

## VI-102 - SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTUDOS DE ILHA DE CALOR: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE SÃO CARLOS (SP)

**Ricardo Victor Rodrigues Barbosa<sup>(1)</sup>**

Arquiteto e Urbanista pela Universidade Federal de Alagoas. Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental na EESC/USP.

**Cláudio Turene Almeida Dornelles**

Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFET-CE), Arquiteto e Urbanista pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental na EESC/USP.

**Marcelo Montaña**

Engenheiro Mecânico, Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento e do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da EESC/USP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Trabalhador Sancarlense, 400, Departamento de Hidráulica e Saneamento, São Carlos-SP - CEP: 13566-590 - Brasil - Tel: (16) 3373-9540 - e-mail: [rvictor@sc.usp.br](mailto:rvictor@sc.usp.br)

### RESUMO

A utilização de dados de sensoriamento remoto captados na região do infravermelho termal permite a realização de estudos do comportamento térmico das diferentes tipologias de cobertura do solo pelo fornecimento de informações relativas à temperatura aparente da superfície (*Land Surface Temperature* – LST). A partir deste contexto, o trabalho objetivou acrescentar novos subsídios ao desenvolvimento de estratégias para o planejamento urbano, com a utilização de SIG e sensoriamento remoto como instrumento para uma aproximação inicial ao estudo da formação de ilhas de calor no ambiente urbano por meio do uso de sensoriamento remoto termal, tendo como objeto de estudo a cidade de São Carlos, localizada na região central do Estado de São Paulo. Nesse sentido, realizou-se o cruzamento de imagem LST com imagem resultante ao mapa de tipologias de uso da área de estudo, a fim de identificar sua correlação entre a formação das ilhas de calor por meio da avaliação de parâmetros estatísticos. Os resultados obtidos por meio de análise da banda termal 6h (alto ganho) do satélite Landsat 7 ETM+ mostrou-se viável a utilização de SIG como ferramenta de análise na identificação de ilhas de calor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sensoriamento remoto termal, Ilha de calor urbano, Landsat 7 ETM+.

### INTRODUÇÃO

O processo de urbanização tem se intensificado desde o final da Revolução Industrial. Em meados do século XIX, a população mundial superou o primeiro bilhão de pessoas. Entretanto, menos de 2% habitavam áreas urbanas. Aproximadamente cem anos depois, em 1940, a população mundial chegou ao número de 2,3 bilhões de habitantes, dentre os quais 20% residentes em áreas urbanas. Na Europa e os Estados Unidos este percentual ultrapassava os 50%.

No Brasil, a ocorrência do crescimento demográfico em áreas urbanas é agravada, sobretudo, pela falta de planejamento, fato que compromete a qualidade ambiental em nossas cidades. Dentre os impactos resultantes da ocupação desordenada do solo em área urbana, podemos citar a modificação das condições iniciais do clima por meio da alteração do balanço energético no sistema superfície-atmosfera, em escala mesoclimática. A alteração na cobertura natural do solo e o incremento de massa edificada, dentre outros fatores, criam um clima peculiar denominado “clima urbano”.

O clima urbano caracteriza-se, freqüentemente, pelo aumento da temperatura, tanto superficial quanto do ar, em relação ao seu ambiente rural circunvizinho. O incremento nos valores de temperatura deve-se às condições particulares do meio ambiente urbano, seja por sua rugosidade, ocupação do solo, orientação, permeabilidade e propriedades físicas dos materiais constituintes, entre outros fatores (OKE, 1996). O aquecimento elevado em algumas áreas da cidade – comumente as áreas centrais – é abordado por alguns



autores como sendo anomalia térmica conhecida como "ilha de calor urbana" – foco de estudo do presente trabalho.

Nesse sentido, o sensoriamento remoto se destaca nos estudos de ordem ambiental com o crescente uso de seus recursos na pesquisa científica. Nos estudos de clima urbano, o uso do sensoriamento remoto tem experimentado um crescimento nas últimas décadas, principalmente na análise de anomalias térmicas como as ilhas de calor.

A utilização de dados de sensoriamento remoto captados na região do infravermelho termal permite a realização de estudos do comportamento térmico das diferentes tipologias de cobertura do solo pelo fornecimento de informações relativas à temperatura aparente da superfície (*Land Surface Temperature – LST*).

No Brasil, o estudo das ilhas de calor com uso de técnicas de sensoriamento remoto é ainda incipiente. Em paralelo, a produção científica a respeito do conforto térmico no meio urbano têm aumentado significativamente, face aos debates a respeito da crise energética e da necessidade de racionalização do uso de energia. Nesse sentido, justifica-se a necessidade de integração entre estas duas áreas do conhecimento, foco do presente trabalho.

A partir deste contexto, o trabalho tem por objetivo acrescentar novos subsídios ao desenvolvimento de estratégias para o planejamento urbano, com a utilização de SIG e sensoriamento remoto como instrumento para uma aproximação inicial ao estudo da formação de ilhas de calor no ambiente urbano por meio do uso de sensoriamento remoto termal, tendo como objeto de estudo a cidade de São Carlos, localizada na região central do Estado de São Paulo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As análises foram realizadas através imagens da banda termal de alto ganho do satélite Landsat 7 ETM+, as quais foram tratadas com auxílio do *software* Idrisi v3.2. A reclassificação da imagem em faixas termais indica áreas que apresentaram maiores temperaturas aparentes de superfície. Essas áreas são identificadas por meio de análise visual ou automatizada, assumindo-se que correspondem a áreas propícias à geração de ilhas de calor.

A partir daí, realizou-se a sobreposição desta imagem resultante ao mapa de tipologias de uso para a área de estudo, a fim de identificar sua correlação entre a formação das ilhas de calor por meio da avaliação de parâmetros estatísticos.

## PRIMEIRA ETAPA: MAPA DE USO DO SOLO URBANO

O mapa do uso do solo na área urbana foi obtido por meio do documento de levantamento para a elaboração do Plano Diretor de São Carlos. O mapa, datado de 2002, disponibilizado pela Prefeitura Municipal encontrava-se em documento digital com extensão "pdf". Dessa forma, o mapa digitalizado foi transferido para o *software* Adobe Photoshop 7.0.1, com resolução de 96 *pixels/cm*, modo de cores em canais RGB (24 *bits*) e dimensões de 871 *pixels* de largura por 1151 *pixels* de altura, com vistas a melhorar a resolução do arquivo original.

Posteriormente, o arquivo tratado e com melhor resolução foi transferido para o *software* Corel Photo-Paint 11, onde foram separados os canais RGB, com a geração de uma imagem para cada canal (8 *bits*). Em seguida, as três imagens em 8 *bits* (*red*, *green* e *blue*) foram importadas para o *software* Idrisi32, a fim de que as mesmas fossem retificadas geometricamente<sup>1</sup>. Na fase de retificação geométrica foram tomados 20 pontos de controle a partir de imagem de satélite corrigida do Laboratório de SIG, EESC/USP.

<sup>1</sup> Usa-se a denominação "retificação geométrica" quando o registro da imagem é feito por meio de uma imagem georreferenciada.



Em seguida foi feita a reamostragem das três imagens de uso do solo adotando os mesmos parâmetros de referências. Utilizou-se a função de mapeamento “linear”<sup>2</sup> e o tipo de reamostragem “interpolação bilinear”, onde o valor da nova célula é determinado pela distância média das quatro células vizinhas. O sistema de projeção utilizado foi o UTM 23 Sul, com unidade de referência em metros e unidade de distância igual a 1.

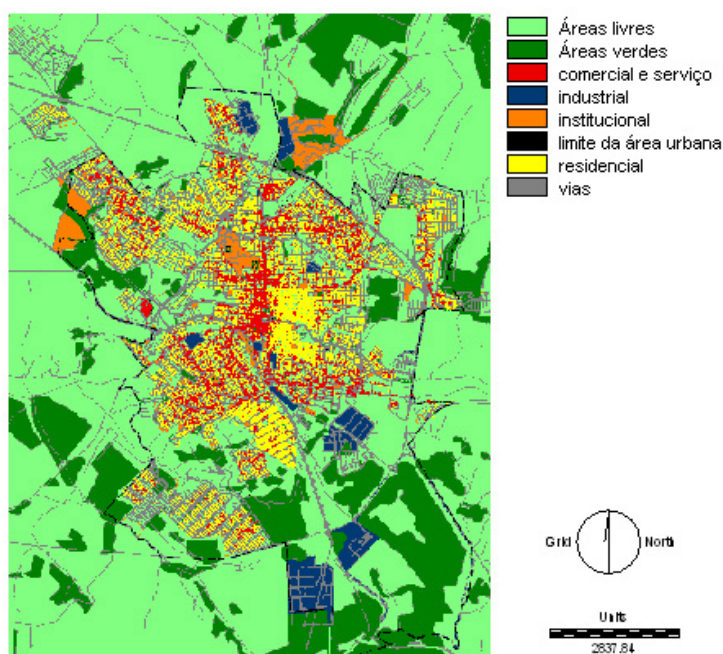
A retificação geométrica com os parâmetros descritos, apresentou erro médio quadrado (RMS) de 2,39. Este valor do erro foi considerado bastante elevado, visto que o tutorial do Idrisi32 sugere que o valor do RMS seja próximo à metade do valor do *pixel*. Neste caso, cada *pixel* possui o valor igual a 1, como vimos anteriormente. Assim, o valor do RMS deveria se aproximar à 0,50.

Dessa forma, foram analisados o erro residual individual dos 20 pontos de controle, optando-se por descartar alguns pontos com vistas a obter um RMS próximo ao valor ideal. O critério de eliminação dos pontos foram três: (1) valor do erro residual individual, (2) classificação do ponto quanto à sua precisão (ruim, regular ou bom); e, (3) sua distribuição na malha de pontos. Ao ponderar esses critérios, decidiu-se pela eliminação de 9 pontos, obtendo-se, por fim, um RMS igual a **0,76**, considerado satisfatório, com um total de 11 pontos de controle distribuídos pela área a ser analisada.

Com as três imagens de uso do solo (*red*, *green* e *blue*) retificadas geometricamente, foi feita a classificação supervisionada da imagem de acordo com o uso do solo indicado no mapa original. Dessa forma, a imagem foi classificada em 8 (oito) tipos de cobertura do solo: (1) residencial; (2) comercial/serviço; (3) industrial; (4) institucional; (5) áreas verdes; (6) áreas livres; (7) vias; e (8) limite da área urbana.

Neste sentido, foram localizados exemplos representativos de cada tipo de cobertura do solo, identificadas como *áreas de treinamento*. Em seguida, digitalizados polígonos em torno de cada área de treinamento, adotando-se um identificador específico para representar cada tipo de cobertura. Obteve-se, assim, a imagem abaixo:

**Figura 1: Mapa de Uso do Solo Urbano – classificado.**



<sup>2</sup> De acordo com o tutorial Idrisi32, deve-se escolher a função de mapeamento de ordem mais baixa que produza resultado aceitável. Os números de pontos de controle mínimos para cada função são: 3, para linear; 6, para quadrática; e 10 para cúbica). No caso deste trabalho, obtivemos melhor resultado com a função linear.



## SEGUNDA ETAPA: IMAGEM DE SATÉLITE – BANDA TERMAL

Para o presente trabalho, foi usada a banda 6h (alto ganho) do satélite Landsat 7 ETM<sup>+</sup>, da órbita 220 ponto 75, às 09h45 do dia 08/01/2003, com 58,8° de ângulo de elevação solar e 98° de azimute. O sistema de projeção da imagem é UTM, com elipsóide WGS84 e datum WGS84.

A imagem foi retificada geometricamente com uso do *software* Idrisi 32, tomando os mesmos 20 pontos de controle usados na etapa anterior de retificação da imagem de uso do solo a partir de imagem de satélite georreferenciada do Laboratório de SIG, EESC/USP. O sistema de projeção permaneceu o UTM 23 Sul, com unidade de referência em metros e unidade de distância igual a 1.

A retificação geométrica tomada com os 20 pontos de controle obteve o erro médio quadrado (RMS) de 578,89. Este valor do erro foi considerado extremamente elevado. Conforme sugerido pelo tutorial do Idrisi, o valor do RMS deve ser próximo à metade do valor do *pixel*. Neste caso, cada *pixel* possui o valor igual a 30 (resolução 30 metros). Assim, o valor do RMS deveria se aproximar a 15,0.

Dessa forma, foram analisados o erro residual individual dos 20 pontos de controle, optou-se por descartar alguns pontos de forma a obter um RMS próximo ao valor ideal. Os critérios de eliminação foram os mesmo adotados na etapa anterior. Ao omitir um dos pontos, o RMS foi reduzido a 19,35 – valor considerado satisfatório, conservando 19 pontos de controle.

## TERCEIRA ETAPA: OBTENÇÃO DA TEMPERATURA APARENTE DA SUPERFÍCIE

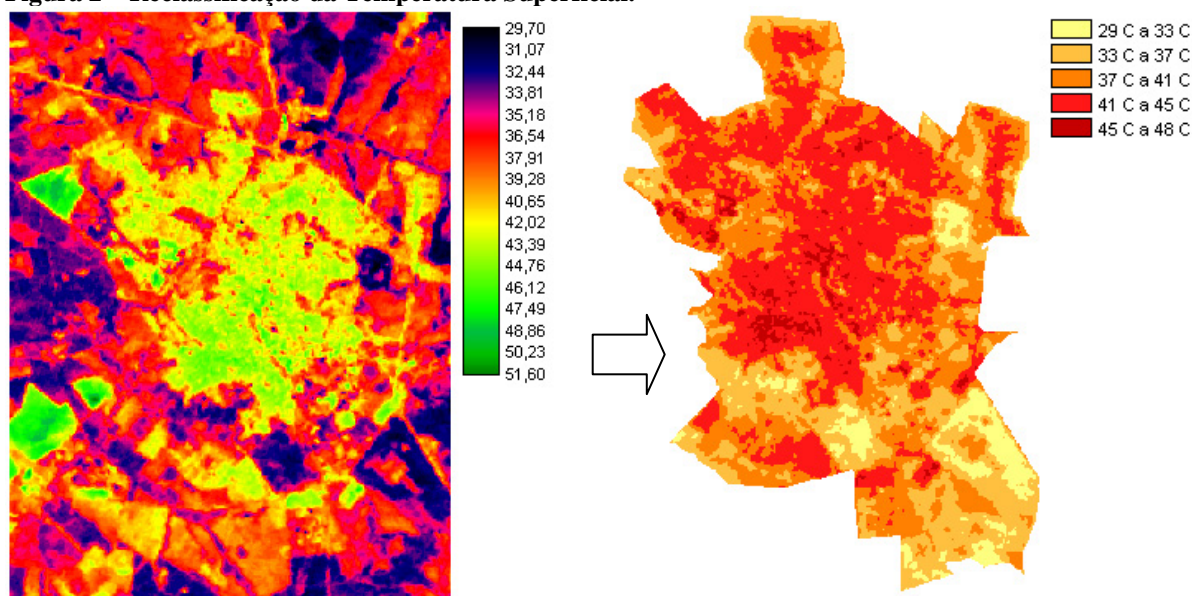
A banda termal 6H do satélite Landsat 7 ETM<sup>+</sup> (assim com a 6L do mesmo satélite) é representada por imagem composta por matriz de *pixels* em 256 tons de cinza. Cada *pixel* que compõe a imagem tem um número digital (dn) associado. Este número corresponde à tonalidade de cinza através do qual é representado e à característica da região imageada.

O algoritmo *thermal* do Idrisi32 possibilita a associação da tonalidade de cinza de cada *pixel* das bandas termais dos satélites Landsat 4 ou Landsat 5 em valores de temperatura aparente da superfície (LST<sup>3</sup>) em graus Celsius, Kelvin ou Fahrenheit. Coltri (2006) validou o uso do algoritmo *thermal* do Idrisi32 desenvolvido para bandas termais do Landsat 5 nas bandas termais do Landsat 7. Salienta-se, entretanto, que o uso do algoritmo *thermal* se trata de uma avaliação qualitativa, uma vez que os valores de temperatura aparente da superfície são superiores ao valor da temperatura do ar (WENG, 2003).

A imagem LST apresentou variação de temperatura aparente da superfície da ordem de 29,7°C a 51,6°C. Para identificação de ilhas de calor, optou-se por reclassificar a imagem LST em categorias de temperatura, em intervalos de 4 graus Celsius a partir da temperatura inicial de 29°C. A Figura 2, a seguir, apresenta a imagem produzida nesta etapa.

---

<sup>3</sup> Land Surface Temperature

**Figura 2 – Reclassificação da Temperatura Superficial.**

Temperatura Aparente da Superfície (LST)

LST reclassificada em intervalos de 4°C

#### QUARTA ETAPA: CRUZAMENTO DAS IMAGENS DE USO DO SOLO E TEMPERATURA APARENTE DA SUPERFÍCIE

Após a obtenção das imagens retificadas geometricamente com informações de uso de solo e a geração da imagem da banda termal com dados de temperatura aparente da superfície (LST), foi efetuado o cruzamento das mesmas com a finalidade de analisar o comportamento térmico para cada área considerando o uso do solo predominante.

Para tanto, o cruzamento das imagens foi efetuado a partir de arquivos individuais obtidos por meio de máscaras, considerando um a um os 8 tipos de uso do solo classificados conforme descrição feita na primeira etapa do trabalho.

#### RESULTADOS

O cruzamento da imagem LST com a imagem classificada de uso do solo compatibilizadas entre si permitiu analisar o comportamento da temperatura aparente da superfície de acordo com o uso do solo urbano. Para tanto, foi gerado sumário estatístico extraído a partir de uma imagem processada pelo cruzamento de seus valores em relação à definição da feição de uma segunda imagem.

Dessa forma, foi possível analisar a temperatura aparente da superfície em seus os valores máximos e mínimos, média, amplitude, desvio padrão da população e desvio padrão da amostra para cada uso do solo. Os resultados obtidos são apresentados na tabela abaixo:



Tabela 07 – Análise estatística na área urbana por uso do solo.

Uso do solo	Sumário	Valores (°C)
Área rural	Mínimo	28.5
	Máximo	51.6
	Média	36.4
	Variação	23.1
	Desvio Padrão População	3.2
	Desvio Padrão da Amostra	3.2
Área livre	Mínimo	30.9
	Máximo	48.7
	Média	37.8
	Variação	17.8
	Desvio Padrão População	2.9
	Desvio Padrão da Amostra	2.9
Área verde	Mínimo	29.7
	Máximo	48.0
	Média	34.8
	Variação	18.3
	Desvio Padrão População	3.0
	Desvio Padrão da Amostra	3.0
Comércio/Serviço	Mínimo	34.2
	Máximo	48.7
	Média	42.9
	Variação	14.5
	Desvio Padrão População	1.7
	Desvio Padrão da Amostra	1.7
Industrial	Mínimo	31.4
	Máximo	47.6
	Média	39.5
	Variação	16.2
	Desvio Padrão População	3.0
	Desvio Padrão da Amostra	3.0
Institucional	Mínimo	30.9
	Máximo	46.1
	Média	39.0
	Variação	15.2
	Desvio Padrão População	2.8
	Desvio Padrão da Amostra	2.8
Residencial	Mínimo	30.9
	Máximo	46.9
	Média	42.3
	Variação	16.0
	Desvio Padrão População	1.7
	Desvio Padrão da Amostra	1.7
Vias	Mínimo	30.9
	Máximo	48.7
	Média	40.4
	Variação	17.8
	Desvio Padrão População	2.9
	Desvio Padrão da Amostra	2.9

De acordo com as análises efetuadas, observa-se (Figura 3) que:

- ✓ As maiores máximas corresponderam a áreas de comércio e serviço (48,7°C), seguidas das áreas industriais (47,6°C);
- ✓ As áreas dentro da zona urbana que apresentaram menor temperatura foram as áreas verdes, com valor de 29,7°C, seguido das áreas institucionais, residenciais e vias de circulação (30,9°C);
- ✓ As áreas verdes apresentaram maior variação entre seus valores mínimos e máximos de temperatura aparente superficial (19°C);
- ✓ A menor variação foi observada no uso comércio e serviços (14,5°C).



Figura 3: Ilhas de calor por tipo de uso.





Observa-se, a partir da análise dos resultados apresentados na Figura 3, que os usos de comércio e serviço e residencial apresentaram maior área de incidência de valores na faixa de 45°C a 48°C. Já os valores na faixa de 29°C a 33°C ocorreram em maior extensão nas áreas verdes. As áreas livres, institucionais, industriais e vias apresentaram destruição das faixas de temperatura aparente de superfície mais diluída dentro de sua extensão total.

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos, ainda que em caráter preliminar, indicam a eficiência do sensoriamento remoto termal por meio de análise da banda termal 6H (alto ganho) do satélite Landsat 7 ETM+ como ferramenta de análise na identificação de ilhas de calor urbanas, mostrando-se eficaz quanto à espacialização dessas anomalias na malha urbana.

Acredita-se que, tendo o SIG como ferramenta de análise, o modo de “pensar a cidade” incorpore o enfoque do comportamento climático em ambientes urbanos e possibilite a obtenção de condições mais favoráveis ao comportamento térmico dos diversos recintos urbanos, com geração de ambientes propícios ao bem-estar de seus habitantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COLTRI, P. P. **Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo**: análise de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2006.
2. LOMBARDO, M. A. **Ilha de Calor nas Metrôpoles**: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1985.
3. MENDONÇA, F. de A. O Clima e o Planejamento Urbano das Cidades de Porte Médio e Pequeno: Proposições Metodológicas para Estudo e sua Aplicação à Cidade de Londrina/PR. 1994. **Tese** (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia FFLCH/USP, São Paulo, 1994.
4. OKE, T. R.; VOOGT, J. A. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. **Remote Sensing Environment**, v. 86, p. 370-384, 2003.
5. WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.69, n.5, p.555-566, may, 2003.