

# KẾT HỢP ẢNH VỆ TINH ALOS-2/PALSAR-2 VÀ LANDSAT-8 TRONG XÁC ĐỊNH TRỮ LƯỢNG RỪNG TỰ NHIÊN LÁ RỘNG THƯỜNG XANH TẠI TỈNH ĐẮK NÔNG

Phạm Văn Duẩn<sup>1</sup>, Nguyễn Thanh Hoàn<sup>2</sup>, Nguyễn Trọng Bình<sup>1</sup>, Phạm Tiến Dũng<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Lâm nghiệp

<sup>2</sup> Viện Địa lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

<sup>3</sup> Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam

## TÓM TẮT

Bản đồ trữ lượng rừng là công cụ quan trọng trong quản lý tài nguyên rừng và thực hiện các chính sách về rừng. Sử dụng hai loại ảnh vệ tinh ALOS-2/PALSAR-2 và LANDSAT-8, mô hình số độ cao từ ảnh ASTER (GDEM), các bản đồ sẵn có và tài liệu phù trợ, kết hợp với số liệu điều tra rừng trên 214 ô tiêu chuẩn, nghiên cứu đã xây dựng các mô hình xác định trữ lượng rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh (LRTX) tại tỉnh Đắk Nông. Mô hình xác định trữ lượng rừng tối ưu được tạo ra với biến đầu vào là giá trị tán xạ ngược kênh HV trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 kết hợp với giá trị kênh thành phần chính thứ nhất trên ảnh LANDSAT-8 tại kích thước cửa sổ lọc ảnh  $13 \times 13$  pixel. Mô hình có sai số khi xác định trữ lượng rừng như sau: Sai số trung bình toàn phương (RMSE = 31,8 m<sup>3</sup>/ha), sai số tuyệt đối (MAE = 25,2 m<sup>3</sup>/ha), sai số tương đối (MAE% = 29,0%) và sai số trung bình toàn phương tương đối (RMSE% = 48,0%). Hiện tại, tư liệu vệ tinh ALOS-2/PALSAR-2 luôn có sẵn trên cả nước, tư liệu vệ tinh LANDSAT-8 được cung cấp thường xuyên và miễn phí. Ranh giới kiểu trạng thái rừng đã được xác định rõ cả trên thực địa và trên bản đồ theo kết quả kiểm kê rừng là cơ sở để áp dụng, nhân rộng mô hình xác định trữ lượng cho các khu rừng tự nhiên lá rộng thường xanh khác ở nước ta với điều kiện tương tự.

**Từ khóa:** Alos-2/  
Palsar-2, Landsat-8,  
Đắk Nông, kiểm kê  
rừng, lá rộng thường  
xanh, trữ lượng rừng

## A combination of Alos-2/Palsar-2 and Landsat-8 satellite images for wood volume estimation of natural evergreen broadleaf forest in Dak Nong province

Forest wood volume map is an important tool for managing forest resources and implementing forest policies. This study has developed models for wood volume estimation of natural evergreen broadleaf forest in Dak Nong Province based on a combination of ALOS-2/PALSAR-2 satellite images, Landsat-8 satellite images, ASTER DEM (GDEM), existing maps and 214 sample plots. The optimal prediction model has been selected. The input variables for the optimal model are mean values of HV backscatter of ALOS-2/PALSAR-2 image and the first Principal Component (PC1) from Landsat-8 image with the window size  $13 \times 13$  pixels. The errors in wood volume estimation using the optimal model are as following: RMSE = 31.8 m<sup>3</sup>/ha, absolute error (MAE) = 25.2 m<sup>3</sup>/ha, relative error (MAE%) = 29.0%, relative RMSE% = 48.0%. In current, ALOS-2/PALSAR-2 satellite image is always available for whole Vietnam. Landsat-8 images are observed frequently and provided in free of charge. The forest type boundaries have been defined both in the field and on the map according to the National forest inventory and statistics program that is as the basis for applying the model for wood volume estimation in other regions with similar conditions.

**Keywords:** Alos-  
2/Palsar-2, Landsat-8,  
NFIS, Dak Nong  
province, natural  
evergreen broadleaf  
forest, wood volume

## I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bản đồ trữ lượng rừng rất cần thiết cho việc quản lý tài nguyên rừng và thực hiện các chính sách về rừng. Đối tượng rừng Việt Nam có diện tích lớn, phạm vi rộng và thường phân bố ở những nơi có địa hình phức tạp nên việc ứng dụng ảnh vệ tinh để xây dựng bản đồ trữ lượng rừng có thể giúp tiết kiệm thời gian và công sức so với phương pháp điều tra truyền thống trên mặt đất.

Đắk Nông là tỉnh thuộc khu vực Tây Nguyên của Việt Nam có diện tích tự nhiên 651.561,5ha, địa hình phức tạp, độ dốc cao (UBND tỉnh Đắk Nông, 2017). Theo kết quả kiểm kê rừng năm 2014, diện tích có rừng của tỉnh chỉ còn 253.962,3ha, trong đó diện tích rừng tự nhiên lá rộng thường xanh là: 165.824,6ha, chiếm 65,3% diện tích rừng toàn tỉnh và phân bố ở tất cả các huyện/thị xã trong tỉnh nhưng tập trung nhiều nhất tại 3 huyện: Đắk G'Long, Tuy Đức và Cư Jut (UBND tỉnh Đắk Nông, 2015). Ngoài giá trị kinh tế, rừng Đắk Nông đặc biệt quan trọng với chức năng phòng hộ, bảo vệ nguồn nước, chống xói mòn cho toàn bộ hệ thống canh tác nông nghiệp, phòng hộ biên giới... Tuy nhiên, hiện trạng rừng Đắk Nông trong những năm qua bị suy giảm cả về số và chất lượng do nhu cầu đất trồng cây công nghiệp và phát triển kinh tế - xã hội. Thực trạng đó đặt ra vấn đề phải thắt chặt quản lý để giữ vững diện tích rừng hiện có kết hợp trồng thêm rừng trên diện tích đất quy hoạch cho mục đích lâm nghiệp. Để góp phần thực hiện tốt công tác này, bản đồ trữ lượng rừng cần phải liên tục được cập nhật theo định kỳ.

Nhiều tác giả đã sử dụng ảnh vệ tinh quang học như: SPOT, ASTER, QUICKBIRD, MODIS, AVHRR, LANDSAT... để ước lượng trữ lượng rừng (Lu 2006; Luther *et al.*, 2006; Fuchs *et al.*, 2009; Song 2013; Du *et al.*, 2014...). Các kỹ thuật xử lý ảnh như: tính toán chỉ số thực vật, phân tích thành phần chính

(PCA) thường được sử dụng để tạo ra các biến mới từ dữ liệu quang học. Ảnh Radar là một cách tiếp cận đầy hứa hẹn cho xác định trữ lượng rừng vì sóng radar có khả năng xuyên vào trong tán rừng đến một độ sâu nhất định tùy thuộc vào bước sóng và độc lập với thời tiết (Dobson *et al.*, 1995; Kasischke *et al.*, 1997; Huang and Chen, 2013). Vì khả năng xuyên sâu vào trong tán rừng, có thể đến mặt đất dưới tán nên ảnh radar có thể thu được thông tin về những thành phần như: thân cây, cành lớn có liên quan mật thiết đến trữ lượng rừng. Do đó, ảnh Radar thường được xem là tốt hơn để xác định trữ lượng rừng so với ảnh quang học. Tuy nhiên, kết hợp hai loại tư liệu nêu trên để xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng ít được quan tâm nghiên cứu.

Ảnh LANDSAT-8, độ phân giải không gian ở mức trung bình có nhiều ưu điểm và triển vọng áp dụng trong việc xác định trữ lượng rừng ở quy mô lớn. Ảnh LANDSAT-8 được xử lý và cung cấp miễn phí đến người sử dụng trong vòng 24 giờ sau khi chụp. Với những ưu điểm trên, ảnh LANDSAT-8 đang được ứng dụng trong nhiều ngành, nhiều lĩnh vực. Tuy nhiên, sử dụng ảnh LANDSAT-8 để xác định trữ lượng rừng tại Việt Nam vẫn chưa được quan tâm nghiên cứu thỏa đáng. Mỗi quan hệ hay cơ chế tán xạ của các thành phần của cây đối với bước sóng radar có thể được khái quát hóa như sau: (1) Sóng radar kênh X tương tác tác với lá, nhánh và cành nhỏ của cây; (2) Sóng radar kênh C tương tác với lá cành nhỏ và cành thứ cấp của cây; (3) Sóng radar kênh L tương tác với cành thứ cấp và thân cây và một phần với đất; (4) Sóng radar kênh P tương tác với cành chính, thân cây và nền đất (Israelsson *et al.*, 1994). Do đó, nghiên cứu này đã chọn ảnh ALOS-2/PALSAR-2 kênh L, về mặt lý thuyết có thể tương tác với cành và thân cây là chính kết hợp với ảnh LANDSAT-8 để thử nghiệm nghiên cứu xác định trữ lượng cho kiểu rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông.

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là nhằm xây dựng mô hình tối ưu xác định trữ lượng rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông với tư liệu sử dụng là ảnh vệ tinh ALOS-2/PALSAR-2 kết hợp với ảnh LANDSAT-8. Qua đó, đánh giá khả năng sử dụng kết hợp hai loại tư liệu này trong việc xác định trữ lượng của kiểu rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông.

## II. TƯ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Tư liệu nghiên cứu

Tư liệu chủ yếu được sử dụng trong nghiên cứu gồm:

- (1) Mô hình số độ cao từ ảnh ASTER (GDEM);
- (2) 6 cảnh ảnh ALOS-2/PALSAR-2 độ phân giải không gian 6,25m, thời gian chụp từ 21/9/2014 đến 25/01/2015 được nhà sản xuất xử lý đến mức 2.1;
- (3) 2 cảnh ảnh LANDSAT-8 độ phân giải không gian 15m đối với kênh toàn sắc, 30m đối với kênh đa phổ, chụp ngày 06/03/2015 được nhà sản xuất xử lý đến mức T1;
- (4) Hệ thống 214 ô tiêu chuẩn rừng tự nhiên lá rộng thường xanh được nhóm tác giả điều tra trong giai đoạn từ tháng 10/2014 - đến tháng 3/2015 tại tỉnh Đắk Nông, thuộc dự án “Rà soát, điều chỉnh quy hoạch ba loại rừng tỉnh Đắk Nông” mà bản thân tác giả là chủ nhiệm công trình;
- (5) Bản đồ kết quả kiểm kê rừng tỉnh Đắk Nông năm 2014, kế thừa từ dự án “Tổng điều tra, kiểm kê rừng toàn quốc”.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

#### 2.2.1. Phương pháp thu thập và xử lý số liệu ngoại nghiệp

Công tác thu thập số liệu ngoại nghiệp được thực hiện trên 214 ô tiêu chuẩn, diện tích OTC 1.000 m<sup>2</sup> (30 × 33,3m). Tại mỗi ô tiêu chuẩn:

- (1) Xác định vị trí tâm ô tiêu chuẩn bằng máy

GPS với độ chính xác từ 3 - 5m; (2) Đo chu vi thân cây ở vị trí 1,3m của tất cả các cây gỗ có đường kính lớn hơn 6 cm bằng thước dây độ chính xác đến cm; (3) Xác định chiều cao vút ngọn của tất cả các cây gỗ có đường kính lớn hơn 6cm bằng thước đo chuyên dụng, độ chính xác đến dm.

Sử dụng biểu thể tích 2 nhân tố lập chung toàn quốc (Viện Điều tra Quy hoạch rừng, 1995) để xác định thể tích của từng cây cá lẻ, từ đó xác định tổng thể tích của các cây trong ô tiêu chuẩn và trữ lượng rừng tại vị trí các ô tiêu chuẩn.

#### 2.2.2. Phương pháp xử lý và trích xuất thông tin từ ảnh vệ tinh

##### a. Phương pháp xử lý ảnh

- Chuyển các ảnh vệ tinh từ hệ tọa độ UTM sang hệ tọa độ VN2000: Mỗi cảnh ảnh LANDSAT-8, việc chuyển đổi được thực hiện trên 7 kênh đa phổ (từ kênh 1 đến kênh 7) và kênh toàn sắc (kênh 8); mỗi ảnh ALOS-2/PALSAR-2, việc chuyển đổi được thực hiện trên 2 kênh HH và HV.

- Ảnh LANDSAT-8: Hiệu chỉnh ảnh hưởng của bóng địa hình bằng phương pháp Cosine hệ số C; trộn các kênh đa phổ với kênh toàn sắc để tạo ra các kênh đa phổ có độ phân giải không gian 15m; xây dựng ảnh thành phần chính (PC) và ảnh chỉ số thực vật (NDVI) độ phân giải không gian 15m.

- Ảnh ALOS-2/PALSAR-2: Chuyển giá trị số của ảnh (Digital Number - DN) về giá trị cường độ tán xạ ngược; chuyển ảnh cường độ tán xạ ngược kênh HH, HV về độ phân giải không gian 15m bằng nội suy tuyến tính (Bi-linear) để phù hợp với độ phân giải ảnh Landsat-8.

##### b. Phương pháp trích xuất thông tin từ ảnh

Căn cứ vào: diện tích OTC, độ phân giải không gian của ảnh vệ tinh, độ chính xác của xác định vị trí tâm ô tiêu chuẩn bằng máy GPS, độ chính xác nắn chỉnh ảnh của nhà sản

xuất ảnh, cấu trúc rừng tự nhiên lá rộng thường xanh với nhiều tầng tán, nhận thấy: mỗi OTC sẽ gồm một số pixel ảnh. Do đó, trong nghiên cứu này, tác giả trích xuất thông tin trên ảnh tại vị trí OTC theo các kích thước cửa sổ lọc ảnh khác nhau. Kích thước cửa sổ lọc luôn là số lẻ để đảm bảo pixel được gán giá trị (chứa tâm OTC) luôn ở trung tâm của cửa sổ lọc.

Sau quá trình xử lý, các ảnh tạo ra sử dụng trong nghiên cứu đều có độ phân giải không gian 15m, gồm: ảnh chỉ số thực vật (NDVI), ảnh thành phần chính kênh thứ nhất (PC1), ảnh thành phần chính kênh thứ hai (PC2), ảnh cường độ tán xạ ngược kênh HH và ảnh cường độ tán xạ ngược kênh HV. Các ảnh này được trích xuất giá trị trung bình, sai tiêu chuẩn theo từng kích thước cửa sổ lọc ảnh.

- Giá trị trung bình các điểm ảnh trong cửa sổ ( $X_{TB}$ ) được tính toán theo công thức:

$$X_{TB} = \left( \sum_{i=1}^n K_i \right) / n \quad (2.1)$$

Trong đó:  $K_i$ : cấp độ xám của điểm ảnh thứ  $i$  tại một kênh trong cửa sổ;  $n$ : số điểm ảnh trong cửa sổ.

- Sai tiêu chuẩn các điểm ảnh trong cửa sổ ( $X_S$ ) được tính toán theo công thức:

$$X_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - X_{TB})^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

Trong đó:  $X_{TB}$ : cấp độ xám trung bình theo cửa sổ (tính theo công thức 2.1);  $K_i$ : cấp độ xám của điểm ảnh thứ  $i$  trong cửa sổ;  $n$ : số điểm ảnh trong cửa sổ.

### 2.2.3. Phương pháp trích lọc các thông tin phi ảnh

Trong nghiên cứu, ngoài các chỉ tiêu trên ảnh, sử dụng thêm một số chỉ tiêu phi ảnh để xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng, gồm: độ cao, độ dốc, hướng phơi. Trích xuất giá trị: độ cao, độ dốc, hướng phơi tại từng vị trí

OTC (từng pixel ảnh) từ mô hình số độ cao (GDEM).

### 2.2.4. Thăm dò mối quan hệ giữa các biến độc lập với biến phụ thuộc

Việc thăm dò mối quan hệ giữa giá trị các chỉ số trên ảnh và phi ảnh (còn gọi là biến độc lập - ký hiệu là  $x_i$ ) với trữ lượng rừng (còn gọi là biến phụ thuộc - ký hiệu là  $y$ ) được thực hiện bằng 4 dạng hàm cơ bản.

$$Y = a + b * X \quad (2.3)$$

$$Y = a + b * \ln(X) \quad (2.4)$$

$$\ln(Y) = a + b * X \quad (2.5)$$

$$\ln(Y) = a + b * \ln(X) \quad (2.6)$$

Trong đó:  $Y$  là trữ lượng rừng (biến phụ thuộc);  $X$  là giá trị chỉ số trên ảnh hoặc phi ảnh (biến độc lập).

Giá trị chỉ số trên ảnh (trung bình, sai tiêu chuẩn) dùng để thăm dò mối quan hệ được xác định tại 3 kích thước cửa sổ lọc:  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  và  $7 \times 7$ . Các mối quan hệ này được đánh giá thông qua kiểm định ý nghĩa của hệ số tương quan ( $r$ ) bằng tiêu chuẩn  $t$  với giả thiết:  $H_0$ : không tồn tại mối quan hệ giữa biến độc lập  $x$  và biến phụ thuộc  $y$ . Nếu  $t < -t_{\alpha/2}(n - 2)$  hoặc  $t > t_{\alpha/2}(n - 2)$  ( $\alpha$  là mức ý nghĩa,  $\alpha = 0,05$ ) thì bác bỏ giả thiết  $H_0$  và ngược lại.

### 2.2.5. Lựa chọn thuật toán xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng

Mô hình hồi quy là mô hình hay được sử dụng nhất để xác định trữ lượng rừng từ ảnh vệ tinh, và có thể là: mô hình hồi quy tuyến tính đa biến hoặc mô hình hồi quy đa phi tuyến tính. Kết quả thăm dò mối quan hệ giữa các biến độc lập với biến phụ thuộc, cho phép lựa chọn dạng quan hệ tốt nhất giữa từng biến độc lập với biến phụ thuộc là tuyến tính hay phi tuyến.

- Khi mối liên hệ giữa biến phụ thuộc ( $y$ ) với các biến độc lập ( $x_i$ ) tuân theo quan hệ tuyến tính, mô hình hồi quy tuyến tính đa biến có dạng:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (2.7)$$

- Tuy nhiên khi mối liên hệ giữa biến phụ thuộc (y) với các biến độc lập (xi) không tuân theo quan hệ tuyến tính, trong trường hợp này, mô hình hồi quy đa phi tuyến tính được nghiên cứu với các dạng phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + \dots + b_p \ln(x_p) \quad (2.8)$$

$$\ln(Y) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (2.9)$$

$$\ln(Y) = b_0 + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + \dots + b_p \ln(x_p) \quad (2.10)$$

Vì độ phức tạp, các mô hình kết hợp: (2.7), (2.8), (2.9) và (2.10) không thực hiện trong nghiên cứu này.

Do các biến đầu vào từ ảnh và phi ảnh đã được kiểm tra mối quan hệ với trữ lượng, chỉ biến có quan hệ thực sự với trữ lượng mới được tham gia để xây dựng mô hình đa biến. Nên các phương trình đa biến xây dựng được phải đảm bảo các yêu cầu: (1) Phương trình tồn tại trong tổng thể theo kiểm định F; (2) Các hệ số  $b_i$  của phương trình tồn tại trong tổng thể theo kiểm định t.

### 2.2.6. Phương pháp xây dựng, lựa chọn mô hình tốt nhất và xác định sai số của mô hình

#### a. Phương pháp xây dựng mô hình

Phân chia OTC để xây dựng và kiểm chứng mô hình: Danh sách 214 ô tiêu chuẩn với đầy đủ các thông tin về ảnh và phi ảnh trích xuất theo kích thước cửa sổ lọc ảnh được phân ngẫu nhiên thành 2 phần: (1) lựa chọn ngẫu nhiên theo không gian 33,3% số ô tiêu chuẩn (71 OTC) sử dụng để kiểm chứng mô hình; (2) 66,7% số ô (143 OTC) còn lại được sử dụng để xây dựng mô hình.

Xây dựng mô hình: Sử dụng tất cả các biến có mối quan hệ với trữ lượng theo kết quả thăm dò mối quan hệ để xây dựng mô hình và xác định sai số của mô hình cho từng kích thước

cửa sổ lọc ảnh theo 4 dạng hàm: (2.7), (2.8), (2.9) và (2.10) với thủ tục chọn biến được thực hiện theo phương pháp loại trừ dần (backward elimination) trên phần mềm SPSS. Trong trường hợp, theo chiều tăng của kích thước cửa sổ lọc (từ  $3 \times 3$  đến  $7 \times 7$ ), hệ số r của mô hình xác định trữ lượng vẫn tăng, tiến hành mở rộng kích thước cửa sổ lọc ảnh đến khi r đạt giá trị cao nhất, không thay đổi hoặc giảm.

Lựa chọn mô hình tốt nhất cho từng dạng hàm: (2.7), (2.8), (2.9) và (2.10) căn cứ vào hệ số r. Với mỗi dạng hàm, mô hình tốt nhất là mô hình có hệ số r cao nhất.

Sau khi lựa chọn được mô hình tốt nhất cho từng dạng hàm, căn cứ vào sai số của mô hình để chọn ra mô hình tốt nhất để xác định trữ lượng rừng tại khu vực. Các loại sai số của mô hình gồm: sai số tuyệt đối ( $MAE_{MH}$ ), sai số tương đối ( $MAE_{MH}(\%)$ ), sai số trung bình toàn phương ( $RMSE_{MH}$ ), sai số trung bình toàn phương tương đối ( $RMSE_{MH}(\%)$ ) được tính toán tương ứng theo các công thức: (2.11), (2.12), (2.13) và (2.14).

$$MAE_{MH} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \quad (2.11)$$

$$MAE_{MH}(\%) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \quad (2.12)$$

$$RMSE_{MH} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.13)$$

$$RMSE_{MH}(\%) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k 100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2} \quad (2.14)$$

Trong đó: k là số phần dữ liệu bằng nhau (hoặc gần bằng nhau) được phân chia (k-fold); n là số dữ liệu đánh giá của mỗi lần;  $y_i$  và  $\hat{y}_i$  là giá trị quan sát và dự đoán qua mô hình ( $y_i$  là trữ lượng tại các OTC,  $\hat{y}_i$  là trữ lượng dự đoán qua mô hình).

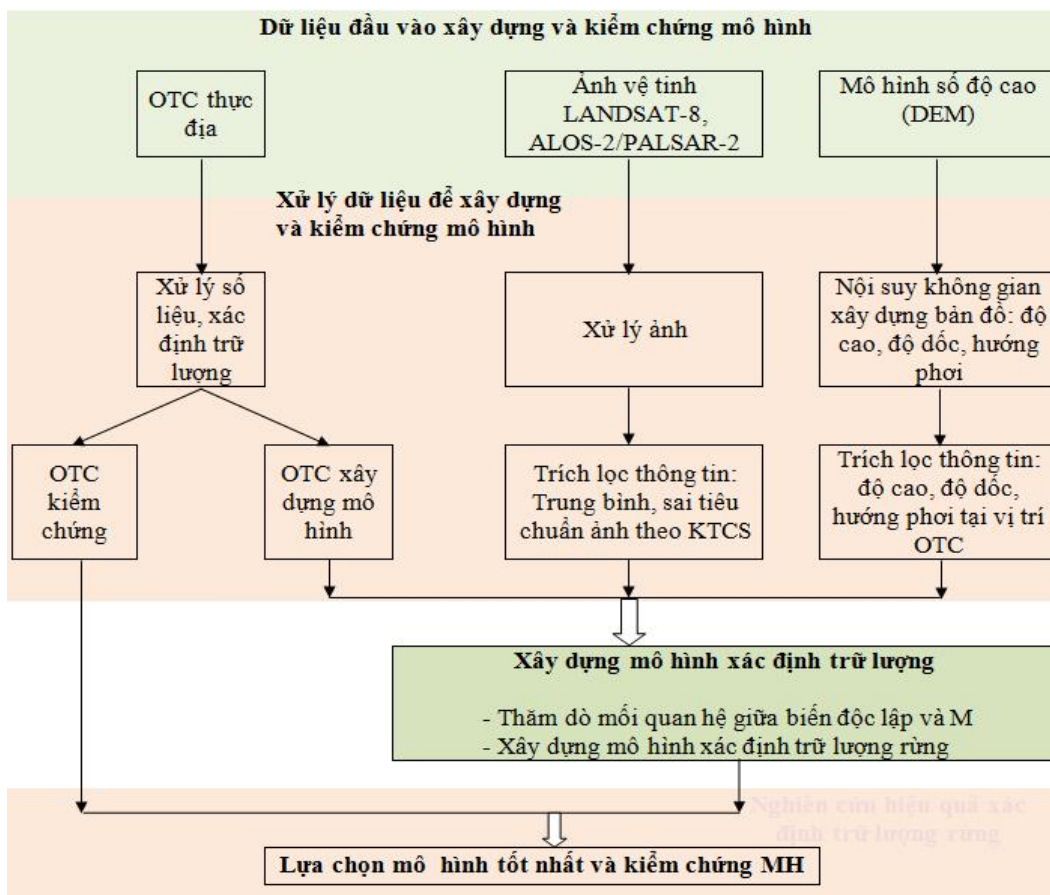
**2.2.7. Phương pháp kiểm chứng mô hình xác định trữ lượng rừng**

Sử dụng 33,3% số ô tiêu chuẩn (71 OTC) độc lập không tham gia xây dựng mô hình để kiểm chứng mô hình tối ưu. Sai số kiểm chứng mô hình gồm: Sai số kiểm chứng tuyệt đối ( $MAE_{KC}$ ) được tính tương tự theo công thức (2.11); Sai số kiểm chứng tương đối ( $MAE_{KC}(\%)$ ) được xác định tương tự theo công thức (2.12); Sai số trung bình toàn phương kiểm chứng ( $RMSE_{KC}$ ) được xác định tương tự theo công

thức (2.13); Sai số trung bình toàn phương tương đối kiểm chứng ( $RMSE_{KC}(\%)$ ) được xác định tương tự theo công thức (2.14).

Trong đó: n là số ô tiêu chuẩn sử dụng để kiểm chứng mô hình (n = 71); k = 1;  $y_i$  và  $\hat{y}_i$  là giá trị quan sát và dự đoán qua mô hình ( $y_i$  là trữ lượng tại các OTC sử dụng để kiểm chứng mô hình,  $\hat{y}_i$  là trữ lượng các ô tiêu chuẩn tương ứng dự đoán qua mô hình).

Toàn bộ quá trình nghiên cứu được minh họa tại hình 1.



**Hình 1.** Sơ đồ quá trình nghiên cứu

**III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN**

**3.1. Xác định trữ lượng rừng trên các ô tiêu chuẩn**

Kết quả thu thập số liệu, tính toán trữ lượng rừng tại vị trí các ô tiêu chuẩn và phân chia ô

tiêu chuẩn để thăm dò mối quan hệ, xây dựng và kiểm chứng mô hình được thể hiện tại bảng 1.

**Bảng 1.** Thông tin chung về các OTC sử dụng trong nghiên cứu

Mục đích	Số OTC				$M_{\min}$ m <sup>3</sup> /ha	$M_{\max}$ m <sup>3</sup> /ha	$M_{TB}$ m <sup>3</sup> /ha
	Tổng	<100 m <sup>3</sup> /ha	100 - 200 m <sup>3</sup> /ha	> 200 m <sup>3</sup> /ha			
Tổng	214	86	98	30	11,8	301,6	123,3
Thăm dò mối quan hệ và xây dựng mô hình	143	57	66	20	11,8	290,8	123,8
Kiểm chứng mô hình	71	29	32	10	20,6	301,6	122,5

Đã điều tra trên kiểu rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại khu vực nghiên cứu 214 ô tiêu chuẩn. Trữ lượng rừng tại vị trí các ô tiêu chuẩn dao động từ 11,8 m<sup>3</sup>/ha đến 301,6 m<sup>3</sup>/ha. Trong đó, số OTC rừng nghèo (trữ lượng nhỏ hơn 100 m<sup>3</sup>/ha) là 86 ô, số OTC rừng trung bình (trữ lượng từ 100 m<sup>3</sup>/ha đến 200 m<sup>3</sup>/ha) là 98 ô, số OTC rừng giàu (trữ lượng lớn hơn 200 m<sup>3</sup>/ha) là 30 ô.

Từ 214 OTC đã phân chia ngẫu nhiên theo không gian thành 2 phần:

Phần thứ nhất gồm 143 OTC (2/3 số ô), sử dụng để thăm dò mối quan hệ, xây dựng và xác định sai số của mô hình. Trữ lượng rừng tại vị trí các ô tiêu chuẩn của phần này dao động từ 11,8 m<sup>3</sup>/ha đến 301,6 m<sup>3</sup>/ha. Trong đó, số OTC rừng nghèo là 57 ô, số OTC rừng trung bình là 66 ô, số OTC rừng giàu là 20 ô.

Phần thứ hai gồm 71 OTC (1/3 số ô), sử dụng để kiểm chứng các mô hình. Trữ lượng rừng tại vị trí các ô tiêu chuẩn của phần này dao động từ 20,6 m<sup>3</sup>/ha đến 290,8 m<sup>3</sup>/ha. Trong đó, số OTC rừng nghèo là 29 ô, số OTC rừng trung bình là 32 ô, số OTC rừng giàu là 10 ô.

Các OTC sử dụng để thăm dò mối quan hệ, xây dựng, đánh giá sai số mô hình xác định trữ lượng cũng như các OTC sử dụng để kiểm chứng mô hình đại diện cho kiểu rừng gỗ tự

nhiên lá rộng thường xanh tại khu vực nghiên cứu do chúng phân bố trên toàn bộ khoảng trữ lượng của kiểu rừng này.

### 3.2. Kết quả thăm dò mối quan hệ giữa trữ lượng với các biến từ ảnh và phi ảnh

Với 33 biến số đầu vào từ ảnh và phi ảnh gồm: 30 biến từ ảnh (15 biến giá trị trung bình; 15 biến giá trị sai tiêu chuẩn theo kích thước cửa sổ ảnh), 3 biến phi ảnh (độ cao, độ dốc, hướng phơi). Kết quả thăm dò mối quan hệ bằng 4 dạng hàm cơ bản thông qua hệ số  $r$  cho thấy:

- Đối với biến từ ảnh: các biến giá trị trung bình theo kích thước cửa sổ (15 biến) đều thực sự tồn tại mối quan hệ với trữ lượng rừng ở cả 4 dạng hàm: (2.3), (2.4), (2.5) và (2.6) với độ tin 99%; các biến giá trị sai tiêu chuẩn theo kích thước cửa sổ không có quan hệ với trữ lượng rừng theo 4 dạng hàm cơ bản hoặc có tồn tại nhưng ở mức yếu.

- Đối với biến phi ảnh: chỉ có giá trị độ dốc có mối quan hệ với trữ lượng rừng. Giữa giá trị độ cao, giá trị hướng phơi với trữ lượng rừng không tồn tại mối quan hệ với nhau.

Kết quả thăm dò mối quan hệ giữa các biến từ ảnh theo kích thước cửa sổ lọc và phi ảnh bằng 4 dạng hàm (2.3), (2.4), (2.5) và (2.6) được thể hiện tại bảng 2.

**Bảng 2.** Kết quả thăm dò mối quan hệ giữa các biến từ ảnh và phi ảnh với trữ lượng rừng

TT	Biến (X)	M = a + bX		M = a + bLn(X)		Ln(M) = a + bX		Ln(M) = a + bLn(X)	
		r	Sig	r	Sig	r	Sig	r	Sig
1	NDVI3 <sub>TB</sub>	0,428**	0,000	0,426**	0,000	0,508**	0,000	0,510**	0,000
2	NDVI5 <sub>TB</sub>	0,429**	0,000	0,426**	0,000	0,512**	0,000	0,512**	0,000
3	NDVI7 <sub>TB</sub>	0,447**	0,000	0,443**	0,000	0,535**	0,000	0,534**	0,000
4	PC2_3 <sub>TB</sub>	- 0,241**	0,004	- 0,232**	0,005	- 0,258**	0,002	- 0,247**	0,003
5	PC2_5 <sub>TB</sub>	- 0,255**	0,002	- 0,247**	0,003	- 0,281**	0,001	- 0,271**	0,001
6	PC2_7 <sub>TB</sub>	- 0,255**	0,002	- 0,248**	0,003	- 0,297**	0,000	- 0,288**	0,000
7	PC1_3 <sub>TB</sub>	0,411**	0,000	0,413**	0,000	0,503**	0,000	0,510**	0,000
8	PC1_5 <sub>TB</sub>	0,422**	0,000	0,423**	0,000	0,511**	0,000	0,516**	0,000
9	PC1_7 <sub>TB</sub>	0,450**	0,000	0,451**	0,000	0,542**	0,000	0,547**	0,000
10	HH3 <sub>TB</sub>	0,357**	0,000	0,351**	0,000	0,326**	0,000	0,321**	0,000
11	HH5 <sub>TB</sub>	0,389**	0,000	0,383**	0,000	0,346**	0,000	0,341**	0,000
12	HH7 <sub>TB</sub>	0,438**	0,000	0,432**	0,000	0,391**	0,000	0,385**	0,000
13	HV3 <sub>TB</sub>	0,475**	0,000	0,468**	0,000	0,451**	0,000	0,447**	0,000
14	HV5 <sub>TB</sub>	0,506**	0,000	0,496**	0,000	0,482**	0,000	0,475**	0,000
15	HV7 <sub>TB</sub>	0,555**	0,000	0,545**	0,000	0,518**	0,000	0,510**	0,000
16	DOC	0,193*	0,021	0,260**	0,002	0,157	0,061	0,217**	0,009

Ghi chú: Dấu (\*) thể hiện sự tồn tại của hệ số r với độ tin 95%; dấu (\*\*) thể hiện sự tồn tại của hệ số r với độ tin 99%; X là ký hiệu chung của biến số đầu vào; các biến NDVI3<sub>TB</sub>, PC1\_3<sub>TB</sub>, PC2\_3<sub>TB</sub>, HH3<sub>TB</sub>, HV3<sub>TB</sub>... là giá trị trung bình các loại ảnh theo kích thước cửa sổ lọc; DOC là giá trị độ dốc tại vị trí OTC.

Kết quả thăm dò mối quan hệ giữa các biến độc lập (biến từ ảnh và phi ảnh) theo kích thước cửa sổ với trữ lượng rừng (biến phụ thuộc), đã lựa chọn được 15 biến từ ảnh (9 biến từ ảnh LANDSAT-8; 6 biến từ ảnh ALOS-2/PALSAR-2) và 1 biến phi ảnh (độ dốc) có quan hệ với trữ lượng rừng.

Do mối quan hệ giữa các biến từ ảnh với trữ lượng rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông là thực sự tồn tại nên có thể sử dụng hai loại ảnh này để xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng tại khu vực.

**3.3. Kết quả xây dựng và tính toán sai số của các mô hình xác định trữ lượng**

Từ các biến số đầu vào có mối quan hệ với trữ lượng rừng theo kết quả thăm dò, ứng với từng kích thước cửa sổ ảnh (3 × 3, 5 × 5, 7 × 7), với thủ tục chọn biến theo phương pháp loại trừ dần, xây dựng được 59 mô hình xác định trữ lượng. Giá trị hệ số tương quan (r) của các mô hình tốt nhất ứng với từng kích thước cửa sổ lọc ảnh, theo từng dạng hàm: (2.7), (2.8), (2.9) và (2.10) được thể hiện tại bảng 3.

**Bảng 3.** Giá trị hệ số tương quan của các mô hình xác định trữ lượng rừng tốt nhất theo dạng hàm và kích thước cửa sổ lọc ảnh từ 3 × 3 đến 7 × 7

Kích thước cửa sổ lọc ảnh	Dạng hàm quan hệ			
	(2.7)	(2.8)	(2.9)	(2.10)
3 × 3	0,653	0,649	0,691	0,690
5 × 5	0,682	0,673	0,716	0,709
7 × 7	0,728	0,720	0,754	0,750



Kết quả tại bảng 3 cho thấy: theo chiều tăng của kích thước cửa sổ lọc ảnh, hệ số  $r$  của các mô hình xác định trữ lượng rừng của mỗi dạng hàm đều tăng và đạt giá trị lớn nhất khi kích thước cửa sổ lọc ảnh là  $7 \times 7$ . Do đó, tác giả tiến hành mở rộng kích thước cửa sổ lọc ảnh nhằm tìm ra kích thước tối ưu sử dụng để trích xuất giá trị từ ảnh xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng cho đối tượng nghiên cứu.

Với phương pháp tương tự, kích thước cửa sổ lọc ảnh được mở rộng từ:  $9 \times 9$  đến  $21 \times 21$ , tác giả xây dựng 155 mô hình xác định trữ lượng rừng với. Giá trị hệ số tương quan ( $r$ ) của các mô hình tốt nhất ứng với từng kích thước cửa sổ lọc ảnh, theo từng dạng hàm: (2.7), (2.8), (2.9) và (2.10) được thể hiện tại bảng 4.

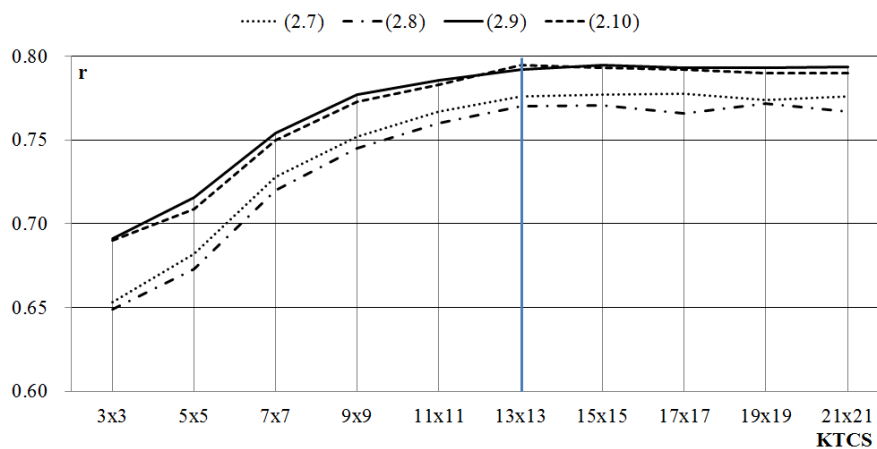
**Bảng 4.** Giá trị hệ số tương quan của các mô hình xác định trữ lượng rừng tốt nhất theo dạng hàm và kích thước cửa sổ lọc ảnh từ  $9 \times 9$  đến  $21 \times 21$

Kích thước cửa sổ lọc ảnh	Dạng hàm quan hệ			
	(2.7)	(2.8)	(2.9)	(2.10)
$9 \times 9$	0,752	0,745	0,777	0,773
$11 \times 11$	0,767	0,760	0,786	0,783
$13 \times 13$	0,776	0,770	0,792	0,795
$15 \times 15$	0,777	0,771	0,795	0,793
$17 \times 17$	0,778	0,766	0,793	0,792
$19 \times 19$	0,774	0,772	0,793	0,790
$21 \times 21$	0,776	0,767	0,794	0,790

Bảng 4 cho thấy: theo chiều tăng của kích thước cửa sổ lọc ảnh, hệ số  $r$  của các mô hình xác định trữ lượng rừng của mỗi dạng hàm đều tăng và đạt giá trị lớn nhất: (1) với dạng hàm (2.7) khi kích thước cửa sổ lọc ảnh là  $17 \times 17$ ; (2) với dạng hàm (2.8) khi kích thước cửa sổ lọc ảnh là  $19 \times 19$ ; (3) với dạng hàm (2.9) khi kích thước cửa sổ lọc ảnh là  $15 \times$

15; (4) với dạng hàm (2.10) khi kích thước cửa sổ lọc là  $13 \times 13$ .

Biểu đồ biến đổi giá trị hệ số tương quan ( $r$ ) của các mô hình xác định trữ lượng rừng tốt nhất theo dạng hàm và kích thước cửa sổ lọc ảnh được minh họa tại hình 2. Trong đó, trục tung thể hiện giá trị hệ số tương quan, trục hoành thể hiện kích thước cửa sổ lọc ảnh.



**Hình 2.** Biểu đồ biến đổi giá trị hệ số tương quan của các mô hình xác định trữ lượng rừng tốt nhất theo dạng hàm và kích thước cửa sổ lọc ảnh

Số liệu tại bảng 3, 4 và hình 2 cho thấy: hệ số tương quan ( $r$ ) của các mô hình xác định trữ lượng rừng tốt nhất theo từng dạng hàm tăng mạnh khi kích thước cửa sổ lọc ảnh thay đổi từ  $3 \times 3$  đến  $9 \times 9$ , tăng ít hơn khi kích thước cửa sổ lọc ảnh thay đổi từ  $9 \times 9$  đến  $13 \times 13$  và hầu như không tăng hoặc tăng rất ít khi kích thước cửa sổ lọc ảnh thay đổi từ  $13 \times 13$  đến  $21 \times 21$ .

Mặc dù ở các dạng hàm khác nhau, hệ số tương quan lớn nhất khi kích thước cửa sổ lọc

thay đổi từ  $13 \times 13$  đến  $19 \times 19$ . Tuy nhiên ứng với từng dạng hàm trong khoảng kích thước cửa sổ lọc này, sự biến đổi của hệ số  $r$  là rất nhỏ. Do đó, tác giả chọn kích thước cửa sổ lọc ảnh tối ưu để xác định trữ lượng rừng là  $13 \times 13$ .

Kết quả xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng tối ưu theo 4 dạng hàm (2.7), (2.8), (2.9) và (2.10) với kích thước cửa sổ lọc ảnh  $13 \times 13$  được thể hiện tại bảng 5.

**Bảng 5.** Kết quả xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng tối ưu theo 4 dạng hàm sử dụng với kích thước cửa sổ lọc ảnh  $13 \times 13$

Dạng hàm	Biến số	$b_i$	$Sig_{b_i}$	$b_0$	F	$r^2$	$r^2$ điều chỉnh	MAE <sub>MH</sub>	MAE <sub>MH</sub> %	RMSE <sub>MH</sub>	RMSE <sub>MH</sub> %
(2.7)	HV13 <sub>TB</sub>	0,02425	0,00000	- 1.360,48	70,3	0,603	0,594	29,2	32,5	38,9	55,7
	PC1_13 <sub>TB</sub>	0,08370	0,00000								
	DOC	1,74809	0,01280								
(2.8)	HV13 <sub>TB</sub>	874,91	0,00000	- 13.836,35	67,5	0,593	0,584	30,0	33,7	39,3	56,3
	PC1_13 <sub>TB</sub>	536,37	0,00000								
	DOC	11,81	0,00587								
(2.9)	HV13 <sub>TB</sub>	0,00020	0,00000	- 9,0454	117,4	0,626	0,621	28,0	27,0	38,0	38,9
	PC1_13 <sub>TB</sub>	0,00094	0,00000								
(2.10)	HV13 <sub>TB</sub>	7,22682	0,00000	- 124,124	79,3	0,631	0,623	27,7	26,9	37,6	39,7
	PC1_13 <sub>TB</sub>	5,96957	0,00000								
	DOC	0,07217	0,04765								

Kết quả tại bảng 5 cho thấy: Giá trị kiểm định F cho giá trị lớn hơn nhiều so với  $F_{05}$ , chứng tỏ các mô hình đều tồn tại trong tổng thể. Các giá trị  $Sig_{b_i}$  đều nhỏ hơn 0,05, chứng tỏ các hệ số  $b_i$  đều tồn tại. Do đó, về mặt thống kê, khẳng định các mô hình xác định trữ lượng rừng nêu trên thực sự tồn tại.

Sai số xác định trữ lượng rừng đến từng điểm ảnh của các mô hình tốt nhất theo dạng hàm biến động: sai số tuyệt đối từ 27,7 - 30,0 m<sup>3</sup>/ha; sai

số tương đối 26,9 - 33,7%; sai số trung bình toàn phương 37,6 - 39,3 m<sup>3</sup>/ha; sai số trung bình toàn phương tương đối 38,9 - 56,3%.

**3.4. Kết quả kiểm chứng mô hình xác định trữ lượng rừng tối ưu**

Sử dụng các ô tiêu chuẩn độc lập không tham gia xây dựng mô hình (71 OTC) để chạy thử và kiểm chứng mô hình tối ưu. Sai số kiểm chứng mô hình như sau:

**Bảng 6.** Sai số kiểm chứng các mô hình xác định trữ lượng rừng tối ưu

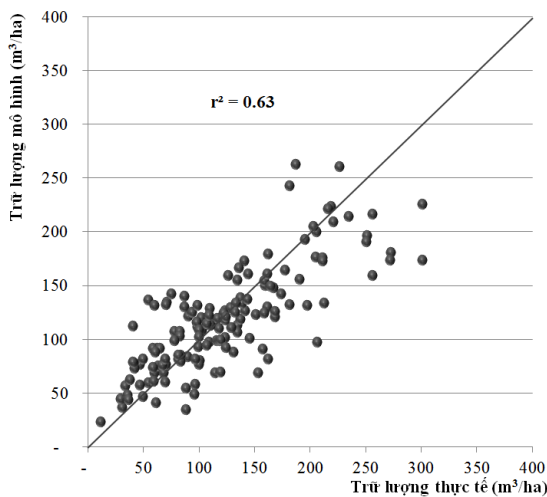
Dạng hàm	MAE <sub>KC</sub>	MAE <sub>KC</sub> %	RMSE <sub>KC</sub>	RMSE <sub>KC</sub> %
(2.7)	28,0	34,9	34,5	60,2
(2.8)	29,4	36,1	35,7	61,4
(2.9)	25,2	29,0	31,8	48,0
(2.10)	24,6	29,2	31,4	50,6

Kết quả cho thấy sai số xác định trữ lượng rừng đến từng điểm ảnh của các mô hình tốt nhất theo dạng hàm: sai số tuyệt đối kiểm chứng từ 24,6 - 29,4 m<sup>3</sup>/ha; sai số tương đối kiểm chứng 29,0 - 36,1%; sai số trung bình toàn phương kiểm chứng 31,4 - 35,7 m<sup>3</sup>/ha; sai số trung bình toàn phương tương đối 48,0 - 61,4%.

Căn cứ vào sai số mô hình, sai số kiểm chứng mô hình, số biến tham gia xây dựng mô hình, lựa chọn mô hình tốt nhất theo dạng hàm (2.9) (mô hình tô đậm trên bảng 5 và 6) là mô hình tối ưu sử dụng để xác định trữ lượng rừng gỗ tự

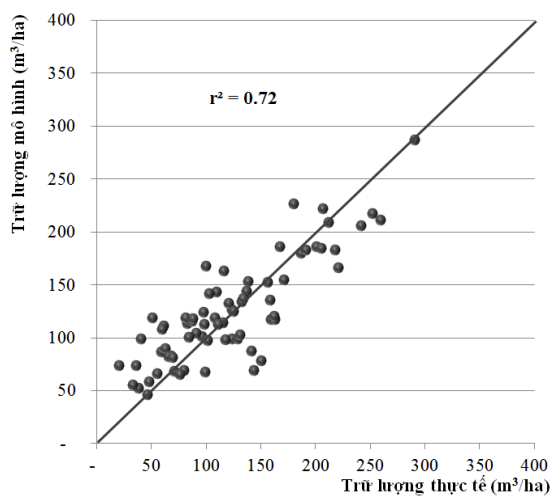
nhiên lá rộng thường xanh tại khu vực nghiên cứu. Chênh lệch giữa sai số tương đối của mô hình và kiểm chứng ( $\Delta_{MAE(\%)} = 2,0\%$ ); chênh lệch giữa sai số trung bình toàn phương của mô hình và kiểm chứng ( $\Delta_{RMSE(\%)} = 9,1\%$ ).

Biểu đồ mối quan hệ giữa: (1) trữ lượng tại các ô mẫu sử dụng để xây dựng mô hình và trữ lượng lý thuyết của mô hình; (2) trữ lượng tại các ô mẫu sử dụng để kiểm chứng mô hình và trữ lượng lý thuyết của mô hình tối ưu được thể hiện lần lượt tại hình 3 và 4.



**Hình 3.** Mối quan hệ giữa trữ lượng thực tế tại các ô mẫu sử dụng xây dựng mô hình và trữ lượng lý thuyết của mô hình tối ưu

Trên hình 3: là đám mây điểm thể hiện mối quan hệ giữa trữ lượng thực tế tại các ô mẫu sử dụng xây dựng mô hình và trữ lượng lý thuyết của các mô hình xác định trữ lượng. Đường chéo trên biểu đồ là đường thể hiện trữ lượng ô mẫu sử dụng xây dựng mô hình bằng trữ lượng lý thuyết tính toán từ mô hình. Các điểm càng phân bố gần đường chéo thì giữa trữ lượng thực tế và trữ lượng xác định theo lý thuyết có chênh lệch càng nhỏ, nghĩa là mô hình xác định trữ lượng rừng càng tốt. Trên hình 4: là đám mây điểm thể hiện mối quan hệ giữa trữ lượng thực tế tại các ô mẫu sử dụng kiểm chứng mô hình (không tham gia xây



**Hình 4.** Mối quan hệ giữa trữ lượng thực tế tại các ô mẫu sử dụng kiểm chứng mô hình và trữ lượng lý thuyết của mô hình tối ưu

dựng mô hình) và trữ lượng lý thuyết xác định từ mô hình.

### 3.5. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy: khi sử dụng kết hợp ảnh ALOS-2/PALSAR-2, LANDSAT-8 và số liệu điều tra mặt đất trên các OTC để xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông, sai số xác định trữ lượng đến từng điểm ảnh trung bình khi kiểm chứng thực tế của mô hình tốt nhất đạt được như sau:  $MAE_{KC} = 25,2$  m<sup>3</sup>/ha;  $MAE_{KC(\%)} = 29,0\%$ ;  $RMSE_{KC} = 31,8$  m<sup>3</sup>/ha;  $RMSE_{KC(\%)} = 48,0\%$ .

Hiện nay, có hai phương pháp chính để lập bản đồ trữ lượng rừng: (1) Dự đoán trữ lượng bằng các biến không gian liên tục; (2) Gán trữ lượng trung bình theo trạng thái rừng/kiểu rừng.

Phương pháp thứ nhất, dự đoán giá trị trữ lượng rừng sử dụng các biến không gian. Đầu tiên sẽ thiết lập mối quan hệ giữa trữ lượng rừng ở các ô đo đếm trên mặt đất với một hoặc nhiều biến không gian. Sau đó, sử dụng mối quan hệ thiết lập được để dự đoán trữ lượng cho toàn bộ khu vực. Biến không gian có thể từ: ảnh vệ tinh, điều kiện địa hình, điều kiện khí hậu... với phương pháp này, trữ lượng rừng có sự biến đổi liên tục, đây là phương pháp thực hiện của bài báo này.

Phương pháp thứ hai, gán trữ lượng trung bình theo trạng thái rừng/kiểu rừng còn được gọi là phương pháp “phân tầng và nhân”, đây là phương pháp thường áp dụng tại Việt Nam để lập bản đồ trữ lượng rừng. Để thực hiện theo phương pháp này, đầu tiên tiến hành phân loại rừng thành các trạng thái/kiểu rừng tương đối đồng nhất, trong một trạng thái sử dụng các phép đo trên mặt đất để xác định giá trị trữ lượng trung bình và gán trữ lượng này cho tất cả các lô rừng của trạng thái/kiểu trạng thái đó. Phương pháp này có ưu điểm là thực hiện đơn giản. Tuy nhiên, nó có một số hạn chế: (1) Chỉ có một giá trị trữ lượng cho một trạng thái rừng; (2) Không thể thực hiện nếu không có bản đồ ranh giới các trạng thái rừng/kiểu rừng.

Trong điều kiện cụ thể tại tỉnh Đắk Nông, đối với kiểu rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh, nếu không sử dụng ảnh vệ tinh, căn cứ vào bản đồ kết quả kiểm kê rừng, luôn có bản đồ ranh giới kiểu rừng nhưng không có bản đồ ranh giới các trạng thái rừng. Nguyên nhân là do kiểu rừng thường không thay đổi theo thời gian, nhưng trạng thái rừng phụ thuộc vào trữ

lượng rừng nên luôn thay đổi theo thời gian, không có thông số về trữ lượng sẽ không biết được trạng thái rừng. Do đó, nếu sử dụng phương pháp thứ hai để xác định trữ lượng sẽ phải gán trữ lượng trung bình các ô tiêu chuẩn ( $M_{TB} = 123,8 \text{ m}^3/\text{ha}$  - Bảng 1) cho tất cả các vị trí trong kiểu rừng. Trong trường hợp này, sai số xác định trữ lượng trung bình đến từng điểm ảnh khi kiểm chứng thực tế đạt đến:  $MAE_{KC} = 48,3 \text{ m}^3/\text{ha}$ ;  $MAE_{KC}(\%) = 58,7\%$ ;  $RMSE_{KC} = 59,9 \text{ m}^3/\text{ha}$ ;  $RMSE_{KC}(\%) = 97,7\%$ . Rõ ràng, việc sử dụng ảnh vệ tinh để xác định trữ lượng rừng theo phương pháp thứ nhất (phương pháp sử dụng trong bài báo) đã cải thiện đáng kể sai số so với phương pháp thứ hai thường áp dụng tại Việt Nam.

Mặc dù chưa có công trình nào trên thế giới và ở Việt Nam nghiên cứu kết hợp 2 loại ảnh: ALOS-2/PALSAR-2 và LANDSAT-8 để xác định trữ lượng rừng. Song so với các nghiên cứu trên các loại ảnh có độ phân giải và bước sóng tương tự, cùng áp dụng phương pháp hồi quy đa biến như: Basuki và đồng tác giả (2013), kết hợp ảnh ALOS PALSAR (ảnh thế hệ trước của ALOS-2/PALSAR-2 sử dụng trong nghiên cứu này) và LANDSAT - 7 ETM (thế hệ trước của ảnh LANDSAT-8) để xác định sinh khối rừng cây họ Dầu (Dipterocarp) tại Indonesia. Các mô hình xác định sinh khối tốt nhất kết hợp từ 2 loại ảnh có sai số tương đối từ 18% đến 25%. Với cùng tư liệu ảnh như Basuki đã sử dụng, Attarchi and Gloaguen (2014), xác định sinh khối rừng tại Iran. Mô hình tốt nhất là sự kết hợp biến số từ 2 loại ảnh, có giá trị  $r^2 = 0,76$ . Songqiu et al (2014), kết hợp ảnh quang học WORLDVIEW-2 với ảnh ALOS PALSAR để xác định sinh khối trên mặt đất rừng tại Vườn quốc gia Purple, Nam Kinh, Trung Quốc bằng phương pháp hồi quy tuyến tính đa biến. Mô

hình tốt nhất có sai số tương đối đạt 17,1% là mô hình kết hợp của 2 loại ảnh nêu trên. Hamdan đồng tác giả (2014), kết hợp ảnh SPOT-5 và ALOS PALSAR để xác định trữ lượng rừng cây họ Dầu tại Malaysia. Mô hình tốt nhất có hệ số  $r^2 = 0,80$ . Jonathan đồng tác giả (2013), kết hợp ảnh SPOT-5 và ALOS PALSAR để xác định trữ lượng rừng tại Singapo. Mô hình tốt nhất cho sai số tương đối đạt 36%. Kết quả cho thấy, sai số khi kiểm chứng mô hình xác định trữ lượng rừng trong nghiên cứu nằm trong phạm vi sai số của các nghiên cứu trên thế giới trên tư liệu ảnh tương tự.

#### IV. KẾT LUẬN

Hai loại tư liệu ảnh vệ tinh ALOS-2/PALSAR-2 và LANDSAT-8 có khả năng sử dụng để xác định trữ lượng cho kiểu rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông.

Kết quả nghiên cứu cho phép lựa chọn bộ tham số đầu vào tối ưu cho xác định trữ lượng rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông kết hợp ảnh ALOS-2/PALSAR-2 và ảnh LANDSAT-8. Cụ thể, bộ tham số đầu

vào tối ưu gồm giá trị tán xạ ngược kênh HV trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 kết hợp với giá trị kênh thành phần chính thứ nhất trên ảnh LANDSAT-8 tại kích thước cửa sổ lọc ảnh  $13 \times 13$ .

Sử dụng kết hợp ảnh ALOS-2/PALSAR-2, LANDSAT-8 với phương pháp hồi quy đa biến để xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng tới từng điểm ảnh tại khu vực nghiên cứu, sai số trung bình của mô hình và kiểm chứng mô hình tối ưu đạt được: (1) sai số tương đối của mô hình ( $MAE_{MH}(\%) = 27,0\%$ ), kiểm chứng ( $MAE_{KC}(\%) = 29,0\%$ ), chênh lệch 2,0%; (2) sai số trung bình toàn phương tương đối của mô hình ( $RMSE_{MH}(\%) = 38,9\%$ ), kiểm chứng mô hình ( $RMSE_{KC}(\%) = 48,0\%$ ), chênh lệch 9,1%.

Căn cứ vào kết quả nghiên cứu, tính riêng cho kiểu trạng thái rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh, để xây dựng mô hình xác định trữ lượng trong tương lai cần có các điều kiện sau: (1) Ảnh vệ tinh; (2) Số liệu trữ lượng rừng điều tra từ hệ thống ô tiêu chuẩn tại mặt đất.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Attarchi, S. Richard Gloaguen, 2014. Improving the Estimation of Above Ground Biomass Using Dual Polarimetric PALSAR and ETM+ Data in the Hyrcanian Mountain Forest (Iran). *Remote Sensing*, No 6, pp 3693 - 3715.
2. Basuki, T.M. Andrew K. Skidmore, Yousif A. Hussin & Iris Van Duren, 2013. Estimating tropical forest biomass more accurately by integrating ALOS PALSAR and Landsat - 7 ETM+ data. *International Journal of RemoteSensing*, No 13, pp 4871 - 4888.
3. Dobson, M. C. F. T. Ulaby, L. E. Pierce, T. L. Sharik, K. M. Bergen, J. Kellndorfer, J. R. Kendra, 1995. Estimation of Forest Biomass Characteristics in Northern Michigan with SIR - C/XSAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No 33, pp 877-894.
4. Du, L., T. Zhou, Z. Zou, X. Zhao, K. Huang, and H. Wu, 2014. Mapping Forest Biomass Using Remote Sensing and National Forest Inventory Data. *Forests5*: 1267-1283.
5. Fuchs, H., P. Magdon, C. Kleinn, and H. Flessa, 2009. Estimating Aboveground Carbon in a Catchment of the Siberian Forest Tundra: Combining Satellite Imagery and Field Inventory. *Remote Sensing of Environment*113: 518-531.
6. Hamdan, O. MR Khairunnisa, AA Ammar, I Mohd Hasmadi, H Khali Aziz1, 2013. Mangrove carbon stock assessment by optical satellite imagery. *Journal of Tropical Forest Science*, No 25, pp 554-565.

7. Hamdan, O. I Mohd Hasmadi, H Khali Azizl, 2014. Combination of SPOT-5 and Alos Palsar images in estimating aboveground biomass of lowland Dipterocarp forest. *Earth and Environmental*, No 18, pp 1 - 6.
8. Huang, Y. P. J. S. Chen, 2013. Advances in the Estimation of Forest Biomass Based on SAR Data. *Remote Sensing for Land and Resources*, No 25, pp 7-13.
9. Jonathan, Y.G. Jukka Miettinen, Aik Song Chia, Ping Ting Chew, Soo Chin Liew, 2013. Biomass Estimation in Humid Tropical Forest Using a Combination of ALOS PALSAR and Spot 5 Satellite Imagery. *Asian Journal of Geoinformatics*, No 4.
10. Kasischke, E.S. Melack, J.M. and Dobson, M.C, 1997. The use of imaging radars for ecological applications - a review. *Remote Sensing of Environment*, No 59, pp 141 - 156.
11. Lu, D., 2006. The potential and challenge of remote sensing - based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, No 27:7, pp 1297 - 1328.
12. Lu, D., Q. Chen, G. Wang, E. Moran, M. Batistella, M. Zhang, G. Vaglio Laurin, and D. Saah, 2012. Aboveground Forest Biomass Estimation with Landsat and LiDAR Data and Uncertainty Analysis of the Estimates. *International Journal of Forestry Research* 2012: 16.
13. Luther, J. E., R. A. Fournier, D. E. Piercey, L. Guindon, and R. J. Hall, 2006. Biomass Mapping Using Forest Type and Structure Derived from Landsat TM Imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8: 173-187.
14. Song, C, 2013. Optical Remote Sensing of Forest Leaf Area Index and Biomass. *Progress in Physical Geography*, Vol 37, No 1, pp 98-113.
15. Songqiu, D. Masato Katoh, Qingwei Guan, Na Yin, Mingyang Li, 2014. Estimating Forest Aboveground Biomass by Combining ALOS PALSAR and WorldView - 2 Data: A Case Study at Purple Mountain National Park, Nanjing, China. *Remote Sens*, No 6, pp 7878 - 7910.
16. UBND tỉnh Đắk Nông, 2017. Báo cáo kết quả rà soát, điều chỉnh quy hoạch ba loại rừng tỉnh Đắk Nông.
17. UBND tỉnh Đắk Nông, 2015. Quyết định số 67/QĐ-UBND ngày 14/01/2015 của UBND tỉnh Đắk Nông về việc phê duyệt, công bố kết quả kiểm kê rừng tỉnh Đắk Nông.
18. Viện Điều tra Quy hoạch rừng, 1995. Sổ tay điều tra quy hoạch rừng. Nhà xuất bản Nông nghiệp, Hà Nội.

**Email tác giả chính:** phamvanduan@gmail.com

**Ngày nhận bài:** 27/10/2017

**Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa:** 04/12/2017

**Ngày duyệt đăng:** 07/12/2017