

# Uma aplicação da banda termal do TM/Landsat-5 no gerenciamento dos recursos hídricos

Marcelo Theophilo Folhes

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Caixa Postal 515 – 12201-970 – São José dos Campos – SP, Brasil  
folhes@ltid.inpe.br

**Abstract.** Increased competition for fresh water among a variety of users in the semi-arid region of Northeast of Brazil has led to heightened interest among water resource managers in the possibilities of monitoring water use through application of remote sensing techniques. This paper presents a brief proposal to improve the ability to locate irrigated agricultural areas through the use of remote sensing working scales ranging from irrigation districts to individual fields. A key indicator used is land surface temperature derived from the Thematic Mapper radiometer on board the Landsat-5 satellite. The paper describes a practical algorithm to estimate land surface temperatures and applies a correction procedure relating temperature error to emissivity.

**Keywords:** thermal remote sensing, surface temperature, water resources management, agriculture.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto termal, temperatura da superfície, gerenciamento dos recursos hídricos,

## 1 Introdução

No Ceará, assim como em outros Estados da União, em função de condições persistentes de escassez em quantidade e ou qualidade, a água deixou de ser um bem livre e passou a ter valor econômico. Isso contribuiu para a adoção de um novo paradigma de gestão desse recurso, o qual compreende a utilização de instrumentos regulatórios e econômicos, como a cobrança pelo uso da água.

De acordo com a mais recente regulamentação da lei estadual de Recursos Hídricos, o modelo tarifário da água adotado no Ceará é definido com base no volume e tipo de uso da água (Ceará, 2004). A legislação sugere que o volume de água consumida pelos usuários do setor agrícola deva ser calculado através do uso de equipamentos de medição direta, ou ainda por meio de medições de vazão, em locais onde é inapropriada a instalação de hidrômetros.

A medição do consumo de água na agricultura requer inicialmente a determinação da localização dos usuários da água que, naturalmente, estão espalhados em extensas áreas. A utilização dos dados espectrais de Sensoriamento Remoto permite obter resultados numéricos pixel a pixel, constituindo, por isto, ferramenta valiosa no estudo do uso da água na atividade agrícola irrigada, para efeito de gerenciamento dos recursos hídricos.

A partir da conversão dos valores de níveis de cinza da imagem do canal do infravermelho termal do sensor TM/Landsat-5 em valores de temperatura, este trabalho supõe que a espacialização deste parâmetro da superfície pode contribuir com o processo de monitoramento dos usuários da água em uma região do semi-árido brasileiro.

## 2 Objetivo

Este estudo objetiva explorar a aplicação da imagem do canal do infravermelho termal do sensor TM/Landsat-5, na identificação de prováveis áreas irrigadas e, portanto, no gerenciamento dos recursos hídricos em uma região do semi-árido brasileiro.

A área de estudo corresponde a um segmento da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, localizado à nordeste do Estado do Ceará. Esta região foi selecionada para o estudo por conter talhões agrícolas irrigados.

O clima da área da bacia, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo BswH, semi-árido quente, predominante no Nordeste brasileiro e marcado pela existência de dois períodos definidos: um seco e longo, e outro úmido, curto e irregular. As chuvas iniciam-se em dezembro ou janeiro de cada ano e estendem-se até junho. A região é caracterizada por escassez de chuvas, baixa nebulosidade, forte insolação, índices elevados de evaporação, baixa umidade relativa do ar e temperaturas médias elevadas (EMBRAPA, 1993).

#### 4 Materiais e métodos

Neste trabalho foi utilizada uma imagem do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat-5, referente à órbita 216 ponto 64 e à data de passagem de 07 de janeiro de 2004. Os parâmetros estimados a partir da imagem TM para o cômputo da medida de temperatura da superfície são apresentados na **Tabela 1**:

**Tabela 1** – Parâmetros da superfície extraídos da imagem TM

Parâmetros	Bandas	Resolução espacial (m)
Radiância	3, 4 e 6	30 (bandas 3 e 4) 120 (banda 6)
Reflectância	3 e 4	30
NDVI	3 e 4	30
Temperatura	6	120

A metodologia adota uma sequência lógica de procedimentos que envolvem basicamente o processamento dos dados espectrais de entrada e o mapeamento da temperatura da superfície. Para as operações de álgebra de mapas foi usado a linguagem de consulta e manipulação espacial (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico - LEGAL) do aplicativo SPRING (Câmara et al., 1992).

A metodologia adotou como dados de entrada as medidas de reflectância extraídas das bandas 3 e 4, e a medida de radiância da banda 6, da imagem do sensor TM/Landsat-5. Além disso, para atender ao objetivo deste trabalho, a grade numérica de NDVI foi utilizado para estimar a emissividade da superfície. Um detalhamento das etapas da metodologia é apresentado a seguir:

##### 4.1 Reflectância Aparente

A primeira etapa consiste em transformar os valores de níveis de cinza (NC) da imagem, em valores de reflectância. Esta etapa é realizada em duas etapas: na primeira etapa os valores de NC são convertidos à radiância espectral, em que utiliza-se os valores de radiância mínima ( $L_{\min}$ ) e máxima ( $L_{\max}$ ) para as bandas 3, 4 e 6 da imagem, obtidos a partir da calibração absoluta de pós lançamento do sensor TM. A seguinte equação converte os valores de NC em radiância:

$$L_i = L_{i,\min} + \left[ \frac{(L_{i,\max} - L_{i,\min})}{255} \right] \times NC_i$$

em que:  $L_i$  é a radiância espectral na banda  $i$  em  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ;  $L_{i,\max}$  e  $L_{i,\min}$  os valores de radiância máxima e mínima na banda  $i$ , respectivamente;  $NC_i$  o nível de cinza na banda  $i$ .

Os parâmetros  $L_{i,\max}$  e  $L_{i,\min}$  variam com a data de aquisição da imagem e com o tipo de sensor. As imagens TM datadas após 4 de maio de 2003 devem utilizar os valores de  $L_{i,\max}$  e  $L_{i,\min}$  apresentadas em Chander e Markhan (2003).

Na segunda etapa, os valores de radiância espectral das bandas 3 e 4 são convertidos à reflectância aparente através da seguinte equação:

$$r_{o,i} = \frac{\pi \times L_i}{E_{o,i} \times \cos \theta \times d_r}$$

em que:  $r_{o,i}$  é a reflectância espectral na banda  $i$ ;  $d_r$  o inverso do quadrado da distância Terra-Sol em unidade astronômica;  $E_{o,i}$  o valor médio da irradiância solar exoatmosférica na banda  $i$  em  $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$  (constante solar);  $\theta$  o ângulo solar zenital (calculado a partir da informação do ângulo de elevação solar,  $\beta$ , disponível no arquivo cabeçalho da imagem:  $\theta=90^\circ - \beta$ );  $L_i$  é a radiância espectral na banda  $i$  em  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ .

De acordo com Duffie e Beckman (1980), a estimativa de  $d_r$  para a data de obtenção da imagem é dada por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(DDA \frac{2\pi}{365}\right)$$

em que: DDA é o dia Juliano, que representa, o dia do ano contado consecutivamente a partir de 1 de janeiro até a data da imagem. Os valores de  $d_r$  variam entre 0,97 e 1,03, e são adimensionais.

A irradiância solar exoatmosférica ( $E_o$ ) é o fluxo de energia radiante que incide sobre o topo da atmosfera e que depende da intensidade, geometria de incidência e distância da fonte. Os valores de  $E_o$  correspondentes às diferentes bandas do sensor TM/Landsat-5 podem ser encontrados em Markhan e Barker (1987).

#### 4.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Da operação algébrica das reflectâncias dos canais do vermelho (banda 3) e do infravermelho próximo (banda 4) obtém-se o mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI). Este mapa é usado para identificar a presença de vegetação verde na superfície, o que permite caracterizar sua distribuição espacial, bem como a evolução do seu estado ao longo do tempo, a qual é determinada pelas variações das condições climáticas dominantes. O índice de vegetação por diferenças normalizadas define-se como:

$$NDVI = \frac{r_{ivp} - r_v}{r_{ivp} + r_v}$$

em que:  $r$  é a reflectância; os subscritos  $ivp$  e  $v$  as regiões do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho próximo e vermelho, respectivamente.

Antes de ser transformada em valores instantâneos de temperatura da superfície, a imagem orbital do espectro do infravermelho termal (banda 6) deve ser corrigida do efeito da emissividade da superfície. A emissividade é uma característica do corpo, mas que pode variar com a temperatura e o comprimento de onda e é dada pela razão da emitância do corpo, a uma certa temperatura e um certo comprimento de onda, pela emitância do corpo negro, à mesma temperatura e mesmo comprimento de onda.

Para a estimativa da emissividade da superfície no infravermelho termal foi utilizado o método de Van de Griend e Owe (1993). Este método consiste de uma relação logarítmica entre a emissividade da superfície e o NDVI, conforme a equação abaixo:

$$e_o = 1,009 + 0,047 \times \ln(\text{NDVI})$$

em que:  $e_o$  é a emissividade da superfície. No trabalho de Van de Griend e Owe (1993), a variação espacial da emissividade da superfície foi estimada com base nos dados de NDVI obtidos dos sensores AVHRR/NOAA e TM/Landsat, para um conjunto de diferentes superfícies naturais encontradas em Botswana, no continente africano, onde a vegetação predominante é a Savana Estépica e o uso da terra era caracterizado por cultivos de sequeiro e agricultura irrigada; condições ambientais e de uso do solo muito semelhantes aos encontrados no semi-árido brasileiro.

#### 4.4 Temperatura da Superfície Terrestre

O modelo teórico para a estimativa da temperatura da superfície terrestre por radiometria, fundamenta-se no pressuposto de que toda a matéria emite radiação termal e possui um espectro contínuo de emissão próprio e característico da sua temperatura e de suas propriedades. A Lei de Stefan-Boltzman estabelece a relação entre a emitância de um corpo negro e a sua temperatura:

$$M = \sigma \times T_{cn}^4$$

em que:  $M$  é a emitância radiante em  $W.m^{-2}$ ;  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzman, cujo valor é  $5,57 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ ;  $T_{cn}$  a temperatura do corpo negro em K.

De acordo com a Lei de Stefan-Boltzman é possível calcular  $M$  de um corpo negro para todo o espectro de radiação eletromagnética do infravermelho termal, contudo a banda termal dos sensores orbitais é demasiadamente estreita para ser utilizada como uma representação de  $M$  na equação acima. A faixa do infravermelho termal usado na equação de Stefan-Boltzman compreende o intervalo de comprimento de onda de 3,0 a 300  $\mu m$ , enquanto a banda 6 do Landsat 5, por exemplo, abrange um pequeno intervalo de 10,4 a 12,4  $\mu m$  (Norman, 1995). Entretanto, segundo a Lei de Plank, a  $T_{cn}$  pode ser relacionada à  $M$  por comprimento de onda, tal que:

$$M_\lambda = \frac{2 \times \pi \times c^2}{\lambda^5 \left[ e^{\left( \frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1 \right]}$$

em que:  $M_\lambda$  é a emitância radiante espectral em  $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ ;  $k$  a constante de Boltzman, cujo valor é  $1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$ ;  $h$  a constante de Planck, cujo valor é  $6,626 \times 10^{-34} J.s$ ;  $c$  a velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8 m.s^{-1}$ );  $T$  a temperatura do corpo negro em K.

O corpo negro é uma abstração física que não existe na natureza. A maioria dos corpos se comporta como radiadores seletivos, isto é, a distribuição espectral de seu fluxo emitido não é a mesma que a de um corpo negro. Isto implica que a emissividade destes corpos varia com o

comprimento de onda, ao contrário da emissividade do corpo negro que é independente do comprimento de onda e igual a 1. Portanto, no intervalo do infravermelho termal do espectro eletromagnético, a relação entre corpos negros e não-negros é estabelecida pela propriedade da emissividade.

Com base nesta equação e nos valores estimados de emissividade, a temperatura da superfície ( $T_o$ ) pode ser obtida pela inversão da equação de Plank para corpos radiadores seletivos. De acordo com Wukelic (1989), a conversão dos valores de níveis de cinza da imagem do canal do infravermelho termal do sensor TM/Landsat 5 em valores de temperatura, deve obedecer o seguinte procedimento:

$$T = \frac{1261}{\ln\left(\frac{60,8}{L_6} + 1\right)}$$

em que: T é a temperatura de brilho em K;  $L_6$  a radiância espectral na banda 6 do sensor TM/Landsat-5 em  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ .

A temperatura da superfície ( $T_o$ ) é então estimada a partir de T e da emissividade ( $e_o$ ) através da seguinte equação:

$$T_o = \frac{T}{e_o^{0,25}}$$

A partir das duas últimas equações, a temperatura da superfície ( $T_o$ ) de imagens Landsat é finalmente calculada por:

$$T_o = \frac{1261}{\ln\left(\frac{60,8}{L_6} + 1\right) \times e_o^{0,25}}$$

Para gerar a grade de temperatura da superfície em graus centígrados ( $^{\circ}C$ ), os valores de  $T_o$  são subtraídos de 273,16.

## 5. Resultados e discussão

A **Figura 1** apresenta um fatiamento realizado sobre a grade numérica de NDVI. Para facilitar a interpretação dos resultados, a grade de NDVI foi fatiada em apenas três classes. A classe temática que corresponde às áreas sujeitas ao estresse hídrico foi associada à fatia de NDVI correspondente ao intervalo de 0 a 0,4. Tal classe é formada predominantemente por áreas cobertas com vegetações caducifólias que não se mantêm verdes na estação seca, e também por áreas de solo exposto, pequenos aglomerados urbanos e por outros alvos espacialmente menos expressivos. Por sua vez, a classe referente às áreas de vegetação verde foi associada ao intervalo de valores de NDVI de 0,4 a 1. A simples presença de vegetação verde, mesmo após 6 meses com apenas 129 mm de chuvas acumuladas, permite supor a existência de um ou mais dos seguintes tipos de cobertura vegetal: 1) áreas constituídas de talhões agrícolas irrigados; 2) formações de campos de vegetação de altitude; 3) coberturas de matas ciliares; 4) ou ainda formações de vegetação particularmente tolerantes à escassez de chuvas. Por último, os corpos d'água foram delimitados com base na definição de um intervalo de valores de NDVI entre -1 e 0.

O mapa apresentado na **Figura 1** pode fornecer ao analista do órgão de gerenciamento dos recursos hídricos, por exemplo, uma indicação preliminar sobre a distribuição espacial das áreas onde provavelmente se pratica a irrigação de parcelas agrícolas. Estas áreas são,

portanto, legalmente passíveis de cobrança pelo uso consuntivo da água e sujeitas ao pedido de outorga do direito de uso.

O exercício de localização dos usuários da água nas áreas agrícolas pode ser aperfeiçoado através da análise do mapa de temperatura da superfície. A **Figura 2** apresenta o resultado do fatiamento da grade de temperatura da superfície gerado para toda a área da imagem. A análise da **Figura 2** permite observar que as áreas mais frias identificadas na imagem coincidem com as áreas cobertas com vegetação verde e com os espelhos d'água, e as áreas mais quentes estão associadas às regiões sujeitas ao estresse hídrico.

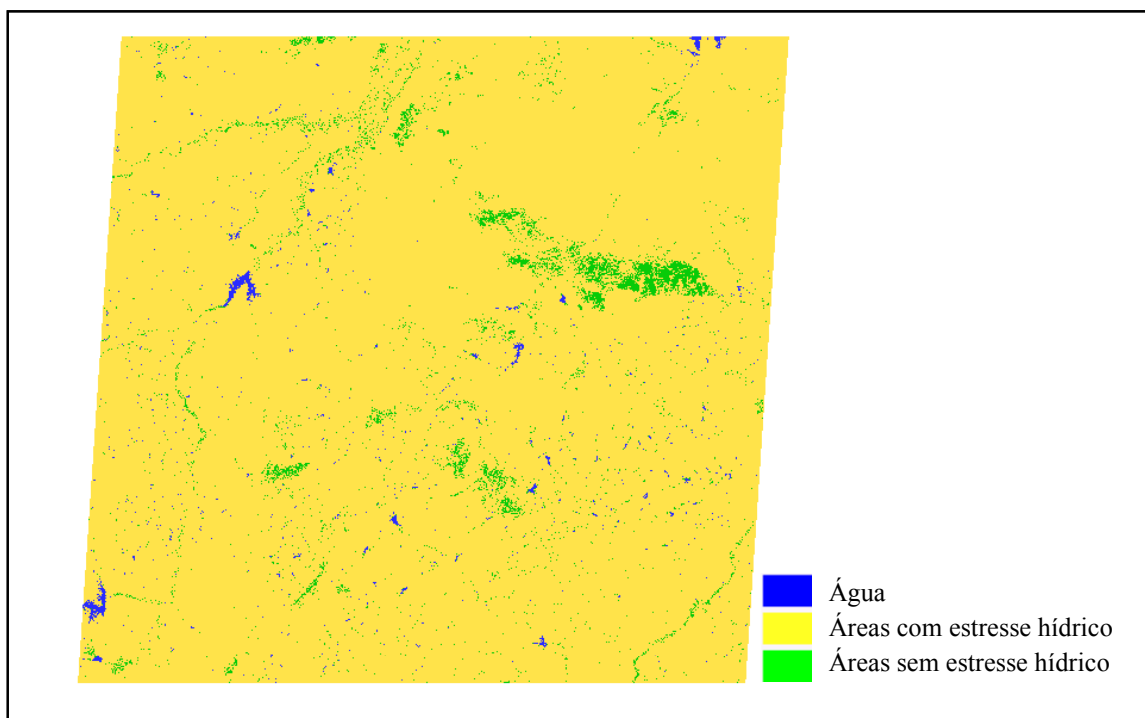


Figura 1 – Mapa resultante do fatiamento da grade de NDVI

No mapa da **Figura 3**, elaborado numa escala maior que o da **Figura 2**, é possível verificar mais detalhadamente a variação de temperatura, que pode superar  $20^{\circ}\text{C}$ , entre o interior de talhões agrícolas irrigados e as superfícies adjacentes a um perímetro de irrigação identificado na imagem. Com exceção das áreas em torno dos corpos d'água, a magnitude da variação da temperatura numa determinada região desta imagem é o principal indício da existência de talhões agrícolas irrigados.

Além disso, em condições adequadas de suprimento de água e nutrientes às plantas, práticas de manejo comuns nos perímetros de irrigação, observa-se uma alta correlação negativa entre o parâmetro de temperatura da superfície e a medida do índice de vegetação, dado que a diminuição da temperatura de uma determinada região ou pixel, na imagem, pode estar associada com o aumento do vigor vegetativo e do conseqüente aumento do efeito refrigerante causado pela evapotranspiração das áreas irrigadas. Ao contrário, o estresse hídrico causa uma elevação da temperatura foliar do dossel, resultado da diminuição do resfriamento evaporativo da superfície foliar, o que é causado pela diminuição da evapotranspiração. A matriz de correlação entre as grades numéricas de temperatura e NDVI, referente à região de interesse representada na **Figura 3**, apontou para um coeficiente negativo de 0,93, o que pode representar mais uma indicação de prática de irrigação.

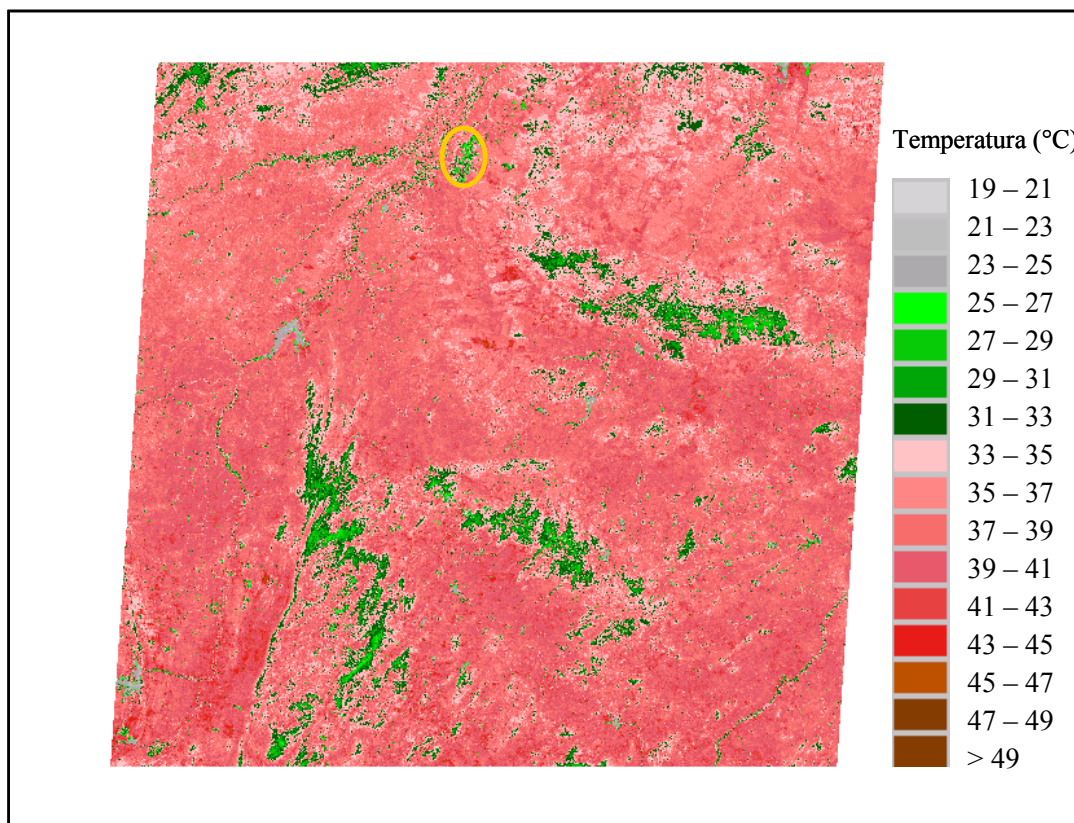


Figura 2 – Mapa resultante do fatiamento da grade de temperatura da superfície

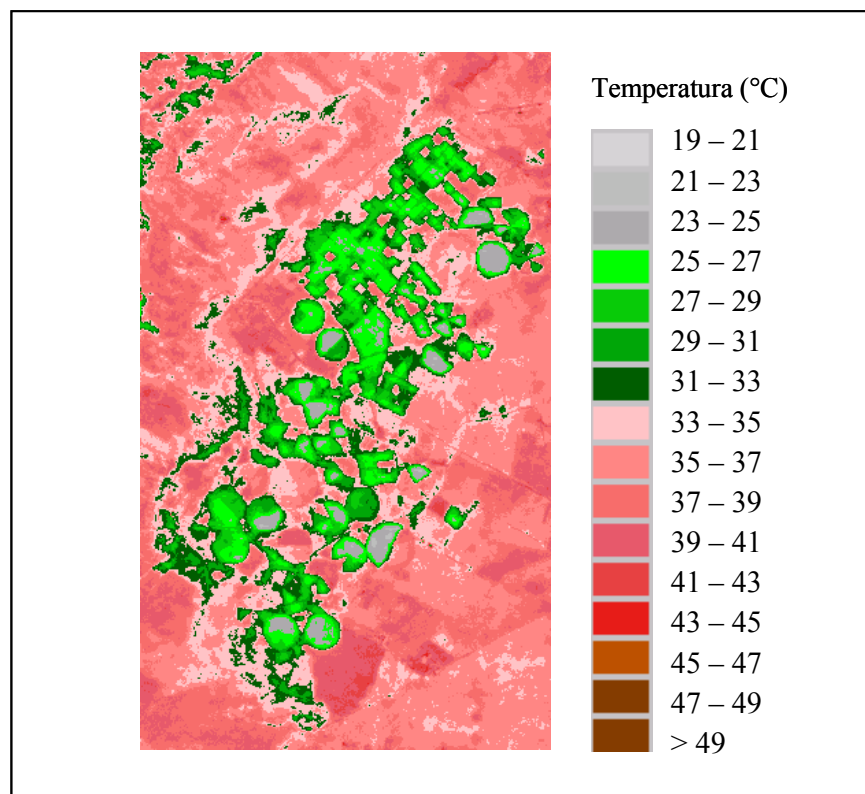


Figura 3 – Recorte do mapa de temperatura da superfície

## 6. Conclusão

A proposta de utilização da imagem do canal do infravermelho termal do sensor TM/Landsat-5, no esforço de localizar prováveis áreas irrigadas em meio à vegetação seca do semi-árido brasileiro e, assim, contribuir com o gerenciamento dos recursos hídricos na atividade agrícola, é de fácil aplicação e gera resultados bastante satisfatórios, tanto em tempo de processamento, como em produto final.

O método utilizado de detecção remota da temperatura da superfície é caracterizado por uma abordagem semi-empírica que pode ser aplicado com relativo sucesso na região semi-árida brasileira, principalmente durante a estação seca do ano quando a demanda por água do setor agrícola é significativamente maior.

Apesar da simplicidade do método empregado, a baixa resolução temporal aliada ao eventual comprometimento das imagens de satélites devido à cobertura de nuvens, limitam, até certo ponto, o atendimento dos objetivos operacionais da maioria das agências de gerenciamento dos recursos hídricos, quando da utilização de imagens de média resolução espacial de satélites, tal como Landsat.

## Referências

- Câmara, G.; de Sousa, R. C. M.; de Freitas, U.; Casanova, M.A. SPRING: processamento de imagens e dados georreferenciados. **Anais do SIBGRAPI V: 233-242**, 1992.
- Ceará. **Decreto estadual nº 27.271, de 28 de novembro de 2003**. Regulamenta o art. 7º da Lei Nº 11.996 de 24 de julho de 1992, no tocante à cobrança pelo uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e o art. 4º da citada Lei, no que se refere a outorga de direito de uso e dá outras providências. < <http://www.cogerh.com.br/versao3/>> Acesso em: 29 jun 2004.
- Chander, G.; Markham, B. **Revised Landsat 5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges**. 2003. Disponível em: < <http://landsat7.usgs.gov/documents/L5TMCa12003.pdf>>
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley and Sons, 1980. 109 p.
- EMBRAPA - **Zoneamento Agroecológico do Nordeste**: Diagnóstico do Quadro Natural e Agrossocioeconômico. Petrolina: MARA/EMBRAPA/CPATSA/CNPS: 1993. (Série Documentos, n. 80).
- Markham, B. L.; Barker, J. L. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospherical radiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.
- Norman, J. M. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. **Remote Sensing Reviews**, v. 12, p. 159-173, 1995.
- Van de Griend, A. A.; Owe, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**. v. 14, n. 6, p. 1119-1131, 1993.
- Wukelic, G. E.; Gibbons, D. E.; Martucci, L. M.; Foote, H. P. Radiometric calibration of Landsat Thematic Thermal Band. **Remote Sensing of Environment**, v. 28, p. 339-347, 1989.