

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÂY NGUYÊN**



HỒ ĐÌNH BẢO

**ƯỚC LƯỢNG KHẢ NĂNG HẤP THỤ CO₂ CỦA KIỂU RỪNG THƯỜNG
XANH TRÊN ĐỊA BÀN TỈNH ĐẮK LẮK DỰA VÀO DỮ LIỆU VIỄN
THÁM VÀ KỸ THUẬT GIS**

**Ngành: Lâm sinh
Mã số: 9 62 02 05**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ LÂM SINH

Đắk Lắk - 2026

Công trình hoàn thành tại:
TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÂY NGUYÊN

Người hướng dẫn: PGS.TS. Nguyễn Thị Thanh Hương

Phản biện 1: GS.TS. Võ Quang Minh, Trường Đại học Cần Thơ

Phản biện 2: PGS.TS. Trần Trung Dũng, Trường Đại học Tây Nguyên

Phản biện 3: PGS.TS. Trần Thị Vân, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh

Luận án sẽ bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Trường, họp tại:
Trường Đại học Tây Nguyên
Vào hồi 13 giờ 30 phút, ngày 03 tháng 02 năm 2026

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện: Thư viện quốc gia Việt Nam và Thư viện Trường Đại học
Tây Nguyên

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Biến đổi khí hậu đang là một trong những thách thức môi trường nghiêm trọng nhất của thế kỷ XXI, tác động mạnh mẽ đến các hệ sinh thái toàn cầu, đặc biệt tại vùng nhiệt đới – nơi có mức độ nhạy cảm cao trước hạn hán, nắng nóng và các hiện tượng khí hậu cực đoan (Hoegh-Guldberg và cộng sự, 2019). Trong bối cảnh đó, rừng đóng vai trò then chốt trong điều hòa khí hậu thông qua khả năng hấp thụ và lưu trữ các-bon, với khoảng 76–98% lượng các-bon trên mặt đất được tích lũy trong hệ sinh thái rừng (Pan và cộng sự, 2011; Houghton và cộng sự, 2009).

Trong các hệ sinh thái nhiệt đới ẩm, rừng lá rộng thường xanh được xem là một trong những bể chứa các-bon quan trọng nhất nhờ trữ lượng sinh khối lớn và khả năng hấp thụ CO₂ cao. Sinh khối trên mặt đất (Aboveground Biomass – AGB) vì vậy trở thành tham số cốt lõi phản ánh cấu trúc, năng suất sinh học và tiềm năng hấp thụ CO₂ của rừng, đồng thời là cơ sở khoa học cho kiểm kê khí nhà kính, quản lý rừng bền vững và hoạch định chính sách ứng phó với biến đổi khí hậu (Sarker & Nichol, 2011; Huang và cộng sự, 2019).

Tại Việt Nam, các chính sách lớn như Luật Lâm nghiệp năm 2017, Chiến lược phát triển lâm nghiệp giai đoạn 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050 và Nghị quyết số 57-NQ/TW đều nhấn mạnh yêu cầu hiện đại hóa công tác điều tra, giám sát tài nguyên rừng và nâng cao vai trò của rừng trong mục tiêu phát thải ròng bằng “0” (Net-Zero). Điều này đòi hỏi các phương pháp ước tính sinh khối và các-bon rừng phải có độ chính xác cao, minh bạch và phù hợp với các tiêu chuẩn quốc tế.

Đối với khu vực Tây Nguyên, đặc biệt là tỉnh Đắk Lắk, rừng thường xanh có vai trò quan trọng trong điều hòa khí hậu và bảo vệ lưu vực nhưng đang chịu áp lực lớn từ suy thoái rừng, biến động sử dụng đất và hạn hán kéo dài. Trong bối cảnh đó, việc ứng dụng công nghệ viễn thám đa nguồn kết hợp với các thuật toán học máy hiện đại như Random Forest để ước tính AGB và CO₂ hấp thụ có ý nghĩa cấp thiết, góp phần cung cấp cơ sở khoa học phục vụ quản lý rừng bền vững và ứng phó biến đổi khí hậu.

2.1. Mục tiêu tổng quát

Ước tính lượng CO₂ hấp thụ từ sinh khối trên mặt đất (AGB) của kiểu rừng thường xanh trên địa bàn tỉnh Đắk Lắk thông qua tích hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn, kỹ thuật GIS và số liệu điều tra thực địa.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Phân tích mối quan hệ giữa các chỉ số và đặc trưng ảnh viễn thám với AGB của rừng thường xanh.
- Xây dựng và đánh giá mô hình ước tính AGB từ dữ liệu viễn thám, lựa chọn mô hình tối ưu cho khu vực nghiên cứu.
- Lập bản đồ AGB và lượng CO₂ hấp thụ, đồng thời phân tích biến động theo không gian – thời gian.

3. Những đóng góp mới của đề tài

- Xây dựng phương pháp tích hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn (Sentinel-1, Landsat), GIS và mô hình học máy RF để ước tính sinh khối AGB và lượng CO₂ hấp thụ của rừng thường xanh trên địa bàn tỉnh Đắk Lắk.
- Xác định được một số đặc trưng ảnh viễn thám có mối quan hệ chặt chẽ với AGB và khả năng hấp thụ CO₂ của RTX tỉnh Đắk Lắk..
- Cung cấp bằng chứng khoa học hỗ trợ việc định giá dịch vụ hấp thụ các-bon của rừng, phù hợp với định hướng chuyển đổi số và cam kết Net-Zero của Việt Nam..

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1. Ý nghĩa khoa học

Góp phần làm rõ mối quan hệ giữa đặc trưng ảnh viễn thám và sinh khối rừng, từ đó phát triển các mô hình ước tính khả năng hấp thụ CO₂ dựa trên nền tảng thống kê hiện đại và nền tảng dữ liệu mở;

Đóng góp cơ sở lý luận và phương pháp luận cho việc tích hợp viễn thám đa nguồn và GIS trong đánh giá dịch vụ hệ sinh thái rừng, đặc biệt là dịch vụ hấp thụ các-bon và chương trình trung hòa các-bon.

4.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu hỗ trợ cơ quan quản lý nhà nước, chủ rừng và các bên liên quan trong việc xác định tiềm năng hấp thụ CO₂ của rừng theo thời gian thực, phục vụ hiệu quả chính sách chi trả dịch vụ các-bon rừng, quản lý rừng bền vững và và chương trình trung hòa các-bon;

Mô hình được xây dựng từ nghiên cứu có thể được nghiên cứu và áp dụng mở rộng cho các khu vực có điều kiện sinh thái tương đồng, cũng như các kiểu rừng khác nhằm góp phần nâng cao hiệu quả quản lý tài nguyên rừng trên quy mô rộng.

5. Kết cấu luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và kiến nghị, luận án được kết cấu thành 3 chương, cụ thể:

Chương 1: Tổng quan vấn đề nghiên cứu

Chương 2: Đối tượng, nội dung và phương pháp nghiên cứu

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Nhu cầu xác định sinh khối, carbon của cây rừng

Sinh khối và carbon rừng là những chỉ số quan trọng trong nghiên cứu lâm học, quản lý tài nguyên và ứng phó biến đổi khí hậu. Sinh khối trên mặt đất (Aboveground Biomass – AGB) phản ánh năng suất sinh học và khả năng tích lũy carbon của rừng, đồng thời là cơ sở để tính toán lượng CO₂ được hấp thụ hoặc phát thải. Việc xác định chính xác sinh khối giúp lượng hóa vai trò của rừng trong cân bằng carbon toàn cầu, là căn cứ cho kiểm kê khí nhà kính, tham gia cơ chế REDD⁺, chi trả dịch vụ môi trường rừng (PFES) và hoạch định chính sách quản lý bền vững. Ở Việt Nam, nhu cầu ước tính AGB ngày càng cấp thiết nhằm đáp ứng yêu cầu báo cáo quốc tế, đồng thời phục vụ công tác quy hoạch bảo vệ và phát triển rừng trong bối cảnh suy thoái tài nguyên và biến đổi khí hậu gia tăng.

1.2. Ước tính sinh khối, carbon cây rừng

Các nghiên cứu ước tính sinh khối rừng đã phát triển mạnh từ giữa thế kỷ XX. Phương pháp truyền thống chủ yếu dựa trên đo đạc thực địa, xây dựng phương trình tương quan giữa các chỉ số sinh trưởng (đường kính, chiều cao, mật độ gỗ) với sinh khối. Tuy nhiên, cách tiếp cận này đòi hỏi công sức lớn, phạm vi áp dụng hẹp và khó mở rộng cho quy mô lớn.

Sự ra đời của công nghệ viễn thám và GIS đã mở ra hướng tiếp cận mới: sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh, ảnh hàng không và dữ liệu radar, LiDAR để gián tiếp ước tính AGB. Viễn thám cho phép theo dõi biến động rừng trên diện rộng, nhiều thời gian, chi phí thấp, trong khi GIS hỗ trợ tích hợp, phân tích không gian và biên tập bản đồ chuyên đề.

1.2.1. Ứng dụng GIS và viễn thám trong ước tính sinh khối

Viễn thám và GIS ngày nay được xem là công cụ hiệu quả trong nghiên cứu và quản lý rừng. Ứng dụng chủ yếu gồm: (i) xây dựng bản đồ hiện trạng và biến động rừng; (ii) trích xuất các chỉ số phổ và cấu trúc tán rừng; (iii) tích hợp dữ liệu địa hình và nhân tố môi trường; (iv) phát triển mô hình dự báo sinh khối. Nhờ đó, có thể giảm phụ thuộc vào dữ liệu đo đạc truyền thống, đồng thời nâng cao độ chính xác và khả năng khái quát hóa.

1.2.2. Nguyên tắc ước tính AGB qua viễn thám

Nguyên tắc cơ bản của việc ước tính AGB từ viễn thám là khai thác mối quan hệ giữa đặc trưng phổ phản xạ hoặc tán xạ của thảm thực vật với cấu trúc sinh học của rừng. Thực vật có đặc tính phản xạ mạnh ở dải cận hồng ngoại (NIR) và hấp thụ ở dải đỏ, do đó các chỉ số thực vật (NDVI, EVI, SAVI, v.v.) được sử dụng rộng rãi để gián tiếp suy đoán mật độ, diện tích lá và sinh khối. Đối với radar, độ nhạy với cấu trúc tán và hàm lượng sinh khối cho phép bổ sung thông tin trong điều kiện mây che phủ.

1.2.3. Nguồn dữ liệu ảnh viễn thám

Ảnh quang học thụ động: Landsat, Sentinel-2, MODIS, PlanetScope... cung cấp chuỗi dữ liệu dài hạn, độ phân giải từ trung bình đến cao, phù hợp theo dõi biến động rừng nhiều thời gian.

Ảnh siêu cao tần (SAR): Sentinel-1, ALOS PALSAR... hoạt động ở dải vi sóng, ít bị ảnh hưởng bởi mây, có khả năng phản ánh cấu trúc tán và độ ẩm rừng.

LiDAR: Cung cấp dữ liệu 3D chi tiết về chiều cao cây, cấu trúc tầng tán, độ che phủ, được coi là dữ liệu tham chiếu quan trọng để hiệu chỉnh mô hình AGB.

Tích hợp đa nguồn: Kết hợp ảnh quang học – radar – LiDAR giúp nâng cao độ chính xác, giảm sai số do hạn chế riêng của từng loại dữ liệu.

1.2.4. Các phương pháp ước tính AGB

Viễn thám ngày càng giữ vai trò chủ đạo trong ước tính sinh khối rừng (AGB), hỗ trợ hiệu quả cho điều tra thực địa. Dựa trên cơ sở lý thuyết và cách mô tả mối quan hệ giữa tín hiệu viễn thám và sinh khối, các phương pháp ước tính AGB được chia thành bốn nhóm chính: mô hình thực nghiệm, mô hình vật lý, mô hình cơ học (quá trình) và mô hình toàn diện.

Trong đó, mô hình thực nghiệm là nhóm được sử dụng phổ biến nhất. Các mô hình này xây dựng quan hệ thống kê giữa dữ liệu viễn thám và số liệu ô mẫu, bao gồm hồi quy tuyến tính, hồi quy đa biến, các mô hình phi tuyến và thuật toán học máy. Những năm gần đây, xu hướng nghiên cứu trong nước và quốc tế cho thấy sự chuyển dịch rõ rệt từ hồi quy truyền thống sang các thuật toán phi tuyến và học máy như Random Forest, SVM, ANN và Cubist, giúp cải thiện đáng kể độ chính xác, đặc biệt trong các hệ sinh thái rừng nhiệt đới phức tạp. Trong số đó, Random Forest được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng mô hình hóa quan hệ phi tuyến, xử lý tương tác đa biến và hạn chế hiện tượng quá khớp.

Mô hình vật lý và mô hình quang hình học ước tính AGB dựa trên các tham số cấu trúc rừng như chiều cao cây, độ che phủ tán và LAI, thường kết hợp với dữ liệu LiDAR hoặc ảnh đa góc. Nhóm mô hình này có ý

nghĩa vật lý rõ ràng và độ ổn định cao, song đòi hỏi dữ liệu đầu vào phức tạp và hiện mới chủ yếu áp dụng ở quy mô nhỏ; tại Việt Nam còn hạn chế do thiếu dữ liệu LiDAR diện rộng.

Mô hình cơ học (mô hình quá trình) mô phỏng sinh khối dựa trên các nguyên lý sinh lý – sinh thái như quang hợp và chu trình các-bon. Mặc dù phản ánh tốt cơ chế sinh thái, các mô hình này yêu cầu nhiều tham số khí hậu, đất và sinh lý cây, nên khó triển khai trong điều kiện thiếu dữ liệu chi tiết.

Mô hình toàn diện kết hợp dữ liệu viễn thám và nguyên lý sinh thái để mô phỏng động thái rừng và biến động sinh khối dài hạn dưới tác động của khai thác và biến đổi khí hậu. Tuy có tiềm năng lớn, nhóm mô hình này phụ thuộc mạnh vào dữ liệu sinh học – sinh thái chi tiết, hiện chưa đáp ứng được trong bối cảnh nghiên cứu tại Việt Nam.

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy, trong điều kiện hạn chế về dữ liệu cấu trúc và sinh thái, mô hình thực nghiệm, đặc biệt là các thuật toán học máy như Random Forest, là hướng tiếp cận khả thi và phù hợp nhất cho ước tính và phân tích biến động AGB rừng ở Việt Nam, trong đó có tỉnh Đắk Lắk.

1.3. Thách thức và triển vọng khi sử dụng viễn thám để ước tính AGB

Việc ước tính sinh khối rừng trên mặt đất (AGB) bằng ảnh viễn thám đã đạt nhiều tiến bộ trong những thập kỷ gần đây và đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu chu trình các-bon và ứng phó biến đổi khí hậu. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn đối mặt với nhiều thách thức liên quan đến dữ liệu, đo đạc thực địa và mô hình hóa.

Về dữ liệu viễn thám, tín hiệu phổ và ra-đa chịu ảnh hưởng của điều kiện khí quyển, độ ẩm, góc chiếu sáng, sai số tiền xử lý và hiện tượng bão hòa ở các lâm phần có sinh khối cao, đặc biệt trong rừng nhiệt đới phức tạp. Sự không đồng bộ về thời gian và không gian giữa ảnh viễn thám và dữ liệu thực địa cũng làm gia tăng độ không chắc chắn. Trong khi đó, dữ liệu thực địa chịu sai số đo đạc, hạn chế về số lượng ô mẫu và chi phí thu thập cao, ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của mô hình.

Từ góc độ mô hình hóa, độ chính xác ước tính AGB phụ thuộc mạnh vào lựa chọn mô hình, biến đầu vào và khả năng mô tả các mối quan hệ phi tuyến trong cấu trúc rừng nhiều tầng.

Bên cạnh các thách thức, triển vọng ứng dụng viễn thám trong ước tính AGB là rất lớn nhờ khả năng cung cấp dữ liệu liên tục trên diện rộng. Việc tích hợp đa nguồn dữ liệu quang học, SAR và LiDAR, kết hợp với các phương pháp học máy hiện đại, đang mở ra hướng tiếp cận hiệu quả nhằm nâng cao độ chính xác và tính ổn định của bản đồ AGB phục vụ quản lý rừng và kiểm kê các-bon..

1.4. Khoảng trống nghiên cứu và lý do lựa chọn đề tài

Các nghiên cứu ước tính sinh khối rừng (AGB) và khả năng hấp thụ CO₂ bằng viễn thám tại Việt Nam vẫn còn những khoảng trống đáng kể, đặc biệt đối với rừng lá rộng thường xanh. Phần lớn các nghiên cứu mang tính cắt ngang, thiếu chuỗi giám sát dài hạn; phụ thuộc chủ yếu vào dữ liệu quang học, chưa khai thác hiệu quả dữ liệu ra-đa đa thời gian; ít so sánh hệ thống giữa các mô hình hồi quy tuyến tính, phi tuyến và học máy; đồng thời chưa áp dụng đầy đủ các phương pháp phân tích xu thế thống kê như Mann–Kendall và Sen's slope.

Xuất phát từ các khoảng trống đó, đề tài được lựa chọn nhằm xây dựng chuỗi giám sát dài hạn (2015–2025) cho rừng thường xanh tỉnh Đắk Lắk dựa trên tích hợp dữ liệu Sentinel-1 và Landsat, kết hợp mô hình Random Forest với các phương pháp hồi quy và phân tích xu thế. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và dữ liệu GIS phục vụ quản lý rừng bền vững, REDD+, MRV và thực hiện cam kết phát thải ròng bằng “0” của Việt Nam.

CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG, NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Kiểu rừng tự nhiên thường xanh và khả năng hấp thụ khí CO₂ của rừng thông qua sinh khối trên mặt đất (AGB).

2.2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Nội dung nghiên cứu

- Đánh giá thay đổi diện tích rừng thường xanh (RTX) tỉnh Đắk Lắk giai đoạn 2015–2025
- Phân tích mối quan hệ giữa đặc trưng ảnh viễn thám và AGB
- Xây dựng mô hình ước tính AGB từ dữ liệu viễn thám
- Lập bản đồ AGB và lượng CO₂ hấp thụ, đánh giá biến động theo thời gian

2.2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được triển khai trên cơ sở tích hợp dữ liệu đa nguồn, kết hợp số liệu thực địa với ảnh viễn thám quang học và radar đa thời gian để ước tính, lập bản đồ và phân tích biến động sinh khối trên mặt đất (AGB) cũng như khả năng hấp thụ CO₂. Cách tiếp cận này vừa đảm bảo độ tin cậy nhờ dữ liệu đo đạc, vừa tận dụng tính toàn diện và khả năng bao phủ rộng của viễn thám.

Trên thực địa, AGB được tính toán từ các ô mẫu tiêu chuẩn dựa trên đo đạc DBH và H, áp dụng phương trình allometric phù hợp với rừng thường xanh ở Tây Nguyên. Ô mẫu 30×30 m được bố trí theo phân khối

trạng thái nhằm đảm bảo tính đại diện và tương thích độ phân giải ảnh Landsat. Dữ liệu thực địa được ghép nối với ảnh vệ tinh cùng mùa/cùng năm để hạn chế sai lệch thời vụ.

Ảnh viễn thám được lựa chọn ở mức phản xạ bề mặt (Surface Reflectance – SR), bao gồm Landsat 8 OLI/TIRS (2013–2025) và Sentinel-1 SAR. Dữ liệu được tiền xử lý hiệu chỉnh khí quyển, loại bỏ mây, tổ hợp ảnh theo mùa và cắt theo ranh giới nghiên cứu. Các chỉ số phổ (NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI, NDWI, MSI...) được tính toán nhằm phản ánh đặc trưng sinh lý, sinh thái và tình trạng ẩm của thảm thực vật.

2.2.2.1. Thu thập và xử lý dữ liệu thực địa

Tổng cộng 117 ô mẫu được sử dụng, trong đó 70 ô mới đo đạc giai đoạn 2020–2024 tại các huyện M'Đrăk, Ea Kar, Krông Bông và Lắk, cùng 47 ô mẫu kế thừa từ dự án trước. Các ô mẫu được đo chi tiết DBH, chiều cao, đường kính tán của tất cả cây gỗ có $DBH \geq 5$ cm. Sinh khối được tính toán bằng phương trình allometric của Bảo Huy và cộng sự (2016a).

$$AGB = 263,9977 \times (DBH^2 \times H)^{0,93645}$$

Từ AGB, lượng carbon và CO_2 được tính toán theo hệ số của IPCC:

- Các-bon = $AGB \times 0,47$
- CO_2 = Các-bon $\times 3,67$

2.2.2.2. Dữ liệu viễn thám

Dữ liệu Landsat 8 OLI/TIRS được thu thập từ Google Earth Engine, đã hiệu chỉnh khí quyển và hình học. Các ảnh được lọc mây bằng QA band và Fmask, tổ hợp theo thời gian để khắc phục mây che phủ. Sentinel-1 SAR được tiền xử lý bằng toolbox ESA (khử nhiễu, hiệu chuẩn bức xạ, hiệu chỉnh địa hình bằng SRTM/ASTER DEM) và chuyển đổi sang dB để tích hợp với ảnh quang học.

Từ ảnh đã tiền xử lý, các chỉ số quang học và radar được tính toán. Những biến có tương quan cao được loại bỏ bằng phân tích Pearson, sau đó lựa chọn biến giải thích thông qua PCA và phân tích ý nghĩa thống kê.

2.2.2.3. Phân tích thay đổi thảm phủ rừng thường xanh giai đoạn 2015-2025

Nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh Landsat 8 OLI/TIRS để phân loại và phân tích biến động thảm phủ rừng lá rộng thường xanh (RTX) tại tỉnh Đắk Lắk giai đoạn 2015–2025. Bộ dữ liệu mẫu gồm 1110 điểm (510 RTX và 600 lớp khác) được lựa chọn theo phương pháp lấy mẫu ngẫu nhiên phân tầng và chia thành tập huấn luyện (80%) và kiểm định (20%). Việc suy diễn lớp phủ quá khứ được thực hiện theo phương pháp “lấy không gian thay thế thời gian”, kết hợp ảnh vệ tinh đa thời gian và dữ liệu hiện trạng rừng nhằm đảm bảo tính nhất quán chuỗi thời gian.

Phân loại thảm phủ được thực hiện bằng thuật toán Random Forest trên nền tảng Google Earth Engine. Độ chính xác được đánh giá thông qua ma trận sai số với các chỉ tiêu OA, PA, UA và hệ số Kappa. Trên cơ sở các bản đồ phân loại chuẩn hóa cho các mốc 2015, 2020 và 2025, phân tích chồng lớp và ma trận biến động được áp dụng để xác định mức độ và hướng thay đổi thảm phủ rừng theo từng giai đoạn.

2.2.2.4. Phân tích mối quan hệ giữa đặc trưng ảnh viễn thám và AGB

Nghiên cứu sử dụng hai nhóm dữ liệu chính gồm dữ liệu AGB đo từ thực địa và dữ liệu viễn thám (ảnh quang học, ra-đa và địa hình). Bộ dữ liệu thực địa gồm 117 ô mẫu, trong đó 70 ô dùng xây dựng mô hình và 47 ô dùng đánh giá độc lập. Dữ liệu AGB được kiểm tra phân bố và chuẩn hóa bằng phép biến đổi lô-ga-rít nhằm giảm lệch phải và ổn định phương sai, đảm bảo các giả định thống kê cho mô hình hóa; các giá trị lớn bất thường được giữ lại và kiểm soát thông qua biến đổi log và mô hình Random Forest.

Giá trị các biến viễn thám (băng phổ Landsat, chỉ số thực vật, dữ liệu radar và địa hình) được trích xuất tại tâm ô mẫu và chuẩn hóa về khoảng [0–1] bằng phương pháp Min–Max Scaling. Phân tích tương quan Pearson, PCA và chỉ số VIF được áp dụng để giảm đa cộng tuyến và lựa chọn tập biến đầu vào tối ưu, làm cơ sở cho mô hình ước tính AGB và lượng CO_2 hấp thụ của rừng thường xanh tại Đắk Lắk.

2.2.2.5. Xây dựng mô hình ước tính AGB từ dữ liệu viễn thám

Bộ dữ liệu chuẩn hóa gồm 70 ô mẫu thực địa thu thập giai đoạn 2020–2024 được sử dụng để phân tích mối quan hệ giữa AGB và các biến viễn thám, bao gồm địa hình, các kênh phổ Landsat, chỉ số thực vật và dữ liệu radar Sentinel-1. Do hạn chế dữ liệu radar trước năm 2015, hai nhóm mô hình được xây dựng song song: mô hình tích hợp Sentinel-1 và mô hình chỉ sử dụng dữ liệu quang học nhằm đảm bảo khả năng áp dụng cho chuỗi thời gian dài (2013–2025).

Ba cách tiếp cận mô hình được thử nghiệm gồm hồi quy tuyến tính (đơn biến và đa biến), mô hình phi tuyến GAM và mô hình học máy Random Forest. Hiệu suất mô hình được đánh giá bằng kiểm định chéo k-fold (5-fold) dựa trên các chỉ tiêu R^2 , R^2 hiệu chỉnh, RMSE và MAE, cho phép so sánh khách quan giữa các mô hình tham số và phi tham số. Mô hình có độ chính xác cao nhất được lựa chọn để ước lượng AGB cho toàn khu vực nghiên cứu.

Ngoài ra, kiểm định độc lập theo thời gian được thực hiện bằng cách sử dụng 47 ô mẫu năm 2013 nhằm đánh giá khả năng ổn định và khái quát hóa của mô hình theo thời gian.

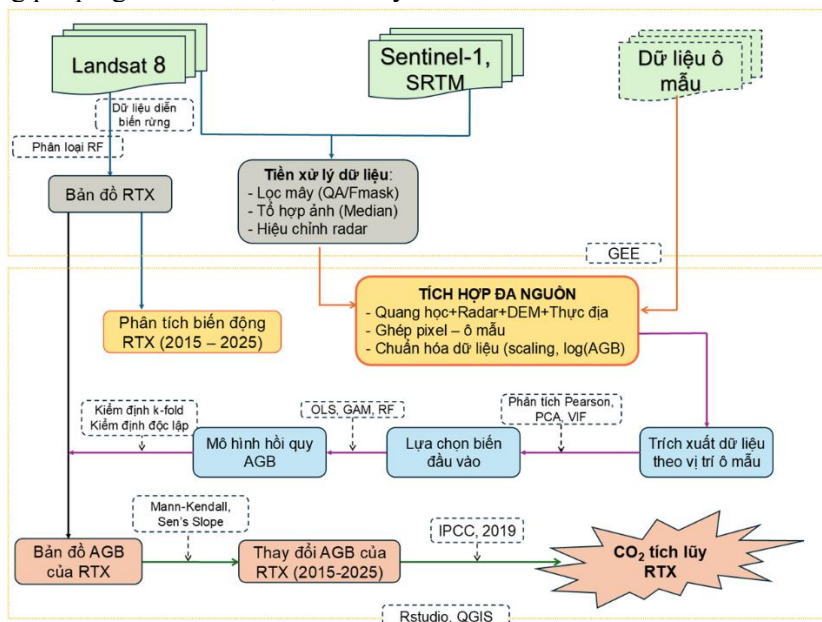
2.2.2.5. Lập bản đồ AGB và lượng CO₂ hấp thụ, đánh giá biến động AGB giai đoạn 2015-2025

Mô hình ước tính AGB tối ưu (lựa chọn theo RMSE, MAE và R²) được áp dụng cho toàn tỉnh Đắk Lắk trên chuỗi ảnh Landsat 8 giai đoạn 2015–2025 sau khi tiền xử lý và chuẩn hóa dữ liệu đầu vào thống nhất. AGB được ước tính theo từng năm, đảm bảo tính nhất quán không gian–thời gian theo khuyến nghị của IPCC và GFOI.

Chuỗi bản đồ AGB theo năm được sử dụng để phân tích biến động sinh khối bằng cách kết hợp: (i) phân tích độ bất định và xác định ngưỡng thay đổi tối thiểu (MDC) nhằm loại bỏ biến động giả do sai số mô hình; (ii) kiểm định Mann–Kendall để phát hiện xu thế tăng, giảm hoặc ổn định; và (iii) ước lượng Sen’s slope để định lượng tốc độ biến đổi theo thời gian. Các phân tích được thực hiện theo từng loại hình che phủ đất, bảo đảm diễn giải xu thế có ý nghĩa thống kê và độ tin cậy cao.

Khả năng hấp thụ CO₂ của rừng thường xanh được ước tính gián tiếp từ AGB thông qua hệ số chuyển đổi mặc định ($C = 0,47 \times \text{AGB}$; $\text{CO}_2 = 3,67 \times C$). Trên cơ sở đó, bản đồ CO₂ hấp thụ theo các mốc 2015–2025 được xây dựng và phân tích biến động nhằm xác định khu vực suy giảm, phục hồi hoặc gia tăng khả năng hấp thụ CO₂, phục vụ quản lý rừng, PFES, REDD+ và xây dựng đường cơ sở các-bon.

Cách tiếp cận tích hợp viễn thám – GIS – thực địa – mô hình học máy cho phép vừa định lượng chính xác sinh khối, vừa đánh giá xu thế biến động theo không gian và thời gian. Đây là nền tảng để xây dựng các công cụ hỗ trợ ra quyết định trong quản lý rừng, chi trả dịch vụ môi trường và ứng phó biến đổi khí hậu ở Tây Nguyên. Sơ đồ phương pháp nghiên cứu được trình bày ở Hình 2.1.



Hình 2.1. Sơ đồ nghiên cứu

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá thay đổi RTX giai đoạn 2015 – 2025

3.1.1. Phân loại ảnh xác định kiểu RTX

Kết quả phân loại ảnh viễn thám (Bảng 3.1) cho thấy lớp rừng thường xanh (RTX) được nhận diện rất tốt qua các năm, với PA ≥ 92% và UA ≥ 90%, cho thấy mô hình RF phân loại chính xác lớp rừng mục tiêu. Lớp “Đất khác” cũng duy trì độ chính xác cao, đặc biệt năm 2015 đạt PA = 96,26% và UA = 95,37%, phản ánh khả năng mô hình phân biệt rừng và các loại đất phi rừng hiệu quả.

Bảng 3.1. Ma trận đánh giá sai số phân loại

Năm	OA (%)	Kappa	PA RTX (%)	PA Đất khác (%)	UA RTX (%)	UA Đất khác (%)
2015	95,93	0,918	96,26	95,61	95,37	96,46
2020	93,39	0,866	92,16	94,40	93,07	93,65
2025	93,39	0,867	96,08	91,20	89,91	96,61

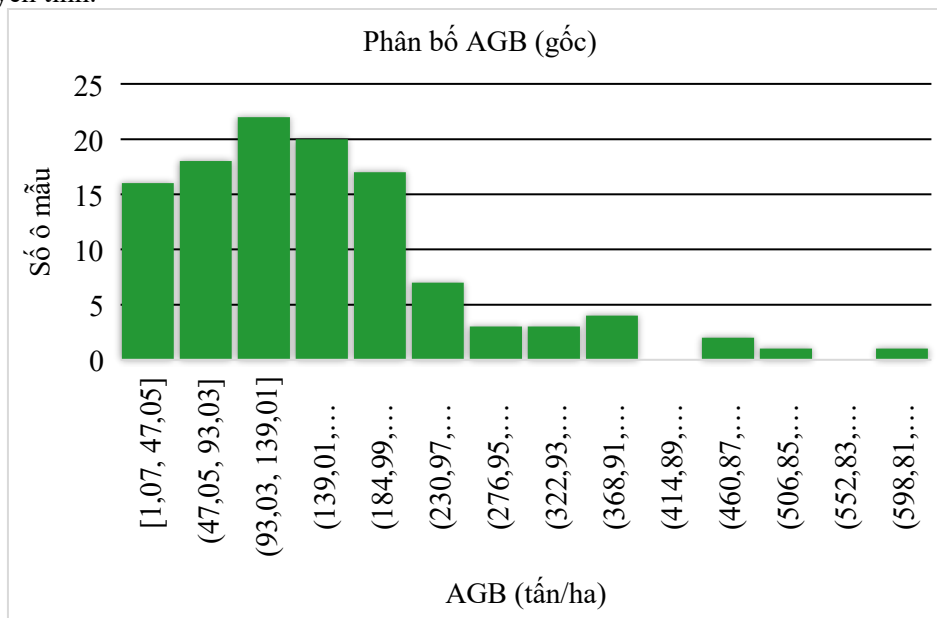
Phân bố diện tích rừng theo không gian cho thấy RTX của tỉnh tập trung phân bố chủ yếu ở phía Đông – Nam gồm các huyện Krông Bông, Lắk, M’Đrăk, Ea Kar – nơi địa hình dốc, ít tác động sản xuất và là vùng lõi của các Vườn quốc gia Chư Yang Sin và các khu bảo tồn thiên nhiên Nam Ka và Ea Sô (Hình 3.1).

3.2. Phân tích mối quan hệ giữa đặc trưng ảnh viễn thám và AGB

3.2.1. Chuẩn hóa dữ liệu sinh khối ô mẫu

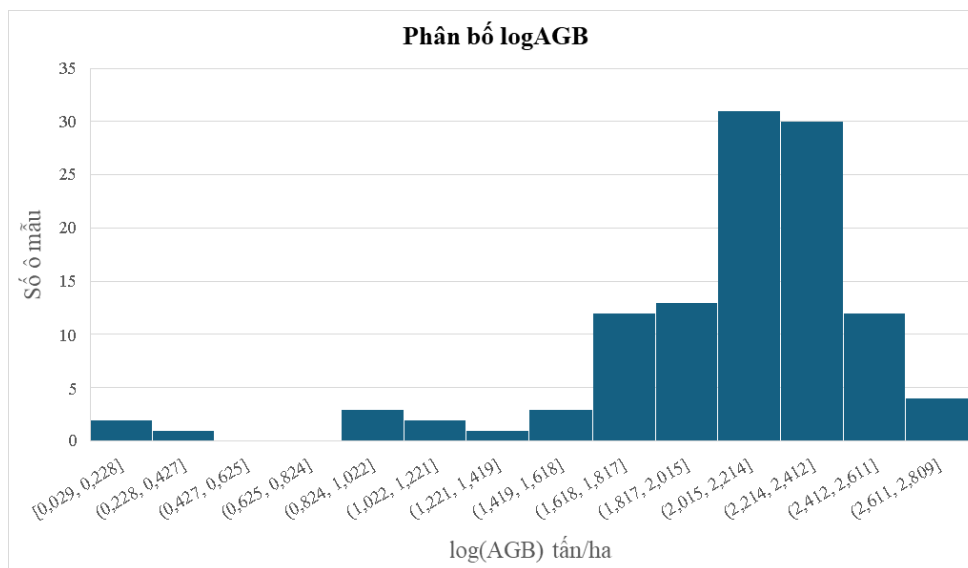
Bộ dữ liệu sinh khối trên mặt đất (AGB) được thu thập từ 117 ô mẫu giai đoạn 2013–2024, phản ánh sự đa dạng về trạng thái và trữ lượng rừng. Giá trị AGB dao động từ 1,07 đến 644,79 tấn/ha, trung bình 159,81 tấn/ha với độ lệch chuẩn lớn (117,28 tấn/ha). Dữ liệu có phân bố lệch phải, tồn tại nhiều giá trị ngoại lai cao.

Biểu đồ phân bố (Hình 3.2) cho thấy phân bố AGB gốc không tuân theo dạng chuẩn, phần đuôi kéo dài về phía giá trị cao, đặc biệt có một số điểm >400 tấn/ha. Điều này có thể ảnh hưởng đến độ ổn định của các mô hình hồi quy tuyến tính.



Hình 3.2. Biểu đồ phân bố AGB (dữ liệu gốc)

Để khắc phục sự lệch phải, dữ liệu được biến đổi lô-ga-rít, giúp phân bố trở nên gần chuẩn (Hình 3.3), ổn định phương sai và phù hợp hơn cho phân tích hồi quy. Phần lớn $\log(\text{AGB})$ tập trung quanh mức 150–165 tấn/ha.



Hình 3.3. Biểu đồ phân bố AGB sau biến đổi lô-ga-rít

Tóm lại, dữ liệu AGB có mức biến động lớn; việc áp dụng biến đổi log là bước quan trọng để nâng cao tính ổn định và độ tin cậy của các mô hình ước lượng sinh khối từ dữ liệu viễn thám.

3.2.2. Phân tích tương quan Pearson

Ma trận tương quan Pearson phản ánh mối quan hệ giữa sinh khối rừng ($\log(\text{AGB})$) và các biến độc lập bao gồm nhóm chỉ số thực vật, chỉ số độ ẩm, các băng phổ Landsat, yếu tố địa hình (độ cao – elevation, độ dốc – slope) và dữ liệu radar Sentinel 1A(VV, VH).

Nhìn chung, các biến quang học và chỉ số phổ thể hiện mối tương quan mạnh với nhau, trong khi các biến radar và địa hình có mối tương quan thấp đến trung bình. Giá trị hệ số tương quan (r) dao động trong khoảng từ $-0,94$ đến $+1,00$, phản ánh sự tồn tại của hiện tượng đa cộng tuyến đáng kể, đặc biệt trong nhóm các chỉ số thực vật và các băng phổ Landsat.

Mối quan hệ giữa sinh khối rừng (logAGB) và các biến độc lập thể hiện sự khác biệt rõ rệt giữa các nhóm nhân tố (Bảng 3.2). Trong nhóm biến địa hình, elevation có mối tương quan dương rõ rệt với logAGB ($r = 0,66$), phản ánh xu thế sinh khối tăng theo độ cao, đặc biệt ở các khu vực rừng tự nhiên lâu năm có độ che phủ lớn. Ngược lại, slope có tương quan rất yếu ($r = 0,10$), cho thấy độ dốc không phải là yếu tố chi phối đáng kể sự biến động sinh khối ở quy mô toàn tỉnh.

Bảng 3.2. Phân loại nhóm biến theo mối tương quan với logAGB

Nhóm biến	Biến đại diện	Hệ số tương quan (r)	Đặc điểm nổi bật
Địa hình	Elevation, Slope	0,66; 0,10	Elevation có tương quan dương mạnh; slope không đáng kể
Chỉ số thực vật	NDVI, SAVI, GNDVI, SR, ARVI	0,24 – 0,33	Tương quan dương yếu – trung bình; có hiện tượng bão hòa ở vùng rừng dày
Chỉ số độ ẩm	NDWI, MSI	$-0,32$; $-0,45$	Tương quan âm vừa; phản ánh ảnh hưởng độ ẩm tán và đất
Băng phổ Landsat	B3, B4, B5, B6, B7	$-0,26$: $-0,55$	Quan hệ nghịch mạnh; B3 và B6 nhạy với biến động sinh khối
Radar Sentinel-1	VH, VV	$-0,12$; $-0,15$	Tương quan rất yếu; tín hiệu bị bão hòa ở vùng rừng dày
Địa hình tổng hợp	Elevation, Slope	0,32; 0,10	Ảnh hưởng tích cực đến sinh khối do phân bố rừng theo độ cao

Việc biến đổi lô-ga-rít không chỉ giúp tăng cường mức độ tương quan với các biến quang học và chỉ số phổ (đặc biệt là NDVI, GNDVI, SR, ARVI), mà còn làm nổi bật hơn mối quan hệ nghịch với các băng phổ vùng SWIR (B6, B7). Kết quả này cho thấy việc sử dụng logAGB giúp nâng cao độ tin cậy và tính ổn định của mô hình ước lượng sinh khối từ dữ liệu viễn thám. Kết quả này khẳng định tính cần thiết của việc chuẩn hóa logAGB trong quá trình xây dựng mô hình hồi quy ước lượng sinh khối rừng từ dữ liệu viễn thám đa nguồn. Để giảm bớt số lượng biến tham gia vào mô hình và giảm sai số thì phân tích thành phần chính (PCA) được sử dụng để lựa chọn các biến chính có khả năng giải thích tốt dữ liệu phân bố của logAGB, phục vụ cho các phân tích tương quan và hồi quy.

3.2.3. Phân tích thành phần chính (PCA)

Kết quả PCA cho thấy hai thành phần chính đầu tiên đã giải thích hơn 75,8% phương sai dữ liệu, và khi thêm thành phần thứ ba đạt tới 84,1%, chứng tỏ cấu trúc dữ liệu được phản ánh rất tốt.

Phân tích biểu đồ biplot (Hình 3.4) cho thấy các biến được phân thành ba nhóm chính với đặc trưng sinh thái và thống kê riêng biệt.

(1) Nhóm chỉ số thực vật (NDVI, GNDVI, SR, SIPI):

Các vector của nhóm này định hướng tương đồng, biểu thị mối tương quan dương mạnh, phản ánh rõ đặc tính xanh và mật độ tán rừng. Đây là nhóm có giá trị sinh thái cao do liên quan trực tiếp đến hàm lượng diệp lục và hoạt động quang hợp. Tuy nhiên, do mức tương quan nội tại cao ($r > 0,85$), cần chọn biến đại diện như NDVI và GNDVI để tránh đa cộng tuyến (Lu et al., 2012).

(2) Nhóm băng phổ quang học và chỉ số độ ẩm (B2–B7, NDWI, MSI):

Nhóm này tập trung chủ yếu dọc theo trục chính Dim.1, thể hiện sự phân biệt rõ giữa các lớp phủ có đặc tính phản xạ khác nhau. Trong đó, các băng SWIR (B6, B7) cùng NDWI và MSI có mức đóng góp cao nhất (contrib > 6), phản ánh tốt đặc tính độ ẩm và cấu trúc tán rừng. Kết quả này phù hợp với nhận định của Foody et al. (2003), cho rằng vùng phổ SWIR có độ nhạy cao với hàm lượng nước và vật chất khô của thực vật.

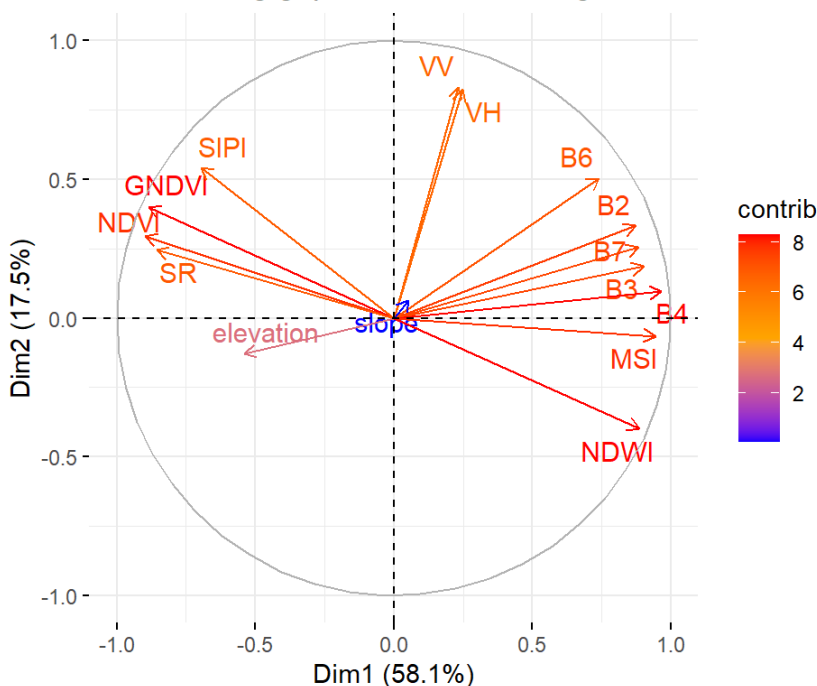
(3) Nhóm biến radar (VV, VH):

Hai biến này định hướng gần vuông góc với các nhóm quang học, thể hiện tính độc lập về nguồn thông tin. Radar phản ánh cấu trúc ba chiều của tán rừng và độ gồ ghề bề mặt (Lucas et al., 2006; Mitchard et al., 2011). Sự tách biệt này chứng minh rằng việc kết hợp dữ liệu radar và quang học là cần thiết để tăng độ chính xác của mô hình ước tính sinh khối.

Ngoài ra, các yếu tố địa hình (elevation, slope) có đóng góp thấp hơn nhưng vẫn mang tính bổ trợ, đặc biệt quan trọng ở các khu vực rừng tự nhiên phân bố theo đai cao.

Từ kết quả phân tích, bộ biến tối ưu được lựa chọn cho mô hình tiếp theo gồm: NDVI, GNDVI, NDWI, MSI, B6, B7, VV, VH, elevation, slope, đại diện cho các đặc tính quang học – cấu trúc – địa hình, đồng thời đảm bảo giảm thiểu đa cộng tuyến và duy trì thông tin sinh thái quan trọng.

Biểu đồ đóng góp của các biến trong PCA



Hình 3.4. Biểu đồ biplot PCA

Từ đó, nghiên cứu lựa chọn các biến đại diện (NDVI, GNDVI, NDWI, MSI, B6, B7, elevation, slope, VV, VH) để đưa vào mô hình, vừa đa dạng nguồn thông tin (quang học + ra-đa + địa hình) vừa giảm thiểu đa cộng tuyến. Kết quả này là nền tảng quan trọng cho các phân tích hồi quy và ứng dụng Random Forest trong ước tính sinh khối rừng.

3.2.4. Phân tích đa cộng tuyến (VIF – Variance Inflation Factor)

Sau khi xác định các biến tiềm năng qua phân tích PCA, bước tiếp theo nhằm đảm bảo tính ổn định của mô hình là kiểm tra hiện tượng đa cộng tuyến giữa các biến độc lập. Đa cộng tuyến xảy ra khi các biến giải thích có mối tương quan tuyến tính cao, làm sai lệch ước lượng hồi quy và giảm độ tin cậy của mô hình (Dormann và cộng sự, 2013).

Trong nghiên cứu này, hệ số VIF được tính cho các biến được lựa chọn gồm nhóm quang học (NDVI, GNDVI, NDWI, MSI, B6, B7), radar (VV, VH) và địa hình (elevation, slope). Theo Kutner et al. (2005), $VIF < 5$ được xem là an toàn, $VIF > 10$ là ngưỡng cảnh báo đa cộng tuyến nghiêm trọng.

Kết quả (Bảng 3.3) cho thấy hầu hết các biến có VIF thấp (1,01–9,68), chứng tỏ mức độ phụ thuộc giữa các biến là chấp nhận được. Biến MSI có giá trị VIF cao nhất (9,68), cho thấy mối tương quan mạnh với NDWI và B7, do đều phản ánh đặc tính độ ẩm và cấu trúc tán rừng ở vùng phổ SWIR. Ngược lại, các biến B7 (4,36) và NDWI (4,47) thể hiện tính bổ sung thông tin tốt, trong khi VH, elevation và slope có giá trị rất thấp (1,01–1,37), chứng minh tính độc lập cao và khả năng bổ trợ cho mô hình.

Bảng 0.3. Các biến lựa chọn có VIF thấp

Biến	B7	MSI	NDWI	VH	elevation	slope
VIF	4,36	9,68	4,47	1,14	1,37	1,01

Như vậy, bộ biến lựa chọn cuối cùng gồm B7, NDWI, VH, elevation, slope và MSI, đảm bảo vừa đa dạng về thông tin quang học – ra-đa – địa hình, vừa hạn chế đa cộng tuyến. Bộ biến này được sử dụng thống nhất trong ba mô hình ước lượng OLS, GAM và RF nhằm so sánh hiệu quả giữa các cách tiếp cận tuyến tính, phi tuyến và phi tham số trong mô hình hóa sinh khối rừng (AGB).

3.3. Xây dựng mô hình ước tính AGB từ dữ liệu viễn thám

3.3.1. Ước tính AGB sử dụng mô hình hồi quy tuyến tính

Phân tích hồi quy tuyến tính cho thấy độ cao địa hình (elevation) là biến có ảnh hưởng mạnh nhất đến $\log AGB$ ($R^2 \approx 0,44$; $p < 0,001$). Trong nhóm biến viễn thám, kênh SWIR2 (B7) và chỉ số MSI thể hiện mối

tương quan có ý nghĩa, phản ánh vai trò của độ ẩm và cấu trúc tán rừng đối với sinh khối. Các biến slope và VH cho tương quan thấp hoặc không có ý nghĩa thống kê.

Mô hình hồi quy đa biến cải thiện khả năng giải thích ($R^2 \approx 0,51$), trong đó elevation (tác động dương) và B7 (tác động âm) là hai biến có ý nghĩa thống kê rõ ràng. Mô hình rút gọn gồm elevation và B7 vẫn đạt hiệu quả tương đương ($R^2 \approx 0,50$), cho thấy đây là các biến then chốt trong ước lượng AGB. Tuy nhiên, mức giải thích trung bình cho thấy cần áp dụng mô hình phi tuyến và học máy để nâng cao độ chính xác.

3.3.2. Ước tính AGB rừng sử dụng mô hình hồi quy phi tuyến

Để khắc phục hạn chế của hồi quy tuyến tính (R^2 hiệu chỉnh thấp, đa cộng tuyến), nghiên cứu áp dụng Mô hình cộng tổng quát (GAM). GAM cho phép mô tả linh hoạt mối quan hệ phi tuyến giữa sinh khối rừng (logAGB) và các biến độc lập viên thám thông qua hàm trơn (smooth functions, $s(\cdot)$).

Kết quả mô hình GAM đầy đủ (Bảng 3.4) cho toàn bộ các biến – gam1: Mô hình gam1 đạt R^2 hiệu chỉnh = 0,619 và Deviance explained = 72,5%. Các biến có ý nghĩa thống kê cao gồm ARVI ($p = 0,018$), VH ($p = 0,0047$), VV ($p = 0,007$), elevation ($p < 1.24e-06$); B5 có ý nghĩa cận biên ($p = 0,078$). Kết quả cho thấy một số chỉ số thực vật, ra-đa và địa hình có mối quan hệ phi tuyến đáng kể với logAGB, phù hợp với các nghiên cứu trước đây (Wai và cộng sự, 2022; Đình Bá Duy, 2024).

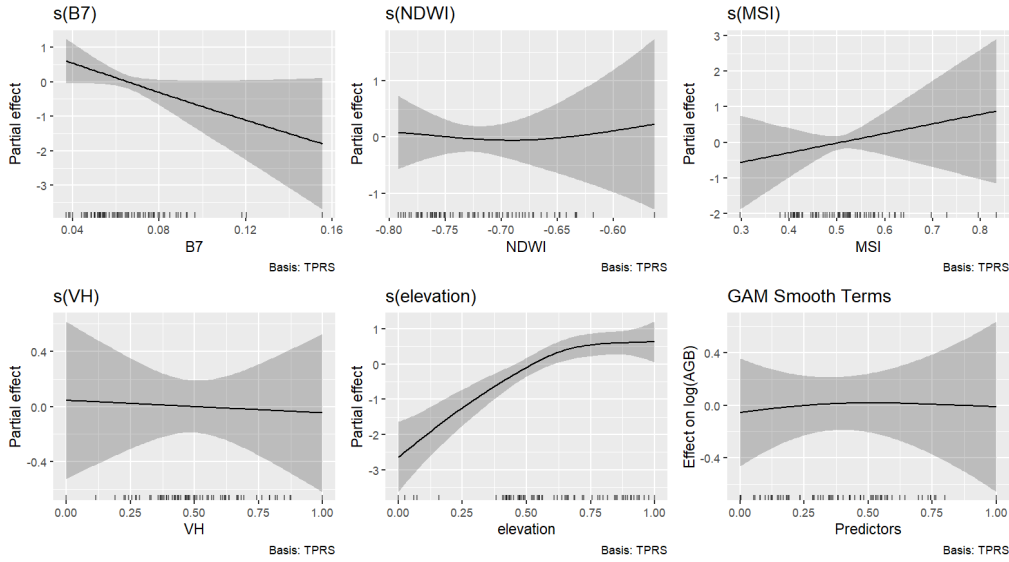
Mô hình GAM rút gọn (gam2): Sau phân tích PCA, mô hình gam2 được xây dựng với B7, NDWI, MSI, VH, elevation và slope. Kết quả: R^2 hiệu chỉnh = 0,535, Deviance explained = 59%. Elevation vẫn là biến có ảnh hưởng mạnh và có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$), trong khi các biến còn lại chỉ thể hiện xu hướng tác động nhưng chưa đạt mức ý nghĩa.

Bảng 3.4. Kết quả mô hình GAM

Mô hình	Biến quan trọng ($p < 0,05$)	R^2 hiệu chỉnh	Tỉ lệ giải thích phương sai
GAM đầy đủ (gam1)	ARVI, VH, VV, B5 (cận biên)	0,619	72,5%
GAM rút gọn (gam2)	elevation	0,535	59,0%

Mô hình GAM cho phép mô tả mối quan hệ phi tuyến giữa sinh khối rừng (logAGB) và các biến viên thám, cải thiện so với hồi quy tuyến tính với R^2 hiệu chỉnh đạt 0,319. Trong đó, B7 thể hiện ảnh hưởng mạnh và ổn định nhất, còn các biến khác chỉ có tác động hạn chế. Tuy vậy, mức giải thích phương sai vẫn còn thấp.

Do các biến trong GAM được ước lượng bằng hàm trơn, mô hình không thể viết thành biểu thức tuyến tính cố định, nhưng kết quả được minh họa bằng đồ thị hàm trơn (Hình 3.5), với đường liền thể hiện quan hệ phi tuyến và đường đứt nét là khoảng tin cậy 95%.



Hình 3.5: Đồ thị hàm trơn từ mô hình GAM, thể hiện quan hệ phi tuyến giữa logAGB và các biến độc lập (B7, NDWI, MSI, VH, elevation)

Đồ thị hàm trơn cho thấy logAGB và các biến có mối quan hệ ở mức độ khác nhau:

- B7 (SWIR2): mối quan hệ phi tuyến nghịch với logAGB, giảm mạnh khi $B7 < 0,10$, phản ánh khả năng hấp thụ năng lượng cao của tán rừng dày, sau ngưỡng này đường cong ổn định do hiệu ứng bão hòa.
- NDWI: tác động yếu, đường cong gần phẳng, chỉ phản ánh một phần độ ẩm bề mặt và tán lá.

- MSI: xu hướng phi tuyến thuận, logAGB tăng khi MSI tăng (mức căng thẳng ẩm giảm), đóng góp vừa phải.
- VH: mối quan hệ rất yếu, gần như nằm ngang, phản ánh bão hòa tín hiệu radar ở rừng dày.
- Elevation: mối quan hệ phi tuyến thuận mạnh nhất, logAGB tăng nhanh từ vùng thấp đến trung bình, sau đó ổn định ở vùng cao, phản ánh phân bố sinh khối theo gradien địa hình, phù hợp với hồi quy tuyến tính trước đó.

Mô hình GAM cải thiện khả năng mô phỏng phi tuyến giữa logAGB và các biến viễn thám, đặc biệt là elevation và B7, trong khi NDWI, MSI và VH đóng vai trò hỗ trợ. Kết quả xác nhận rằng mối quan hệ giữa sinh khối rừng và tín hiệu viễn thám không hoàn toàn tuyến tính, mà có dạng phi tuyến yếu, phù hợp với các nghiên cứu trước (Lu và cộng sự, 2014; Levine và cộng sự, 2020).

Tuy GAM nâng cao mức giải thích phương sai so với hồi quy tuyến tính, giá trị R^2 hiệu chỉnh (0,535) và phương sai giải thích (59%) vẫn chưa cao, do dữ liệu có tương tác phức tạp và cấu trúc tán rừng đa chiều. Vì vậy, nghiên cứu tiếp tục áp dụng Random Forest (RF) nhằm cải thiện độ chính xác trong ước lượng AGB.

3.3.3. Ước tính AGB rừng sử dụng mô hình RF

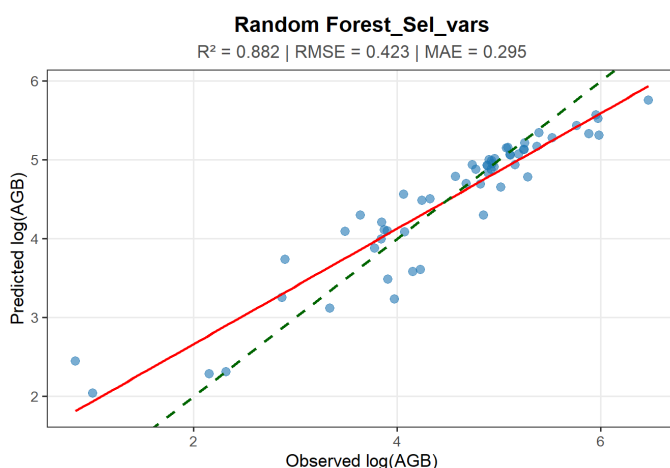
Nhằm xác định phương án tối ưu trong việc lựa chọn biến đầu vào và đánh giá ảnh hưởng của các nhóm biến, nghiên cứu triển khai hai cấu hình mô hình RF:

- RF-All_var.: sử dụng toàn bộ 18 biến đầu vào (chỉ số quang học, radar và địa hình).
- RF-Selected (VH): sử dụng 6 biến quan trọng được chọn lọc qua PCA và đánh giá tầm quan trọng: B7, NDWI, MSI, VH, elevation và slope.

Cả hai mô hình được huấn luyện với $n_{tree} = 2000$ và $m_{try} = 6$.

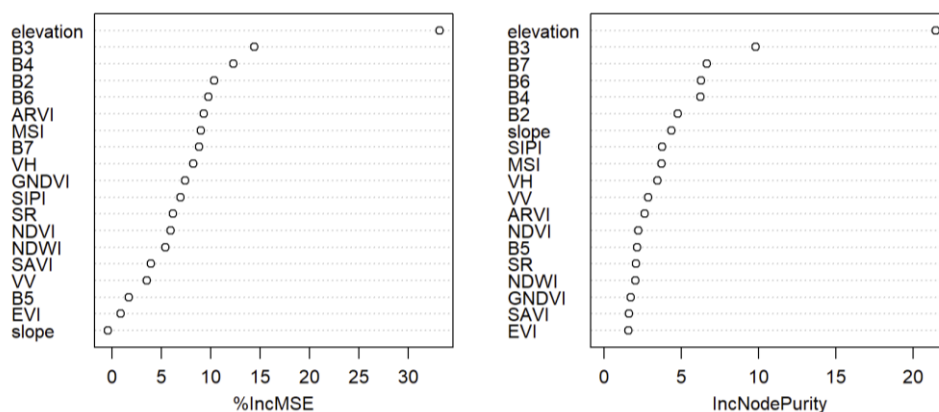
3.3.3.1 Kết quả phân tích RF cho toàn bộ các biến (RF-All_var.)

Mô hình RF sử dụng toàn bộ 18 biến đầu vào (Hình 3.6) cho kết quả rất tốt trên tập huấn luyện ($R^2 = 0,882$; $RMSE = 0,423$), vượt trội so với các mô hình hồi quy tuyến tính và phi tuyến. Tuy nhiên, hiệu suất trên tập kiểm định OOB giảm mạnh ($R^2_{test} \approx 0,40$), cho thấy hiện tượng quá khớp do dư thừa thông tin và tương quan cao giữa các biến.



Hình 3.6. Tương quan logAGB thực tế và ước tính

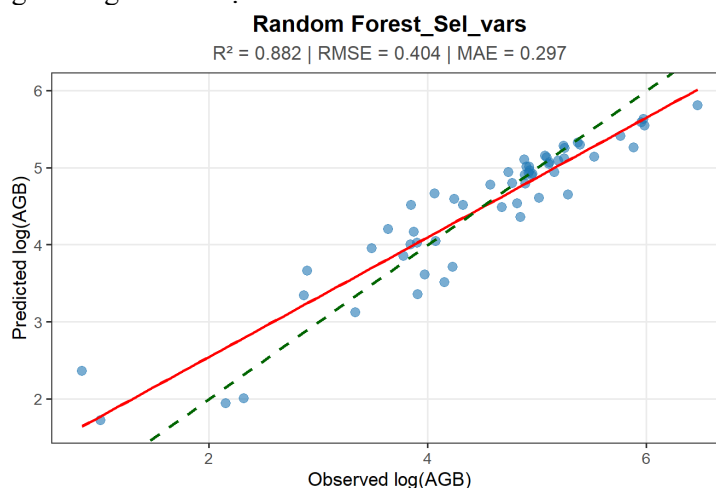
Phân tích độ quan trọng biến (Hình 3.7) cho thấy độ cao địa hình (elevation) là yếu tố chi phối mạnh nhất đến AGB, tiếp theo là các kênh phổ SWIR và Green (đặc biệt B7, B3) và chỉ số MSI, phản ánh vai trò của địa hình, cấu trúc tán rừng và độ ẩm thực vật. Các biến ra-đa (VH, VV) có mức đóng góp thấp hơn nhưng đóng vai trò hỗ trợ quan trọng trong việc cung cấp thông tin cấu trúc tán và nâng cao tính ổn định mô hình. Biến slope thể hiện ảnh hưởng không đáng kể.



Hình 3.7. Mức độ quan trọng của các biến trong mô hình RF-All_var.

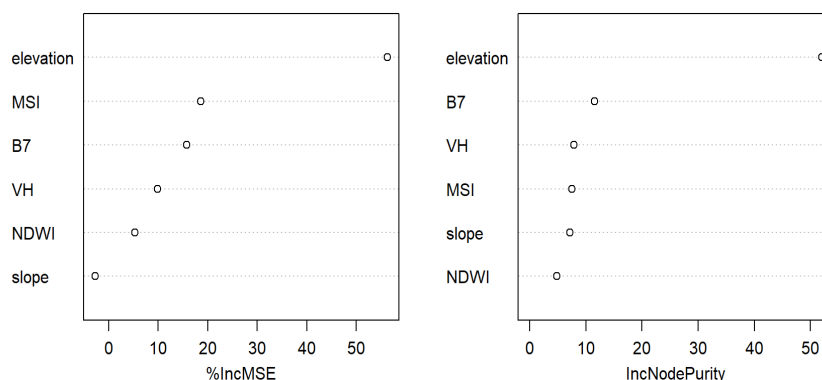
3.3.3.2 Mô hình RF chọn lọc biến (RF_Selected)

Mô hình RF sử dụng 6 biến chọn lọc (Hình 3.8) cho hiệu suất huấn luyện cao ($R^2_{\text{train}} = 0,882$; $\text{RMSE}_{\text{train}} = 0,404$), tương đương mô hình dùng toàn bộ biến. Tuy nhiên, khả năng khái quát hóa được cải thiện rõ rệt, với R^2_{test} tăng lên 0,606 và $\text{RMSE}_{\text{test}}$, MAE_{test} giảm khoảng 17%, cho thấy việc loại bỏ biến dư thừa đã giảm overfitting và tăng tính ổn định mô hình.



Hình 3.8. Tương quan logAGB thực tế và ước tính (chọn lọc biến)

Phân tích độ quan trọng biến (Hình 3.9) cho thấy elevation, B7 (SWIR2) và MSI là ba yếu tố chi phối chính đến AGB, phản ánh vai trò của địa hình, cấu trúc tán và độ ẩm thực vật. Các biến VH và NDWI có vai trò hỗ trợ trong phản ánh cấu trúc tán và phân biệt rừng – không rừng, trong khi slope có ảnh hưởng không đáng kể.



Hình 3.9. Tương quan logAGB thực tế và ước tính (chọn lọc biến)

Thử nghiệm các cấu hình tham số (Bảng 3.5) cho thấy mô hình RF hội tụ từ 1000–1500 cây, và tham số $mtry$ ảnh hưởng rõ rệt hơn $n\text{tree}$. Cấu hình $n\text{tree} = 1500$, $mtry = 6$ cho kết quả tối ưu với $R^2_{\text{test}} = 0,632$, sai số thấp và mô hình ổn định nhất, được lựa chọn cho các bước ước tính và lập bản đồ AGB tiếp theo.

Bảng 3.5. Hiệu suất mô hình RF theo các cấu hình khác nhau

<i>ntree</i>	<i>mtry</i>	Train			Test		
		R ²	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE
1000	3	0,884	0,416	0,303	0,629	0,892	0,617
1000	4	0,883	0,408	0,301	0,621	0,887	0,609
1000	5	0,887	0,401	0,293	0,630	0,877	0,603
1000	6	0,886	0,398	0,292	0,606	0,893	0,604
1500	3	0,883	0,417	0,299	0,626	0,890	0,600
1500	4	0,886	0,405	0,296	0,623	0,885	0,607
1500	5	0,888	0,399	0,292	0,631	0,877	0,607
1500	6	0,884	0,401	0,295	0,632	0,871	0,596
2000	3	0,888	0,409	0,296	0,616	0,900	0,613
2000	4	0,887	0,401	0,296	0,627	0,880	0,602
2000	5	0,884	0,403	0,295	0,626	0,881	0,607
2000	6	0,882	0,404	0,297	0,606	0,894	0,614

Tổng thể, mô hình RF chọn lọc cho thấy hiệu quả vượt trội và đáng tin cậy hơn mô hình toàn biến, khẳng định tầm quan trọng của lựa chọn biến hợp lý trong ước tính sinh khối rừng bằng viễn thám đa nguồn.

3.3.3.3 So sánh hiệu suất RF toàn bộ biến và biến chọn lọc

So sánh hiệu suất (Bảng 3.6) cho thấy mô hình RF sử dụng biến chọn lọc (RF-Selected) có khả năng khái quát hóa vượt trội so với mô hình dùng toàn bộ biến, dù độ phù hợp trên tập huấn luyện tương đương ($R^2_{train} \approx 0,88$). Cụ thể, RF-Selected đạt $R^2_{test} = 0,606$, cao hơn 0,211 so với RF-All_var. ($R^2_{test} = 0,395$), đồng thời giảm sai số RMSE_test và MAE_test khoảng 17%.

Bảng 3.6. So sánh hiệu suất của mô hình RF dựa trên 2 bộ dữ liệu khác nhau

Mô hình	R ² _train	R ² _test	RMSE_train	RMSE_test	MAE_train	MAE_test
All_var.	0,882	0,395	0,423	1,073	0,295	0,745
Selected (VH)	0,884	0,632	0,401	0,871	0,295	0,596

Kết quả khẳng định rằng giảm số lượng biến đầu vào giúp hạn chế quá khớp, tăng tính ổn định và hiệu quả dự báo của mô hình. Với cấu hình $ntree = 1500$, $mtry = 6$, RF-Selected duy trì độ chính xác cao, cấu trúc gọn nhẹ và được lựa chọn là mô hình tối ưu để ước lượng và lập bản đồ AGB rừng thường xanh tỉnh Đắk Lắk.

So sánh với các nghiên cứu trước trong và ngoài nước cho thấy kết quả đạt được phù hợp với xu hướng chung, khẳng định ưu thế của RF trong ước tính sinh khối rừng từ dữ liệu viễn thám đa nguồn, đồng thời nhấn mạnh vai trò then chốt của lựa chọn biến hợp lý trong việc nâng cao khả năng ứng dụng thực tiễn và giám sát sinh khối – các-bon rừng ở quy mô cảnh quan.

3.3.4. Đánh giá độ chính xác của các mô hình ước lượng

3.3.4.1. Kiểm định bằng các thông số nội bộ của mô hình

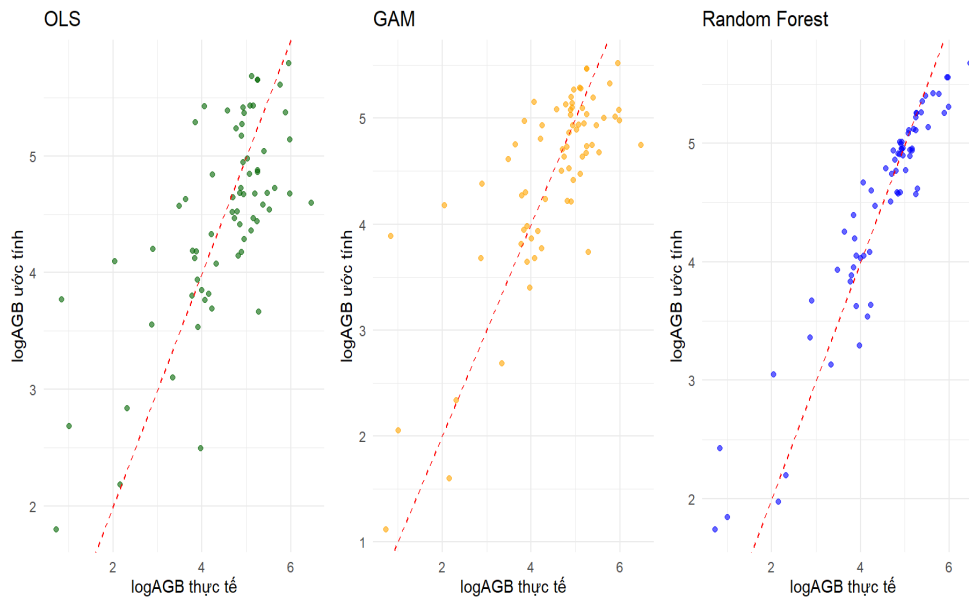
Đánh giá nội bộ ba mô hình OLS, GAM và Random Forest (RF) dựa trên các chỉ số R^2 , RMSE và MAE cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu suất (Bảng 3.7).

Bảng 3.7. Hiệu suất mô hình trên tập huấn luyện

Mô hình	RMSE	MAE	R ²
OLS	0,824	0,6194	0,510
GAM	0,750	0,5340	0,590
RF	0,401	0,2950	0,884

- OLS cho độ chính xác thấp nhất ($R^2 = 0,51$; RMSE = 0,824; MAE = 0,619), phản ánh hạn chế của giả định tuyến tính trong mô phỏng mối quan hệ phi tuyến giữa AGB và các biến viễn thám.
- GAM cải thiện so với OLS ($R^2 = 0,59$; RMSE = 0,750; MAE = 0,534) nhờ mô tả phi tuyến đơn biến, nhưng vẫn chưa nắm bắt được các tương tác đa chiều phức tạp.
- RF đạt hiệu suất vượt trội với $R^2 = 0,884$, RMSE = 0,401 và MAE = 0,295, cho thấy khả năng mô phỏng tốt dữ liệu phi tuyến, dị thể và hạn chế hiện tượng bão hòa tín hiệu trong rừng nhiệt đới.

So sánh tổng thể và đồ thị tương quan (Hình 3.10) đều khẳng định RF là mô hình tối ưu, có độ chính xác và độ ổn định cao nhất, được lựa chọn cho các bước ước tính không gian AGB và CO₂ tiếp theo.



Hình 3.10. Mức độ phù hợp giữa dữ liệu thực tế và ước tính từ các mô hình

3.3.4.2. Kiểm định chéo Stratified k-fold

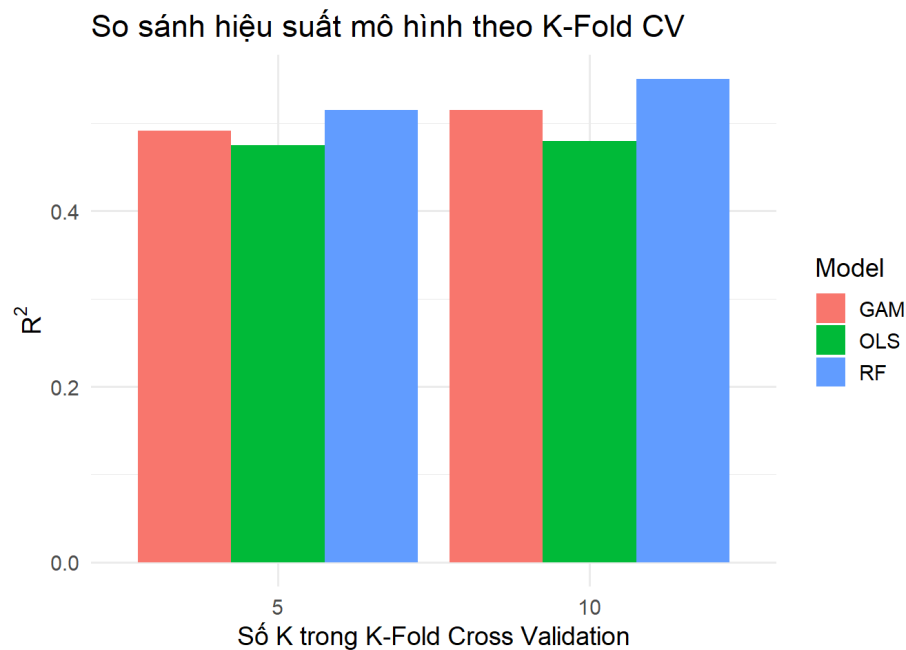
Kiểm định chéo phân tầng k-fold ($k = 5$ và 10) được áp dụng cho ba mô hình OLS, GAM và Random Forest (RF) nhằm đánh giá độ chính xác và khả năng khái quát hóa (Bảng 3.8).

Bảng 0.8. Kết quả kiểm định các mô hình hồi quy bằng cross validation

Mô hình	k	R^2	RMSE	MAE
OLS	5	0,475	0,896	0,669
OLS	10	0,480	0,878	0,709
GAM	5	0,491	0,845	0,646
GAM	10	0,515	0,817	0,639
RF	5	0,515	0,881	0,651
RF	10	0,550	0,818	0,637

Kết quả cho thấy khi tăng số fold từ $k = 5$ lên $k = 10$, hiệu suất của các mô hình đều cải thiện nhẹ, thể hiện qua R^2 tăng và RMSE giảm, trong đó RF cải thiện rõ rệt nhất (Hình 3.11). Cụ thể:

- OLS cho hiệu quả thấp nhất ($R^2 \approx 0,48$; $RMSE \approx 0,88-0,90$), phản ánh hạn chế của mô hình tuyến tính trong mô phỏng mối quan hệ phi tuyến giữa AGB và các biến viễn thám.
- GAM có hiệu suất tốt hơn OLS ($R^2 \approx 0,49-0,52$; $RMSE \approx 0,82-0,85$) nhờ mô tả phi tuyến đơn biến, nhưng vẫn chưa nắm bắt đầy đủ các tương tác đa biến.
- RF đạt kết quả tốt nhất ở cả hai cấu hình, đặc biệt với $k = 10$ ($R^2 \approx 0,55$; $RMSE \approx 0,818$; $MAE \approx 0,637$), cho thấy khả năng mô hình hóa mạnh các quan hệ phi tuyến và tương tác đa chiều, đồng thời duy trì tính ổn định cao.



Hình 3.11. So sánh hiệu suất mô hình RF bằng kiểm định chéo k-fold

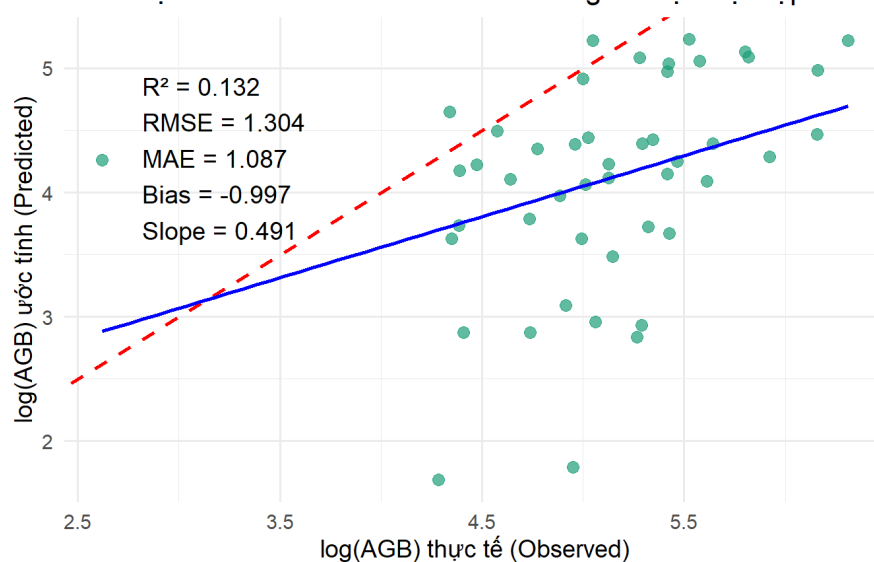
Nhìn chung, $RF > GAM > OLS$ về hiệu suất và tính khái quát hóa. Kết quả này nhất quán với kiểm định nội bộ và khẳng định Random Forest là mô hình phù hợp nhất để ước lượng sinh khối rừng từ dữ liệu viễn thám đa nguồn trong điều kiện rừng nhiệt đới phức tạp.

3.3.4.3. Kiểm định mô hình RF bằng dữ liệu độc lập

Mô hình RF được huấn luyện từ dữ liệu giai đoạn 2020–2024 và kiểm định bằng bộ dữ liệu độc lập năm 2013 nhằm đánh giá khả năng tổng quát hóa theo thời gian. Do khác biệt về cảm biến (chỉ có Landsat, thiếu Sentinel-1), đặc tính phổ và trạng thái rừng, hiệu suất mô hình suy giảm rõ rệt so với giai đoạn huấn luyện.

Kết quả cho thấy R^2 chỉ đạt 0,132, trong khi $RMSE = 1,304$ và $MAE = 1,087$ (Hình 3.12), phản ánh sai số dự báo tăng cao khi áp dụng ngoài mẫu. Hệ số slope = 0,491 cho thấy hiện tượng nén giá trị ước lượng, với xu hướng đánh giá thấp sinh khối cao và đánh giá cao sinh khối thấp, chủ yếu do bão hòa tín hiệu quang học khi thiếu dữ liệu ra-đa hỗ trợ.

Kiểm định mô hình Random Forest bằng dữ liệu độc lập



Hình 3.12. Đồ thị tương quan AGB ước lượng và thực tế (độc lập)

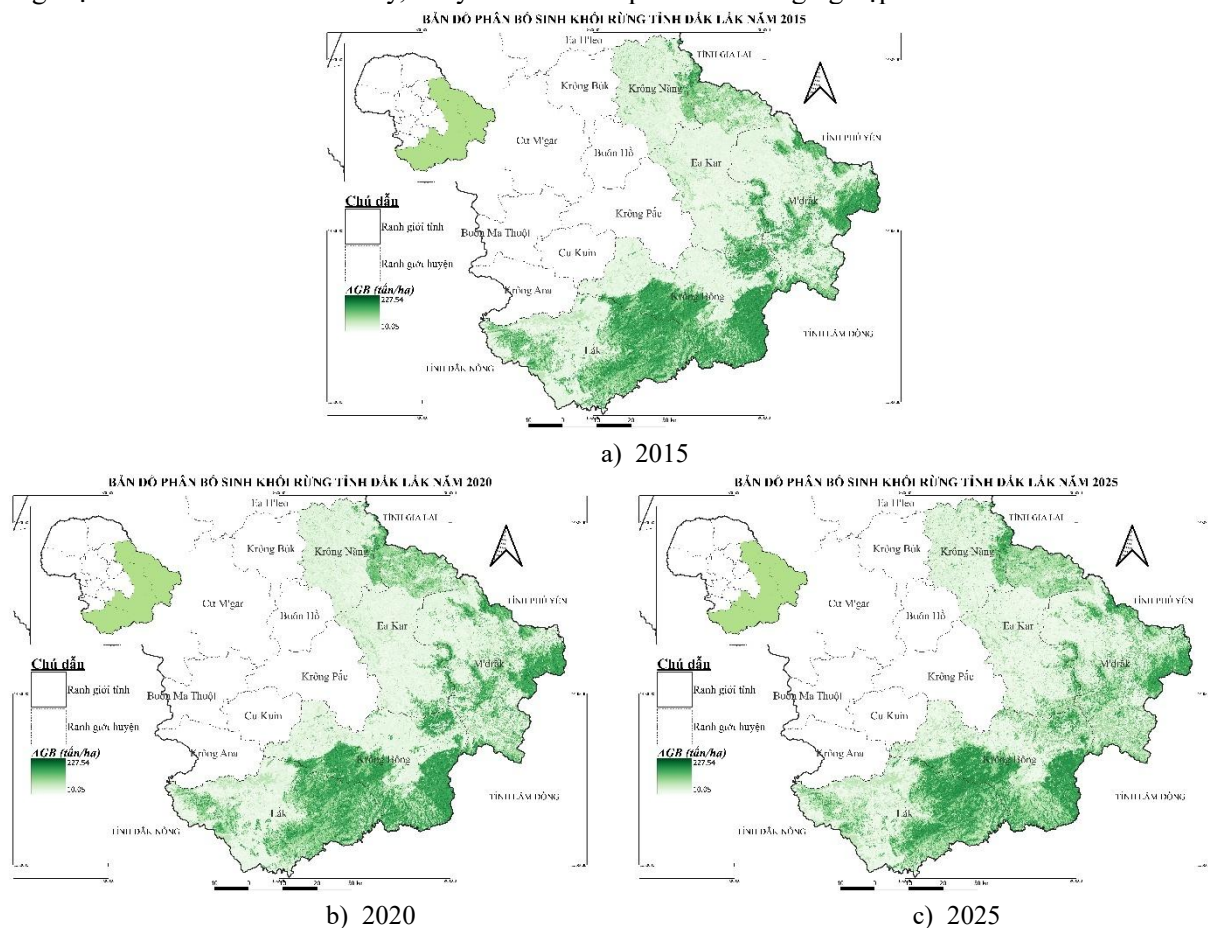
Mặc dù độ chính xác tuyệt đối giảm, mô hình RF vẫn duy trì được xu hướng biến thiên tổng thể của AGB, chứng tỏ tính khả dụng nhất định cho phân tích không gian – thời gian ở quy mô tỉnh. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước, cho thấy mô hình huấn luyện theo một thời kỳ thường suy giảm hiệu suất khi áp dụng cho giai đoạn khác do khác biệt cảm biến và điều kiện sinh thái.

3.4. Lập bản đồ AGB rừng và khả năng hấp thụ CO₂ giai đoạn 2015 – 2025

3.4.1. Xây dựng bản đồ AGB giai đoạn 2015-2025

Nghiên cứu sử dụng mô hình RF với nhóm biến chọn lọc (B7, NDWI, MSI, VH, elevation, slope) để ước lượng và lập bản đồ phân bố sinh khối trên mặt đất (AGB) của rừng lá rộng thường xanh tỉnh Đắk Lắk trong giai đoạn 2015–2025. Giai đoạn này được lựa chọn nhằm đảm bảo tính nhất quán dữ liệu, đặc biệt do Sentinel-1 (biển ra-đa quan trọng) chỉ sẵn có từ năm 2015.

Kết quả bản đồ AGB các năm 2015, 2020 và 2025 (Hình 3.13) cho thấy cấu trúc phân bố không gian sinh khối tương đối ổn định qua thời gian. Các khu vực có AGB cao tập trung chủ yếu ở phía Nam và Đông Nam tỉnh (huyện Lắk, Krông Bông), gần với rừng tự nhiên liên tục và địa hình cao, ít chịu tác động nhân sinh. Ngược lại, AGB thấp phân bố chủ yếu ở phía Bắc và Đông Bắc (Ea Kar, Krông Năng, M'Đrăk), nơi chịu ảnh hưởng mạnh của khai thác trước đây, chuyển đổi đất và phát triển nông nghiệp.



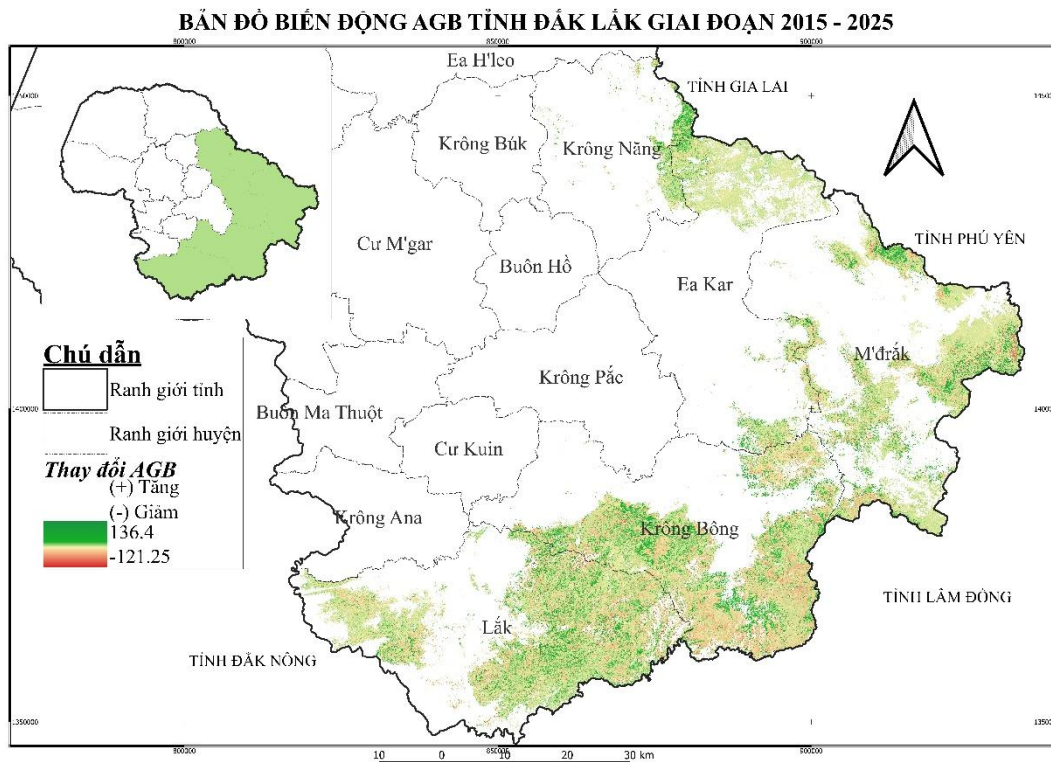
Hình 3.13. Phân bố sinh khối rừng qua các giai đoạn

Tổng thể, giai đoạn 2015–2025 cho thấy đặc trưng không gian của AGB RTX ít thay đổi, song giá trị sinh khối có biến động theo thời gian, phản ánh tác động tổng hợp của mất rừng, phục hồi rừng và công tác quản lý – bảo vệ rừng. Các bản đồ AGB thu được cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho giám sát biến động sinh khối, đánh giá hiệu quả quản lý rừng và phục vụ báo cáo REDD+ ở cấp tỉnh.

3.4.2. Phân tích biến động AGB giai đoạn 2015-2025

Ngưỡng biến động sinh khối có ý nghĩa thống kê (MDC) được xác định là $0,405 \log AGB (\approx 2,5 \text{ tấn AGB/ha})$. Do đó, chỉ các thay đổi vượt ngưỡng này mới được xem là biến động thực, không phải do sai số mô hình.

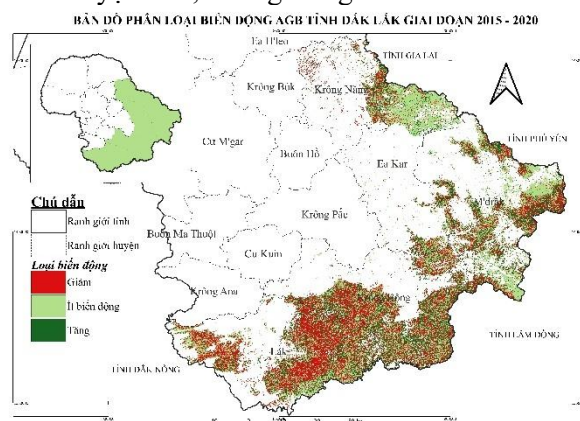
Kết quả bản đồ biến động (Hình 3.14) cho thấy AGB rừng thường xanh tỉnh Đắk Lắk giai đoạn 2015–2025 có xu thế suy giảm chiếm ưu thế, mặc dù tồn tại các khu vực phục hồi cục bộ. Các vùng giảm AGB phân bố rộng và liên tục, tập trung chủ yếu tại M'Đrăk, Ea Kar, Krông Bông và một phần Lắk, gần với khai thác gỗ trái phép, chuyển đổi mục đích sử dụng đất và mở rộng nông nghiệp. Ngược lại, các vùng tăng AGB xuất hiện rải rác, chủ yếu ở Lắk và Krông Bông, nơi có điều kiện thuận lợi cho tái sinh tự nhiên và các chương trình khoanh nuôi, phục hồi rừng.



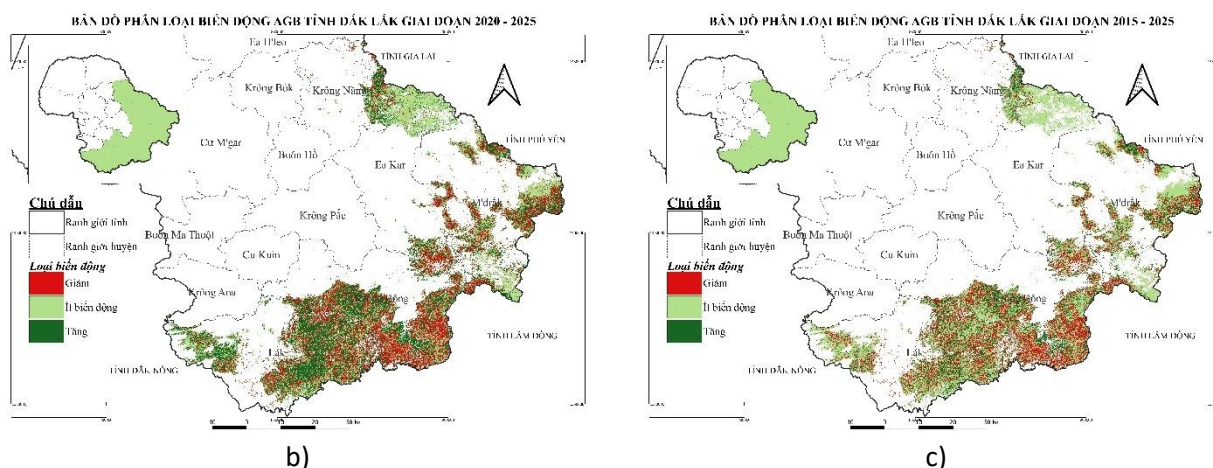
Hình 3.14. Bản đồ biến động AGB giai đoạn 2015–2025

Nhìn chung, bản đồ biến động AGB phản ánh sự mất cân bằng giữa suy giảm và phục hồi, trong đó suy giảm vẫn chiếm ưu thế. Điều này cho thấy yêu cầu cấp thiết trong tăng cường giám sát rừng bằng công nghệ viễn thám – GIS, kết hợp các chính sách phục hồi và bảo vệ rừng bền vững. Biến động theo từng giai đoạn như sau:

- Giai đoạn 2015–2020 (Hình 3.15a): Suy giảm AGB diễn ra mạnh dọc ranh giới Lăk – Krông Bông, phản ánh áp lực khai thác trái phép và chuyển đổi đất rừng còn cao.
- Giai đoạn 2020–2025 (Hình 3.15b): Biến động phân tán hơn, với diện tích tăng AGB tập trung tại rừng sâu ít bị tác động, đặc biệt ở phía Nam huyện Krông Bông, Lăk và các huyện Ea Kar và M'Đrăk nơi xa khu dân cư và khó tiếp cận.
- Tổng thể 2015–2025 (Hình 3.15c): Xu thế suy giảm vẫn chiếm ưu thế, tập trung ở các huyện phía Đông và Nam tỉnh, trong khi đó, các khu vực có xu hướng tăng AGB phân bố rải rác ở các khu vực thuộc rừng đặc dụng ở các huyện Lăk, Krông Bông.



a)



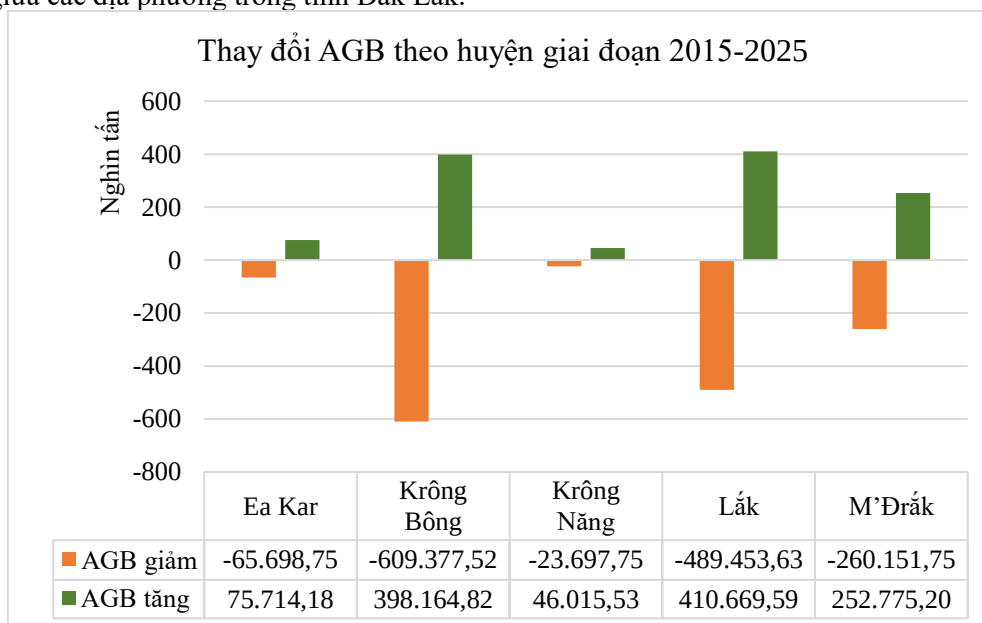
Hình 3.15. Bản đồ phân loại biến động AGB rừng tỉnh Đắk Lắk qua các giai đoạn
a) 2015–2020; b) 2020–2025; c) 2015–2025.

Phân tích định lượng cho thấy tổng AGB giảm 1,45 triệu tấn, trong khi AGB tăng 1,18 triệu tấn, dẫn đến suy giảm ròng khoảng 265 nghìn tấn AGB trên toàn tỉnh (Bảng 3.9). Ở cấp huyện, Krông Bông và Lắk có mức thâm hụt sinh khối lớn nhất; M'Đrăk gần đạt trạng thái cân bằng; trong khi Krông Năng và Ea Kar ghi nhận cân đối sinh khối dương.

Bảng 3.9. Kết quả định lượng thay đổi sinh khối RTX tỉnh Đắk Lắk giai đoạn 2015–2025

Chỉ tiêu	Giảm AGB (tấn)	Tăng AGB (tấn)
Giá trị nhỏ nhất (tấn/ha)	0,00	1,00
Giá trị lớn nhất (tấn/ha)	-175,99	136,81
Khoảng biến động (tấn/ha)	175,98	135,81
Tổng lượng (tấn)	1.448.379,41	1.183.339,32
Giá trị trung bình (tấn/ha)	7,42	14,33
Độ lệch chuẩn	12,86	14,93
Cân đối (tấn)	-	-265.040,09

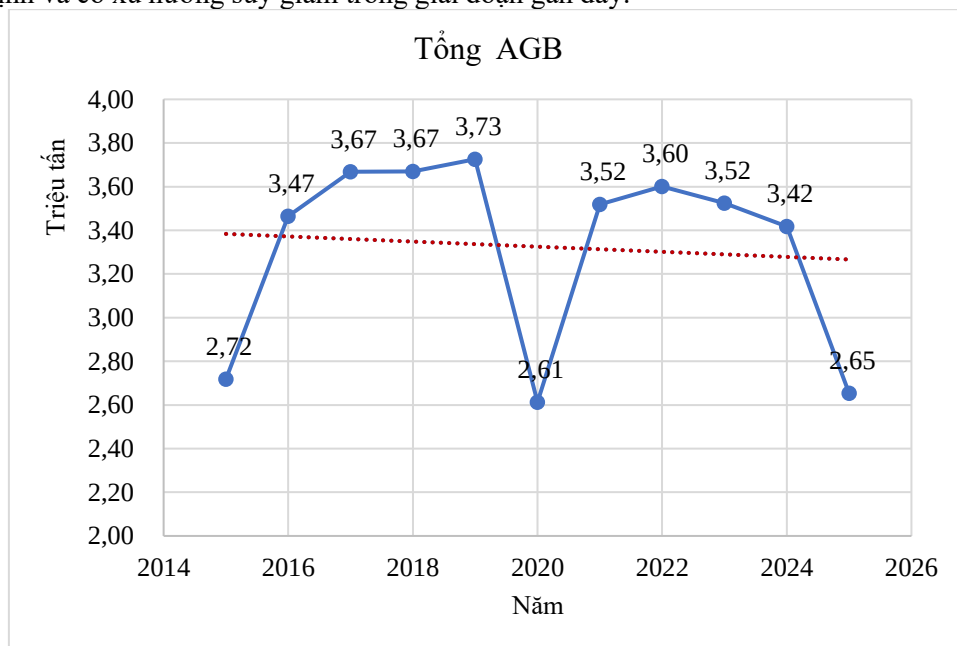
Kết quả phân tích thay đổi sinh khối giai đoạn 2015–2025 theo từng huyện (Hình 3.16) cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các địa phương trong tỉnh Đắk Lắk.



Hình 3.16. Biểu đồ thay đổi AGB theo huyện giai đoạn 2015–2025

Nhìn chung, kết quả phân tích biến động sinh khối RTX giai đoạn 2015–2025 cho thấy xu hướng suy giảm chiếm ưu thế so với tích lũy, với tổng lượng sinh khối giảm nhiều hơn 265,04 nghìn tấn so với lượng tăng. Tuy nhiên, sự thay đổi này không đồng đều giữa các huyện: Lắk và Krông Năng thể hiện khả năng phục hồi và tích lũy sinh khối, trong khi M'Đrăk và Krông Bông lại mất mát đáng kể.

Về mặt xu thế, nếu xét trung bình, AGB_total giai đoạn 2015–2025 duy trì ở mức khoảng 3,4 triệu tấn (Hình 3.17), song thể hiện chu kỳ tăng – giảm rõ rệt, đặc trưng cho biến động rừng nhiệt đới do chịu tác động kết hợp giữa tự nhiên và nhân sinh. Diễn biến này cho thấy, mặc dù có sự phục hồi cục bộ, tổng trữ lượng sinh khối chưa ổn định và có xu hướng suy giảm trong giai đoạn gần đây.



Hình 3.17. Tổng sinh khối rừng giai đoạn 2015 – 2025

Nhìn chung, mặc dù vẫn tồn tại các khu vực có khả năng phục hồi sinh khối, song tổng thể toàn tỉnh Đắk Lắk vẫn đang đối diện xu thế suy giảm nhẹ sinh khối rừng, đòi hỏi các giải pháp quản lý bền vững, bảo vệ diện tích rừng hiện có và tăng cường phục hồi rừng ở những khu vực trọng điểm suy thoái.

Do vậy, để xác định liệu các biến động này mang xu thế dài hạn hay chỉ là dao động ngắn hạn, cần phân tích xu thế tổng thể bằng kiểm định thống kê Mann-Kendall kết hợp với ước lượng độ dốc Theil–Sen nhằm đánh giá xu hướng tổng thể của AGB trong giai đoạn 2015–2025.

3.4.3. Kiểm định xu thế AGB giai đoạn 2015–2025

Để đánh giá xu thế biến động AGB giai đoạn 2015–2025, nghiên cứu áp dụng kiểm định Mann–Kendall (MK) kết hợp ước lượng độ dốc Theil–Sen. Phương pháp này không yêu cầu dữ liệu tuân theo phân phối chuẩn và thích hợp cho chuỗi ngắn, nhiều – đặc trưng của dữ liệu sinh khối từ viễn thám.

Kết quả cho thấy tổng sinh khối rừng RTX dao động trong khoảng 2,61 – 3,73 triệu tấn (Bảng 3.10), tăng nhẹ giai đoạn 2015–2019, giảm mạnh năm 2020 và phục hồi một phần giai đoạn 2021–2024 trước khi giảm lại vào 2025.

Bảng 3.10. Tổng sinh khối RTX giai đoạn 2015-2025

Năm	AGB_total (triệu tấn)	Năm	AGB_total (triệu tấn)
2015	2,72	2021	3,52
2016	3,47	2022	3,60
2017	3,67	2023	3,52
2018	3,67	2024	3,42
2019	3,73	2025	2,65
2020	2,61		

Kiểm định MK cho thấy hệ số $\tau = -0,1667$, $p = 0,53$ ($>0,05$), chứng tỏ không có xu thế biến đổi có ý nghĩa thống kê. Giá trị Sen's slope cho thấy độ dốc $-0,0175$ triệu tấn/năm, phản ánh xu hướng giảm nhẹ nhưng không đáng kể (Bảng 3.11).

Bảng 3.11. Kết quả kiểm định xu thế AGB giai đoạn 2015–2025

Chỉ số thống kê	Giá trị	Ý nghĩa thống kê
Hệ số τ	-0,1667	Xu thế giảm nhẹ, không có ý nghĩa thống kê
Sen's slope	-0,0175	$p = 0,53$ ($>0,05$), không có xu thế rõ rệt.
Số quan sát (năm)	11	2015 - 2025

Như vậy, trong giai đoạn 2015–2025, AGB rừng thường xanh tại Đắk Lắk dao động không theo xu thế rõ rệt, chủ yếu chịu ảnh hưởng bởi các biến động ngắn hạn như mất rừng cục bộ và phục hồi tự nhiên. Kết quả này là cơ sở cho các phân tích tiếp theo về khả năng hấp thụ và lưu giữ các-bon, phục vụ quản lý rừng bền vững và giảm phát thải khí nhà kính.

3.5. Ước tính khả năng hấp thụ khí CO₂ của rừng thường xanh

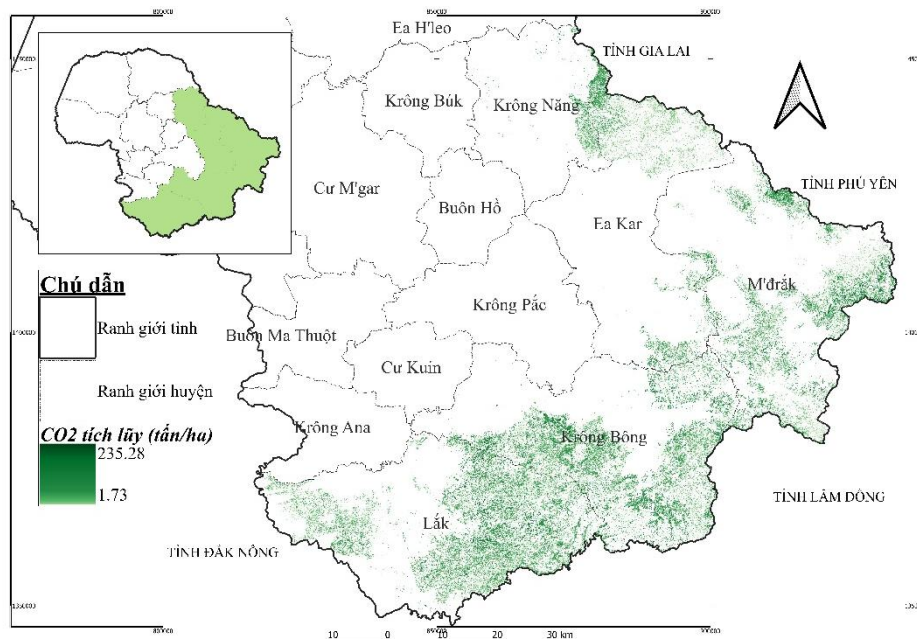
AGB là cơ sở để ước tính lượng các-bon tích lũy và khả năng hấp thụ CO₂ của rừng. Thông qua quang hợp, rừng hấp thụ CO₂, chuyển hóa thành chất hữu cơ và lưu trữ lâu dài trong sinh khối, góp phần giảm phát thải khí nhà kính và điều hòa khí hậu (Chen và cộng sự, 2023b; Mo và cộng sự, 2023). Việc định lượng khả năng hấp thụ CO₂ của rừng thường xanh tại Đắk Lắk có ý nghĩa quan trọng trong đánh giá cân bằng các-bon và xây dựng chính sách quản lý rừng bền vững, REDD+ và PFES.

Kết quả cho thấy tổng lượng CO₂ tích lũy của RTX toàn tỉnh đạt khoảng 2,04 triệu tấn, với giá trị dao động 1,73 – 235,98 tấn/ha, trung bình 24,72 tấn/ha (Bảng 3.12). Mức độ biến động cao phản ánh sự khác biệt lớn giữa các khu vực rừng.

Bảng 3.12. Thống kê lượng CO₂ tích lũy RTX tỉnh Đắk Lắk giai đoạn 2015–2025

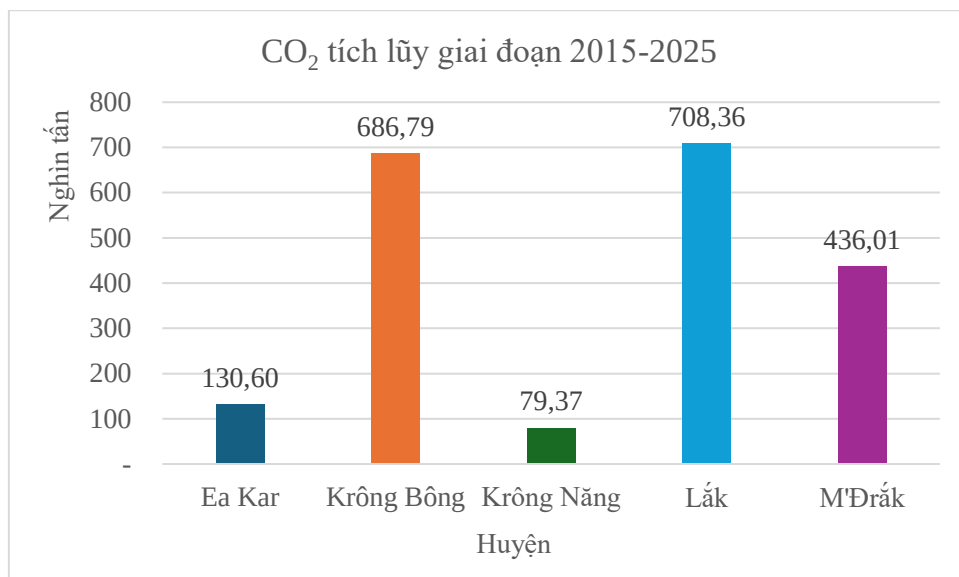
Chỉ tiêu	Giá trị
Minimum value (tấn/ha)	1,73
Maximum value (tấn/ha)	235,98
Range (tấn/ha)	234,26
Sum (tấn CO ₂)	2.041.141,99
Mean value (tấn/ha)	24,72
Standard deviation (tấn/ha)	25,75

Các vùng có khả năng tích lũy CO₂ cao (150–235 tấn/ha) tập trung ở một vài khu vực nhỏ thuộc nam Krông Bông và đông M’Đrăk, nơi còn rừng tự nhiên liên tục, địa hình đồi núi cao và ít chịu tác động nhân sinh. Ngược lại, Ea Kar và Lắk có giá trị thấp (<50 tấn/ha) do chịu ảnh hưởng mạnh của khai thác tài nguyên rừng (Hình 3.18).



Hình 3.18. Bản đồ phân bố CO₂ tích lũy giai đoạn 2015–2025

Về phân bố hành chính, huyện Lắk có lượng CO₂ tích lũy lớn nhất (708,36 nghìn tấn), tiếp đến là Krông Bông (686,79 nghìn tấn), M’Đrăk (436,01 nghìn tấn) và Ea Kar (130,60 nghìn tấn), trong khi Krông Năng thấp nhất (79,37 nghìn tấn) (Hình 3.19).



Hình 3.19. Biểu đồ tổng tích lũy CO₂ theo huyện

Nhìn chung, khả năng hấp thụ CO₂ của rừng tại Đắk Lắk phụ thuộc chặt chẽ vào diện tích, cấu trúc và trạng thái rừng. Các khu vực rừng tự nhiên liên tục có vai trò then chốt trong cân bằng các-bon và giảm phát thải. Do đó, cần ưu tiên bảo vệ và phục hồi các khu rừng có trữ lượng CO₂ cao nhằm duy trì và tăng cường chức năng hấp thụ các-bon của hệ sinh thái rừng trong dài hạn.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Luận án “Ước lượng khả năng hấp thụ CO₂ của kiểu RTX trên địa bàn tỉnh Đắk Lắk dựa vào dữ liệu viễn thám và kỹ thuật GIS” đã đạt được các mục tiêu nghiên cứu đề ra và có những đóng góp quan trọng về mặt khoa học và thực tiễn trong lĩnh vực quản lý tài nguyên rừng, giám sát các-bon và ứng phó biến đổi khí hậu.

Luận án đã hệ thống hóa và cập nhật các tiến bộ trong ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS cho ước tính sinh khối rừng, đồng thời lựa chọn và xây dựng quy trình phân tích phù hợp với điều kiện sinh thái dữ liệu của tỉnh Đắk Lắk; đồng thời với nguồn lực hiện có của nghiên cứu. Phương pháp nghiên cứu tích hợp gồm: (i) xử lý ảnh Landsat và Sentinel; (ii) tính toán và lựa chọn các chỉ số phổ – ra-đa có ý nghĩa; (iii) kiểm định thống kê (Pearson, PCA, hồi quy đơn và đa biến); và (iv) mô hình học máy Random Forest (RF) kết hợp kiểm định chéo phân tầng k-fold. Kết hợp giữa dữ liệu quang học (B7, MSI, NDWI), dữ liệu địa hình (elevation, slope) và dữ liệu ra-đa (VH) đã chứng minh hiệu quả trong mô phỏng biến động sinh khối rừng. Phép biến đổi lô-ga-rít của AGB được áp dụng giúp giảm sai số và nâng cao độ ổn định thống kê của các mô hình ước lượng.

Kết quả phân loại thảm phủ bằng thuật toán RF đạt độ chính xác tổng thể trung bình 94,24% và chỉ số Kappa 0,88, thể hiện khả năng nhận dạng tốt RTX. Phân bố diện tích rừng theo không gian cho thấy RTX của tỉnh tập trung phân bố chủ yếu ở phía Đông – Nam, nơi có địa hình cao và dốc, khó tiếp cận.

Dữ liệu AGB ô mẫu sau khi biến đổi lô-ga-rít cho thấy phân bố dữ liệu trở nên chuẩn hóa hơn, tạo điều kiện thuận lợi cho các mô hình hồi quy và học máy. Kết quả phân tích tương quan và hồi quy cho thấy các biến B7, MSI, NDWI, VH, elevation và slope có mối quan hệ có ý nghĩa thống kê với logAGB ($p < 0,05$). Kết hợp ảnh quang học, địa hình và ra-đa với mô hình RF có cải thiện độ chính xác của mô hình hồi quy giữa AGB với các nhân tố viễn thám. Mô hình hồi quy RF cho kết quả ước lượng có độ tin cậy cao hơn so với mô hình hồi quy tuyến tính đa biến và mô hình hồi quy phi tuyến GAM với hệ số R^2 lần lượt là 0,51, 0,59 và 0,88. Kiểm định chéo phân tầng k-fold RF vượt trội nhất trong cả hai cấu hình k, với: R^2 cao nhất (0,55), RMSE thấp nhất (~0,818), MAE thấp nhất (~0,637). Điều này chứng minh ưu thế của RF khi mô hình hóa mối quan hệ phi tuyến phức tạp và tương tác giữa nhiều biến viễn thám đồng thời. Sử dụng dữ liệu độc lập để đánh giá sai số ước lượng cho thấy mô hình RF áp dụng cho ảnh vệ tinh quang học có hệ số $R^2 = 0,132$ và các sai số RMSE = 1,304, MAE = 1,087 cho thấy ảnh vệ tinh quang học đơn lẻ không giải thích tốt mối quan hệ giữa sinh khối và nhân tố ảnh viễn thám so với kết hợp ảnh ra-đa và ảnh quang học.

Tổng lượng CO₂ tích lũy của rừng tự nhiên toàn tỉnh giai đoạn 2015-2025 ước đạt khoảng 2,04 triệu tấn CO₂. Tính trung bình, lượng CO₂ hấp thụ của RTX trong khu vực nghiên cứu đạt trung bình 24,72 tấn CO₂/ha. Các địa phương có tích lũy CO₂ cao trong giai đoạn này là huyện Krông Bông và huyện Lắk với lượng CO₂ tích lũy lần lượt là 686,79 và 708,36 nghìn tấn CO₂.

Những kết quả này không chỉ góp phần khẳng định vai trò của rừng trong chu trình các-bon, mà còn là cơ sở khoa học quan trọng để hoạch định chính sách quản lý, bảo vệ và phát triển rừng, cũng như tham gia vào các cơ chế chi trả dịch vụ môi trường rừng, giảm phát thải từ mất rừng và suy thoái rừng (REDD+) và trung hòa các-bon.

Tồn tại

Mặc dù luận án đã đạt được các mục tiêu nghiên cứu đề ra và xây dựng được mô hình ước tính sinh khối và khả năng hấp thụ CO₂ cho rừng thường xanh tỉnh Đắk Lắk với độ tin cậy khá tốt, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định.

Trước hết, dữ liệu thực địa còn hạn chế cả về số lượng và mức độ đồng bộ theo thời gian so với quy mô lớn và tính phân mảnh cao của rừng trong toàn tỉnh. Việc thiếu đồng nhất về thời điểm thu thập giữa dữ liệu thực địa và ảnh viễn thám, cùng với việc chưa thu thập đầy đủ các thông tin cấu trúc rừng chi tiết, có thể làm gia tăng sai số và hạn chế khả năng diễn giải sinh thái của mô hình.

Thứ hai, hạn chế từ dữ liệu viễn thám chủ yếu xuất phát từ độ phân giải không gian của ảnh Landsat và Sentinel (10–30 m), chưa phản ánh đầy đủ cấu trúc rừng hỗn loài, nhiều tầng và sinh khối cao. Bên cạnh đó, ảnh quang học chịu ảnh hưởng của mây che và điều kiện khí quyển, trong khi dữ liệu radar C-band có xu hướng bão hòa ở rừng giàu sinh khối. Việc chưa tích hợp dữ liệu LiDAR mặt đất hoặc không gian cũng là một hạn chế trong việc mô tả cấu trúc thẳng đứng của rừng.

Thứ ba, về mô hình hóa, luận án mới tập trung thử nghiệm một số nhóm mô hình đại diện (OLS, GAM và RF). Mặc dù RF cho kết quả tối ưu, nghiên cứu chưa mở rộng so sánh với các mô hình học máy nâng cao hơn, chưa đánh giá đầy đủ khả năng chuyển tiếp mô hình theo thời gian và chưa phân tích sâu sự khác biệt sinh thái theo các điều kiện địa hình – môi trường khác nhau. Do đó, khả năng khái quát và mở rộng mô hình sang các kiểu rừng hoặc vùng sinh thái khác vẫn còn hạn chế.

Cuối cùng, về tính ứng dụng quản lý, các kết quả ước tính sinh khối và CO₂ mới dừng ở mức cung cấp cơ sở khoa học và dữ liệu tham khảo, chưa được tích hợp đầy đủ vào các hệ thống MRV phục vụ REDD+ hoặc PFES.

Kiến nghị

Trên cơ sở những kết quả đạt được và các hạn chế còn tồn tại của luận án, tác giả đề xuất một số kiến nghị sau nhằm nâng cao hiệu quả nghiên cứu và ứng dụng trong thời gian tới:

Thứ nhất, về dữ liệu thực địa, cần tiếp tục mở rộng và chuẩn hóa hệ thống ô mẫu rừng theo hướng tăng số lượng, cải thiện tính đại diện và đồng bộ hóa thời gian thu thập với dữ liệu viễn thám. Việc bổ sung các thông tin cấu trúc rừng như chiều cao tán, mật độ cây, tái sinh và đa dạng loài sẽ góp phần nâng cao độ chính xác của mô hình ước tính sinh khối, đồng thời tăng khả năng diễn giải sinh thái của kết quả nghiên cứu.

Thứ hai, về dữ liệu viễn thám, cần đẩy mạnh tích hợp các nguồn dữ liệu có khả năng mô tả cấu trúc thẳng đứng của rừng, đặc biệt là dữ liệu LiDAR mặt đất và LiDAR không gian (GEDI, ICESat-2), kết hợp với ảnh quang học và ra-đa đa thời gian. Cách tiếp cận đa nguồn này sẽ giúp khắc phục hiện tượng bão hòa tín hiệu ở rừng sinh khối cao, nâng cao độ tin cậy của bản đồ sinh khối và CO₂ hấp thụ.

Thứ ba, về phương pháp và mô hình hóa, các nghiên cứu tiếp theo nên mở rộng so sánh các thuật toán học máy nâng cao như Gradient Boosting, XGBoost, hoặc các thuật toán ANN, Deep learning. Việc phân tích độ nhạy của sinh khối theo các điều kiện sinh thái – địa hình khác nhau cũng là hướng nghiên cứu cần thiết nhằm làm rõ cơ chế biến động sinh khối rừng.

Thứ tư, về tính ứng dụng quản lý, cần từng bước tích hợp kết quả ước tính sinh khối và CO₂ vào các hệ thống MRV phục vụ REDD+ và chi trả dịch vụ môi trường rừng (PFES). Đồng thời, việc xây dựng các quy trình kỹ thuật và bộ công cụ đơn giản hóa trên nền tảng GIS và viễn thám sẽ giúp các cơ quan quản lý rừng địa phương có thể áp dụng thường xuyên và hiệu quả hơn trong công tác theo dõi diễn biến rừng.

Nhìn chung, các kiến nghị trên không chỉ góp phần hoàn thiện hướng nghiên cứu trong tương lai mà còn tạo tiền đề để chuyển hóa các kết quả khoa học của luận án thành công cụ hỗ trợ thiết thực cho quản lý và sử dụng bền vững tài nguyên rừng trong bối cảnh biến đổi khí hậu và thực hiện các cam kết giảm phát thải của Việt Nam.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CÓ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

A. Tạp chí

1. **Ho Dinh Bao**, Nguyen Thi Thanh Huong (2025). Estimating forest above ground biomass in Dak Lak province, Vietnam. *Asian Journal of Forestry*, Volume 9, Number 1, June 2025, DOI: 10.13057/asianjfor/r090112 (SCOPUS, Q3).
2. **Hồ Đình Bảo**, Nguyễn Thị Thanh Hương (2023). Sử dụng ảnh viễn thám để ước tính sinh khối rừng trên mặt đất: Thách thức và triển vọng. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp*, Số 6/2023, tr. 125-147.
3. **Hồ Đình Bảo**, Nguyễn Thế Hiển, Lê Thị Mai Trang, Nguyễn Thị Thanh Hương (2025). So sánh liệu quả phân loại thảm phủ tỉnh Đắk Lắk từ dữ liệu ảnh viễn thám bằng thuật toán học máy. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp*, Số 1/2025: 61-75. DOI: <https://doi.org/10.70169/VJFS.1014>

B. Bài báo hội thảo Quốc tế

4. **Ho Dinh Bao**, Nguyen Thi Thanh Huong, Nguyen Thi Tuyen Nhung (2024). Using satellite images and statistics for Estimating Aboveground Forest Biomass change in Dak Lak province – Vietnam. *International conference on Biodiversity, Science, and Technology - BioSat*, Jan 2024, Pattaya, Thailand.