



**Um Estudo do Fenômeno da Ilha de Calor  
Urbana na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ)**

A Study of the Phenomenon of Urban Heat Island in Rio de Janeiro Metropolitan Region

Victor Hugo Pezzini de Meireles<sup>1</sup>; José Ricardo de Almeida França<sup>2</sup> & Leonardo F. Peres<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FUNCATE, Núcleo de Monitoramento de Descargas Atmosféricas,

Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais - São José dos Campos – São Paulo – SP

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências - IGEO, Departamento de Meteorologia.

Rua Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco H, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, 21941-916 Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

E-mails: victor@tempestades.org.br; jricardo@igeo.ufrj.br; leonardo.peres@igeo.ufrj.br

Recebido em: 08/08/2014 Aprovado em: 15/11/2014

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2014\\_2\\_180\\_194](http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_180_194)

## Resumo

O principal objetivo deste estudo é analisar o campo de temperatura da superfície (TS) da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e sua relação com o uso do solo. A análise foi realizada com base no índice de vegetação NDVI e em valores de TS obtidos a partir de imagens dos satélites NOAA – 14 e 18 cobrindo os anos de 2005 a 2010. O método de Composição de Máximo Valor foi utilizado para gerar mapas mensais de TS e NDVI, e também, para todo o período dos dados. Diferentes parâmetros estatísticos (e.g., coeficientes de correlação e determinação, regressão linear e desvio-padrão) foram calculados para determinar a relação entre TS e NDVI. Os valores mensais de TS para o satélite NOAA – 14 mostraram-se elevados no início da manhã, apesar de serem ligeiramente inferiores ao NOAA – 18 devido aos diferentes horários de passagem. Observou-se que o fenômeno da Ilha de Calor Urbana (ICU) atua ao longo do ano, principalmente na porção leste da cidade e em municípios da Baixada Fluminense. A relação inversa entre TS e NDVI foi evidenciada principalmente nos meses de outono e inverno com os maiores coeficientes de correlação e determinação. Porém, tal fato não é verificado no verão, pois o efeito do aquecimento de macroescala (efeitos meteorológicos) se sobrepõe ao uso do solo.

**Palavras-chave:** Ilha de Calor Urbana; RMRJ; Satélites NOAA – 14 e 18

## Abstract

The main objective of this study is analyze the field of Surface Temperature (TS) of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro (RMRJ) and its relation to land use. The analysis was based on vegetation index NDVI and TS values obtained from NOAA – 14 and 18 images covering the 2005 to 2010 years. The Maximum Value Composite method was used to generate of TS and NDVI monthly maps and also for all data period. The different statistical parameters (e.g. correlation and determination coefficients, linear regression and standard deviation) were calculated to determine the relationship between TS and NDVI. The TS monthly values for NOAA – 14 satellite shown to be high in the early morning, although slightly lower than NOAA – 18 satellite due to the different times of passage. It was observed that Urban Heat Island (ICU) phenomenon operates throughout the year, especially in the eastern portion of the city and in the Baixada Fluminense cities. The inverse relationship between TS and NDVI was observed mainly in the autumn and winter months with the highest correlation and determination coefficients. However, this is not observed in the summer months because the heating effect of macroscale (weather effects) overlaps with land use.

**Keywords:** *Urban Heat; RMRJ; NOAA – 14 and 18 satellites*

## 1 Introdução

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) possui uma topografia bastante acidentada, variando entre áreas de maciços e de baixadas, com uma densa população vivendo nesta área. O uso do solo desta área apresenta um elevado percentual de áreas cobertas por asfalto e concreto, as quais são superfícies capazes de converter (em aquecimento destas superfícies) e armazenar a radiação solar incidente e em maior grau que as áreas rurais. Este conjunto de fatores é capaz de determinar o aparecimento de um gradiente horizontal de temperatura conhecido como o fenômeno da Ilha de Calor Urbana (ICU), Stull (1993).

Estudos sobre este fenômeno são amplamente realizados pela comunidade científica desde o início do século XIX. Oke (1992) relata uma série de artigos relacionados ao fenômeno da ICU, destacando o balanço de energia em áreas rurais, suburbanas e urbanas. Estudos de Lombardo (1985) e de Oke (1987) observaram uma diferença entre as temperaturas das áreas centrais e rurais de cerca de 10°C ou mais. O estudo de Matielli *et al.* (2004) investigou características espaciais e temporais da ICU em Cuiabá/MT. Seus resultados revelaram que a ilha de calor localiza-se no distrito comercial com elevação da temperatura de até 1,5°C em dias chuvosos e de até 3,0°C em dias sem chuva. Teza & Baptista (2005) obtiveram para a cidade do Rio de Janeiro uma amplitude térmica espacial de 13°C com a temperatura de superfície variando de 28°C (mínima) a 41°C (máxima), obtendo-se um perfil de temperatura típico de ilhas de calor.

O estudo realizado por Marques Filho *et al.* (2009) sobre a ICU na RMRJ identificou três grupos diferentes de microclimas (urbano, marítimo e vegetação) nesta área. Um padrão de temperatura à superfície, distintamente diferente daquele observado em cidades de latitudes médias que possui ilhas de calor noturna e na RMRJ esta é acentuada durante o período diurno.

A técnica do sensoriamento remoto também utilizada no estudo de ilhas de calor. Souza & Massambani (2004) utilizaram o índice de vegetação NDVI e a temperatura da superfície na identificação das áreas afetadas pela ICU na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Pelo exposto acima, a ICU pode afetar a população que reside nos centros urbanos em termos econômicos, pelo maior consumo de energia e de conforto e, assim sendo, é necessário

um melhor entendimento deste fenômeno para o aprimoramento de condições de contorno de modelos atmosféricos de alta resolução Ezber *et al.* (2007), Zhang *et al.* (2010), para que medidas de mitigação Gartland (2010) possam ser tomadas pelas autoridades competentes.

O principal objetivo deste estudo consiste em identificar e analisar modificações no campo de TS na RMRJ e, conseqüentemente, áreas de influência do fenômeno da ICU, e a sua relação com o uso do solo. Para isto, foram empregados dados e técnicas de sensoriamento remoto orbital.

## 2 Materiais e Métodos

Inicialmente, neste estudo foi necessária a definição da área da RMRJ, sendo composta pelos municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Japeri, Magé, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Queimados, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica. Dessa forma, a área do estudo tem por limites: latitudes de 22,4°S e 23,1°S e longitudes de 43,7°W e 42,8°W.

Após a definição da área de estudo, a elaboração deste estudo foi estruturada da seguinte forma: formação de banco de dados das imagens (item 2.1), utilização de técnicas de mascaramento de nuvens (item 2.2), cálculos do NDVI, da TS, cálculo dos coeficientes de correlação, de determinação, das regressões lineares e desvio – padrão (item 2.3).

### 2.1 Formação do Banco de Dados de Imagens

Organizou-se um banco de dados de imagens composta por uma série temporal de 410 imagens do sensor AVHRR, a bordo dos satélites NOAA – 14 e 18. As imagens de cada um destes satélites tem resolução (Nadir) de 1 km<sup>2</sup>. No primeiro satélite, as imagens são para o período entre outubro de 2005 a maio de 2007 (total de 185 cenas) e correspondem ao período matutino, enquanto as imagens do NOAA – 18 são do período de agosto de 2008 até fevereiro de 2010 (total de 225 cenas) e correspondem ao período vespertino.

Na seleção destas imagens utilizou-se o critério de mínima nebulosidade sobre a área do estudo através da verificação visual destas imagens. As Tabelas 1 e 2 consolidam as quantidades de imagens por mês utilizadas para, respectivamente, NOAA – 14 e 18.

Mês/Ano	Quantidade Imagens
outubro de 2005	07
novembro de 2005	12
dezembro de 2005	07
janeiro de 2006	14
fevereiro de 2006	07
março de 2006	16
abril de 2006	16
maio de 2006	04
junho de 2006	09
julho de 2006	16
agosto de 2006	07
setembro de 2006	05
outubro de 2006	07
novembro de 2006	06
dezembro de 2006	09
janeiro de 2007	03
fevereiro de 2007	11
março de 2007	13
abril de 2007	10
maio de 2007	05

Tabela 1 Quantidade de dias utilizados para cada mês para o satélite NOAA – 14.

Mês/Ano	Quantidade Imagens
agosto de 2008	16
setembro de 2008	10
outubro de 2008	06
novembro de 2008	04
dezembro de 2008	12
janeiro de 2009	06
fevereiro de 2009	17
março de 2009	10
abril de 2009	18
maio de 2009	23
junho de 2009	20
julho de 2009	14
agosto de 2009	14
setembro de 2009	13
outubro de 2009	07
novembro de 2009	12
dezembro de 2009	06
janeiro de 2010	08
fevereiro de 2010	19

Tabela 2 Quantidade de dias utilizados para cada mês para o satélite NOAA – 18.

## 2.2 Mascaramento de Nuvens

Tendo em vista que a determinação das ilhas de calor requer *pixels* das imagens sem a contaminação de nebulosidade, mesmo após a aplicação do critério de seleção de imagens, foram utilizadas três técnicas

de mascaramento de nuvens sugeridas por França & Cracknell (1995).

Estas técnicas podem ser resumidas em: a) comparação das reflectâncias dos canais 1 ( $R_1$ ) e 2 ( $R_2$ ) do sensor AVHRR e caso  $R_2 \leq R_1$  a informação do *pixel* é desconsiderada; b) técnica de Gross Threshold; c) técnica Q; d) técnica da diferença entre as temperaturas de brilho dos canais 4 e 5 do sensor AVHRR. O *pixel* é considerado sem a presença de nuvens quando é aprovado pelas três técnicas simultaneamente. Caso seja reprovado por qualquer uma dessas técnicas, o *pixel* é considerado contaminado por nebulosidade e desconsiderado.

## 2.3 Cálculos do NDVI e Estimativa de TS

Segundo Moreira & Shimabukuro (2004), na literatura são encontrados mais de cinquenta índices de vegetação, sendo que quase todos obtidos de medidas da reflectância nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Os dois tipos mais comumente utilizados, no entanto, são: Razão Simples (RVI) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Neste estudo, optou-se pelo uso do NDVI que relaciona as reflectâncias do infravermelho próximo com a do vermelho do espectro eletromagnético, conforme descrito no estudo de Moreira & Shimabukuro (2004).

Pelo índice NDVI ter pequena variação de valores entre as imagens, utilizou-se o método de Composição de Máximo Valor (CMV) para confeccionar mapas mensais, consolidados para cada um dos satélites e para o período total de dados. O método CMV seleciona o *pixel* com maior valor ao longo de uma série temporal para a composição e elimina os *pixels* com valores menores, contaminados, ainda que aplicadas as técnicas de mascaramento de nuvens.

A estimativa de TS para a RMRJ foi realizada utilizando o método *split-window* (SW), de acordo com Coll (2003) e Peres *et al.* (2011). Este método assume que a emissividade da superfície terrestre é previamente conhecida, não necessita de informações de radiossondagens para realizar a correção atmosférica e tem uma boa eficiência computacional.

Para melhor analisar o fenômeno da ICU foi realizada a composição dos maiores valores de TS utilizando o mesmo método CMV adotado para

a elaboração dos mapas do índice de vegetação NDVI. Este mesmo método foi utilizado para gerar as figuras de NDVI e da estimativa de TS das composições para cada satélite utilizado e dos dois conjuntos de dados.

A escolha dos maiores valores da temperatura à superfície deve-se ao fato do fenômeno estudado ser caracterizado por temperaturas elevadas. É importante destacar que esses maiores valores de TS não são as temperaturas máximas como se conhece em Meteorologia, mas sim os maiores valores que são estimados para a área da RMRJ.

Com base nos mapas das composições dos maiores valores de TS foram elaborados *transectors* na latitude de 22,85°S. Esta latitude foi escolhida por passar por diferentes áreas. A partir disto, foram gerados perfis térmicos que permitem a visualização da variação de TS de acordo com o espaço (representado pelas longitudes).

#### 2.4 Cálculos dos Coeficientes de Correlação, Determinação, das Regressões Lineares e Desvio – Padrão

A equação da estimativa da temperatura à superfície é dependente das emissividades e estas do índice de vegetação NDVI, assim, a TS é indiretamente dependente do NDVI.

O índice de vegetação é a variável independente e a estimativa de TS é a dependente e, partindo disto, foram calculados os coeficientes de correlação (R), de determinação (R<sup>2</sup>). A finalidade deste cálculo é mostrar a relação entre o NDVI e a composição dos maiores valores de TS mensais. Em seguida, foram realizadas regressões lineares com o intuito de se encontrar equações que descrevessem a relação acima citada. Também foi calculado o desvio-padrão dos maiores valores de TS mensais. Estes cálculos foram feitos com base em Wilks (2006).

### 3 Resultados e Discussões

A seguir serão apresentados alguns resultados encontrados no estudo da ICU para a RMRJ, a partir dos dados do sensor AVHRR a bordo dos satélites NOAA – 14 e 18. Os meses de janeiro e abril de 2006, fevereiro e maio de 2007 (para o NOAA – 14), agosto e dezembro de 2008, agosto de 2009 e fevereiro de 2010 (para o NOAA – 18) foram escolhidos para serem exibidos para possibilitarem

uma análise temporal do fenômeno. Também foram analisadas as figuras relativas as composições de cada satélite e dos dois conjuntos de dados usados.

Na análise das figuras apresentadas de NDVI e da estimativa de TS as áreas correspondentes ao oceano Atlântico (que banha a região do estudo) e aquelas fora da delimitação da área de interesse são representadas pela cor branca. Esta mesma cor também é utilizada para representar os *pixels* contaminados pela presença de nebulosidade. Estes pontos ocorrem em pequena quantidade devido à utilização do método CMV.

#### 3.1 Índice de Vegetação NDVI

Na análise das imagens do índice de vegetação NDVI (Figuras 1,2 e 3) tem-se que as cores em tons de vermelho representam os menores valores do NDVI, o que indica áreas com pouca ou quase nenhuma vegetação. As tonalidades em azul são representativas dos maiores valores deste índice de vegetação, o que indica uma região mais vegetada.

Observa-se nas imagens mensais do índice de vegetação NDVI que a área compreendida entre as latitudes de 22,7°S a 23,0°S e longitudes de 43,5°W até, aproximadamente, 43,2°W detém os menores valores de NDVI, sendo em algumas localidades desta região com valores inferiores a 0,1. Esta região de reduzido NDVI engloba porções de alguns municípios da Baixada Fluminense (como Duque de Caxias, São João de Meriti, Nilópolis), além de bairros da cidade do Rio de Janeiro (Centro, Irajá, Pavuna, Penha). Isto se explica por esta região refletir quase a mesma quantidade de radiação no comprimento de onda do vermelho e do infravermelho próximo, o que é característico de áreas com pouca ou nenhuma vegetação (áreas densamente urbanizadas).

Nas áreas dos três maciços da cidade do Rio de Janeiro (Gericinó, Pedra Branca e Tijuca), na série de maciços próximos ao litoral da cidade de Niterói e ao norte da RMRJ (onde encontra-se a serra do Mar) são observados valores de NDVI mais elevados (acima de 0,5), se comparados às áreas em seu entorno. Isto é explicado por estas áreas terem maior reflectância na faixa do infravermelho e absorverem mais no vermelho (para realizarem seus processos fisiológicos), o que é característico de localidades com vegetação.

Nas áreas entre os maciços da cidade do Rio de Janeiro e entre os municípios de Niterói e São



Gonçalo (próximo a Baía de Guanabara, entre as latitudes de 22,8°S e 22,9°S e longitudes de 43,0°W até 43,1°W), percebe-se a sazonalidade do índice de vegetação. Essas localidades são caracterizadas por terem, simultaneamente, áreas urbanizadas e ainda manterem áreas vegetadas. Esta mesma sazonalidade é observada nos maciços e na serra do Mar, onde no período de outono e inverno o NDVI atinge seus valores mais baixos (próximo a 0,5) e é relacionado a diminuição da área foliar. Nos meses de primavera e verão, nestas áreas são observados os mais altos valores (próximo a 0,6), pois as árvores florescem e aumentam a área foliar fazendo com que ocorra a elevação do NDVI. Na região com os mais baixos valores do índice de vegetação não é possível visualizar essa sazonalidade da mesma forma que em outras áreas da RMRJ. Isto deve-se a esta região ser caracterizada pela quase total ausência de áreas vegetadas, assim mantendo os valores do NDVI abaixo de 0,15.

A Figura 3 representa o NDVI consolidado para cada conjunto de dados dos satélites utilizados, sendo (A) para o NOAA – 14, (B) para o NOAA – 18 e a (C) refere-se para todo o período de dados. Na análise das duas primeiras figuras percebe-se que as áreas com os maiores valores do índice de vegetação e as áreas com os valores mais baixos do NDVI permanecem as mesmas quando comparadas as imagens mensais.

Comparando-se as imagens consolidadas para cada satélite, pode-se perceber que as áreas consideradas vegetadas (maiores valores de NDVI) detêm valores mais elevados no satélite NOAA – 18 do que no NOAA – 14. Também é possível notar uma “expansão” da área com os mais reduzidos valores de NDVI em direção a oeste na figura do NOAA – 18 em relação ao NOAA – 14. Isto pode estar relacionado aos horários das imagens de cada satélite (no início da manhã no NOAA – 14 e no início da tarde no NOAA - 18). No início da manhã, a radiação solar incidente forma um menor ângulo com a superfície terrestre indicando um maior caminho óptico a ser percorrido por esta radiação. Esta condição favorece as atenuações da radiação solar incidente e uma menor radiação incidente pela manhã. Ainda há o fato de que a vegetação absorve quase totalmente a porção vermelha e reflete a porção infravermelha do espectro eletromagnético. Estas duas condições contribuem para que o valor do NDVI na parte da tarde seja maior do que no início da manhã.

Na Figura 3C pode-se identificar, assim como nas figuras anteriores do índice de vegetação, as áreas com os mais altos valores do NDVI (em torno

de 0,6) nos maciços do Rio de Janeiro, Niterói e a serra do Mar, ao norte da RMRJ. A área com os menores valores do índice (valores entre 0,2 e 0,3) entre o oeste da cidade do Rio de Janeiro e porções de municípios que formam a Baixada Fluminense. Ao redor desta última região identificou-se valores de NDVI entre 0,4 e 0,5, que pode ser classificada como uma área de transição que contém áreas urbanizadas com algumas regiões vegetadas.

### 3.2 Estimativa de TS

As Figuras 4 e 5 são referentes a composição dos maiores valores da estimativa de TS mensais e a Figura 6 é relativa as composições dos maiores valores de TS para cada conjunto de dados de satélite (A e B) e para todo o período de dados (C). Nestas três imagens tem-se que as cores em tons de vermelho representam os maiores valores de TS e as tonalidades em azul são representativas dos menores valores de TS.

A análise das Figuras 4 e 5 mostra que as áreas onde se localizam os maciços das cidades do Rio de Janeiro, Niterói e a serra do Mar detêm os valores mais reduzidos de TS, entretanto as primeiras áreas apresentam valores ligeiramente superiores aos da segunda localidade. Naquela região as temperaturas tem valores entre 33°C a 39°C (nos meses de primavera e verão) e de 27°C até 30°C (nos meses de outono e inverno), enquanto que na serra do Mar variam de 24° a 27°C (primavera e verão) e de 18° a 24°C (outono e inverno).

Estas três áreas são as mesmas que no índice de vegetação NDVI apresentavam os maiores valores. Isto indica uma localidade com superfície vegetada onde a água fica mais tempo disponível no solo e a energia é particionada entre o calor latente (utilizado para evaporar parte desta água) e o sensível (relacionado ao aquecimento da superfície). Isto contribui para os valores de TS serem menores nas áreas vegetadas.

Era esperado que com o aumento do índice de vegetação NDVI nessas 3 áreas no verão ocorresse a redução de TS, entretanto isto não ocorre, pois os efeitos do aquecimento de macroescala (causado pelo aumento da incidência dos raios solares acarretam a elevação da temperatura) se sobrepõe ao efeito do uso do solo.

A área entre as latitudes de 22,7°S a, aproximadamente, 23,0°S e longitudes de 43,4°W até 43,2°W é a que ocorre os valores mais elevados da composição da estimativa de TS, sendo que nesta

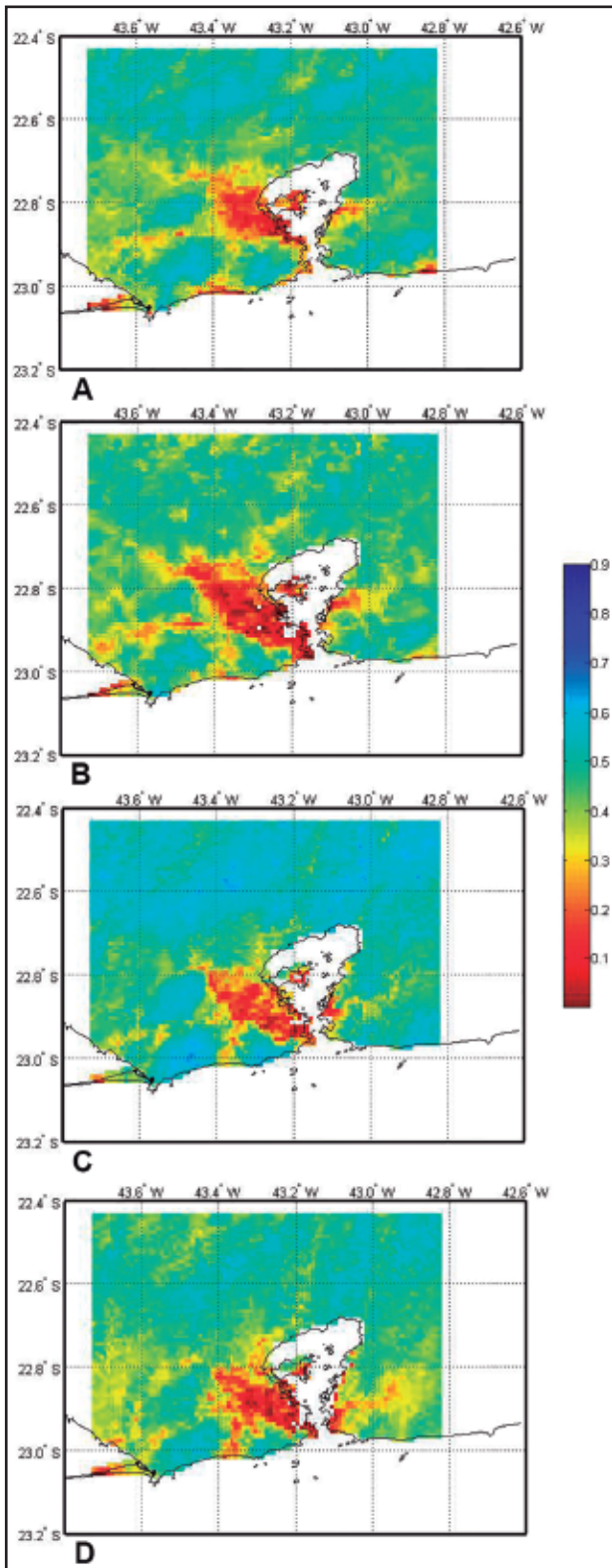


Figura 1 Imagens do índice de vegetação NDVI obtidas pelo sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA – 14 para a RMRJ em: (A) janeiro de 2006, (B) abril de 2006, (C) fevereiro de 2007 e (D) maio de 2007.

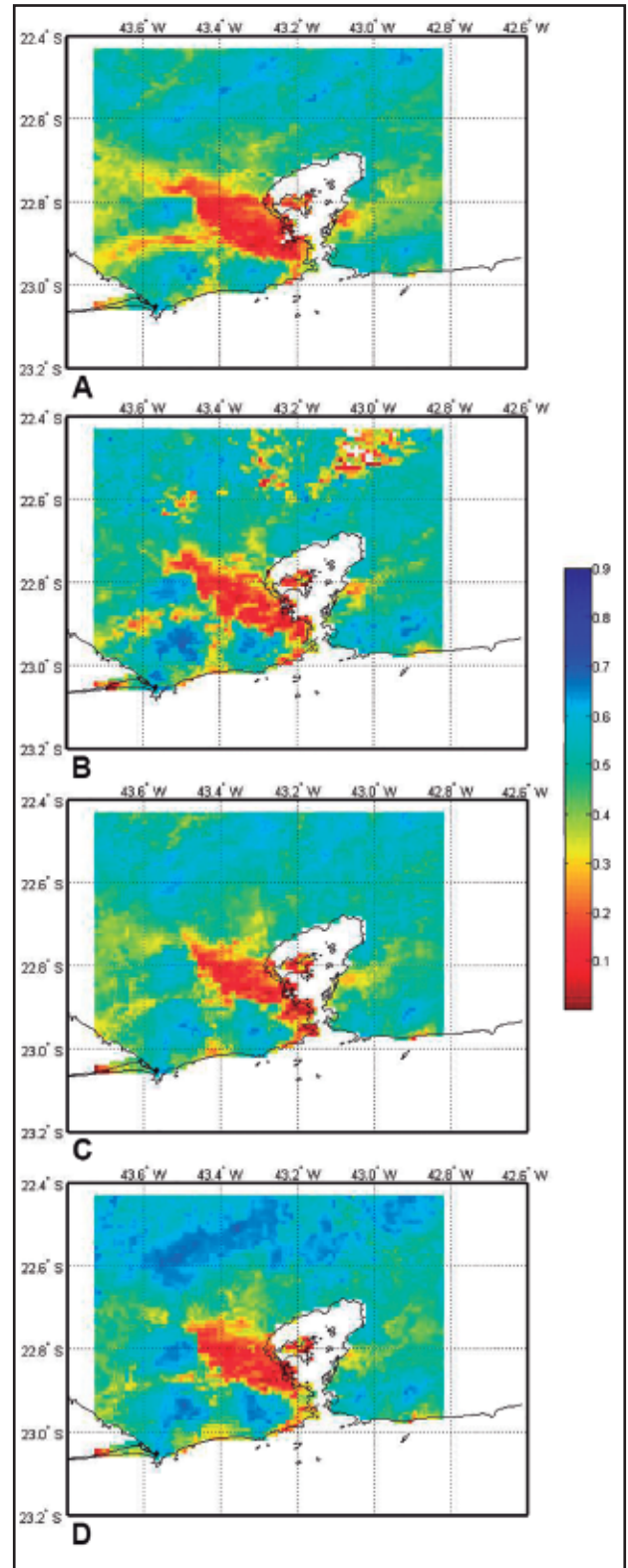


Figura 2 Imagens do índice de vegetação NDVI obtidas pelo sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA – 18 para a RMRJ em: (A) agosto de 2008, (B) dezembro de 2008, (C) agosto de 2009 e (D) fevereiro de 2010.

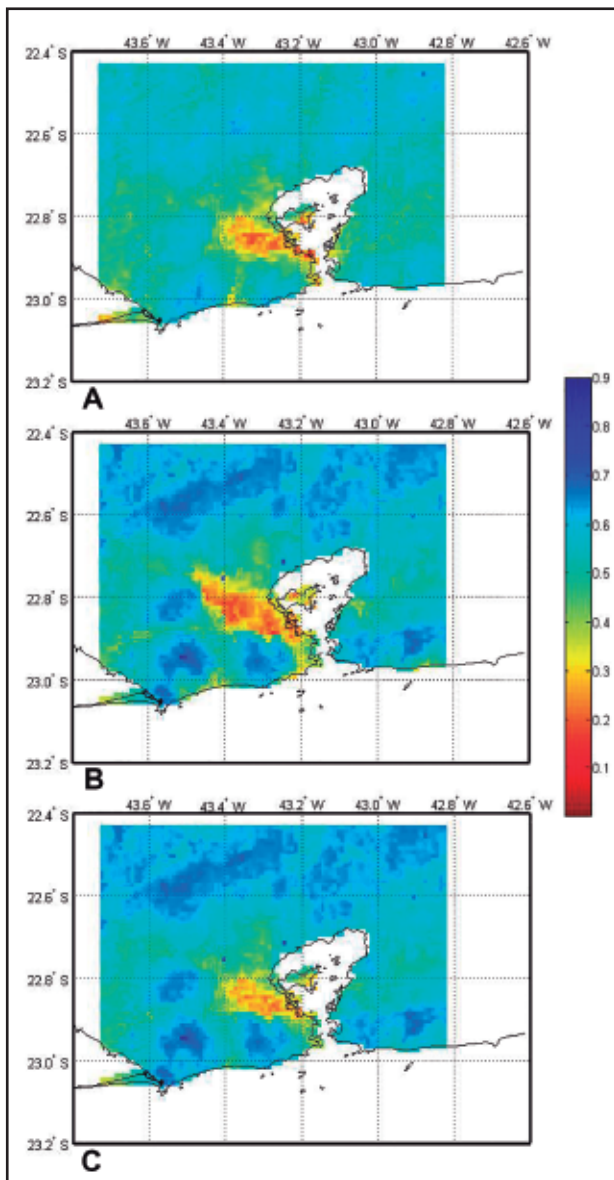


Figura 3 Imagens do índice de vegetação NDVI obtidas pelo sensor AVHRR para: (A) NOAA - 14, (B) NOAA - 18 e (C) todo o período de dados.

área as temperaturas podem ultrapassar os  $54^{\circ}\text{C}$  (por vezes atingindo valores em torno de  $63^{\circ}\text{C}$ ) nos meses de primavera e verão e entre  $39^{\circ}\text{C}$  a  $42^{\circ}\text{C}$  no outono e inverno. Esta área é a que apresenta os menores valores de NDVI (evidenciando uma região com pouca ou nenhuma vegetação). Estas temperaturas são mais elevadas do que as estimadas para áreas vizinhas (como os maciços da cidade do Rio de Janeiro), evidenciando um dos fatores característicos da ICU.

Ainda analisando as Figuras 4 e 5 pode-se observar que as áreas entre os maciços da cidade do Rio de Janeiro e na porção oeste de Niterói e

São Gonçalo (próximo a Baía de Guanabara) a sazonalidade da temperatura é bem evidente, com os mais elevados valores sendo estimados na primavera e verão e os mais baixos no outono e inverno. Nas áreas de maciços e serra do Mar também percebe-se a sazonalidade da estimativa da TS, pois nos meses de primavera e verão as temperaturas estimadas são mais elevadas do que nos meses representativos do outono e inverno, como era esperado, devido a variação da temperatura nas estações do ano.

Na Figura 4, referente ao NOAA - 14 para o início do período vespertino, pode observar altos valores da estimativa de TS em localidades citadas anteriormente, em comparação as áreas no em torno. Isto indica um padrão de ICU distintamente diferente do que é observado em áreas de latitudes médias. Nestas áreas o fenômeno ocorre com maior intensidade durante a noite, enquanto que na área do estudo elevados valores da estimativa de TS já podem ser encontrados no período da manhã. Marques Filho (2009) observou este mesmo padrão.

Na Figura 5A, referente ao mês de agosto de 2008, as temperaturas estimadas são tão elevadas quanto as que ocorrem nos meses de primavera e verão e chegam a alcançar valores entre  $45^{\circ}\text{C}$  a  $48^{\circ}\text{C}$  na área entre as latitudes de  $22,7^{\circ}\text{S}$  a, aproximadamente,  $23,0^{\circ}\text{S}$  e longitudes de  $43,4^{\circ}\text{W}$  até  $43,2^{\circ}\text{W}$ . Estas altas TS são devido a ação conjunta do efeito do uso do solo, grande número de dias com ausência de nebulosidade (que ocasionou a elevação das temperaturas) e baixo índice de precipitação.

Na Figura 5D, representativa de fevereiro de 2010 percebe-se *pixels* em branco na porção leste da cidade do Rio de Janeiro. Isto pode ser causado pela contaminação da nebulosidade nos dados, pois os horários deste satélite são do início da tarde, quando as nuvens convectivas encontram-se em processo de formação.

Ao analisar as Figuras 6A e 6B (composições dos maiores valores de TS para, respectivamente, o NOAA - 14 e o NOAA - 18) percebe-se que a segunda figura exhibe valores mais elevados (entre  $39^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ ) em grande parte da área da RMRJ, incluindo os maciços do Rio de Janeiro, de Niterói e a Serra do Mar. Isto mostra uma “expansão” da mancha com elevados valores da estimativa de TS. Já na Figura 6A os maiores valores ficam concentrados na área com os mais baixos valores do índice de vegetação NDVI, como era esperado. O fato pode ser explicado por os dados da Figura 6B serem do início da tarde, quando a superfície terrestre já se encontra mais aquecida pela radiação solar, enquanto que a



primeira imagem é do início da manhã. Os diferentes valores do coeficiente  $A_k$  podem colaborar para esta diferença na estimativa de TS entre os satélites.

Ao se fazer a composição dos maiores valores da estimativa de TS para todo o período de dados (Figura 6C) percebe-se essa influência dos maiores valores de temperatura que são estimados através dos dados do NOAA – 18, pois somente na área mais ao norte da RMRJ (na Serra do Mar) encontram-se os valores mais reduzidos (entre 33°C a 39°C), enquanto grande parte da área do estudo as temperaturas são superiores a 42°C e atingindo picos próximos a 65°C. Isto evidencia que a área da RMRJ se configura em uma extensa região de altas temperaturas à superfície.

### 3.3 Transectors e Perfil Térmico

Nesta seção são exibidos os resultados encontrados a partir de *transectors*, ou seja, os perfis térmicos para os meses de janeiro e abril de 2006, fevereiro e maio de 2007 (estes para o NOAA – 14) e agosto e dezembro de 2008, agosto de 2009, fevereiro de 2010 (para o NOAA – 18). Os *transectors* foram confeccionados para a mesma latitude (22,85°S) nas composições dos maiores valores de TS dos meses acima citados. Esta latitude foi selecionada por estar na área onde ocorrem tanto elevados valores de TS como valores de TS mais reduzidos.

Na análise das Figuras 7 e 8 pode-se observar que os picos de valores mais elevados ocorrem entre as longitudes de 43,2°W a 43,4°W ao longo do período de dados. Nos meses de primavera e verão os valores da TS são em torno de 55°C (podendo alcançar 60°C) e nos meses de outono e inverno alcançam valores próximos a 45°C. Também é observado que entre as longitudes de 43,1°W e 43,2°W há um espaço branco em todos os perfis térmicos mostrados. Isto deve-se a Baía de Guanabara estar situada entre estas longitudes e os valores de TS nesta área serem desconsiderados.

Em fevereiro de 2010 a contaminação da nebulosidade é observada nos espaços em branco entre os pontos das maiores TS. Estes espaços brancos ocorrem, principalmente, na região entre as longitudes de 43,2°W a 43,4°W, onde os perfis térmicos exibiram seus maiores valores de TS.

Nos meses inseridos na primavera e verão a amplitude térmica é mais elevada (cerca de 20°C) do que no período de outono e inverno (em torno de 10°C). Estas amplitudes térmicas devem-se a

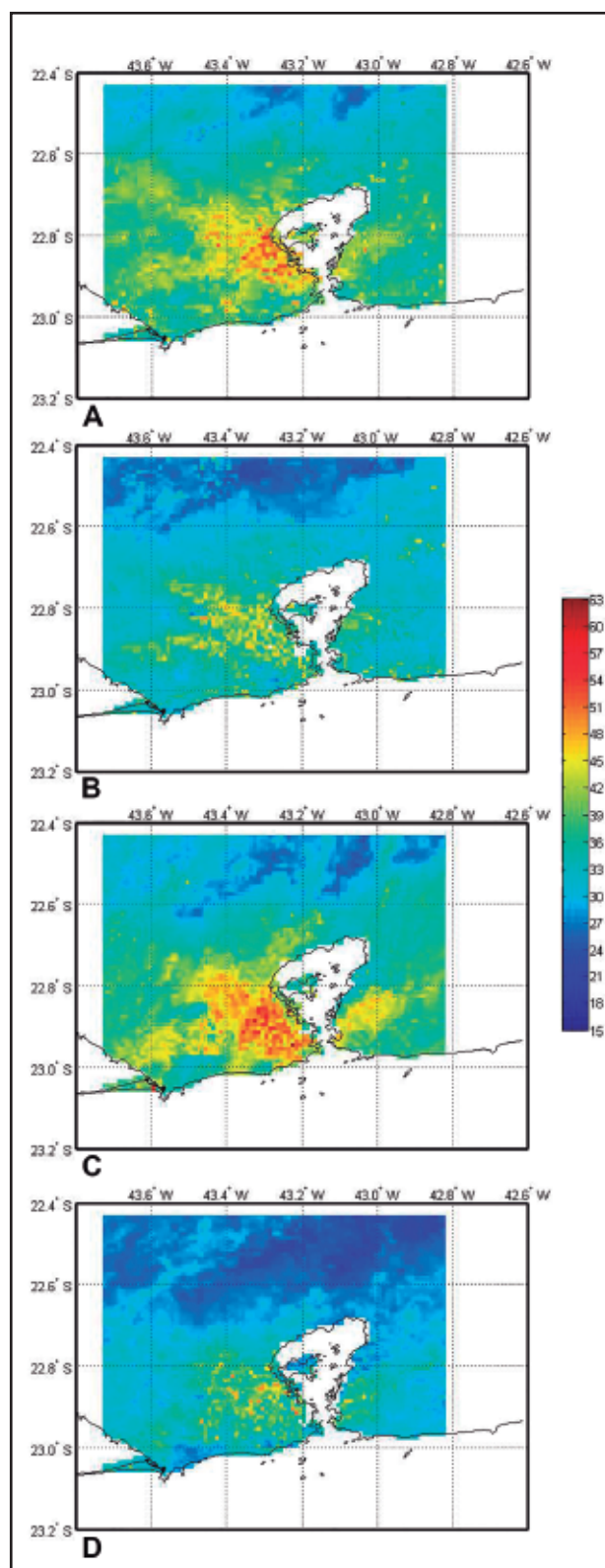


Figura 4 Imagens da composição dos maiores valores de TS obtidos pelo sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA – 14 para a RMRJ em: (A) janeiro de 2006, (B) abril de 2006, (C) fevereiro de 2007 e (D) maio de 2007.



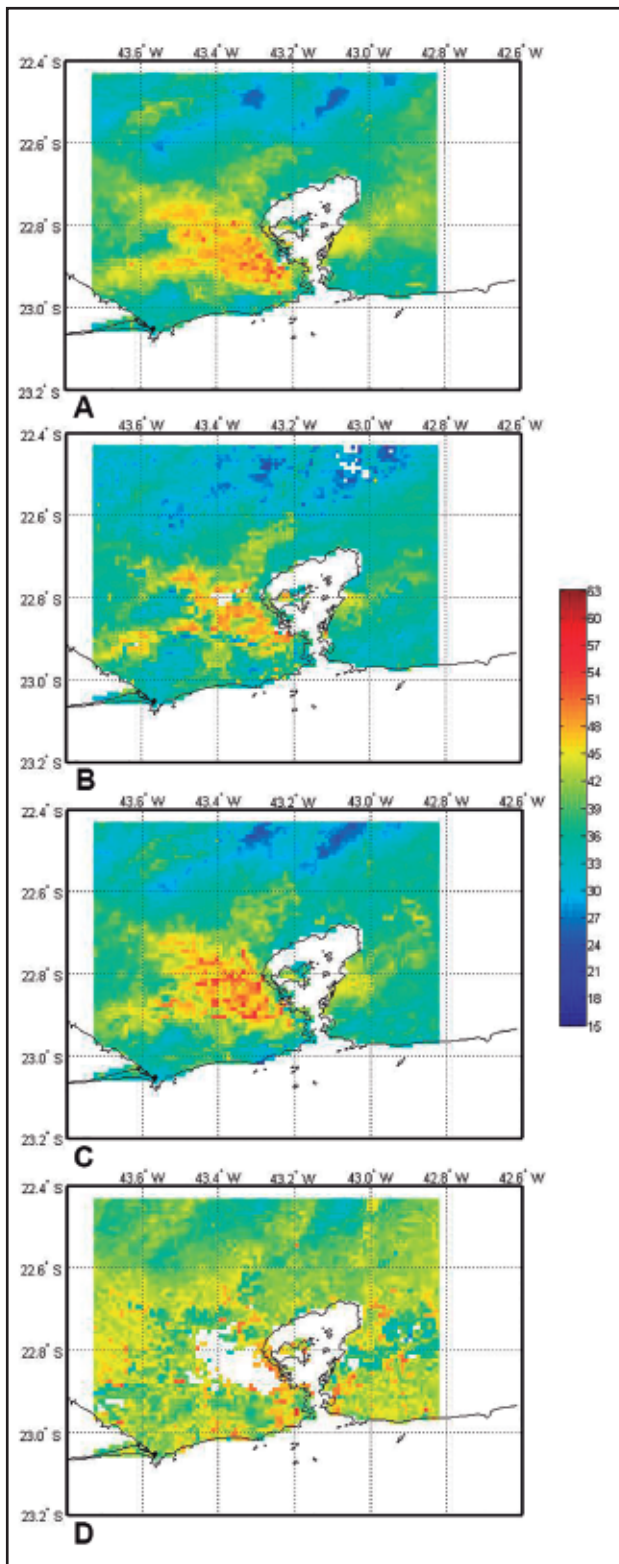


Figura 5 Imagens da composição dos maiores valores de TS obtidos pelo sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA – 18 para a RMRJ em: (A) agosto de 2008, (B) dezembro de 2008, (C) agosto de 2009 e (D) fevereiro de 2010.

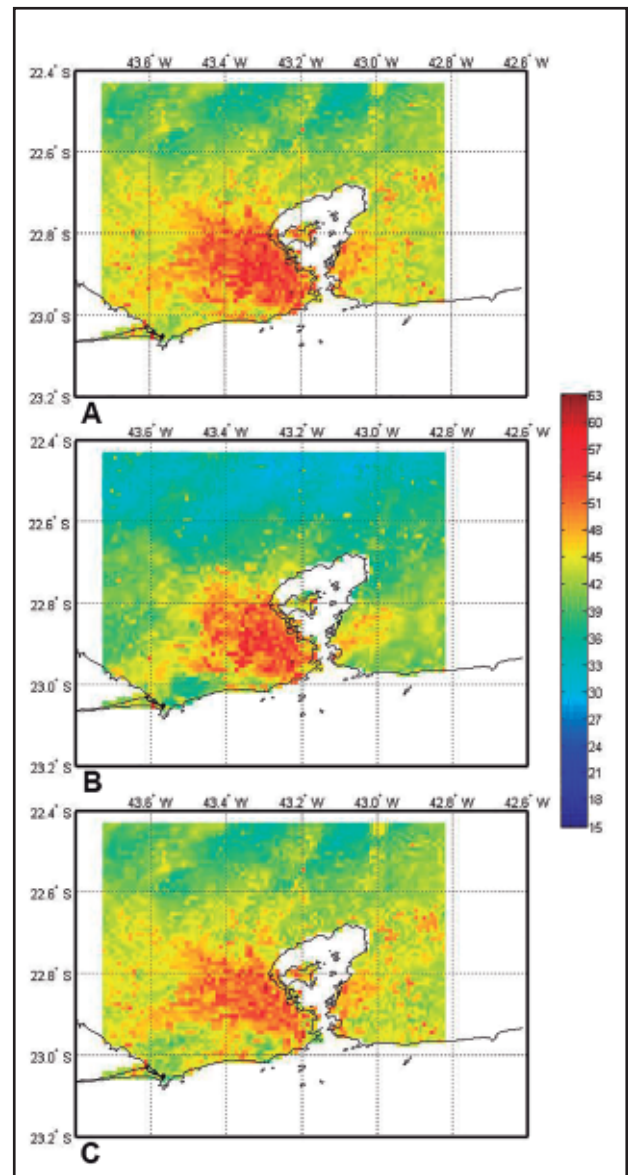


Figura 6 Imagens da composição dos maiores valores de TS obtidos pelo sensor AVHRR para: (A) NOAA – 14, (B) NOAA – 18 e (C) todo período de dados.

latitude usada como referência atravessar tanto a área do maciço de Gericinó (nas longitudes próximas a 43,5°W) como uma parte da região com as TS mais elevadas. A primeira área detém alto valor de NDVI (é considerada uma área vegetada) e com menores valores de TS, enquanto a segunda área é caracterizada por pouca ou nenhuma vegetação e altos valores de TS. Isto mostra que a diferença de uso de solo influi diretamente na estimativa de TS. Além disto, as altas amplitudes térmicas entre áreas consideradas menos vegetadas e com maior vegetação é uma característica do fenômeno da ilha de calor urbana.

A Figura 9 representa o perfil térmico da composição dos maiores TS para, respectivamente, os períodos de dados dos satélites NOAA – 14, NOAA – 18 e o perfil térmico da composição dos maiores TS para todo o período de dados. A análise das Figuras 7, 8 e 9 mostra que entre as longitudes de 43,2°W a 43,4°W ocorrem os valores mais elevados de TS. Nas longitudes próximas a 43,5°W estão os menores valores estimados da temperatura à superfície. Estas duas condições também foram observadas nos perfis térmicos mensais mostrados anteriormente. Nas duas primeiras figuras notam-se elevados picos de TS (próximos a 55°C) e uma amplitude térmica com valores em torno de 15°C.

Nestes perfis térmicos percebe-se uma grande diferença entre os mais elevados valores da composição dos maiores TS e os mais reduzidos valores desta composição. Esta diferença varia entre, aproximadamente, 10°C (nos meses de outono e inverno) e de 20°C (nos meses de primavera e verão). A amplitude térmica observada pelo *transector* confeccionado na latitude de 22,85°S é característica do efeito da ilha de calor urbana, onde se tem altos valores de temperatura nas áreas mais urbanizadas (com NDVI mais baixos, como ocorre na área compreendida entre as longitudes de 43,2°W a 43,4°W) e temperaturas mais baixas nas áreas mais verdes (NDVI mais alto, como ocorre na área do maciço de Gericinó).

### 3.4 Resultados Estatísticos

As Figuras 10 e 11 representam o diagrama de dispersão para os meses de resultados exibidos, respectivamente, para o NOAA – 14 e NOAA - 18. A Figura 12A e 12B são os diagramas de dispersão para cada um dos satélites utilizados e, por último, a Figura 12C refere-se para todo período de dados. Foram inseridos retângulos nestas figuras que mostram a equação que melhor representa a relação existente entre as variáveis consideradas, os coeficientes de correlação (R) e o de determinação (R<sup>2</sup>). Nos gráficos de dispersão as informações do índice de vegetação NDVI se encontram no eixo x e as das composições dos maiores valores de TS no eixo y.

A análise dos diagramas de dispersão mensais mostra que, na sua grande maioria, a reta tem uma inclinação representativa de correlação negativa e isto pode ser observado pelos valores do coeficiente de correlação (R). Este índice varia de -0,30 a -0,74, o que representa uma forte correlação negativa

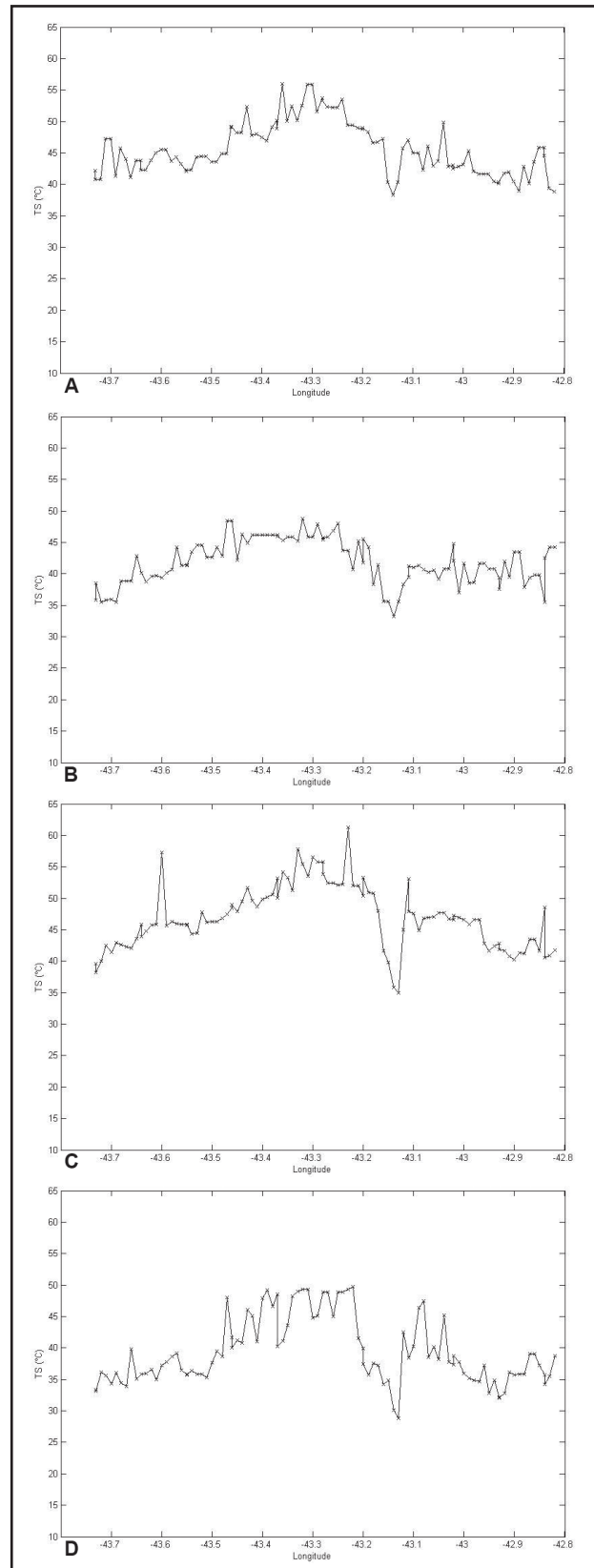


Figura 7 Perfil térmico da composição dos maiores valores de TS na latitude de 22,85°S em: (A) janeiro de 2006, (B) abril de 2006, (C) fevereiro de 2007, (D) maio de 2007.

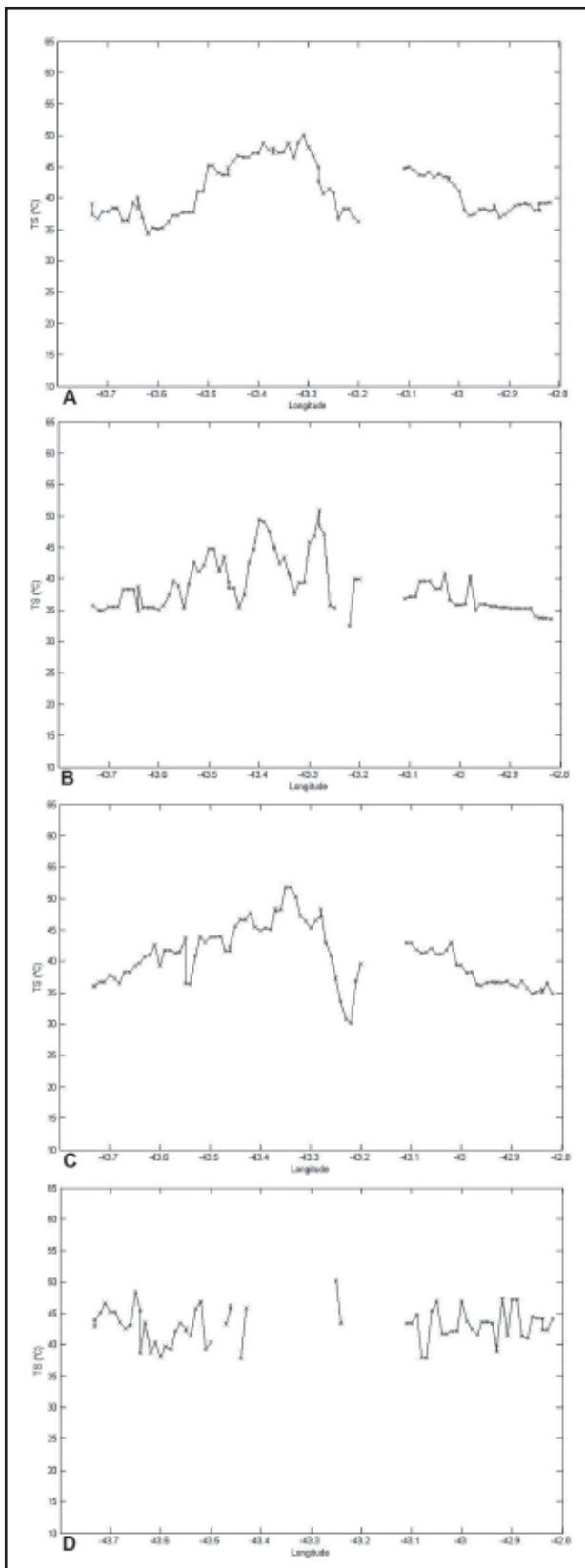


Figura 8 Perfil térmico da composição dos maiores valores de TS na latitude de 22,85°S em: (A) agosto de 2008, (B) dezembro de 2008, (C) agosto de 2009, (D) fevereiro de 2010.

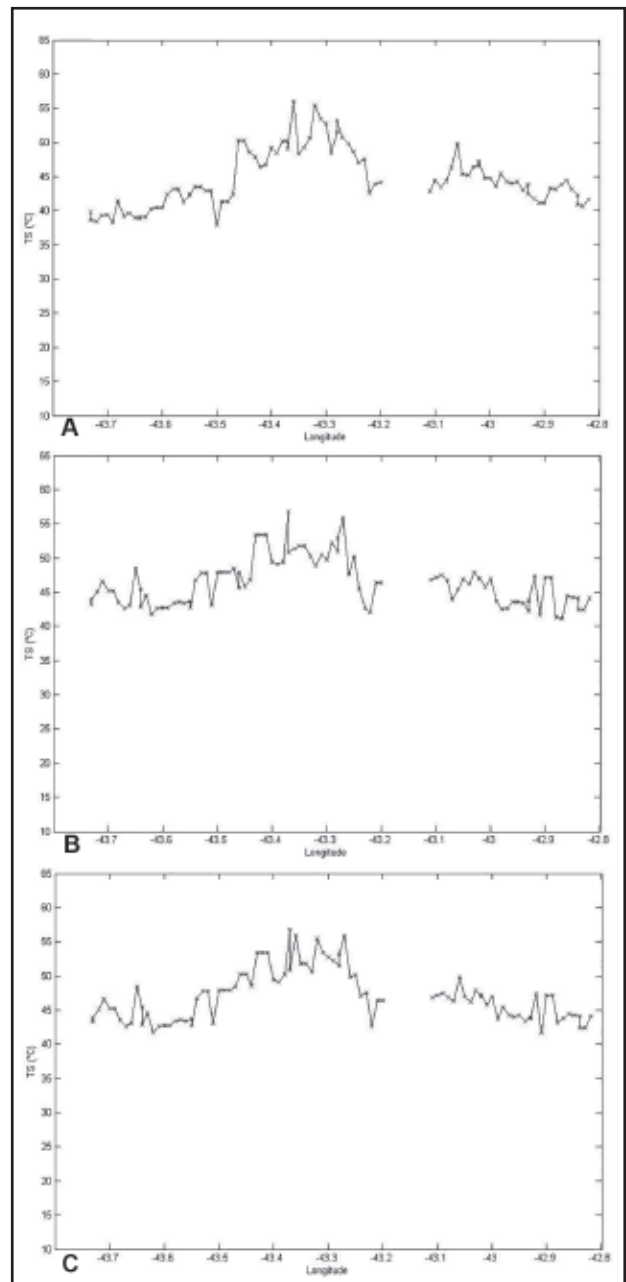


Figura 9 Perfil térmico da composição dos maiores valores de TS na latitude de 22,85°S para: (A) NOAA - 14, (B) NOAA - 18, (C) todo o período de dados.

entre o NDVI e as estimativas de TS. Isto significa que estes valores tem uma relação inversamente proporcional, ou seja, à medida que um aumenta ou outro tem que diminuir. Esta relação é observada nas áreas da região do leste da cidade do Rio de Janeiro e porções de municípios da Baixada Fluminense (baixos valores do índice de vegetação e elevados valores de TS) e na região dos maciços e da Serra do Mar (valores mais elevados de NDVI e mais reduzidos da estimativa de TS).



Nestes meses também percebe-se que o coeficiente de determinação é alto (variando de, aproximadamente, 34% até 55%). Isto significa que a variação de TS pode ser explicada entre 34% a 55% pela variação do NDVI.

Nos meses de primavera e verão nota-se que os coeficientes de correlação e determinação são menores, com destaque para o mês de fevereiro de 2010, onde R tem valores próximos a zero e R<sup>2</sup> menor que 10%. Isto indica baixa correlação entre NDVI e TS. Ainda observa-se que a reta representativa do modelo matemático que melhor descreve a relação entre estas variáveis é praticamente paralela ao eixo horizontal. A explicação para isto é o aumento da superfície vegetada nos meses de primavera e verão e elevação das TS ocorrem simultaneamente. Isto se deve aos efeitos de macroescala (efeitos meteorológicos) se sobreporem ao efeito do uso do solo.

Nas figuras do diagrama de dispersão entre o NDVI e a composição dos maiores valores de TS para cada satélite utilizado (Figura 12A, B) e para todo o período de dados (Figura 12C), é vista a relação inversa entre o índice de vegetação e a estimativa de TS com bons valores de coeficiente de correlação e determinação.

A Tabela 3 exibe o desvio-padrão de TS para os meses apresentados, para cada conjunto de dados e para o período total de dados. Como o desvio-padrão foi calculado em relação as composições dos maiores valores de TS, tem-se que este parâmetro estatístico informa a variabilidade espacial de TS. Observa-se que não ocorre maior ou menor variabilidade espacial de TS nos períodos de outono e inverno e primavera e verão. Por exemplo, tanto a maior variabilidade (fevereiro de 2007) como a menor (fevereiro de 2010) ocorrem no mesmo período.

Mês/Ano	Desvio-Padrão de TS
janeiro de 2006	4,801
abril de 2006	4,055
fevereiro de 2007	5,806
maio de 2007	4,270
agosto de 2008	4,672
dezembro de 2008	4,611
agosto de 2009	4,947
fevereiro de 2010	3,244
NOAA – 14	5,62
NOAA – 18	3,691
Todo período	4,08

Tabela 3 Desvio-padrão de TS para os meses, consolidado para cada satélite e em todo o período de dados

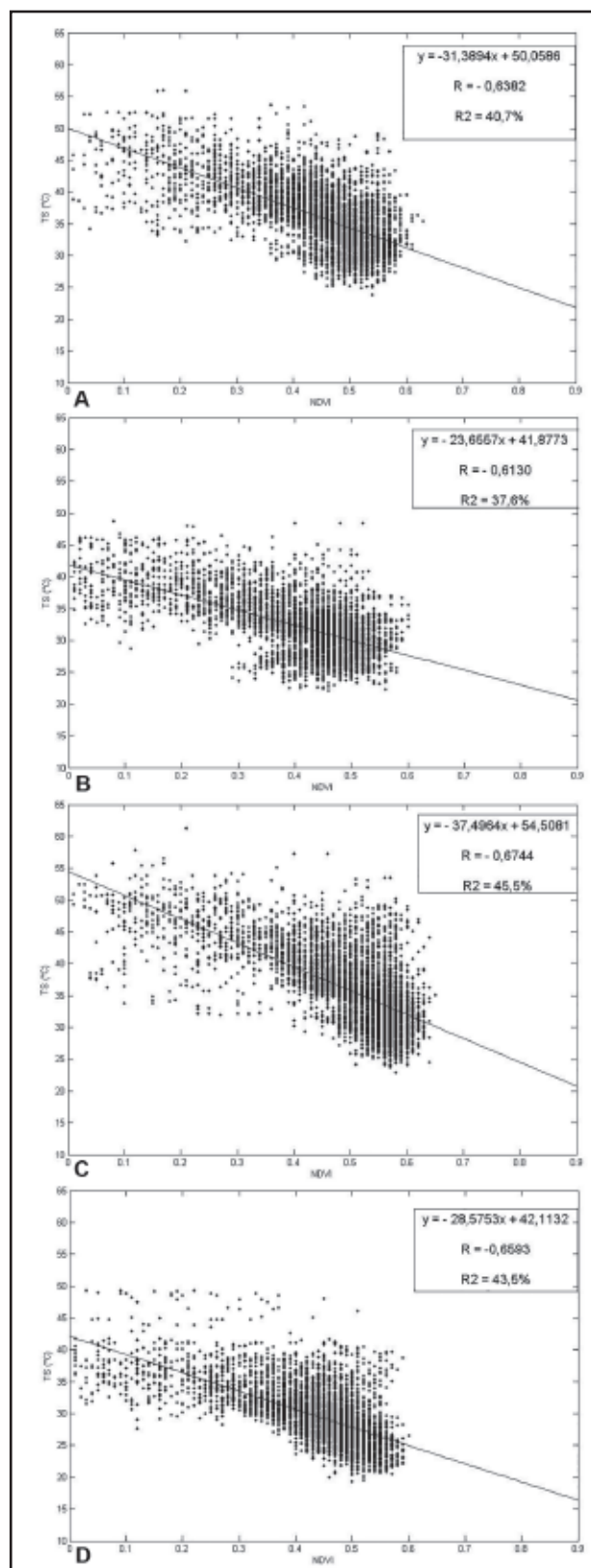
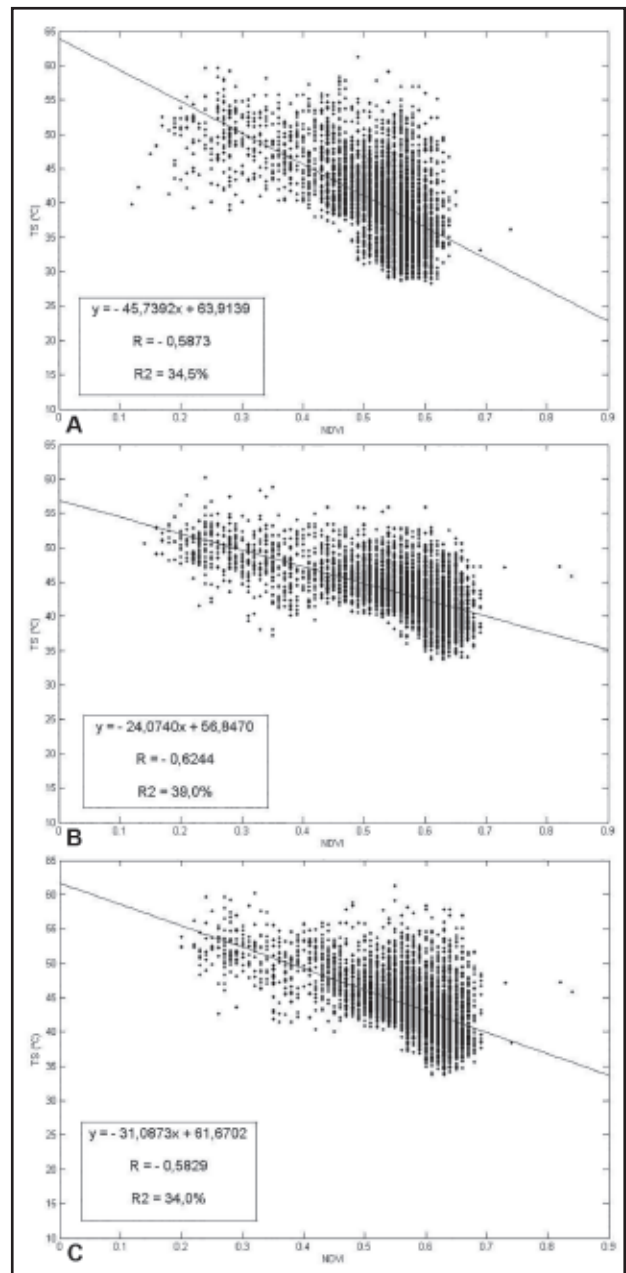
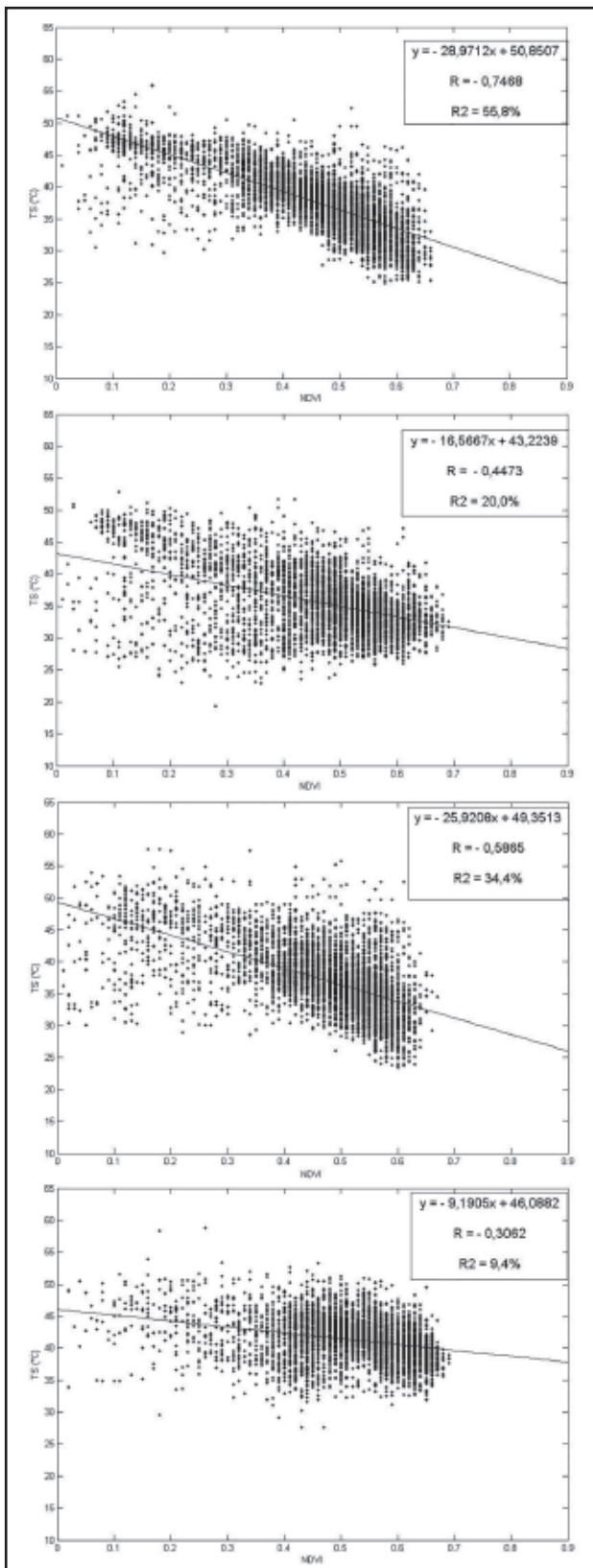


Figura 10 Diagrama da dispersão entre o NDVI e a composição dos maiores valores de TS no NOAA – 14 para: (A) janeiro de 2006, (B) abril de 2006, (C) fevereiro de 2007, (D) maio de 2007.



#### 4 Conclusões

Este trabalho discutiu a presença do fenômeno da ICU na RMRJ. A abordagem deste tema fez uso de técnicas de sensoriamento remoto no período de outubro de 2005 a maio de 2007 (para o NOAA – 14) e de agosto de 2008 a fevereiro de 2010 (para o NOAA – 18), porém foram apresentadas as discussões para os meses de janeiro e abril de 2006, fevereiro e maio de 2007, agosto e dezembro de 2008, agosto de 2009 e fevereiro de 2010.

Inicialmente, discutiu-se os resultados encontrados para estes meses do índice de vegetação

Figura 11 Diagrama da dispersão entre o NDVI e a composição dos maiores valores de TS no NOAA – 14 para: (A) agosto de 2008, (B) dezembro de 2008, (C) agosto de 2009, (D) fevereiro de 2010.

NDVI seguida pela composição dos maiores valores da estimativa de TS, o perfil térmico das temperaturas à superfície e, por fim, as estatísticas.

A utilização do método de Composição de Máximo Valor (CMV) mostrou-se bastante útil na elaboração das figuras do NDVI e da composição dos maiores valores de TS, pois, associado com as técnicas de mascaramento de nuvens, reduz a contaminação da nebulosidade.

Pode-se perceber áreas com altos valores do NDVI (acima de 0,5) ocorrendo na porção norte da RMRJ (serra do Mar), nos três maciços da cidade do Rio de Janeiro e na série de maciços próximos ao litoral da cidade de Niterói. Nestas mesmas áreas foi notado os mais reduzidos valores de TS na área da RMRJ. Nas áreas dos maciços a TS varia de 33°C a 39°C (na primavera e verão) e de 27°C a 30°C (no outono e inverno), enquanto que na serra do Mar variam de 24°C a 27°C (primavera e verão) e de 18°C a 24°C (outono e inverno). Estas áreas são consideradas como localidades com superfície vegetada e, como consequência disto, as temperaturas estimadas à superfície são mais reduzidas do que em áreas não vegetadas.

Também foi observado a existência de uma área (entre as latitudes de 22,7°S a 23,0°S e longitudes de 43,4°W até, aproximadamente, 43,2°W) com valores bastante reduzidos do NDVI. Nesta mesma área foi observado os valores mais elevados da composição das maiores temperaturas à superfície estimadas tanto na primavera e verão (em torno de 54°C e, por vezes, superando 63°C) como no outono e inverno (entre 39°C a 42°C). Esta região engloba partes de alguns municípios da Baixada Fluminense e de alguns bairros da cidade do Rio de Janeiro. Os baixos valores do NDVI podem caracterizar a área como bastante urbanizada e, assim, devido às propriedades de absorção/emissão dos diferentes tipos de matérias utilizados no processo de substituição da vegetação por prédios, ruas, entre outras construções, acabam por absorver e reter mais o calor do que em áreas vegetadas, resultando em um maior aquecimento.

Ainda foi possível observar a ocorrência da sazonalidade no índice NDVI e na estimativa de TS na zona Oeste do Rio de Janeiro, entre os municípios de Niterói e São Gonçalo, além dos maciços e a serra do Mar. Esta sazonalidade ocorre pela diminuição da área foliar que ocorre nos meses de outono e inverno, acarretando na redução do NDVI, enquanto que na primavera e verão a vegetação floresce e aumenta a área foliar e, conseqüentemente, a elevação do

NDVI. A sazonalidade da temperatura era esperada pela própria variação que ocorre nesta variável decorrente das mudanças de estações do ano.

Foi possível observar que os valores da composição dos maiores valores estimados de TS elaboradas com base nos dados do satélite NOAA – 14 foram ligeiramente inferiores àqueles obtidos para a composição dos maiores valores estimados de TS pelo NOAA – 18. Isto pode estar relacionado ao fato de que os dados do primeiro satélite serem no início da manhã, enquanto que na segunda plataforma orbital os dados são do início da tarde. No período da manhã o caminho ótico percorrido pela radiação solar é maior, o que possibilita a sua maior atenuação e menor quantidade de radiação incidente na superfície. Na parte da tarde o caminho ótico é menor, além de a superfície terrestre já ter um significativo aquecimento causado pela incidência da radiação solar. Outro fator que pode contribuir para essa diferença é o fato de os coeficientes utilizados na equação da estimativa de TS pelo método *split-window* serem diferentes entre os satélites.

Ainda com relação às composições mensais dos maiores valores de TS pelo NOAA – 14 indicam um padrão de ICU distintamente diferente do que é observado em áreas de latitudes médias. Nestas áreas o fenômeno ocorre com maior intensidade durante a noite, enquanto que na área do estudo elevados valores da estimativa de TS já podem ser encontrados no período da manhã. Marques Filho *et al.* (2009) observou este mesmo padrão.

A diferença entre as TS estimadas para as áreas de baixo NDVI e aquelas estimadas para a área de alto NDVI evidenciam uma das características do fenômeno da ICU: a amplitude térmica entre as áreas consideradas mais vegetadas e as mais urbanizadas que varia de, aproximadamente, 10°C (no outono e inverno) até 20°C (na primavera e verão).

Como era esperado, observou-se a relação inversamente proporcional existente entre o NDVI e a estimativa de TS, ou seja, as áreas com os maiores valores do índice de vegetação são as mesmas com os menores valores de TS e vice-versa. Esta relação é bem verificada nos meses de outono e inverno com os maiores coeficientes de correlação e determinação. Entretanto, nos meses de verão isto não é verificado, pois o efeito do aquecimento de macroescala (efeitos meteorológicos) se sobrepõe ao efeito do uso do solo.

O desvio-padrão da estimativa de TS mostrou-se alto pois os valores da estimativa da temperatura



à superfície estão relativamente distantes do valor da média calculada entre eles. A obtenção de medidas *in situ* é interessante para se avaliar o quão distantes ou próximos estão os valores estimados de TS em relação à temperatura observada para a área do estudo.

Os resultados encontrados mostraram que o fenômeno da ICU é atuante ao longo do ano, principalmente, na porção leste da cidade do Rio de Janeiro e em áreas de municípios da Baixada Fluminense (próximas a esta cidade). No verão o efeito da macroescala sobrepõe o efeito do uso do solo e é responsável pelos altos valores da estimativa da temperatura à superfície.

## 5 Referências

- Ezber, Y.; Sen, O.L.; Kindap, T. & Karaca, M. 2007. Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis. *International Journal of Climatology*, 27: 667 – 679.
- França, G.B. & Cracknell, A. P. 1994. A Simple Cloud Masking Approach Using NOAA – AVHRR Daytime Data for Tropical Areas. *International Journal of Remote Sensing*, 16 (9): 1697-1705.
- França, J.R.A. 1994. *Télédetection Satellitaire des Feux de Végétation em Région Intertropicale – Application à l'estimation des Flux des Composés em Trace Émis dans l'Atmosphère*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Paul Sabatier, Tese de Doutorado, 215p.
- França, J.R.A.; Brustet, J.M. & Fontan, J. 1996. Multispectral Remote Sensing of Biomass Burning in West Africa. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 22: 81 – 110.
- Garltand, L. 2010. *Ilhas de calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas*. São Paulo, Oficina de Textos. 248 p.
- Lombardo, M.A. 1985. *Ilha de Calor nas Metrôpoles: O Exemplo de São Paulo*. São Paulo, Editora HUCITEC, 244 p.
- Lucena, A.J.; Rotunno Filho, O.C.; Peres, L.F. & França, J.R.A. 2012. A evolução da ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista GEONORTE*, 2(5): 8 – 21.
- Maitelli, G.T.; Chileto, E.C.; Junior, N.L.A. & Chileto, R. 2004. Intensidade da ilha de calor em Cuiabá/MT na estação chuvosa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza, 2004. *Anais SBMET*: p. 69-82.
- Marques Filho, E.P.; Karam, H.A.; Miranda, A.G. & França, J.R.A. 2009. Tropical Urban Climate. *International Association for Urban Climate*, 52: 5 – 9.
- Moraes, N.O.; Marton, E. & Pimentel, L.C.G. 2005. Simulações numéricas da formação da ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 28 (2): 487 – 534.
- Moreira, M.A. & Shimabukuro, Y.E. 2004. Cálculo do Índice de Vegetação a Partir do Sensor AVHRR. In *Aplicações Ambientais Brasileiras dos Satélites NOAA e TIROS-N*. São Paulo, Oficina de Textos, p. 79-101.
- Oke, T.R. 1982. The Energetic basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108: 1–23.
- Oke, T.R. 1987. *Boundary Layer Climates*. New York, Routledge. 435 p.
- Peres, L.F. 1999. *Estimativa do Fluxo Médio Diário de Radiação de Onda Longa Emitido pela Superfície Terrestre Usando Dados do NOAA-AVHRR*. Bacharelado em Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Monografia, 147 p.
- Peres, L.F.; Sobrino, J.A.; Libonati, R.; Jiménez-Muñoz, J.C.; Romaguera, M. & DaCamara, C. 2011. Validation of a Temperature Emissivity Separation Hybrid Method from Airborne Hyperspectral Scanner Data and Ground Measurements in the SEN2FLEX Field Campaigns. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (24): 7251 – 7268.
- Souza, A. L. F. & Masssambani, O. 2004. Ilha de Calor Urbana na Região Metropolitana de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza, 2004. *Anais SBMET*, p. 565- 584.
- Stull, R.B. 1993. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. 666 p.
- Teza & Baptista. 2005. Identificação do Fenômeno Ilhas Urbanas de Calor por Meio de Dados ASTER on demand 08 – Kinetic Temperature (III): Metrôpoles Brasileiras. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 2005, *Anais*, p. 3911 – 3918.
- Zhang, N., Gao, Z., Wang, X. & Chen, Y. 2010. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 102: 331 – 342.
- Wilks, D.S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. London, Academic Press, 649 p.