



**Transformações Espaciais e Impactos na Temperatura da Superfície Continental na Área do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ)**  
Spatial Transformations and Impacts on the Land-Surface Temperature in the Rio de Janeiro Petrochemical Complex (COMPERJ) Area

Rebeca Gonçalves Campos Carvalho<sup>1</sup>; Liz Barreto Coelho Belém<sup>1</sup>;  
Leonardo de Faria Peres<sup>1</sup>; Andrews José de Lucena<sup>2</sup> & Vitor Fonseca Vieira Vasconcelos de Miranda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza,  
Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Ilha do Fundão, 21941-909, Rio de Janeiro

<sup>2</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia, Instituto de Agronomia  
Rodovia BR 465, Km 07, s/n - Zona Rural, Seropédica - RJ, 23890-000

E-mails: [cgrebeca@hotmail.com](mailto:cgrebeca@hotmail.com); [lizbarreto7@gmail.com](mailto:lizbarreto7@gmail.com);

[leonardo.peres@igeo.ufrj.br](mailto:leonardo.peres@igeo.ufrj.br); [lucenageo@gmail.com](mailto:lucenageo@gmail.com); [vitormiranda91@yahoo.com.br](mailto:vitormiranda91@yahoo.com.br)

Recebido em: 14/05/2018      Aprovado em: 20/07/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_2\\_438\\_447](http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_438_447)

## 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) e de área construída (IBI) para a região de instalação do COMPERJ. Desta forma, utilizou-se uma série temporal de imagens de 12 anos provenientes dos satélites Landsat-5, 7 e 8, referente aos anos de 2002 a 2013, subdivididos em dois grupos, anterior (2002 a 2007) e posterior (2008 a 2013) à construção do COMPERJ, totalizando 58 imagens. Dois mapas de uso do solo foram confeccionados, um para cada período, levando em conta as classes urbano, solo, vegetação e água. Posteriormente, a TSC foi relacionada com cada índice, mostrando que a TSC é inversamente (diretamente) proporcional ao NDVI (IBI). A maior correlação absoluta para o período pós-construção ( $R = 0,85$ ) foi obtida com o IBI, indicando que este índice pode funcionar como uma métrica adicional para análise dos padrões térmicos urbanos. Uma caracterização (média e desvio padrão) dos parâmetros TSC, NDVI e IBI de acordo com cada classe de uso do solo para o período pré-construção e pós-construção também foi realizada, onde para o período pré-construção (pós-construção) a diferença de TSC entre a área do COMPERJ (urbano) 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 dois períodos. O IBI (NDVI) aumentou (diminuiu) seu valor de  $-0,16$  para  $0,05$  ( $0,49$  para  $0,15$ ). Finalmente, utilizou-se o índice M de separabilidade para analisar a distinção dos parâmetros entre as diferentes classes. Para o período pré-construção, todos os parâmetros mostraram valores de  $M < 1$ , enquanto que após a construção todos os parâmetros apresentam M próximo a 1.

**Palavras-chave:** ilha de calor urbana; COMPERJ; temperatura da superfície continental; NDVI; IBI

## Abstract

The present work studies the land-surface temperature (LST) variation associated with the land cover change, supported by normalized difference vegetation (NDVI) and based built-up (IBI) indices for the COMPERJ installation region. 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 (2002 to 2007) and post-construction (2008 to 2013) period, totalizing 12 years with 58 images available. Two images were selected as the basis for making two land cover maps, one for each period, taking into account urban, soil, vegetation, and water land cover classes. Subsequently, LST was correlated with each index, exhibiting an inverse (direct) relation with NDVI (IBI). The highest correlation for the post-period ( $R = 0.85$ ) was found with IBI, suggesting that this index could work as an additional metric to analyze the urban thermal patterns. An LST, NDVI, and IBI characterization (average and standard deviation) was performed in accordance with each class for both pre and post-period. The LST difference between COMPERJ (urban class) and vegetated areas was  $1.9^{\circ}\text{C}$  ( $3.2^{\circ}\text{C}$ ) for the pre-period (post). The comparison between these two values shows an intensification of  $1.3^{\circ}\text{C}$  for the post-period. The IBI (NDVI) has increased (decreased) from  $-0.16$  to  $0.05$  ( $0.49$  to  $0.15$ ). In addition, the separability index M was used to analyze the parameters distinction between the classes. All parameters have shown  $M < 1$  for the pre-construction period whereas all parameters have M values near to 1 for the post-construction period.

**Keywords:** urban heat island; COMPERJ; land-surface temperature; NDVI; IBI

## 1 Introdução

Segundo projeções das Nações Unidas, realizadas em 2014, 54% da população mundial vivem em áreas urbanas e a urbanização continuará avançando, de forma que em 2050, residentes urbanos somarão 84% da população em regiões mais desenvolvidas e 64% em regiões menos desenvolvidas. Atenção redobrada tem sido dispensada às grandes cidades e regiões metropolitanas, como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), visto que seu grande porte pode desencadear uma diversidade de problemas ambientais. 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 a procura 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 km<sup>2</sup>, 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). 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.

O aquecimento de áreas urbanas e a formação da ilha de calor é um atributo dos impactos urbanos, interesse em diferentes áreas de pesquisa, visto que o sinal da ilha de calor urbana (ICU) reflete uma vasta gama de mudanças importantes na superfície terrestre que impactam a saúde humana, funções de ecossistemas, tempo local e o clima (Imhoff *et al.*, 2010).

Neste contexto, o presente trabalho utiliza um conjunto de dados de sensoriamento remoto, nomeadamente dos satélites Landsat-5, 7 e 8, referente a um período de aproximadamente 12 anos, para analisar a variação do campo térmico, i.e., temperatura da superfície continental (TSC),

na região da construção do COMPERJ, apoiada na 1) classificação de uso e cobertura da terra; 2) índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), e 3) índice de área construída (IBI). De fato, uma das aplicações do sensoriamento remoto no infravermelho térmico para estudos de climas urbanos consiste em examinar as relações entre a estrutura espacial dos padrões térmicos e as características da superfície urbana (Voogt & Oke, 2003). A região de estudo escolhida funciona como área piloto e fornece uma oportunidade única para verificar o desempenho de diferentes métodos com base em dados de sensoriamento remoto na descrição do avanço da urbanização, e também para propor novas metodologias que resultem num monitoramento mais eficaz.

Estudos pioneiros (Gallo *et al.*, 1993; Lo *et al.*, 1997; Gallo & Owen, 1999) exploraram a correlação negativa entre TSC e NDVI, apontando esse último como um dos principais indicadores do clima urbano, visto que o NDVI indica a fração de cobertura vegetal dentro do pixel e a quantidade de vegetação determina a TSC pelo fluxo de calor latente da superfície para a atmosfera através da evapotranspiração. A análise da relação entre a TSC e o IBI num ambiente que sabidamente sofreu urbanização pode fornecer uma métrica adicional para análise da TSC e dos padrões térmicos urbanos. Desta forma, torna-se interessante realizar estudos comparativos entre o NDVI e o IBI como indicadores da ICU e, portanto, o presente estudo também explora e compara a correlação da TSC com o NDVI e o IBI na região do COMPERJ.

## 2 Metodologia

Para analisar a variação do campo térmico na região da construção do COMPERJ, apoiada na TSC, classificação de uso e cobertura da terra, NDVI e IBI, utilizou-se um banco de dados formado por dados dos sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) e *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) a bordo respectivamente dos satélites Landsat-5, 7 e 8 para um período de aproximadamente 12 anos, cobrindo os anos de 2002 a 2013. Os dados foram

agrupados 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. Cinquenta e oito imagens foram selecionadas, sendo 29 para o período pré-construção, entre 2002 e 2007, e o mesmo número para o período pós-construção, entre 2008 e 2013. 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.

As imagens foram selecionadas de acordo com a menor cobertura de nuvens possível (em torno de 10%) e foram georreferenciadas, reamostradas e recortadas nos softwares SPRING versão 4.3 e ENVI versão 4.7. As bandas 6 do TM e ETM+ com resolução respectivamente de 120 e 60 m foram reamostradas para 30 m afim de que esta pudesse ser utilizada em conjunto com as demais bandas. A banda 10 do sensor TIRS com resolução espacial de 100 m já é disponibilizada com 30 m pelo *United States Geological Survey* (USGS). A calibração radiométrica dos dados para os sensores TM e ETM+ foi feita com base nas equações e constantes de calibração propostas no trabalho de Chander & Markham (2003). Enquanto que as constantes referentes aos sensores OLI e TIRS a bordo do Landsat-8, vêm especificadas para cada imagem num arquivo descritor. Com base nos trabalhos de França & Cracknell (1995) e Chen *et al.* (2002) foram adotadas três técnicas de mascaramento de nuvens no presente estudo: 1) técnica com base em limiar do valor da reflectância na banda 3 ( $> 0,3$ ); 2) técnica com base em limiar do valor de temperatura de brilho na banda 6 ( $< 278$  K); e 3) técnica da razão  $Q$  entre as bandas 4 e 3 ( $0,8 \leq Q \leq 1,6$ ). Os valores de limiares 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.

Foram confeccionados dois mapas de uso e cobertura do solo utilizando o software Ecognition

8.9 com base numa classificação supervisionada e num algoritmo de segmentação de multiresolução. Os mapas representam à área do COMPERJ antes (2002-2007) e após (2008-2013) a sua construção e foram obtidos a partir de imagens de 01/08/2001 e 02/08/2013. Após a segmentação, amostras de 4 classes foram coletadas, nomeadamente Água, Vegetação, Urbano e Solo, e aplicou-se um algoritmo de classificação que usa como base o método de interpolação do vizinho mais próximo (nearest neighbor) entre os segmentos.

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 um método mono-canal que assume diferentes hipóteses e parametrizações (Qin *et al.*, 2001; Souza & Silva, 2005), onde a correção atmosférica é realizada utilizando-se dados medidos na rede convencional de estações meteorológicas presentes na RMRJ. A emissividade da superfície foi obtida através de uma relação com o NDVI proposta por Van de Griend & Owe (1993).

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 (Huete *et al.*, 2002).

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 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.

A partir da obtenção dos parâmetros acima citados, a TSC foi correlacionada com o NDVI e IBI com o intuito de comparar esses dois índices como indicadores da ICU. Também foi realizada a caracterização da TSC, NDVI e IBI 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:

$$M_{p\_c1\_c2} = \frac{|\mu_{c1} - \mu_{c2}|}{\sigma_{c1} + \sigma_{c2}} \quad (1)$$

onde é o índice M para um determinado parâmetro (TSC, NDVI e IBI) quando se compara duas classes distintas c1 e c2 e  $\mu_{c1}$  e  $\mu_{c2}$  ( $\sigma_{c1}$  e  $\sigma_{c2}$ ) são as médias (desvio padrão) do parâmetro para duas classes distintas. O cálculo do índice M foi realizado com o objetivo de verificar a separabilidade entre as classes. Quando o valor de M é próximo a (menor que) 1, a separabilidade é considerada alta (baixa).

### 3 Resultados e Discussão

O mapa de uso e cobertura do solo para a condição anterior à construção do COMPERJ (2002-2007) (Figura 1A) mostra que a região destinada ao Complexo foi classificada como área de solo

exposto rodeada por vegetação. Segundo Fidalgo *et al.* (2011) essa área era tomada por área de pastagem de gado e cultivo de laranjas. Para o período pós-construção, nota-se na Figura 1B que o COMPERJ passa a ser classificado totalmente como área urbana e grande parte da vegetação pré-existente passa a ser classificada como solo exposto, o que talvez possa ser explicado pelo processo de terraplanagem para implantação do Complexo. Os mapas de uso e cobertura do solo são posteriormente confrontados com os parâmetros TSC, NDVI e IBI para se evidenciar algumas discrepâncias no resultado final da classificação.

A Figura 2 mostra a média de TSC para o período pré-construção (A) e pós-construção (B) do COMPERJ. Pelos dois períodos analisados antes da construção a área destinada ao COMPERJ não possuía tanta vegetação como mostrado em nossa classificação, haja visto que os valores de TSC são bem elevados em alguns pontos classificados como vegetação quando comparados (não mostrado no presente trabalho) com regiões vegetadas de floresta presentes na RMRJ (como a Floresta da Tijuca que apresenta valores em torno de 20°C). Por outro lado, a região que circunda essa área apresenta uma certa coerência espacial em termos de classificação e valores de TSC. A região do COMPERJ para o período pré-construção apresenta valores que variam entre 23 e 34°C, com um valor médio de 29°C. É interessante notar que o intervalo de valores de TSC para o período pós-construção é bem próximo ao do período pré-construção. Apesar desse fato é impor-

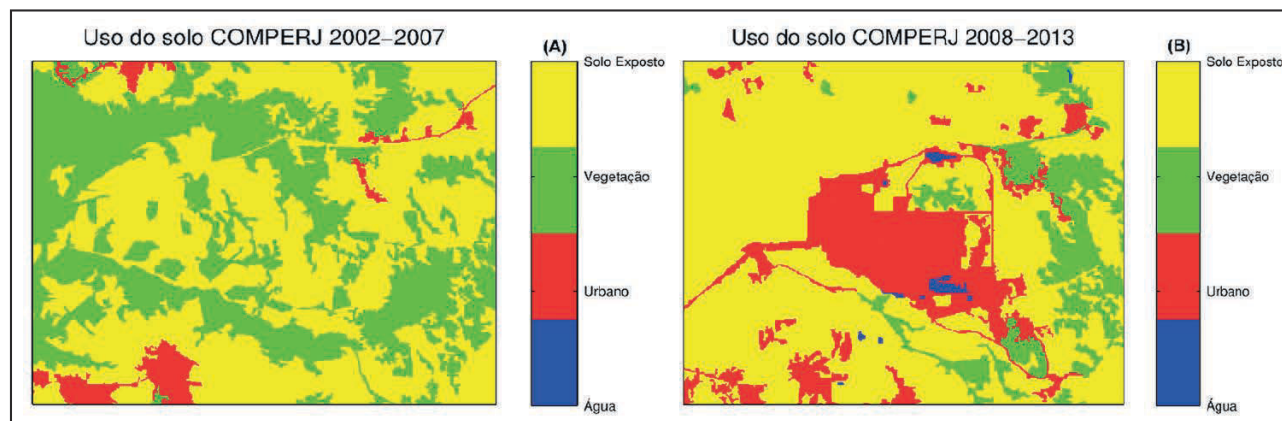


Figura 1 Mapa de uso e cobertura do solo da área do COMPERJ referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007) (A) e ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013) (B).



tante observar que quando os resultados são analisados individualmente, fica claro a formação de um núcleo com temperaturas mais elevadas no local de construção quando comparado com seu entorno concordando com a classificação de área urbana. Os valores baixos de TSC nas áreas que circundam o COMPERJ indicam que a vegetação pré-existente não foi substituída por solo exposto como indicado pela classificação. De fato, ao contrário do período pré-construção onde a quantidade de vegetação é sobrestimada, a classificação para o período pós-construção parece subestimar a quantidade de vegetação com base nos valores de TSC. Provavelmente a classificação mais correta para o período pós-construção seria uma combinação entre as duas classificações obtidas para 2002-2007 e 2008-2013, com a área urbana vinda da classificação pós-construção e a vegetada e solo vindas da pré-construção.

A média de NDVI para o período anterior à construção do COMPERJ é exibida na Figura 3A indicando que grande parte dos valores se encontra entre 0,4 e 0,6, com um valor médio de 0,5. A distribuição espacial do NDVI apresenta pouca concordância com a classificação para o período pré-

construção. Os valores encontrados de NDVI indicam que a região apresentava uma certa composição de massa vegetal, como já discutido durante a análise dos valores de TSC. Apesar dos intervalos de valores e do valor médio de NDVI do período entre 2002-2007 serem bem semelhantes aos mostrados em 2008-2013, observa-se na Figura 3B que a região específica de construção do COMPERJ, que antes apresentava valores predominantes entre 0,3 e 0,6, tornou-se escassamente vegetada, com valores próximos a 0 (zero), indicando a presença de área urbana, neste caso, correspondente tanto em valores quanto ao padrão espacial da classificação presente no mapa de uso de solo. Similar à análise conduzida com base na TSC, ao redor desse núcleo com valores de NDVI próximos a zero, os pixels apresentam muitas vezes valores típicos de vegetação, acima de 0,6, indicando mais uma vez que a área ao redor do COMPERJ não foi completamente transformada em solo exposto como indicado pelo mapa de uso do solo para o período pós-construção. Para o período entre 2008 e 2013 é também possível observar uma concordância muito maior entre a TSC e o NDVI do que para o período entre 2002 e 2007.

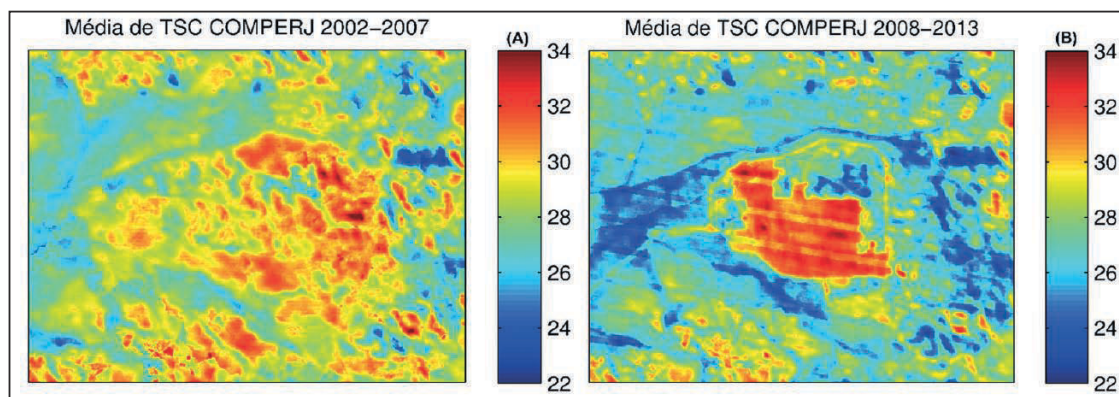


Figura 2 Média de TSC para a área do COMPERJ referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007) (A) e ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013) (B).

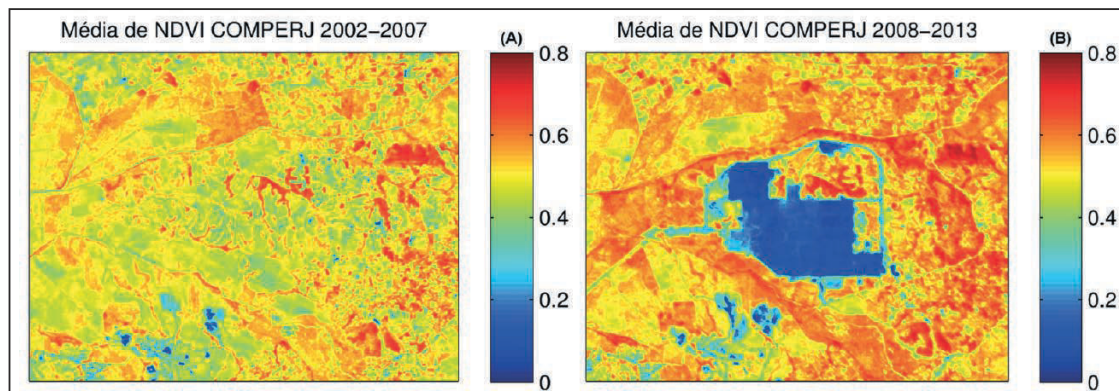


Figura 3 Média de NDVI para a área do COMPERJ referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007) (A) e ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013) (B).

A Figura 4 é similar à figura de NDVI, mas refere-se ao IBI, e nota-se que para o período pré-construção (Figura 4A) os valores variam entre -0,5 até 0,13, com um valor médio de -0,17. Em termos gerais, no caso do período pós-construção (Figura 4B) o IBI alcança um valor máximo de 0,16 e médio de -0,14. Especificamente, a área do COMPERJ (Figura 4A) apresenta valores entre -0,2 e 0 com predominância de valores entre -0,2 e -0,1. Percebe-se que para o período mais recente (Figura 4B) há um aumento do IBI na região do COMPERJ, passando 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 (não mostrados), apontando um comportamento esperado do IBI mediante ao processo de alteração do uso do solo para implementação da obra. Em relação à classificação, o mesmo comportamento relativo à TSC e NDVI é observado com o IBI.

A relação entre a TSC e o NDVI e IBI para antes e após a construção do COMPERJ é mostrada em termos de gráficos de dispersão nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Os gráficos apresentam cores que se referem aos pixels das classes vegetação (verde), urbana (vermelho) e solo exposto (amarelo). As correlações referentes ao período pré-construção e pós-construção são mostradas respectivamente nas Tabelas 1 e 2. Conforme esperado, identificou-se uma correlação negativa entre a TSC e NDVI com valor de  $R = -0,56$ . Os pixels de vegetação 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°C, em oposição aos pixels de áreas urbanas com uma aglomeração maior próximos a 32° e 34°C, indicando que áreas mais (menos) vegetadas apresentam menores (maiores) valores de TSC, corroborando o importante papel da vegetação na mitigação da variação do campo termal. Essa relação (também negativa) é mais 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 de área urbana, próximos a valores mais altos de TSC, entre 28° e 34°C e, conseqüentemente, a valores menores de NDVI, entre 0,1 e 0,3. Na Figura 6, por outro lado, observa-se uma correlação positiva muito bem definida entre a TSC e o IBI, com valor de  $R = 0,74$  para o período pré-construção e  $R = 0,86$  para o período pós-construção. Na Figura 6A nota-se uma aglomeração maior de pixels de áreas vegetadas associadas à valores mais baixos de IBI, entre -0,4 e -0,2, e nota-se que os pixels referentes a solo exposto e área urbana estão associados a valores mais elevados de IBI. Para o período pós-construção novamente é notado o deslocamento dos pixels de área urbana para valores mais altos de IBI, entre 0 e 0,1, bem como para valores mais altos de TSC, entre 28° e 34°C. Em ambas as figuras se percebe uma grande sobreposição de valores entre a classe urbana (círculos em vermelho) a e classe solo exposto (círculos em amarelo). Os resultados mostram que a TSC se relaciona melhor com o IBI, principalmente para o período pós-construção, o que pode indicar

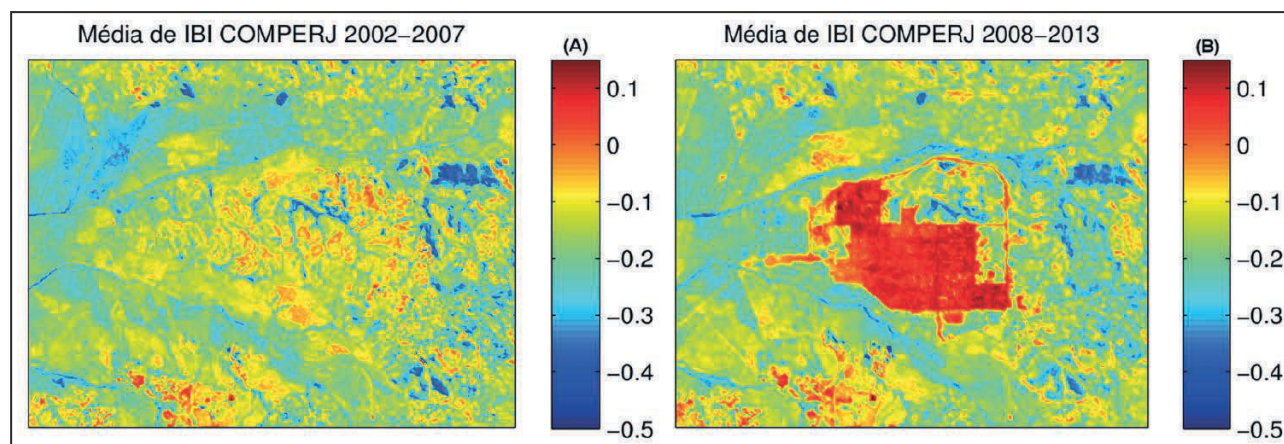


Figura 4 Média de IBI para a área do COMPERJ referente ao período anterior à construção do COMPERJ (2002-2007) (A) e ao período posterior à construção do COMPERJ (2008-2013) (B).



indiretamente que o IBI é um bom índice para mapear espaços urbanos e para análise dos padrões térmicos urbanos.

2002 – 2007		
Y X	TSC (°C)	
	Equação	Correlação (R)
NDVI	A = - 13, 4365 B = 35,2269	R = - 0,5566
IBI	A = 17,4098 B = 31,4499	R = 0,7406

Tabela 1 Coeficientes de correlação dos gráficos de dispersão para o período pré-construção.

2008 – 2013		
Y X	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

Tabela 2 Coeficientes de correlação dos gráficos de dispersão para o período pós-construção.

Os valores de média e desvio padrão de TSC, NDVI e IBI referentes às classes urbano, solo e vegetação para a região do COMPERJ antes e após a construção são mostrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. Quando se compara as médias de TSC entre as classes para o período pré-construção, percebe-se que esta é menor na classe vegetação, que, conforme esperado possui o valor mais alto de NDVI e que a diferença entre as classes urbano-vegetação, solo-vegetação e urbano-solo é de 1,2, 0,98 e 0,21°C, respectivamente. Mais uma vez a classe com menor valor de NDVI, i.e., urbano, apresenta maior valor de TSC, mostrando a importância da vegetação no controle da TSC.

No período pós-construção, como a região de construção do COMPERJ foi classificada como área urbana, as diferenças entre essa classe e as demais são mais marcantes. Para esse período, por exemplo, a diferença entre as classes urbano-vegetação, solo-vegetação e urbano-solo é de 3,5, 2,1 e 1,5°C, respectivamente. Quando se compara esses valores com o período anterior, percebe-se que há uma

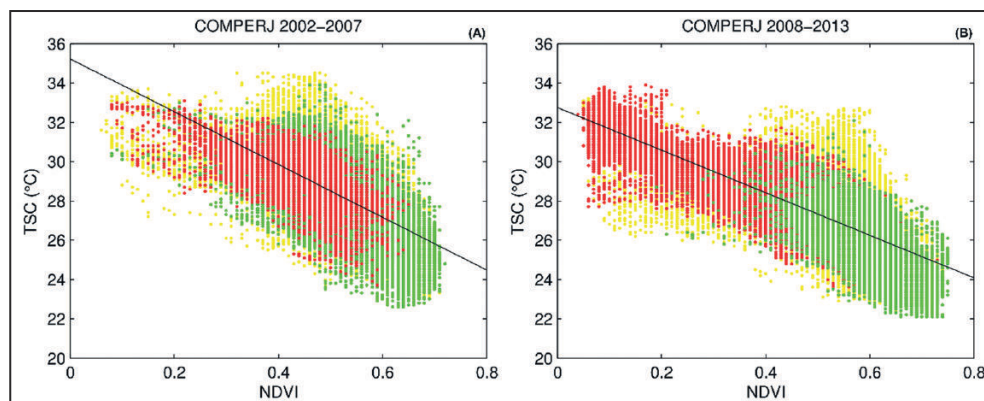


Figura 5 Gráfico de dispersão entre a TSC e o NDVI mostrando a relação entre as duas variáveis para o período anterior (A) e posterior (B) à construção do COMPERJ. Os pontos verdes, vermelhos e amarelos indicam respectivamente pixels classificados conforme o uso do solo.

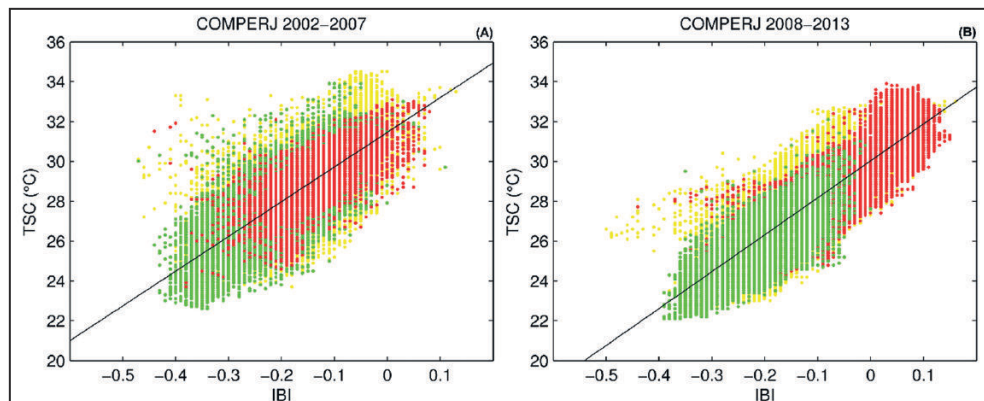


Figura 6 Gráfico de dispersão entre a TSC e o IBI mostrando a relação entre as duas variáveis para o período anterior (A) e posterior (B) à construção do COMPERJ. Os pontos verdes, vermelhos e amarelos indicam respectivamente pixels classificados conforme o uso do solo.

intensificação das diferenças de temperatura entre urbano-vegetação, solo-vegetação e urbano-solo em 2,3, 1,1 e 1,3°C. Os demais parâmetros referentes à classe urbano para o período pós-construção apresentam uma variação acentuada. O IBI aumentou seu valor de -0,13 para -0,05, enquanto o NDVI diminuiu de 0,44 para 0,33.

2002-2007	Urbano		Vegetação		Solo	
TSC (°C)	29,1	1,4	27,9	1,5	28,9	1,4
NDVI	0,44	0,09	0,52	0,06	0,49	0,06
IBI	-0,13	0,07	-0,20	0,06	-0,15	0,06

Tabela 3 Média e desvio padrão de TSC, NDVI e IBI referentes às classes urbano, solo e vegetação para o período pré-construção do COMPERJ.

2008-2013	Urbano		Vegetação		Solo	
TSC (°C)	29,1	2,2	25,6	1,4	27,0	1,4
NDVI	0,33	0,19	0,61	0,06	0,54	0,07
IBI	-0,05	0,11	-0,22	0,07	-0,16	0,06

Tabela 4 Média e desvio padrão de TSC, NDVI e IBI referentes às classes urbano, solo e vegetação para o período pós-construção do COMPERJ.

Com base nos valores de média e desvio padrão de TSC, NDVI e IBI referentes às classes urbano, solo e vegetação mostrados nas Tabelas 3 e 4 calculou-se o índice M para analisar a separabilidade entre as classes acima para ambos os períodos. Para o período pré-construção (Tabela 5) as classes não apresentaram valores de separabilidade elevados apontando parâmetros não tão bem definidos de acordo com as diferentes classes. Entre urbano e solo, a TSC demonstrou uma pobre distinção por classe, podendo ser explicado pelos valores próximos das médias e pelos valores altos de desvio padrão (Tabela 3). O mesmo acontece para o IBI. Como esperado a melhor separação é encontrada quando se compara as classes urbano e vegetação.

Índice M			
2002 - 2007	Urbano X Vegetação	Urbano X Solo	Vegetação X Solo
TSC	0,41	0,07	0,33
NDVI	0,51	0,35	0,21
IBI	0,50	0,18	0,36

Tabela 5 Índice M de separabilidade referentes às classes urbano, vegetação e solo exposto para TSC, NDVI e IBI no período pré-construção do COMPERJ.

Para o período pós-construção nota-se definições maiores entre as classes para todos os parâmetros. Novamente, a melhor separação é encontrada entre a classe urbano e vegetação, onde todos os parâmetros apresentam valores próximos de 1. De qualquer forma, nota-se que os parâmetros não apresentam uma boa separabilidade entre as demais classes.

Índice M			
2008 - 2013	Urbano X Vegetação	Urbano X Solo	Vegetação X Solo
TSC	0,97	0,57	0,51
NDVI	1,07	0,78	0,52
IBI	0,95	0,67	0,44

Tabela 6 Índice M de separabilidade referentes às classes urbano, vegetação e solo exposto para TSC, NDVI e IBI no período pós-construção do COMPERJ.

Vale ressaltar que os resultados encontrados nas Tabelas 3-6 dependem dos mapas de uso e cobertura do solo (Figura 1) e pela comparação destes mapas com os campos de TSC, NDVI e IBI é possível concluir que as classificações apresentam algumas discrepâncias como analisado anteriormente.

Considerando-se somente a região do COMPERJ e excluindo-se seu entorno, onde a classificação apresenta maiores incongruências, observa-se pelas Figuras 3e 4, que os valores de NDVI (IBI) eram em torno de 0,45 (-0,10) e passaram para 0 (0,15), representando uma variação muito maior que as observadas quando se compara as médias apresentadas nas Tabelas 3 e 4. Adicionalmente, os valores se apresentam também mais homogêneos para o período pós-construção sobre essa área específica, com um desvio padrão em discordância com aqueles obtidos para toda área (Tabela 4), o que por sua vez resultaria em desvios padrões menores e, por conseguinte, em valores maiores de índice M do que os apresentados na Tabela 6.

#### 4 Conclusões

O presente trabalho analisou a variação espaço-temporal da TSC associada à alteração da cobertura e do uso do solo na área de construção do



COMPERJ tanto com base em mapas de cobertura e uso do solo, como nos índices de vegetação NDVI e de área construída IBI. A abordagem adotada no estudo utilizando conjuntamente mapas de uso do solo e parâmetros relacionados às características da superfície sobre uma área que sabidamente teve seu uso do solo modificado mostrou-se eficaz na verificação do desempenho desses parâmetros e dos mapas gerados na descrição da realidade. Por um lado, os parâmetros obtidos, TSC, NDVI e IBI, serviram para verificar a coerência da classificação realizada, por outro lado, os mapas de classificação permitiram caracterizar (média e desvio padrão) os parâmetros TSC, NDVI e IBI de acordo com cada classe de uso do solo.

A comparação entre os mapas de uso do solo e a TSC, NDVI e IBI mostrou que o mapa referente ao período anterior à construção sobestima a vegetação na área de construção do COMPERJ enquanto que para o período posterior, o mapa subestima a vegetação ao redor dessa área. Desta forma, sugere-se elaborar a classificação do uso do solo com maior nível de detalhe e com mais testes, seja supervisionada ou não supervisionada, para superar as confusões espectrais ou de interpretação observadas.

O intervalo de valores de TSC para o período pós-construção é bem próximo ao do período pré-construção, evidenciando que a TSC é influenciada não só pelo uso do solo, mas também pelas condições atmosféricas. Por outro lado, em termos espaciais observa-se a formação de um núcleo homogêneo de temperaturas mais elevadas no local de construção quando comparado com seu entorno, fato não observado no período anterior à construção quando toda a região apresenta uma distribuição espacial heterogênea. No caso do NDVI e do IBI, ambos menos dependentes das condições atmosféricas e mais relacionados com as características da superfície continental, observou-se de forma clara e pronunciada uma diminuição e um aumento, respectivamente, após a construção do COMPERJ. Entretanto, com base nos parâmetros TSC, NDVI e IBI somente foi possível diferenciar a classe urbano da classe vegetação e somente para o período pós-construção, quando todos os parâmetros apresentam

valores de separabilidade M próximos a 1, e portanto os parâmetros utilizados não apresentam grandes variações capazes de indicar mudanças na superfície quando estas ocorrem de forma menos marcada.

Estudos pioneiros (Gallo *et al.*, 1993; Lo *et al.*, 1997; Gallo & Owen, 1999) já apontaram o NDVI como um dos principais indicadores do clima urbano. Desta forma, com a escolha da área de estudo, foi possível verificar o desempenho do IBI como indicador do clima urbano através da análise da relação entre ele e a TSC num ambiente que sabidamente sofreu urbanização. Tanto para o NDVI quanto para o IBI, a correlação com a TSC é maior no período pós-construção do que para o período pré-construção e em ambos os casos, a TSC possui uma correlação maior com o IBI, confirmado que este índice realmente serve como métrica adicional para analisar os padrões térmicos urbanos.

A média de TSC, independente do período, é sempre menor (maior) na classe vegetação (urbano), a qual apresenta maior (menor) valor de NDVI, mostrando a importância da vegetação no controle da TSC.

## 5 Agradecimentos

A pesquisa realizada na preparação deste artigo foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) sob o número de projetos E-24 26/201.521/2014 e E-26/110.822/2013 e pela Petrobras/CENPES através do Termo de Cooperação nº 14494 celebrado em 26/07/2011 entre a UFRJ e a Petrobras (Edital 293/2012).

## 6 Referências

- Chen, P.Y.; Srinivasan, R.; Fedosejevs, G. & Narasimhan, B. 2002. An automated cloud detection method for daily NOAA-14 AVHRR data for Texas, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 23(15): 2939-2950.
- Fidalgo, E.C.C.; Prado, R.B.; Pedreira, B.C.C.G. & Araújo, R.S. 2011. *Caracterização e mapeamento do uso e cobertura da terra no Comperj, Estado do Rio de Janeiro, Brasil*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892, 39p.
- França, G.B. & Cracknell, A.P.A. 1995. Simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for

- tropical areas. *International Journal of Remote Sensing*, 16(9): 1697–1705.
- Gallo, K.P.; McNan, A.L.; Karl, T.R.; Brown, J.F.; Hood, J.J. & Tarpley, J.D. 1993. The Use of NOAA AVHRR data for Assessment of the Urban Heat Island Effect. *Journal of Applied Meteorology*, 32(5):899-908.
- Gallo, K.P. & Owen, T.W. 1999. Satellite-Based Adjustments for the Urban Heat Island Temperature Bias. *Journal of Applied Meteorology*, 38(6): 806-813.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T. & Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2): 195-213.
- Imhoff, M.L.; Zhang, P.; Wolfe, R. & Bounoua, L. 2009. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114 (3): 504–513.
- Lo, C. P.; Quattrochi, D. A. & Luvall, J. C. 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 18(2): 287-304.
- Qin, Z.; Karnieli, A. & Berliner, P. 2001. 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*, 22(18): 3719–3746.
- Souza, J.D. & Silva, B.B. 2005. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4): 349-358.
- Van de Griend, A.A. & Owe, M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 1119–1131.
- Voogt, J.A. & Oke, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 370–384.
- Xu, H. 2008. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14): 4269-4276.