

# SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AOS ESTUDOS DE ILHAS DE CALOR URBANAS

Marta Eichemberger Ummus<sup>1</sup>  
Tessio Novack<sup>1</sup>  
Bruno Rodrigues do Prado<sup>1</sup>  
Erick Sobreiro Gonçalves<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{marta, tessio, prado}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>Fundação Getúlio Vargas - FGV  
01332-000 - São Paulo - SP, Brasil  
[erick.sobreiro@gmail.com](mailto:erick.sobreiro@gmail.com)

## Resumo

A presente pesquisa apresenta um inventário sucinto da utilização científica de dados de sensoriamento remoto na análise de fenômenos climáticos urbanos, especificamente Ilhas de Calor. Atualmente, os grandes centros urbanos sofrem graves conseqüências devido à sua expansão urbana desordenada. Dessa forma, faz-se necessário pesquisar meios que propiciem um melhor entendimento das dinâmicas climáticas urbanas para que a partir deles possam ser pensadas possíveis resoluções para os problemas urbanos. São apresentados os principais conceitos relacionados a este tipo de estudo climatológico e a correlação entre a cobertura da terra e a temperatura de superfície terrestre. A literatura aponta que as grandezas físicas obtidas por meio de algoritmos, representam uma fonte de dados acurada e de custo acessível. Devido à alta variabilidade espacial dos alvos urbanos, observou-se a necessidade de se trabalhar com imagens de alta resolução espacial nominal, uma vez que estas detalham de forma adequada a complexidade geométrica de alvos urbanos.

**Palavras-chave:** Urbanização; Ilhas de Calor Urbanas; Sensoriamento Remoto.

## Abstract:

This work is a review on the use of remote sensing data in the study of urban areas radiant energy budgets and more specifically the heat island phenomenon. Nowadays unplanned urban sprawl has been causing severe consequences regarding the radiant energy balance of these areas. For this reason, remote sensing represents a reasonable way to monitor and study the urban climate dynamics. Certain image processing algorithms can provide accurate measurements of the physical properties of urban targets. The high heterogeneity of those and its geometrical complexity makes the improvement on the spatial resolution of thermal sensors placed on orbital platforms a first order necessity. The main concepts of urban climate dynamics as well as the relationship between urban land cover and the surface temperature are presented in this paper.

**Key-words:** Remote Sensing; Heat Island; Urban Sprawl.

## 1. Introdução

Os grandes centros urbanos atualmente sofrem graves conseqüências devido à sua expansão urbana desordenada, falta de planejamento e geração de uma grande quantidade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos que o ambiente não é capaz de assimilar. Neste sentido, o estudo do clima urbano é extremamente complexo, principalmente pela heterogeneidade dos materiais e da geometria que o compõem. Um dos fenômenos decorrentes da influência antrópica na atmosfera refere-se às Ilhas de Calor Urbanas (ICU), resultantes da elevação das temperaturas médias nas zonas centrais da mancha urbana em comparação com as zonas periféricas ou rurais (LOMBARDO, 1985). Elas ocorrem basicamente devido às alterações no balanço de energia nas camadas de cobertura e limite urbanas, proporcionadas pelo aumento de absorção de radiação de ondas curtas, menor perda de radiação de ondas longas, aumento do *input* de calor sensível, diminuição da evapotranspiração e diminuição do transporte de calor turbulento (OKE, 1982).

Nas últimas décadas, estudos de clima urbano e especialmente de ICU vêm se beneficiando pela disponibilidade de dados de sensoriamento remoto. Voogt e Oke (2003) salientam que o uso do sensoriamento remoto termal para avaliar a temperatura das superfícies urbanas foi limitado, no sentido de que a descrição qualitativa dos padrões termais vinha sendo feita por simples correlações com o uso do solo através de informações temáticas e não por descrições quantitativas. Com o incremento da utilização de métodos quantitativos, esta descrição pode ser efetuada de maneira mais simples e eficaz. A aplicação do sensoriamento remoto em estudos de ICU permite que, além das visões em diferentes escalas, medidas de temperatura aparente da superfície (*land surface temperature* – LST) sejam realizadas através dos dados na faixa do Infravermelho Termal (*Thermal Infrared* - TIR), fornecendo a temperatura qualitativa da cidade, ou seja, o desenho da temperatura local. Neste sentido, os grandes avanços no sensoriamento remoto termal, principalmente em relação ao aumento da resolução espacial nominal e aplicação de algoritmos, permitem examinar a estrutura espacial dos padrões termais urbanos e sua relação com as características da superfície. Segundo Voogt & Oke (2003) o sensoriamento remoto termal de áreas urbanas pode nos responder questões referentes às diferenças de resposta do balanço de energia e aos principais efeitos da radiação da superfície e propriedades termodinâmicas incluindo a umidade da superfície, emissividade, a radiação incidente e a relação de transferência de energia.

Neste contexto, esta pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica sobre abordagens metodológicas empregadas em estudos de ICU por meio de dados de sensoriamento remoto.

## 2. Fundamentação teórica

### 2.1 Ilhas de Calor Urbanas

Um dos mecanismos do sistema cidade-atmosfera mais afetados pela urbanização é o balanço de energia (PEREZ *et al.*, 2001). As propriedades físico-químicas dos materiais que compõem a cidade, assim como a geometria e relação espacial em que estão dispostos, os tornam capazes de reter mais energia (fluxo de calor latente) e convertê-la preferencialmente em calor sensível. Assim, ao se diminuir o fluxo de calor latente se incrementa o fluxo de calor sensível, que gera um maior aquecimento do ar superficial e, com isto, a temperatura do sistema se eleva, culminado desta forma em um fenômeno chamado ICU. O termo ICU refere-se a uma anomalia térmica em que a temperatura de superfície das regiões onde há grande atividade antrópica, normalmente o centro das grandes cidades, se caracteriza por ser superior a da vizinhança rural (LOMBARDO, 1985). A ICU é influenciada por fatores do meio físico regional tais como o clima e a topografia, mas são as características de rugosidade e de liberação de calor antropogênico da cidade em si que definem a forma espacial do fenômeno. De modo geral, áreas comerciais, industriais e de alta densidade de áreas impermeáveis formam picos na ICU, enquanto parques, áreas abertas e lagos formam os vales da ICU (OKE, 1987).

As ICU são caracterizadas por atuarem em por duas diferentes camadas da atmosfera urbana, uma numa escala mais local, que vai da superfície até a camada superior (entre os edifícios) e outra numa escala maior, abrangendo também os arredores dos grandes centros urbanos, até onde a influência das ICU interagem com a atmosfera (VOOGT e OKE, 2003, PEREZ *et al.*, 2001). Segundo Nichol (1994), os dados derivados de satélites são passíveis de maior correspondência com a camada superior das ICU, embora haja a necessidade da transferência de função entre a temperatura da superfície e a temperatura terrestre.

Considerando a magnitude das ICU, muitos são os mecanismos que contribuem para a sua formação e muitos são os fatores e sistemas que agravam sua intensidade (CARNAHAN e LARSON, 1990; KIM e BAIK, 2005), desde sua localização geográfica até as condições climatológicas do dia (CARNAHAN e LARSON, 1990; PEREZ *et al.*, 2001; WENG, 2001). Há também fatores relacionados às características específicas como o tamanho da cidade, a densidade da população, o dia da semana, a impermeabilização do solo, a densidade de edificações, além de variações diurnas e sazonais (CARNAHAN e LARSON, 1990). Carnahan e Larson (1990) e

Weng (2003) destacam que uma das prováveis explicações para esse fenômeno é o fato de que no centro da cidade existe uma grande concentração de população urbana e ausência de vegetação, diferentemente do que acontece nas extremidades das cidades, onde esses índices praticamente se invertem. Assim, é possível afirmar que um dos principais fatores que causam e intensificam a ICU é o uso e ocupação dos solos urbanos. A intensidade da ICU é proporcional ao tamanho da cidade, à densidade de população e aos tipos de atividade nela realizadas (CHEN *et al.*, 2006).

As ICU ocorrem com maior intensidade à noite, quando as diferenças de radiação são mais evidentes entre áreas rurais e áreas urbanas. A atmosfera e as propriedades radioativas da superfície influenciam na emissão e reflexão da radiação que é detectada pelos sensores. Segundo Kato e Yamaguchi (2005), durante o dia a energia é transferida da atmosfera para a superfície, pois a temperatura subterrânea é mais baixa. Este calor que é estocado ao longo do dia é conduzido para a atmosfera durante a noite.

## *2.2 Sensoriamento remoto aplicado ao estudo das ICU*

Há quase 40 anos o sensoriamento remoto orbital contribui para o entendimento da ICU (RAO, 1972). No entanto, a grande maioria dos estudos publicados até hoje sobre o assunto analisou a ICU em pequena escala, utilizando sensores termais de baixa resolução espacial como o AVHRR (1.1 km), o VHRR (0.9 km) e o HCMM (0.5 km). Estes sensores atendem ao propósito de avaliar os efeitos da ICU no padrão climático regional, mas não são adequados para discernir os efeitos de classes individuais de cobertura da terra urbana na resposta termal obtida pelos sensores (GLUCH *et al.*, 2006). Uma nova fase no estudo de ICU se deu com a disponibilidade de imagens dos canais termais do ETM+/Landsat-7 e do ASTER/Terra de 60 e 90 metros de resolução espacial respectivamente (VOOGT & OKE, 2003).

A outra vertente analítico-metodológica do sensoriamento remoto termal urbano está baseada no uso de sensores aerotransportados de alta resolução espacial na faixa do termal. Com vôos a baixa altitude e resolução mais potente, é possível de extrair a temperatura de alvos urbanos específicos com baixa interferência atmosférica (QUATTROQUI & RIDD, 1994). Relações entre o comportamento térmico e características como o fator de visada do céu (*sky view factor*) podem ser avaliadas eficientemente por esta classe de sensores (LO *et al.*, 1997). Trabalhos recentes incorporaram informações tridimensionais da rugosidade da superfície urbanas e visadas multiangulares para avaliar os efeitos direcionais e anisotrópicos de alvos urbanos assim como a qualidade e ambigüidade dos dados de temperatura obtidos ao nadir (VOOGT & OKE, 1998; VOOGT & SOUX, 2000). Gluch *et al.* (2006)

examinaram a resposta termal inerente a cada classe de cobertura da terra em macro e mesoescala utilizando o sensor ATLAS (10 m) para o mapeamento do campo térmico na escala do bairro e regional e da cobertura da terra na escala do bairro, enquanto o sensor TM foi utilizado para mapear a cobertura da terra na escala regional.

A importância destes estudos aumenta na proporção em que aumenta a população urbana no mundo. Segundo relatório da Organização das Nações Unidas, publicado em 1999, 80% da população mundial viverá em cidades no ano de 2025 (NASA, 2000). Em um contexto de crescimento das cidades e de inquérito sobre as causas e conseqüências do aquecimento global, estudos sobre o balanço de energia das cidades são de suma importância para o entendimento do fenômeno através das escalas de análise, integrando desde a qualidade ambiental do cidadão até o impacto da ICU no clima regional.

O parâmetro para se classificar um sensor de alta resolução espacial nominal na faixa do TIR difere um pouco dos parâmetros utilizados para o sensoriamento remoto na faixa da radiação refletida, dado que a faixa do espectro termal recebe uma quantidade menor de energia, fazendo com que as resoluções espaciais nominais sejam menores do que em outras regiões do espectro eletromagnético. Desse modo, existe uma relação de compromisso entre a amplitude espectral, a relação sinal/ruído e a altitude dos sensores para definir a resolução espacial nominal. Um exemplo de sensor de alta resolução espacial é o sensor aerotransportado *Advanced Thermal and Land Applications Sensor* (ATLAS), desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a bordo do avião *Stennis Learjet*, com resolução espacial nominal de 10 m nas seis bandas do TIR, que é ideal para analisar o efeito das ICU durante o dia e também à noite (energia emitida pela terra) em muitas cidades, e então caracterizar efetivamente os padrões de ICU (LO *et al.*, 1997; QUATTROCHI *et al.*, 2000; QUATTROCHI e RIDD, 1994).

A gama de sensores termais orbitais tem permitido o estudo de ICU por diferentes abordagens. A partir de mapas independentes da cobertura da terra ou de imagens multiespectrais obtidas simultaneamente às imagens termais, pode-se relacionar a cobertura da terra ou o uso do solo urbano com o padrão espacial da temperatura de brilho ou radiométrica da superfície (NICHOL, 1996). Vários autores utilizaram dados de sensoriamento remoto termal no estudo do balanço de energia da superfície urbana integrando modelos de clima urbano e imagens termais (HAFNER & KIDDER, 1999). Outros trabalhos se dedicaram a relacionar a ICU com observações e medidas obtidas em campo (LEE, 1993). Há também estudos que, a partir de imagens nas bandas do visível e infravermelho próximo, simplesmente, geraram modelos de absorção e

reflectância de ondas curtas para parametrização do fluxo de calor da superfície (PARLOW, 1999).

### 3. Principais metodologias aplicadas

De maneira geral, ao se trabalhar com dados de sensoriamento remoto, alguns parâmetros devem ser tomados para a caracterização e determinação da intensidade das ICU, sendo eles:

a) descrição quantitativa e análise das temperaturas da superfície e suas relações com a cobertura do solo e a morfologia urbana (CARNAHAN e LARSON, 1990; CHEN *et al.*, 2006; KATO e YAMAGUCHI, 2005; WENG, 2001, 2003);

b) comparação entre áreas rurais e/ou periféricas em relação às áreas urbanas, onde ocorrem as ICU (CARNAHAN e LARSON, 1990; CHEN *et al.*, 2006; KATO e YAMAGUCHI, 2005; WENG, 2001, 2003);

c) validação da radiância termal e temperatura da superfície com medidas obtidas *in situ* e calibração da imagem para uma melhor quantificação e análise dos dados colhidos em áreas urbanas (KATO e YAMAGUCHI, 2005);

d) recuperação e análise da temperatura da superfície e correção dos efeitos atmosféricos, da emissividade, rugosidade e anisotropia da superfície (o aumento da rugosidade ocasionado pela presença de edifícios aumenta a turbulência, que age para transferir o calor para cima, ao mesmo tempo em que diminui o escoamento zonal), fluxos de energia termal em áreas urbanas e interações entre a temperatura da superfície, vegetação, solos e água (WENG, 2001, 2003).

#### 3.1 Utilização de algoritmos

De acordo com Voogt & Oke (2003), as pesquisas sobre ICU baseadas em dados de sensoriamento remoto termal permitem examinar a estrutura espacial dos padrões termais urbanos e suas relações com as características da superfície e o balanço de energia por meio da aplicação de modelos climáticos. Comumente, para análises climáticas, utiliza-se a aplicação de algoritmos. O algoritmo é um procedimento matemático capaz de criar uma seqüência não ambígua de instruções que é executada até que determinada condição se verifique (GILLESPIE *et al.*, 1998), ou seja, transforma o dado de entrada numa informação de saída.

Em sensoriamento remoto, a definição de algoritmos transforma os valores de radiância em grandezas físicas. No caso específico de detecção de ICU, essa transformação pode ser feita por meio da conversão dos números digitais (ND) obtidos na faixa do TIR para valores de temperatura. Essa conversão pode ser realizada através do inverso da Lei de Planck que, em síntese, diz que

quanto maior a temperatura para um dado comprimento de onda, maior será a quantidade de energia emitida por um corpo negro. Se o sensor capta a radiância proveniente de um alvo, ou seja, sua emissividade e reflectância, torna-se possível determinar sua temperatura (GILLESPIE *et al.*, 1998). Para a obtenção da LST através da radiância medida pelo sensor, é necessário proceder aos seguintes passos:

- a) conversão do número digital (ND) dos *pixels* da imagem em valor de radiância;
- b) conversão do valor de radiância em temperatura de brilho (temperatura medida ao nível do sensor considerando o alvo como um corpo negro);
- c) correção para a absorvância e re-emissão da atmosfera;
- d) conversão para a emissividade da superfície;
- e) correção para a rugosidade da superfície (VOOGT & OKE, 2003).

Nas análises das ICU, é interessante que haja coleta de dados *in situ* para a calibração dos dados do sensor (CHEN *et al.*, 2006; KATO e YAMAGUCHI, 2005; WENG, 2001, 2003). A falta da correção atmosférica, por exemplo, pode introduzir um erro de 4 a 7° C na temperatura obtida por um sensor. Já erros devido à anisotropia da superfície urbana e posição do sensor podem ocasionar uma diferença de até 6° C ou mais para áreas muito edificadas (VOOGT & OKE, 1998).

Segundo Kato e Yamaguchi (2005), a presença da radiação termal no clima urbano pode ser dividida em duas principais origens: uma, que diz respeito àquela quantidade de radiação solar ganha, armazenada e difundida (por emissão, reflexão, condução e convecção); e outra que diz respeito à radiação proveniente da ação antropogênica (atividades industriais, o trânsito, o próprio calor metabólico do homem, os sistemas de condicionamento mecânico, a queima de combustíveis, etc). Para separar essas duas componentes foi utilizado o modelo de balanço de calor, utilizando-se para tal propósito dados dos sensores ASTER e do ETM+/ *Landsat 7* e dados coletados *in situ*. Dessa forma foi possível aferir as descargas de calor antropogênicas e quantificar seu efeito nas ICU.

### 3.2 Correlação entre LST e cobertura da terra

Nesta sessão serão abordadas as considerações a serem feitas na obtenção da LST, diferentes metodologias de representação da superfície urbana e relações quantitativas estabelecidas entre estas duas variáveis.

A correlação da LST com o uso do solo é de fundamental importância para o estudo da ICU, bem como a discriminação da morfologia urbana, uma vez que a quantidade de solo exposto eleva a temperatura da superfície. As montanhas e vales podem servir como barreiras para a dispersão do ar

quente e a difícil geometria de ruas e edifícios alteram a circulação de ar. Chen *et al.* (2006) estudaram a relação entre o uso do solo e os padrões de temperatura analisando as transformações ocorridas ao longo de dez anos, entre 1990 e 2000, utilizando dados termais do sensor *Thematic Mapper* do satélite *Landsat 5 (TM/ Landsat 5)* e do *ETM+/Landsat 7* com resoluções espaciais nominais de 120 e 60 m respectivamente. Este autor verificou que a distribuição espacial da temperatura da superfície pode ser alterada através das mudanças ocorridas na cobertura da terra, assim como o aumento da malha urbana também pode mudar os padrões das ICU. Além disso, os diferentes tipos de uso e as variações de densidade da malha urbana geram diferentes tipos de IC.

Outro fator que corrobora com a correlação entre *LST* e a cobertura da terra é a comparação entre áreas urbanas e periféricas, freqüente nas análises de ICU, uma vez que ela parametriza as diferenças de temperatura existentes entre estas áreas. Carnahan e Larson (1990) utilizaram a banda TIR do *TM/ Landsat 5* para observar as diferenças de temperatura entre as áreas urbanas e rurais, podendo dessa forma estimar a ocorrência de ICU.

Muitos estudos consideram a intensidade relativa da ICU e a correlação entre temperatura e cobertura da terra, portanto, costuma-se calcular apenas a temperatura de brilho em análises deste tipo (CHEN *et al.*, 2006). A temperatura de brilho é derivada usando-se a Lei de Planck (DASH *et al.*, 2002) e os procedimentos matemáticos para o seu cálculo podem ser encontrados em Weng (2004) e Chen *et al.* (2006).

### 3.3 Utilização de Índices

O *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* vêm sendo bastante utilizado como indicador das propriedades da superfície urbana tais como a evaporação e a capacidade térmica (YUAN & BAUER, 2007). Na literatura recente, encontramos diversos outros índices que podem ser usados para estabelecer relações quantitativas entre os padrões de uso e cobertura da terra e a *LST* (Tab.1.0). Weng (2001, 2003) examinou os padrões de temperatura e suas relações com o uso do solo, por meio da aplicação do Índice de Vegetação Diferencial Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*) com o intuito de estimar a temperatura da superfície e de analisar as variações espaciais usando a banda TIR do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* do satélite *Landsat 7 (ETM+/ Landsat 7)*, com resolução espacial nominal de 60m. Ele ainda coloca que, por meio do cálculo do NDVI, é possível diferenciar bem as feições da superfície, já que elas se apresentam bem contrastadas. Os índices NDVI, *Normalized Difference Water Index (NDWI)*, *Normalized Difference Bareness Index (NDBaI)* e índices de urbanização como o *Normalized Difference Build-up Index (NDBI)* foram usados por Chen *et al.* (2006) na produção de mapas de cobertura da terra para relação com os dados de temperatura derivados do sensor



ETM+. Os valores exatos de *threshold* de cada índice para cada classe foram obtidos extraindo a assinatura espectral média de cada classe a partir de áreas representativas e executando operações booleanas entre bandas e índices. De posse do mapa de cobertura da terra gerado por cada índice, cada classe teve seu valor médio de TS calculado. Percebeu-se que, dos índices empregados, o NDBI tem a maior correlação com a variável temperatura de brilho (CHEN *et al.*, 2006).

Tabela 1.0 – Índices de vegetação, urbanização e solo exposto.

$NDVI = (p(NIR) - p(R)) / (p(NIR) + p(R))$
$NDWI = (p(NIR) - p(SWIR)) / (p(NIR) + p(SWIR))$
$NDBI = (d(SWIR) - d(NIR)) / (d(SWIR) + d(SWIR))$
$NDBal = (d(SWIR) - d(TIR)) / (d(SWIR) + d(TIR))$

Fonte: Chen *et al.* (2006). Onde *d* representa o ND e *p* unidades de reflectância.

Weng *et al.* (2004) investigaram a aplicabilidade de imagens do ETM+ de fração de vegetação (FV) derivadas de um modelo linear de mistura intra-píxel como estimador da abundância de vegetação e, por relação, TS. Imagens de fração de solo, sombra e vegetação foram derivadas através dos seguintes passos: (1) transformação MNF para redução da redundância e correlação de informação entre as bandas do ETM+ (menos a do termal); (2) seleção de áreas representativas nas imagens ETM+ dos três membros de mistura (*endmembers*) a partir de conhecimento de campo e por fotografia aérea; (3) comparação espectral entre os *pixels* destas áreas e aqueles dos extremos do espaço espectral de atributos das duas primeiras componentes da transformação MNF e (4) escolha dos *pixels* que atendiam às duas condições. As resultantes imagens de fração de cada membro foram usadas para a classificação da cobertura da terra pelo método de máxima verossimilhança. Cada classe gerada teve seu valor médio e de desvio padrão de TS, NDVI e FV calculados. Índices de correlação entre NDVI e TS e entre FV e TS foram gerados para cada classe em múltiplas resoluções espaciais (30, 60, 120, 240, 480 e 960 m). Os resultados indicaram para as duas comparações boa correlação, sendo que o índice aumenta com resoluções de 30 a 120 m e diminui até a resolução de 960 m. A TS teve maior correlação negativa com a FV do que com o NDVI. O fato de ambas as correlações atingirem valores máximos na resolução de 120 m indica que esta é a escala operacional de relação entre estas variáveis, como sugerido por Lam & Quattrochi (1992). Weng *et al.* (2004) analisaram também as dimensões fractais das imagens de TS, NDVI e FV a partir de 20 transectos traçados através da cidade. De novo, em ambos

os casos, os valores aumentam até a resolução de 120 m decaindo até a resolução de 960 m. A maior correlação negativa entre os valores de dimensão fractal se dá entre TS e FV ao invés de TS e NDVI, evidenciando que a TS pode ser mais bem estimada por imagens de FV que por imagens NDVI.

Outro modo de representação da superfície urbana é o modelo V-I-S (*Vegetation-Impervious surface-Soil*), no qual cidades podem ser comparadas ecologicamente e em diferentes escalas espaciais (RIDD, 1995). Estas três superfícies têm reações com a energia e umidade bastante distintas dentro de um ecossistema urbano (GLUCH *et al.*, 2006). Usado como esquema de classificação, o modelo V-I-S pode ser relacionado às respostas termais da cidade. A partir de um modelo de mistura espectral linear, pode-se definir a porcentagem de cada componente do V-I-S em cada pixel, tornando possível agregar quantitativamente *pixels* semelhantes ecologicamente (RIDD, 1995). A partir deste modelo, Gluch *et al.* (2006) definiram oito classes de cobertura da terra e realizaram classificações supervisionadas usando o sensor ATLAS (10 m) e o TM (30 m) para as escalas do bairro e regional respectivamente. A assinatura termal (mínimo, máximo, média e desvio padrão) de cada classe para as duas escalas foi obtida através da banda 13 do ATLAS (10 m) sob áreas classificadas corretamente pelo classificador supervisionado. Os valores médios de TS foram atribuídos a cada classe de cobertura da terra para a geração de mapas de padrão térmico. Notou-se que a resposta termal é coerente entre as duas escalas, aumentando sempre na seguinte ordem: água, sombra, vegetação, solo e áreas impermeáveis. Foi observado também que há grande similaridade do valor médio de temperatura entre as duas escalas para todas as classes, indicando baixa variação no comportamento termal da escala do bairro para a regional (GLUCH *et al.*, 2006).

#### 4. Considerações finais

O avanço das pesquisas em relação ao sensoriamento remoto possibilita uma série de aplicações na climatologia urbana e principalmente na análise do efeito das ICU. A utilização de modelos e algoritmos permite respostas mais rápidas e diretas, uma vez que eles são capazes de separar as componentes envolvidas, como visto em Kato e Yamaguchi (2005). É desejável que os dados de satélite tenham uma resolução espacial nominal alta na faixa do TIR, já que por causa da complexidade da geometria das cidades (aglomeração de ruas, edifícios, etc.) exige-se uma discriminação maior de detalhes. Melhorias na resolução espectral e espacial de sensores orbitais desta e da próxima geração, assim como a disponibilidade crescente de scanners termais aerotransportados, possibilitarão avanços na representação detalhada da superfície urbana (VOOGT & OKE, 2003). Estudos que almejem relacionar diferentes escalas de balanço de energia deverão inexoravelmente dispor de dados de altíssima a média resolução. Neste sentido, poderemos usar os sensores ASTER (90 m) e o ETM+ (60 m) para análises regionais e sensores aerotransportados, como o ATLAS ou a câmera AGEMA, para análises termais em escala intra-urbana. Entretanto, há de se considerar a questão da acessibilidade, pois apesar do sensor ATLAS, por exemplo, ter uma resolução espacial nominal muito alta, por ser aerotransportado seu custo também é muito elevado. Um investimento como este seria válido para o estudo de ICU, uma vez que, segundo Kato e Yamaguchi (2005), não existem mudanças significativas nas características das ICU ao longo de dois anos, porém talvez não fosse para outros tipos de análises que necessitam sistematicidade, inviabilizando desta forma um programa grande (onde diferentes objetivos de pesquisa justificassem seu elevado custo) com este recurso. Diversos trabalhos aplicados ao estudo de ICU foram e vêm sendo realizados com sensores como o ASTER, TM e ETM+, e até mesmo com sensores de menores resoluções espaciais, como o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo do satélite *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e o *Moderate-Resolution Imaging Spectro Radiometer* (MODIS) a bordo da plataforma Terra, demonstrando que a limitação da resolução espacial nominal é pequena se comparada com as inúmeras possibilidades de análise oferecidas pelo sensoriamento remoto orbital, haja vista que a modelagem e o desenvolvimento de algoritmos aplicados aos estudos de ICU são relativamente recentes. No

entanto, a maior parte dos sensores orbitais não imageiam à noite, o que para o estudo de ICU representa uma grande restrição, já que estas são mais proeminentes neste horário.

Por fim, faz-se necessário entender que as ICU acontecem principalmente por falta de planejamento urbano, uma vez que qualquer forma de vegetação existente nos grandes centros oferece um efeito amenizador para este fenômeno (LOMBARDO, 1985), e que o sensoriamento remoto termal é a forma mais eficiente de analisar seus efeitos, posto que oferece possibilidades de análise em diversas escalas de maneira mais prática, rápida e de custo mais acessível do que medições *in situ*.

### Referências bibliográficas

CARNAHAN, W. H.; LARSON, R.C. An analysis of an urban heat sink. *Remote Sensing of Environment*, v.33, p. 65-71, 1990.

CHEN, X.L.; ZHAO, H.M.; LI, P. X.; YIN, Z.Y. Remote Sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, v.104, p. 133-146, 2006.

GILLESPIE, A.; ROKUGAWA, S.; MATSUNAGA, T.; COTHERN, J. S.; HOOK, S.; KAHLE, A. A temperature and Emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, July 1998.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER an ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment*, v. 99, p. 44-54, 2005

KIM, Y.H.; BAIK, J.J. Spatial and temporal structure of urban heat island in Seoul. *American Meteorological Society*, v.44, n.5, p.591-605, 2005.

LO, C. P.; QUATTROCHI, D.A.; LUVALL, J.C. Application of high-resolution thermal infrared sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, v.18, p 287-304, 1997.

LOMBARDO, Magda Adelaide. *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.

NICHOL, J. E. A GIS-based approach to microclimate monitoring in Singapoure's high-rise housing estates. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 60, p. 1225-1232, 1994.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.108, p. 1 – 24, 1982 .

PEREZ, J.C.; SÁNCHEZ, M.de los.A.V.; BARRADAS, V. L. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de Mexico. Red Nacional de Investigación Urbana, Puebla, México, Ciudades 51, jul-set. 2001.

QUATTROCHI, D.A.; RIDD, M. K. Measurement and analysis of thermal energy responses from discrete urban surfaces using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, p. 1991-2022, 1994.

QUATTROCHI, D.A.; LUVALE, J.C.; RICKMAN, D.L.; ESTER JR.,M.G.; LAYMON, C.A.; HOWELL, B.F. A decision support system for urban landscape management using thermal infrared data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 66(10), p. 1195-1207, 2000.

VOOGT, J.A; OKE, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*. v.86, p. 370-384, 2003.

WENG, Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n.10, p.1999-2014, 2001.

WENG, Q. Fractal analysis of Satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 69 (5), p. 555-566, 2003.

BLASCHKE, T.; KUX, H., *Sensoriamento remoto e SIG avançados*. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 303

CHEN, X.L.; ZHAO, H.M.; LI, P. X.; YIN, Z.Y. Remote Sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, v.104, p. 133-146, 2006.

DASH, P., GOTTSCHKE, F.M., OLESEN, F.S. & FISCHER ,H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice – current trends. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, p. 2563-2594, 2002.

GLUCH, R; QUATTROCHI, D.A.; LUVALL, J.C. A multi-scale approach to urban thermal analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 104, p. 123-132, 2006.

HAFNER, J; KIDDER, S.Q. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. *Journal of Applied Meteorology*, v. 38, p. 448-465, 1999.

LEE, H.Y. An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands. *Atmospheric Environment*, v. 27, 1-13, 1993.

LO, C. P.; QUATTROCHI, D.A.; LUVALL, J.C. Application of high-resolution thermal infrared sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, v.18, p 287-304, 1997.

NICHOL, J.E. High resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology*, v. 35, p. 135-146, 1996.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPATIAL ADMINISTRATION (NASA). Background on urban growth and urban heat island. Desenvolvido por SHEPHERD, J.M. 2000. Disponível em: <<http://rsd.gsfc.nasa.gov/912/urban/index.htm>>. Acesso em: 24 mai. 2007.

OKE, T.R. *Boundary Layer Climates*. 2<sup>a</sup> ed. London: Methuen, 1987. 435 p.

PARLOW, E. Remotely-sensed heat fluxes of urban areas. *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium*, v. 1026, p. 523-528, 1999.

QUATTROCHI, D.A.; RIDD, M. K. Measurement and analysis of thermal energy responses from discrete urban surfaces using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, p. 1991-2022, 1994.

RAO, P.K. Remote sensing of urban “heat island” from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 53, p. 647-648, 1972.

RIDD, M. K. Exploring a V-I-S model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, v. 16, p. 2165-2185, 1995.

VOOGT, J.A.; OKE, T.R. Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 5, p. 895-920, 1998.

VOOGT, J.A.; OKE, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, v. 86, p. 370-384, 2003.

VOOGT, J.A., SOUX, C.A. Methods for the assessment of representative urban surface temperature. *Third Symposium on the Urban Environment*, p 179-180, Agosto 14-18, 2000.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, v. 89 (4), p. 467-483, 2004.

YUAN, F.; BAUER, M. E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 106 (3), p. 375 – 386, 2007.