

XÂY DỰNG MÔ HÌNH ƯỚC TÍNH SINH KHỐI TRÊN MẶT ĐẤT RỪNG NGẬP MẶN SỬ DỤNG DỮ LIỆU KẾT HỢP SENTINEL-1 VÀ SENTINEL-2 TẠI MIỀN BẮC VIỆT NAM

Nguyễn Văn Thi¹, Nguyễn Hải Hòa^{2*}, Lê Sỹ Doanh²

¹Công ty Cổ phần Thương mại Công nghệ Xuân Mai Green

²Trường Đại học Lâm nghiệp

TÓM TẮT

Rừng ngập mặn là hệ sinh thái ven biển có vai trò quan trọng trong bảo vệ bờ biển, duy trì đa dạng sinh học và tích lũy carbon. Sinh khối trên mặt đất là chỉ tiêu cơ bản để đánh giá trữ lượng carbon rừng, tuy nhiên việc điều tra sinh khối bằng phương pháp thực địa thường tốn nhiều thời gian, chi phí và khó mở rộng trên phạm vi không gian lớn. Nghiên cứu này hướng tới xây dựng và so sánh các mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất rừng ngập mặn tại miền Bắc Việt Nam dựa trên ba chỉ số viễn thám gồm chỉ số thực vật Radar RVI (Radar Vegetation Index), các kênh hồng ngoại sóng ngắn SWIRS (Short-Wave Infrared) và chỉ số thực vật kết hợp quang học và Radar CORVI (Combined Optical and Radar Vegetation Index). Trong đó, RVI được tính từ hai phân cực VH và VV của Sentinel-1; SWIRS được xác định từ tổng phản xạ hai kênh hồng ngoại sóng ngắn B11 và B12 của Sentinel-2; CORVI là chỉ số kết hợp giữa RVI và SWIRS theo công thức $CORVI = RVI^{(1 - SWIRS)}$. Với mỗi biến độc lập, bốn dạng hàm được kiểm định gồm tuyến tính, lũy thừa, logarit và hàm mũ. Các mô hình được xây dựng dựa trên 322 ô mẫu với phạm vi AGB quan sát từ 15,4 - 282,8 Mg/ha và đánh giá bằng hệ số xác định R^2 , sai số căn phương trung bình RMSE và sai lệch hệ thống Bias. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình hồi quy lũy thừa sử dụng chỉ số CORVI là mô hình phù hợp nhất để ước tính AGB rừng ngập mặn, với độ chính xác kiểm định cao nhất ($R^2 = 0,606 \pm 0,065$), sai số RMSE kiểm định thấp nhất ($27,926 \pm 1,299$ Mg/ha) và Bias kiểm định là $-3,277 \pm 5,951$ Mg/ha; do đó, mô hình này được khuyến nghị sử dụng để lập bản đồ phân bố sinh khối trên mặt đất rừng ngập mặn tại khu vực nghiên cứu.

Từ khóa: Chỉ số viễn thám, kết hợp quang học và radar, mô hình sinh khối, rừng ngập mặn, ước tính sinh khối.

MODELLING ABOVE-GROUND BIOMASS OF MANGROVE FORESTS USING INTEGRATED SENTINEL-1 AND SENTINEL-2 DATA IN NORTHERN VIETNAM

Nguyen Van Thi¹, Nguyen Hai Hoa^{2*}, Le Sy Doanh²

¹Xuan Mai Green Technology Trading Joint Stock Company

²Vietnam National University of Forestry

*Corresponding author: hoanh@vnuf.edu.vn

ABSTRACT

Mangrove forests are coastal ecosystems that play an important role in shoreline protection, biodiversity conservation, and carbon accumulation. Above-ground biomass (AGB) is a fundamental indicator for assessing forest carbon stocks; however, field-based biomass surveys are often time-consuming, costly, and difficult to scale up over large spatial extents. This study aims to develop and compare models for estimating mangrove AGB in Northern Vietnam based on three remote sensing indices, namely RVI (Radar Vegetation Index), SWIRS (Short-Wave Infrared), and CORVI (Combined Optical and Radar Vegetation Index). Specifically, RVI is derived from the VH and VV polarizations of Sentinel-1; SWIRS is calculated as the sum of the shortwave infrared bands B11 and B12 of Sentinel-2; and CORVI is a combined index integrating RVI and SWIRS, defined as $CORVI = RVI^{(1 - SWIRS)}$. For each independent variable, four functional forms are tested, including linear, power, logarithmic, and exponential models. The models were developed based on 322 sample plots, with observed AGB ranging from 15.4 to 282.8 Mg/ha, and were evaluated using the coefficient of determination R^2 , root mean square error (RMSE), and bias. The results showed that the power regression model using the CORVI index was the most suitable model for estimating mangrove AGB, achieving the highest validation accuracy ($R^2 = 0,606 \pm 0,065$), the lowest validation RMSE ($27,926 \pm 1,299$ Mg/ha), and a validation Bias of $-3,277 \pm 5,951$ Mg/ha; therefore, this model is recommended for mapping the spatial distribution of mangrove above-ground biomass in the study area.

Keywords: Biomass estimation, biomass model, combined optical and radar, remote sensing indices, mangroves.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rừng ngập mặn là hệ sinh thái chuyển tiếp đặc thù giữa đất liền và biển, phân bố chủ yếu ở các vùng ven biển nhiệt đới và cận nhiệt đới, nơi chịu ảnh hưởng đồng thời của thủy triều, độ mặn, trầm tích và các quá trình động lực ven bờ. Hệ sinh thái này có vai trò quan trọng trong bảo vệ bờ biển, giảm tác động của sóng và bão, hạn chế xói lở, duy trì đa dạng sinh học và hỗ trợ sinh kế cho cộng đồng ven biển (Alongi, 2002; Duke *et al.*, 2007; Giri *et al.*, 2011). Ở Việt Nam, rừng ngập mặn phân bố dọc theo các tỉnh, thành ven biển từ Quảng Ninh đến Kiên Giang, trong đó khu vực phía Bắc có đặc điểm nổi bật là rừng phân bố tại các bãi bồi, cửa sông, đầm triều và vùng ven biển chịu ảnh hưởng mạnh của chế độ thủy văn - trầm tích (Nguyễn Văn Huy *et al.*, 2020).

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, rừng ngập mặn được quan tâm đặc biệt do khả năng tích lũy và lưu giữ carbon cao trong sinh khối thực vật và trầm tích, đồng thời là hệ sinh thái nhạy cảm với nước biển dâng, thay đổi thủy văn và các tác động khí hậu ven biển (Feller *et al.*, 2017). Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, rừng ngập mặn là một trong những hệ sinh thái rừng giàu carbon ở vùng nhiệt đới, có vai trò quan trọng trong cân bằng carbon và giảm nhẹ phát thải khí nhà kính (Donato *et al.*, 2011; Alongi, 2014; Rovai *et al.*, 2018). Sinh khối trên mặt đất (AGB) là một thành phần quan trọng trong tổng trữ lượng sinh khối rừng, phản ánh trạng thái sinh trưởng, cấu trúc tán, mật độ cây và mức độ phát triển của quần xã rừng. Vì vậy, ước tính chính xác AGB là cơ sở để quy đổi sang trữ lượng carbon, phục vụ kiểm kê khí nhà kính, giám sát tài nguyên rừng, chi trả dịch vụ môi trường rừng, REDD+ và các hệ thống đo đạc - báo cáo - thẩm định trong lâm nghiệp (Kauffman, Donato, 2012; Murdiyarso *et al.*, 2015).

Phương pháp truyền thống để xác định AGB rừng ngập mặn thường dựa trên điều tra thực địa kết hợp với phương trình sinh khối theo loài hoặc nhóm loài. Cách tiếp cận này có ưu điểm là phản ánh trực tiếp đặc điểm lâm học tại ô mẫu, nhưng lại

đòi hỏi nhiều thời gian, nhân lực và chi phí, đặc biệt tại các khu vực bãi triều, nền bùn lầy, phân bố rừng phân tán và khó tiếp cận (Kauffman, Donato, 2012). Do đó, việc mở rộng kết quả đo đếm thực địa lên quy mô không gian lớn thường gặp nhiều hạn chế. Trong bối cảnh đó, viễn thám được xem là công cụ hiệu quả để hỗ trợ ước tính sinh khối và trữ lượng carbon rừng ngập mặn, nhờ khả năng cung cấp thông tin lặp lại theo thời gian, bao phủ không gian rộng và có thể kết hợp với dữ liệu ô tiêu chuẩn để xây dựng mô hình định lượng (Fatoyinbo, Simard, 2013; Kuenzer *et al.*, 2011; Aslan *et al.*, 2021).

Các nguồn dữ liệu viễn thám quang học, Radar và LiDAR đã được sử dụng trong nhiều nghiên cứu ước tính chiều cao tán, cấu trúc rừng, sinh khối và carbon rừng ngập mặn, trong đó chiều cao tán là một biến cấu trúc quan trọng có liên quan chặt chẽ đến sinh khối và điều kiện sinh thái của rừng ngập mặn (Simard *et al.*, 2019). Dữ liệu quang học, như Landsat và Sentinel-2, có khả năng phản ánh đặc điểm phổ của thảm thực vật, độ xanh, độ ẩm tán và trạng thái sinh trưởng thông qua các kênh phổ và chỉ số thực vật. Tuy nhiên, ảnh quang học thường bị hạn chế bởi mây, bóng mây, hơi nước và điều kiện khí quyển, nhất là ở vùng nhiệt đới ven biển (Giri *et al.*, 2015; Aslan *et al.*, 2021). Ngược lại, dữ liệu radar khẩu độ tổng hợp, như Sentinel-1, có khả năng thu nhận trong điều kiện ngày đêm và ít bị ảnh hưởng bởi mây, đồng thời nhạy với đặc điểm cấu trúc tán, độ nhám bề mặt và độ ẩm. Tuy nhiên, tín hiệu radar cũng có thể chịu ảnh hưởng bởi mực nước triều, độ ẩm nền, nhiễu speckle và giới hạn xuyên tán của băng C trong các khu rừng có sinh khối cao (Lagomasino *et al.*, 2019; Ghosh *et al.*, 2021).

Việc kết hợp dữ liệu quang học và radar được xem là hướng tiếp cận có tiềm năng nhằm nâng cao độ chính xác ước tính AGB rừng ngập mặn. Các nghiên cứu trước đây đã chứng minh rằng dữ liệu Sentinel có thể được sử dụng hiệu quả trong mô hình hóa sinh khối rừng ngập mặn. Castillo và đồng tác giả (2017) sử dụng ảnh Sentinel để

ước tính sinh khối trên mặt đất rừng ngập mặn tại Philippines và cho thấy tiềm năng của dữ liệu này trong lập bản đồ AGB ở vùng ven biển nhiệt đới. Ghosh và đồng tác giả (2021) đã sử dụng Sentinel-1 SAR coherence và mô hình học sâu để ước tính AGB rừng ngập mặn nhiệt đới. Gần đây, Huang và đồng tác giả (2022) đã sử dụng kết hợp Sentinel-1 và Sentinel-2 với các thuật toán học máy để lập bản đồ AGB rừng ngập mặn, cho thấy việc tích hợp dữ liệu SAR và quang học có thể cải thiện khả năng dự báo sinh khối so với sử dụng đơn lẻ từng nguồn dữ liệu.

Ở Việt Nam, các nghiên cứu ứng dụng viễn thám trong giám sát rừng, ước tính sinh khối và trữ lượng carbon rừng ngập mặn đã được triển khai ở một số khu vực ven biển. Đặc biệt, Pham và đồng tác giả (2020) đã so sánh nhiều thuật toán học máy để ước tính AGB rừng ngập mặn tại Khu Dự trữ sinh quyển châu thổ sông Hồng trên cơ sở kết hợp nhiều nguồn dữ liệu viễn thám cho thấy, tiềm năng ứng dụng của dữ liệu vệ tinh trong mô hình hóa sinh khối rừng ngập mặn tại miền Bắc Việt Nam. Một số nghiên cứu đã sử dụng Sentinel-1A, Sentinel-2A, ALOS-2 PALSAR-2 hoặc các mô hình học máy để giám sát sinh khối, biến động rừng ngập mặn và ước tính carbon tại Hải Phòng, Cần Giờ, Quảng Ninh và một số địa phương khác (Pham et al., 2018; Pham et al., 2020; Luong et al., 2018; Nguyen Hai Hoa et al., 2024). Tuy nhiên, các nghiên cứu theo hướng xây dựng và so sánh có hệ thống các mô hình đơn biến dựa trên các chỉ số kết hợp Sentinel-1 và Sentinel-2 cho rừng ngập mặn miền Bắc Việt Nam còn chưa nhiều. Đặc biệt, cần làm rõ mức độ phản ánh AGB của từng chỉ số riêng lẻ và dạng hàm toán học phù hợp giữa chỉ số viễn thám và sinh khối rừng.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đề xuất xây dựng mô hình ước tính AGB rừng ngập mặn sử dụng ba chỉ số gồm RVI, SWIRS và CORVI. Trong đó, RVI được tính từ hai phân cực VH và VV của Sentinel-1, phản ánh đặc điểm tán xạ radar liên quan đến cấu trúc tán rừng; SWIRS được tính từ

tổng phản xạ hai kênh hồng ngoại sóng ngắn B11 và B12 của Sentinel-2, đại diện cho thông tin phổ liên quan đến độ ẩm và trạng thái bề mặt của thảm thực vật; CORVI là chỉ số kết hợp giữa RVI và SWIRS theo công thức $CORVI = RVI^{(1 - SWIRS)}$, nhằm tích hợp thông tin cấu trúc từ radar và thông tin quang học vùng SWIR. Để xác định biến và dạng quan hệ phù hợp nhất với AGB, mỗi chỉ số được kiểm định độc lập theo bốn dạng hàm gồm tuyến tính, lũy thừa, logarit và hàm mũ. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá rõ vai trò của từng biến viễn thám, đồng thời cung cấp cơ sở lựa chọn mô hình đơn giản, dễ diễn giải và có khả năng ứng dụng trong lập bản đồ sinh khối rừng ngập mặn tại miền Bắc Việt Nam.

II. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ DỮ LIỆU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là sinh khối trên mặt đất của rừng ngập mặn, ký hiệu là AGB. AGB được hiểu là tổng khối lượng sinh học của các bộ phận cây nằm trên mặt đất, bao gồm thân, cành, lá và các bộ phận trên mặt đất khác, được quy đổi theo đơn vị tấn/ha.

2.2. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi không gian của nghiên cứu là khu vực rừng ngập mặn ven biển miền Bắc Việt Nam, bao gồm các tỉnh, thành: Quảng Ninh, Hải Phòng, Hưng Yên và Ninh Bình.

2.3. Dữ liệu nghiên cứu

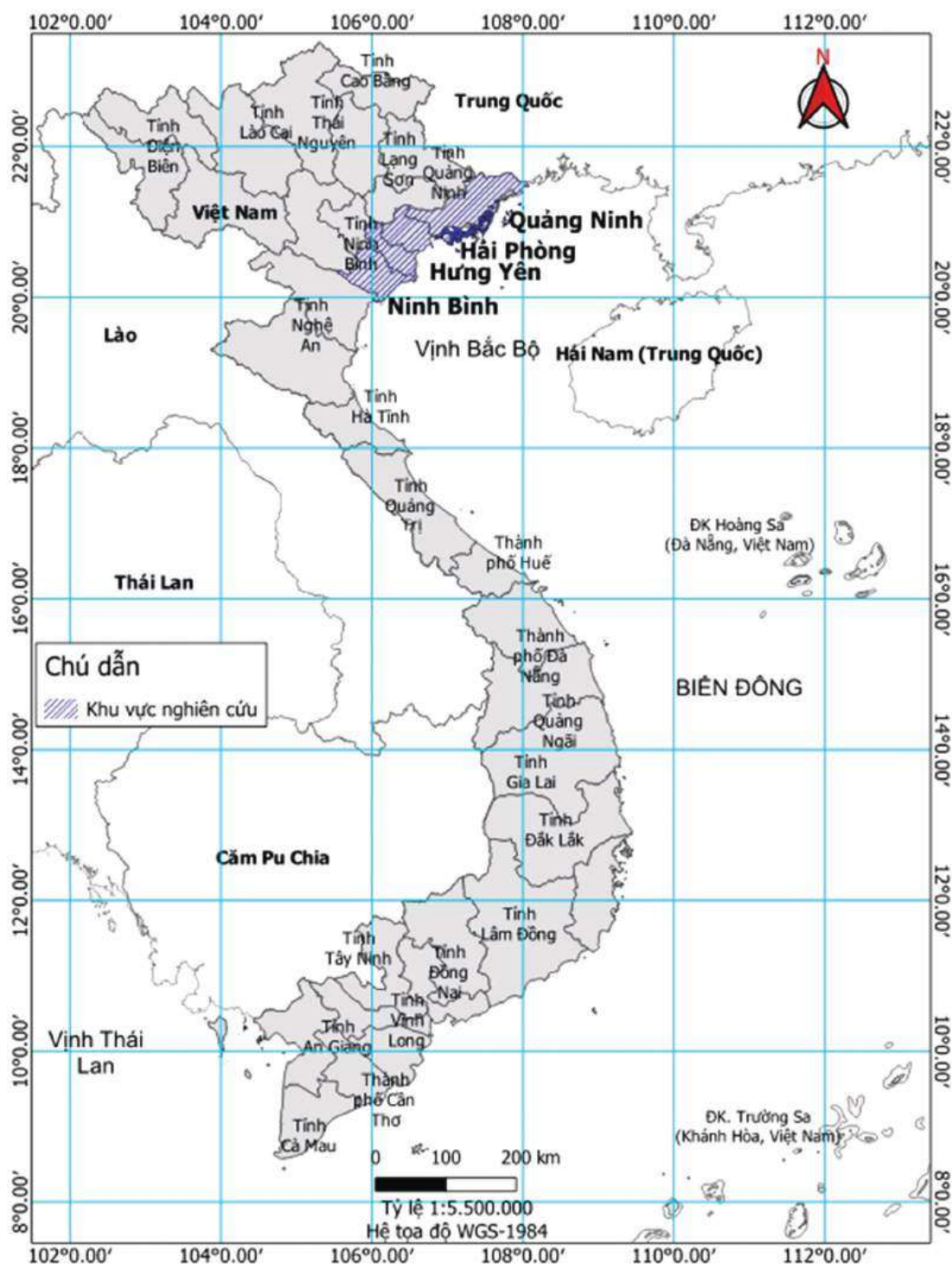
2.3.1. Dữ liệu thực địa

Dữ liệu thực địa gồm 322 ô tiêu chuẩn (OTC) được bố trí tại các trạng thái rừng ngập mặn đại diện trong khu vực nghiên cứu. Trong mỗi OTC, thông tin được thu thập gồm tọa độ ô, loài cây, đường kính thân cây, chiều cao cây, mật độ cây, tình trạng sinh trưởng và đặc điểm trạng thái rừng. Phân bố các OTC ở các tỉnh như sau: Quảng Ninh 99 mẫu, Hưng Yên 44 mẫu, Ninh Bình 129 mẫu và TP. Hải Phòng 50 mẫu.

2.3.2. Dữ liệu viễn thám

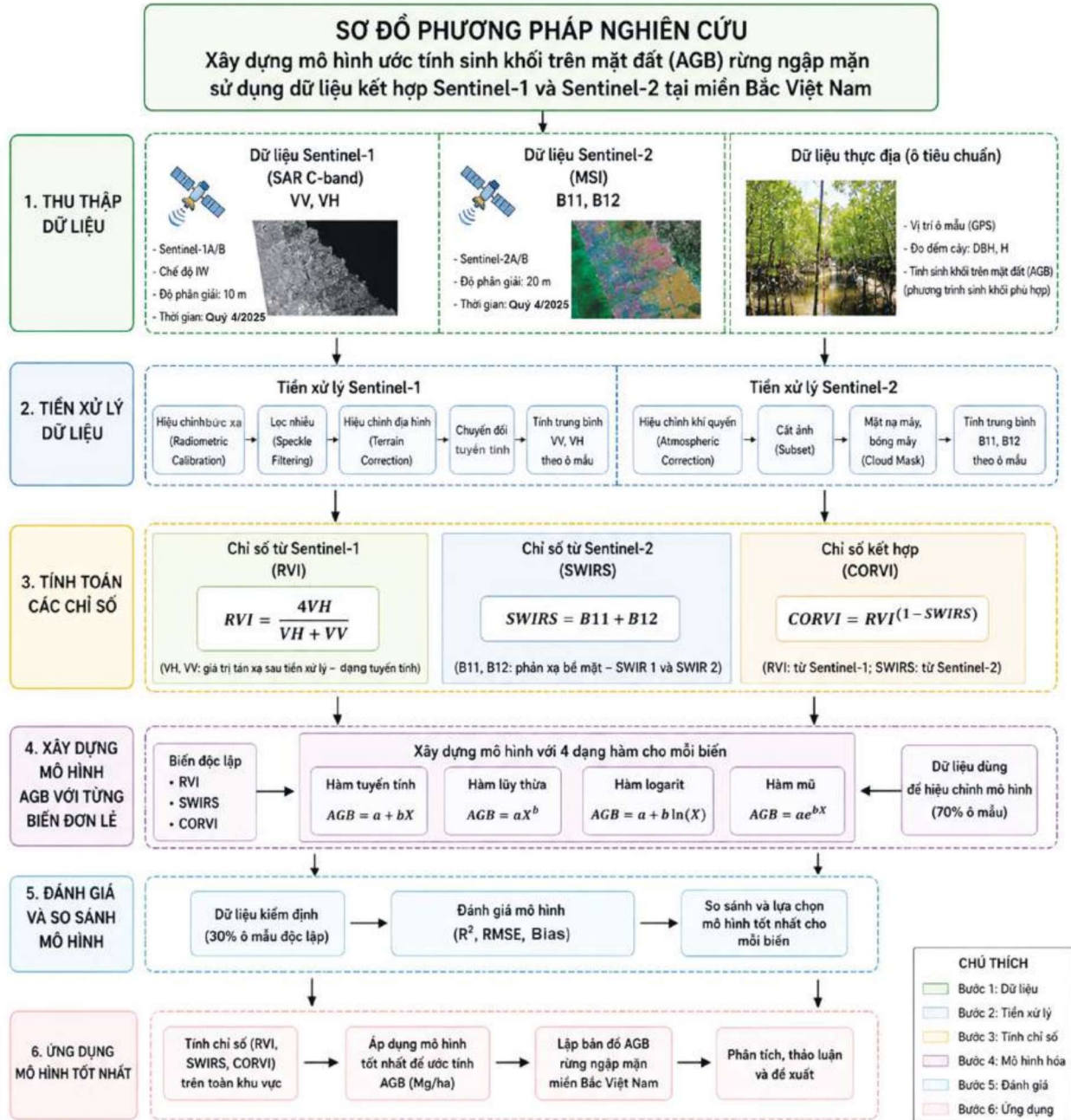
Dữ liệu Sentinel-1 được sử dụng là ảnh SAR với hai phân cực VV và VH. Dữ liệu Sentinel-2 được sử dụng để khai thác thông tin phản xạ vùng hồng

ngoại sóng ngắn (B11 và B12). Cả hai nguồn dữ liệu này được khai thác và tiền xử lý trên Google Earth Engine, thời gian thu nhận ảnh từ 01/10/2025 đến 31/12/2025 (Quý 4/2025).



Hình 1. Khu vực vị trí nghiên cứu.

III. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU



Hình 2. Sơ đồ khung phương pháp nghiên cứu sử dụng trong nghiên cứu.

Nghiên cứu xây dựng các mô hình đơn biến nhằm đánh giá khả năng ước tính sinh khối trên mặt đất rừng ngập mặn của ba chỉ số viễn thám gồm RVI, SWIRS và CORVI. Chỉ số RVI được tính từ hai phân cực VH và VV của Sentinel-1 theo công thức $RV = 4VH/(VH + VV)$, trong đó VH và VV là giá trị tán xạ ngược theo phân cực VH và VV ở dạng tuyến tính (Nasirzadehdizaji *et al.*, 2019). Chỉ số

SWIRS được xác định bằng tổng phản xạ hai kênh hồng ngoại sóng ngắn B11 và B12 của Sentinel-2 theo công thức $SWIRS = B11 + B12$. Trên cơ sở đó, chỉ số CORVI (là công thức thực nghiệm do tác giả xây dựng) được tính theo công thức $CORVI = RVI(1 - SWIRS)$, nhằm tích hợp thông tin cấu trúc tán từ dữ liệu radar và thông tin phản xạ vùng SWIR từ dữ liệu quang học.

Với mỗi biến độc lập X , trong đó X lần lượt là RVI, SWIRS và CORVI, bốn dạng mô hình được thiết lập gồm tuyến tính ($AGB = aX + b$), lũy thừa ($AGB = aX^b$, logarit ($AGB = a\ln(X) + b$) và hàm mũ ($AGB = ae^{bX}$). Các tham số của mô hình được ước lượng từ bộ dữ liệu ô tiêu chuẩn kết hợp với giá trị chỉ số viễn thám trích xuất tại vị trí tương ứng. Độ chính xác của các mô hình được đánh giá thông qua hệ số xác định R^2 , sai số căn phương trung bình RMSE, sai lệch hệ thống Bias. Mô hình tối ưu được lựa chọn dựa trên nguyên tắc có khả năng giải thích cao, sai số thấp, Bias gần 0 và dạng quan hệ phù hợp với đặc điểm sinh thái của rừng ngập mặn.

Mô hình được xây dựng và đánh giá bằng phương pháp kiểm định chéo 5 phần (5-fold cross-validation) trên toàn bộ 322 ô tiêu chuẩn đã điều tra ngoài thực địa. Trong mỗi lần lặp, 4/5 số ô được sử dụng để huấn luyện và 1/5 số ô còn lại được dùng để kiểm định, bảo đảm mỗi ô tiêu chuẩn đều tham gia kiểm định một lần.

Công cụ xử lý và phân tích số liệu: Xử lý ảnh vệ tinh được thực hiện trên Google Earth Engine

(GEE). Xây dựng mô hình và phân tích thống kê được thực hiện bằng phần mềm mã nguồn mở R.

Đánh giá độ chính xác mô hình:

Độ chính xác của các mô hình được đánh giá bằng các chỉ tiêu thống kê gồm hệ số xác định R^2 , sai số căn phương trung bình RMSE, sai số tuyệt đối trung bình MAE và sai lệch hệ thống Bias.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (AGB_i - \widehat{AGB}_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |AGB_i - \widehat{AGB}_i|$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\widehat{AGB}_i - AGB_i)$$

Trong đó AGB_i là AGB quan sát từ số liệu thực địa, $\widehat{AGB}_i$ là AGB dự báo từ mô hình và n là số ô mẫu.

Mô hình tối ưu được lựa chọn theo nguyên tắc: R^2 cao, RMSE và MAE thấp, Bias gần 0 và dạng quan hệ có ý nghĩa sinh thái phù hợp.

IV. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Đặc điểm AGB từ số liệu ô tiêu chuẩn điều tra

Bảng 1. Thống kê mô tả AGB tại các ô tiêu chuẩn.

TT	Chỉ tiêu	Giá trị
1	Số dung lượng mẫu (OTC)	322
2	Giá trị nhỏ nhất	15,4
3	Giá trị lớn nhất	282,8
4	Giá trị trung bình	116,99
5	Độ lệch chuẩn mẫu	45,47
6	Hệ số biến động (%)	38,87

Sinh khối trên mặt đất tại 322 OTC có sự biến động tương đối lớn, dao động từ 15,4 đến 282,8 Mg/ha, với giá trị trung bình đạt 116,99 tấn/ha và độ lệch chuẩn 45,47 tấn/ha. Hệ số biến động đạt 38,87%, cho thấy AGB giữa các ô mẫu không đồng nhất mà phân hóa rõ theo điều kiện sinh trưởng và trạng thái

rừng. Các ô có giá trị AGB thấp có thể đại diện cho rừng non, rừng thưa, khu vực phục hồi hoặc chịu tác động của điều kiện lập địa bất lợi; trong khi các ô có AGB cao phản ánh những khu vực rừng phát triển tốt hơn, mật độ cây lớn, tán tương đối ổn định hoặc cây đạt kích thước lớn. Mức biến động này là

cơ sở phù hợp để xây dựng và kiểm định các mô hình ước tính AGB từ chỉ số viễn thám, do bộ mẫu

đã bao quát được phổ sinh khối từ thấp đến cao trong khu vực nghiên cứu.

4.2. Đặc điểm các chỉ số RVI, SWIRS và CORVI

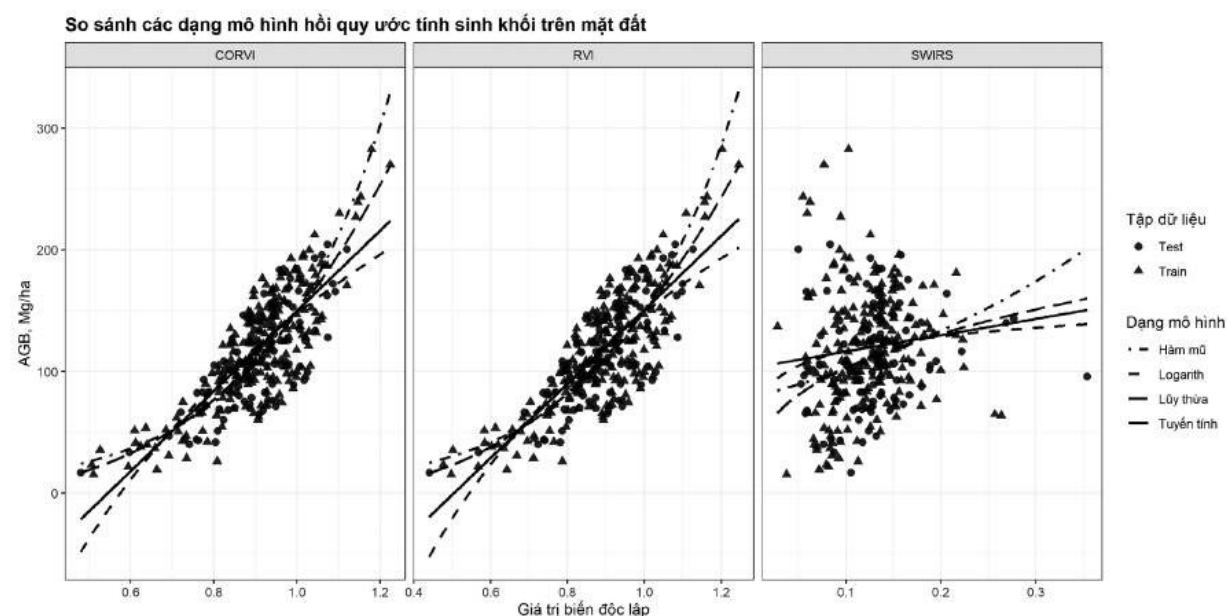
Bảng 2. Thống kê mô tả các chỉ số viễn thám.

Chỉ số	Số mẫu	Min	Max	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Hệ số biến động (%)
CORVI	322	0,4796	1,2245	0,9057	0,1114	12,3
SWIRS	322	0,0278	0,354	0,1241	0,0413	33,25
RVI	322	0,4399	1,2453	0,8946	0,1214	13,57

Các chỉ số viễn thám được trích xuất tại 322 OTC có mức biến động khác nhau. Chỉ số RVI dao động từ 0,4399 đến 1,2453, với giá trị trung bình 0,8946 và hệ số biến động 13,57%. Chỉ số CORVI có giá trị từ 0,4796 đến 1,2245, trung bình 0,9057, hệ số biến động 12,30%, cho thấy mức phân tán tương đối thấp

hơn RVI. Trong khi đó, SWIRS dao động từ 0,0278 đến 0,3540, trung bình 0,1241, nhưng có hệ số biến động cao nhất, đạt 33,25%, phản ánh sự khác biệt rõ hơn về phản xạ vùng SWIR giữa các ô mẫu, có thể liên quan đến độ ẩm tán, điều kiện nền bùn nước và trạng thái sinh trưởng của rừng ngập mặn.

4.3. Quan hệ giữa AGB và từng chỉ số viễn thám



Hình 3. Quan hệ giữa AGB và các chỉ số viễn thám.

Kết quả tại hình 3 cho thấy mối quan hệ giữa AGB và các chỉ số viễn thám có sự khác biệt rõ rệt giữa ba biến CORVI, RVI và SWIRS. Đối với CORVI, các điểm quan sát phân bố theo xu thế tăng khá rõ: khi CORVI tăng thì AGB cũng tăng. Cả bốn dạng hàm hồi quy đều mô tả được quan hệ thuận

này, trong đó các dạng hàm mũ, lũy thừa và logarit thể hiện xu thế phi tuyến rõ hơn ở khoảng giá trị CORVI cao. Điều này cho thấy CORVI có khả năng phản ánh tốt sự thay đổi sinh khối rừng ngập mặn, đặc biệt ở nhóm ô có AGB trung bình đến cao. Tuy nhiên, tại vùng giá trị cao, các đường hồi quy

bắt đầu phân kỳ mạnh, cho thấy mô hình nhạy hơn và có thể làm tăng sai số dự báo nếu ngoại suy ngoài miền dữ liệu quan sát.

Đối với RVI, quan hệ với AGB cũng thể hiện xu thế thuận và khá chặt chẽ, tương tự CORVI. Khi RVI tăng, AGB tăng tương ứng, phản ánh vai trò của tín hiệu radar trong mô tả cấu trúc tán, mật độ và mức độ phát triển sinh khối rừng. Các dạng hàm phi tuyến, đặc biệt là hàm mũ và lũy thừa, cho thấy AGB có xu hướng tăng nhanh hơn ở các giá trị RVI cao. Điều này phù hợp với đặc điểm sinh thái rừng ngập mặn, khi sự gia tăng cấu trúc tán và mật độ cây có thể kéo theo sự gia tăng nhanh của sinh khối. So với CORVI, RVI có dạng phân bố và xu thế hồi quy

khá tương đồng, cho thấy thông tin từ Sentinel-1 giữ vai trò quan trọng trong ước tính AGB.

Ngược lại, SWIRS có quan hệ với AGB yếu hơn rõ rệt. Các điểm dữ liệu phân tán mạnh, đặc biệt ở khoảng SWIRS từ khoảng 0,08 đến 0,18, nơi AGB biến động từ thấp đến rất cao. Các đường hồi quy đều có xu thế tăng nhẹ, nhưng độ dốc không lớn và mức phân tán quanh đường hồi quy cao, cho thấy SWIRS đơn lẻ chưa giải thích tốt biến động sinh khối trên mặt đất. Điều này có thể do SWIRS không chỉ chịu ảnh hưởng của tán rừng mà còn bị chi phối bởi độ ẩm, nền bùn nước, thủy triều và sự hỗn hợp giữa rừng - đất - nước trong pixel ảnh Sentinel-2.

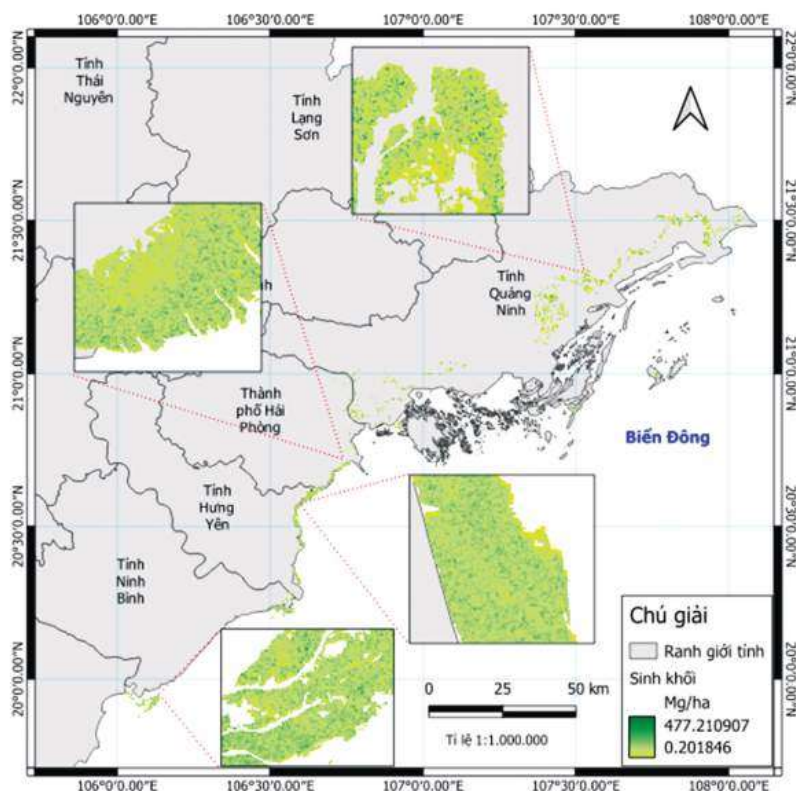
4.4. So sánh độ chính xác các mô hình đơn biến

Bảng 3. So sánh độ chính xác 12 mô hình ước tính AGB.

TT	Chỉ số	Mô hình hồi quy	Huấn luyện			Kiểm định		
			R2	RMSE	Bias	R2	RMSE	Bias
1	RVI	$AGB = 153,451564 + 304,212573 \times RVI$	$0,615 \pm 0,008$	$28,155 \pm 0,492$	$0,000 \pm 0,000$	$0,599 \pm 0,036$	$28,290 \pm 2,043$	$-0,004 \pm 5,522$
2	RVI	$AGB = 148,569804 + 244,372541 \times \ln(RVI)$	$0,583 \pm 0,005$	$29,285 \pm 0,676$	$0,000 \pm 0,000$	$0,570 \pm 0,032$	$29,391 \pm 2,788$	$-0,018 \pm 5,497$
3	RVI	$AGB = 6,132104 \times \exp(3,203582 \times RVI)$	$0,593 \pm 0,014$	$28,927 \pm 0,529$	$-2,901 \pm 0,074$	$0,569 \pm 0,078$	$29,170 \pm 1,578$	$-2,885 \pm 6,106$
4	RVI	$AGB = 149,425282 \times RVI^{2,680302}$	$0,619 \pm 0,012$	$28,009 \pm 0,397$	$-3,270 \pm 0,111$	$0,598 \pm 0,061$	$28,205 \pm 1,357$	$-3,258 \pm 5,865$
5	SWIRS	$AGB = 102,982896 + 134,229934 \times SWIRS$	$0,013 \pm 0,003$	$45,073 \pm 1,173$	$0,000 \pm 0,000$	$-0,015 \pm 0,038$	$45,193 \pm 4,743$	$-3,258 \pm 5,865$
6	SWIRS	$AGB = 156,998985 + 17,462474 \times \ln(SWIRS)$	$0,015 \pm 0,004$	$45,022 \pm 1,208$	$0,000 \pm 0,000$	$-0,011 \pm 0,039$	$45,125 \pm 4,887$	$0,017 \pm 8,274$
7	SWIRS	$AGB = 78,272220 \times \exp(2,669890 \times SWIRS)$	$-0,052 \pm 0,008$	$46,533 \pm 1,316$	$-9,813 \pm 0,605$	$-0,092 \pm 0,099$	$46,780 \pm 4,284$	$-9,800 \pm 9,010$
8	SWIRS	$AGB = 229,779193 \times SWIRS^{0,348508}$	$-0,044 \pm 0,010$	$46,355 \pm 1,377$	$-9,737 \pm 0,603$	$-0,077 \pm 0,094$	$46,496 \pm 4,692$	$-9,751 \pm 8,638$
9	CORVI	$AGB = -179,530903 + 329,470382 \times CORVI$	$0,615 \pm 0,009$	$28,139 \pm 0,475$	$0,000 \pm 0,000$	$0,599 \pm 0,039$	$28,286 \pm 1,985$	$-0,005 \pm 5,569$
10	CORVI	$AGB = 147,676479 + 266,582650 \times \ln(CORVI)$	$0,581 \pm 0,006$	$29,345 \pm 0,653$	$0,000 \pm 0,000$	$0,567 \pm 0,035$	$29,468 \pm 2,709$	$-0,018 \pm 5,576$
11	CORVI	$AGB = 4,51463 \times \exp(3,504369 \times CORVI)$	$0,606 \pm 0,014$	$28,479 \pm 0,488$	$-2,879 \pm 0,075$	$0,581 \pm 0,079$	$28,718 \pm 1,571$	$-2,867 \pm 6,190$
12	CORVI	$AGB = 148,328088 \times CORVI^{2,946809}$	$0,626 \pm 0,013$	$27,723 \pm 0,359$	$-3,289 \pm 0,104$	$0,606 \pm 0,065$	$27,926 \pm 1,299$	$-3,277 \pm 5,951$

Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình đơn biến sử dụng CORVI dạng lũy thừa đạt độ chính xác tốt nhất trong 12 mô hình kiểm định, với R^2 huấn luyện đạt $0,626 \pm 0,013$, RMSE huấn luyện $27,723 \pm 0,359$ Mg/ha, R^2 kiểm định $0,606 \pm 0,065$, RMSE kiểm định $27,926 \pm 1,299$ Mg/ha (tương đương RMSE% khoảng $23,923 \pm 1,655\%$) và Bias kiểm định $-3,277 \pm 5,951$ Mg/ha. Kết quả này cho thấy quan hệ giữa AGB và chỉ số CORVI có tính phi tuyến rõ rệt, đồng thời xác nhận lợi thế

của việc kết hợp thông tin radar Sentinel-1 với thông tin SWIR Sentinel-2 trong mô tả biến động sinh khối rừng ngập mặn. Khi áp dụng mô hình $AGB = 148,328088 \times CORVI^{2,946809}$ để ước tính và lập bản đồ sinh khối cho khu vực nghiên cứu cho thấy toàn khu vực có lượng sinh khối trên mặt đất khoảng 2,9 triệu tấn, trong đó nhiều nhất ở tỉnh Quảng Ninh với 1,72 triệu tấn, Hải Phòng 0,36 triệu tấn, Hưng Yên 0,42 triệu tấn và Ninh Bình 0,47 triệu tấn.



Hình 3. Bản đồ phân bố sinh khối trên mặt đất khu vực nghiên cứu theo mô hình lũy thừa

V. THẢO LUẬN

Kết quả nghiên cứu này có sự tương đồng với các nghiên cứu trước đây khi nhấn mạnh rằng việc tích hợp dữ liệu radar và quang học có thể cải thiện khả năng ước tính AGB so với sử dụng riêng lẻ từng nguồn dữ liệu. Chẳng hạn, Castillo và đồng tác giả (2017) đã sử dụng ảnh Sentinel để ước tính và lập bản đồ AGB rừng ngập mặn tại Philippines, đồng thời cho thấy dữ liệu Sentinel có tiềm năng trong mô hình hóa sinh khối ở các hệ sinh thái ven biển nhiệt đới. Tương tự, Huang và đồng tác giả (2022)

sử dụng Sentinel-1 và Sentinel-2 kết hợp với thuật toán học máy để ước tính AGB rừng ngập mặn tại Trung Quốc, và kết quả cho thấy mô hình học máy cải thiện độ chính xác so với mô hình bán thực nghiệm, qua đó hỗ trợ tốt hơn cho mô hình hóa sinh khối và quản lý rừng theo REDD+. Ở Việt Nam, Phạm và đồng tác giả (2018) đã tích hợp ALOS-2 PALSAR-2 và Sentinel-2A với mô hình SVR để ước tính AGB rừng ngập mặn trồng tại Hải Phòng, cho kết quả khả quan với $R^2 = 0,596$ và AGB ước tính dao động từ 36,22 đến 230,14 Mg/ha.

So với nghiên cứu này, mô hình CORVI dạng lũy thừa có R^2 kiểm định ở mức trung bình khá, nhưng có ưu điểm là cấu trúc mô hình đơn giản, chỉ sử dụng một chỉ số tổng hợp, dễ diễn giải và thuận lợi khi áp dụng trên phạm vi rộng.

Sự vượt trội của CORVI so với RVI và đặc biệt là SWIRS cũng có ý nghĩa về mặt sinh thái và viễn thám. RVI phản ánh tán xạ radar liên quan đến cấu trúc tán, mật độ cành lá và độ phức tạp hình thái của rừng; trong khi SWIRS phản ánh thông tin vùng hồng ngoại sóng ngắn, chịu ảnh hưởng bởi độ ẩm tán, vật chất khô, nền bùn nước và điều kiện thủy triều. Khi sử dụng riêng lẻ, SWIRS cho R^2 rất thấp và thậm chí âm ở tập kiểm định, chứng tỏ chỉ số này không đủ khả năng giải thích biến động AGB. Nguyên nhân có thể là do SWIRS được tính từ hai kênh hồng ngoại sóng ngắn B11 và B12 của Sentinel-2, vốn nhạy mạnh với hàm lượng nước trong tán lá, độ ẩm bề mặt, nền bùn nước và điều kiện thủy triều hơn là phản ánh trực tiếp cấu trúc thân, cành và mật độ cây. Đối với rừng ngập mặn, các ô mẫu thường nằm trong môi trường bãi triều có sự xen kẽ giữa tán rừng, đất bùn, nước mặt và khoảng trống tán; do đó tín hiệu SWIR dễ bị ảnh hưởng bởi hiện tượng hỗn hợp pixel. Tuy nhiên, khi được tích hợp vào CORVI, thông tin SWIR có thể đóng vai trò điều chỉnh tín hiệu radar theo trạng thái quang phổ và độ ẩm bề mặt, nhờ đó cải thiện nhẹ khả năng dự báo so với RVI đơn thuần. Nhận định này phù hợp với các tổng quan trước đây cho rằng các nguồn dữ liệu Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat, ALOS PALSAR và LiDAR đều có giá trị trong lập bản đồ AGB, nhưng hiệu quả thường được nâng cao khi kết hợp nhiều loại dữ liệu và mô hình hóa phù hợp. Bên cạnh đó, Ghosh và đồng tác giả (2021) cũng nhấn mạnh tiềm năng của Sentinel-1 băng C trong ước tính AGB rừng ngập mặn nhiệt đới, mặc dù tín hiệu SAR có thể chịu giới hạn do khả năng xuyên tán và tính không đồng nhất không gian của rừng ngập mặn.

Mặc dù mô hình CORVI dạng lũy thừa cho kết quả tốt nhất trong nghiên cứu này, vẫn cần lưu ý một số hạn chế khi diễn giải và mở rộng ứng dụng.

Thứ nhất, mô hình được xây dựng theo cách tiếp cận đơn biến nên có ưu điểm là đơn giản và dễ áp dụng, nhưng chưa phản ánh đầy đủ tác động đồng thời của các yếu tố sinh thái - lập địa như loài cây, tuổi rừng, mật độ, chiều cao tán, điều kiện bãi triều, độ mặn và mức độ ngập nước. Thứ hai, dữ liệu Sentinel-1 và Sentinel-2 có độ phân giải không gian trung bình nên trong các khu vực rừng hẹp, phân mảnh hoặc xen kẽ với mặt nước, bãi bùn và ao nuôi trồng thủy sản, sai số do hỗn hợp pixel vẫn có thể ảnh hưởng đến giá trị chỉ số viễn thám và kết quả ước tính AGB. Ngoài ra, tín hiệu radar băng C của Sentinel-1 có thể bị giới hạn ở các khu rừng có sinh khối cao, trong khi phản xạ SWIR của Sentinel-2 dễ chịu ảnh hưởng bởi mây, hơi nước, độ ẩm nền và trạng thái thủy triều tại thời điểm thu nhận ảnh.

Vì vậy, khả năng áp dụng mô hình sang các khu vực khác cần được xem xét thận trọng. Mô hình có thể phù hợp với các khu vực rừng ngập mặn có điều kiện sinh thái, cấu trúc rừng và miền giá trị AGB tương đồng với bộ mẫu của nghiên cứu này, đặc biệt trong phạm vi ven biển miền Bắc Việt Nam. Tuy nhiên, khi áp dụng cho các vùng khác như rừng ngập mặn miền Trung, Nam Bộ hoặc các khu vực có thành phần loài, tuổi rừng, chế độ thủy triều và điều kiện lập địa khác biệt, cần tiến hành hiệu chỉnh và kiểm định lại bằng dữ liệu ô tiêu chuẩn độc lập. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc bổ sung biến phụ trợ như chiều cao tán, mật độ cây, tuổi rừng, chỉ số thực vật quang học, biến địa hình - thủy văn hoặc áp dụng mô hình đa biến và học máy có thể giúp nâng cao độ chính xác, giảm bất định và cải thiện khả năng chuyển giao mô hình trên phạm vi rộng hơn.

VI. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đề xuất khung mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất rừng ngập mặn sử dụng ba chỉ số viễn thám gồm RVI, SWIRS và CORVI từ dữ liệu Sentinel-1 và Sentinel-2. Với mỗi biến độc lập, bốn dạng hàm gồm tuyến tính, lũy thừa, logarit và hàm mũ được xây dựng và so sánh nhằm xác định dạng

quan hệ phù hợp nhất với AGB. Kết quả so sánh 12 mô hình cho thấy mô hình lũy thừa sử dụng chỉ số CORVI là mô hình phù hợp nhất để ước tính AGB rừng ngập mặn tại khu vực nghiên cứu, với phương trình: $AGB = 148,328088 \times CORVI^{2,946809}$. Mô hình này đạt độ chính xác cao nhất trên tập kiểm định với $R^2 = 0,606 \pm 0,065$, $RMSE = 27,926 \pm 1,299$ Mg/ha ($RMSE\% = 23,923 \pm 1,655\%$) và $Bias = -3,277 \pm 5,951$ Mg/ha. So với các mô hình sử dụng RVI và SWIRS, mô hình CORVI dạng lũy thừa cho thấy khả năng dự báo ổn định hơn do kết hợp được thông tin cấu trúc tán từ Sentinel-1 và thông tin phản xạ vùng SWIR từ Sentinel-2. Vì vậy, nghiên cứu khuyến cáo sử dụng mô hình này để xây dựng bản đồ phân bố sinh khối trên mặt đất rừng ngập mặn tại khu vực nghiên cứu, đồng thời làm cơ sở phục vụ giám sát sinh khối, ước tính trữ lượng carbon và hỗ trợ quản lý rừng ngập mặn ven biển theo hướng bền vững. Kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho ứng dụng dữ

liệu Sentinel-1 và Sentinel-2 trong ước tính sinh khối rừng ngập mặn, đồng thời cung cấp công cụ hỗ trợ giám sát carbon, quản lý rừng ven biển và phục vụ các chương trình giảm phát thải trong lĩnh vực lâm nghiệp. Trong các nghiên cứu tiếp theo có thể xây dựng mô hình đa biến, mô hình học máy, bổ sung thêm các biến khác như chế độ thủy triều, địa hình và có thể thử với dữ liệu có khả năng phản ánh tốt hơn về cấu trúc rừng như Radar ở dải băng tần L hoặc Lidar nhằm giúp cải thiện độ chính xác của mô hình.

Lời cảm ơn: Đây là kết quả nghiên cứu thuộc Luận án tiến sĩ “Nghiên cứu cơ sở khoa học và xây dựng mô hình ước tính trữ lượng carbon rừng ngập mặn từ dữ liệu viễn thám tại phía Bắc Việt Nam” của NCS Nguyễn Văn Thị, chúng tôi xin được gửi lời cảm ơn đến tập thể lãnh đạo và nhân viên Viện Sinh thái rừng và Môi trường đã tạo điều kiện cho NCS tham gia điều tra thu thập số liệu thực địa và hỗ trợ chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Alongi, D. M., 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331 – 349. DOI: 10.1017/S0376892902000231.
- Alongi, D. M., 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6(1), 195 – 219. DOI: 10.1146/annurev-marine-010213-135020.
- Aslan, A., Rahman, A. F., Sánchez-Azofeifa, G. A., 2021. Remote sensing-based carbon stock estimation in mangrove forests. *Remote Sensing of Environment*, 257, 112329.
- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G., 2017. Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 70 – 85. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.10.016
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., Kanninen, M., 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293 – 297. DOI: 10.1038/ngeo1123.
- Duke, N. C., Meynecke, J. O., Dittmann, S., Ellison, A. M., Anger, K., Berger, U., 2007. A world without mangroves? *Science*, 317(5834), 41-42. DOI: 10.1126/science.317.5834.41b.
- Fatoyinbo, T. E., Simard, M., 2013. Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM. *International Journal of Remote Sensing*, 34(2), 668 – 681. DOI: 10.1080/01431161.2012.712224.
- Feller, I. C., Friess, D. A., Krauss, K. W., Lewis, R. R., 2017. The state of the world's mangroves in the 21st century under climate change. *Hydrobiologia*, 803, 1 – 12. DOI: 10.1007/s10750-017-3331-z
- Ghosh, S. M., Behera, M. D., Paramanik, S., 2021. Aboveground biomass estimates of tropical mangrove forest using Sentinel-1 SAR coherence data: The superiority of deep learning over semi-empirical model. *Computers & Geosciences*, 150, 104737. DOI: 10.1016/j.cageo.2021.104737.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154 – 159. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.

11. Giri, C., Long, J., Abbas, S., Murali, R. M., Qamer, F. M., Pengra, B., Thau, D., 2015. Distribution and dynamics of mangrove forests of South Asia. *Journal of Environmental Management*, 148, 101-111. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.01.020.
12. Nguyen Hai Hoa, Vu Van Truong, Nguyen Thi Thu Hien, Ha Tri Son, Nguyen Van Thi, Nguyen Trong Cuong, Nguyen Thi Bich Hao, Tran Thi Huong, Phan Duc Le, Phan Van Dung, Thai Thi Thuy An, Le Phu Tuan, 2024. Mangrove above-ground carbon estimation from Sentinel-1A (SAR) and field-based data in Tien Yen district, Quang Ninh province. *Journal of Forestry Science and Technology*, 9(1), 073 – 085. DOI: 10.55250/jo.vnuf.9.1.2024.073-085
13. Huang, Z., Tian, Y., Zhang, Q., Huang, Y., Liu, R., Huang, H., Zhou, G., Wang, J., Tao, J., Yang, Y., Zhang, Y., Lin, J., Tan, Y., Deng, J., Liu, H., 2022. Estimating mangrove above-ground biomass at Maowei Sea, Beibu Gulf of China using machine learning algorithm with Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Geocarto International*, 37(27), 15778 – 15805. DOI: 10.1080/10106049.2022.2102226
14. Kauffman, J. B., Donato, D. C., 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. CIFOR Working Paper No. 86. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research. DOI: 10.17528/cifor/003749.
15. Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T. V., Dech, S., 2011. Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3(5), 878 – 928. DOI: 10.3390/rs3050878.
16. Lagomasino, D., Fatoyinbo, T. E., Lee, S. K., Feliciano, E., Trettin, C., Shapiro, A., & Mangora, M. M., 2019. Measuring mangrove carbon loss and gain in deltas. *Environmental Research Letters*, 14(2), 025002. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf0de.
17. Luong, N. V., Tu, T. T., Khoi, A. L., Hoan, T. N., Thuy, T. L. H., 2018. Biomass estimation and mapping of Can Gio mangrove biosphere reserve in South of Viet Nam using ALOS-2 PALSAR-2 data. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 15 – 31. DOI: 10.15666/aeer/1701_015031
18. Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., Kurnianto, S., 2015. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089-1092. DOI: 10.1038/nclimate2734.
19. Nasirzadehdizaji, R., Sanli, F. B., Abdikan, S., Cakir, Z., Sekertekin, A., Ustuner, M., 2019. Sensitivity analysis of multi-temporal Sentinel-1 SAR parameters to crop height and canopy coverage. *Applied Sciences*, 9(4), 655. DOI: 10.3390/app9040655.
20. Nguyễn Văn Huy, Phạm Thị Thanh Hương, Lê Xuân Phương, 2020. Hiện trạng và biến động diện tích rừng ngập mặn Việt Nam giai đoạn 2000 - 2020. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn*, 21(4), 112 – 124.
21. Pham, T. D., Yoshino, K., Le, N. N., Bui, D. T., 2018. Estimating aboveground biomass of a mangrove plantation on the Northern coast of Vietnam using machine learning techniques with an integration of ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-2A data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(22), 7761 – 7788. DOI: 10.1080/01431161.2018.1471544.
22. Pham, T. D., Yokoya, N., Xia, J., Ha, N. T., Le, N. N., Nguyen, T. T. T., Dao, T. H., Vu, T. T. P., Pham, T. D., Takeuchi, W., 2020. Comparison of machine learning methods for estimating mangrove above-ground biomass using multiple source remote sensing data in the Red River Delta Biosphere Reserve, Vietnam. *Remote Sensing*, 12(8), 1334. DOI: 10.3390/rs12081334.
23. Rovai, A. S., Twilley, R. R., Castañeda-Moya, E., 2018. Global controls on carbon storage in mangrove soil. *Nature Climate Change*, 8(6), 534 – 538. DOI: 10.1038/s41558-018-0162-5.
24. Simard, M., Fatoyinbo, L., Smetanka, C., Rivera-Monroy, V. H., Castaneda-Moya, E., Thomas, N., Van der Stocken, T., 2019. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience*, 12(1), 40-45. DOI: 10.1038/s41561-018-0279-1.

Email tác giả liên hệ: hoan@vnuf.edu.vn

Ngày nhận bài: 11/6/2026

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 03/7/2026; 04/7/2026

Ngày duyệt đăng: 14/7/2026