Fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas, por meio da combinação de dados LandSat e Ikonos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1741-1748. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.12.18.52/doc/14_005.pdf>. Acesso em 4 mar. 2015.

BRANDÃO, A. M. P. M. **O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro.** 1996. 362 f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito, 2013. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2013.htm>> Acesso em: 04 mar 2015.

CACHO-LIMA, R; ANUNCIACÃO, V. S. Estudos da formação de ilhas de calor na cidade de Campo Grande/MS, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13, 2009, Viçosa. **Anais** Viçosa, 2009.

CAMARGO, F. F. *et al.* Análise temporal do revestimento do solo e suas implicações na modificação do campo térmico da área urbana do município de Campo Grande, MS, no período de 1988 a 2003. In: SIMPOSIO DE GEOTECNOLOGIAS DO PANTANAL, 1, 2006, Campo Grande. **Anais**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: INPE, 2006. p.575-584. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.12.13.29>>. Acesso em 4 mar. 2015.

CARVALHO, T. *et al.* Repercussões da Exploração Petrolífera sobre as transformações urbanas de Macaé (RJ). In: CARVALHO, T.; GUIMARÃES, W.; DELECAVE, J. **Oficina sobre Impactos Sociais, Ambientais e Urbanos das Atividades Petrolíferas**, 2010, Niterói. Cap. 2-6. p. 220. Disponível em: <http://www.uff.br/macaeimpecto/OFICINAMACAE/pdf/26_TherezaCarvalho.pdf>. Acesso em 4 mar. 2015.

CHANDER, G., MARKHAM, B. L. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. **IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p. 2674–2677, nov. 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1245255/>>. Acesso em 28 ago. 2016.

CHANDER, G.; MARKHAN, B.; L., HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893–903, 2009. Disponível em: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat_Calibration_Summary_RSE.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2015.

CHEN, P. Y. *et al.* An automated cloud detection method for daily NOAA-14 AVHRR data for Texas, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.15, p. 2939-2950, 2002. Disponível em: <<http://ssl.tamu.edu/media/11821/an%20automated%20cloud%20detection%20method%20for%20daily%20noaa14avhrr%20data%20for%20tx.pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

COMPLEXO PETROQUIMICO DO RIO DE JANEIRO. COMPERJ. **Apresentação**. Itaboraí, 2007. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/complexo-petroquimico-do-rio-de-janeiro.htm>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

CONCREMAT. Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ). Rio de Janeiro, 2007.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FLUMINENSE, 2015. Comperj terá demissões. Disponível em: <<http://www.ofluminense.com.br/pt-br/cidades/comperj-tera-mais-demissoes>>. Acesso em 25 out 2015.

FRANÇA, G. B.; CRACKNELL, A. P. A simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for tropical areas. **International Journal of Remote Sensing**, Washington, v. 16, n. 9, p. 1697–1705, may 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169508954506>>. Acesso em 4 mar. 2015.

FUNDAÇÃO CENTRO ESTADUAL DE ESTATÍSTICAS, PESQUISAS E FORMAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO RIO DE JANEIRO. Estado do Rio de Janeiro: Divisão Político-Administrativa. Rio de Janeiro, [2015?]. Disponível em: <http://www.fesp.rj.gov.br/ceep/info_territorios/divis_politico_administrativo.html> Acesso em: 4 mar. 2015.

GALLO, K. P., TARPLEY, J. D. The comparison of vegetation index and surface temperature composites for urban heat island analysis, **International Journal of Remote Sensing**, v. 17/15, p. 3071– 3076, apr. 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169608949128>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

GARTLAND, L. **Heat islands: understanding and mitigating heat urban areas**. USA: Earthscan, 2008. 215p.

GRIEND, A.A.; OWE, M. On The relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**. V. 14, p. 11119-1131, oct. 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169308904400>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

GUIMARAES, M. Após oito anos, a construção do COMPERJ ainda não foi concluída. **CBN**, Rio de Janeiro, jan. 2015. Disponível em: <<http://cbn.globoradio.globo.com/rio-de-janeiro/2015/01/10/APOS-OITO-ANOS-CONSTRUCAO-DO-COMPERJ-AINDA-NAO-FOI-CONCLUIDA.htm#ixzz3TOqteAj9>>. Acesso em: 04 mar 2015.

GUTMAN, G. G. Vegetation indices from AVHRR: An updated and future prospects. **Remote Sensing of Environment**, Washington, v. 25, n. 2, p. 121–136, feb./mar. 1991. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579190005Q>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

GUTMAN, G.; IGNATOV, A. The relative merit of cloud/clear identification in the NOAA/NASA Pathfinder AVHRR land 10-day composites. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n. 16, p. 3295–3304, 1996. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169608949149>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

HEBBLE, E.E.; CARLSON, T.N; DANIEL, K. Impervious surface area and residential housing density: a satellite perspective. **Geocarto International**, v.16, n. 1, p.13-18, 2001. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106040108542178>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, nov. 2002.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000962>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

IMHOFF, M.L. ZHANG, P. WOLFE, R. BOUNOUA, L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 504–513, 2009. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015410.pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo de 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: <<http://censo2006.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo de 2013**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: <<http://censo2013.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=330190&idtema=117&search=rio-de-janeiro%7Citaborai%7Censino-matriculas-docentes-e-rede-escolar-2012>>. Acesso em: 04 mar 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (Brasil). **O espectro infravermelho**. São José dos Campos: INPE, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007.

LEMLE, Marina. **Saúde e riscos da exploração mineral é tema de evento**. Informe ENSP, 2011. Disponível em: <<http://www.ensp.fiocruz.br/portal-ensp/informe/site/materia/detalhe/27886>>. Acesso: 04 mar 2015.

LEMONSU, A., GRIMMOND, C. S. B., MASSON, V. Modeling the surface energy balance of the core of an old mediterranean an city: Marseille. **Journal Applied Meteorology**, v. 43, p. 312–327, feb. 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/224001509_Modeling_the_Surface_Energy_Balance_of_the_Core_of_an_Old_Mediterranean_City_Marseille>. Acesso em: 28 ago. 2016.

LOMBARDO, M. A. **Ilhas de Calor nas Metrôpoles**: o caso de São Paulo. São Paulo: HUCITEC, 1985.

LORENA, R. B.; MARCHIORO, E.; HOLZ, S. Análise do campo térmico da área urbana do município de Vitória através de dados de sensoriamento remoto. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. 2013, Foz do Iguaçu. **Anais XVI**. Foz do Iguaçu: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0881.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

LUCENA, A.J. et al. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theoretical Applied Climatology**, v. 1111, n. 3, p. 497-511, feb. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s00704-012-0668-0>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

LUCENA, A. J. A Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. 2012. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MELLO, I. Delta abandonou Arco Metropolitano, obra está sem data para ser inaugurada. **Jornal do Brasil**, Rio de Janeiro, 12 set, 2010. Disponível em: <<http://www.jb.com.br/rio/noticias/2012/09/12/delta-abandonou-arco-metropolitano-obra-esta-sem-data-para-ser-inaugurada/>> Acesso em: 4 mar 2015.

MENESES, P. R. ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: [s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2003. 192 p.

OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES. **O estado do Rio de Janeiro no Censo 2010**. Rio de Janeiro: Observatório das Metrôpoles; FAPERJ, 2010. Disponível em: <http://www.observatoriodasmetropoles.net/download/documento01_censo2010RJ.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2016.

OKE, T.R. The distinction between canopy and boundary-layer heat islands. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268–277, 1976. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00046973.1976.9648422>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, jan. 1982. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49710845502/abstract>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

OWEN, T. W., CARLSON, T. N., GILLIES, R. R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p.1663– 1681, sep. 1997. Disponível em: <http://web.pdx.edu/~nauna/articles/Owen_etal_1998.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2016.

PADUAN, R. A obra mais enrolada do Brasil é o COMPERJ. **Revista Exame**, Rio de Janeiro, 28 jun. 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/revista-exame/edicoes/1044/noticias/a-obra-mais-enrolada-do-brasil>>. Acesso em: 04 mar. 2015.

PETROBRAS. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/complexo-petroquimico-do-rio-de-janeiro.htm>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

PIELKE, R.A.; AVISSAR, R. Influence of landscape structure on local and regional climate. **Landscape Ecology**, v 4, n. 2/3, p 133-155, 1990. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=B5D7FF0B4B4D4CFDED84CCE2368CAB45?doi=10.1.1.248.3441&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

PONZONI, F.J., SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parentese, 2009.

QIN, Z.; KARNIELI, A.; BERLINER, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **International Journal of Remote Sensing**, v.22, n. 18, p.3719–3746, 2001. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.bgu.ac.il/bidr/research/phys/remote/Papers/2001-Qin_Mono_Window_IJRS_01.pdf&gws_rd=cr&ei=DFWIV9D4D8uSwgTwjp3gBQ>. Acesso em: 4 mar. 2015.

RAO, P.K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite, **Bulletin American Meteorology Society**, v. 53, p. 647-648, 1972.

RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL – RIMA. Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro. Petrobras e Concremat Engenharia, 2007.

RIDD, M.K. Exploring a V-I-S (vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16. n. 12, p. 2165-2185, 1995. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169508954549>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

RIZWAN A. M.; DENNIS, L.Y.C.; LIU, C. A Review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. 1, p.120-128, 2008. Disponível em: <<https://hub.hku.hk/handle/10722/75712>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

ROTH, M.; OKE, T. R.; EMERY, W. J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilisation of such data in urban climatology. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, p. 1699–1720, oct. 1989. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/253014707_Satellite-derived_urban_heat_islands_from_three_coastal_cities_and_the_utilization_of_such_data_in_urban_climatology>. Acesso em: 28 ago. 2016.

ROUSE, J.W.JR. et al. Monitoring the Vernal Advancement and retrogradation (Green Wave Effect) of Natural vegetation. **NASA/GSFC**, jan. 1974. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740008955>>. Acesso em: 26 ago. 2016.

SILVA, N. T. C. **Diagnóstico do clima**: estação ecológica da Guanabara e região. ECOMEX, 2009. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/diagnostico_clima_ga.pdf> Acesso em: 04 mar. 2015.

SOUZA, J.D.; SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 349-358, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-261X2005000400002&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 4 mar. 2015.

SOUZA, M.L. **ABC do desenvolvimento urbano**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

SOUZA, P. Comperj gera legião de moradores de rua em Itaboraí. **Maricá Info**, Maricá, 2 mar. 2015. Disponível em: <<http://info.com/2015/03/02/comperj-gera-legiao-de-moradores-de-rua-em-itaborai.html>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

STREUTKER, D.R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, p.282–289, 2003. Disponível em: <<http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/EES5093/UHI-houston.pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

TRENBERTH, K.E. et al. Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S. et al. **Climate Change 2007: The physical science basis**, contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects: The 2014 Revision**. New York: United Nations, 2014. Disponível em: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/WUP2014_Report.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2015.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Frequently asked questions about the Landsat missions. **USGS**, jan. 2015. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/band_designations_Landsat_satellites.php>. Acesso em: 4 mar. 2015.

VOOGT, J. A. Urban Heat Island, Causes and consequences of global environmental change. **Encyclopedia of Global Environmental Change**, v. 3, p. 660-666, 2002.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 370–384, 2003. Disponível em: <http://gisknowledge.net/topic/eo_by_remote_sensing/voogt_oke_rse_03.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2015.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n.4, p. 467–483, feb. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425703003390>>. Acesso em: 26 ago. 2016.

WENG, Q.; QUATTROCHI, D. Thermal remote sensing of urban areas: an introduction to the special issue. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n.2, p. 119–122, sep. 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238376798_Thermal_remote_sensing_of_urban_areas_An_introduction_to_the_special_issue>. Acesso em: 26 ago. 2016.

XU, H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 14, p. 4269- 4276, 2008. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160802039957>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

YUAN, F.; BAUER, M.E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery, **Remote Sensing Environment**, v. 106, n.3, p. 375-386, feb. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706003191>>. Acesso em: 26 ago. 2016.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 583–594, nov. 2010. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160304987>>. Acesso em: 26 ago. 2016.