

Monitoramento dos impactos do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro utilizando dados Landsat

Leandro Ribeiro Luz de Barros ¹

Leonardo de Faria Peres ²

Andrews José de Lucena ³

José Ricardo de Almeida França ²

Otto Corrêa Rottuno Filho ⁴

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro – Bacharelado em Ciências Matemáticas e da Terra
21949-900 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
leandrorlbarros@gmail.com

² Universidade Federal do Rio de Janeiro - Departamento de Meteorologia
21949-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{leonardo.peres, jricardo}@igeo.ufrj.br

³ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Departamento de Geociências
23890-000 - Seropédica - RJ, Brasil
lucenageo@yahoo.com.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE
Caixa Postal 68540 - 21945-970 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
otto@coc.ufrj.br

Abstract. Rio de Janeiro Petrochemical Complex (COMPERJ) is scheduled to begin operation in 2014. The facility is located on a 45 square kilometers land in Itaboraí, Rio de Janeiro. It is expected that COMPERJ construction increase the pressure on local infrastructure conditions and the environmental system. Accordingly, this manuscript aims to analyze the impact of COMPERJ based on remotely sensed data from TM and ETM+ sensors on board Landsat-5 and 7 satellites, respectively. The remote sensing data were used in the retrieval of land-surface temperature (LST), the normalized difference vegetation index (NDVI) and the based built-up index (IBI) for a period of 8 years allowing the temporal evolution observation of these parameters before and after COMPERJ construction. The temporal evolution of the TSC, NDVI and IBI was verified by the Student's t statistical test conducted at the 5% level. Post-construction results show a ring of LST concentric values coming from the colder outer part toward the warmer core. From the outside to the core, the temperature gradient is close to 8.0 °C with spatial characteristics similar to an urban heat island. LST presents a huge variability associated with weather and climate conditions and therefore it was not possible confirm based on the Student's test that LST values were increased after COMPERJ construction. On the other hand obtained results confirm, within the significance level assumed, that NDVI (IBI) has decreased (increased) just inside the construction area of COMPERJ.

Palavras-chave: COMPERJ, Landsat, surface temperature, NDVI, IBI, temperatura da superfície.

1. Introdução

O Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), um dos principais empreendimentos da história da Petrobras, está previsto para entrar em operação em 2014 no município de Itaboraí e será construído em uma área de 45 quilômetros quadrados. Com um investimento estimado em R\$ 15 bilhões, O COMPERJ é considerado a maior iniciativa brasileira no setor, e uma das maiores no mundo. Prevê-se que diferentes empresas sejam atraídas e se instalem também nos municípios vizinhos e ao longo do Arco Metropolitano, que ligará Itaboraí, no leste da região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), ao Porto de Itaguaí, no extremo oeste da RMRJ. Estão previstos vários programas ambientais de suporte e apoio ao desenvolvimento local sustentável. Apesar dos programas planejados, 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. Este impacto sobre o uso do solo e a infra-estrutura disponível poderá ser ainda maior se não houver medidas governamentais adequadas para absorver mão-de-obra, ampliar a infraestrutura e controlar o uso do solo. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar o impacto do COMPERJ em seu entorno utilizando dados dos sensores TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente. Com base no cálculo da temperatura da superfície continental (TSC), do Normalized Difference Vegetation Index ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e do Index Based Built-up Index ou Índice de Área Construída (IBI), o presente estudo permitiu comparar as condições ambientais antes e durante a construção do empreendimento.

2. Metodologia de Trabalho

O COMPERJ está localizado (Figura 1) no distrito de Porto das Caixas, no município de Itaboraí, nos limites com os municípios de Cachoeiras de Macacu e Guapimirim, dispondo de infraestrutura logística. A sua localização foi estrategicamente escolhida pela Petrobrás, por ser próxima dos portos de Itaguaí e do Rio de Janeiro, dos terminais de Angra dos Reis, Ilhas d'Água e Redonda, da Refinaria de Duque de Caxias - REDUC, sendo também amparada por rodovias e refinarias das plantas petroquímicas do Rio Polímeros e da Suzano, servindo de excelente canal de escoamento dos produtos. Com o Arco Metropolitano, o escoamento da produção será facilitado, já que conecta as rodovias federais, BR-040, BR-116(Norte e Sul), BR-465 e BR-101(Norte e Sul), ampliando assim a acessibilidade aos Portos de Itaguaí e Rio de Janeiro.

A base de toda a pesquisa concentrou-se na análise de uma base de dados composta por uma série temporal de 40 imagens Landsat-5 e 7 referentes ao período entre 2004 e 2011. Todas as imagens estão situadas na órbita-ponto 217-76, que abrange a RMRJ, e correspondem ao período matutino. As imagens foram georeferenciadas no software ENVI 4.7. Após o georeferenciamento, foi realizada a correção radiométrica com base nas equações e constantes de calibração presentes no trabalho de Chander et al (2009) como parte do pré-processamento dos dados. Com base no trabalho de França e Cracknell (1995) foram adotadas três técnicas de mascaramento de nuvens no presente estudo: 1) técnica com base em limiar do valor da reflectância na banda 3; 2) técnica com base em limiar do valor de temperatura de brilho na banda 6 e 3) técnica da razão entre as bandas 4 e 3.

Medidas adequadas de TSC são úteis aos estudos de clima urbano devido ao seu papel importante no balanço de energia à superfície. 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. A TSC neste estudo foi estimada utilizando a banda 6 do Landsat com base em diferentes hipóteses e parametrizações (Qin et al., 2001; Souza e 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:

$$T_s = T_b + \Delta T \quad (1)$$

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

$$\Delta T = \frac{B_i(T_b) \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} B_i(T_a)}{\frac{\partial B_i(T_b)}{\partial T_b}} \quad (2)$$

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

$$\alpha_1 = \tau_i \varepsilon_i \quad (3)$$

$$\alpha_2 = (1 - \tau_i) [1 + (1 - \varepsilon_i) \tau_i] \quad (4)$$

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 1-4 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

$$T_a = 19,73 + 0,909T_0 \quad (5)$$

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

$$\tau_i = 0,951 - 0,01 \cdot w \cdot \exp\left(\frac{3w}{1+w}\right) \quad (6)$$

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 possui 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)

$$\varepsilon_i = 1,009 + 0,047 \ln(\text{NDVI}) \quad (7)$$

onde o NDVI é obtido conforme a seguinte equação (Huete et al. 2002)

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (8)$$

onde ρ representa a reflectância. 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.

O terceiro 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 as três principais componentes da paisagem urbana: 1) vegetação; 2) água e 3) áreas construídas. 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

$$IBI = \frac{2\rho_5/(\rho_5 + \rho_4) - [\rho_4/(\rho_4 + \rho_3) + \rho_2/(\rho_2 + \rho_5)]}{2\rho_5/(\rho_5 + \rho_4) + [\rho_4/(\rho_4 + \rho_3) + \rho_2/(\rho_2 + \rho_5)]} \quad (9)$$

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.

Finalmente, as imagens foram agrupadas em dois períodos com o mesmo número de anos, 2004 a 2007 e 2008 a 2011, 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 e posterior à construção.

Na análise temporal dos parâmetros gerados com base nos dados do Landsat foi realizado um teste de hipótese para verificar se são verdadeiras as afirmações sobre os parâmetros das populações como base nas amostras geradas. A utilização do teste é uma tentativa de discutir estatisticamente os resultados encontrados para o período. Neste contexto, o teste paramétrico t de Student foi adotado, onde se assume que a distribuição da amostra é conhecida, como por exemplo, uma distribuição Normal. Admitiu-se um intervalo de confiança de 95% com uma probabilidade de erro de 0,05. O teste t de Student foi aplicado para diferença entre médias sob independência considerando-se que as variâncias são supostamente diferentes, com o intuito de verificar se duas médias amostrais calculadas a partir de banco de dados diferentes são estatisticamente diferentes para o nível de significância de 5%. Com base nesta abordagem foi possível avaliar uma suspeita a priori: 1) a média de TSC e IBI (NDVI) para o período após a construção do COMPERJ (2008-2011) é maior (menor) que a média do período antes da construção (2004-2007) por conta da modificação da superfície resultante da construção do COMPERJ. Dentro deste contexto foi aplicado um teste unicaudal visto que existe um fundamento a priori, fisicamente embasado, para supor que as violações da hipótese nula resultem em valores do teste estatístico sobre um lado particular da distribuição nula. Neste caso, considerou-se como hipótese nula, que as médias com base nas amostras consideradas são iguais e como hipótese alternativa que uma média com base numa amostra é

maior que a outra. De forma resumida e ilustrativa, na comparação entre os dois períodos, a sentença da hipótese nula é que a média de TSC, IBI e NDVI da amostra do período após a construção é igual à média da amostra do período, enquanto que a hipótese alternativa consiste em dizer que a média de TSC e IBI (NDVI) do período posterior é maior (menor) que a média do período anterior.

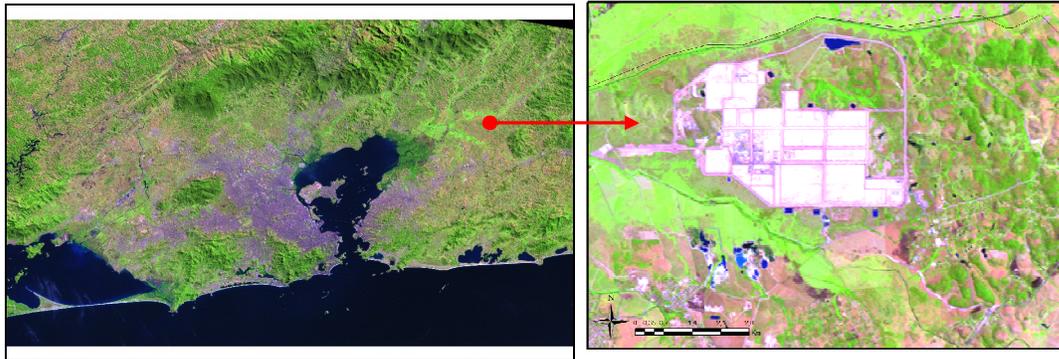


Figura 1. Área da RMRJ (à esquerda), onde a região do COMPERJ é indicada com o início da seta vermelha e a ampliação da área do COMPERJ (à direita).

3. Resultados e Discussão

Com base na média para os dois períodos estudados, uma referente aos anos 2004-2008 e outra referente aos anos 2008-2011, a análise preliminar indica alterações na TSC e nos índices NDVI e IBI no perímetro ocupado pelo COMPERJ. Analisando-se somente o resultado de TSC para o período 2008-2011 (Figura 2 à direita), observa-se um anel de valores concêntricos com valores mais frios advindos da parte mais externa a valores mais quentes em direção ao núcleo. Desde a área externa até o núcleo, observa-se um gradiente térmico próximo a 8,0 °C com características espaciais típicas a forma de uma ilha de calor. Com base nos resultados obtidos para os dois períodos (Figura 2), podemos observar que em geral a TSC para o período anterior à construção do COMPERJ apresenta maiores valores. Este comportamento é também observado para toda RMRJ (não mostrado no artigo). Entretanto, a região do COMPERJ é a única a apresentar de forma padronizada valores ligeiramente maiores para o período posterior à construção. Este fato é mostrado de forma mais clara na Figura 3 (à esquerda), onde é indicada a diferença entre os dois períodos com valores positivos sendo ressaltados na área do COMPERJ. Com base no teste paramétrico t-student não é possível afirmar que os valores de TSC nesta região são realmente mais elevados para o período 2008-2011. Praticamente toda a área apresenta valores sem significância. Com notado na Figura 3 (à direita), os valores com significância representam diferenças por volta de 4,0 a 5,0 °C. Este fato se deve a grande variância da TSC dentro dos períodos analisados em conjunto com um número de imagens ainda insuficientes. Para contornar este inconveniente, sugere-se analisar um número maior de imagens ampliando desta forma os períodos analisados e ainda fazer uma análise com base numa subdivisão sazonal diminuindo assim a variabilidade da TSC. É interessante notar que apesar da TSC estar intimamente relacionada com o tipo de superfície, esta é altamente influenciada pelas condições meteorológicas e climáticas. De fato, os resultados para imagens individuais (não mostrado no artigo) indicam que os valores de TSC antes da construção do COMPERJ, para um determinado dia, podem ser tanto maiores como menores que os valores referentes ao período posterior à construção e vice e versa. Este fato é observado no inverno e no verão. Portanto, os resultados obtidos no presente trabalho indicam que a análise temporal de áreas urbanas com base em imagens individuais de TSC pode resultar em conclusões errôneas.

As Figuras 4 e 5 mostram respectivamente às médias de NDVI e IBI para os anos 2004-2007 (à esquerda) e 2008-2011 (à direita), onde nota-se uma grande variação destes índices. Os índices se mostram inversamente proporcionais, isto é, a grande perda de massa vegetada no período posterior à construção coincide com um ganho elevado de massa construída. O NDVI sofre uma queda próxima a 0,0 após o início da construção opondo-se a valores médios de 0,5 antes da construção. Por outro lado, o IBI calculado após a construção apresenta um salto chegando a valores próximos a 0,1, ao passo que no período antes à construção o índice apresentava valores próximos à -0,1. Uma observação cuidadosa das Figuras 4 e 5 evidenciam o impacto das obras do COMPERJ mostrado através do NDVI e IBI. Praticamente toda a área de vegetação é substituída por solo nu, que provavelmente está sendo substituído por cobertura impermeável. Sem dúvida, a retração de biomassa e a ampliação de massa construída, flagradas pelo NDVI e IBI, explicam os valores mais elevados de TSC. É importante notar que diferenças de NDVI e IBI entre os anos 208-2011 e 2004-2007 mostradas na Figura 6 possuem significância justamente na área destinada à construção do COMPERJ nos permitindo afirmar, dentro do intervalo de confiança estabelecido, que o NDVI (IBI) diminuiu (aumentou) após a construção do COMPERJ. Com base nos resultados do teste estatístico observamos que ao contrário da TSC, tanto o NDVI como o IBI apresentam uma menor variabilidade temporal, por exemplo, associada às condições meteorológicas fazendo com que estejam mais correlacionadas com mudanças na superfície.

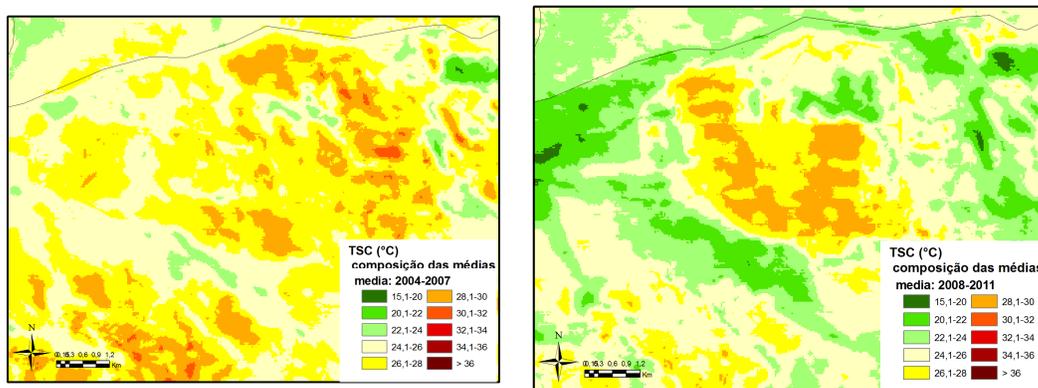


Figura 2. Média de TSC para o período de 2004 a 2007, anterior à construção do COMPERJ (à esquerda) e de 2008 a 2011, posterior à construção (à direita).

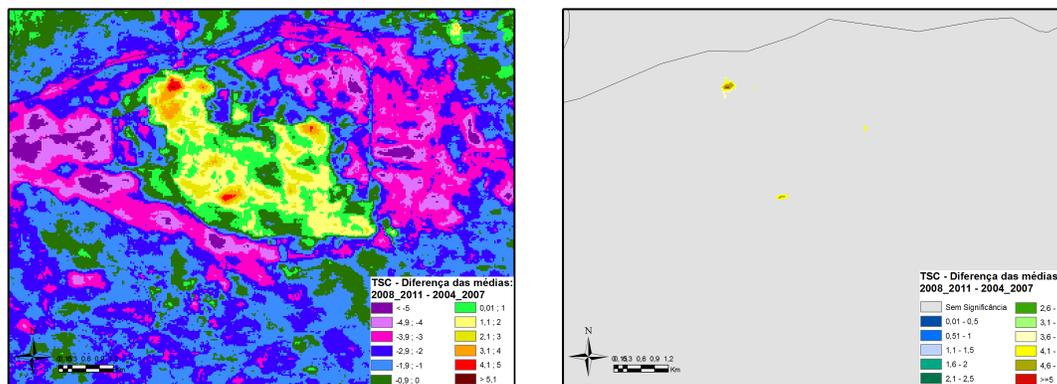


Figura 3. Diferença de TSC entre antes e depois à construção COMPERJ (à esquerda) e valores de diferença indicando as áreas onde a TSC do período pós-construção é maior que o período anterior segundo o teste t de Student e nível de significância de 5% (à direita).

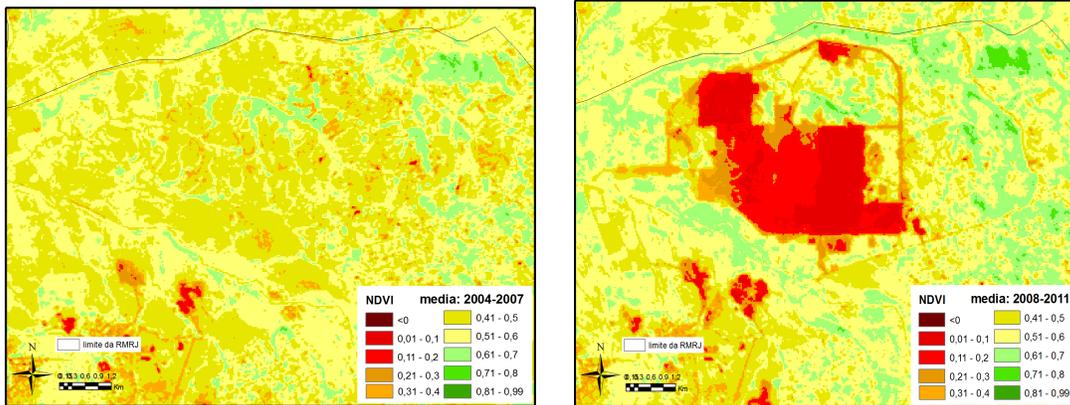


Figura 4. Similar a Figura 1, mas para o NDVI.

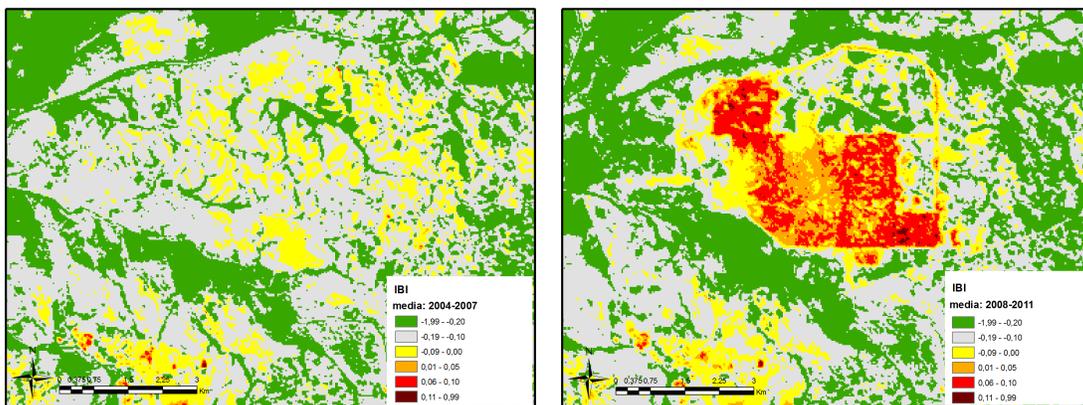


Figura 5. Similar a Figura 1, mas para o IBI.

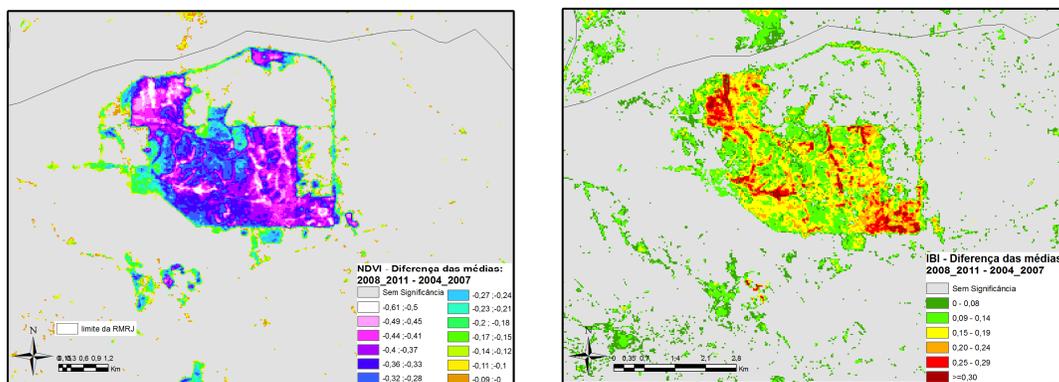


Figura 6. Valores de diferença indicando as áreas onde o NDVI (à esquerda) e IBI (à direita) do período pós-construção é respectivamente menor e maior que o período anterior segundo o teste t de Student e nível de significância de 5%.

4. Conclusões

No presente trabalho utilizaram-se compostos de imagens de TSC, NDVI e IBI com base na média para dois períodos que representam as condições ambientais antes à construção e após a construção do COMPERJ. Na análise temporal dos parâmetros gerados foi adotado o

teste paramétrico t de Student com o intuito de verificar se duas médias amostrais calculadas a partir de banco de dados diferentes são estatisticamente diferentes para o nível de significância de 5%. Com base nesta abordagem foi possível avaliar se a média de TSC e IBI (NDVI) para o período após a construção do COMPERJ (2008-2011) é maior (menor) que a média do período antes da construção (2004-2007). Com base no teste t-student não foi possível afirmar que os valores de TSC nesta região são realmente mais elevados para o período 2008-2011, visto que a TSC apresenta grande variância, sendo sugerida uma análise com base numa subdivisão sazonal. Entretanto, quando analisado individualmente o período após a construção observa-se um anel de valores concêntricos com valores mais frios advindos da parte mais externa a valores mais quentes em direção ao núcleo. Desde a área externa até o núcleo, o gradiente térmico é próximo a 8,0 °C e traz características espaciais típicas a forma de uma ilha de calor. Os resultados mostram que a TSC é altamente influenciada pelas condições meteorológicas e climáticas e que uma análise temporal de áreas urbanas com base em imagens individuais de TSC pode resultar em conclusões errôneas. No caso do NDVI e IBI, as diferenças entre os anos 2008-2011 e 2004-2007 possuem significância justamente na área destinada à construção do COMPERJ nos permitindo afirmar, dentro do intervalo de confiança estabelecido, que o IBI (NDVI) aumentou (diminuiu) após a construção do COMPERJ. Os resultados encontrados, ainda que preliminares, conseguem revelar impactos importantes associados ao início da construção do COMPERJ. Como mencionado anteriormente, espera-se que a construção do COMPERJ aumente a pressão em seu entorno, fruto da atração de novos grupos populacionais em busca de trabalho. Este impacto sobre o uso do solo e a infra-estrutura disponível será ainda maior do que os impactos encontrados no presente trabalho. Neste contexto, a continuação e a ampliação do presente estudo são de extrema importância visto que este grande empreendimento reúne componentes sociais, econômicas e ambientais em uma categoria única de alto risco no espaço geográfico do leste metropolitano.

Referências Bibliográficas

- 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.
- Franca, G.B., Cracknell, A.P. A simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for tropical areas. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, p.1697–1705, 1995.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.195-213, 2002.
- Iqbal, M. **An introduction to solar radiation**. Library of Congress Cataloging in Publication data, Academic Press Canadian, 1983. 416p.
- Qin, Z., Kameli, 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, p.3719–3746, 2001.
- Souza, J.D., Silva, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, p.349-358, 2005.
- Van de 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.1119–1131, 1993.
- Xu, H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, p.4269- 4276, 2008.