

Estudo da variação da temperatura da superfície do município de São Paulo no período 1991–2006, com a utilização de imagens termais do satélite LANDSAT-5 TM

Flavio Laurenza Fatigati

Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente do Município de São Paulo – SVMA
R. do Paraíso, nº 387 – CEP 04103-000 – São Paulo - SP, Brasil
flfatigati@terra.com.br

Abstract. This study aims to check the variation of the apparent surface temperature of the city of São Paulo (Brazil) and its neighborhood in the 1991 – 2006 period, by using LANDSAT-5 TM satellite thermal images, as well as identify the factors that led to its formation. To do this first was calculated the apparent surface temperature of two thermal images from LANDSAT-5 TM satellite - one of them obtained in 23/10/1991 and the other obtained in 14/09/2006 – with the use of a quadratic regression model developed by Malaret et al. Then the two resultant images were compared by the subtraction between them (2006 – 1991), which revealed positive and negative variation in the apparent surface temperature of the territory in the studied period. The main conclusion is that the positive variation (heating) is directly related to the transformation caused by the antropic action on the local environment, especially to the supression of its green coverage, which is a serious situation, because this process endangers very important remaining environmental areas of the city of São Paulo and its neighborhood (particularly in terms of natural green areas and water reserves). On the other hand, negative variation in the apparent surface temperature was not that clearly explained, demanding more detailed information.

Palavras-chave: Thermal images, Heat islands, Imagens termais, Ilhas de calor, LANDSAT, São Paulo.

1. Introdução

Uma das principais características do município de São Paulo é a sua diversidade; diversos povos, diversas culturas, diversas realidades urbanas e sociais, diversas feições, diversas paisagens, diversos ambientes naturais e construídos, diversos climas.

Essa diversidade interage em uma série de processos que ocorrem na cidade e tem papel preponderante na configuração do fenômeno das “ilhas de calor” nos grandes centros urbanos e seus efeitos resultantes da combinação / sinergia entre fatores naturais e antrópicos.

Segundo Oke apud Lombardo: *“as ilhas de calor são “o resultado das modificações dos parâmetros da superfície e da atmosfera pela urbanização”*.

Notadamente na Região Metropolitana de São Paulo, o processo de urbanização levou a uma significativa supressão da cobertura vegetal e a um violento processo de impermeabilização do solo, entre outros aspectos, modificando significativamente alguns de seus principais ambientes naturais, interferindo nos regimes locais e configurando microclimas de caráter notadamente diversificado e com reflexos em ocorrências como as chuvas convectivas, que tantos transtornos trazem aos habitantes da maior cidade da América do Sul.

O objetivo principal deste trabalho é o de avançar na compreensão do fenômeno das diferenças de temperatura observadas no município de São Paulo, pesquisar suas origens e suas interações na formação de distintos microclimas locais, muitas vezes em reduzidas porções do território, bem como verificar a sua variação no espaço e no tempo. Para tanto, foi escolhido o período compreendido entre os anos de 1991 e 2006.

2. Área de Estudo

A área a ser estudada é formada pelo município de São Paulo e partes dos municípios limítrofes da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP (Figura 1), totalizando cerca de 3.500 km² (equivalentes a 350.000 ha ou 3.500.000.000 m²).

3. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes dados básicos:

- Bandas termais do satélite LANDSAT-5 TM (órbitas-pontos 219-076 e 219-077), correspondentes às cenas obtidas nos dias 23/10/1991 e 14/09/2006,
- Base cartográfica digital GEOLOG 2.1.2 (PMSP / SEMPLA / PRODAM), na escala de 1:10.000 e referenciada ao Elipsóide Internacional de Hayford (projeção UTM, fuso 23 Sul, meridiano central 45 Oeste, Datum horizontal Córrego Alegre – MG),
- Aplicativo de geoprocessamento “SPRING 4.3.3”, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – São José dos Campos / SP.

As imagens termais obtidas pelo satélite LANDSAT-5 TM captam a energia térmica irradiada / emitida pela superfície alvo varrida pelo sensor infravermelho termal (TIR – Thermal Infra-Red / 10,4 a 12,5 μm de comprimento de onda), revelando as diferenças de temperatura que ocorrem na superfície aparente, prestando-se à detecção das propriedades termais de solos, vegetação, água e rochas, entre outros alvos.

Decidiu-se utilizar apenas imagens geradas pelo LANDSAT-5 TM, dispensando-se aquelas geradas pelo LANDSAT-7 ETM+, não apenas pelos problemas operacionais recentemente apresentados por esse último, mas também pelos seguintes motivos:

- A utilização de imagens do LANDSAT-5 TM permitiu estudar um período mais longo (15 anos) e com data final mais próxima da atual (1991 – 2006),
- As imagens utilizadas referem-se a datas mais próximas em termos de épocas do ano (23/10/1991, meados da primavera / 14/09/2006, final do inverno), o que aumentou a chance da ocorrência de condições atmosféricas e meteorológicas similares entre as datas dessas,
- O fato do modelo de regressão quadrática de Malaret et al (Equação 1), que será usado para a obtenção da temperatura aparente da superfície a partir dos números digitais dos pixels que compõem a banda termal - conforme será exposto na seqüência -, ter sido concebido originalmente à época das imagens do LANDSAT-5 TM e com base nas características desse.

Para o processamento digital das imagens termais que integram este estudo, utilizou-se o aplicativo “SPRING 4.3.3”, desenvolvido pelo INPE. A rotina aplicada é a seguinte:

- Importação de alguns dos *layers* do GEOLOG 2.1.2 (limites municipais, hidrografia, quadras, etc, em .dxf R12) para o SPRING, mantendo-se os parâmetros geodésicos,
- Abertura das bandas termais do satélite LANDSAT-5 TM, referentes à área de estudo e às datas supracitadas, com o uso do módulo “IMPIMA” do SPRING, para a conversão dessas imagens para o formato “.grb” utilizado por esse aplicativo,
- Georreferenciamento e mosaicagem das cenas que compõem a área de estudo - órbitas-pontos 219/076 e 219/077 -, com base nos *layers* importados do Geolog 2.1.2 e com a utilização de 30 pontos de controle (em polinômio do 3º grau),
- Aplicação do modelo de regressão quadrática de Malaret et al (Equação 1), com o uso da programação “LEGAL” no SPRING, para obtenção da temperatura da superfície registrada em cada pixel da imagem termal do LANDSAT-5 TM, segundo o qual:

$$T = 209.831 + 0.834 \text{ DN} - 0.00133 \text{ DN}^2 \quad (1)$$

onde:

T = temperatura aparente em Kelvin (K)

DN = *digital number* ou número digital de cada pixel

As temperaturas resultantes serão, então, convertidas para °C (graus Celsius) com a subtração do valor da temperatura do ponto de congelamento da água ao nível do mar, ou seja, 273,15 K.

- Operação “pixel a pixel” entre as bandas processadas, com a subtração da imagem mais recente pela mais antiga, para determinação da variação de temperatura (Δt) no período estudado (análise temporal), adotando-se um *offset* de valor 100, para compensar a oclusão de valores negativos na imagem de 256 tons de cinza (de 0 a 255),
- Obtenção da imagem da variação da temperatura no período estudado,
- Fatiamento da imagem resultante em valores / intervalos de “ Δt ” em °C,
- Aplicação de uma escala cromática de pseudocor às imagens resultantes,

A imagem síntese final mostrará em vermelho as áreas de maior variação positiva na temperatura da superfície aparente (Δt), em contraponto às áreas a serem representadas em azul, nas quais a variação da temperatura é negativa, correspondendo os demais tons intermediários aos valores da escala de variação termal do fatiamento.

Os resultados da imagem fatiada da variação da temperatura da superfície ao longo do período estudado serão, então, analisados com o subsídio de informações e imagens complementares que venham a auxiliar na compreensão dos fatores e dos processos que influenciaram tais mudanças.

4. Resultados Obtidos

A aplicação do modelo de Malaret et al (Equação 1) tem por objetivo converter o valor digital (ou número digital, “DN”) de cada pixel que compõe as imagens termais do satélite LANDSAT-5 TM em uma correspondente temperatura da superfície aparente, qual seja, aquela registrada pelos sensores termais do citado satélite. Os resultados permitem observar a distribuição espacial das diferentes temperaturas que ocorrem na superfície da área estudada. É importante, todavia, ressaltar que a temperatura revelada com a aplicação do modelo supracitado é aquela correspondente à temperatura do solo (mais especificamente da superfície varrida pelo sensor termal do LANDSAT-5 TM) e não à temperatura atmosférica.

Conforme exposto anteriormente, o processamento das imagens resultou, num primeiro momento, em uma imagem na qual as temperaturas são representadas em tons de cinza. Como a amplitude dos valores é reduzida, tais imagens iniciais resultam pouco legíveis. Com o objetivo de melhorar a leitura da distribuição das diferentes temperaturas nas imagens, foi então aplicado às mesmas um alongamento (“*stretch*”) no contraste de seus histogramas, de forma a abranger todo o espectro de tons de cinza, sendo posteriormente aplicada uma escala cromática (do azul – temperaturas mais amenas – ao vermelho – temperaturas mais elevadas), para facilitar a associação das temperaturas às cores adotadas.

As imagens resultantes da aplicação do modelo supracitado são apresentadas na seqüência (Figura 2).

As imagens apresentadas revelam uma distribuição quantitativa da temperatura aparente da superfície registrada pelos sensores termais dos satélites LANDSAT-5 TM e permitem visualizar a sua distribuição espacial na cidade de São Paulo em momentos distintos (1991 e 2006).

Da mesma forma, permitem inferir as associações entre a resposta termal revelada e os aspectos que interagem para tal resultado. Como exemplos podem ser citados:

- a ocorrência de temperaturas mais amenas nas áreas com cobertura vegetal significativa (matas da Cantareira, extremo Sul, etc) e junto aos corpos d’água, em contraste com as temperaturas mais elevadas observadas nas regiões mais áridas da cidade (região central e antigas áreas industriais ao longo do Rio Tamanduateí - Mooca, Brás - zona leste, etc);

- o contraponto entre as respostas observadas em áreas com diferentes padrões de apropriação do espaço urbano: temperaturas mais amenas nas áreas dos chamados bairros jardins - Jardim Europa, Cidade Jardim, Chácara Flora, Granja Julieta, etc - resultado da predominância de ocupação residencial horizontal, arborização intralote e urbana/viária; temperaturas mais elevadas nas áreas periféricas (em especial da zona leste), fruto da ocupação total dos lotes pelas edificações e da quase ausência de arborização/cobertura vegetal;
- a peculiaridade da formação de algumas zonas frias provocadas pela projeção das sombras das edificações nas áreas com maior padrão de ocupação vertical (os “*canyons* urbanos”, ex. região central, Av. Paulista, etc) em conjunto com fatores como os ventos;
- a influência dos materiais encontrados nas superfícies registradas pelo sensor termal e as respectivas temperaturas aparentes reveladas (por ex.: respostas de temperaturas mais elevadas nas áreas industriais, provavelmente decorrentes da grande projeção das coberturas compostas de telhas de fibrocimento / cimento amianto e metálicas - conforme observado nos sobrevôos de helicóptero que o autor teve oportunidade de participar como integrante da equipe do projeto “Atlas Ambiental do Município de São Paulo”).

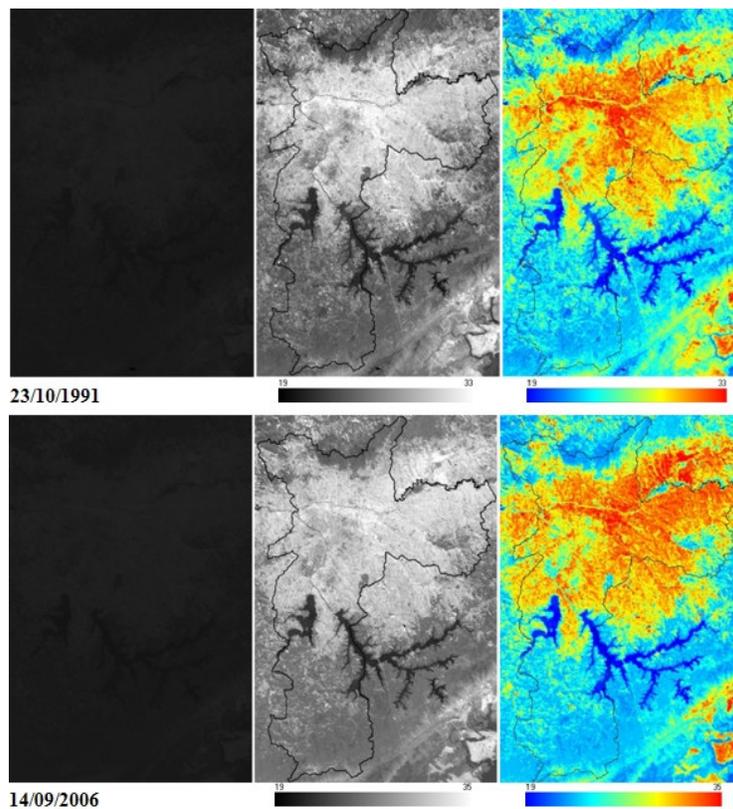


Figura 2 - Acima imagens (normais e contrastadas - em tons de cinza e em pseudocor) do cálculo da temperatura da superfície aparente nas imagens de 23/10/1991 e de 14/09/2006 e suas correspondentes escalas cromáticas (com os respectivos valores mínimo e máximo, obtidos em graus Celsius °C, ocorrentes em cerca de 99% da área do território estudado).

Em complementação, e de maneira que parece refletir a mesma lógica excludente que resulta das enormes diferenças de padrões urbanos e sociais observados no município de São Paulo, o estudo indica que, via de regra, as regiões mais carentes da cidade são também aquelas que apresentam as temperaturas mais elevadas e, por conseguinte, microclimas de menor conforto térmico para seus habitantes.

Conforme anteriormente exposto, foi, então, efetuada uma operação “pixel a pixel” entre as bandas processadas, com a subtração dos resultados de temperatura obtidos para os pixels da imagem termal processada mais recente (2006) pelos da mais antiga (1991), para a determinação da variação de temperatura (Δt) no período estudado - análise temporal -, sendo, posteriormente, aplicado um fatiamento dos valores de Δt e associada uma escala cromática - do azul ao vermelho - para melhor interpretação visual dos resultados.

O processamento adotado revelou a ocorrência de variações positivas (aquecimento) e negativas (resfriamento) na temperatura da superfície aparente em significativas porções do território estudado. Foram arbitrados como representativos os valores de variação na temperatura ocorrentes em, pelo menos, 1% da superfície total da área de estudo, sendo agrupados os valores menores do que tal parâmetro em duas faixas extremas, no início e no final da escala de fatiamento da variação termal (Tabela 1).

Tabela 1 – Variação da temperatura da superfície da área de estudo no período 1991 – 2006

Valor resultante da subtração entre as bandas termal processadas de 2006 e 1991 (com o <i>offset</i> de valor 100)	Variação da temperatura da superfície (°C)	Área (m ²)	Porcentagem da área de estudo (%)
68 a 97	≤ -3	69310917	1,97
98	-2	128445966	3,67
99	-1	340410726	9,72
100	0	845445033	24,14
101	1	1068742305	30,52
102	2	619467336	17,69
103	3	254679363	7,27
104	4	104149944	2,97
105 a 131	≥ 5	70990650	2,05

Para a geração da imagem resultante, os nove valores de variação na temperatura da superfície da área de estudo apresentados na Tabela 1 foram separados em classes, sendo essas associadas a uma escala cromática, do que resultou a imagem sintética da variação termal na temperatura da superfície da área de estudo no período 1991 – 2006 apresentada na seqüência (Figura 3).

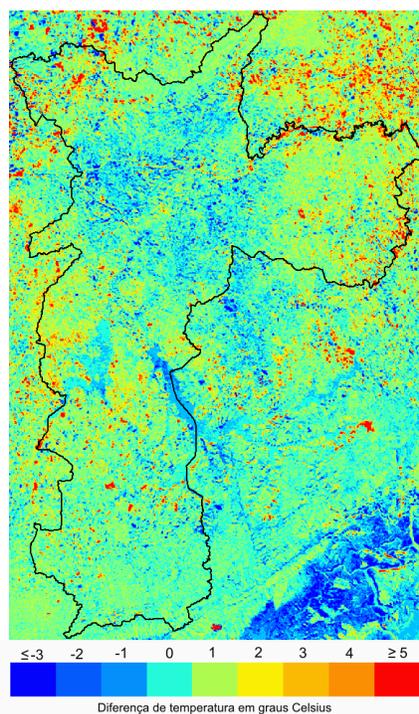


Figura 3 - Imagem fatiada da variação na temperatura da superfície da área de estudo no período 1991 – 2006

Na seqüência serão feitas aproximações nas áreas de maior variação da temperatura da superfície no período 1991 – 2006, com o objetivo de identificar as alterações e avaliar os processos ocorrentes no meio físico que levaram a que tal situação viesse a acontecer, sendo focadas áreas com variação positiva (aquecimento) nas Figuras 4, 5 e 6 e áreas com variação negativa (resfriamento) na Figura 7. Para tanto serão utilizadas a imagem sintética da variação termal 2006 - 1991, bem como duas imagens resultantes da combinação das demais bandas espectrais das cenas registradas pelo satélite LANDSAT-5 TM em 23/10/1991 e de 14/09/2006 (composições RGB respectivamente das bandas 5, 4 e 3 do LANDSAT-5 TM) e imagens capturadas do portal de informações geográficas “Google Earth” (<http://earth.google.com>), obtidas pelo satélite QuickBird supostamente durante o ano de 2007, do quanto se pode obter de informações sobre tais imagens no respectivo portal.

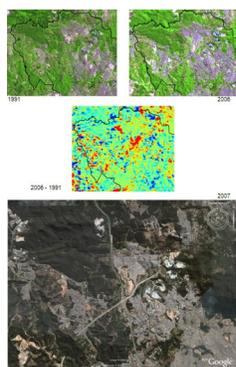


Figura 4 - Zona Noroeste – ocupações por loteamentos irregulares, ampliação do aterro sanitário Bandeirantes e obras do Rodo Anel.

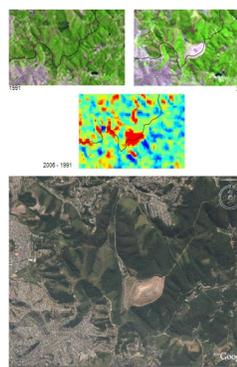


Figura 5 - Zona Leste – detalhe da área do aterro sanitário São João, junto à divisa com o município de Mauá.

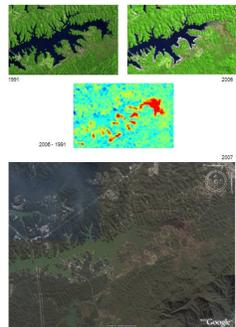


Figura 6 - Região da Represa Billings (Rio Grande) no município de Santo André – ocupações junto às margens do reservatório e redução do nível d’água.

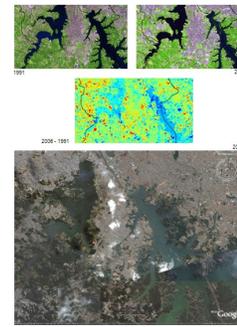


Figura 7 - Reservatórios Guarapiranga e Billings – presença de microorganismos (algas verdes e macrófitas aquáticas) na superfície de suas águas.

5. Conclusões

Os resultados do presente estudo da variação na temperatura da superfície aparente do município de São Paulo no período 1991 – 2006 indicam que tal fenômeno está diretamente relacionado à ação antrópica sobre o meio ambiente local (supressão de cobertura vegetal, estado da vegetação, exposição do solo, adensamento, topografia construída / verticalidade das edificações, tipos de uso do solo, padrões áridos de ocupação e urbanização, etc).

As áreas com variação positiva (aquecimento) na temperatura da superfície do território estudado mostraram especial correlação com regiões nas quais houve processos de supressão da cobertura vegetal existente e a conseqüente exposição do solo ou de superfícies compostas de materiais com maior índice de absorção da radiação solar resultantes da ocupação do território.

Já as áreas com variação negativa (resfriamento) na temperatura da superfície, não permitiram clara identificação dos processos a elas associados, porém, parecem estar relacionadas ao estado da cobertura vegetal (recomposição / estágio / crescimento) e aos reflexos de diferenças nas condições atmosféricas e meteorológicas na temperatura das superfícies no período estudado. Tais processos mostram-se particularmente cruéis, pois têm levado a um comprometimento exponencial do patrimônio ambiental remanescente do município de São Paulo, não apenas de sua cobertura vegetal (Serra da Cantareira, extremo sul do MSP), mas também de seus mananciais (Represas Billings e Guarapiranga), e carregam, ainda, uma importante componente socioambiental em sua formação e em suas conseqüências.

Como propostas para um eventual aprofundamento do presente estudo, são considerados, entre outros itens:

- A construção de uma série temporal mais abrangente (e com imagens de datas intermediárias - multitemporalidade),
- Um adequado controle dos dados originais e do pré-processamento das imagens de satélite utilizadas,
- O teste de outros modelos / algoritmos para a determinação da temperatura (ex: cálculo a partir da radiância),
- O uso de imagens termais geradas por outros satélites, por exemplo, as do ASTER,
- O cruzamento das imagens com dados cadastrais (multitemporais) de uso do solo,
- A calibragem dos resultados obtidos para as respostas termais com o uso de dados de estações meteorológicas terrestres (e sua modelagem), visando um maior controle das condições atmosféricas e meteorológicas das datas das imagens termais a serem utilizadas.

Agradecimentos

O presente estudo é parte do Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Geoprocessamento do SENAC / SP, concluído pelo autor no primeiro semestre do ano de 2008. Agradeço à minha orientadora, Joyce da Silva Bevilacqua, à coordenadora do curso, Diana Sarita Hamburger e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a elaboração deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Crosta, A.C. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas, UNICAMP, 1992. 107p.
- Lombardo, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: HUCITEC, 1985, 244 p.
- Malaret, E.; Bartolucci, L.A.; Lozano, D.F.; Anuta, P.E.; Mc Gillen, C.D. 1985. LANDSAT-4 and LANDSAT-5 thematic mapper data quality analysis. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, n. 51, p. 1407-1416.
- Oke, T. R. **Boundary Layer Climates, London**. Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John. Wiley & Sons, New York, 1978, 372p.
- Pereira, G., Camargo, F. F., Oliveira, L. G. L de, Guerra, J. B. Identificação do fenômeno de ilhas de calor para a Região Metropolitana de São Paulo através de dados provenientes do Satélite LANDSAT 7 ETM+. **Anais – III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**, Aracaju/SE, 25 a 27 de outubro de 2006, Disponível em < http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr3/artigos_pdf/031_t.pdf > Acesso em 21/09/2007
- PMSP / SVMA / SEMPLA, **Atlas Ambiental do Município de São Paulo**. 2003, Disponível em < <http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br> > Acesso em 03/12/2007
- Sorre, M. **Traité de climatologie biologique et médicale**. Piery Masson et Cie Éditeurs. Paris, p.1-9, 1934.
- Tarifa J.R.; Armani G., Os Climas Naturais. In: Tarifa J.R. & Azevedo, T.R. (orgs.) **Os Climas na cidade de São Paulo: Teoria e prática**. São Paulo, GEOUSP, coleção Novos Caminhos (4), 2001, p. 34-46.
- Weng Q. A., Dengsheng L. B., Schubring J. A. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, n. 89, p. 467 – 483, Disponível em < www.elsevier.com/locate/rse > Acesso em 10/04/2007