

ĐÁNH GIÁ TRỮ LƯỢNG CÁC-BON RỪNG BẰNG DỮ LIỆU VIỄN THÁM ĐA NGUỒN: MỘT TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU TẠI KHU DỰ TRỮ SINH QUYỂN THẾ GIỚI NÚI CHÚA

Nguyễn Việt Lương^{1, *}

¹ Trung tâm Công nghệ Viễn thám và Địa không gian-Trung tâm Vũ trụ Việt Nam,
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

*Email: nvluong@vnsc.org.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này kết hợp dữ liệu khảo sát thực địa với ảnh vệ tinh Landsat 8 OLI, Sentinel-2 và ra-đa ALOS-2 PALSAR-2 nhằm đánh giá trữ lượng sinh khối, các-bon và khả năng hấp thụ CO₂ của thảm thực vật tại Khu Dự trữ Sinh quyển Thế giới Núi Chúa. Các tham số tán xạ ngược và đặc trưng cấu trúc từ dữ liệu ra-đa cùng với chỉ số NDVI từ ảnh quang học được sử dụng để xây dựng mô hình ước tính sinh khối rừng. Hiệu quả các mô hình ước tính sinh khối rừng sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh đơn nguồn và đa nguồn được đánh giá thông qua các chỉ tiêu sai số nhằm so sánh và lựa chọn mô hình tối ưu. Kết quả cho thấy, mô hình tích hợp dữ liệu ảnh vệ tinh ALOS-2 PALSAR-2 và Sentinel-2 đạt độ chính xác trên 83%, vượt trội so với mô hình đơn nguồn nhờ khả năng kết hợp thông tin phổ và cấu trúc đối tượng. Trên cơ sở đó, bản đồ phân bố trữ lượng sinh khối của khu vực nghiên cứu được thành lập, với tổng trữ lượng các-bon rừng được ước tính khoảng 1,36 triệu tấn, tương đương khoảng 4,97 triệu tấn CO₂ hấp thụ. Kết quả cho thấy, tích hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn giúp nâng cao độ chính xác ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon. Nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học phục vụ quản lý, bảo tồn tài nguyên rừng và hỗ trợ các mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính và hướng tới trung hòa các-bon.

Từ khóa: Sinh khối rừng, các-bon rừng, ảnh vệ tinh, sinh quyển, Net zero.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự gia tăng phát thải khí nhà kính, đặc biệt là CO₂ do các hoạt động công nghiệp đã trở thành nguyên nhân chủ yếu gây sự ấm lên toàn cầu. Nồng độ CO₂ trong khí quyển đã tăng khoảng 45% từ năm 1750 đến năm 2025, từ khoảng 280 ppm lên 429,35 ppm [1]. Mặc dù hơn 50% lượng CO₂ phát thải được hấp thụ bởi các chu trình các-bon tự nhiên, lượng khí này vẫn tiếp tục gia tăng và gây tác động tiêu cực đến môi trường [2, 3].

Hệ sinh thái rừng đóng vai trò quan trọng trong việc hấp thụ và lưu trữ các-bon, góp phần điều hòa khí hậu và giảm nhẹ biến đổi khí hậu [4]. Mặc dù tốc độ mất rừng toàn cầu giảm mạnh từ 10,7 triệu ha/năm (năm 1990-2000) xuống 3,68 triệu ha/năm (năm 2000-2015) và đã tăng nhẹ trở lại lên 4,12 triệu ha/năm trong giai đoạn 2015-2025 [5]. Tuy nhiên, nhiều nơi trên thế giới chất lượng, diện tích rừng vẫn bị suy giảm.

Tại Việt Nam, tài nguyên rừng cũng đã có nhiều biến động. Diện tích rừng giảm mạnh từ khoảng 14,42 triệu ha năm 1943 xuống còn khoảng 8,97 triệu ha năm 1990, với độ che phủ chỉ còn khoảng 27-28% [6]. Nhờ các chương trình phục hồi rừng và chính sách phát triển lâm nghiệp, diện tích rừng đã tăng trở lại, diện tích rừng đủ tiêu chí tính độ che phủ khoảng 13,9 triệu ha vào năm 2025 với độ che phủ khoảng 42,03% [7]. Tuy nhiên, sự gia tăng này chủ yếu đến từ rừng trồng, trong khi diện tích và chất lượng rừng tự nhiên vẫn còn nhiều thách thức trong công tác quản lý và bảo tồn.

Trong bối cảnh đó, công nghệ viễn thám và hệ thống thông tin địa lý (GIS) đã trở thành công cụ hiệu quả trong giám sát tài nguyên rừng, ước tính sinh khối và đánh giá trữ lượng các-bon trên diện rộng. Việc tích hợp dữ liệu ảnh vệ tinh đa nguồn với các phương pháp phân tích không gian

cho phép theo dõi biến động rừng, hỗ trợ quản lý tài nguyên và phục vụ các cơ chế như chi trả dịch vụ môi trường rừng [8-10].

Vườn Quốc gia (VQG) Núi Chúa, tỉnh Ninh Thuận (nay là tỉnh Khánh Hòa) là khu vực đại diện cho hệ sinh thái rừng khô hạn đặc trưng của Việt Nam, với điều kiện khí hậu khắc nghiệt và hệ sinh thái độc đáo. Năm 2021, khu vực này đã được UNESCO công nhận là Khu Dự trữ Sinh quyển Thế giới (KDSQTG) Núi Chúa [11], đã khẳng định giá trị nổi bật về đa dạng sinh học và sinh thái của nơi đây. Tuy nhiên, tại KDSQTG Núi Chúa, các nghiên cứu ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon bằng viễn thám và GIS còn vắng bóng, đặc biệt chưa có tiếp cận tích hợp dữ liệu đa nguồn (quang học và ra-đa). Điều này làm giảm độ chính xác trong ước tính, nhất là ở các khu vực rừng có cấu trúc phức tạp. Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là tiếp cận tích hợp dữ liệu đa nguồn ảnh vệ tinh trong xây dựng các mô hình ước tính sinh khối rừng nhằm nâng cao độ chính xác, hỗ trợ chi trả dịch vụ môi trường rừng và cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho quản lý, bảo tồn và phát triển bền vững hệ sinh thái rừng.

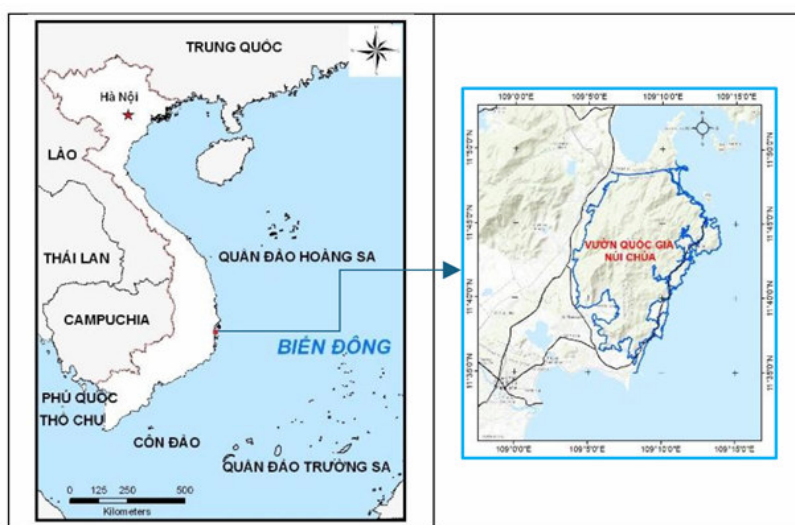
2. ĐẶC ĐIỂM KHU VỰC NGHIÊN CỨU

KDSQTG Núi Chúa với diện tích khoảng 106,646 ha. Phần diện tích nghiên cứu chủ yếu nằm trong ranh giới VQG Núi Chúa với diện tích khoảng hơn 25.000 ha, đây cũng là giới hạn về mặt không gian địa lý của nghiên cứu này [11].

Khu vực VQG Núi Chúa có địa hình chủ yếu là núi thấp và đồi ven biển, với độ cao địa hình dao động từ mực nước biển đến khoảng 1.040 m. Khu vực có khí hậu khô hạn đặc trưng, nhiệt độ trung bình năm khoảng 26-27°C và lượng mưa thấp, phân hóa rõ giữa mùa mưa (tháng 9-11) và mùa khô kéo dài. Lượng mưa trung bình năm tại VQG Núi Chúa chỉ khoảng 650 mm, thuộc khu vực có lượng mưa thấp nhất vùng Nam Trung Bộ; hệ thống khe, suối ngắn theo sườn dốc và phần lớn bị khô cạn trong mùa khô [12].

Hệ sinh thái rừng khô hạn tại đây được xem là hiếm gặp ở Đông Nam Á, đồng thời được xem là mẫu chuẩn tiêu biểu về hệ sinh thái rừng khô hạn đặc trưng của Việt Nam và khu vực. Khu vực nghiên cứu có mức độ đa dạng sinh học cao, với hơn 1.500 loài thực vật và khoảng 760 loài động vật đã được ghi nhận. Thực vật gồm nhiều kiểu rừng phân bố theo độ cao, bao gồm: Rừng thường xanh, rừng nửa rụng lá, rừng rụng lá và các trảng cây bụi thích nghi với điều kiện khô nóng. Trong đó, rừng thường xanh chủ yếu phân bố ở độ cao trên 800 m, trong khi rừng thứ sinh và trảng cây bụi phổ biến ở các đai thấp hơn [11-14].

Với điều kiện tự nhiên và đặc điểm sinh thái đặc trưng, thực vật tại khu vực nghiên cứu được dự báo có tiềm năng đáng kể trong lưu trữ các-bon và hấp thụ CO₂, cần được đánh giá và định lượng bằng các phương pháp nghiên cứu phù hợp.



Hình 1. Vị trí khu vực nghiên cứu VQG Núi Chúa

3. PHƯƠNG PHÁP VÀ DỮ LIỆU

3.1. Dữ liệu khảo sát thực địa

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu thực địa thu thập tại 64 ô tiêu chuẩn (OTC) vào tháng 5 năm 2018. Các OTC được phân bố tương đối đều theo từng trạng thái rừng, gồm: Rừng giàu (10 OTC), rừng trung bình (14 OTC), rừng nghèo (15 OTC), rừng nghèo kiệt (17 OTC) và cây bụi (8 OTC). Diện tích OTC gồm: 500 m², 100 m² đối với rừng nghèo, nghèo kiệt và cây bụi và 1.000 m² đối với rừng tự nhiên. Diện tích và vị trí phân bố các OTC được thiết kế và lựa chọn phù hợp với đặc điểm hiện trạng rừng, đồng thời bảo đảm số lượng mẫu và tính tương thích với dữ liệu ảnh viễn thám. Thiết kế và phương pháp điều tra OTC tham khảo theo Tổng cục Lâm nghiệp (2013) [15].

Tại mỗi OTC, các cây gỗ được xác định tên loài, đo đường kính thân tại vị trí 1,3 m ($D_{1.3m}$) và chiều cao vút ngọn (H_{vn}). Trong tổng số 64 OTC, 48 OTC (75%) được lựa chọn ngẫu nhiên để xây dựng mô hình và 16 OTC (25%) được sử dụng để kiểm định. Từ dữ liệu thực địa (OTC), các chỉ tiêu cấu trúc lâm phần được tính toán, gồm: Đường kính trung bình ($D_{1.3tb}$), chiều cao trung bình (H_{vntb}), tiết diện ngang (G), mật độ cây (N) và sinh khối trên mặt đất (SK).

Sinh khối trên mặt đất (SK) của từng cây được ước tính theo phương trình được phát triển bởi UN-REDD (2012) [16]. Phương trình (1) có dạng sau:

$$SK (\text{tấn}) = \exp(-2.24267 + 2.47464 \times \ln(D)) \quad (1)$$

Trong đó: SK là sinh khối rừng trên mặt đất; D là đường kính ngang ngực của cây đo tại cao độ 1,3 m ($D_{1.3m}$).

Lượng các-bon tích trữ bởi thực vật được chuyển đổi từ sinh khối theo phương trình (2) và (3) được đưa ra bởi IPCC (2006) [17]:

$$CBS = a * SK \quad (2)$$

$$CO_2 = 3,67CBS \quad (3)$$

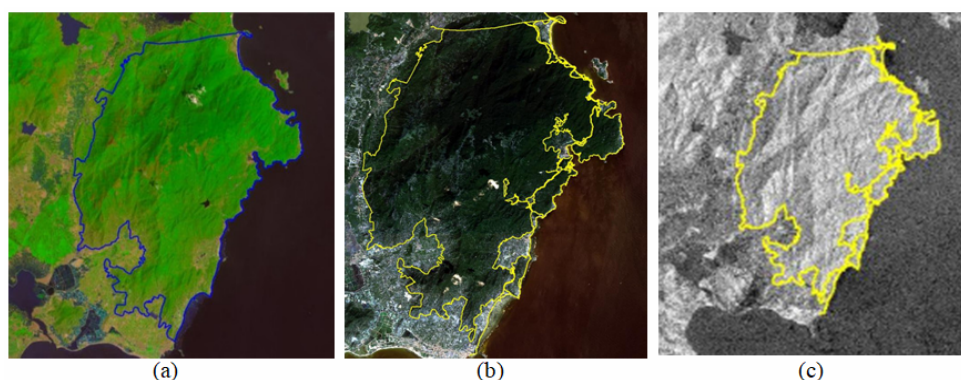
Trong đó: CBS là lượng các-bon tích trữ (tấn/ha); a là hệ số chuyển đổi được lấy chung là 0,5, theo IPCC (2006) [17].

3.2. Dữ liệu ảnh vệ tinh

Trong nghiên cứu này, dữ liệu vệ tinh ALOS-2 PALSAR-2, Landsat 8 OLI và Sentinel-2B đã được khai thác để phục vụ phân tích và xây dựng mô hình. Các thông số kỹ thuật cơ bản và đặc điểm của từng loại dữ liệu ảnh vệ tinh đã sử dụng được tổng hợp trong bảng 1. Một số hình ảnh về ảnh vệ tinh sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện tại hình 2.

Bảng 1. Danh sách ảnh vệ tinh ALOS-2 PALSAR-2, Sentinel-2B và Landsat 8 OLI

TT	Vệ tinh	Thời gian chụp	Số hiệu cảnh ảnh (ID)	Phân cực, kênh phổ	Độ phân giải không gian
1	ALOS-2 PALSAR-2	14-3-2018	ALOS2151563380-18031	HH, HV	10 m
		16-01-2018	ALOS2197180220-180116		
2	Sentinel-2B	08-5-2018	S2B_tile_20180508_49PBP_0	B4, B8	10 m
		08-5-2018	S2B_tile_20180508_49PBN_0		
3	Landsat 8 OLI	02-4-2018	LC081230522018042101T1	B4, B5, B8	30 m, 15 m



Hình 2. Dữ liệu ảnh vệ tinh: (a) Landsat 8 OLI; (b) Sentinel-2B; (c) ALOS-2 PALSAR-2

3.3. Phương pháp xử lý dữ liệu ảnh vệ tinh

Dữ liệu ảnh ALOS-2 PALSAR-2, Sentinel-2B và Landsat 8 OLI được tiền xử lý trước khi trích xuất các biến đầu vào phục vụ xây dựng mô hình. Quy trình tiền xử lý bao gồm: Hiệu chỉnh bức xạ, hiệu chỉnh hình học, tăng cường chất lượng ảnh và cắt ảnh theo phạm vi nghiên cứu.

Giá trị DN của ALOS-2 PALSAR-2 được chuyển đổi sang hệ số tán xạ ngược (Backscattering coefficient) theo công thức (4) của JAXA (2014) [18]:

$$\sigma^0 \text{ (dB)} = 10 \times \log_{10} (\text{DN}^2) + \text{CF} \quad (4)$$

Trong đó: σ^0 là giá trị tán xạ ngược; DN là giá trị điểm ảnh và CF là hệ số chuyển đổi được tính theo JAXA (2014) ($= -83,0$) [18]. Đồng thời, 8 tham số kết cấu (Contrast, Correlation, Dissimilarity, Entropy, Homogeneity, Mean, Second Moment, Variance) cũng được trích xuất từ dữ liệu vệ tinh ALOS-2 PALSAR-2 theo phương pháp của Haralick và cs (1973) [19].

Chỉ số NDVI được tính từ ảnh vệ tinh quang học theo Rouse và cs (1974) [20] cho Landsat 8 OLI và Sentinel-2B theo công thức (5):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (5)$$

Trong đó: NIR và RED lần lượt là kênh cận hồng ngoại và kênh đỏ.

Sau tiền xử lý, các biến HH, HV, tham số kết cấu và NDVI được trích xuất tại vị trí các OTC để xây dựng và kiểm định mô hình. Quá trình xử lý được thực hiện bằng ENVI/SARscape, ArcGIS và các phần mềm này có bản quyền do Trung tâm Vũ trụ Việt Nam, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam trang bị.

3.4. Phân lớp sinh khối rừng

Trong nghiên cứu này, sinh khối rừng được phân thành 3 cấp dựa trên trữ lượng sinh khối

(tấn/ha), bao gồm: (i) cấp trữ lượng 1 (>200 tấn/ha); (ii) cấp trữ lượng 2 (101-200 tấn/ha) và (iii) cấp trữ lượng 3 (0-100 tấn/ha), theo Nguyễn Viết Lương và cs (2024) [8]; Nguyen Viet Luong và cs (2016) [10].

3.5. Xây dựng mô hình ước tính sinh khối

Sinh khối rừng (SK) được ước tính thông qua các mô hình hồi quy, trong đó các biến độc lập là các tham số trích xuất từ dữ liệu vệ tinh và biến phụ thuộc là sinh khối đo ngoài thực địa. Nghiên cứu áp dụng hồi quy tuyến tính đơn biến và hồi quy tuyến tính đa biến để xây dựng mô hình.

Hiệu quả mô hình được đánh giá thông qua hệ số xác định (R^2) và sai số tuyệt đối của mô hình được xác định theo phương pháp bình phương nhỏ nhất (RMSE), được xây dựng và xác định thông qua phần mềm R, và được tính theo các công thức (6), (7) sau:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Tổng bình phương sai số}}{\text{Tổng bình phương}} \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\text{Giá trị tiên lượng} - \text{Giá trị quan sát})^2} \quad (7)$$

Trong đó: Giá trị tiên lượng là giá trị ước tính từ mô hình; Giá trị quan sát được là giá trị quan sát thu được từ dữ liệu kiểm kê, và n là số lượng mẫu được sử dụng trong phân tích mô hình.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các biến đầu vào của mô hình được trích xuất từ dữ liệu vệ tinh tại vị trí các OTC khảo sát thực địa. Cụ thể, bao gồm chỉ số NDVI từ ảnh vệ tinh quang học Landsat 8 OLI (NDVI_{LS8}) và Sentinel-2 (NDVI_{S2}), cùng với hệ số tán xạ ngược và các tham số kết cấu thu được từ dữ liệu ảnh vệ tinh ALOS-2 PALSAR-2.

4.1. Kết quả xây dựng mô hình đơn biến từ dữ liệu ảnh vệ tinh

Bảng 2. Kết quả mô hình đơn biến tính toán sinh khối rừng khu vực nghiên cứu

Mô hình	Biến số sử dụng	Kết quả mô hình đơn biến	(R^2)	RMSE (tấn/ha)
Mô hình 1	HH với SK	$\text{SK} = 318.265 + 23.244 \cdot \text{HH}$	0,58	31,24
Mô hình 2	HH với SK	$\text{SK} = 88.627 + 387.293 \cdot \text{HH} + 112.269 \cdot \text{HH}^2$	0,62	28,26
Mô hình 3	HV với SK	$\text{SK} = 459.009 + 25.917 \cdot \text{HV}$	0,61	29,00
Mô hình 4	HV với SK	$\text{SK} = 88.627 + 398.799 \cdot \text{HV} + 174.001 \cdot \text{HV}^2$	0,73	20,08

Mô hình	Biến số sử dụng	Kết quả mô hình đơn biến	(R ²)	RMSE (tấn/ha)
Mô hình 5	NDVI_LS8 với SK	$SK = -157.74 + 357.16 \cdot NDVI_S8$	0,45	40,90
Mô hình 6	NDVI_LS8 với SK	$SK = 88.627 + 343.668 \cdot NDVI_LS8 + 220.812 \cdot (NDVI_LS8)^2$	0,64	26,77
Mô hình 7	NDVI_S2 với SK	$SK = -128.2 + 312.35 \cdot NDVI_S2$	0,45	40,90
Mô hình 8	NDVI_S2 với SK	$SK = 88.627 + 342.658 \cdot NDVI_S2 + 195.976 \cdot (NDVI_S2)^2$	0,60	29,75

Tổng cộng có 8 mô hình đơn biến đã được xây dựng cho tính toán sinh khối rừng trong đó có 2/8 mô hình có hệ số $R^2 < 0,50$, 1/8 mô hình có hệ số $R^2 > 0,50$, 4/8 mô hình có hệ số $R^2 > 0,60$ và 01 mô hình có hệ số tốt nhất với $R^2 > 0,70$ (Mô

hình 4). Kết quả xây dựng các mô hình đơn biến trong ước tính sinh khối rừng tại khu vực nghiên cứu được tổng hợp và trình bày tại bảng 2.

4.2. Kết quả xây dựng mô hình đa biến và kết hợp từ dữ liệu ảnh vệ tinh

Bảng 3. Kết quả xây dựng mô hình đa biến và kết hợp tính sinh khối rừng khu vực nghiên cứu

Mô hình	Biến số sử dụng	Kết quả mô hình đa biến	(R ²)	RMSE (tấn/ha)
Mô hình 9	(HH+HV)/2 với SK	$SK = 412.384 + 26.789 \cdot (HH+HV)/2$	0,65	26,03
Mô hình 10	(HH+HV)/2 với SK	$SK = 88.63 + 410.65 \cdot (HH+HV)/2 + 156.62 \cdot [(HH+HV)/2]^2$	0,74	19,34
Mô hình 11	(HH*HH/HV) + HV với SK	$SK = 378.841 + 13.643 \cdot (HV+HH*HH/HV)$	0,62	28,26
Mô hình 12	(HH*HH/HV) + HV với SK	$SK = 88.627 + 400.812 \cdot (HV+HH*HH/HV) + 147.954 \cdot (HV+HH*HH/HV)^2$	0,7	22,31
Mô hình 13	HH, HV và SK	$SK = 426.838 + 10.863 \cdot HH + 16.156 \cdot HV$	0,65	26,03
Mô hình 14	8 textures với SK	$SK = 7373.59 + 15.287 \cdot Contrast + 62.273 \cdot Correlation - 145.201 \cdot Dissimilarity - 1961.424 \cdot Entropy - 139.973 \cdot Homogeneity + 4.946 \cdot Mean - 25610.426 \cdot SecondMoment + 6.099 \cdot Variance$	0,46	40,16
Mô hình 15	8 textures, HH với SK	$SK = 4242.589 + 22.902 \cdot HH + 4.321 \cdot Contrast + 73.088 \cdot Correlation - 37.366 \cdot Dissimilarity - 945.91 \cdot Entropy - 83.769 \cdot Homogeneity - 7.283 \cdot Mean - 13276.363 \cdot SecondMoment - 2.537 \cdot Variance$	0,70	22,31
Mô hình 16	8 textures, HV với SK	$SK = 3162.330 + 31.905 \cdot HV - 1.866 \cdot Contrast + 7.578 \cdot Correlation + 14.66 \cdot Dissimilarity - 585.92 \cdot Entropy + 228.942 \cdot Homogeneity - 14.645 \cdot Mean - 7447.101 \cdot SecondMoment + 5.329 \cdot Variance$	0,82	13,39
Mô hình 17	8 texture, NDVI_LS8 với SK	$SK = 5824.223 + 323.356 \cdot NDVI_LS8 + 12.495 \cdot Contrast - 11.687 \cdot Correlation - 189.546 \cdot Dissimilarity - 1436.613 \cdot Entropy - 347.56 \cdot Homogeneity - 5.022 \cdot Mean - 19608.874 \cdot SeconMoment + 12.445 \cdot Variance$	0,71	21,57
Mô hình 18	8 texture, HH, NDVI_LS8 với SK	$SK = 4062.470 + 16.125 \cdot HH + 230.967 \cdot NDVI_LS8 + 5.572 \cdot Contrast + 17.059 \cdot Correlation - 100.953 \cdot Dissimilarity - 871.571 \cdot Entropy - 248.677 \cdot Homogeneity - 10.784 \cdot Mean - 12639.616 \cdot SeconMoment + 4.551 \cdot Variance$	0,80	14,87

Mô hình	Biến số sử dụng	Kết quả mô hình đa biến	(R ²)	RMSE (tấn/ha)
Mô hình 19	8 texture, HV, NDVI_LS8 với SK	SK = 3403 + 26.9*HV + 87.74*NDVI_LS8 + 0.06754*Contrast - 3.907*Correlation - 22.46*Dissimilarity - 659.4*Entropy + 114.7*Homogeneity - 14.28*Mean - 8669*SecondMoment + 7.172*Variance	0,83	12,64
Mô hình 20	HH, NDVI_LS8 với SK	SK = 136.012 + 16.985*HH + 174.584*NDVI_LS8	0,64	26,77
Mô hình 21	HV, NDVI_LS8 với SK	SK = 365.345 + 22.57*HV + 66.449*NDVI_LS8	0,62	28,26
Mô hình 22	8 texture, NDVI_S2 với SK	SK = 5816.282 + 278.77*NDVI_S2 + 11.373*Contrast + 21.289*Correlation - 155.218*Dissimilarity - 1451.794*Entropy - 239.798*Homogeneity - 5.178*Mean - 19709.353*SeconMoment + 9.311*Variance	0,71	21,57
Mô hình 23	8 textures, HH, NDVI_S2 với SK	SK = 3927.672 + 16.76*HH + 206.698*NDVI_S2 + 4.36*Contrast + 39.799*Correlation - 73.716*Dissimilarity - 840.411*Entropy - 172.86*Homogeneity - 11.509*Mean - 12209.072*SeconMoment + 2.161*Variance	0,81	14,13
Mô hình 24	8 textures, HV, NDVI_S2 với SK	SK = 3412 + 26.25*HV + 89.05*NDVI_S2 - 0.07495*Contrast + 4.185*Correlation - 16.89*Dissimilarity - 667*Entropy + 131.6*Homogeneity - 14.4*Mean - 8783*SeconMoment + 6.491*Variance	0,83	12,64
Mô hình 25	HH, NDVI_S2 với SK	SK = 148.011 + 17.039*HH + 156.945*NDVI_S2	0,65	26,03
Mô hình 26	HV, NDVI_S2 với SK	SK = 359.309 + 22.17*HV + 66.476*NDVI_S2	0,62	28,26

Tổng cộng có 18 mô hình đa biến và kết hợp đã được xây dựng trong đó hầu hết các hệ số tương quan R² đều >0,60. Trong đó, có 7 mô hình có R² nằm trong khoảng từ 0,60-<0,70, có 5 mô hình có R² nằm trong khoảng từ 0,70-<0,80. Ấn tượng là có 5 mô hình có hệ số tương quan R²≥0,80, gồm có Mô hình 16 (R²=0,82; RMSE=13,39 tấn/ha); Mô hình 18 (R²=0,80; RMSE=14,87 tấn/ha); Mô hình 19 (R²=0,83; RMSE=12,64 tấn/ha); Mô hình 23 (R²=0,81; RMSE=14,13 tấn/ha) và Mô hình 24 (R²=0,83; RMSE=12,64 tấn/ha). Kết quả xây dựng các mô hình đa biến và kết hợp trong ước tính sinh khối rừng tại khu vực nghiên cứu được tổng hợp và trình bày trong bảng 3.

4.3. Kết quả kiểm định mô hình ước tính sinh khối từ dữ liệu ảnh vệ tinh

Nghiên cứu đã chọn những mô hình có R²≥0,80 để tiến hành việc kiểm định, gồm mô hình 16, 18, 19, 23 và 24 (bảng 4), nhằm lựa chọn mô hình có kết quả R² cao nhất và RMSE thấp nhất. Kết quả kiểm định cho thấy các mô hình được lựa chọn đều đạt độ chính xác tương đối cao, với R² dao động từ 0,82 đến 0,83 và RMSE từ 12,13 tấn/ha đến 11,46 tấn/ha (hình 3). Trong đó, mô hình 24 cho kết quả tốt nhất với R²=0,83 và RMSE = 11,46 tấn/ha, cho thấy khả năng dự báo sinh khối đáng tin cậy hơn so với các mô hình còn lại (hình 3).

Bảng 4. Kết quả kiểm định từ mô hình ước tính sinh khối khu vực nghiên cứu

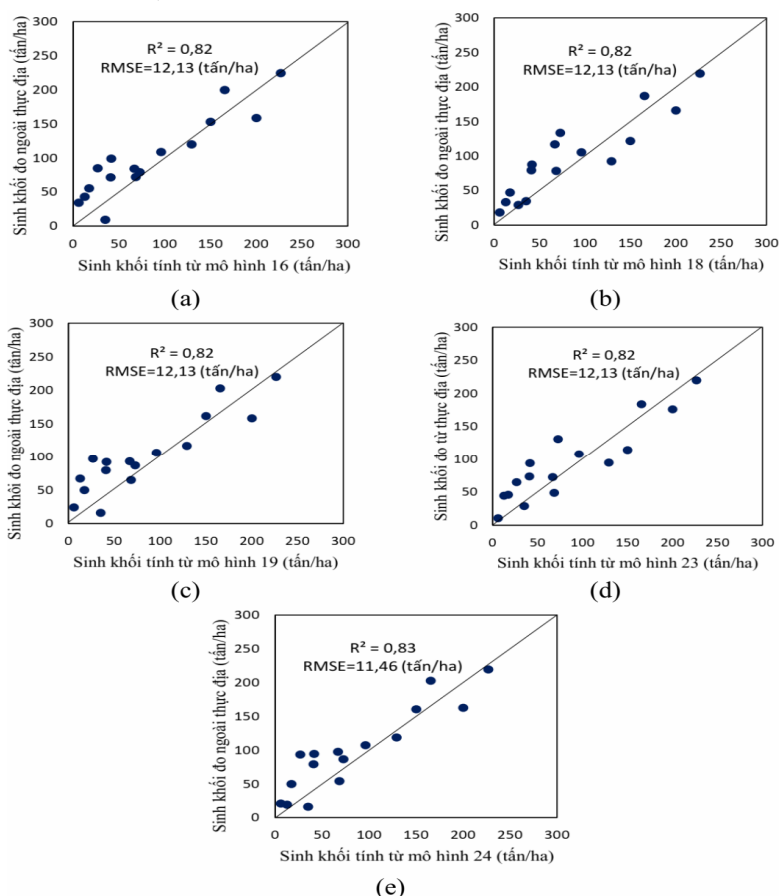
TT	Sinh khối trên mặt đất					
	Đo đếm ngoài thực địa	Tính từ mô hình 16	Tính từ mô hình 18	Tính từ mô hình 19	Tính từ mô hình 23	Tính từ mô hình 24
1	12,68	43,28	33,21	67,18	44,50	18,98
2	6,10	34,30	18,33	24,11	10,69	20,88

TT	Sinh khối trên mặt đất					
	Đo đếm ngoài thực địa	Tính từ mô hình 16	Tính từ mô hình 18	Tính từ mô hình 19	Tính từ mô hình 23	Tính từ mô hình 24
3	165,55	199,81	187,00	202,87	183,76	202,59
4	226,74	224,45	219,37	220,03	219,87	219,43
5	17,37	55,61	47,16	49,99	45,94	49,53
6	66,87	84,29	117,04	93,09	72,62	97,34
7	129,30	120,11	92,54	116,84	94,55	118,64
8	68,43	72,01	78,43	64,96	48,73	53,89
9	96,13	108,93	105,47	106,23	107,94	107,22
10	35,15	9,36	34,70	16,15	28,91	15,90
11	40,89	71,59	79,45	79,62	73,57	78,97
12	26,68	85,09	29,20	96,90	64,88	93,25
13	72,75	79,18	133,52	86,82	131,11	86,52
14	150,06	153,03	121,78	161,46	114,49	160,39
15	41,53	99,07	87,74	92,05	93,80	94,16
16	200,19	158,77	165,93	158,18	176,26	162,58

Kết quả kiểm định (hình 3) cho thấy rằng Mô hình 16 ($R^2=0,82$; RMSE=12,13 tấn/ha); Mô hình 18 ($R^2=0,82$; RMSE=12,13 tấn/ha); Mô hình 19 ($R^2=0,82$; RMSE=12,13 tấn/ha); Mô hình 23

($R^2=0,82$; RMSE=12,13 tấn/ha) và Mô hình 24 ($R^2=0,83$; RMSE=11,46 tấn/ha).

Các kết quả kiểm định được mô tả tại hình 3.



Hình 3. Mô hình kiểm định VQG Núi Chúa (tỉ lệ 1:1): (a) mô hình 16; (b) mô hình 18; (c) mô hình 19; (d) mô hình 23; (e) mô hình 24

Kết quả cho thấy, các mô hình có độ chính xác tương đối tương đồng (Hình 3), phản ánh khả năng giải thích tốt của các biến đầu vào đối với sinh khối rừng. Việc lựa chọn mô hình tối ưu được dựa trên đồng thời các chỉ tiêu R^2 và RMSE của cả tập xây dựng và kiểm định; mô hình có R^2 cao nhất và RMSE nhỏ nhất được ưu tiên lựa chọn. Do đó, mô hình 24 được xác định là mô hình tối ưu để ước tính sinh khối rừng cho khu vực nghiên cứu.

Dạng phương trình của mô hình được trình bày như sau:

$$\text{Sinh khối (tấn/ha)} = 3412 + 26.25 \cdot \text{HV} + 89.05 \cdot \text{NDVI_S2} - 0.07495 \cdot \text{Contrast} + 4.185 \cdot \text{Correlation} - 16.89 \cdot \text{Dissimilarity} - 667 \cdot \text{Entropy} + 131.6 \cdot \text{Homogeneity} - 14.4 \cdot \text{Mean} - 8783 \cdot \text{SeconMoment} + 6.491 \cdot \text{Variance}.$$

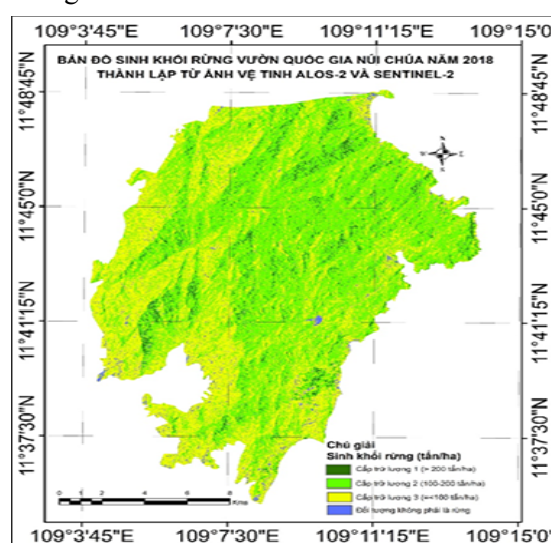
Trong đó: HV là giá trị tán xạ ngược từ phân cực HV; NDVI_S2 là giá trị chỉ số thực vật chuẩn hoá tính từ ảnh Sentinel-2; Contrast, Correlation, Dissimilarity, Entropy, Homogeneity, Mean, SeconMoment và Variance là giá trị về cấu trúc từ ảnh vệ tinh ALOS-2.

Kết quả cho thấy, việc kết hợp các thông số tán xạ ngược HV và đặc trưng textures từ ALOS-2 với NDVI từ ảnh Sentinel-2 cho phép mô hình khai thác đồng thời thông tin về cấu trúc và đặc tính bề mặt của thảm thực vật, qua đó nâng cao hiệu quả ước tính sinh khối rừng. Kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Nguyễn Việt Lương và cs (2024) [8], Vaglio Laurin và cs (2016) [21], khi kết hợp dữ liệu ALOS-2 và NDVI cho kết quả tốt hơn so với sử dụng dữ liệu đơn nguồn. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu của Golshani và cs (2019) [22], Luong và cs (2019) [9], Nguyễn Việt Lương và cs (2024) [8] cho thấy, phân cực HV có hiệu quả trong ước tính sinh khối, đặc biệt đối với các khu rừng có cấu trúc rậm. Những kết quả này củng cố vai trò bổ sung lẫn nhau của dữ liệu SAR và quang học, qua

đó khẳng định hiệu quả của cách tiếp cận tích hợp đa nguồn dữ liệu trong ước tính sinh khối rừng.

4.4. Kết quả thành lập bản đồ sinh khối rừng

Dựa trên mô hình ước tính sinh khối đã được lựa chọn, bản đồ sinh khối rừng cho khu vực nghiên cứu được xây dựng ở tỷ lệ 1:50.000 với độ phân giải không gian 10 m. Sử dụng số liệu trạng thái từ thực địa (32 điểm) để đánh giá độ chính xác bản đồ đã được xây dựng, kết quả cho thấy sai số là 16,71% tức là độ chính xác của bản đồ đã được thành lập đạt 83,29%. Kết quả bản đồ và thống kê sinh khối rừng được trình bày tại hình 4 và bảng 5.



Hình 4. Bản đồ sinh khối rừng VQG Núi Chúa

Kết quả phân tích từ bản đồ sinh khối rừng cho thấy, tổng diện tích khu vực nghiên cứu là 25.209,22 ha. Trong đó, rừng trung bình chiếm diện tích lớn nhất với 13.283,70 ha (52,69%), tiếp đến là rừng nghèo với 10.298,59 ha (40,85%), rừng giàu đạt 1.029,68 ha (4,08%) và các đối tượng khác chiếm 597,25 ha (2,37%). Kết quả được trình bày trong bảng 5.

Bảng 5. Phân bố diện tích theo các cấp sinh khối rừng tại khu vực nghiên cứu

TT	Lớp	Tiêu chuẩn trữ lượng sinh khối rừng (tấn/ha)	Diện tích	
			(ha)	(%)
1	Cấp trữ lượng 1	> 200	1.029,68	4,08
2	Cấp trữ lượng 2	101-200	13.283,70	52,69
3	Cấp trữ lượng 3	0-100	10.298,59	40,85
4	Đối tượng không phải là rừng	Không có rừng	597,25	2,37
	Tổng		25.209,22	100

Kết quả nghiên cứu cho thấy, thảm thực vật rừng tại VQG Núi Chúa có khả năng tích trữ khoảng 1,35 triệu tấn các-bon, tương đương 4,97 triệu tấn CO₂. Trung bình, mỗi hecta rừng có thể hấp thụ khoảng 202,20 tấn CO₂. Giá trị này nằm trong khoảng được ghi nhận đối với các hệ sinh thái rừng nhiệt đới của IPCC (2006) [17] và FAO (2025) [5], cho thấy tiềm năng tích trữ các-bon đáng kể bởi rừng của khu vực nghiên cứu, góp

phần vào điều hòa khí hậu và giảm phát thải khí nhà kính, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá vai trò của hệ sinh thái rừng trong thực hiện các mục tiêu phát thải ròng bằng “0” (Net Zero).

Kết quả thống kê trữ lượng các-bon và khả năng CO₂ hấp thụ tại khu vực nghiên cứu VQG Núi Chúa được thể hiện tại bảng 6.

Bảng 6. Trữ lượng các-bon và CO₂ được hấp thụ tại khu vực nghiên cứu

TT	Cấp trữ lượng (Tiêu chuẩn, tấn/ha)	Tổng diện tích (ha)	Tổng sinh khối (tấn)	Các-bon tích lũy (tấn)	CO ₂ hấp thụ (tấn)
1	Cấp trữ lượng 1 (> 200 tấn/ha)	1.029,68	205.936,00	102.968,00	377.892,56
2	Cấp trữ lượng 2 (100-200 tấn/ha)	13.283,70	1.992.555,00	996.277,50	3.656.338,43
3	Cấp trữ lượng 3 (0-100 tấn/ha)	10.298,59	514.929,50	257.464,75	944.895,63
4	Đối tượng không phải là rừng	597,25	0	0	0
	Tổng	25.209,22		1.356.710,25	4.979.126,61

5. KẾT LUẬN

Việc tích hợp dữ liệu từ ảnh vệ tinh ra-đa ALOS-2 PALSAR-2 (HV, textures) và ảnh vệ tinh quang học Sentinel-2 (NDVI) đã nâng cao độ chính xác trong ước tính sinh khối rừng hơn khi so sánh với mô hình sử dụng dữ liệu từ một loại vệ tinh. Trong các mô hình đã xây, mô hình 24 cho kết quả tốt nhất (R²=0,83; RMSE=14,64 tấn/ha), thể hiện tiềm năng của việc tích hợp dữ liệu ảnh vệ tinh ra-đa và quang học trong ước tính sinh khối từ tại khu vực nghiên cứu.

Bản đồ sinh khối rừng được xây dựng với độ phân giải 10 m, đạt độ chính xác 83,29%, cho phép thể hiện rõ sự phân bố không gian của ba cấp sinh khối rừng chính (>200 tấn/ha, 100-200 tấn/ha và 0-100 tấn/ha), cung cấp cơ sở dữ liệu phục vụ giám sát, đánh giá hiện trạng và quản lý tài nguyên rừng khu vực nghiên cứu.

Kết quả ước tính cho thấy, thảm thực vật rừng tại khu vực nghiên cứu có khả năng lưu trữ khoảng 1,35 triệu tấn các-bon, tương đương 4,97 triệu tấn CO₂, cho thấy vai trò đáng kể của hệ sinh thái rừng trong lưu trữ các-bon, giảm phát thải khí nhà kính và góp phần vào việc thực hiện mục tiêu phát thải ròng bằng “0” (Net Zero) của Việt Nam.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn hạn chế về số lượng dữ liệu thực địa và độ phân giải của dữ liệu ảnh vệ tinh. Trong tương lai, việc tăng cường quy mô dữ liệu thực địa, tích hợp ảnh vệ tinh với độ phân giải cao và áp dụng các phương pháp học máy có thể cải thiện độ chính xác mô hình và nâng cao khả năng ứng dụng trong giám sát sinh khối, các-bon rừng.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả trân trọng cảm ơn Quỹ Đổi mới Sáng tạo Vingroup (VINIF) đã hỗ trợ kinh phí cho nghiên cứu này thông qua dự án mã số VINIF. 2025.DA107. Cảm ơn JAXA đã cung cấp dữ liệu ALOS-2 thông qua “IP No. ER4A2N116” và USGS, ESA đã cung cấp dữ liệu Landsat 8 OLI và Sentinel-2 sử dụng trong nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. NOAA Global Monitoring Laboratory (2026). Trends in CO₂, CH₄, N₂O, SF₆. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Truy cập ngày 25/5/2026.
- [2]. Olchev, A. V. (2025). Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 61(Suppl 1), S74-S100.

- [3]. Yurak, V. V. & Fedorov, S. A. (2025). Review of natural and anthropogenic emissions of carbon dioxide into the earth's atmosphere. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(4), 2719-2736.
- [4]. Reek, J. E., Zohner, C. M., Smith, G. R., Cook-Patton, S. C., De Frenne, P., D'Odorico, P., ... & Crowther, T. W. (2026). More than mitigation: The role of forests in climate adaptation. *Science*, 391(6786), 669-678.
- [5]. FAO (2025). Global Forest Resources Assessment 2025. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd6709en>.
- [6]. Liên hiệp các Hội Khoa học và Kỹ thuật Việt Nam (2011). *Tài nguyên rừng và nguyên nhân suy thoái rừng ở Việt Nam*. <https://vusta.vn/tai-nguyen-rung-va-nguyen-nhan-suy-thoai-rung-o-viet-nam-p70348.html>. Truy cập ngày 16/5/2026.
- [7]. Bộ Nông nghiệp và Môi trường (2026). *Quyết định số 1106/QĐ-BNNMT ngày 31/3/2026 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2025*.
- [8]. Nguyễn Việt Lương, Đặng Vũ Khắc, Nguyễn Quyết Chiến, Nguyễn Thị Vân Anh & Nguyễn Trọng Trường Sơn (2024). Ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS ước tính sinh khối rừng thông ba lá (*Pinus kesiya royle ex gordon*) khu vực hồ Tuyên Lâm, thành phố Đà Lạt, tỉnh Lâm Đồng. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ*, 61, 33-40.
- [9]. Luong, V. N., Tu, T. T., Khoi, A. L., Hong, X. T., Hoan, T. N. & Thuy, T. L. H. (2019). Biomass estimation and mapping of Can Gio Mangrove Biosphere Reserve in South of Viet Nam using ALOS-2 PALSAR-2 data. *Applied Ecology & Environmental Research*, 17(1), 15-31.
- [10]. Nguyen Viet Luong, Ryutaro Tateishi, Akihiko Kondoh, Ram C. Sharma, Hoan Thanh Nguyen, Tu Trong To, Dinh Ho Tong Minh (2016). Mapping tropical forest biomass by combining ALOS-2, Landsat 8, and field plots data. *Land* 5(4), 31.
- [11]. UNESCO (2021). Nui Chua World Biosphere Reserve. UNESCO Man and the Biosphere (MAB) programme. <https://www.unesco.org/en/mab/nui-chua>. Truy cập ngày 6/3/2026.
- [12]. Trung tâm Bảo tồn Thiên nhiên Việt (2004). Vườn Quốc gia Núi Chúa. https://thiennhienviet.org.vn/sourcebook/source_book_vn/Tay%20nguyen/Nui%20Chua.htm. Truy cập ngày 25/5/2026.
- [13]. Cục Bảo tồn thiên nhiên và Đa dạng sinh học (2023). Vườn Quốc gia Núi Chúa, Khánh Hòa. <https://nbca.gov.vn/vuon-quoc-gia-nui-chua-ninh-thuan/>. Truy cập ngày 25/5/2026.
- [14]. UNESCO (2021). *Nui Chua-General information*. <https://www.unesco.org/en/mab/nui-chua>. Truy cập ngày 6/3/2026.
- [15]. Tổng cục Lâm nghiệp (2013). *Quyết định số 689/QĐ-TCLN-KL ngày 23/12/2013 ban hành Bộ tài liệu hướng dẫn kỹ thuật điều tra, kiểm kê rừng*.
- [16]. UN-REDD (2012). *Tree allometric equation development for estimation of forest above-ground biomass in Viet Nam. Part A - Introduction and Background of the Study*. UN-REDD Programme Viet Nam October 2012 Hanoi, Viet Nam.
- [17]. IPCC (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for global environmental strategies*: Hayama, Kanagawa, Japan.
- [18]. JAXA (2014). *ALOS-2/Calibration Result of JAXA Standard Products*; Japan Aerospace Exploration Agency, Earth Observation Research Center: Tsukuba, Japan.
- [19]. Haralick, R. M., Shanmugam, K. & Dinstein, I. H. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 6, 610-621.
- [20]. Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A* (No. PAPER-A20).
- [21]. Vaglio Laurin, G., Pirotti, F., Callegari, M., Chen, Q., Cuozzo, G., Lingua, E., ... & Papale, D. (2016). Potential of ALOS2 and NDVI to estimate forest above-ground biomass, and comparison with lidar-derived estimates. *Remote Sensing*, 9(1), 18.

[22]. Golshani, P., Maghsoudi, Y. & Sohrabi, H. (2019). Relating ALOS-2 PALSAR-2 parameters to biomass and structure of temperate broadleaf hyrcanian forests. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(5), 749-761.

ASSESSMENT OF FOREST CARBON STOCK USING MULTI-SOURCE REMOTE SENSING DATA: A CASE STUDY IN THE NUI CHUA WORLD BIOSPHERE RESERVE

Nguyen Viet Luong¹

¹ *Center for Remote Sensing and Geospatial Technology, Vietnam National Space Center,
Vietnam Academy of Science and Technology*

Abstract

This study integrates field survey data with satellite imagery, including Landsat 8 OLI, Sentinel-2 and ALOS-2 PALSAR-2 radar data, to assess forest biomass, carbon stocks and CO₂ sequestration in the Nui Chua World Biosphere Reserve. Radar backscatter coefficients and texture parameters, together with NDVI derived from optical imagery, were used to develop a forest biomass estimation model. The performance of forest biomass estimation models based on single-source and multi-source satellite imagery was evaluated using error metrics to compare model performance and identify the optimal approach. The results indicate that the integrated model combining satellite data from ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-2 achieved an accuracy exceeding 83%, outperforming single-source models due to its ability to integrate spectral and structural information. Based on this model, a biomass stock distribution map of the study area was developed, with the total forest carbon stock estimated at approximately 1.36 million tons, equivalent to about 4.97 million tons of absorbed CO₂. The results demonstrate that integrating multi-source remote sensing data enhances the accuracy of biomass and carbon stock estimation. This study provides a scientific basis for forest resource management and conservation, while supporting greenhouse gas emission reduction targets and progress toward carbon neutrality.

Keywords: *Forest biomass, forest carbon, satellite images, biosphere, Net zero.*

Ngày nhận bài: 26/2/2026

Ngày chuyển phản biện: 16/3/2026

Ngày thông qua phản biện: 12/8/2026

Ngày duyệt đăng: 04/9/2026