Tạp chí KHLN Số 6/2026: 123 - 139
©: Viện KHLNVN - VAFS
DOI: https://doi.org/10.70169/VJFS.1286
ISSN: 1859 - 0373 Đăng tải tại: https://vjfs.vafs.gov.vn

SINH TRƯỞNG, SINH KHỐI, TÍCH LŨY CARBON VÀ HIỆU QUẢ KINH TẾ CỦA RỪNG TRỒNG KEO LAI 11,5 TUỔI TẠI QUẢNG TRỊ

Vũ Đức Bình[1], Hồ Thanh Hà[2], Phạm Xuân Đỉnh[1], Nguyễn Hải Thành[1], Lê Công Định[1], Hoàng Văn Tuấn[1], Nguyễn Xuân Tùng[1], Nguyễn Tùng Lâm[1], Lê Xuân Toàn[1], Nguyễn Thị Thanh Nga[1]

[1]Trung tâm Khoa học Lâm nghiệp Bắc Trung Bộ
[2]Trường Đại học Nông Lâm - Đại học Huế

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá sinh trưởng, sinh khối, tích lũy carbon và hiệu quả kinh tế của rừng trồng keo lai (*Acacia mangium* × *A. auriculiformis*) 11,5 tuổi tại tỉnh Quảng Trị. Số liệu được thu thập trên 09 ô tiêu chuẩn 500 m², 27 cây tiêu chuẩn chặt hạ giải tích sinh khối và 45 ô dạng bản 4 m². Mật độ lâm phần hiện tại đạt 907 ± 66 cây/ha, đường kính ngang ngực ($D_{1,3}$) bình quân 17,50 ± 0,50 cm, chiều cao vút ngọn (H_{vn}) bình quân 21,19 ± 0,33 m, trữ lượng cây đứng 224,98 ± 6,24 m³/ha, tăng trưởng bình quân năm của trữ lượng cây đứng 19,56 ± 0,54 m³/ha/năm. Đường kính biến động mạnh hơn chiều cao; 73,0% số cây đạt $D_{1,3} \geq 15$ cm nhưng chỉ 25,9% đạt ≥ 20 cm. Tổng sinh khối khô trên mặt đất đạt 176,1 ± 2,9 tấn/ha (tầng cây gỗ 88,5%, cây bụi thảm tươi 5,9% và vật rơi rụng 5,6%); ở cấp cây cá lẻ, sinh khối tập trung ở thân (76,7%), cành (11,6%), vỏ (8,4%) và lá (3,3%). Sinh khối khô các bộ phận tương quan chặt với $D_{1,3}$ theo hàm lũy thừa $W = a \times D_{1,3}^{b}$ (R^2 = 0,88 - 0,96; $p < 0,001$). Trữ lượng carbon trên mặt đất đạt 82,8 ± 1,4 tấn C/ha (chưa tính rễ và carbon trong đất), tương đương 303,8 ± 5,0 tấn CO_2/ha, mức tích lũy bình quân theo tuổi 26,4 ± 0,4 tấn CO_2/ha/năm. Với lãi suất chiết khấu 7%/năm, phương án phân loại sản phẩm theo cấp kính đạt NPV 106,2 triệu đồng/ha, EAV 13,7 triệu đồng/ha/năm, LEV 196,4 triệu đồng/ha, BCR 2,7 lần và IRR 32,4%/năm, cao hơn phương án gỗ dăm 32,3 triệu đồng/ha NPV (43,6%). Tại tuổi 11,5, lâm phần vẫn duy trì sinh trưởng và hiệu quả tài chính tích cực, cho thấy triển vọng kéo dài chu kỳ kinh doanh keo lai theo hướng gỗ lớn.

Từ khóa: Keo lai, hiệu quả kinh tế, sinh khối, sinh trưởng, tích lũy carbon.

GROWTH, BIOMASS, CARBON STOCK AND ECONOMIC EFFICIENCY OF AN 11.5-YEAR-OLD ACACIA HYBRID PLANTATION IN QUANG TRI PROVINCE, VIETNAM

Vu Duc Binh[1], Ho Thanh Ha[2], Pham Xuan Dinh[1], Nguyen Hai Thanh[1], Le Cong Dinh[1], Hoang Van Tuan[1], Nguyen Xuan Tung[1], Nguyen Tung Lam[1], Le Xuan Toan[1], Nguyen Thi Thanh Nga[1]

[1]Forest Science Centre for North of Central Vietnam
[2]University of Agriculture and Forestry, Hue University

SUMMARY

This study assessed the growth, aboveground biomass, carbon stock and economic efficiency of an 11.5-year-old acacia hybrid (*Acacia mangium* × *A. auriculiformis*) plantation in Quang Tri province, Vietnam. Data were collected from nine 500 m² sample plots, 27 sample trees felled for biomass and stem analysis, and 45 quadrats of 4 m². Current stand density was 907 ± 66 trees ha^{-1}, mean diameter at breast height (DBH) 17.50 ± 0.50 cm, mean total height 21.19 ± 0.33 m and standing volume 224.98 ± 6.24 m³ ha^{-1}, corresponding to a mean annual increment of standing volume of 19.56 ± 0.54 m³ ha^{-1} yr^{-1}. DBH was more variable than height; 73.0% of trees reached DBH ≥ 15 cm but only 25.9% reached ≥ 20 cm. Total aboveground dry biomass was 176.1 ± 2.9 t ha^{-1} (tree layer 88.5%, understorey vegetation 5.9%, litter 5.6%); at the individual-tree level, biomass was concentrated in stemwood (76.7%), branches (11.6%), bark (8.4%) and foliage (3.3%). Component dry biomass was closely related to DBH through the power function $W = a \times DBH^{b}$ (R^2 = 0.88 - 0.96; $p < 0.001$). Aboveground carbon stock was 82.8 ± 1.4 t C ha^{-1} (roots and soil organic carbon excluded), equivalent to 303.8 ± 5.0 t CO_2 ha^{-1} and to 26.4 ± 0.4 t CO_2 ha^{-1} yr^{-1} when averaged over stand age. At a 7% discount rate, grading

the harvest by log small-end diameter class returned a net present value (NPV) of 106.2 million VND ha^{-1}, an equivalent annual value (EAV) of 13.7 million VND ha^{-1} yr^{-1}, a land expectation value (LEV) of 196.4 million VND ha^{-1}, a benefit-cost ratio (BCR) of 2.70 and an internal rate of return (IRR) of 32.4%, exceeding the all-woodchip option by 32.3 million VND ha^{-1} in NPV (43.6%). At age 11.5 years the stand still maintained good growth and positive financial performance, indicating potential for extending acacia hybrid rotations towards sawlog production.

Keywords: Acacia hybrid, biomass, carbon accumulation, economic efficiency, growth.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rừng trồng sản xuất đóng vai trò ngày càng quan trọng trong việc cung cấp nguyên liệu gỗ, giảm áp lực khai thác rừng tự nhiên, tạo sinh kế và đóng góp vào mục tiêu tăng trưởng xanh của ngành lâm nghiệp. Ở Việt Nam, tổng diện tích rừng đạt khoảng 14,97 triệu ha, trong đó rừng trồng chiếm khoảng 4,89 triệu ha (Bộ Nông nghiệp và Môi trường, 2026). Keo lai là giống lai giữa Keo tai tượng (*Acacia mangium* Willd.) và Keo lá tràm (*Acacia auriculiformi*s A.Cunn. ex Benth.) có đặc điểm ưu việt về khả năng sinh trưởng và cải tạo đất tốt, có tính chất gỗ phù hợp trong công nghiệp chế biến (Lê Đình Khả, 1993). Đây là một trong những loài cây trồng rừng chủ yếu tại Việt Nam nhờ đặc tính sinh trưởng nhanh, biên độ sinh thái rộng và hiệu quả kinh tế cao (Van Bueren, 2004; Arvola *et al.*, 2021).

Chu kỳ kinh doanh (tuổi khai thác) rừng trồng keo lai thường được chọn là 5 hoặc 6 năm theo kinh nghiệm mà chưa dựa trên cơ sở đánh giá năng suất gỗ và phân tích tài chính, do vậy lợi nhuận thu được trên đơn vị diện tích rừng trồng thường thấp (Đỗ Anh Tuân, 2013). Để khắc phục hạn chế này, chuyển hóa rừng trồng keo lai sang kinh doanh gỗ lớn với chu kỳ kinh doanh 10 - 15 năm phù hợp với định hướng tái cơ cấu ngành lâm nghiệp theo hướng nâng cao giá trị gia tăng, phát triển rừng trồng gỗ lớn và quản lý rừng bền vững (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, 2019; Chính phủ, 2021). Một số nghiên cứu cho thấy chu kỳ kinh doanh gỗ lớn đối với keo lai đạt hiệu quả tối ưu ở khoảng 9 - 10 năm, với lợi nhuận cao hơn so với chu kỳ 5 năm phục vụ sản xuất gỗ dăm (Arvola *et al.*, 2021; Ho Thanh Ha *et al.*, 2025). Tuy nhiên, việc kéo dài chu kỳ kinh doanh keo lai sản xuất gỗ lớn cần được xem xét cùng với các rủi ro về gió bão, sâu bệnh hại và yêu cầu vốn đầu tư dài hạn (Blackburn *et al.*, 2020; Minh *et al.*, 2021; Thu *et al.*, 2021). Vì vậy, cần bổ sung các nghiên cứu thực nghiệm theo vùng sinh thái và điều kiện lập địa cụ thể để xác định chu kỳ kinh doanh phù hợp, đồng thời gắn với các giải pháp duy trì độ phì lập địa và năng suất qua các luân kỳ (Nambiar *et al.*, 2015).

Sinh khối và trữ lượng carbon của rừng trồng keo lai ngày càng được quan tâm trong bối cảnh Việt Nam phát triển thị trường carbon và cơ chế chi trả dịch vụ hấp thụ, lưu giữ carbon của rừng (Chính phủ, 2026). Một số nghiên cứu đã đánh giá sinh trưởng, sinh khối và hấp thụ CO_2 của rừng trồng keo lai tại nhiều địa phương như Yên Bái, Phú Thọ, Quảng Trị, Bình Định, Quảng Nam, Đồng Nai, Bà Rịa Vũng Tàu và Thành phố Hồ Chí Minh (Ngô Đình Quế *et al.*, 2006; Võ Đại Hải *et al.*, 2009; Trần Thị Ngoan, Nguyễn Tấn Chung, 2018; Trần Quang Bảo, Võ Thành Phúc, 2019; Nguyễn Văn Bích *et al.*, 2020, 2022; Nguyễn Văn Tuấn *et al.*, 2024; Ho Thanh Ha *et al.*, 2025). Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trên chỉ tập trung ở rừng trồng keo lai đến 8 tuổi; dữ liệu về sinh khối và carbon của rừng keo lai trên 10 năm tuổi còn hạn chế, trong khi đây là cơ sở quan trọng cho định giá dịch vụ môi trường rừng, thương mại carbon và kinh doanh gỗ lớn.

Quảng Trị là một trong những địa phương có điều kiện thuận lợi để phát triển rừng trồng keo lai thâm canh theo hướng gỗ lớn và đã có một số nghiên cứu riêng lẻ về sinh trưởng, năng suất, sinh khối và hiệu quả kinh tế của rừng keo lai ở các cấp tuổi khác nhau (Trần Duy Rương, 2013;

Nguyễn Huy Sơn, Phạm Xuân Đỉnh, 2016). Tuy nhiên, các đánh giá tổng hợp đồng thời cả bốn nhóm chỉ tiêu này ở rừng keo lai trên 10 tuổi vẫn còn thiếu.

Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện nhằm: (i) đánh giá sinh trưởng và trữ lượng rừng; (ii) xác định đặc điểm sinh khối và trữ lượng carbon tích lũy trên mặt đất của lâm phần; và (iii) phân tích hiệu quả kinh tế của rừng trồng keo lai kinh doanh gỗ lớn ở tuổi 11,5 tại tỉnh Quảng Trị. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn để hoàn thiện quy trình kỹ thuật trồng rừng thâm canh gỗ lớn, góp phần nâng cao giá trị rừng trồng và thúc đẩy quản lý rừng bền vững ở địa phương.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và địa điểm nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là rừng trồng keo lai thuần loài chu kỳ thứ hai với hỗn hợp 02 giống BV16 và BV33 được nhân giống bằng phương pháp giâm hom. Hai giống được trồng hỗn giao trên toàn bộ diện tích lô, không bố trí thành các ô riêng theo từng giống. Mô hình được trồng tháng 11 năm 2014; đến thời điểm điều tra tháng 6/2026 đạt 11,5 tuổi. Mật độ trồng ban đầu là 1.660 cây/ha (khoảng cách cây cách cây 2 m, hàng cách hàng 3 m). Biện pháp kỹ thuật lâm sinh chủ yếu đã áp dụng: phát, băm dập thực bì tại chỗ, cuốc hố thủ công (40 × 40 × 30 cm), bón lót và bón thúc phân với liều lượng 200 gam NPK (5:10:3)/cây; chăm sóc 02 lần/năm trong 3 năm sau khi trồng. Mô hình đã được tỉa thưa nuôi dưỡng 01 lần ở tuổi 4 (năm 2019) theo phương thức chọn lọc, loại bỏ cây sinh trưởng kém, cong queo, sâu bệnh và cây bị chèn ép; (mật độ trước tỉa thưa khoảng từ 1.440 đến 1.536 cây/ha; mật độ sau tỉa từ 1.100 đến 1.200 cây/ha), sản lượng tận thu đạt 36,0 tấn/ha. Sau đó lâm phần được vệ sinh rừng (loại bỏ khoảng 10% số cây bị gãy đổ) do ảnh hưởng của cơn bão số 13 năm 2020 và tiếp tục bị tỉa thưa tự nhiên hằng năm.

Địa điểm nghiên cứu tại lô b5 và b7, khoảnh 2, tiểu khu 776, xã Hiếu Giang, tỉnh Quảng Trị, tọa độ trung tâm khoảng 16°46′N, 107°00′E (WGS84), với tổng diện tích lâm phần 8,0 ha. Khí hậu khu vực nghiên cứu thuộc nhiệt đới ẩm gió mùa, nhiệt độ trung bình hàng năm dao động từ 22 đến 23°C. Lượng mưa trung bình hàng năm từ 2.300 đến 2.400 mm, tập trung từ tháng 9 năm trước đến tháng 2 năm sau, chiếm từ 75 đến 85% tổng lượng mưa. Độ ẩm không khí trung bình tháng từ 85 đến 90%. Đất đai thuộc loại đất feralit phát triển trên phiến thạch sét (Fs), độ dày tầng đất từ 50 đến 100 cm, tỷ lệ đá lẫn chiếm khoảng 20%. Địa hình dạng đồi thấp, độ dốc bình quân < 15°, độ cao bình quân so với mực nước biển dao động từ 45 đến 50 m. Thực bì phát triển mạnh gồm các loài cỏ, sim mua, cây bụi có chiều cao trung bình từ 1,5 - 2,0 m, chiếm tỷ lệ < 50%.

2.2. Phương pháp thu thập số liệu ngoại nghiệp

Việc điều tra, thu thập số liệu ngoại nghiệp được thực hiện tháng 6 năm 2026. Tổng cộng 09 ô tiêu chuẩn (OTC) điển hình đã được thiết lập rải đều trên toàn bộ diện tích của lâm phần keo lai, mỗi ô có diện tích 500 m², kích thước 25 × 20 m. Các OTC được bố trí theo phương pháp điển hình có định hướng, bảo đảm: (i) đại diện cho các vị trí địa hình (chân, sườn và đỉnh đồi) của lâm phần; (ii) cách bìa lô tối thiểu 20 m; (iii) khoảng cách giữa các OTC tối thiểu 50 m và phân bố đều trên 8,0 ha theo ba tuyến song song, mỗi tuyến 03 OTC. Tổng diện tích ô điều tra 4.500 m², tương ứng cường độ điều tra 0,56% diện tích lâm phần.

Các số liệu thu thập bao gồm:

- *Thu thập số liệu sinh trưởng và sinh khối của tầng cây cao:*

Trong các OTC điển hình đã thiết lập, tiến hành đo đếm đường kính tại vị trí 1,3 m ($D_{1,3}$), chiều

cao vút ngọn (H_{vn}) của tất cả các cây keo lai trong OTC. Sau khi thu thập số liệu sinh trưởng, mỗi OTC chọn 3 cây tiêu chuẩn đại diện cho ba cấp đường kính: lớn, trung bình và nhỏ, có tổng tiết diện ngang bằng nhau. Phân cấp đường kính được áp dụng theo phương pháp của Vũ Tiến Hinh (2012): toàn bộ số cây trong mỗi OTC được sắp xếp theo thứ tự đường kính tăng dần và chia thành ba tổ có tổng tiết diện ngang bằng nhau (mỗi tổ chiếm 1/3 tổng tiết diện ngang của OTC); trong mỗi tổ chọn 01 cây có đường kính gần nhất với đường kính bình quân theo tiết diện của tổ đó. Cây tiêu chuẩn phải sinh trưởng bình thường, thân thẳng, một ngọn, tán cân đối, không sâu bệnh, không cụt ngọn và không nằm ở hàng biên của OTC. Tổng cộng 27 cây tiêu chuẩn (03 cây/OTC × 9 OTC) được chọn để điều tra sinh khối và trữ lượng carbon tích lũy.



Hình 1. Thu thập số liệu sinh trưởng trong OTC và lấy mẫu sinh khối cây tiêu chuẩn

Sinh khối tầng cây cao được xác định bằng phương pháp cây tiêu chuẩn kết hợp chặt hạ giải tích sinh khối. Cụ thể: Sau khi chặt hạ, cây tiêu chuẩn được phân chia thành các bộ phận gồm gỗ thân, vỏ, cành và lá. Thân cây được cắt thành các đoạn có chiều dài 2 m, cân khối lượng tươi cả vỏ, sau đó bóc vỏ để xác định riêng khối lượng vỏ và gỗ thân. Cành và lá được tách riêng và cân khối lượng tươi ngay tại hiện trường. Các đoạn thân và vỏ được cân bằng cân bàn 100 kg có độ chính xác 0,1 kg; cành, lá và các mẫu mang về phòng thí nghiệm được cân bằng cân bàn 1 kg có độ chính xác 2,5 g. Sau khi cân sinh khối xong, tiến hành thu thập khoảng từ 200 g đến 500 g/mẫu cho mỗi bộ phận gồm gỗ thân, vỏ, cành và lá. Mẫu được đựng trong túi nilon buộc kín và ghi ký hiệu cây tiêu chuẩn, loại mẫu, khối lượng mẫu, ngày lấy và người lấy mẫu. Mẫu sau đó được chuyển về phòng thí nghiệm. Tổng số mẫu sinh khối tầng cây cao là 108 mẫu (27 cây tiêu chuẩn × 4 mẫu bộ phận/cây).

- *Thu thập số liệu sinh khối cây bụi, thảm tươi và vật rơi rụng:*

Cây bụi thảm tươi và vật rơi rụng được thu thập trong 5 ô dạng bản (4 m^2) ở 4 góc OTC và 01 ô ở giữa tâm OTC. Tổng số ô dạng bản là 45 ô. Trong từng ô dạng bản, tiến hành cắt toàn bộ cây bụi, thảm tươi và thu gom vật rơi rụng trên mặt đất. Cây bụi thảm tươi được phân thành hai loại là cây bụi (cây thân gỗ) và thảm tươi (dạng cỏ); vật rơi rụng cũng được phân thành hai loại là cành nhánh, thân cây khô và lá, hoa, quả khô. Khối lượng tươi của cây bụi thảm tươi và vật rơi rụng được cân riêng tại hiện trường.

Đối với mỗi OTC, toàn bộ vật liệu thu thập từ 5 ô dạng bản được trộn đều, sau đó lấy ngẫu nhiên khoảng từ 200 g đến 300 g đại diện cho mẫu tổ hợp cây bụi thảm tươi và 1 mẫu cho vật rơi rụng để phân tích trong phòng thí nghiệm.



Hình 2. Thu thập số liệu sinh khối cây bụi thảm tươi và vật rơi rụng trong các ô dạng bản

- *Thu thập số liệu đánh giá hiệu quả kinh tế:*

Hiệu quả kinh tế của rừng trồng keo lai 11,5 tuổi được đánh giá trên cơ sở tổng hợp toàn bộ chi phí đầu tư và doanh thu thu được trong một chu kỳ kinh doanh. Các khoản chi phí được thu thập gồm chi phí cây giống, xử lý thực bì, làm đất, trồng rừng, bón phân, chăm sóc, bảo vệ, tỉa thưa, khai thác, vận chuyển. Các khoản thu được xác định từ sản lượng gỗ tỉa thưa và sản lượng gỗ khai thác chính ở tuổi 11,5. Doanh thu được tính trên cơ sở khối lượng thể tích và cơ cấu sản phẩm theo cấp kính được xác định trực tiếp từ số liệu giải tích của 27 cây tiêu chuẩn và đơn giá bán được khảo sát tại các nhà máy và xưởng chế biến trong tháng 7 năm 2026, sau đợt điều tra hiện trường. Cơ cấu sản phẩm theo cấp kính được xác định như sau: mỗi cây tiêu chuẩn được cắt thành các khúc dài 2 m, đo đường kính đầu lớn, đầu nhỏ và chiều dài của từng khúc; các khúc được phân thành ba nhóm theo đường kính đầu nhỏ (dưới 15 cm; từ 15 đến 20 cm; trên 20 cm). Tỷ lệ thể tích của ba nhóm sản phẩm được gia quyền theo tổng thể tích thân cây của từng cấp đường kính trong phân bố số cây theo cấp kính thực tế của 09 OTC, sau đó mới suy rộng cho toàn lâm phần.

2.3. Phương pháp xử lý nội nghiệp

Số liệu điều tra được xử lý bằng phần mềm Microsoft Excel 365. Các chỉ tiêu thống kê mô tả gồm giá trị trung bình, sai tiêu chuẩn, hệ số biến động và khoảng biến động được tính cho các chỉ tiêu sinh trưởng, trữ lượng, sinh khối và hiệu quả kinh tế của mô hình.

2.3.1. Tính toán xác định các chỉ tiêu sinh trưởng và trữ lượng cây đứng

Từ số liệu điều tra đã thu thập được tiến hành tính toán các giá trị trung bình của OTC và lâm phần. Thể tích thân cây bình quân được xác định theo công thức:

$$V=\frac{\pi}{40000}\times D_{1,3}^2\times H_{vn}\times f$$

Trong đó: V là thể tích thân cây (m^3/cây);

$D_{1,3}$ là đường kính đo tại vị trí 1,3 m (cm);

H_{vn} là chiều cao vút ngọn (m);

f là hình số thân cây;

$\pi = 3{,}1416.$

Hình số f được xác định từ số liệu giải tích của 27 cây tiêu chuẩn theo công thức $f = V/(g_{1,3} \times H_{vn})$, trong đó V là thể tích thân cây thực đo, xác định bằng cách cộng dồn thể tích của các phân đoạn dài 2 m; $g_{1,3} = (\pi/40000) \times D_{1,3}^2$ là tiết diện ngang tại vị trí 1,3 m và H_{vn} là chiều cao vút ngọn. Giá trị hình số bình quân của 27 cây tiêu chuẩn là 0,50; do đó f = 0,50 được sử dụng chung cho toàn lâm phần.

2.3.2. Xác định sinh khối của lâm phần

Toàn bộ các mẫu thực vật bao gồm mẫu thân, cành, lá, vỏ (tầng cây cao), cây bụi, thảm tươi và mẫu cành, lá khô (vật rơi rụng) sau khi được chuyển về phòng thí nghiệm được sấy ở nhiệt độ 105°C trong 6 đến 8 giờ đến khối lượng

không đổi để xác định tỷ lệ khô/tươi của từng bộ phận. Cân khối lượng khô của mẫu bằng cân điện tử có độ chính xác đến 0,001 g.

Nghiên cứu này chỉ tập trung xác định sinh khối trên mặt đất bao gồm gỗ thân, vỏ, cành và lá; sinh khối dưới mặt đất (rễ) không được đo đếm trực tiếp.

- *Xác định sinh khối khô của tầng cây cao:* Từ tỷ lệ khô tươi được xác định ở trên, tiến hành quy đổi để xác định sinh khối khô của từng bộ phận cho từng cây tiêu chuẩn. Tiếp đến, sử dụng số liệu sinh khối và sinh trưởng của 27 cây tiêu chuẩn để xây dựng phương trình tương quan giữa sinh khối khô của từng bộ phận với đường kính ($D_{1,3}$) của cây tiêu chuẩn. Các phương trình tương quan sinh khối được xây dựng bằng phương pháp hồi quy thông qua các dạng hồi quy thông dụng như: Tuyến tính (Y = a + b.X); Logarit (Y= a + b.lnX); Hàm mũ (Power): (Y = a. X^b); Hàm số mũ (exponential): Y = a.e^(bX). Dạng hàm lũy thừa được lựa chọn và được ước lượng bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất sau khi tuyến tính hóa trên thang logarit tự nhiên: $\ln W = \ln a + b \times \ln D_{1,3}$. Phép lấy logarit đồng thời khắc phục hiện tượng phương sai sai số không thuần nhất; các giả định của mô hình được kiểm tra qua biểu đồ phần dư và biểu đồ xác suất chuẩn của phần dư trên thang logarit. Mức độ phù hợp của phương trình được đánh giá đồng thời bằng hệ số xác định R^2, sai số tiêu chuẩn của ước lượng (SEE) trên thang logarit, sai số bình phương trung bình gốc (RMSE) và sai lệch hệ thống (bias) trên thang sinh khối, cùng mức ý nghĩa của các tham số hồi quy. Do phép quy đổi ngược từ thang logarit về thang gốc cho giá trị trung vị chứ không phải giá trị trung bình nên sinh khối bị ước lượng thấp một cách hệ thống; vì vậy hệ số hiệu chỉnh của Baskerville (1972), $CF = \exp(SEE^2/2)$, đã được tính cho từng phương trình. Phương trình tương quan phù hợp nhất được sử dụng để tính toán sinh khối từng bộ phận và tổng sinh khối của tầng cây cao cho từng OTC, sau đó quy đổi cho cả lâm phần (tấn/ha).

- *Xác định sinh khối khô của cây bụi thảm tươi và vật rơi rụng:* Sử dụng tỷ lệ khô tươi được xác định cho từng bộ phận của cây bụi thảm tươi và vật rơi rụng, tiến hành quy đổi để tính sinh khối khô của từng bộ phận cho mỗi ô dạng bản, sau đó quy đổi ra cho cả lâm phần.

2.3.3. Xác định trữ lượng carbon tích lũy trên mặt đất của lâm phần

Sử dụng hàm tương quan giữa tổng sinh khối khô của cây cá lẻ với đường kính ($D_{1,3}$) đã xác định và số liệu ($D_{1,3}$) của từng cây trong OTC để tính toán trữ lượng carbon và lượng CO_2 tương đương được lưu giữ trong sinh khối trên mặt đất, xác định lượng CO_2 tích lũy bình quân theo tuổi và đánh giá tổng trữ lượng carbon của OTC và lâm phần.

- Hàm lượng carbon trong sinh khối khô (Wcarbon) được xác định bằng hệ số mặc định CF = 0,47 tấn C/tấn sinh khối khô của IPCC cho rừng nhiệt đới (IPCC, 2019). Hàm lượng carbon trên mặt đất là tổng hàm lượng carbon của tầng cây cao (thân, vỏ, cành, lá), tầng cây bụi, thảm tươi và vật rơi rụng, được tính theo công thức:

Wcarbon = [Wk (thân) + Wk (vỏ) + Wk (cành) + Wk (lá) + Wk (thảm tươi) + Wk (vật rơi rụng)] × 0,47 (tấn/ha).

- Lượng CO_2 tương đương được lưu giữ trong sinh khối của cây cá lẻ (kg/cây) và của lâm phần (tấn/ha): Sử dụng hệ số quy đổi:

$$WCO_2 = 3{,}67\ Wcarbon.$$

- Lượng CO_2 tích lũy bình quân theo tuổi của lâm phần được xác định bằng tổng lượng CO_2 tương đương đang được lưu giữ chia cho tuổi rừng: $\Delta CO_2S = CO_2S/A$ (tấn/ha/năm).

Trong đó: ΔCO_2S: Lượng CO_2 tích lũy bình quân theo tuổi (tấn/ha/năm); chỉ tiêu này được tính từ trữ lượng hiện hữu chia cho tuổi rừng (11,5 tuổi), chưa trừ phần sinh khối đã lấy ra khi tỉa thưa; A: Tuổi rừng (năm).

2.3.4. Phương pháp đánh giá hiệu quả kinh tế

Hiệu quả kinh tế của mô hình được đánh giá bằng năm chỉ tiêu: giá trị hiện tại ròng (NPV), tỷ suất thu nhập trên chi phí (BCR), tỷ suất hoàn vốn nội bộ (IRR), giá trị tương đương hằng năm (EAV) và giá trị kỳ vọng của đất (LEV). LEV được xác định theo công thức:

$$LEV = NPV/(1 - (1 + r)^{-A}) = EAV/r$$

Trong đó: r là lãi suất chiết khấu; A là độ dài chu kỳ kinh doanh (Chang, 1984).

Phân tích được thực hiện trên dòng tiền danh nghĩa theo quy ước cuối năm, chi phí và doanh thu tính theo giá thực tế tại thời điểm phát sinh. Lãi suất chiết khấu cơ sở được chọn là 7%/năm. Phân tích độ nhạy được thực hiện theo hai chiều: lãi suất chiết khấu ở các mức 6, 7, 8 và 12%/năm và giá bán sản phẩm biến động ± 10% và ± 20% so với mức cơ sở. IRR được xác định bằng cách giải phương trình NPV = 0 với thời điểm khai thác chính đặt tại t = 11,5 năm. Năm gốc chiết khấu là thời điểm trồng rừng (tháng 11/2014, t = 0). Thời điểm phát sinh của các dòng tiền được quy ước như sau: chi phí cây giống, vật tư, xử lý thực bì, làm đất và trồng rừng ở năm thứ nhất; chi phí phân bón thúc và chăm sóc ở năm thứ hai và năm thứ ba; chi phí bảo vệ rừng phân bổ đều từ năm thứ tư đến tuổi 11,5; khoản thu và chi phí tỉa thưa tại t = 4 (năm 2019); toàn bộ doanh thu và chi phí khai thác chính tại t = 11,5 (năm 2026). Do chi phí và doanh thu được lấy theo giá danh nghĩa tại thời điểm phát sinh nên lãi suất chiết khấu 7%/năm cũng là lãi suất danh nghĩa, tương ứng mức lãi suất cho vay trung và dài hạn bình quân của các ngân hàng thương mại đối với lĩnh vực nông, lâm nghiệp giai đoạn 2014 - 2026.

Các mức lãi suất dùng cho phân tích độ nhạy được chọn tương ứng với: lãi suất tín dụng ưu đãi cho trồng rừng sản xuất (6%/năm), mức cơ sở (7%/năm), mức lãi suất thương mại phổ biến (8%/năm) và mức lãi suất cao trong giai đoạn thắt chặt tiền tệ (12%/năm). Biên độ giá ± 10% và ± 20% phản ánh dải biến động giá gỗ nguyên liệu đã ghi nhận tại Quảng Trị giai đoạn 2020 - 2026.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc điểm sinh trưởng và trữ lượng rừng trồng keo lai 11,5 tuổi

Kết quả đánh giá sinh trưởng và trữ lượng của rừng trồng keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị được tổng hợp tại bảng 1 cho thấy, rừng trồng keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị có sinh trưởng khá tốt, mật độ hiện tại bình quân đạt 907 ± 66 cây/ha, đường kính ngang ngực ($D_{1,3}$) trung bình đạt 17,5 ± 0,5 cm, chiều cao vút ngọn (H_{vn}) trung bình 21,19 ± 0,33 m. Trữ lượng cây đứng đạt 224,98 ± 6,24 m³/ha, tương ứng lượng tăng trưởng bình quân năm (MAI) đạt 19,56 ± 0,54 m³/ha/năm (MAI trong nghiên cứu này không bao gồm phần sản lượng đã lấy ra và thấp hơn tổng năng suất thực của cả chu kỳ).

Về độ biến động của các chỉ tiêu $D_{1,3}$ và H_{vn} cho thấy đường kính phân hóa mạnh hơn chiều cao ở tất cả các ô tiêu chuẩn: CV $D_{1,3}$ dao động 15,41 - 24,62% (trung bình 19,78%), trong khi CV H_{vn} chỉ 8,53 - 16,35% (trung bình 12,86%). Quy luật này cho thấy chiều cao chịu chi phối chủ yếu bởi tuổi và lập địa nên tương đối đồng đều, còn đường kính nhạy cảm hơn với cạnh tranh không gian dinh dưỡng.

Phân tích tương quan trên 9 ô tiêu chuẩn xác nhận các quy luật trên: mật độ tương quan nghịch rất chặt với đường kính bình quân ($r = -0,955$; $p < 0,001$) và tương quan thuận với mức phân hóa đường kính ($r = +0,754$; $p = 0,019$), nhưng chưa phát hiện được tương quan có ý nghĩa với trữ lượng cây đứng ($r = +0,433$; $p = 0,245$). Như vậy, trong khoảng mật độ khảo sát 640 - 1.180 cây/ha, các OTC có mật độ thấp hơn có xu hướng đạt đường kính bình quân lớn hơn và đồng đều hơn, trong khi chưa ghi nhận được mối tương quan có ý nghĩa thống kê giữa mật độ và trữ lượng cây đứng.

Bảng 1. Sinh trưởng và trữ lượng của rừng trồng keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị

Thứ tự OTC	$\overline{D_{1,3}}$ (cm)	CV $D_{1,3}$ (%)	$\overline{H_{vn}}$ (m)	CV H_{vn} (%)	Mật độ (cây/ha)	Trữ lượng (m^3/ha)	MAI (m^3/ha/năm)
1	20,23	16,09	22,97	11,36	640	236,13	20,53
2	18,75	15,41	21,06	8,53	720	209,09	18,18
3	17,78	16,99	21,84	13,06	860	233,02	20,26
4	16,04	23,04	21,69	14,91	1.180	258,52	22,48
5	17,08	22,34	21,15	11,98	880	213,13	18,53
6	18,11	16,22	19,97	13,55	780	200,60	17,44
7	16,04	24,62	21,00	16,35	1.140	241,75	21,02
8	17,94	22,61	21,46	9,83	820	222,33	19,33
9	15,49	20,66	19,58	16,21	1.140	210,20	18,28
TB	17,50	19,78	21,19	12,86	907	224,98	19,56
SE (n=9)	0,50		0,33		66	6,24	0,54

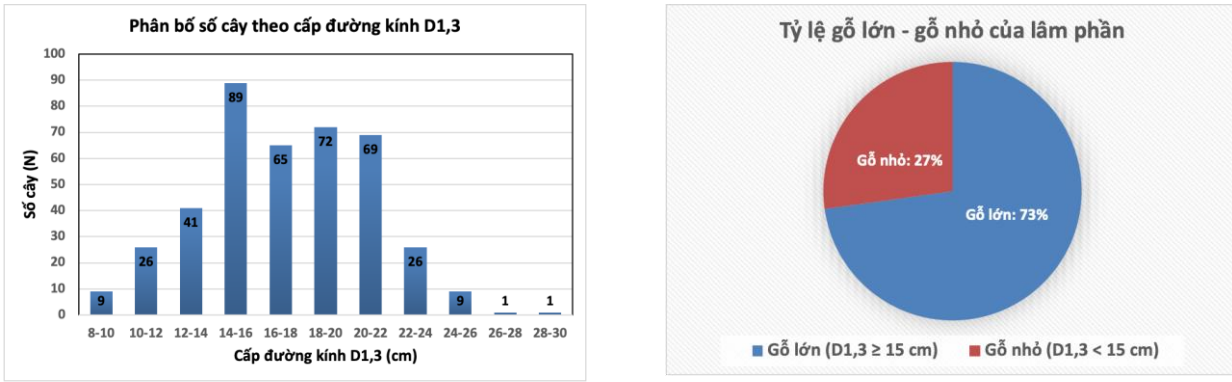
Ghi chú: $\overline{D_{1,3}}$ là giá trị đường kính ngang ngực bình quân; $\overline{H_{vn}}$ là giá trị chiều cao vút ngọn bình quân; CV $D_{1,3}$ (%) là độ biến động về đường kính ngang ngực; CV H_{vn} (%) là độ biến động về chiều cao vút ngọn; TB là giá trị trung bình của 9 OTC; SE: là sai số tiêu chuẩn của giá trị trung bình; MAI: lượng tăng trưởng bình quân năm (m^3/ha/năm).

Số liệu bảng 1 cho thấy ở OTC1 và OTC2 với mật độ thấp 640 - 720 cây/ha đạt $\overline{D_{1,3}}$ lớn nhất (20,23 và 18,75 cm) và đồng đều nhất (CV $D_{1,3}$ 16,09 và 15,41%). Không gian dinh dưỡng rộng làm giảm cạnh tranh, thúc đẩy tăng trưởng đường kính và nâng tỷ lệ cây đạt cấp kính lớn, đây là yếu tố quyết định chất lượng gỗ tròn cho đồ mộc xuất khẩu. Trên cơ sở xu hướng quan sát được, kết hợp với hướng dẫn kỹ thuật hiện hành về trồng rừng thâm canh gỗ lớn và chuyển hóa rừng trồng gỗ nhỏ sang rừng trồng gỗ lớn đối với keo lai (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, 2019), mật độ nuôi dưỡng 600 - 700 cây/ha có thể được xem là mức định hướng bước đầu cho mục tiêu kinh doanh gỗ lớn tại Quảng Trị.

Tại xã Cam Hiếu, huyện Cam Lộ cũ (nay là xã Hiếu Giang, tỉnh Quảng Trị), rừng keo lai 7 tuổi đạt trữ lượng 161,14 m^3/ha (dòng TB16) và 134,65 m^3/ha (trung bình các dòng khảo sát), tương ứng MAI 23,02 và 19,24 m^3/ha/năm (Trần Duy Rương, 2013). Trữ lượng của lâm phần 11,5 tuổi trong nghiên cứu này cao hơn tương ứng khoảng 1,4 và 1,7 lần, mặc dù MAI có xu hướng thấp hơn so với giai đoạn tuổi non.

Ở tuổi 13,5 tại Cam Lộ, Quảng Trị, các lâm phần keo lai đã chịu tác động của tự tỉa thưa và gió bão hằng năm nên mật độ chỉ còn 580 - 780 cây/ha, trữ lượng 168,10 - 219,54 m^3/ha và MAI giảm còn 12,45 - 16,26 m^3/ha/năm (Nguyễn Huy Sơn, Phạm Xuân Đỉnh, 2016). Trong khi đó, lâm phần 11,5 tuổi trong nghiên cứu này có $D_{1,3}$ và chiều cao tương đương nhưng trữ lượng và MAI (m^3/ha/năm) vẫn cao hơn, mặc dù chu kỳ kinh doanh ngắn hơn.

(a) (b)



Hình 3. Phân bố số cây theo cấp kính (N/$D_{1,3}$) (a) và tỷ lệ số cây theo mục đích kinh doanh (b) của lâm phần rừng keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị

Kết quả nghiên cứu đặc điểm cấu trúc phân bố số cây theo cấp kính (hình 3a) cho thấy, ở tuổi 11,5 đường kính cây keo lai dao động khá lớn từ 8,9 đến 28,0 cm, trong đó tập trung chủ yếu ở cấp kính 14 - 16 cm (chiếm 21,8% số cây) và các cấp kính từ 16 - 18; 18 - 20; 20 - 22 cm (dao động từ 15,9 đến 17,6% số cây). Theo tiêu chuẩn gỗ lớn đang được thu mua tại Quảng Trị, tỷ lệ cây đạt $D_{1,3} \geq 15$ cm là 73%, song chỉ 25,9% đạt $D_{1,3} \geq 20$ cm (hình 3b). Các kết quả nghiên cứu trên bước đầu cho thấy sự cần thiết của việc điều chỉnh mật độ thông qua lựa chọn mật độ trồng ban đầu và tỉa thưa kịp thời, nhằm dung hòa giữa sinh trưởng đường kính cá thể và trữ lượng trên đơn vị diện tích, tối ưu hóa tỷ lệ gỗ lớn và hiệu quả kinh tế cho các mô hình keo lai kinh doanh gỗ lớn.

3.2. Đặc điểm sinh khối rừng trồng keo lai 11,5 tuổi

3.2.1. Sinh khối cây cá lẻ keo lai

- Về cấu trúc sinh khối tươi của cây cá lẻ:

Kết quả xác định sinh khối tươi và sinh khối khô trung bình của 27 cây tiêu chuẩn keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị được tổng hợp tại bảng 2 cho thấy có sự phân hóa rõ rệt giữa các bộ phận. Tính theo sinh khối khô, thân gỗ chiếm ưu thế tuyệt đối với 76,7 ± 0,7% tổng sinh khối trên mặt đất, tiếp đến là cành (11,6 ± 0,7%), vỏ (8,4 ± 0,3%) và thấp nhất là lá (3,3 ± 0,1%). Tổng sinh khối tươi bình quân của cây keo lai ở tuổi 11,5 là 378,6 ± 31,2 kg/cây và tổng sinh khối khô là 218,9 ± 18,3 kg/cây.

Bảng 2. Cấu trúc sinh khối tươi và sinh khối khô của 27 cây tiêu chuẩn keo lai 11,5 tuổi

Bộ phận	Sinh khối tươi		Sinh khối khô		Tỷ lệ khô/tươi (%)
	(kg/cây)	(%)	(kg/cây)	(%)	
Thân	282,8 ± 22,3	74,9 ± 0,6	166,4 ± 13,0	76,7 ± 0,7	58,8
Vỏ	31,3 ± 2,4	8,5 ± 0,2	18,3 ± 1,6	8,4 ± 0,3	58,5
Cành	45,6 ± 5,7	11,5 ± 0,6	26,9 ± 3,6	11,6 ± 0,7	59,0
Lá	18,9 ± 1,8	5,1 ± 0,2	7,3 ± 0,7	3,3 ± 0,1	38,6
Tổng cộng:	**378,6 ± 31,2**	**100,0**	**218,9 ± 18,3**	**100,0**	**57,8**

Quy luật sinh khối của thân cây chiếm ưu thế trong tổng sinh khối trên mặt đất và phù hợp với các kết quả đã công bố về cấu trúc sinh khối cho các loài keo ở Việt Nam (Trần Thị Ngoan, Nguyễn Tấn Chung, 2018; Nguyễn Văn Bích *et al.*, 2022). Tuy nhiên, mức độ ưu thế của thân thay đổi rõ rệt theo tuổi lâm phần. Nếu bóc vỏ tại rừng và giữ lại toàn bộ cành lá sau khai thác

thì lượng sinh khối tươi lấy đi chỉ còn 74,9%, tức là trả lại lập địa thêm 8,5% sinh khối so với phương thức khai thác cả vỏ. Việc quản lý vật liệu hữu cơ sau khai thác là nhóm biện pháp có chi phí thấp nhất để hạn chế suy giảm độ phì lập địa qua các luân kỳ và đã được chứng minh có hiệu quả duy trì năng suất ở các chu kỳ sau của rừng trồng keo tại Việt Nam và Đông Nam Á (Vu Dinh Huong *et al.*, 2015).

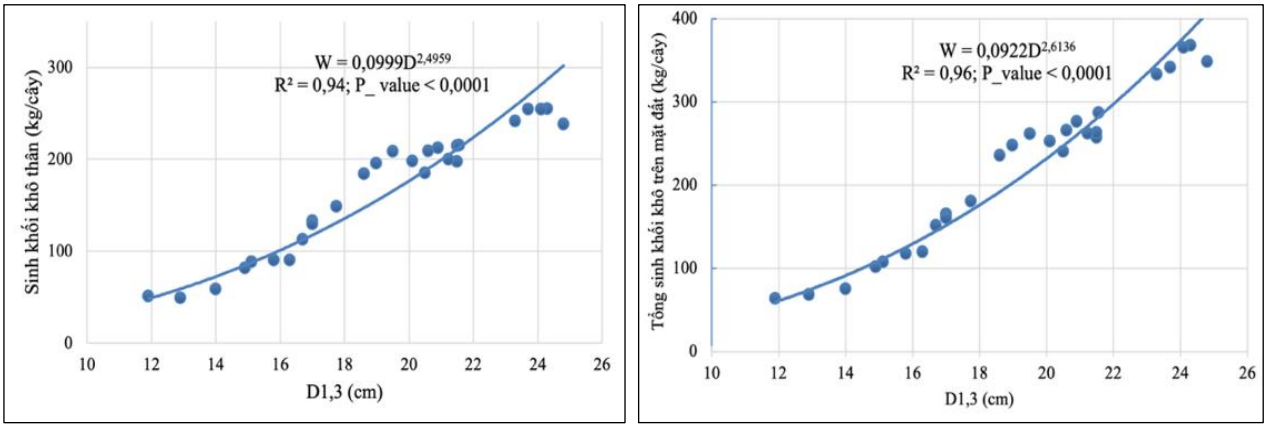
- Tương quan sinh khối từng bộ phận cây cá lẻ với đường kính ($D_{1,3}$):

Kết quả phân tích tương quan giữa sinh khối cây cá lẻ với đường kính của cây cho thấy, sinh khối khô các bộ phận của cây cá lẻ có tương quan từ chặt đến rất chặt với đường kính ($D_{1,3}$) của cây, với hệ số tương quan R dao động từ 0,94 đến 0,98, hệ số xác định R^2 từ 0,88 đến 0,96 và *p_value* đều nhỏ hơn 0,001 (bảng 3, hình 4).

Bảng 3. Phương trình tương quan giữa sinh khối khô tầng cây cao và đường kính $D_{1,3}$ của cây cá lẻ keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị

TT	Bộ phận của cây	Phương trình tương quan	Hệ số tương quan (R)	Hệ số xác định (R^2)	*p_value*
1	Thân	$W = 0,0999 \times D_{1,3}^{2,4959}$	0,97	0,94	< 0,0001
2	Vỏ	$W = 0,0082 \times D_{1,3}^{2,5901}$	0,96	0,92	< 0,0001
3	Cành	$W = 0,0014 \times D_{1,3}^{3,2996}$	0,94	0,88	< 0,0001
4	Lá	$W = 0,0016 \times D_{1,3}^{2,8256}$	0,96	0,91	< 0,0001
5	Tổng sinh khối	$W = 0,0922 \times D_{1,3}^{2,6136}$	0,98	0,96	< 0,0001

Ghi chú: W là sinh khối khô của bộ phận cây (kg/cây); R^2 được tính trên thang logarit; phạm vi $D_{1,3}$ của cây tiêu chuẩn 11,9-24,8 cm. Hệ số hiệu chỉnh sai lệch khi quy đổi ngược (Baskerville, 1972) CF = exp(SEE²/2) tương ứng là 1,007 (thân); 1,010 (vỏ); 1,025 (cành); 1,013 (lá) và 1,005 (tổng sinh khối), tương ứng mức hiệu chỉnh dưới 3%.



Hình 4. Tương quan giữa sinh khối khô thân (a) và tổng sinh khối khô trên mặt đất (b) của cây cá lẻ với đường kính $D_{1,3}$ rừng trồng keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị

Mức độ tương quan khá đồng đều giữa các bộ phận, cao nhất là tổng sinh khối trên mặt đất (R^2 = 0,96) và sinh khối thân (0,94), tiếp đến là vỏ (0,92), lá (0,91) và cành (0,88). Kết quả kiểm tra sự tồn tại của các tham số của phương trình trong tổng thể đều đảm bảo (p < 0,001). Vì vậy, có thể sử dụng các phương trình tương quan tại bảng 3 để ước lượng sinh khối từng bộ phận cũng như tổng sinh khối trên mặt đất của cây cá lẻ keo lai tại Quảng Trị và những nơi có điều kiện lập địa, giống và tuổi tương tự. Phạm vi đường kính của 27 cây tiêu chuẩn dùng để xây dựng phương trình là 11,9 - 24,8 cm và phạm vi áp dụng được khuyến nghị của các phương trình là $D_{1,3}$ từ 12 đến 25 cm.

3.2.2. Sinh khối của toàn lâm phần keo lai 11,5 tuổi

Kết quả tổng hợp sinh khối khô trên mặt đất của lâm phần keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị được tổng hợp tại bảng 4 cho thấy mật độ hiện tại của lâm phần dao động 640 - 1.180 cây/ha (trung bình 907 ± 66 cây/ha), tổng sinh khối khô trên mặt đất đạt 165,0 - 188,9 tấn/ha (trung bình 176,1 ± 2,9 tấn/ha), tương ứng sinh khối tích lũy bình quân theo tuổi 15,3 tấn/ha/năm. Tầng cây gỗ chiếm tỷ trọng chi phối với 155,9 ± 3,0 tấn/ha (88,5%; biến động 86,5 - 90,4%), tiếp đến là cây bụi thảm tươi 10,3 ± 0,6 tấn/ha (5,9%) và vật rơi rụng 9,9 ± 0,5 tấn/ha (5,6%).

Bảng 4. Sinh khối khô lâm phần keo lai theo các OTC điều tra

OTC	$D_{1,3}$ (cm)	Mật độ (cây/ha)	Tổng sinh khối khô (tấn/ha)	Cấu trúc sinh khối toàn lâm phần					
				Tầng cây gỗ		Cây bụi thảm tươi		Vật rơi rụng	
				Tấn/ha	%	Tấn/ha	%	Tấn/ha	%
1	20,2	640	180,4	161,0	89,2	9,7	5,4	9,8	5,4
2	18,7	720	165,0	147,8	89,6	7,9	4,8	9,4	5,7
3	17,8	860	175,3	155,3	88,6	9,7	5,5	10,3	5,8
4	16,0	1.180	188,9	170,8	90,4	10,0	5,3	8,1	4,3
5	17,1	880	171,5	148,8	86,7	12,7	7,4	10,0	5,9
6	18,1	780	170,2	147,1	86,5	12,5	7,4	10,5	6,2
7	16,0	1.140	187,7	167,0	89,0	12,3	6,6	8,4	4,5
8	17,9	820	180,3	158,3	87,8	9,0	5,0	13,0	7,2
9	15,5	1.140	166,0	147,4	88,8	8,9	5,4	9,7	5,8
TB	17,5	907	176,1	155,9	88,5	10,3	5,9	9,9	5,6
SE (n=9)	0,5	66	2,9	3,0	0,4	0,6	0,3	0,5	0,3

Tại Quảng Trị, Ngô Đình Quế và đồng tác giả (2006) đã xác định sinh khối trên mặt đất của rừng trồng keo lai 8 tuổi tại huyện Cam Lộ đạt 151,98 tấn/ha với mật độ 1.400 cây/ha và 100,08 tấn/ha đối với rừng 7 tuổi tại huyện Triệu Phong với mật độ 1.700 cây/ha (theo địa giới hành chính trước ngày 01/07/2025; lâm phần trong nghiên cứu này thuộc địa bàn huyện Cam Lộ cũ). Lâm phần 11,5 tuổi trong nghiên cứu này cao hơn tương ứng 1,16 và 1,76 lần, phù hợp với quy luật tích lũy sinh khối theo tuổi. Tại Yên Bái, Nguyễn Văn Bích và đồng tác giả (2022) ghi nhận tổng sinh khối khô lâm phần keo lai 7 tuổi đạt 138,1 tấn/ha (cấp đất I) và 50,1 tấn/ha (cấp đất IV); sau khi loại phần rễ (18,60% sinh khối cây cá thể) để đồng nhất phạm vi bể chứa, giá trị trên mặt đất tương ứng là 113,9 và 42,0 tấn/ha, với cấu trúc sinh khối tương đồng (tầng cây gỗ 89,7% so với 88,5% trong nghiên cứu này). Ở vùng Đông Nam Bộ, mức tích lũy sinh khối cao hơn rõ rệt: tại Đồng Nai, sinh khối trên mặt đất của tầng cây gỗ ở tuổi 6, 8 và 10 lần lượt đạt 122,7; 190,1 và 241,7 tấn/ha, năng suất bình quân 20,4; 23,8 và 24,2 tấn/ha/năm (Trần Thị Ngoan, Nguyễn Tấn Chung, 2018) và 73,6 - 94,9 tấn/ha ở tuổi 7 (Nguyễn Văn Tuấn *et al.*, 2024). Sinh khối tích lũy bình quân theo tuổi của tầng cây gỗ trong nghiên cứu này đạt 13,6 tấn/ha/năm. Các so sánh trên chỉ mang tính tham khảo do khác biệt về tuổi, mật độ, cấp đất và phương pháp đo tính; phạm vi bể chứa đã chuẩn hóa về phần trên mặt đất (cây gỗ, cây bụi thảm tươi, vật rơi rụng), không gồm rễ.

3.3. Trữ lượng carbon tích lũy trên mặt đất của lâm phần keo lai 11,5 tuổi

Kết quả xác định trữ lượng carbon và lượng CO_2 tích lũy của lâm phần keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị được tổng hợp tại bảng 5.

Bảng 5. Trữ lượng carbon và lượng CO_2 tương đương được lưu giữ trong sinh khối trên mặt đất của lâm phần keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị

OTC	Mật độ (cây/ha)	Tổng sinh khối khô (tấn/ha)	Trữ lượng carbon (tấn C/ha)	Trữ lượng CO_2 (tấn/ha)	Lượng CO_2 tích lũy bình quân theo tuổi (tấn CO_2/ha/năm)
1	640	180,4	84,8	311,2	27,1
2	720	165,0	77,5	284,6	24,7
3	860	175,3	82,4	302,3	26,3
4	1.180	188,9	88,8	325,8	28,3
5	880	171,5	80,6	295,8	25,7
6	780	170,2	80,0	293,6	25,5
7	1.140	187,7	88,2	323,8	28,2
8	820	180,3	84,7	310,9	27,0
9	1.140	166,0	78,0	286,3	24,9
TB	907	176,1	82,8	303,8	26,4
SE (n=9)	66,2	2,9	1,4	5,0	0,4

Kết quả tại bảng 5 cho thấy, tổng trữ lượng carbon trên mặt đất của lâm phần keo lai 11,5 tuổi biến động từ 77,5 đến 88,8 tấn C/ha, trung bình đạt 82,8 ± 1,4 tấn/ha; tương ứng trữ lượng CO_2 từ 284,6 đến 325,8 tấn CO_2/ha (trung bình 303,8 ± 5,0 tấn CO_2/ha) và lượng CO_2 tích lũy bình quân theo tuổi từ 24,7 đến 28,3 tấn CO_2/ha/năm (trung bình 26,4 ± 0,4 tấn CO_2/ha/năm). Chỉ tiêu này được tính bằng trữ lượng CO_2 hiện hữu chia cho tuổi rừng, phản ánh mức tích lũy bình quân của cả giai đoạn 11,5 năm; do không có chuỗi số liệu theo thời gian và chưa tính phần sinh khối đã lấy ra khi tỉa thưa, chỉ tiêu này không đồng nhất với tốc độ hấp thụ CO_2 ròng hằng năm của lâm phần tại tuổi 11,5.

So sánh với các nghiên cứu đã công bố cho thấy kết quả của nghiên cứu này phù hợp với quy luật tích lũy carbon theo tuổi của rừng trồng keo lai. Nguyễn Văn Tuấn và đồng tác giả (2024) khi nghiên cứu rừng trồng thuần loài keo lai tuổi 3 - 7 trên ba cấp đất tại Đồng Nai đã xác định trữ lượng carbon lâm phần biến động từ 10,0 đến 44,6 tấn C/ha (tương ứng 36,7-163,7 tấn CO_2/ha), với lượng CO_2 tích lũy bình quân năm từ 12,2 đến 26,2 tấn CO_2/ha/năm. Tại vùng Bắc Trung Bộ, Ngô Đình Quế và đồng tác giả (2006) xác định lượng CO_2 tương đương được lưu giữ trong sinh khối của rừng trồng keo lai 7 tuổi tại huyện Triệu Phong, tỉnh Quảng Trị (theo địa danh hành chính cũ) đạt 212,40 tấn CO_2/ha; giá trị của lâm phần 11,5 tuổi trong nghiên cứu này (303,8 tấn CO_2/ha) cao hơn khoảng 1,4 lần. Ở Bà Rịa - Vũng Tàu, Trần Quang Bảo và Võ Thành Phúc (2019) ghi nhận trữ lượng carbon rừng trồng keo lai tuổi 2 đến tuổi 6 biến động 6,37 - 65,61 tấn C/ha (23,4 - 240,6 tấn CO_2/ha). Sự chênh lệch lớn giữa các nghiên cứu trên do ảnh hưởng của tuổi lâm phần, cấp đất, mật độ để lại và đặc biệt là phạm vi bể chứa carbon được đưa vào tính toán.

3.4. Hiệu quả kinh tế của rừng trồng keo lai 11,5 tuổi

Kết quả tổng hợp giá và chi phí và cơ sở quy đổi sản lượng áp dụng cho rừng trồng keo lai 11,5 tuổi tại Quảng Trị (bảng 6) cho thấy, tổng chi phí trồng, chăm sóc và bảo vệ rừng trong toàn bộ luân kỳ kinh doanh là 30,6 triệu đồng/ha, trong đó chi phí nhân công chiếm 76,0% và chi phí vật tư 24,0%. Chi phí khai thác và vận chuyển gỗ (60,0 - 63,0 triệu đồng/ha) cao gấp khoảng 2,0 lần toàn bộ chi phí tạo rừng; nếu tính cả chi phí tỉa thưa ở tuổi 4 thì nhóm chi phí

khai thác chiếm 69,8 - 70,7% tổng chi phí cả chu kỳ. Khi quy về giá ròng tại rừng (giá bán tại nhà máy trừ chi phí khai thác và vận chuyển), gỗ dăm bóc vỏ đạt 1,060 triệu đồng/tấn, gỗ tròn D từ 15 - 20 cm đạt 1,280 triệu đồng/tấn (bằng 120,8% so với gỗ dăm) và gỗ tròn D > 20 cm đạt 1,980 triệu đồng/tấn (bằng 186,8%). Như vậy, giá trị gia tăng của kinh doanh gỗ lớn tập trung chủ yếu ở cấp kính trên 20 cm; chênh lệch giá ròng gần gấp đôi này chính là cơ sở kinh tế để kéo dài chu kỳ kinh doanh.

Bảng 6. Giá, chi phí và cơ sở quy đổi sản lượng áp dụng cho rừng trồng keo lai 11,5 tuổi

TT	Hạng mục	Đơn vị tính	Giá trị
I	**Giá bán tại nhà máy/xưởng**		
1	Gỗ dăm bóc vỏ (tỉa thưa, năm 2019)	triệu đồng/tấn	1,020
2	Gỗ dăm bóc vỏ (khai thác chính, tháng 7/2026)	triệu đồng/tấn	1,440
3	Gỗ tròn không bóc vỏ (khúc D >15 - 20 cm)	triệu đồng/tấn	1,600
4	Gỗ tròn không bóc vỏ (khúc D > 20 cm)	triệu đồng/tấn	2,300
II	**Chi phí vật tư**	**triệu đồng/ha**	**7,356**
1	Cây giống keo lai hom (kể cả trồng dặm 10%)	triệu đồng/ha	2,376
2	Phân bón lót (năm thứ nhất)	triệu đồng/ha	1,660
3	Phân bón thúc (năm thứ hai và năm thứ ba)	triệu đồng/ha	3,320
III	**Chi phí nhân công trồng và chăm sóc**	**triệu đồng/ha**	**23,250**
1	Trồng rừng năm thứ nhất	triệu đồng/ha	10,800
2	Chăm sóc, bảo vệ năm thứ hai	triệu đồng/ha	5,040
3	Chăm sóc, bảo vệ năm thứ ba	triệu đồng/ha	4,860
4	Bảo vệ rừng từ năm thứ 4 đến tuổi 11,5	triệu đồng/ha	2,550
IV	**Chi phí khai thác và vận chuyển**		
1	Tỷa thưa ở tuổi 4 (năm 2019)	triệu đồng/tấn	0,300
2	Khai thác, vận chuyển gỗ dăm bóc vỏ	triệu đồng/tấn	0,380
3	Khai thác, vận chuyển gỗ tròn không bóc vỏ	triệu đồng/tấn	0,320
V	**Cơ sở quy đổi sản lượng**		
1	Trữ lượng cây đứng	m^3/ha	224,98
2	Tỷ lệ lợi dụng gỗ	%	85,0
3	Khối lượng thể tích gỗ dăm bóc vỏ (chung 27 cây)	tấn/m^3	0,867
4	Khối lượng thể tích khúc gỗ D < 15 cm (bóc vỏ)	tấn/m^3	0,797
5	Khối lượng thể tích khúc gỗ D 15-20 cm (cả vỏ)	tấn/m^3	0,991
6	Khối lượng thể tích khúc gỗ D > 20 cm (cả vỏ)	tấn/m^3	1,018
VI	**Cơ cấu sản phẩm khai thác**		
1	Sản phẩm tỉa thưa ở tuổi 4	tấn/ha	36,0
2	Phương án 1: toàn bộ làm gỗ dăm bóc vỏ	tấn/ha	165,8
3	Phương án 2: phân loại theo cấp kính khúc gỗ	tấn/ha	177,3
-	Gỗ dăm bóc vỏ (khúc D < 15 cm; 36,0% thể tích)	tấn/ha	54,9
-	Gỗ tròn cả vỏ (khúc D 15-20 cm; 41,2% thể tích)	tấn/ha	78,1
-	Gỗ tròn cả vỏ (khúc D > 20 cm; 22,8% thể tích)	tấn/ha	44,4

Ghi chú: D là đường kính đầu nhỏ của khúc gỗ. Khối lượng thể tích ở mục V là khối lượng gỗ tươi (tấn gỗ tươi/m^3 gỗ tròn), xác định trực tiếp từ số liệu cân và đo thể tích của 27 cây tiêu chuẩn. Khối lượng thể tích của gỗ dăm và của khúc gỗ D dưới 15 cm được tính cho phần gỗ đã bóc vỏ; các nhóm còn lại tính cả vỏ.

Ở tuổi khai thác chính 11,5 với tỷ lệ lợi dụng gỗ 85%, sản lượng đạt 165,8 tấn/ha nếu toàn bộ được chế biến thành gỗ dăm bóc vỏ (phương án 1) và 177,3 tấn/ha nếu phân loại theo cấp kính khúc gỗ (phương án 2). Chênh lệch 11,5 tấn/ha (7,0%) giữa hai phương án không thể hiện sự khác biệt về sinh khối lâm phần mà xuất phát từ việc phương án 2 tiêu thụ phần lớn sản phẩm ở dạng gỗ tròn không bóc vỏ. Ba tỷ lệ thể tích 36,0%; 41,2% và 22,8% của ba nhóm sản phẩm được xác định từ số liệu giải tích khúc gỗ của 27 cây tiêu chuẩn và đã được gia quyền theo phân bố số cây, thể tích theo cấp kính thực tế của 09 OTC (mục 2.2), không phải trung bình số học của 27 cây. Cơ cấu sản phẩm của phương án 2 gồm gỗ dăm 54,9 tấn/ha, gỗ tròn D từ 15 - 20 cm 78,1 tấn/ha và gỗ tròn D > 20 cm là 44,4 tấn/ha; tuy chỉ chiếm một phần tư khối lượng, nhóm gỗ tròn D > 20 cm đóng góp tới 33,4% doanh thu khai thác chính. Ngoài ra, sản lượng tỉa thưa ở tuổi 4 đạt 36,0 tấn/ha, đem lại khoản thu ròng 25,9 triệu đồng/ha, bù đắp được 79,0% giá trị hiện tại của chi phí trồng và chăm sóc trong ba năm đầu.

Bảng 7. Chỉ tiêu hiệu quả kinh tế của hai phương án tiêu thụ sản phẩm khai thác chính (lãi suất chiết khấu 7%/năm)

Chỉ tiêu	Đơn vị	Phương án 1 (toàn bộ gỗ dăm)	Phương án 2 (phân loại theo cấp kính)	Chênh lệch
Tổng chi phí	triệu đồng/ha	104,4	101,4	-3,0
Tổng doanh thu	triệu đồng/ha	275,5	342,7	+67,3
Lợi nhuận chưa chiết khấu	triệu đồng/ha	171,1	241,3	+70,2
Giá trị hiện tại ròng (NPV)	triệu đồng/ha	73,9	106,2	+32,3
Giá trị tương đương hằng năm (EAV)	triệu đồng/ha/năm	9,6	13,7	+4,2
Giá trị kỳ vọng của đất (LEV)	triệu đồng/ha	136,7	196,4	+59,7
Tỷ suất thu nhập trên chi phí (BCR)	lần	2,16	2,70	+0,54
Tỷ suất hoàn vốn nội bộ (IRR)	%/năm	28,8	32,4	+3,6

Kết quả đánh giá hiệu quả kinh tế cho hai phương án tiêu thụ sản phẩm với lãi suất chiết khấu 7%/năm được tổng hợp tại bảng 7 cho thấy, phương án 2 vượt trội trên toàn bộ các chỉ tiêu. NPV đạt 106,2 triệu đồng/ha so với 73,9 triệu đồng/ha của phương án 1, cao hơn 32,3 triệu đồng/ha, tương đương 43,6%; EAV đạt 13,7 so với 9,6 triệu đồng/ha/năm; BCR đạt 2,70 so với 2,16 lần và IRR đạt 32,4% so với 28,8%/năm. Đáng chú ý, ưu thế của phương án 2 là đạt doanh thu cao hơn 67,3 triệu đồng/ha nhờ giá gỗ tròn cấp kính lớn, đồng thời tổng chi phí lại thấp hơn 3,0 triệu đồng/ha do gỗ tròn không phải bóc vỏ nên đơn giá khai thác thấp hơn gỗ dăm (0,32 so với 0,38 triệu đồng/tấn).

Phân tích độ nhạy cho thấy kết quả có tính ổn định tương đối trong dải biến động đã giả định (mục 2.3.4). Khi lãi suất chiết khấu tăng từ 6% lên 12%/năm, NPV của phương án 2 giảm từ 119,3 xuống 59,0 triệu đồng/ha và LEV giảm từ 244,4 xuống 81,0 triệu đồng/ha; khi giá bán giảm 20% (ở lãi suất 7%/năm), NPV vẫn đạt 72,5 triệu đồng/ha. Trong toàn bộ 20 tổ hợp lãi suất và giá bán được khảo sát, cả hai phương án đều có NPV dương và thứ hạng giữa chúng không đảo ngược; ngưỡng hòa vốn, xác định bằng cách giải phương trình NPV = 0 theo hệ số biến động giá, cho thấy giá bán sản phẩm khai thác chính có thể giảm tới 63,0% so với mức cơ sở trước khi NPV của phương án 2 trở về 0.

Giá trị kỳ vọng của đất (LEV) đạt 196,4 triệu đồng/ha ở phương án 2 và 136,7 triệu đồng/ha ở phương án 1, nghĩa là với chu kỳ 11,5 năm và lãi suất chiết khấu 7%/năm, mô hình kinh doanh gỗ lớn có thể chi trả tối đa 196,4 triệu đồng/ha cho quyền sử dụng đất mà vẫn hòa vốn. Chỉ tiêu

này lượng hóa chi phí cơ hội của đất và cho phép so sánh trực tiếp kinh doanh gỗ lớn với các phương thức sử dụng đất khác trên cùng lập địa.

So với rừng trồng keo lai 7 tuổi tại Cam Lộ, Quảng Trị (NPV 30,38 triệu đồng/ha; BCR 2,84 lần; IRR 28,7%; Trần Duy Rương, 2013), NPV của mô hình 11,5 tuổi cao gấp 3,5 lần và EAV cao gấp 2,4 lần. BCR thấp hơn chu kỳ ngắn do đặc điểm cơ cấu chi phí đã phân tích ở trên, còn IRR có xu hướng giảm khi chu kỳ kinh doanh kéo dài.

Nghị định số 180/2026/NĐ-CP ngày 21/5/2026, có hiệu lực từ ngày 15/7/2026, mở ra khả năng bổ sung nguồn thu từ dịch vụ hấp thụ và lưu giữ carbon của rừng (Chính phủ, 2026). Các tính toán dưới đây chỉ là một kịch bản minh họa mang tính tham khảo: nghiên cứu này xác định trữ lượng carbon hiện hữu trong sinh khối trên mặt đất, không xác định trực tiếp lượng tín chỉ có khả năng phát hành của lâm phần. Khoản thu từ tín chỉ được xác định trên cơ sở lượng carbon tăng thêm so với kịch bản cơ sở, sau khi trừ rò rỉ và phần trích lập quỹ dự phòng rủi ro, đồng thời phải bảo đảm tính bổ sung, tính lâu dài và hệ thống đo đạc, báo cáo, thẩm định (MRV), chứ không phải là trữ lượng carbon cây đứng của lâm phần. Theo Arvola và đồng tác giả (2021), khi so sánh chu kỳ kinh doanh gỗ lớn 9 - 10 năm với chu kỳ gỗ dăm 5 năm đối với keo lai tại miền Trung Việt Nam, lượng carbon lưu giữ bình quân tăng thêm khoảng 15 - 16%. Áp dụng giả định này cho lâm phần nghiên cứu, với kịch bản cơ sở là phương thức kinh doanh gỗ dăm chu kỳ ngắn đang phổ biến tại địa phương, lượng carbon tăng thêm tương ứng khoảng 48,6 tấn CO_2e/ha.

Ở đơn giá 5 USD/tấn CO_2e, tương ứng mức trong Thỏa thuận chi trả giảm phát thải vùng Bắc Trung Bộ, khoản thu này làm tăng NPV thêm 3,0 triệu đồng/ha (2,8%) và LEV thêm 5,5 triệu đồng/ha; ở đơn giá 20 USD/tấn CO_2e, mức tăng tương ứng là 11,8 và 21,9 triệu đồng/ha (11,1%). Các ước tính trên chưa trừ chi phí xây dựng dự án, đo đạc, báo cáo và thẩm định. Trong khi đó, việc chuyển từ phương án gỗ dăm sang phân loại theo cấp kính làm tăng NPV thêm 32,3 triệu đồng/ha, gấp gần 11 lần khoản thu carbon ở mức giá 5 USD/tấn CO_2e. Như vậy, nguồn thu từ tín chỉ carbon là khoản bổ trợ chứ chưa đủ để trở thành động lực quyết định việc kéo dài chu kỳ kinh doanh, thống nhất với nhận định của Arvola và đồng tác giả (2021).

IV. KẾT LUẬN

Rừng trồng keo lai 11,5 tuổi kinh doanh gỗ lớn tại Quảng Trị sinh trưởng tốt, mật độ hiện tại đạt 907 ± 66 cây/ha, $D_{1,3}$ bình quân 17,50 ± 0,50 cm, H_{vn} bình quân 21,19 ± 0,33 m; trữ lượng cây đứng đạt 224,98 ± 6,24 m³/ha, MAI 19,56 ± 0,54 m³/ha/năm. Đường kính biến động mạnh hơn chiều cao (CV $D_{1,3}$ 19,78% so với CV H_{vn} 12,86%) và mức phân hóa có xu hướng tăng theo mật độ; 73,0% số cây đạt $D_{1,3} \geq 15$ cm nhưng chỉ 25,9% đạt ≥ 20 cm.

Tổng sinh khối khô trên mặt đất của lâm phần đạt trung bình 176,1 ± 2,9 tấn/ha, tương ứng sinh khối tích lũy bình quân theo tuổi 15,3 tấn/ha/năm; trong đó tầng cây gỗ chiếm 88,5%, cây bụi thảm tươi 5,9% và vật rơi rụng 5,6%; ở cấp cây cá lẻ, sinh khối tập trung chủ yếu ở thân (76,7%), cành (11,6%), vỏ (8,4%) và lá (3,3%). Sinh khối khô của từng bộ phận tương quan chặt với $D_{1,3}$ theo dạng hàm lũy thừa (R^2 = 0,88-0,96; $P < 0,001$), có thể dùng để ước lượng sinh khối lâm phần keo lai trong phạm vi $D_{1,3}$ từ 12 đến 25 cm ở những nơi có điều kiện tương tự. Trữ lượng carbon tích lũy trên mặt đất đạt 82,8 ± 1,4 tấn C/ha, tương đương 303,8 ± 5,0 tấn CO_2/ha và lượng CO_2 tích lũy bình quân theo tuổi 26,4 ± 0,4 tấn CO_2/ha/năm.

Với lãi suất chiết khấu 7%/năm, phương án phân loại sản phẩm theo cấp kính cho hiệu quả cao nhất: NPV 106,2 triệu đồng/ha, EAV 13,7 triệu đồng/ha/năm, LEV 196,4 triệu đồng/ha, BCR 2,70 lần và IRR 32,4%/năm; cao hơn phương án bán toàn bộ sản lượng làm gỗ dăm 32,3 triệu đồng/ha về NPV (43,6%), đồng thời giảm được 3,0 triệu đồng/ha chi phí khai thác.

Khoản tận thu tỉa thưa ở tuổi 4 bù đắp 79,0% giá trị hiện tại của chi phí trồng và chăm sóc rừng ba năm đầu.

Kết quả tại lâm phần nghiên cứu cho thấy duy trì rừng trồng keo lai đến tuổi 11,5 vẫn đạt sinh trưởng và hiệu quả tài chính tích cực, mở ra triển vọng kéo dài chu kỳ kinh doanh theo hướng gỗ lớn trên điều kiện lập địa gò đồi Quảng Trị khi sử dụng giống có năng suất cao, thâm canh và điều tiết mật độ hợp lý. Do nghiên cứu chỉ dựa trên 09 ô tiêu chuẩn của một lâm phần 8,0 ha tại một thời điểm và chỉ đo đếm các bể chứa trên mặt đất, cần tiếp tục nghiên cứu ở nhiều cấp tuổi và lập địa, có bổ sung sinh khối rễ và carbon hữu cơ trong đất, để xác định chu kỳ kinh doanh và mật độ nuôi dưỡng tối ưu cho keo lai gỗ lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Arvola, A., Ha, H., Kanninen, M., Malkamäki, A., Simola, N., 2021. Financial attractiveness of wood production in smallholder plantations of central Vietnam in the context of developing carbon markets. Journal of Tropical Forest Science, 33(2), 137-148. https://www.jstor.org/stable/27007562
2. Baskerville, G. L., 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Canadian Journal of Forest Research, 2(1), 49-53. DOI: 10.1139/x72-009
3. Blackburn, D., Huong, V. D., Mendham, D., 2020. Returns to Vietnamese smallholder farmers from managing acacia plantations for sawn wood over 4-10 year rotations. Forest Policy and Economics, 121, 102318. DOI: 10.1016/j.forpol.2020.102318
4. Bộ Nông nghiệp và Môi trường, 2026. Công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2025 (ban hành theo Quyết định số 1106/QĐ-BNNMT của Bộ trưởng Bộ Nông nghiệp và Môi trường ngày 31/3/2026). Hà Nội, Việt Nam.
5. Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, 2019. Quyết định số 2962/QĐ-BNN-TCLN ngày 30/7/2019 về việc ban hành hướng dẫn kỹ thuật trồng rừng thâm canh gỗ lớn và chuyển hóa rừng trồng gỗ nhỏ sang rừng trồng gỗ lớn đối với loài cây keo lai và Keo tai tượng.
6. Chang, S. J., 1984. Determination of the optimal rotation age: A theoretical analysis. Forest Ecology and Management, 8(2), 137-147. DOI: 10.1016/0378-1127(84)90031-8
7. Chính phủ, 2021. Quyết định số 523/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược phát triển lâm nghiệp Việt Nam giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050. Ban hành ngày 01/4/2021. Hà Nội, Việt Nam.
8. Chính phủ, 2026. Nghị định số 180/2026/NĐ-CP quy định về dịch vụ hấp thụ và lưu giữ carbon của rừng. Ban hành ngày 21/5/2026, có hiệu lực từ ngày 15/7/2026. Hà Nội, Việt Nam.
9. Đỗ Anh Tuân, 2013. Xác định chu kỳ kinh doanh tối ưu rừng trồng keo lai theo quan điểm kinh tế tại Công ty Lâm nghiệp Lương Sơn, Hòa Bình. Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp, số 4; tr. 3049 - 3059.
10. Ho Thanh Ha, Nguyen Thi Thuong, Nguyen Hoi, Huynh Kim Hieu, 2025. Biomass and Carbon Sequestration Capacity Of FSC-Certified Acacia Plantations In Quang Nam province, Vietnam. International Journal of Environmental Sciences, 11(3s), 1465-1476. DOI: 10.64252/pmsat693
11. IPCC, 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html
12. Lê Đình Khả, 1993. Giống lai tự nhiên giữa Keo tai tượng và Keo lá tràm. Tạp chí Lâm nghiệp, số 7.
13. Minh, N. T., Koyano, K., Mizunaga, H., 2021. Assessing wind damage risk in complex terrain using an aerodynamic model in acacia hybrid plantations in Quang Tri, Vietnam. Journal of Tropical Forest Science, 33(4), 501-515. DOI:10.26525/jtfs2021.33.4.501
14. Nambiar, E. K. S., Harwood, C. E., Kien, N. D., 2015. Acacia plantations in Vietnam: research and knowledge application to secure a sustainable future. Southern Forests: A Journal of Forest Science, 77(1), 1 - 10. DOI: 10.2989/20702620.2014.999301
15. Ngô Đình Quế, Nguyễn Đức Minh, Vũ Tấn Phương, Lê Quốc Huy, Đinh Thanh Giang, Nguyễn Thanh Tùng, Nguyễn Văn Thắng, 2006. Khả năng hấp thụ CO_2 của một số loại rừng trồng chủ yếu ở Việt Nam. Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, số 7: 71-75.

16. Nguyễn Huy Sơn, Phạm Xuân Đỉnh, 2016. Khả năng cung cấp gỗ lớn của rừng keo lai 13,5 tuổi trồng ở Quảng Trị. Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp, số 3, tr. 4490-4497.
17. Nguyễn Văn Bích, Nguyễn Đăng Cường, Cao Thị Thu Hiền, Bùi Mạnh Hưng, 2020. Đặc điểm sinh trưởng và sinh khối của rừng trồng Keo tai tượng 7 tuổi tại Yên Bái. Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp, số 2, tr. 22-31.
18. Nguyễn Văn Bích, Hà Thị Mai, Võ Đại Hải, 2022. Sinh khối rừng trồng keo lai theo tuổi và cấp đất tại Yên Bái. Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp, số 4, tr. 132-145.
19. Nguyễn Văn Tuấn, Nguyễn Văn Thịnh, Phạm Tiến Dũng, Nguyễn Huy Hoàng, Nguyễn Việt Cường, Nguyễn Thị Thu Phương, Trần Hồng Vân, 2024. Xác định sinh khối và khả năng tích lũy carbon của rừng trồng thuần loài keo lai tại Khu dự trữ Sinh quyển Đồng Nai. Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp, số 1, tr.46-53.
20. Thu, P. Q., Quang, D. N., Chi, N. M., Hung, T. X., Binh, L. V., Dell, B., 2021. New and emerging insect pest and disease threats to forest plantations in Vietnam. Forests, 12(10), 1301. DOI: 10.3390/f12101301
21. Trần Duy Rương, 2013. Đánh giá hiệu quả rừng trồng keo lai ở một số vùng sinh thái tại Việt Nam. Luận án Tiến sỹ Nông nghiệp, Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam, Hà Nội, 131 tr.
22. Trần Quang Bảo, Võ Thành Phúc, 2019. Nghiên cứu sinh khối và khả năng hấp thụ CO_2 của rừng trồng keo lai tại tỉnh Bà Rịa Vũng Tàu. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp, số 2, tr. 69-75.
23. Trần Thị Ngoan, Nguyễn Tấn Chung, 2018. Sinh khối trên mặt đất đối với rừng trồng keo lai (*Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*) tại tỉnh Đồng Nai. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp, số 6, tr. 61-68.
24. Van Bueren M., 2004. Acacia hybrids in Vietnam. ACIAR Impact Assessment Series Report No. 27. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia, 44 p.
25. Võ Đại Hải, Đặng Thịnh Triều, Nguyễn Hoàng Tiệp, Nguyễn Văn Bích, Đặng Thái Dương, 2009. Năng suất sinh khối và khả năng hấp thụ carbon của một số dạng rừng trồng chủ yếu ở Việt Nam. NXB Nông nghiệp, Hà Nội, 236 tr.
26. Vu Dinh Huong, Nambiar, E. K. S., Quang, L. T., Mendham, D. S., Dung, P. T., 2015. Improving productivity and sustainability of successive rotations of *Acacia auriculiformis* plantations in South Vietnam. Southern Forests: A Journal of Forest Science, 77(1), 51-58. DOI: 10.2989/20702620.2014.983360
27. Vũ Tiến Hinh, 2012. Giáo trình điều tra rừng. Trường Đại học Lâm nghiệp Việt Nam. NXB Nông nghiệp, Hà Nội, 204 tr.

Email tác giả liên hệ: vuducbinhbtb@gmail.com

Ngày nhận bài: 11/08/2026

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 21/08/2026; 23/08/2026

Ngày duyệt đăng: 27/08/2026

Tạp chí KHLN Số 6/2026: 140 - 157
©: Viện KHLNVN - VAFS
DOI: https://doi.org/10.70169/VJFS.1286
ISSN: 1859 - 0373 Đăng tải tại: https://vjfs.vafs.gov.vn

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH CUBIST TRONG ƯỚC TÍNH SINH KHỐI TRÊN MẶT ĐẤT RỪNG LÁ RỘNG THƯỜNG XANH TỪ DỮ LIỆU KẾT HỢP SENTINEL-1, SENTINEL-2 VÀ THỰC ĐỊA TẠI XÃ NẬM LẦU TỈNH SƠN LA

Đinh Phương Thảo[1], Nguyễn Hải Hòa[1*], Vũ Văn Tuân[2], Nguyễn Văn Hùng[2], Hoàng Thị Thanh Tuyền[1], Nguyễn Hồng Hải[1], Vũ Văn Trường[1], Vũ Xuân Định[1], Lê Hùng Chiến[1]

[1]Trường Đại học Lâm nghiệp
[2]Trung tâm Khoa học Lâm nghiệp Tây Bắc, Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam

TÓM TẮT

Rừng lá rộng thường xanh (LRTX) có vai trò quan trọng trong điều hòa khí hậu, chống sạt lở đất, duy trì đa dạng sinh học và tích lũy carbon. Sinh khối trên mặt đất (AGB) là chỉ tiêu cơ bản để đánh giá trữ lượng carbon rừng, song việc điều tra AGB bằng phương pháp thực địa thường tốn nhiều thời gian, chi phí và khó mở rộng trên phạm vi lớn. Nghiên cứu xây dựng mô hình ước tính AGB rừng LRTX bằng thuật toán học máy Cubist tại xã Nậm Lầu, tỉnh Sơn La dựa trên ba nhóm biến độc lập, gồm nhóm biến chỉ số thực vật, kênh phổ đơn lẻ từ dữ liệu Sentinel-2; nhóm biến từ Sentinel-1 (giá trị tán xạ ngược, chỉ số, kết cấu Radar), và nhóm biến từ DEM, giá trị AGB quan sát từ 38,81 đến 213,99 Mg/ha, độ tin cậy của mô hình được đánh giá thông qua hệ số xác định R^2, RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error) và sai lệch hệ thống Bias. Kết quả đánh giá mô hình cho thấy mô hình AGB được xây dựng từ biến NDREn, dải phân cực (VV_VH), đặc trưng địa hình có độ tin cậy (MH1), được sử dụng để xây dựng bản đồ AGB (từ 9,77 đến 250,88 Mg/ha) và AGC (từ 4,59 đến 116,76 Mg/ha) rừng LRTX, với hệ số xác định trên tập kiểm định (R^2 = 0,835) và 10-fold CV (R^2 = 0,713), sai số RMSE kiểm định thấp nhất 14,94 Mg/ha, MAE là 12,15 Mg/ha và Bias kiểm định là -1,61%. MH1 được khuyến nghị sử dụng để lập bản đồ phân bố AGB rừng LRTX tại xã Nậm Lầu và các khu vực có đặc điểm địa hình tương đồng.

Từ khóa: Chỉ số thực vật, mô hình Cubist, rừng lá rộng thường xanh (LRTX), Sentinel-2, sinh khối trên mặt đất (AGB), viễn thám.

CUBIST-BASED ESTIMATION OF ABOVEGROUND BIOMASS IN EVERGREEN BROADLEAF FORESTS USING INTEGRATED SENTINEL-1, SENTINEL-2 AND FIELD DATA IN NAM LAU, SON LA PROVINCE

Dinh Phuong Thao[1], Nguyen Hai Hoa[1*], Vu Van Tuan[2], Nguyen Van Hung[2], Hoang Thi Thanh Tuyen[1], Nguyen Hong Hai[1], Vu Van Truong[1], Vu Xuan Dinh[1], Le Hung Chien[1]

[1]Vietnam National University of Forestry
[2]Forest Science Instistute of North Western Vietnam, Vietnamese Academy of Forestry Sciences
Corresponding author: hoanh@vnuf.edu.vn

ABSTRACT

Evergreen broadleaf forests (EBFs) play an important role in climate regulation, preventing landslides, maintaining biodiversity, and sequestering carbon. Above-ground biomass (AGB) is a fundamental indicator for assessing forest carbon stocks. However, field-based AGB inventories are often time-consuming and costly, making them difficult to implement over large areas. This study developed a Cubist-based AGB estimation model for EBFs in Nam Lau commune, Sơn La province, Vietnam. Three groups of independent variables were considered, vegetation indices and individual spectral bands derived from Sentinel-2 data; Sentinel-1 variables, including backscatter values, polarization indices, and Radar texture features; and variables derived from a digital elevation model (DEM). The observed AGB values ranged from 38.81 to 213.99 Mg/ha. Model reliability was evaluated using the coefficient of

determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and systematic bias (Bias). Model evaluation identified MH1, developed using the NDREn vegetation index, the VV_VH polarization feature, and topographic variables, as a reliable model. MH1 was subsequently used to generate AGB and AGC maps of EBFs, with estimated AGB ranging from 9.77 to 250.88 Mg/ha and AGC ranging from 4.59 to 116.76 Mg/ha. The model achieved an R^2 of 0.835 on the independent validation dataset and an R^2 of 0.713 under 10-fold cross-validation. Its lowest validation RMSE was 14.94 Mg/ha, with an MAE of 12.15 Mg/ha and a validation bias of -1.61%. MH1 is recommended for mapping the spatial distribution of AGB in evergreen broadleaf forests in Nam Lau commune and in other areas with similar topographic characteristics.

Keywords: Aboveground biomass, cubist model, evergreen broadleaf forest, remote sensing, Sentinel-2, vegetation indices.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rừng lá rộng thường xanh (LRTX) là một trong những hệ sinh thái rừng quan trọng ở vùng nhiệt đới và cận nhiệt đới với cấu trúc nhiều tầng tán, năng suất sinh học cao và đa dạng thành phần loài (Feroz *et al.*, 2015). Kiểu rừng này cung cấp nhiều dịch vụ hệ sinh thái như bảo tồn đa dạng sinh học, bảo vệ đất, điều tiết nguồn nước, duy trì chu trình dinh dưỡng và điều hòa khí hậu. Bên cạnh đó, rừng còn cung cấp gỗ và lâm sản ngoài gỗ, nguồn dược liệu và tạo sinh kế cho cộng đồng địa phương (Global Forest Resources Assessment 2020, 2020). Rừng LRTX là một trong những hệ sinh thái có khả năng lưu trữ và hấp thụ carbon lớn nhờ sinh khối cao và cấu trúc nhiều tầng tán. Cơ chế này góp phần quan trọng trong việc điều chỉnh các mô hình khí hậu toàn cầu và giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu (Levy *et al.*, 2004). Rừng LRTX với hơn 300 năm tuổi tại Vân Nam, Trung Quốc được cho là một bể hấp thụ carbon lớn với lượng hấp thụ ròng khoảng 9 tc/ha/năm, trong đó khoảng 60% mức tăng sinh khối đến từ sự sinh trưởng của các cây có đường kính trên 60 cm (Tan *et al.*, 2011). Do đó, việc ước tính chính xác sinh khối và trữ lượng carbon lưu trữ có ý nghĩa quan trọng cho công tác quản lý tài nguyên và giảm thiểu biến đổi khí hậu. Hiện nay, phương pháp truyền thống ước tính chủ yếu là điều tra thực địa kết hợp với phương trình sinh khối cho từng kiểu rừng, đây là phương pháp cung cấp số liệu có độ chính xác cao, nhưng việc triển khai trên quy mô lớn còn gặp nhiều khó khăn do đòi hỏi thời gian, nhân lực và kinh phí lớn, đặc biệt tại các khu rừng có địa hình phức tạp (Zoltán *et al.*, 2023). Trong những năm gần đây, dữ liệu viễn thám đã trở thành công cụ hiệu quả để giám sát và lập bản đồ AGB ở quy mô lớn nhờ khả năng thu nhận thông tin nhanh, đồng bộ và liên tục (Latterini *et al.*, 2025).

Sentinel-2 là vệ tinh quang học với 13 kênh phổ khác nhau. Trong đó, 4 kênh ở độ phân giải không gian 10 m, 6 kênh ở độ phân giải 20 m và 3 kênh ở độ phân giải 60 m. Độ rộng vùng quét quỹ đạo sẽ là 290 km, cho phép trích xuất nhiều chỉ số thực vật và biến phổ phục vụ xây dựng các mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất (Delwart, 2015). Một số nghiên cứu gần đây đã chứng minh tính khả thi của việc sử dụng Sentinel-2 để ước tính sinh khối rừng ở các vùng nhiệt đới, bao gồm Amazon, Đông Nam Á và châu Phi (Ngo *et al.*, 2026). Công nghệ viễn thám cho phép thu thập dữ liệu nhanh chóng và tiết kiệm chi phí, đặc biệt tại khu vực rừng khó tiếp cận đồng thời cung cấp chi tiết về những thay đổi trong sinh khối rừng theo thời gian (Ngo *et al.*, 2026). Tuy nhiên, dữ liệu quang học Sentinel-2 chịu ảnh hưởng của mây phủ, điều kiện khí quyển và hiện tượng bão hòa tín hiệu ở những khu vực có sinh khối cao, làm giảm độ chính xác của các mô hình ước tính (Delwart, 2015). Ngược lại, Sentinel-1 sử dụng công nghệ Radar khẩu độ tổng hợp (SAR) băng tần C có khả năng thu nhận dữ liệu trong mọi điều kiện thời tiết, cả ngày lẫn đêm và tín hiệu Radar có khả năng xuyên qua lớp tán rừng ở mức độ nhất định và phản ánh tốt đặc điểm cấu trúc của thảm thực vật (Fang *et al.*, 2023). Do đó, việc kết hợp dữ liệu Sentinel-1 và Sentinel-2 cho phép khai thác đồng thời thông tin phổ và thông tin cấu trúc

của rừng, góp phần khắc phục những hạn chế của từng nguồn dữ liệu riêng lẻ và nâng cao độ chính xác trong ước tính sinh khối trên mặt đất cũng như trữ lượng carbon (Fang *et al.*, 2023).

Tại Việt Nam, việc ứng dụng công nghệ viễn thám như Sentinel-1 (Radar SAR) và Sentinel-2 (quang học) đang trở thành hướng tiếp cận phổ biến trong giám sát tài nguyên rừng, phân loại thảm thực vật và ước tính sinh khối trên mặt đất. Một số nghiên cứu đã sử dụng Sentinel-2 để ước tính sinh khối và trữ lượng carbon cho rừng ngập mặn tại Thái Thụy thuộc tỉnh Thái Bình (nay là Hưng Yên), Tiên Yên thuộc tỉnh Quảng Ninh, cũng như đánh giá trữ lượng sinh khối rừng tự nhiên tại VQG Bái Tử Long (Ngo *et al.*, 2026), VQG Yok Đôn (Dang *et al.*, 2019) và Cao nguyên Kon Hà Nừng (Dang *et al.*, 2022). Bên cạnh đó, kết hợp giữa ảnh Sentinel-1 với Sentinel-2 được áp dụng để tận dụng ưu thế xuyên qua tán lá của sóng Radar C-band kết hợp với các chỉ số quang phổ dải Rìa đỏ (Red-edge) và Hồng ngoại, việc kết hợp này đã hạn chế hiệu ứng bão hòa phổ ở các khu vực rừng nhiệt đới có cấu trúc phức tạp và sinh khối cao (Nhung *et al.*, 2023).

Mặc dù việc kết hợp dữ liệu viễn thám quang học Sentinel-2 và Sentinel-1 đã cho thấy tiềm năng trong ước tính AGB, độ chính xác của mô hình vẫn phụ thuộc vào đặc điểm cấu trúc lâm phần, điều kiện thực địa, trạng thái thảm thực vật và khả năng phản ánh các đặc trưng sinh học của từng kiểu rừng, trạng thái rừng. Dữ liệu ảnh quang học có thể cung cấp thông tin về đặc tính phổ và trạng thái thảm thực vật, trong khi dữ liệu Sentinel-1 Radar (SAR) bổ sung thông tin về cấu trúc rừng và đặc tính tán xạ bề mặt. Do đó, việc tích hợp hai nguồn dữ liệu có thể cải thiện khả năng mô tả sự biến đổi sinh khối so với việc sử dụng từng nguồn dữ liệu riêng lẻ, mặc dù vẫn tồn tại hạn chế liên quan đến hiện tượng bão hòa tín hiệu và ảnh hưởng của địa hình (Yan *et al.*, 2023). Tại Việt Nam, một số nghiên cứu đã sử dụng dữ liệu Sentinel-1 Radar kết hợp với các nguồn viễn thám khác để ước tính sinh khối, trữ lượng carbon rừng, kết quả cho thấy khả năng khai thác dữ liệu vệ tinh trong đánh giá tài nguyên rừng trên phạm vi vùng và quốc gia. Tuy nhiên, việc xây dựng, lựa chọn và kiểm định mô hình ước tính AGB dựa trên sự kết hợp dữ liệu Sentinel-1 và Sentinel-2, đặc biệt là rừng LRTX tại xã Nậm Lầu, tỉnh Sơn La rất cần thiết để nhằm xác định và lựa chọn các biến đầu vào, thuật toán học máy phù hợp với điều kiện tại địa phương. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và yêu cầu quản lý tài nguyên rừng theo hướng bền vững, việc nâng cao độ tin cậy của các phương pháp ước tính sinh khối rừng có ý nghĩa thiết thực đối với công tác đánh giá tiềm năng tích lũy và kiểm kê carbon rừng. Xuất phát từ yêu cầu đó, nghiên cứu được thực hiện nhằm: (1) xây dựng và đánh giá mô hình ước tính AGB của rừng LRTX tại xã Nậm Lầu, tỉnh Sơn La trên cơ sở tích hợp dữ liệu Sentinel-1 và Sentinel-2 bằng thuật toán học máy Cubist; và (2) thành lập bản đồ phân bố sinh khối trên mặt đất và ước tính trữ lượng carbon tương ứng của hệ sinh thái rừng trong khu vực nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và dữ liệu không gian phục vụ đánh giá sinh khối, trữ lượng carbon, đồng thời hỗ trợ công tác quản lý, giám sát và bảo tồn tài nguyên rừng tại địa phương.

II. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ DỮ LIỆU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, sinh khối cây gỗ được hiểu là tổng khối lượng vật chất hữu cơ thuộc cây gỗ phía trên mặt đất như thân, cành, lá, hoa, quả và vỏ cây, đơn vị là Mg/ha (Ma *et al.*, 2024). Đối tượng nghiên cứu là sinh khối trên mặt đất (AGB, Aboveground Biomass) của cây gỗ, cây có đường kính $D_{1.3} \geq 6{,}0$ cm kiểu rừng LRTX.

2.2. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu thuộc xã Nậm Lầu, tỉnh Sơn La (hình 1). Tại đây, rừng LRTX thuộc địa phận quản lý của Ban Quản lý Rừng Đặc dụng - Phòng hộ Thuận Châu, tỉnh Sơn La. Nậm Lầu là một trong những xã có diện tích đất lâm nghiệp

lớn nhất (8.975,30 ha), bao gồm cả diện tích quy hoạch rừng đặc dụng (5.123,72 ha) và rừng phòng hộ (3.851,34 ha). Xã có địa hình đồi núi cao đặc trưng của vùng Tây Bắc, bị chia cắt mạnh với độ dốc lớn và độ cao trung bình dao động từ 700 - 750 m so với mực nước biển. Khí hậu tại đây mang tính chất nhiệt đới gió mùa phân hóa thành hai mùa mưa và khô rõ rệt, tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của thảm thực vật rừng tự nhiên. Hệ sinh thái rừng tại xã Nậm Lầu chủ yếu là rừng gỗ tự nhiên LRTX, giữ vai trò quan trọng trong việc bảo tồn đa dạng sinh học, phòng hộ chống xói mòn và điều tiết nguồn nước đầu nguồn cho khu vực.

2.3. Dữ liệu nghiên cứu

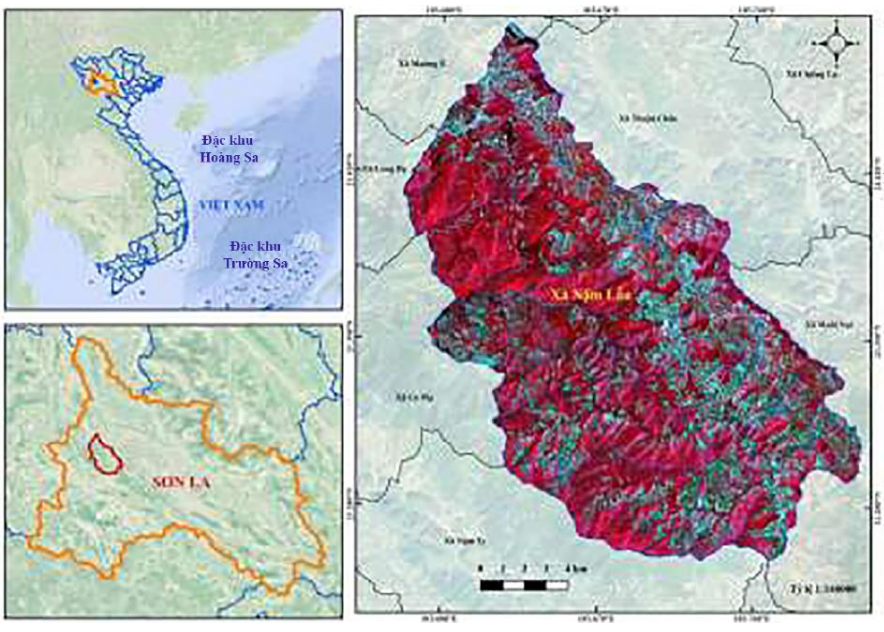
2.3.1. Dữ liệu thực địa

Để xây dựng mô hình ước tính AGB rừng LRTX, nghiên cứu sử dụng ảnh viễn thám Sentinel (Sentinel-1, Sentinel-2) để trích xuất các biến đầu vào cho mô hình cùng dữ liệu điều tra thực địa. Nghiên cứu đã thiết lập 45 ô tiêu chuẩn (OTC) để điều tra một số chỉ tiêu cấu trúc rừng, thời gian điều tra chỉ tiêu cấu trúc rừng từ tháng 3 đến tháng 5 năm 2026. Để đảm bảo lấy mẫu đại diện cho các trạng thái rừng (rừng trung bình, rừng nghèo, rừng nghèo kiệt) thuộc kiểu rừng LRTX trong khu vực xã, các vị trí OTC được chọn bằng phương pháp phân tầng ngẫu nhiên mẫu. OTC nghiên cứu có dạng hình tròn với diện tích 1000 m^2 (r= 17,84 m) được thiết lập. Các thông tin thu thập trong OTC bao gồm: Tọa độ OTC, tên loài (tên khoa học và địa phương), chu vi ngang ngực ($C_{1.3}$), chiều cao vút ngọn (H_{vn}) được điều tra theo TCVN 14204-2:2024.

Sau khi các chỉ tiêu cấu trúc của cây cá lẻ trong mỗi OTC được thu thập, sinh khối trên mặt đất (AGB) của từng cây được ước tính theo hướng dẫn TCVN 14287:2024. Đối với rừng LRTX, AGB được tính theo phương trình allometric tổng quát sau:

$$AGBgo = 277{,}273 \times (D_{1,3}{}^2 \times Hmt/10000)^{0,947} \times 10^{-3} \text{ (TCVN 14287:2024, 2024)}$$

Trong đó: AGBgo là sinh khối trên mặt đất của cây gỗ (đơn vị tính là tấn); $D_{1,3}$ là đường kính tại vị trí cách mặt đất 1,3 m, đo tất cả cây có $D_{1,3} \geq 6$ cm; Hmt là chiều cao men thân của cây gỗ (m); Hmt = H_{vn} × 1,04 (H_{vn}: chiều cao vút ngọn, đơn vị tính là m).



Hình 1. Khu vực nghiên cứu tại xã Nậm Lầu, tỉnh Sơn La (Sentinel-2: 26/03/2026, RGB:843)

2.3.2. Dữ liệu viễn thám

Nghiên cứu đã sử dụng dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2 MSI và Sentinel-1 C-SAR do Cơ quan Vũ trụ châu Âu (European Space Agency - ESA) cung cấp thông qua nền tảng Copernicus Data Space Ecosystem. Ảnh Sentinel-2 được lựa chọn ở mức xử lý Level-2A (Surface Reflectance), đã được hiệu chỉnh khí quyển và hình học và xử lý trên GEE để chuyển đổi các kênh phổ về cùng độ phân giải 10 m phục vụ tính toán các chỉ số phổ thực vật (Delwart, 2015).

Bảng 1. Thông số dữ liệu ảnh viễn thám sử dụng trong nghiên cứu

TT	Mã ảnh	Thời gian thu nhận	Kênh phổ	Độ phân giải (m)	Tỷ lệ mây (%)	Loại ảnh, mức độ xử lý ảnh
1	S2B_MSIL2A_20260326T033529_N0512_R061_T48QUJ_20260326T072554.SAFE	26/03/2026	B1÷B12	10, 20, 60	0,54	Sentinel-2
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20260323T225913_20260323T225942_063761_08045B_D651.SAFE	23/03/2026	VV, VH	10	-	Sentinel-1
3	DEM	2011		30		

Nguồn: Copernicus Data Space Ecosystem (ESA). https://dataspace.copernicus.eu/

Dữ liệu Sentinel-2 cung cấp 12 băng phổ với độ phân giải không gian 10 m, 20 m và 60 m; trong đó các băng 10 m và 20 m được sử dụng để tính toán các chỉ số phổ như NDVI, EVI, SAVI, NDWI và MSI (Delwart, 2015). Ảnh Sentinel-1 được sử dụng ở mức xử lý Level-1 với chế độ thu nhận Interferometric Wide Swath (IW) và hai kênh phân cực VV và VH (VV: truyền dọc - thu dọc và VH: truyền dọc - thu ngang), có độ phân giải không gian 10 m, cung cấp thông tin về đặc tính tán xạ ngược của thảm thực vật, ít bị ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết và mây che phủ. Hai nguồn dữ liệu được lựa chọn trong cùng thời kỳ nhằm hạn chế sai khác về điều kiện sinh trưởng của thảm thực vật (Fang *et al.*, 2023).

III. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Biến đầu vào cho mô hình

Các biến độc lập cho thuật toán được lựa chọn từ dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2, Sentinel-1 và mô hình độ cao số (DEM). Tập dữ liệu đặc trưng đầu vào bao gồm 3 nhóm biến đầu vào:

(1) Nhóm biến đầu vào từ dữ liệu ảnh Sentinel: gồm 10 kênh phổ quang học, các dải phổ này đều có khả năng dự báo sinh khối tốt (Fang *et al.*, 2023). Các biến ứng viên đầu vào cho xây dựng mô hình AGB được tổng hợp tại bảng 2.

Bảng 2. Các biến viễn thám sử dụng trong nghiên cứu.

Băng phổ	Bước sóng (nm)	Độ phân giải (m)	Mục đích sử dụng
B2 (Blue)	490	10	Tính EVI, ARVI và các chỉ số phổ
B3 (Green)	560	10	Hỗ trợ phân tích thảm thực vật
B4 (Red)	665	10	Tính NDVI, EVI, SAVI
B5 (Red Edge 1)	705	20	Đánh giá hàm lượng diệp lục
B6 (Red Edge 2)	740	20	Đánh giá cấu trúc tán rừng
B7 (Red Edge 3)	783	20	Phân tích sinh khối thực vật
B8 (NIR)	842	10	Tính NDVI, EVI, SAVI, NDWI
B8A (Narrow NIR)	865	20	Tính các chỉ số phổ hẹp (NDVIn, NDREn)
B11 (SWIR1)	1610	20	Tính MSI, NDWI

Bên cạnh các dải phổ đơn lẻ, các chỉ số thực vật phản ánh về cấu trúc thảm phủ và trạng thái sức khỏe rừng cũng được sử dụng cho việc xây dựng mô hình (bảng 3).

Bảng 3. Các chỉ số thực vật và độ ẩm được sử dụng cho mô hình

Chỉ số	Công thức tổng quát	Nguồn tham khảo
Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI)	(NIR-RED)/(NIR+RED)	Lima *et al.*, (2026)
NDVI dải hẹp (NDVIn)	(NIR_narrow-RED)/(NIR_narrow + RED)	Delwart (2015); Ngo *et al.*, (2026)
NDVI dải cạnh đỏ (NDVIre)	(NIR-RE)/(NIR+RE) hoặc (RE-RED)/(RE+RED)	Lima *et al.*, (2026)
NDRE dải hẹp (NDREn)	(NIR_narrow-RE1)/(NIR_narrow+RE1)	Lima *et al.*, (2026)
RENDVI phổ cạnh đỏ (RENDVI)	(RE3-RE1)/(RE3+RE1)	Gitelson, Merzlyak (1994)
Chỉ số chênh lệch chuẩn hóa K4-K5 (NDI45)	(RE1-RED)/(RE1+RED)	Delegido *et al.*, (2011)
Chỉ số thực vật dải động rộng 1 (WDRVI_1)	(0.1*NIR-RED)/(0.1*NIR+RED)	Gitelson (2004)
Chỉ số thực vật dải động rộng 2 (WDRVI_2)	(0.2*NIR-RED)/(0.2*NIR+RED)	Gitelson (2004)
Chỉ số chênh lệch nước chuẩn hóa (NDWI)	(NIR-SWIR1)/(NIR+SWIR1) hoặc (GREEN-NIR)/(GREEN+NIR)	Gao (1996)
Chỉ số thực vật sai khác (DVI)	NIR-RED	Xue, Su (2017)
Chỉ số thực vật nâng cao (EVI)	2.5 * (NIR-RED)/(NIR+6*RED - 7.5*BLUE+1)	Huete *et al.*, (2002)
Chỉ số thực vật điều chỉnh theo đất (SAVI)	(1+L)*(NIR-RED)/(NIR+RED+L) [L = 0.5]	Huete (1988)
Chỉ số diện tích lá (LAI)	(3.618*EVI)-0.118	Boegh *et al.*, (2002)
Chỉ số ức chế độ ẩm (MSI)	SWIR1/NIR	Hunt, Rock (1989)

Ghi chú: BLUE: là kênh 2, GREEN: kênh 3, RED: kênh 4, RE1: kênh 5, RE2: kênh 6, RE3: kênh 7, NIR: kênh 8, NIR_narrow (B8A): kênh 8A, SWIR1: kênh 11, SWIR2: kênh 12

(2) Nhóm biến Sentinel-1 SAR: Các nghiên cứu cho thấy nhóm biến này giúp cải thiện độ chính xác của mô hình (Fang *et al.*, 2023; Nhung *et al.*, 2023), các biến được lựa chọn cho mô hình cụ thể ở bảng 4.

Bảng 4. Các biến nhóm Sentinel-1 SAR.

Nhóm biến	Biến	Công thức	Mô tả
Sentinel-1 SAR: Tán xạ ngược & Chỉ số phân cực (C-Band Backscatter)	VH_db, VV_db	γ0_VH (dB) γ0_VV (dB)	Cường độ tán xạ ngược phân cực VH (Vertical-Horizontal) và VV (Vertical-Vertical) tính theo thang decibel (dB)
	VV-VH	γ0_VV - γ0_VH (dB)	Hiệu số tán xạ ngược giữa phân cực dọc và phân cực chéo (Pol_diff_dB)
	VH/VV VV/VH	γ0_VH / γ0_VV γ0_VV / γ0_VH	Tỷ số tán xạ ngược phân cực (Pol_ratio_dB) đánh giá cấu trúc tán rừng
	RVI (DPRVI_dB)	(4 × γ0_VH) / (γ0_VH + γ0_VV)	Dual-Polarization Radar Vegetation Index (Chỉ số thực vật Radar phân cực kép)
Sentinel-1 SAR: Đặc trưng kết cấu (GLCM Textures 11×11)	GLCM Entrope (VH, VV)	$\sum P(i,j) \times (-\ln P(i,j))$	Đo lường độ hỗn loạn/ngẫu nhiên của mức xám tán xạ ngược trên cả 2 kênh phân cực VH & VV
	GLCM Mean (VH, VV)	$\mu i = \sum j \times P(i,j)$	Giá trị trung bình cục bộ mức xám trong ma trận đồng xuất GLCM (kênh VH & VV)
	GLCM Variance (VH, VV)	$\sigma^2 i = \sum P(i,j) \times (j - \mu j)^2$	Phương sai độ xám GLCM (VH_GLCM Variance là biến có độ quan trọng cao nhất trong mô hình TSB)

Nguồn: Georgopoulos et al., 2022.

(3) Nhóm biến số cấu trúc địa hình: Trích xuất trực tiếp dữ liệu địa hình từ mô hình độ cao số (DEM) bao gồm: độ cao tuyệt đối (Elevation), độ dốc (Slope) và hướng phơi (Aspect) nhằm hiệu chỉnh sai số hình học do hiện tượng bóng núi và góc chiếu mặt trời gây ra tại địa hình đồi núi dốc phức tạp của xã Nậm Lầu (Latterini *et al.*, 2025).

3.2. Đồng bộ hóa dữ liệu không gian

3.2.1. Tiền xử lý ảnh viễn thám

Quá trình tiền xử lý dữ liệu được thực hiện kết hợp trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) và Sentinel Application Platform (SNAP), nhằm đảm bảo chất lượng và tính đồng nhất về không gian và khả năng tích hợp các biến đầu vào cho xây dựng mô hình AGB (hình 2). Đối với ảnh Sentinel-1, các sản phẩm ảnh Radar được tiền xử lý trên SNAP thông qua các bước hiệu chỉnh quỹ đạo (Apply Orbit File), loại bỏ nhiễu nhiệt (Thermal Noise Removal), hiệu chuẩn bức xạ (Radiometric Calibration), hiệu chỉnh địa hình (Terrain Correction) và chuyển hệ số tán xạ ngược sang đơn vị decibel (dB). Đối với dữ liệu Sentinel-2, việc xử lý được thực hiện chủ yếu trên GEE bằng cách lựa chọn khu vực và thời gian nghiên cứu, sử dụng sản phẩm phản xạ bề mặt Level- 2A, loại bỏ mây và bóng mây thông qua các lớp thông tin chất lượng ảnh, mặt nạ mây phù hợp. Các ảnh đạt yêu cầu được tổng hợp thành ảnh tổ hợp nhằm giảm ảnh hưởng của mây và các yếu tố gây nhiễu, đồng thời bảo đảm tính đại diện của dữ liệu trong thời gian nghiên cứu. Các kênh phổ được lựa chọn để tính toán chỉ số thực vật và xây dựng các biến phục vụ mô hình ước tính AGB (bảng 3). Đối với mô hình số độ cao (DEM), dữ liệu được kiểm tra chất lượng, cắt theo phạm vi nghiên cứu và sử dụng để dẫn xuất các biến địa hình như độ cao, độ dốc, hướng sườn.

Sau khi hoàn thành các bước tiền xử lý ảnh, dữ liệu Sentinel-1, Sentinel-2 và DEM được tích hợp trên GEE và phần mềm QGIS. Tất cả dữ liệu được cắt theo ranh giới khu vực nghiên cứu (hình 2), chuẩn hóa về hệ tọa độ WGS84/UTM Zone 48N (EPSG:32648) và thống nhất độ phân giải phân tích 10 m. Phương pháp nội suy song tuyến tính (Bilinear Resampling) được sử dụng đối với các dữ liệu liên tục khi cần thay đổi độ phân giải. Cuối cùng, các lớp dữ liệu được đồng bộ về phạm vi không gian, hệ tọa độ và lưới phân tích, chúng được kiểm tra chất lượng trước khi trích xuất biến đầu vào phục vụ xây dựng, đánh giá mô hình ước tính AGB theo thuật toán Cubist (Vinh *et al.*, 2025).

3.2.2. Kiểm tra và xử lý giá trị ngoại lai (Outliers)

Quy trình này được thực hiện nhằm hạn chế ảnh hưởng của sai số đo đạc, sai sót khi nhập số liệu và các bất thường trong quá trình trích xuất dữ liệu, đồng thời bảo toàn những biến thiên thực tế của cấu trúc rừng trong bộ dữ liệu sử dụng để huấn luyện và kiểm định mô hình. Bộ dữ liệu được kiểm tra nhằm phát hiện các giá trị ngoại lai (outliers) có thể ảnh hưởng đến độ tin cậy của mô hình ước tính AGB, quá trình phân tích được thực hiện trên môi trường Rstudio (RStudio-2026.08.1-195), sử dụng gói outliers (packages) kết hợp với các phương pháp thống kê. Phương pháp khoảng tứ phân vị (Interquartile Range- IQR) được sử dụng để xác định các giá trị quan sát nằm ngoài phạm vi biến thiên thông thường của dữ liệu, chỉ số Z-score được sử dụng để đánh giá mức độ sai lệch của từng giá trị quan sát so với giá trị trung bình của tập dữ liệu. Ngưỡng giá trị ngoại lai được xác định: Với IQR, ngưỡng dưới $L = Q_1 - 1{,}5 \times IQR$ và trên $U = Q_3 + 1{,}5 \times IQR$. Với Z-score, ngưỡng $|Z|>3$ được sử dụng như một quy tắc sàng lọc các giá trị ngoại lai. Các giá trị bất thường được kiểm tra đối chiếu với số liệu điều tra thực địa, gồm các chỉ tiêu đo tại OTC, giá trị AGB tính toán và các biến viễn thám trích xuất tương ứng. Việc loại bỏ, giữ lại các giá trị quan sát được quyết định trên cơ sở xem xét nguyên nhân sai lệch và độ tin cậy của số liệu gốc, thay vì tự động loại bỏ tất cả các giá trị vượt ngưỡng thống kê.