

## NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ BỀ MẶT ĐẤT THỊ BẢNG PHƯƠNG PHÁP VIỄN THÁM NHIỆT

Trần Thị Vân<sup>(1)</sup>, Hoàng Thái Lan<sup>(2)</sup>, Lê Văn Trung<sup>(3)</sup>

(1) Viện Môi trường và Tài nguyên, ĐHQG-HCM

(2) Viện Vật lý Tp.HCM, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

(3) Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 23 tháng 09 năm 2008, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 26 tháng 02 năm 2009)

**TÓM TẮT:** Viễn thám hồng ngoại nhiệt đo lường bức xạ bề mặt trái đất có thể giúp ta khôi phục giá trị nhiệt độ bề mặt trên toàn vùng nghiên cứu theo từng pixel. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phương pháp xác định nhiệt độ bề mặt cho đô thị TP.HCM, có tính đến việc hiệu chỉnh kết quả tính toán thông qua việc xác định độ phát xạ bề mặt từ phương pháp NDVI. Phương pháp này cho bản đồ phân bố nhiệt độ bề mặt có độ phân giải cao hơn là tính trực tiếp từ các kênh nhiệt. Nghiên cứu thử nghiệm thực hiện trên 2 dòng ảnh vệ tinh Landsat và Aster có các kênh hồng ngoại nhiệt với độ phân giải không gian trung bình, thích hợp cho các nghiên cứu về các quá trình nhiệt ở các khu đô thị. Kết quả tính toán được đối sánh với số liệu đo thực tế của 10 điểm quan trắc nhiệt độ và phân tích sai số theo nhiều phương pháp khác nhau để chứng minh tính ưu việt của phương pháp trong điều kiện thực tế của khu vực nghiên cứu nói riêng cũng như của Việt Nam nói chung. Kết quả nghiên cứu này sẽ đóng góp một hướng tiếp cận giải quyết vấn đề xác định các yếu tố khí tượng liên quan đến quá trình nhiệt trong nghiên cứu biến đổi khí hậu hiện nay.

**Từ khóa:** Độ phát xạ, NDVI, nhiệt độ bề mặt, viễn thám nhiệt

### 1. GIỚI THIỆU

Nhiệt độ bề mặt đất là một biến quan trọng trong nhiều tính toán ứng dụng như khí hậu, thủy văn, nông nghiệp, sinh địa hóa và các nghiên cứu biến động môi trường. Nó là một yếu tố chỉ thị về cân bằng năng lượng ở bề mặt trái đất. Nhiệt độ bề mặt đất bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi khả năng của bề mặt phát ra bức xạ, tức là độ phát xạ bề mặt. Vì vậy, biết rõ độ phát xạ bề mặt là điều quyết định để ước tính cân bằng bức xạ ở bề mặt trái đất. Bức xạ nhiệt từ bất kỳ bề mặt nào phụ thuộc vào 2 yếu tố: (1) nhiệt độ bề mặt, là chỉ thị của tình trạng nhiệt động lực gây nên bởi cân bằng nhiệt của các thông lượng giữa khí quyển, bề mặt và lớp đất mặt phụ; (2) độ phát xạ bề mặt, là hiệu suất của bề mặt để truyền dẫn năng lượng bức xạ được sinh ra trong đất đi vào khí quyển. Nó phụ thuộc vào thành phần, độ nhám bề mặt và các tham số vật lý của bề mặt như độ ẩm đất. Vì vậy, để ước tính định lượng nhiệt độ bề mặt, cần phải tách các hiệu ứng của nhiệt độ và độ phát xạ trong bức xạ được quan sát.

Viễn thám thụ động đo lường bức xạ phát ra từ bề mặt trái đất trên từng pixel phụ thuộc vào trường nhìn tức thời của bộ cảm biến (IFOV) đặt trên vệ tinh. Vùng bước sóng điện từ 3-35 $\mu$ m thường được gọi là vùng hồng ngoại trong viễn thám mặt đất. Dải quang phổ điện từ này cho phép thu nhận bức xạ và ước tính nhiệt độ bề mặt, đặc biệt trong cửa sổ khí quyển từ 8-14 $\mu$ m. Các bộ cảm biến thu nhận ảnh có chứa kênh hồng ngoại nhiệt có thể kể đến như AVHRR (trên vệ tinh NOAA), MVIRI (Meteosat), AATSR (ENVISAT), MODIS (TERRA) với độ phân giải thấp từ 1km trở lên. Trong nghiên cứu đô thị thường yêu cầu độ phân giải cao hơn, trong đó có các ảnh vệ tinh thu nhận từ các bộ cảm biến như LANDSAT: TM có độ phân giải kênh nhiệt 120m, EMT+ - 60m; ASTER độ phân giải không gian 90m; TIMS độ phân giải 18m; ATLAS độ phân giải 10m. Trong đó, ảnh TIMS và ATLAS được thu nhận từ các vệ tinh nhỏ phục vụ cho các nghiên cứu địa phương. Ảnh hồng ngoại nhiệt của Landsat và Aster mặc

dù có độ phân giải thấp hơn nhưng lại có quỹ đạo bay chụp toàn cầu và tư liệu lưu trữ lâu dài, rất thích hợp cho nhiều nghiên cứu ứng dụng, đặc biệt nghiên cứu lịch sử.

Ứng dụng viễn thám hồng ngoại nhiệt (viễn thám nhiệt) trong nghiên cứu ước tính nhiệt độ bề mặt đô thị có tính ưu việt đặc biệt là mức độ chi tiết của kết quả được thể hiện trên toàn vùng, chứ không phải chỉ là số đo tại điểm quan trắc như trong phương pháp đo đạc truyền thống từ các trạm quan trắc khí tượng. Bài báo này sẽ trình bày kết quả nghiên cứu phương pháp xác định nhiệt độ bề mặt đối tượng ở cấp đô thị (sử dụng ảnh vệ tinh LANDSAT và ASTER) có tính đến yếu tố phát xạ trong hiệu chỉnh kết quả tính toán với quy trình tính toán có thể áp dụng cho bất kỳ ảnh vệ tinh không phụ thuộc vào số lượng kênh nhiệt và tăng cường được độ phân giải ảnh kết quả. Đồng thời kết quả nghiên cứu sẽ được kiểm chứng với số đo quan trắc nhiệt độ bề mặt thực tế để đánh giá độ chính xác.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Bức xạ Mặt Trời đi qua khí quyển ảnh hưởng lên các điều kiện khí tượng bằng cách truyền năng lượng vào không khí và trái đất. Vật đen được dùng để nghiên cứu bức xạ. Đó là một vật lý tưởng hấp thụ hoàn toàn và phát xạ toàn bộ năng lượng đạt tới nó. Thực tế chỉ tồn tại vật thể tự nhiên (vật xám) với khả năng phát xạ của vật thể tự nhiên có giá trị trong khoảng 0-1. Năng lượng bức xạ trái đất là hàm số của hai thông số: nhiệt độ và độ phát xạ. Nếu vật tự nhiên và vật đen có cùng nhiệt độ bề mặt thì vật tự nhiên phát xạ kém hơn vật đen.

Vùng bước sóng điện từ 3-35 $\mu\text{m}$  thường được gọi là vùng hồng ngoại trong viễn thám mặt đất. Trong vùng này, bức xạ phát ra bởi Trái Đất lớn hơn nhiều so với bức xạ phản xạ bởi Mặt Trời, do đó viễn thám vùng này được dùng để khôi phục giá trị nhiệt độ bề mặt đất. Các bộ cảm biến vận hành chủ yếu phát hiện đặc tính bức xạ nhiệt của các vật liệu mặt đất. Tuy nhiên, các kênh phổ hữu ích bị hạn chế do cường độ bức xạ phát ra và các cửa sổ khí quyển. Cửa sổ khí quyển tốt nhất là 8-14 $\mu\text{m}$  [10] do có sự hấp thụ vật chất của khí quyển là thấp nhất [13]. Phần lớn năng lượng bề mặt đất được các bộ cảm biến nhiệt thu nhận trong dải bước sóng 10.5-12.5  $\mu\text{m}$ , và được dùng để ước tính nhiệt độ bề mặt đất và các quá trình nhiệt khác [12], [10], [4]. Viễn thám hồng ngoại nhiệt thu nhận dữ liệu trong 2 cửa sổ 3-5 $\mu\text{m}$  và 8-14 $\mu\text{m}$  nói chung là bị động, nghĩa là, các bộ cảm biến thu thập dữ liệu theo bức xạ phát ra một cách tự nhiên. Các kỹ thuật chủ động triển khai các búp sóng laser bước sóng đơn sắc (gọi là radar lazer hoặc LIDAR) chỉ mới được phát triển gần đây.

Bức xạ hồng ngoại nhiệt trong dải 8-14 $\mu\text{m}$  được phát ra từ bề mặt tương quan với nhiệt độ động năng và độ phát xạ bề mặt. Tuy nhiên, có hai vấn đề chính cần phải giải quyết để đạt được nhiệt độ và độ phát xạ bề mặt từ dữ liệu hồng ngoại nhiệt. Thứ nhất, bức xạ đo được ở bộ cảm biến bị ảnh hưởng bởi khí quyển từ quá trình hấp thụ và phát xạ lại bởi các khí, chủ yếu là hơi nước trong vùng hồng ngoại của phổ điện từ. Vì vậy, để đạt được nhiệt độ bề mặt, cần phải hiệu chỉnh khí quyển qua việc sử dụng mô hình truyền bức xạ. Thứ hai, bản chất không xác định được của các số đo nhiệt độ và độ phát xạ. Nếu bức xạ nhiệt được đo trong N kênh, thì sẽ có N+1 tham số không biết gồm N lớp độ phát xạ (đối với N kênh) và 1 lớp nhiệt độ bề mặt. Ước tính độ phát xạ và nhiệt độ trong dữ liệu hồng ngoại nhiệt đa phổ cần các giả thiết bổ sung để giải biến không xác định [16], [11]. Các giả thiết thường liên quan đến các đo đạc độ phát xạ trong phòng thí nghiệm hoặc trên thực tế.

Giá trị bức xạ thu nhận trong dải hồng ngoại nhiệt của phổ điện từ trên các bộ cảm biến vệ tinh gồm 3 thành phần: (1) phát xạ bề mặt được truyền qua khí quyển ( $\tau\epsilon B_\lambda$ ); (2) bức xạ hướng dưới được phát ra bởi khí quyển được phản xạ bởi bề mặt và truyền qua khí quyển đến bộ cảm ( $\tau(1-\epsilon)L_{\lambda\downarrow}$ ) và (3) phát xạ từ khí quyển được truyền qua khí quyển ở trên điểm phát xạ ( $L_\lambda\uparrow$ ). Minh họa điều này qua phương trình truyền bức xạ như sau:

$$L_{\text{sensor}, \lambda} = \tau [\varepsilon B_{\lambda} + (1 - \varepsilon) L_{\lambda\downarrow}] + L_{\lambda\uparrow}(1)$$

Trong đó,  $\tau$  và  $\varepsilon$  là độ truyền qua và độ phát xạ.

Thành phần (2) và (3) phụ thuộc vào các điều kiện khí quyển. Các thông số này thường được đo đạc đồng thời cùng lúc thu nhận ảnh từ vệ tinh, dùng để hiệu chỉnh khí quyển cho các bài toán liên quan bằng các mô hình như MODTRAN, ATCOR... Thực tế các số đo điều kiện khí quyển không sẵn có, do đó việc hiệu chỉnh khí quyển cho việc khôi phục lại các số đo mặt đất là một việc khó khăn đối với một vùng bất kỳ vào một thời điểm bất kỳ và thường bỏ qua trong một số nghiên cứu ứng dụng.

Trong công thức (1), bức xạ bề mặt đất  $R_{\lambda}$  được đo trong kênh bước sóng  $\lambda$  gồm hai thành phần:  $R_{\lambda} = \varepsilon B_{\lambda} + (1 - \varepsilon) L_{\lambda\downarrow}(2)$

Do nhiệt độ khí quyển thường thấp hơn nhiệt độ mặt đất nên phần mặt đất hấp thụ được bức xạ phát ra từ khí quyển  $((1 - \varepsilon) L_{\lambda\downarrow})$  thường rất nhỏ so với phần phát xạ của mặt đất. Thực tế tính toán, đối với các bề mặt tự nhiên, bức xạ bề mặt sẽ được biểu diễn gần đúng như sau: [9]:  $R_{\lambda} = \varepsilon B_{\lambda}(3)$

### 3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Mỗi loại bộ cảm biến nhiệt được thiết kế với sứ mạng riêng của mình, có loại chỉ có một kênh nhiệt (bộ cảm biến Landsat TM và ETM+), có loại có từ hai đến nhiều kênh (bộ cảm biến Aster có 5 kênh nhiệt). Chọn lựa phương pháp xác định nhiệt độ và độ phát xạ bề mặt sao cho phù hợp đồng thời với các dữ liệu vệ tinh này (chỉ chứa 1 kênh nhiệt hoặc nhiều hơn) là yêu cầu của nghiên cứu nhằm đơn giản hoá việc tính toán và có thể áp dụng cho tất cả các loại dữ liệu vệ tinh cho mọi khu vực khác nhau.

#### Xác định nhiệt độ

Trong viễn thám hồng ngoại nhiệt, nhiệt độ bức xạ ( $T_R$ ) được định nghĩa như là nhiệt độ tương đương của vật đen truyền cùng một lượng bức xạ thu được từ một vật thực tế và phụ thuộc vào nhiệt độ động lực bề mặt thực ( $T_K$ ) và độ phát xạ. Trường hợp không phải vật đen, tổng lượng bức xạ phát ra được biểu diễn theo định luật Stefan-Boltzman như sau:

$$B = \varepsilon \sigma T_K^4 = \sigma T_R^4 \quad (4)$$

$$\text{Suy ra: } T_R = \varepsilon^{1/4} T_K \quad (5)$$

Như vậy, nhiệt độ bức xạ của vật tự nhiên sẽ nhỏ hơn nhiệt độ bức xạ của vật đen tại cùng một nhiệt độ. Điều này cho thấy rằng *nhiệt độ được đo bằng phương pháp viễn thám sẽ nhỏ hơn nhiệt độ động lực bề mặt tương đương bởi hệ số  $\varepsilon^{1/4}$*  [10].

Nhiệt độ bức xạ được đo bởi các bộ cảm biến trên vệ tinh là nhiệt độ bức xạ còn gọi là nhiệt độ sáng của vật đen tuyệt đối (với  $\varepsilon=1$ ) và được xác định theo định luật Planck:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B_{\lambda}} + 1\right)} \quad (6)$$

Trong đó,  $B_{\lambda}$  - bức xạ của vật đen tuyệt đối ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ );  $K_1 = 2\pi hc^2/\lambda^5$ ;  $K_2 = hc/k\lambda$ ;  $h$  - hằng số Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  Js);  $c$  - vận tốc ánh sáng ( $3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ );  $k$  - hằng số Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>);  $\lambda$  - bước sóng trung tâm ( $\mu\text{m}$ ).

Nhiệt độ bề mặt (hay nhiệt độ động năng bề mặt) là nhiệt năng của một vật thể và có thể được đo bằng nhiệt kế. Công thức (5) cho thấy giữa nhiệt độ bức xạ và nhiệt độ bề mặt có mối tương quan qua độ phát xạ  $\varepsilon$ . Nếu có thể đo được tổng bức xạ phát ra từ mặt đất hoặc nếu đo được nhiệt độ bức xạ thì số liệu này có thể được dùng để tính nhiệt độ mặt đất như sau:

$$T_s = \frac{1}{\varepsilon^{1/4}} T_B \quad (7)$$

Nhiệt độ bề mặt bị ảnh hưởng chủ yếu bởi bức xạ mặt trời. Độ chính xác ước tính của nhiệt độ bề mặt từ dữ liệu viễn thám nhiệt phụ thuộc vào các yếu tố: khí quyển, tương tác giữa bề mặt và khí quyển, độ phát xạ vật thể và độ phân giải ảnh. Nhiệt độ bề mặt đo lường từ viễn thám nhiệt có thể bị ảnh hưởng bởi sự hỗn hợp của các yếu tố dưới pixel, xảy ra khi có nhiều hơn một vật thể tồn tại bên trong trường nhìn của bộ cảm biến (FOV). Vì vậy, để so sánh nhiệt độ đo từ viễn thám nhiệt với số đo thực mặt đất, cần phải chọn lựa các khu vực đối tượng lớn hơn kích thước pixel.

#### Xác định độ phát xạ

**Độ phát xạ ( $\varepsilon$ ) là tỷ số giữa năng lượng phát xạ từ bề mặt tự nhiên trên năng lượng phát xạ từ vật thể đen ở cùng bước sóng và nhiệt độ (xem công thức 3)**

Nhiệt độ và độ phát xạ luôn luôn là hai biến cần xác định trong phương pháp viễn thám, do đó các phương pháp thường phát triển tính toán đồng thời giá trị của hai biến trên. Tuy nhiên, do tính chất phức tạp và không xác định, nên bài toán giải  $N+1$  ẩn số không được giải với độ chính xác và tính tổng quát đầy đủ. Tuy nhiên, độ phát xạ bề mặt là biến ít thay đổi theo thời gian và không gian so với nhiệt độ bề mặt, vì vậy ta thường xác định độ phát xạ bề mặt trước khi tính toán nhiệt độ bề mặt.

Có nhiều phương pháp tính độ phát xạ bề mặt từ dữ liệu của các bộ cảm biến vệ tinh hiện hành. Một số phương pháp giả thiết ban đầu độ phát xạ là hằng số (ví dụ phương pháp chuẩn hóa độ phát xạ NEM, NOR) hoặc nhiệt độ là hằng số (phương pháp tỷ số phổ), lúc đó biến không biết được tính và biến hằng số đã được giả thiết sẽ được tính lại tiếp sau đó. Một số phương pháp bỏ qua khái niệm phản xạ bề mặt hoặc yêu cầu biết trước thông tin bề mặt như phương pháp NDVI [5].

Phương pháp dựa trên NDVI rất hữu ích nếu biết trước độ phát xạ của đất trống và thực vật cũng như cấu trúc và phân bố thực vật. Ước tính độ phát xạ bề mặt từ kênh khả kiến và cận hồng ngoại theo phương pháp NDVI có 3 ưu điểm chính: (1) các bộ cảm biến trên vệ tinh thường cung cấp độ phân giải không gian cao hơn đối với các kênh khả kiến và cận hồng ngoại so với kênh nhiệt, vì vậy bản đồ độ phát xạ thu được sẽ có độ phân giải không gian cao hơn so với các phương pháp tính trực tiếp từ các kênh nhiệt; (2) phương pháp NDVI có thể được ứng dụng cho bất kỳ bộ cảm biến nào, không phụ thuộc vào số lượng kênh nhiệt; (3) trình tự tính toán đơn giản và hiệu chỉnh khí quyển ít phức tạp.

Các pixel đại diện bề mặt đất thường là các pixel hỗn hợp chứa cả thực vật và đất tùy thuộc vào độ phân giải của ảnh vệ tinh. Độ phát xạ hiệu quả của một pixel có thể được ước tính bằng cách cộng lại các phần đóng góp của độ phát xạ thực vật và độ phát xạ đất chứa trong đó. Van de Griend và Owe (1993) [17] đã thực hiện thí nghiệm đo đạc trực tiếp độ phát xạ và phản xạ phổ trong dải khả kiến và cận hồng ngoại để tính NDVI và tìm ra được mối quan hệ thực nghiệm giữa độ phát xạ và NDVI như sau:

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln(\text{NDVI}) \quad (8)$$

với  $a = 1.0094$  và  $b = 0.047$ . Quan hệ này chỉ thực thi đối với các khu vực có đặc tính đồng nhất. Valor và Caselles (1996) [16] đã đưa ra một mô hình tương tự cũng dựa trên NDVI nhưng có thể ứng dụng cho các khu vực không đồng nhất với nhiều kiểu đất, thực vật và thực phủ thay đổi. Theo mô hình này, độ phát xạ hiệu quả của bề mặt không đồng nhất được định nghĩa là tổng độ phát xạ của các thành phần đơn giản của nó:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) \quad (9)$$

Trong đó,  $\epsilon_v$  và  $\epsilon_s$  là độ phát xạ của thực vật và đất tinh khiết, nghĩa là trong vòng một pixel đại diện chỉ là thực vật hoặc chỉ là đất, không có sự pha trộn.  $P_v$  là tỷ lệ hay hợp phần hiện diện của thực vật trong pixel, giá trị từ 0 (đối với đất trống) đến 1 (đối với đất phủ đầy thực vật). Do đó  $P_v$  có thể được tính theo NDVI tương quan với các ngưỡng giá trị NDVI<sub>s</sub> của đất trống hoặc NDVI<sub>v</sub> của đất phủ đầy thực vật. NDVI được xác định theo tỷ số giá trị phản xạ của các kênh đỏ thuộc dải khả kiến và cận hồng ngoại ((red-NIR)/(red+NIR)).  $P_v$  được xác định theo công thức tỷ số [3] như sau:

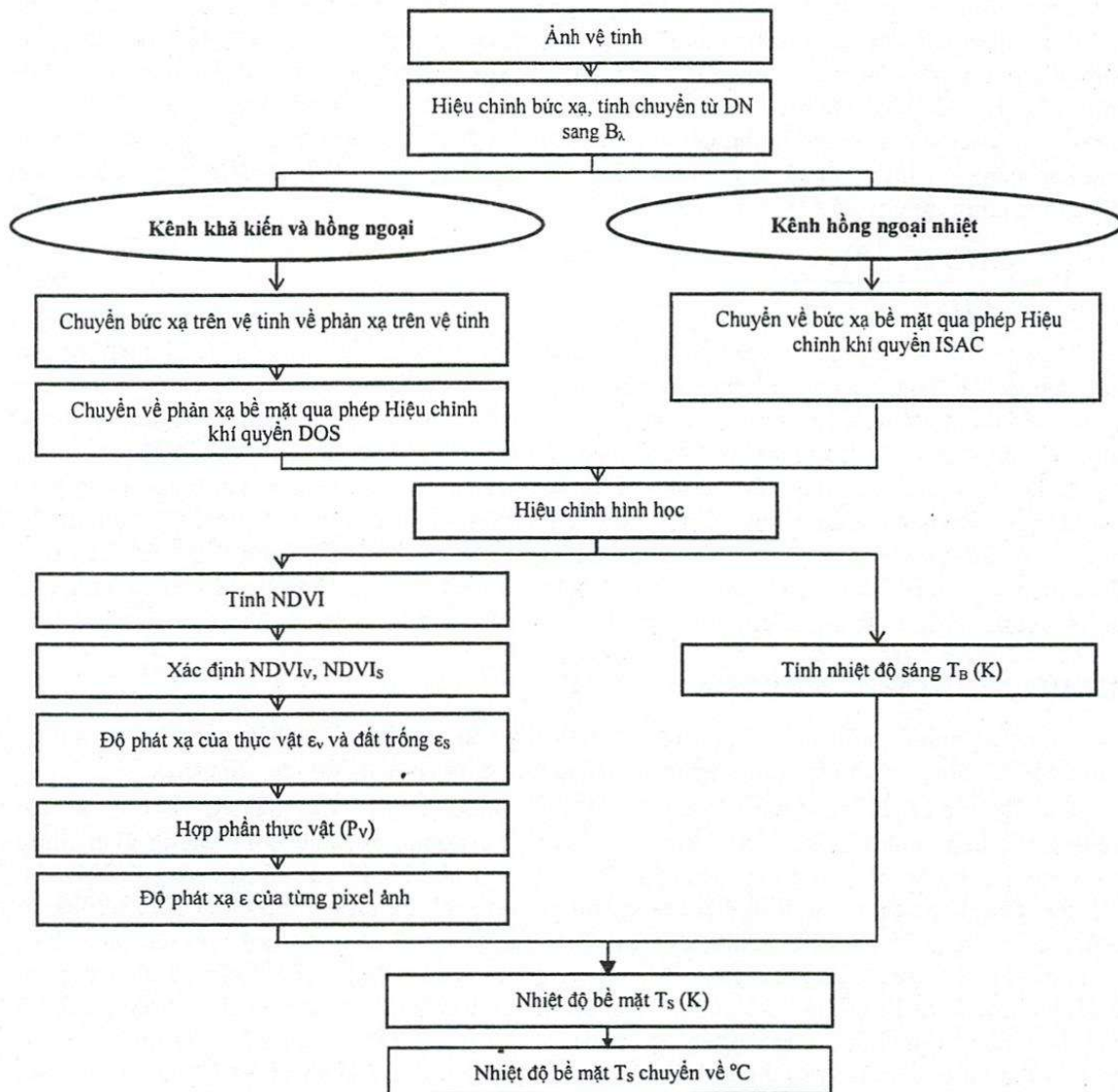
$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (10)$$

Việc xác định độ phát xạ theo phương pháp NDVI yêu cầu phải biết trước độ phát xạ của đất và thực vật. Hầu hết các nghiên cứu trước đây đều lấy số liệu độ phát xạ từ các văn liệu sẵn có qua đo đạc thực nghiệm trên các mẫu đại diện. Điều này dễ dẫn đến sai số vì mỗi khu vực mỗi bề mặt sẽ có đặc trưng vật lý khác nhau, cần thiết phải xác định riêng cho khu vực của mình. Trong nghiên cứu này, tác giả đã thử nghiệm trên khu vực TPHCM với nhiều vùng mẫu chỉ là thực vật và chỉ là đất trống với kích thước lớn hơn rất nhiều giá trị 1 pixel để xác định độ phát xạ của đất và thực vật cũng như phần trăm lớp phủ thực vật  $P_v$ , cung cấp đầu vào trong phương pháp của Valor và Caselles để xác định độ phát xạ cho từng pixel của cả khu vực nghiên cứu. Sơ đồ thực hiện xem trên hình 1.

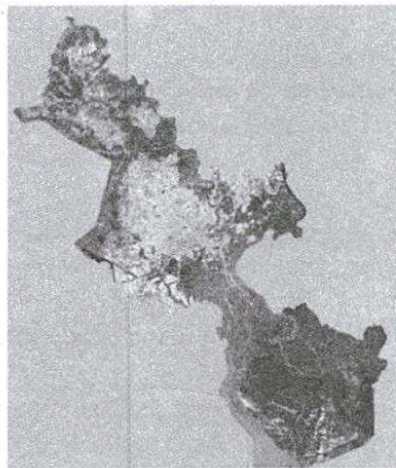
#### 4. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

Khu vực nghiên cứu được chọn là TP.HCM có cấu tạo địa hình thấp dần từ Bắc xuống Nam với các công trình xây dựng tập trung ở các khu giữa và tiến dần lên phía Bắc.

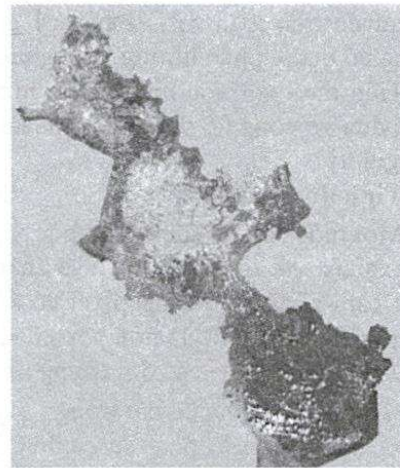
Dữ liệu viễn thám sử dụng là ảnh vệ tinh LANDSAT ETM+ và ASTER, vì cả 2 đều có kênh nhiệt bên cạnh các kênh khả kiến và kênh hồng ngoại, độ phân giải không gian trung bình thích hợp cho nhiều nghiên cứu cấp địa phương (tỉnh, thành) và giá cả tương đối rẻ. Hai ảnh này đều được chọn vào thời điểm mùa khô, ít mây: ảnh Landsat chụp ngày 13-02-2002 và Aster chụp ngày 25-12-2006 (Hình 2). Ảnh Landsat chỉ có 1 kênh nhiệt trong dải phổ 10.4-12.5 $\mu$ m sẽ được dùng trong tính toán. Ảnh Aster gồm 5 kênh nhiệt từ 8.125-11.65 $\mu$ m, trong đó 2 kênh cuối 13 và 14 có dải phổ 10.25-11.65 $\mu$ m. Phần lớn năng lượng bề mặt đất được các bộ cảm biến nhiệt thu nhận trong dải bước sóng 10.5-12.5  $\mu$ m, và được dùng để ước tính nhiệt độ bề mặt đất và các quá trình nhiệt khác [12], [10], [4]. Do đó, 2 kênh nhiệt 13 và 14 của ảnh Aster sẽ được dùng trong tính toán này.



Hình 1: Quy trình xác định nhiệt độ và độ phát xạ bề mặt



LANDSAT 13-02-2002



ASTER 25-12-2006

**Hình 2.** Ảnh tổ hợp màu giả khu vực nghiên cứu**Tính giá trị bức xạ**

Ở bước tiền xử lý ảnh, việc hiệu chỉnh bức xạ là điều cần thiết đối với các kênh nhiệt để chuyển đổi giá trị số nguyên (DN) không đơn vị sang giá trị thực của bức xạ ( $B_\lambda$ ) với đơn vị là  $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ . Mỗi bộ cảm biến sẽ có các tham số tính chuyển khác nhau:

Đối với ảnh Landsat:  $B_\lambda = g * DN + b$  (11)

Đối với ảnh Aster:  $B_\lambda = (DN - 1) * R$  (12)

Trong đó, g, b, và R là các hệ số chuyển đổi đơn vị thường được cung cấp sẵn đối với mỗi loại bộ cảm biến (Bảng 1).

**Bảng 1.** Các hệ số chuyển đổi đơn vị của dữ liệu Landsat ETM+ và Aster (Nguồn: [15], [1])

LANDSAT ETM+			ASTER			
Kênh	g	b	Kênh	R	Kênh	R
1	1.176078	-6.20	1	1.688	8	0.0417
2	1.205098	-6.40	2	1.415	9	0.0318
3	0.938824	-5.00	3N	0.862	10	$6.882 \times 10^{-3}$
4	0.965490	-5.10	3B	0.862	11	$6.780 \times 10^{-3}$
5	0.190471	-1.00	4	0.2174	12	$6.590 \times 10^{-3}$
6	0.066824	0.00	5	0.0696	13	$5.693 \times 10^{-3}$
7	0.066235	-0.35	6	0.0625	14	$5.225 \times 10^{-3}$
8	0.971765	-4.70	7	0.0597		

Các kênh khả kiến và cận hồng ngoại được tiếp tục chuyển sang giá trị phản xạ và được đưa về phản xạ bề mặt qua phép hiệu chỉnh khí quyển từ phương pháp "Trừ đối tượng đen" (DOS - Dark Object Subtract). Phương pháp này dựa vào các điều kiện ngay chính trên ảnh, và đối tượng đen được ước tính từ giá trị thấp nhất của histogram trích dẫn từ mỗi kênh. Phương pháp dùng để hiệu chỉnh khí quyển cho các kênh nhiệt trong dải phổ từ 8 - 14 $\mu m$  được dùng trong nghiên cứu này là "Bù trừ hiệu ứng khí quyển ngay trên ảnh" (ISAC - In-Scene Atmospheric Compensation). Giải thuật này giả thiết rằng không có sự thay đổi các tham số

khí quyển trên toàn ảnh và bề mặt gần với vật đen tuyệt đối tồn tại bên trong ảnh. Giả thiết không có thành phần hướng xuống của bức xạ bị phản xạ [7].

Tiếp theo là bước hiệu chỉnh hình học. Ở bước này tất cả các kênh của mỗi loại ảnh sẽ được đưa về cùng độ phân giải của kênh đỏ, của ảnh Landsat là 30m, của ảnh Aster là 15m, để tính giá trị NDVI.

#### Tính độ phát xạ

Mỗi một vật thể sẽ phát ra bức xạ riêng tùy theo khả năng hấp thụ của nó, do đó giá trị độ phát xạ của vật thể khác nhau sẽ khác nhau. Tuy nhiên, trên ảnh vệ tinh đối tượng bề mặt đất được cảm nhận theo từng pixel có kích thước liên quan đến độ phân giải ảnh. Vì vậy, trong một pixel ảnh thường là hỗn hợp của hai hoặc vài đối tượng bên trong, và lúc đó giá trị độ phát xạ sẽ là hỗn hợp của các đối tượng này hợp lại.

NDVI xác định cho đất trống và đất phủ đầy thực vật đối với ảnh Landsat 2002 là 0.107 và 0.676 tương ứng độ phát xạ  $\epsilon_s=0.904$  và  $\epsilon_v=0.991$ ; đối với ảnh Aster 2006 là 0.106 – 0.725, tương ứng  $\epsilon_s=0.904$  và  $\epsilon_v=0.994$ .

Độ phát xạ có liên quan đến tình trạng lớp phủ mặt đất và tỷ lệ thuận với sinh khối thực vật, kết quả thể hiện trên hình 3b đối với ảnh Aster 2006 cho thấy những khu vực có thực vật thường có giá trị phát xạ cao hơn 0.92, đặc biệt những vùng phủ đầy thực vật độ phát xạ đạt trên 0.95, đó là những vùng đất nông nghiệp có mật độ cây xanh cao hoặc những khu công viên cây xanh. Những khu vực đất trống, đô thị, khu xây dựng thường có giá trị độ phát xạ thấp nhất (khoảng 0.90 – 0.91). Mặt nước sông hồ có giá trị trong khoảng 0.91 đối với nước ít hàm lượng thực vật lơ lửng, ngược lại đối với mặt nước có hàm lượng thực vật lơ lửng cao độ phát xạ đạt đến 0.92.

Tương tự trên ảnh Landsat năm 2002 (hình 3a) cho thấy độ phát xạ ở những vùng đất nông nghiệp và khu vực có phủ cây xanh thường lớn hơn 0.92 đến hơn 0.95 hoặc gần 1 tùy vào mật độ phủ ít đến nhiều. Đất đô thị và khu xây dựng, đất trống có độ phát xạ khoảng 0.90-0.91. Các vùng nước sông hồ do có hàm lượng thực vật lơ lửng khá cao nên độ phát xạ có giá trị khoảng từ 0.92– 0.95 gần như của thực vật.

#### Tính nhiệt độ bề mặt đất

Nhiệt độ được ước tính từ các kênh nhiệt của mỗi bộ cảm biến. Đối với Landsat chỉ có một kênh nhiệt là kênh 6. Aster có 5 kênh nhiệt, mỗi kênh sẽ cho giá trị nhiệt độ khác nhau, tuy nhiên, nhiều nghiên cứu cho thấy, nhiệt độ cực đại thường xảy ra trong dải bước sóng 10 - 12 $\mu$ m [6], vì vậy, đối với ảnh ASTER nhiệt độ được tính từ hai kênh 13 và 14, giá trị cực đại từ 2 kênh sẽ là nhiệt độ bề mặt kết quả.

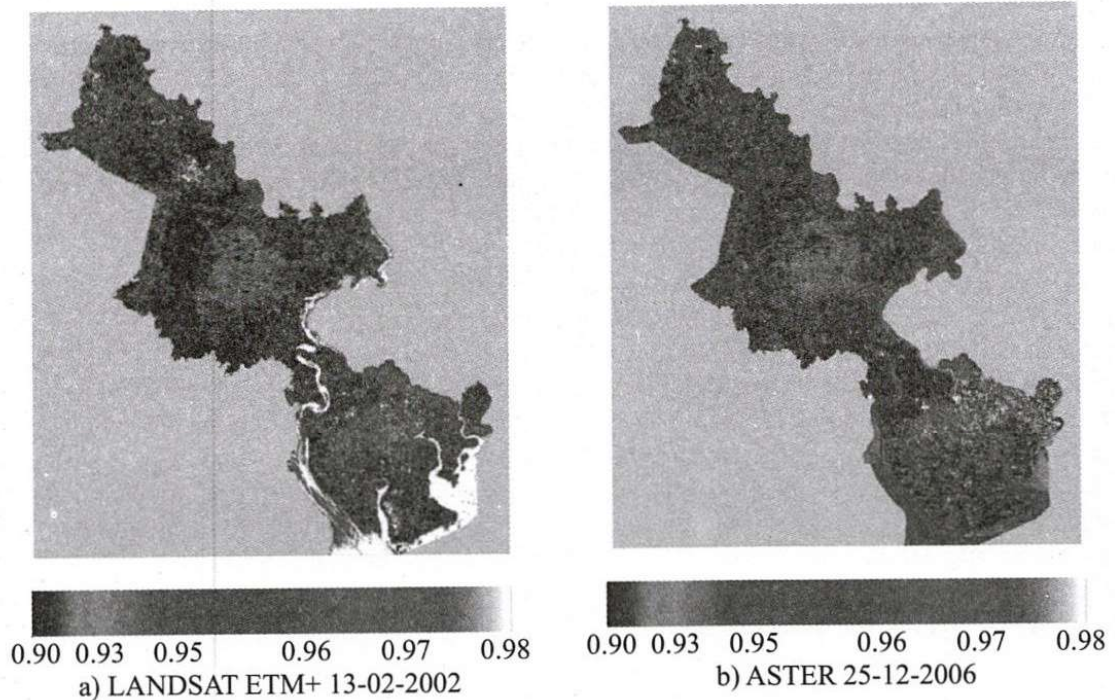
Hình 4 biểu diễn phân bố nhiệt độ bề mặt của khu vực TP.HCM trên 2 ảnh Landsat và Aster. Kết quả thống kê cho thấy nhiệt độ cao hơn 40°C là các khu công nghiệp tập trung, nhiệt độ từ 36°C đến 40°C thường tập trung ở các khu đô thị, khu vực dân cư thiếu cây xanh hoặc với mật độ cây xanh thưa thớt hay các khu vực đất trống khô. Do tính chất của vật liệu bề mặt (bê tông, đá, nhựa đường...) của những nơi này mang tính dẫn nhiệt cao, hấp thụ nhiệt tốt và nhanh, nhưng quá trình bốc thoát hơi nước lại kém bởi bề mặt không thấm, nên thông lượng nhiệt luôn luôn cao hơn so với những vùng có cây xanh hay đất ẩm ướt. Đặc biệt, kết quả cho thấy các vùng có mây với nhân nhiệt độ thường thấp nhất <22°C được thể hiện rõ ràng hơn trên ảnh Aster với màu xanh da trời (blue), và đây cũng là thông tin hữu ích để tách các khu vực bị mây che phủ. Thống kê giá trị nhiệt độ cực đại và cực tiểu (Bảng 2) cho thấy nhiệt độ bề mặt cực đại của năm 2006 cao hơn so với năm 2002, mặc dù ảnh năm 2006 chụp vào tháng 12 chưa phải là tháng cực nóng trong năm so với ảnh 2002 chụp vào tháng 2 nắng nóng. Điều này có thể giải thích với 2 nguyên nhân: thứ nhất, ảnh Landsat ETM+ được chụp vào khoảng 10g sáng, ảnh Aster được chụp vào khoảng 10g30, trong khoảng thời gian trễ hơn



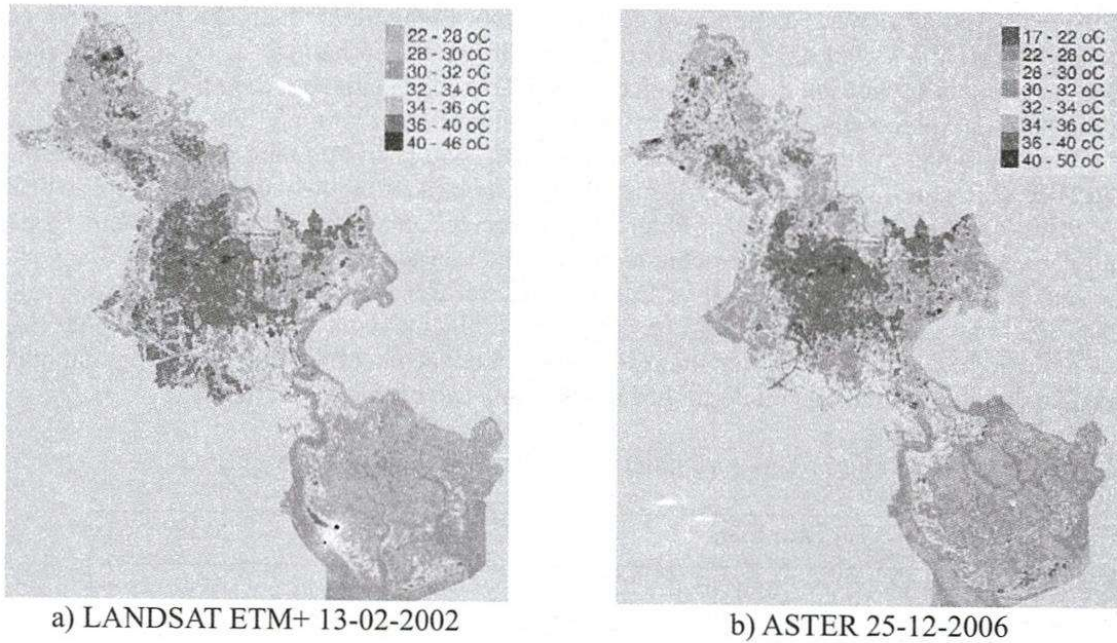
khoảng 30 phút đó mặt đất đã được đốt nóng thêm một lượng nhiệt khiến cho nhiệt độ bề mặt lúc này sẽ cao hơn so với nhiệt độ bề mặt trước đó 30 phút. Thứ hai, có thể do xu hướng ngày càng nóng ẩm bởi tiến trình đô thị hóa và công nghiệp hóa, đã làm tăng diện tích bề mặt không thấm, hấp thu nhiều năng lượng mặt trời cùng các hoạt động thải nhiệt của con người từ các quá trình sản xuất, hoạt động giao thông và sinh hoạt, góp phần làm tăng nhiệt độ bề mặt của khu vực. Nhìn chung, phân bố nhiệt độ bề mặt trên 2 ảnh tập trung nền nhiệt độ cao ở các quận nội thành và quận huyện phía Bắc. Phần rừng ngập mặn phía Nam ở huyện Cần Giờ và các khu vực cây xanh đất nông nghiệp còn lại có nền nhiệt độ thấp hơn. Kết quả phân bố này cho biết thông tin giữa nhiệt độ bề mặt và lớp phủ thực vật trên một khu vực nghiên cứu có mối quan hệ không gian với nhau thông qua các đặc tính nhiệt của vật chất. Do đó, sản phẩm kết quả nhiệt độ bề mặt từ dữ liệu viễn thám sẽ hữu ích cho việc phát hiện thực phủ cũng như đánh giá biến động trong nghiên cứu đô thị hoá qua đặc tính các bề mặt không thấm.

**Bảng 2.** Thống kê nhiệt độ bề mặt tính từ ảnh vệ tinh (°C)

Bộ cảm biến	Min	Max
LANDSAT ETM+ ngày 13-02-2002	23.2	45.9
ASTER ngày 25-12-2006	17.4	49.4



**Hình 3:** Phân bố độ phát xạ bề mặt của 2 ảnh Landsat và Aster

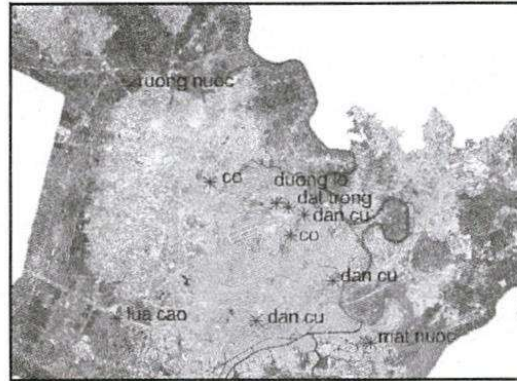


Hình 4. Phân bố nhiệt độ bề mặt trên 2 ảnh Landsat và Aster

#### Đánh giá độ chính xác

Ảnh Aster được sử dụng trong đề tài là ảnh thu nhận vào cuối tháng 12 năm 2006. Đây là thời gian thực hiện nghiên cứu nên có số liệu quan trắc về nhiệt độ dùng để đối chứng. Riêng ảnh Landsat là ảnh chụp vào năm 2002, không có số đo song hành, tuy nhiên dải bước sóng của kênh nhiệt Landsat (10-12 $\mu$ m) bao gồm luôn cả 2 dải bước sóng kênh nhiệt 13 và 14 của Aster. Đồng thời, việc tính toán nhiệt độ bề mặt được thực hiện theo cùng một quy trình, nên có thể xem xét kết quả đánh giá của ảnh Aster tương tự cho Landsat. Vì vậy, kết quả đánh giá độ chính xác sẽ được thực hiện đối với dữ liệu ảnh Aster để chứng minh phương pháp.

Đề tài đã tiến hành đặt 10 điểm quan trắc đo nhiệt độ hàng ngày trên các bề mặt đất khác nhau (Hình 5) và lấy số đo vào lúc 10g30 cùng lúc vệ tinh TERRA mang bộ cảm biến Aster đi qua khu vực TPHCM từ tháng 11-2006 cho đến khi đặt mua được ảnh Aster ngày 25-12-2006. Để đánh giá độ chính xác tính nhiệt độ bề mặt, đề tài đã so sánh kết quả tính cho ảnh Aster vào tháng 12-2006 với số đo tại 10 điểm này và kết hợp so sánh với phương pháp Chuẩn hoá phát xạ NOR của Gillespie, A.R., (1985) (tham khảo từ [11]), và phương pháp của Artis và Carnahan (1982) [2] (gọi tắt AC trong mô tả bài báo này). Giá trị độ phát xạ của 2 phương pháp NOR và AC được lấy từ kết quả của đề tài để cùng so sánh, riêng NOR chỉ sử dụng giá trị phát xạ cực đại và xem như là hằng số. Ngoài ra, đề tài cũng so sánh kết quả tính với sản phẩm nhiệt độ bề mặt AST08 đã được tính trước theo phương pháp tách nhiệt độ và độ phát xạ TES [8] đặc biệt chuyên dùng cho ảnh Aster.



Hình 5. Vị trí 10 điểm quan trắc nhiệt độ bề mặt

Sai số đánh giá độ chính xác của các phương pháp sẽ được tính từ độ lệch trung bình (bias) giữa các giá trị ước tính từ mỗi phương pháp với giá trị đo đạc thực tế và sai số E(%) giữa số đo và số tính (Bảng 3).

Kết quả cho thấy số liệu của sản phẩm AST08 tính từ phương pháp TES cho kết quả tốt nhất độ lệch khoảng  $1^{\circ}\text{C}$  và sai số chỉ khoảng 2.24%, vì đây là sản phẩm đã được hiệu chỉnh khí quyển đầy đủ. Kế tiếp là kết quả từ phương pháp của đề tài có tính đến hiệu chỉnh độ phát xạ theo NDVI, độ lệch khoảng  $2^{\circ}\text{C}$  và sai số khoảng 5.42%. Phương pháp tính nhiệt độ theo AC có độ lệch cao hơn một ít so với phương pháp của đề tài. Riêng trường hợp chỉ dùng tính toán đến nhiệt độ sáng (không hiệu chỉnh theo độ phát xạ bề mặt) cho kết quả sai lệch lớn đáng kể. Đây là trường hợp xấu nhất, nếu chỉ để xem xét tổng thể khu vực nghiên cứu sẽ phải sử dụng đến, còn không thì nhất thiết phải tính đến giá trị phát xạ bề mặt để hiệu chỉnh số liệu.

Bảng 3. Kết quả sai số tính nhiệt độ ( $T_s$ ) của các phương pháp khác nhau

Phương pháp tính $\epsilon$	Bias ( $^{\circ}\text{C}$ )	E(%)
Không tính $\epsilon$	7.24	20.14
NDVI	1.95	5.42
AC	2.01	5.59
NOR	6.83	19.0
TES – AST08	0.81	2.24

Có một điều cần quan tâm là, mặc dù phương pháp TES cho sai số nhỏ nhất trong các phương pháp mô tả, nhưng kết quả này là kết quả được định lượng trên trường nhìn FOV tương đương một vùng với kích thước  $90 \times 90\text{m}$  đối với ảnh Aster. Trong khi đó, phương pháp NDVI sử dụng các đặc tính của các kênh phản xạ có độ phân giải (15-30m) cao hơn so với kênh nhiệt ( $60\text{-}90\text{m}$ ). Ảnh độ phát xạ lúc này sẽ có độ phân giải là 15m đối với Aster và 30m đối với Landsat. Vì vậy, ảnh nhiệt độ bề mặt cuối cùng cũng mang cùng độ phân giải như ảnh độ phát xạ, giải quyết được một phần của vấn đề hỗn hợp đối tượng trong một pixel. Đồng thời, phương pháp TES có quy trình tính toán phức tạp, yêu cầu số liệu phải được hiệu chỉnh khí quyển tốt. Điều này sẽ khó thực hiện đối với các trường hợp ảnh quá khứ không có sẵn số đo về các yếu tố khí quyển song hành. Cuối cùng, giải thuật TES được thiết kế chỉ chuyên dùng cho loại ảnh Aster. Vì vậy, qua kết quả này, phương pháp tính nhiệt độ có hiệu chỉnh độ phát xạ từ NDVI của đề tài sẽ là giải pháp tối ưu trong điều kiện thực tế của Việt Nam.

## 5. KẾT LUẬN

Viễn thám nhiệt là một kênh thông tin khá hữu ích trong các nghiên cứu về tài nguyên môi trường, khí hậu, cảnh quan và trong các nghiên cứu về đô thị. Đặc biệt, đây là một "tài nguyên thông tin" quý giá trong những nghiên cứu về sự thay đổi của các đặc tính vật lý của môi trường đất - khí quyển xung quanh, trong bối cảnh bức xúc về biến đổi khí hậu toàn cầu. Các kết quả nghiên cứu của đề tài đã cho thấy:

A. Độ phát xạ bề mặt thu nhận từ viễn thám được khôi phục lại là một điều thử thách vì tính chất gồ ghề của bề mặt đất, đặc biệt là bề mặt đô thị và khó khăn trong việc loại bỏ các hiệu ứng khí quyển. Do đó, thường thì các nghiên cứu đơn giản bỏ qua giai đoạn tính toán độ phát xạ và lúc đó chỉ dừng việc tính nhiệt độ bức xạ trên vệ tinh (nhiệt độ sáng) hoặc giả thiết độ phát xạ là một hằng số. Điều này dễ dẫn đến kết quả khác biệt nhiều so với thực tế, trong khi đó độ chính xác đo lường nhiệt độ bề mặt liên quan trực tiếp đến độ chính xác tính độ phát xạ của đối tượng. Tính độ phát xạ từ các kênh khả kiến và cận hồng ngoại trong phương pháp NDVI phối hợp của nghiên cứu này có các ưu điểm sau:

1) Các bộ cảm biến cung cấp độ phân giải không gian cao hơn cho các kênh khả kiến và cận hồng ngoại so với các kênh nhiệt, sẽ cho các bản đồ độ phát xạ với độ phân giải cao hơn. Ảnh Aster với kênh khả kiến có độ phân giải 15m so với kênh nhiệt có độ phân giải là 90m. Do đó, sẽ giải quyết được một phần về tính chất hỗn hợp đối tượng bên trong một pixel.

2) NDVI là một trường hợp đặc biệt của tỷ số ảnh. Phép tỷ số ảnh có thể làm giảm một cách hiệu quả các thay đổi do môi trường như độ sáng bởi địa hình, bóng, thay đổi mùa, góc chiếu sáng mặt trời, các điều kiện khí quyển thay đổi. Do đó, nếu không thể tiến hành hiệu chỉnh khí quyển cho ảnh vệ tinh thì ảnh hưởng sai số trong tính độ phát xạ cũng sẽ không đáng kể. Đồng thời, việc tính toán sử dụng NDVI, như đã được Song C. et.al. (2001) [14] chứng minh, không cần phải tiến hành nắn chỉnh khí quyển. Điều này có ý nghĩa quan trọng với các ảnh chụp trong quá khứ không có sẵn các thông số khí quyển được đo đạc.

3) Phương pháp NDVI có thể được ứng dụng cho các ảnh nhiệt chỉ có 1 kênh nhiệt duy nhất (trường hợp bộ cảm biến TM và ETM+ của Landsat), trong khi đó các phương pháp tính từ kênh nhiệt khác đòi hỏi ảnh phải có phải có từ 2 kênh nhiệt trở lên.

4) Việc phối hợp xác định trước giá trị phát xạ của đất và thực vật tinh khiết từ hàm phụ thuộc vào NDVI của Van de Griend cho phép tính giá trị phát xạ hiệu quả trong một pixel sẽ phù hợp với từng khu vực nghiên cứu cụ thể, không phải phụ thuộc vào các thư viện phổ cho sẵn hoặc phải tham khảo từ các văn liệu nghiên cứu trước đây.

B. Về phương pháp ước tính nhiệt độ bề mặt trong kết quả nghiên cứu này phản ánh:

1. Kết quả của đề tài ước tính giá trị nhiệt độ bề mặt với độ lệch so với số đo thực tế trong vòng 2°C với quy trình tính toán đơn giản sẽ là giải pháp tối ưu trong điều kiện thực tế ở Việt Nam.

2. Nhiệt độ được xác định cho từng khu vực tương ứng với kích thước của pixel và cho bức tranh phân bố nhiệt độ toàn thể khu vực nghiên cứu.

3. Số đo nhiệt độ bề mặt thực tế của từng điểm quan trắc chắc chắn sẽ khác biệt so với số đo tính từ phương pháp viễn thám. Điều này lý giải bởi độ phân giải của ảnh vệ tinh, cụ thể các bộ cảm biến viễn thám cảm nhận vật thể trong một pixel. Nếu vật thể nào có kích thước bằng hoặc lớn hơn một pixel thì giá trị đo đạc từ viễn thám có thể so sánh với giá trị đo đạc thực địa khi không kể đến các yếu tố của điều kiện môi trường và khí quyển. Thường thì bên trong một pixel sẽ là hỗn hợp của một vài đối tượng, do đó kết quả sẽ cho là của hỗn hợp các đối tượng này. Tuy nhiên, trong thực tế ta khó có thể đo đạc cho từng đối tượng trên một khu vực nghiên cứu, vì sẽ cần sử dụng nhiều công lao động, chi phí thực địa lại rất cao và nhu cầu

thiết bị đo nhiều. Đồng thời, phương pháp đo đạc truyền thống từ các trạm quan trắc khí tượng cũng không thể thực hiện được bằng cách tăng dày mật độ trạm do chi phí thiết lập tốn kém. Vì vậy, viễn thám sẽ là phương pháp tối ưu cho giải pháp này.

## STUDY ON DETERMINATION OF URBAN SURFACE TEMPERATURE BY THERMAL REMOTE SENSING METHOD

Tran Thi Van<sup>(1)</sup>, Hoang Thai Lan<sup>(2)</sup>, Le Van Trung<sup>(3)</sup>

(1) Institute for Environment and Resources, VNU-HCM

(2) Ho Chi Minh City Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology

(3) University of Technology, VNU-HCM

**ABSTRACT:** Thermal infrared remote sensing potentially measures the earth's surface radiation for retrieving surface temperature values in the whole study area by pixel. The paper presents the results of study on methodology to determinate the urban surface temperature of Ho Chi Minh City considered surface emissivity factor from NDVI method. This method shows the surface temperature map with spatial resolution higher than the one derived directly from the thermal bands. The experiment was carried out on two kinds of the satellite images such as Landsat and Aster owing the thermal infrared bands with the medium spatial resolution, suitable for studies on heat processes in urban areas. The results were compared with the in-situ measurements in 10 observed sites and analyzed in errors by many other methods for proving the method preeminent in the study condition. The results will contribute a new approach to resolve the determination of meteorological parameters related to heat processes in climate change research at present.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Abrahams, M. and Hook, S., *Aster User's Guide, version 2* (2004)
- [2]. Artis, D.A. and Carnahan, W.H., Survey of emissivity variability in thermography of urban areas, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 12, pp. 313-329, (1982)
- [3]. Carlson, T.N. and Ripley, D.A., On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, vol. 62, pp. 241-252, (1997)
- [4]. Czajkowski, K.P., Goward, S.N., Mulhern, T, Goetz, S.J., Walz, A., Shirey, D., Stadler, S., Prince, S.D. and Dubayah, R.O., Estimating environmental variables using thermal remote sensing, in *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes*, CRC Press, (2004)
- [5]. Dash, P., Göttsche, 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*, Vol. 23, pp. 2563-2594, (2002)
- [6]. French, A.N., Schmugge, T.J., Ritchie, J.C., Hsu, A., Jacob, F. and Ogawa, K., Detecting land cover change at the Jornada Experimental Range, New Mexico with ASTER emissivities, *Remote Sensing of Environment*, doi: 10.1016/j.rse.2007.08.020 (in press), (2007)

- [7]. ITT Visual Information Solutions, *ENVI user's guide* (2004)
- [8]. Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Hook, S., Matsunaga, T., & Kahle, A. B., A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113–1126, (1998)
- [9]. Gillespie, A.R., Rokugawa, S., Hook, S.J., Matsunaga, T. and Kahle, A., *Temperature / Emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4*, ATBD-AST-05-08, Prepared under NASA contract NAS5-31372, (1999)
- [10]. Gupta, R.P., *Remote Sensing Geology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, (1991)
- [11]. Li, Z.L., Becker, F., Stall, M.P. and Want, Z., Evaluation of Six Methods for Extracting Relative Emissivity Spectra from Thermal Infrared Images, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 69, pp. 197-214, (1999)
- [12]. Sabins, Jr., *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. 2nd Ed, (1987)
- [13]. Short, N.M., *Remote Sensing Tutorial. Section 9: The Warm Earth – Thermal*, NASA website <http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Front/tofc.html>, site last updated: June 18, 2007, (1995)
- [14]. Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Pax-Lenney, M. and Macomber, S. A., Classification and change detection using landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?, *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, pp. 230-244, (2001)
- [15]. USGS, *Landsat 7 Science Data Users Handbook* (2000)
- [16]. Valor, E. and Caselles, V., Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas, *Remote Sensing of Environment*, vol. 57, pp. 167-184, (1996)
- [17]. Van De Griend, A. A. and Owe, M., On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.14(6), pp. 1119 – 1131, (1993)