

# ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐỊA THỐNG KÊ ĐỂ ƯỚC LƯỢNG TRỮ LƯỢNG LÂM PHẦN DỰA VÀO ẢNH SPOT 5

Nguyễn Thi Thanh Hương<sup>1</sup>

**TÓM TẮT:** Bài báo này mô tả tiềm năng ứng dụng phương pháp địa thống kê để ước lượng trữ lượng lâm phần dựa vào ảnh vệ tinh cho các trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh ở Tây Nguyên. Phương pháp regression-kriging đã được sử dụng trong quá trình ước lượng. Nghiên cứu đã thử nghiệm trên các loại dữ liệu ảnh khác nhau như kết hợp 4 kênh của ảnh SPOT 5, ảnh thành phần chính PCs và ảnh chỉ số thực vật NDVI. Sử dụng các dữ liệu độc lập với các tiêu chí sai số trung phương và sai số bình quân để so sánh kết quả đạt được. Kết quả đã chỉ ra sự có mặt của 4 kênh ảnh SPOT có kết quả tốt nhất so với các ảnh khác.

**TỪ KHÓA:** Ảnh vệ tinh, regression-kriging, sai số trung phương

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trữ lượng lâm phần là nhân tố quan trọng trong quản lý lâm nghiệp. Chính vì vậy đã có nhiều phương pháp được áp dụng để điều tra trữ lượng lâm phần. Đối với phương pháp truyền thống, trữ lượng được xác định thông qua điều tra hệ thống ô mẫu với các nhân tố được điều tra là đường kính ngang ngực ( $D_{1.3}$ ) và chiều cao cây ( $H$ ). Ngoài ra cần có giải tích thân cây để xác định thể tích cây cá thể. Từ kết quả này sẽ xây dựng được mô hình tương quan giữa thể tích cây với  $D_{1.3}$  và  $H$ . Sau đó biểu thể tích cây rừng sẽ được xây dựng. Người sử dụng có thể dùng biểu tra này để xác định thể tích thân cây, từ đó tính toán trữ lượng cho lâm phần. Vì vậy việc điều tra để ước lượng trữ lượng lâm phần thường tốn nhiều thời gian và tài chính nếu được thực hiện trên diện tích rộng lớn. Trong khi đó rừng tự nhiên thường phân bố ở những vùng xa xôi với điều kiện tự nhiên khó khăn. Tuy nhiên trong giai đoạn gần đây cùng với phát triển nhanh chóng của công nghệ thông tin, công nghệ viễn thám, những ứng dụng công nghệ này trong lâm nghiệp đã đóng góp vai trò quan trọng trong điều tra rừng. Do vậy việc ước lượng trữ lượng lâm phần trở nên dễ dàng hơn. Để ước lượng trữ lượng lâm phần, nhiều nghiên cứu đã xây dựng mô hình quan hệ giữa giá trị ảnh (DN-Digital Number) và trữ lượng đã được điều tra trên thực địa. Mô hình không gian và phi không gian thường được sử dụng để ước lượng nhân tố điều tra rừng kể cả trữ lượng cho lâm phần. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng phương pháp hồi quy tuyến tính và phi tuyến tính để tính toán (Trotter et al., 1997; Cohen et al., 2003; Awaya et al., 2004; Fransson et al., 2004; Rahman, 2004), gần đây phương pháp phi tham số K-nearest neighbor cũng chứng tỏ hữu hiệu trong ước lượng các nhân tố điều tra rừng (Tokola et al., 1996; Tomppo et al., 1999, 2001; Holmström and Fransson, 2003; Makela and Pekkarinen, 2004; Kurzer, 2008, Thesler et al., 2008). Phương pháp địa thống kê cũng đã được sử dụng và mang lại kết quả hứa hẹn (Tuominen et al., 2003; Wallerman, 2003; Meng et al., 2009).

Mặc dù có nhiều kết quả nghiên cứu mối quan hệ giữa nhân tố điều tra lâm phần với DN nhưng kết luận rất khác nhau phụ thuộc vào đặc điểm vùng nghiên cứu và dữ liệu được sử dụng. Hơn nữa các nghiên cứu này thường được tiến hành trên các lâm phần ôn đới, đó là những lâm phần có cấu trúc rừng và thành phần loài tương đối đơn giản, trong khi đó hiếm có các nghiên cứu được thực hiện ở vùng rừng nhiệt đới. Chính vì vậy thực hiện nghiên cứu trên lâm phần nhiệt đới hỗn loài là cần thiết.

---

<sup>1</sup> Tiến sĩ lâm nghiệp, trường Đại học Tây Nguyên

Nghiên cứu này được thực hiện tại các khu rừng lá rộng thường xanh ở huyện Tuy Đức, tỉnh Đắk Nông. Khu vực nghiên cứu nằm ở vĩ độ bắc từ 11<sup>0</sup>59' đến 12<sup>0</sup>16' và kinh độ đông từ 107<sup>0</sup>13' đến 107<sup>0</sup>28' với diện tích khoảng 500km<sup>2</sup> (20x25km). Rừng lá rộng thường xanh nhiệt đới chiếm ưu thế ở khu vực này, tuy nhiên đã qua tác động của con người ở các cấp độ khác nhau, hình thành các trạng thái trữ lượng gỗ khác biệt.

## 2. DỮ LIỆU, PHẦN MỀM VÀ PHƯƠNG PHÁP

### 2.1 Dữ liệu và phần mềm

Các nguồn dữ liệu khác nhau bao gồm ảnh vệ tinh, dữ liệu số về rừng, bản đồ nền và các ô mẫu được điều tra trên thực địa được sử dụng trong nghiên cứu này. Ảnh vệ tinh quang học SPOT 5 được tài trợ từ tổ chức OASIS. Độ phân giải quang phổ của ảnh là 256 cấp độ xám, độ phân giải không gian là 10m x 10m. Ảnh vệ tinh đã được hiệu chỉnh dựa vào các điểm khống chế trên thực địa được thu thập bằng GPS và mô hình số độ cao (DEM). Mô hình này được tạo từ các đường đồng mức ở dạng GIS shapefile. Để phù hợp và liên kết được với các loại dữ liệu hiện có tại địa phương, ảnh SPOT 5 đã được tham chiếu hệ tọa độ UTM ở cột 48 (UTM 48N). Phương pháp tái chia mẫu “nearest neighbor” được áp dụng trong quá trình hiệu chỉnh hình học với độ phân giải không gian là 10m x 10m để bảo toàn giá trị của các pixel. Đặc điểm chung của ảnh được mô tả trong bảng 1.

Bảng 1. Đặc điểm của ảnh SPOT 5

Số band	Độ phân giải phổ (μm)	Độ phân giải không gian (m)	Vùng phổ SPOT
Band 1	0.50 – 0.59	10 x 10	Xanh lá cây
Band 2	0.61 – 0.68	10 x 10	Đỏ
Band 3	0.79 – 0.89	10 x 10	Gần hồng ngoại
Band 4	1.58 – 1.75	20 x 20	Hồng ngoại sóng ngắn

97 ô mẫu đã được điều tra trên thực địa với diện tích mỗi ô là 900m<sup>2</sup> (30m x 30m). Vị trí trung tâm của ô được thu thập bằng GPS Garmin 72. 119 cây mẫu được đo đếm để xây dựng mô hình tương quan thể tích với đường kính và chiều cao. Các cây mẫu được chia làm 10 phần bằng nhau. Đường kính từng phần và chiều cao tương ứng của cây mẫu đã được đo bằng máy đo Laser Criterion RD 1000. Số liệu này được sử dụng để xây dựng công thức tính thể tích cây đứng cho toàn bộ số cây trong ô mẫu. Tương ứng với mỗi ô mẫu với kích cỡ 30m x 30m, giá trị trung bình của 9 pixel (3x3) digital number của các band SPOT 5 cũng được tính toán.

Một số phần mềm được sử dụng trong nghiên cứu với các phân tích khác nhau bao gồm: Erdas Imagine version 9.2 và ENVI version 4.2 được dùng để xử lý ảnh vệ tinh. Access và ArcGIS được sử dụng để phát triển cơ sở dữ liệu và phân tích không gian. Đặc biệt chương trình Gstat được thiết kế bởi Pebesma (2005) đóng vai trò quan trọng trong phân tích địa thống kê. Bởi vì R là phần mềm mã nguồn mở và có giao diện thân thiện với người sử dụng, vì vậy nó được lựa chọn để thực hiện quá trình phân tích địa thống kê sử dụng Gstat được chạy trong môi trường của R.

### 2.2 Phương pháp

Nghiên cứu đã thử nghiệm ước lượng trữ lượng rừng trên 4 kênh của SPOT 5, kênh thành phần chính (PCs) và kênh chỉ số thực vật (NDVI). Regression-kriging là một trong các phương pháp phân tích địa thống kê được áp dụng để thực hiện ước lượng trữ lượng lâm phần, cả kriging đơn biến và đa biến đã được áp dụng để phân tích. Hai loại dữ liệu đầu vào là cần thiết trong quá trình này: i) file ảnh (image file) và ii) file dữ liệu thực địa (field sample file). Dữ liệu ảnh

(SPOT 5, PCs, và NDVI) được chuyển đổi thành dạng file ASCII. Để thành lập bản đồ trữ lượng cho toàn bộ diện tích vùng nghiên cứu, các ảnh này đã được chia nhỏ (split) thành các khối (block). Quá trình ước lượng được thực hiện trên từng khối riêng rẽ, sau đó được kết hợp (merge) trở lại để có được bản đồ cho toàn diện tích. Để so sánh độ chính xác của các thử nghiệm, dữ liệu độc lập (dữ liệu không tham gia regression-kriging) được dùng để đánh giá. Sai số trung phương (RMSE) và sai số bình quân (MAE) là 2 tiêu chuẩn được sử dụng để so sánh.

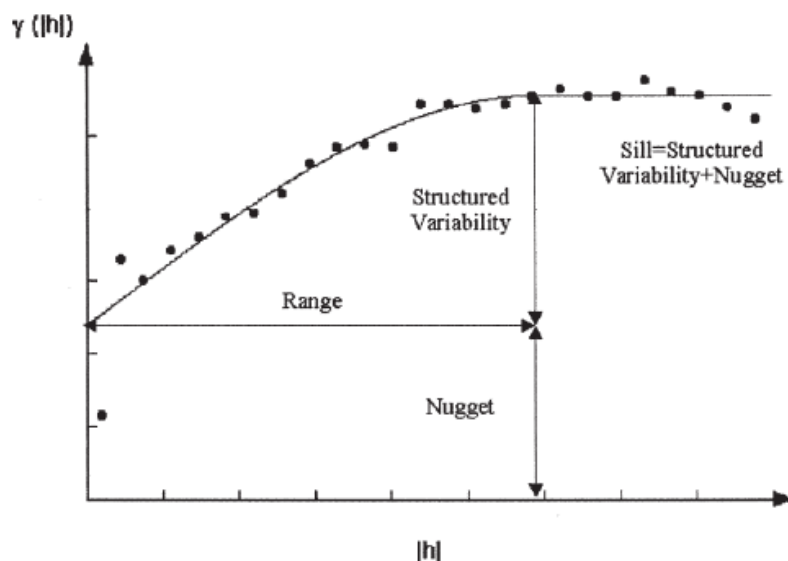
Để áp dụng regression-kriging, phân tích variogram/semivariogram và kriging (cả đơn biến và đa biến) cần được thực hiện để tìm ra mô hình lý thuyết thích hợp. Gstat package được sử dụng để tính variogram và kriging với nguyên lý như sau:

*Semivariogram:*

Semivariogram thực nghiệm cho một vector riêng biệt  $h$  thu được bằng cách tính toán một nửa sự khác biệt bình quân của giá trị dữ liệu cho mỗi cặp vị trí dữ liệu được phân biệt bởi  $h$ . Nói chung semivariogram được tính theo công thức sau:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (1)$$

Trong đó  $x_i$  là số liệu về vị trí,  $Z(x_i)$  là giá trị của một loại thuộc tính tại vị trí  $x_i$ ,  $N$  là số lượng các cặp dữ liệu ở một khoảng cách nào đó theo  $h$ . Công thức này được sử dụng để xác định tương quan không gian của biến số. Dạng chung của semivariogram được minh họa trong hình dưới đây:



Hình 1. Dạng chung của semivariogram

Chức năng của semivariogram thường được đặc trưng bởi 3 tham số:

- Khoảng cách đến điểm mà đường đồ thị bằng phẳng gọi là *range*.
- Giá trị đạt đến range được gọi là sill (Tức là tổng biên động được giải thích bởi cấu trúc không gian và *nugget effect*).
- Giá trị mà đồ thị chặn trên trục y gọi là *nugget effect*.

Semivariogram thực nghiệm được sử dụng để mô phỏng theo một mô hình lý thuyết phù hợp nào đó như spherical, exponential, bessel,... (McBratney and Webster, 1986). Mô hình này cho

phép tính toán các giá trị semivariogram đối với bất kỳ  $h$  cần thiết cho phân tích địa thống kê như kriging or cokriging.

### Kriging

Một kiểu chuẩn của kriging được gọi là ordinary kriging (OK). OK là đồng nhất với phương pháp hồi quy tuyến tính đa biến số. Mô hình OK được thể hiện như công thức (2).

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(s_i) \quad (2)$$

$Z(s_0)$  là giá trị nội suy ở vị trí  $s_0$ ,  $z(s_i)$  là giá trị mẫu ở vị trí đó,  $\lambda_i$  là trọng số được ấn định cho mỗi giá trị mẫu.

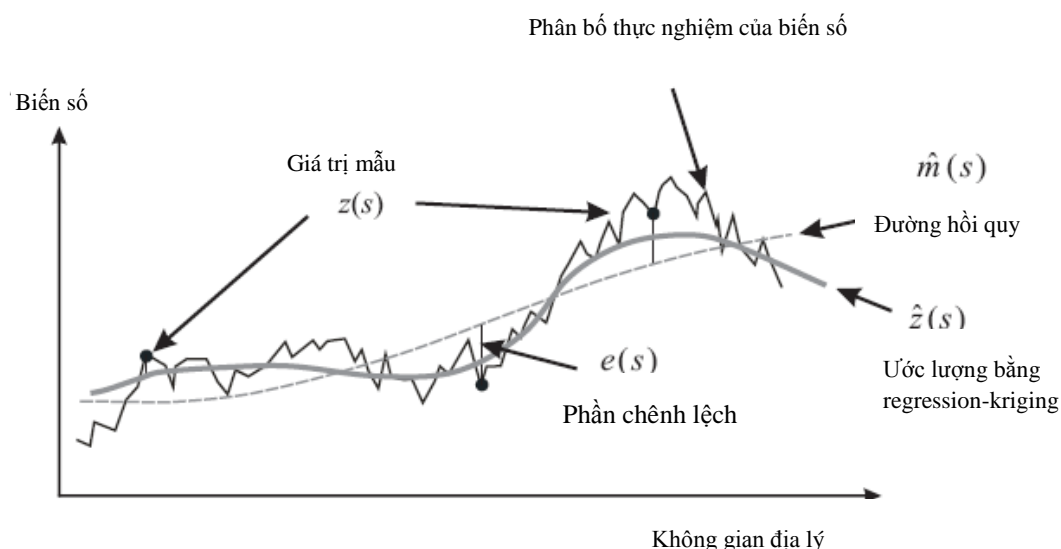
### Regression - kriging

Regression - kriging (RK) là phương pháp tích hợp giữa 2 phương pháp hồi quy tuyến tính đơn biến và đa biến với kriging (Goovaerts, 1997, McBratney et al., 2000, Odeh et al., 1995). Trong RK, sự không chắc chắn của mô hình được biểu diễn bởi residuals. Việc ước lượng được kết hợp giữa 2 phần: i) ước lượng thu được từ việc phân tích hồi quy biến số chính yếu với biến số phụ trợ; ii) phần chênh lệch residuals được ước lượng từ OK. Những ước lượng này được thực hiện riêng rẽ. Công thức của Regression-kriging được tính như sau:

$$\hat{z}_{rk}(s_0) = \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0) \quad (3)$$

$$\hat{z}_{rk}(s_0) = \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \cdot q_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e(s_i) \quad (4)$$

Trong đó  $\hat{m}(s_0)$  là phần quyết định sự phù hợp (regression),  $\hat{e}(s_0)$  là residual được nội suy,  $\hat{\beta}_k$  là hệ số mô hình,  $q_k$  là trọng số được xác định bởi chức năng semivariogram.  $\lambda_i$  là trọng số kriging được xác định bởi sự phụ thuộc không gian của residual và  $e(s_i)$  là residual ở vị trí  $s_i$ . Trong nghiên cứu này Gstat package chạy trong R được sử dụng để phân tích kriging đơn biến và đa biến để ước lượng trữ lượng rừng.

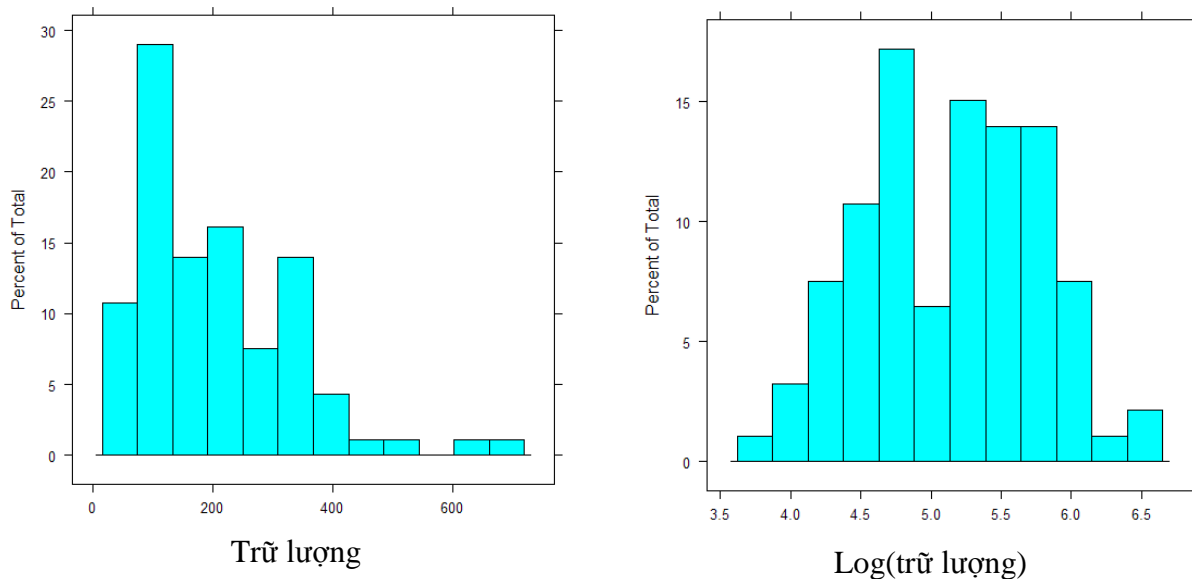


Hình 2. Đồ thị biểu diễn regression-kriging: mặt cắt dọc của phân phối giả định của một biến môi trường trong không gian theo chiều ngang (nguồn: Hengl, 2007)

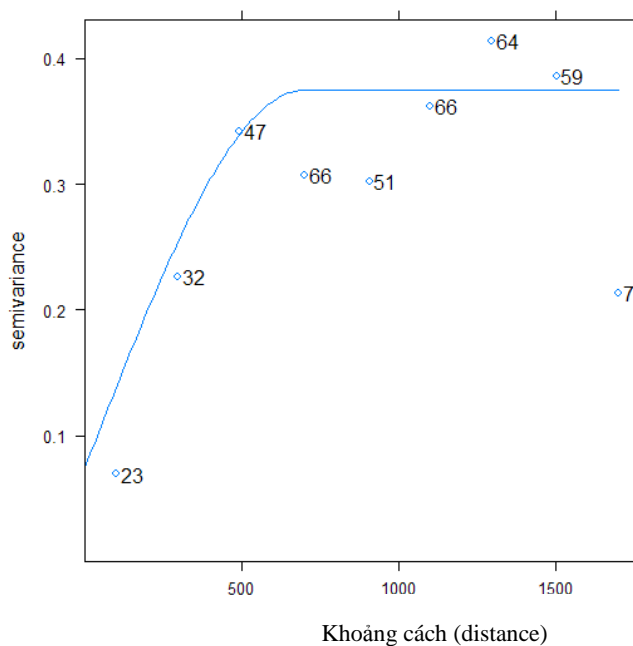
### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1 Phân tích địa thống kê với mô hình regression kriging

Variograms được sử dụng để phân tích không gian thuộc tính của trữ lượng. Do đồ thị lệch phải và phạm vi giá trị của trữ lượng là rộng, nghiên cứu đã chuyển đổi biến số trữ lượng thành logarit. Việc đổi biến số nhằm đưa chuỗi dữ liệu ở dạng rời rạc trở nên liên tục và có dạng phân bố chuẩn và đây cũng là yêu cầu trong phân tích mô hình hồi quy. Điều này cho phép giải đoán kết quả được dễ dàng hơn (Rossiter, 2007; Hengl, 2007). Semivariogram được tính dựa trên đám mây variogram thực nghiệm. Sau đó các mô hình semivariogram khác nhau như Spherical, Exponential, Gaussian, Circular, Bessen và Pentaspherical được thử nghiệm để tìm ra mô hình phù hợp nhất. Trong nghiên cứu này, mô hình Spherical cho thấy là mô hình phù hợp hơn so với các mô hình còn lại như đã đề cập. Vì vậy nó đã được xem như mô hình lý thuyết để áp dụng ước lượng không gian. Mô hình này có giá trị nugget là 0.30, sill là 0.75 và range là 700 như hình 4. Mô hình này sau đó được áp dụng để phân tích địa thống kê giữa logarit trữ lượng rừng và các DN. Theo (Ripple, 1985), việc áp dụng logarit hóa cho thấy đồ thị gần với phân bố chuẩn hơn có lẽ là vì quan hệ tiệm cận tự nhiên của nó. Điều đó cũng được tìm thấy trong các nghiên cứu trước đây khi họ tìm hiểu mối quan hệ giữa nhân tố điều tra rừng kể cả trữ lượng lâm phần với giá trị ảnh (Ardo, 1992; Peterson, 1987; Ramann, 2004; Ripple et al., 1991).



Hình 3. Histogram của trữ lượng và logarit trữ lượng



Hình 4. Vairogram thực nghiệm phù hợp với mô hình lý thuyết spherical của log (trữ lượng)

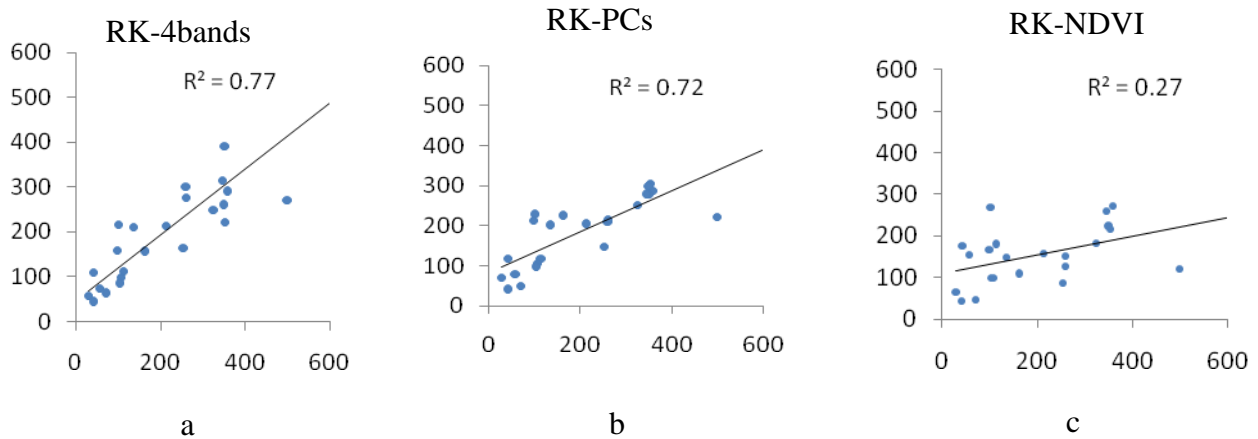
#### 4.2 Đánh giá độ chính xác của các mô hình

Sai số trung phương và sai số bình quân được sử dụng để đánh giá kết quả ước lượng sử dụng 3 loại dữ liệu như đã đề cập. Kết quả được tổng hợp trong bảng 2.

Bảng 2. Sai số ước lượng trữ lượng sử dụng 3 loại dữ liệu SPOT khác nhau

	RMSE ( $m^3 \text{ ha}^{-1}$ )	RMSE (%)	MAE ( $m^3 \text{ ha}^{-1}$ )	MAE (%)
Regression - Kriging 4 kênh	73.18	35.44	43.55	21.09
Regression – Kriging PC	91.86	47.33	57.97	29.87
Regression – Kriging NDVI	143.23	90.09	95.86	60.3

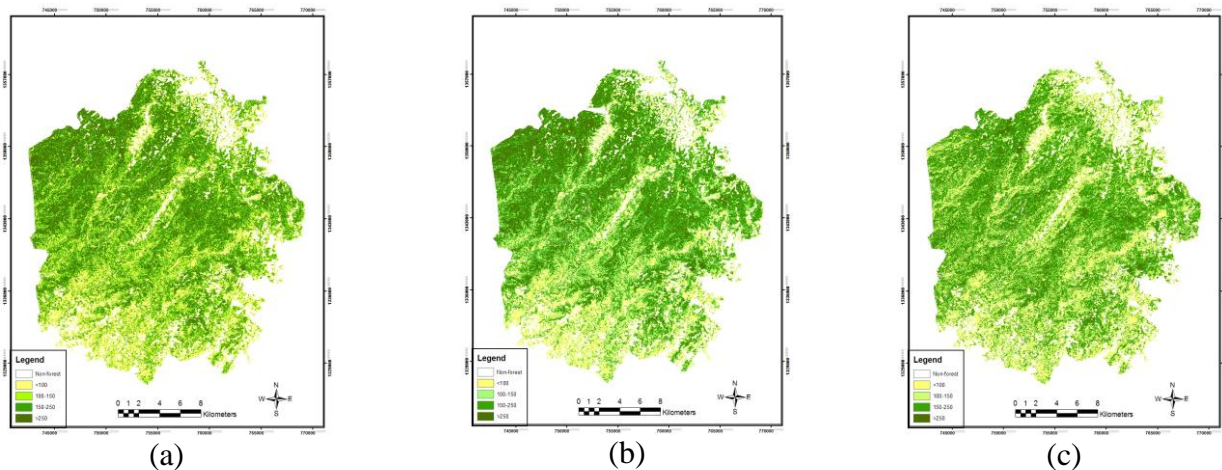
Kết quả cho thấy sử dụng phương pháp RK với sự có mặt của cả 4 kênh ảnh SPOT 5 cho kết quả chính xác nhất với sai số trung phương khoảng  $73m^3/ha$  với sai số trung bình gần  $44 m^3/ha$ . Trong khi đó sai số khi sử dụng ảnh chỉ số thực vật (NDVI) cho kết quả kém nhất với sai số gần gấp đôi sai số của dữ liệu gồm 4 kênh của ảnh SPOT 5. Điều này chứng tỏ đối với dữ liệu của ảnh vệ tinh SPOT 5, sự có mặt của nhiều kênh tham gia trong phân tích sẽ cung cấp nhiều thông tin hơn từng kênh riêng rẽ như NDVI hoặc kênh chuyển đổi PCs. NDVI thường được sử dụng rộng rãi cho nhiều nghiên cứu về thực vật nhưng nó cho thấy không hiệu quả trong trường hợp này. Đây có thể do động lực tự nhiên của điều kiện rừng làm giới hạn khả năng giải đoán từ nguồn thông tin riêng rẽ như NDVI. Theo Beusch et al. (2005), vì NDVI được lấy từ giá trị quang phổ của ảnh nên bất kỳ khả năng biến đổi cấu trúc rừng như độ tàn che, mật độ,... đều liên quan đến việc tính NDVI. Tuy vậy theo Lu et al. (2003), khi độ che phủ rừng càng tăng lên, tầng tán cũng trở lên không đồng nhất trong lâm phần, điều đó cũng sẽ làm giảm phản xạ phổ và kết quả là có sự bão hòa phản xạ trong thu nhận thông tin thực vật từ ảnh vệ tinh. Trong trường hợp này mối quan hệ cũng được xác định khi kiểm tra kết quả ước lượng trữ lượng và trữ lượng thực tế. Quan sát hình dưới đây (hình 5) có thể thấy biến động càng tăng khi trữ lượng càng tăng (a,b).



Hình 5. Trữ lượng rừng thực tế (trục x) và trữ lượng được ước lượng thông qua mô hình (trục y): (a) regression-kriging với 4 kênh SPOT 5, (b) regression-kriging với PCs, (c) regression-kriging NDVI

### 4.3 Xây dựng bản đồ trữ lượng

Bản đồ trữ lượng rừng đã được tạo bằng phương pháp regression-kriging dựa trên các 4 kênh ảnh SPOT, PCs, và NDVI với Gstat trong môi trường R. Để dễ quan sát hơn, các bản đồ này sau đó được biên tập trong phần mềm AcrGIS. Các bản đồ thể hiện trong hình 6 dưới đây:



Hình 6. Bản đồ trữ lượng rừng sử dụng phương pháp Regression-kriging với 4 kênh SPOT 5 (a), 3 kênh PCs (b), và NDVI (c)

## 6. KẾT LUẬN

Ước lượng trữ lượng rừng sử dụng ảnh vệ tinh đã được thực hiện rộng rãi kể cả trong nghiên cứu và trong thực tế bằng các phương pháp khác nhau. Tuy vậy việc này hầu hết tập trung ở rừng ôn đới, rừng lá kim hoặc rừng trồng. Tương đối hiếm các nghiên cứu được thực hiện ở rừng nhiệt đới, đặc biệt là rừng tự nhiên hỗn loài ở Việt Nam. Việc tìm kiếm mối quan hệ giữa giá trị phản xạ phổ của ảnh vệ tinh và nhân tố điều tra rừng như trữ lượng rừng trong nghiên cứu này có thể là tiềm năng áp dụng trong cấu trúc rừng phức tạp như đối tượng rừng thường xanh lá rộng ở Tây Nguyên, Việt Nam. Dù thể hiện là một trong những phương pháp tiềm năng để ước lượng trữ lượng rừng để giảm chi phí về thời gian cũng như nhân vật lực, độ chính xác thu được từ phương pháp regression-kriging trong trường hợp này vẫn còn khá thấp (sai số  $\pm 73\text{m}^3/\text{ha}$ ); vì vậy nó được kiến nghị áp dụng trong trường hợp điều tra rừng tổng thể để cung cấp dữ liệu có

tính chất định hướng. Do đó những phương pháp khác như cokriging, ordinary kriging cũng cần quan tâm để áp dụng trong nghiên cứu tiếp theo để có thể cải thiện độ chính xác. Ngoài ra đặc điểm semivariogram cũng có thể bị ảnh hưởng theo hướng, do đó khai thác mô hình semivariogram với sự ảnh hưởng theo hướng có thể là một chủ đề thú vị trong các nghiên cứu tiếp theo.

## ABSTRACT

Title: “*Applying geostatistic to estimate stand forest volume based on SPOT 5 data*”

This paper describes potential application of geostatistic method in predicting stand volume based on satellite images for disturbed natural forests in the Central Highlands of Vietnam. The study tested different image data such as original 4-band combination of SPOT 5, Principle Component (PCs), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The independent field data was then used to validate the results using Root Mean Squared Error (RMSEs) and Mean Average Error (MAEs) as the criteria of accuracy assessment. The result shows that presence of all band SPOT 5 represented as the best one compared to others.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ardo, J. 1992. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing*, 13(9): 1779-1786.
- Awaya, Y., Tsuyuki, S., Kodani, E. and Takao, G., 2004. Potential of woody carbon stock estimation using high spatial resolution imagery: A case study of spruce stands. Pp. 425-440. In: Shiyomi, M. et al. (Eds). *Global environmental change in the ocean and on land*. TERRAPUB.
- Beusch, M., Koetz, B., Kneubühler, M., and Itten, K., 2005. Forest canopy structure derived from spatial and spectral high resolution remote sensing data. [www.geo.uzh.ch](http://www.geo.uzh.ch) (accessed January 2008).
- Cohen, W.B., Maiersperger, T.K., Gower, S.T., Turner, D.P., 2003. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment* 84 (4), 561- 571.
- Fransson J. E.S., Magnusson, M., Holmgren, J., 2004. Estimation of Forest Stem Volume using optical SPOT-5 satellite and laser data in Combination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*: 2318-2322.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Hengl, T., 2007. *A practical guide geostatistics mapping of environment variable*. JRC European commission. 165p.
- Holmström, H. and Fransson, J.E.S., 2003. Combining remotely sensed optical and radar data in kNN estimation of forest variables. *Forest Science*, 49(3):409–418.
- Kutzer, C., 2008. Doctoral thesis. *Potential of the kNN Method for estimation and Monitoring off-Reserve Forest Resources in Ghana*. Faculty of Forest and Environmental Sciences, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Germany. 130p.
- Lu, D., Moran, E., and Batistella, M. 2003. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. *Remote Sensing of Environment*, 87: 456-469.
- Mäkelä, H., Pekkarinen, A., 2004. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data, *Forest ecology and management*, Volume 196, issues 2-3: 245 – 255.
- McBratney, A.B. and Webster, R. 1986. Choosing function for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, 37: 617–639.
- Meng, Q., Cieszewski, C., and Madden, M., 2009. Large area forest inventory using Landsat ETM+: A geostatistical approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64: 27-36.
- Nguyen, Thị Thanh Hương. 2009. *Classification of natural broad-leaved evergreen forests based on multi-data for forest inventory in the Central Highlands of Vietnam*. Doctoral thesis. Freiburg University, Germany.
- Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., and Chittleborough, D.J. 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: Heterotypic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*, 67: 215-226.
- Pebesma, E.J., 2005. The Gstat Package. <http://cran.r-project.org/doc/packages/gstat.pdf> (accessed November 2008).
- Peterson, D. L., Spanner, M.A., Running, S.W., and Teuber, K. B. 1987. Relationship of thematic mapper simulator data to leaf area of temperate coniferous forests. *Remote sensing of environment* 22: 323-341. Elsevier publishing Co., Inc.

- Rahman, M.M., 2004. Estimating carbon pool and carbon release due to tropical deforestation using high resolution Satellite Data. Doctoral thesis. Faculty of Forest, Geo and Hydro Sciences, Dresden University of Technology, Germany. 191p.
- Ripple, W. J., Wang, S., Isaacson, D. L., and Pairre, D. P. 1991. A preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-1 HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. *International Journal of Remote Sensing* 12(9): 1971-1991.
- Rossiter, D. G., 2007. Technical Note: Co-kriging with the gstat package of the R environment for statistical computing, 2nd edition. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, Netherlands.
- Thessler, S., Sesnie, S., Bendaña, Z.S.R., Ruokolainen, K., Tomppo, E., and Finegan, B., 2008. Using k-nn and discriminant analyses to classify rain forest types in a Landsat TM image over northern Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*, 112: 2485–2494.
- Tokola, T., Pitkanen, J., Partinen, S. and Muinonen, E., 1996. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. *International Journal of Remote Sensing*, 17(12): 2333:2351.
- Tomppo, E., Goulding, C., and Katila, M., 1999. Adapting Finnish multi-source forest inventory techniques to the New Zealand preharvest inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14: 182–192.
- Tomppo, E., Korhonen, K. T., Heikkinen, J., & Yli-Kojola, H., 2001. Multisource inventory of the forests of the Hebei Forestry Bureau, Heilongjiang, China. *Silva Fennica*, 35: 309–328.
- Trotter, C.M., Dymond, J.R. and Goulding, C.J., 1997. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*, 18(10): 2209-2223.
- Tuominen, S., Fish, S. and Poso S., 2003. Combining remote sensing, data from earlier inventories and geostatistical interpolation in multi source forest inventory. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 624-634.
- Wallerman, J., 2003. Remote sensing aided spatial prediction of forest stem volume . Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå. 42p.

**Người phản biện: PGS.TS. Bảo Huy**