



XÂY DỰNG PHƯƠNG TRÌNH ƯỚC TÍNH TRỮ LƯỢNG CARBON RỪNG TỰ NHIÊN BẰNG ẢNH VỆ TINH SENTINEL-2: NGHIÊN CỨU TRƯỜNG HỢP Ở THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG

Nguyễn Hữu Tâm^{1,2}, Nguyễn Văn Lợi¹, Hoàng Huy Tuấn^{1,*}

¹ Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế, 102 Phùng Hưng, Huế, Việt Nam

² Sở Nông nghiệp và Môi trường thành phố Đà Nẵng, 24 Trần Phú, Đà Nẵng, Việt Nam

* Tác giả liên hệ: Hoàng Huy Tuấn <hhtuan@hueuni.edu.vn>

(Ngày nhận bài: 12-9-2024; Ngày chấp nhận đăng: 8-1-2025)

Tóm tắt. Sử dụng ảnh viễn thám và dữ liệu điều tra rừng để ước tính sinh khối rừng theo các tham số, chỉ số ảnh đã được tiến hành hơn hai thập kỷ qua trên toàn Thế giới. Trong đó ảnh Sentinel 2 có độ phân giải khá cao và phù hợp với phân tích mối quan hệ của các chỉ số phản xạ thực vật rừng với sinh khối rừng, hơn nữa ảnh Sentinel 2 được sử dụng miễn phí nên góp phần giảm chi phí trong việc ước tính trữ lượng carbon rừng. Nghiên cứu được tiến hành nhằm xây dựng phương trình tương quan giữa trữ lượng carbon rừng tự nhiên với chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) của ảnh Sentinel 2 ở thành phố Đà Nẵng thông qua các mô hình hồi quy tuyến tính và phi tuyến. Kết quả của nghiên cứu đã chỉ ra rằng: độ chính xác tổng thể của bản đồ phân loại đạt 96% và hệ số Kappa là 0,94. Phương trình hồi quy $TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$ có hệ số xác định $R^2 = 0,8713$ và độ chính xác 83,41% được chọn để ước tính trữ lượng carbon rừng của thành phố Đà Nẵng.

Từ khóa: ảnh Sentinel-2, carbon rừng tự nhiên, Đà Nẵng, NDVI, phương trình hồi quy

Developing equation to estimate natural forest carbon based on using Sentinel-2 imagery: Case study in Da Nang city

Nguyen Huu Tam^{1,2}, Nguyen Van Loi¹, Hoang Huy Tuan^{1,*}

¹ University of Agriculture and Forestry, Hue University, 102 Phung Hung St., Hue, Vietnam

² Department of Agriculture and Environment of Da Nang City, 24 Tran Phu St., Danang, Vietnam

* Correspondence to Hoang Huy Tuan <hhtuan@hueuni.edu.vn>

(Submitted: September 12, 2024; Accepted: January 8, 2025)

Abstract. Using remote sensing images and forest inventory data to estimate forest biomass basing on parameters and image indices that has been conducted for more than two decades on the World. In which,

the Sentinel 2 image has quite high resolution and suitable for analyzing the relationship of forest vegetation reflectance indices with forest biomass, furthermore the Sentinel 2 images are free of charge so it contributes to reducing costs in estimating natural forest carbon stocks. This study was conducted to develop correlation equation between natural forest carbon stocks and normalized difference vegetation index (NDVI) of Sentinel 2 images in Danang city through linear and non-linear models. The study found out that the overall accuracy of the classification map is 96%, with a Kappa coefficient of 0.94. The regression equation $TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$ with $R^2 = 0.8713$ and an accuracy of 83.41% was selected for estimating natural forest carbon stocks in Danang city.

Keywords: Da Nang, natural forest carbon, NDVI, regression equation, Sentinel-2 images

1 Đặt vấn đề

Có nhiều chỉ số thực vật đóng vai trò quan trọng trong việc ước tính sinh khối và theo dõi sự phát triển thực vật, nhưng mỗi chỉ số có cách tiếp cận riêng và những hạn chế nhất định. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) được phát triển để giảm thiểu tác động của điều kiện đất, giúp cải thiện độ chính xác trong các khu vực có thảm thực vật thưa, nhưng hiệu quả kém hơn trong vùng cây cối dày đặc [1]. CVI (Chlorophyll Vegetation Index) đo nồng độ diệp lục, rất hữu ích trong việc đánh giá sức khỏe và sự phát triển của cây, tuy nhiên có thể hạn chế trong các vùng có nồng độ diệp lục thấp hoặc đồng đều [2]. GLI (Green Leaf Index) phản ánh sắc xanh của lá cây, đặc biệt chính xác trong giai đoạn tăng trưởng nhanh, nhưng mất đi tính hiệu quả trong các khu vực có thảm thực vật dày đặc [3]. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) nổi bật nhờ khả năng ổn định khi áp dụng ở quy mô lớn và tính phù hợp với các khu vực có thảm thực vật phong phú. NDVI được tính dựa trên sự khác biệt giữa phản xạ của ánh sáng hồng ngoại gần và ánh sáng đỏ, giúp đo lường mức độ quang hợp và sinh trưởng của thảm thực vật, qua đó ước tính hiệu quả sinh khối và carbon lưu trữ [4]. Đồng thời, NDVI cung cấp thông tin chính xác về mật độ và sức khỏe thảm thực vật, những yếu tố cốt lõi trong việc đánh giá trữ lượng carbon [5]. Ngoài ra, NDVI có ưu điểm ổn định qua thời gian, đặc biệt phù hợp khi sử dụng ở các khu vực có thảm thực vật dày đặc và phong phú, giúp việc đánh giá diễn ra hiệu quả trên diện rộng [6].

Trong thập kỷ qua, dữ liệu vệ tinh Sentinel-2 được áp dụng rộng rãi nhờ độ phân giải cao để ước tính sinh khối của rừng tự nhiên. Nghiên cứu mối quan hệ giữa các chỉ số ảnh Sentinel-2 (NDVI, EVI, NDI45...) với sinh khối trên mặt đất (AGB) của rừng nhiệt đới do tư nhân quản lý ở Indonesia, Askar và cộng sự đã chỉ ra rằng: chỉ số NDI45 thể hiện mối tương quan mạnh với AGB so với các chỉ số khác ($r = 0,89$; $R^2 = 0,79$) [7]. Ngoài ra, ảnh Sentinel-2 còn kết hợp với EnMAP để lập bản đồ và theo dõi các thay đổi về môi trường [8], hay kết hợp với PlanetScope để lập mô hình bản đồ sinh khối [9]. Ước tính sinh khối và khả năng tích lũy carbon của rừng mưa nhiệt đới ở cao nguyên Kon Hà Nừng dựa vào chỉ số EVI của ảnh Sentinel-2, Dang, H.N. và cộng sự đã chứng minh các mô hình lin-log được xây dựng để tính toán sinh khối từ chỉ số EVI của ảnh Sentinel-2 năm 2016 và năm 2021 đều có hệ số R^2 cao nhất, lần lượt là 0,76 và 0,765 [10].

Vào năm 2018, Đà Nẵng được công nhận là Thành phố Xanh Quốc gia của Việt Nam, nhờ vào các chính sách và sáng kiến của chính quyền thành phố và người dân nhằm phát triển đô thị xanh và bền vững. Thành phố đã cam kết giảm 25% lượng phát thải carbon vào năm 2030 so với mức phát thải năm 2016, vì vậy việc tính toán lượng hấp thụ carbon từ hệ sinh thái rừng là nhiệm vụ quan trọng để Đà Nẵng duy trì vị thế là Thành phố Xanh [11].

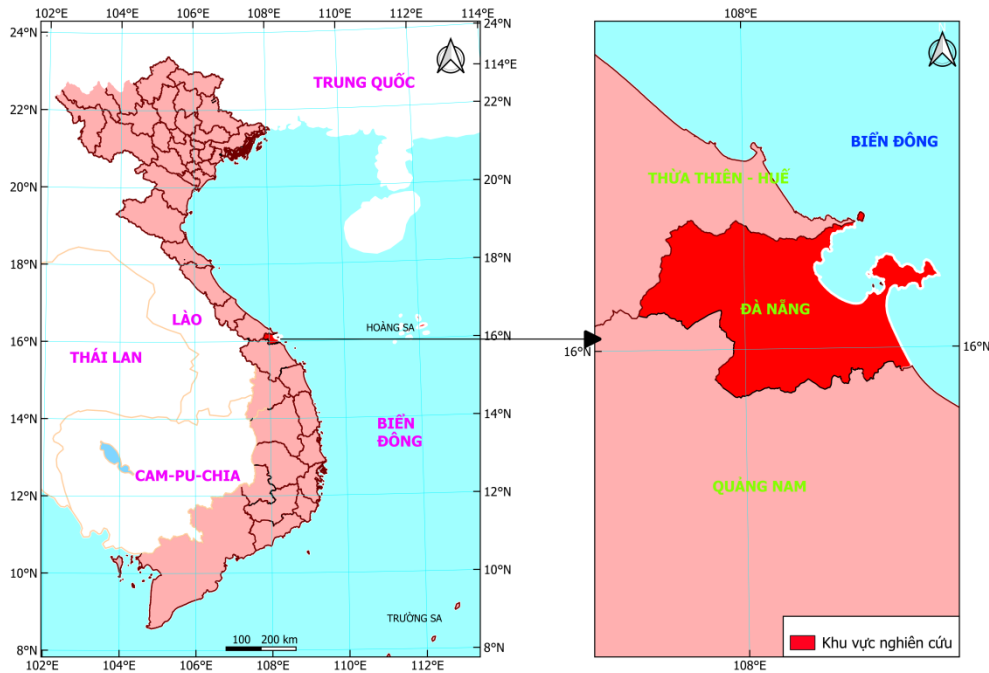
Nghiên cứu này nhằm mục đích ước tính trữ lượng carbon từ rừng tự nhiên thông qua kết hợp GIS và viễn thám với dữ liệu điều tra rừng để làm cơ sở theo dõi sự biến động của trữ lượng carbon theo thời gian trên địa bàn thành phố Đà Nẵng. Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng trong việc cung cấp thông tin cho công tác quản lý và bảo vệ tài nguyên rừng, hỗ trợ quyết định chính sách về bảo vệ môi trường và tăng trưởng trữ lượng carbon rừng tự nhiên, góp phần giảm phát thải trong quá trình phát triển đô thị. Qua việc xử lý ảnh vệ tinh và kết hợp với các dữ liệu điều tra rừng, nghiên cứu này đã xây dựng được phương trình tương quan giữa tổng trữ lượng carbon từ rừng tự nhiên và chỉ số NDVI của ảnh Sentinel-2 để ước tính trữ lượng carbon của rừng tự nhiên tại thành phố Đà Nẵng năm 2023.

2 Phương pháp nghiên cứu

2.1 Phương pháp thu thập số liệu

Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện tại thành phố Đà Nẵng thuộc vùng sinh thái Nam miền Trung của Việt Nam. Thành phố Đà Nẵng nằm ở miền Trung Việt Nam, giáp biển Đông, Thừa Thiên Huế, và Quảng Nam có vĩ độ từ 15°55' đến 16°14' Bắc, kinh độ từ 107°18' đến 108°20' Đông với 8 quận, huyện. Hệ thực vật ở đây chủ yếu là rừng nhiệt đới thường xanh và thảm thực vật ven biển. Đề tài tập trung nghiên cứu đối với các trạng thái rừng tự nhiên (rừng giàu, rừng trung bình, rừng nghèo và rừng nghèo kiệt) tại 04 quận, huyện có rừng của thành phố Đà Nẵng (Hòa Vang, Sơn Trà, Liên Chiểu, Cẩm Lệ).



Hình 1. Khu vực nghiên cứu, thành phố Đà Nẵng

Phương pháp thu thập số liệu thứ cấp

Tư liệu sử dụng xây dựng bản đồ hiện trạng rừng bao gồm:

Bản đồ hiện trạng rừng

Bản đồ diễn biến rừng năm 2022 của thành phố Đà Nẵng được thu thập từ Chi cục Kiểm lâm để lập các ô tiêu chuẩn (OTC) đại diện cho các trạng thái rừng để tiến hành đo đếm các chỉ tiêu sinh trưởng của cây rừng (cây gỗ) làm cơ sở tính toán trữ lượng carbon rừng, đồng thời dùng để đối chiếu diện tích rừng và đất lâm nghiệp so với bản đồ hiện trạng rừng năm 2023 được xây dựng từ ảnh Sentinel-2 và kiểm chứng sự trùng khớp các OTC đã được lập giữa hai bản đồ.

Ảnh vệ tinh Sentinel 2

Dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu là dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 2 với độ phân giải không gian 10m, độ phân giải thời gian 5 ngày với 12 kênh phổ. Hệ tọa độ sử dụng trong ảnh là UTM hệ chiếu WGS1984. Ảnh vệ tinh được tải về tại địa chỉ website: <https://scihub.copernicus.eu/>.

Cảnh ảnh S2B_MSIL1C_20230522T030529_N0509_R075 chụp ngày 22 tháng 05 năm 2023, có độ che phủ mây nhỏ hơn 5%, bao phủ toàn bộ diện tích đất liền của thành phố Đà Nẵng (Hình 2) được sử dụng để giải đoán ảnh để xây dựng bản đồ hiện trạng rừng năm 2023, từ đó xác định các chỉ số NDVI của từng trạng thái rừng làm cơ sở dữ liệu đầu vào để xây dựng các phương trình tương quan giữa TC và NDVI.



Hình 2. Ảnh Sentinel-2A tổ hợp màu tự nhiên chụp ngày 22/05/2023

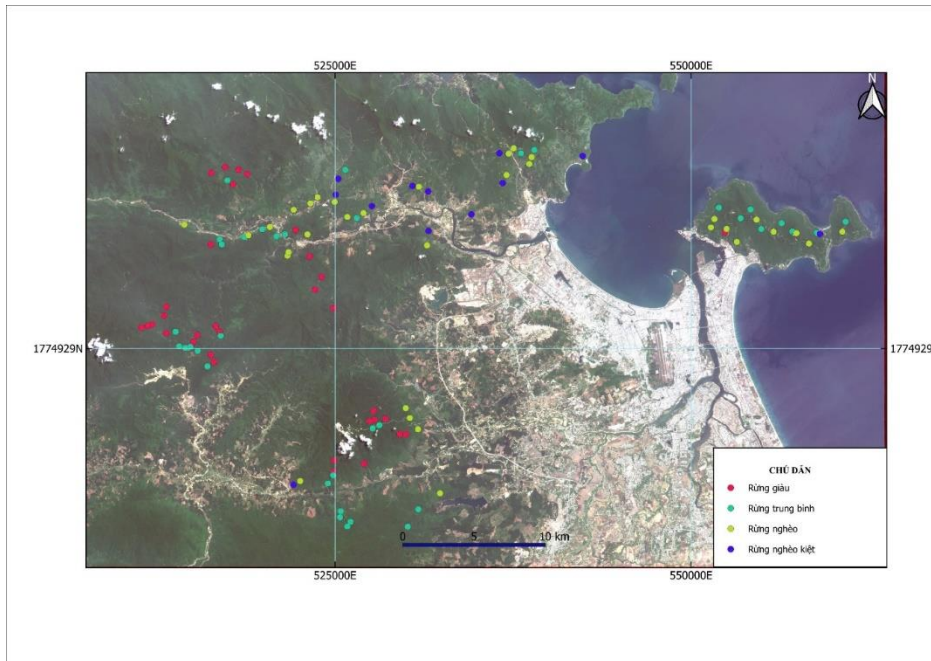
Phương pháp thu thập số liệu sơ cấp

Thu thập số liệu thực địa

Các điểm mẫu khóa ảnh được thu thập bằng phương pháp sử dụng máy GPS cầm tay để xác định tọa độ, trên cơ sở đó đã thiết lập bản đồ của 220 điểm mẫu khóa ảnh phục vụ cho công tác giải đoán ảnh vệ tinh.

Đo đếm các chỉ tiêu sinh trưởng trên các ô tiêu chuẩn

Thiết lập ngẫu nhiên các ô tiêu chuẩn (OTC) để đo đếm sinh khối rừng tự nhiên theo hướng dẫn của Bộ trưởng Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn tại Thông tư số 33/2018/TT-BNNPTNT ngày 16/11/2018 được sửa đổi, bổ sung tại Thông tư số 16/2023/TT-BNNPTNT ngày 15/12/2023.



Hình 3. Sơ đồ vị trí các ô tiêu chuẩn

Tổng cộng có 115 OTC được bố trí ngẫu nhiên đại diện cho 4 trạng thái rừng (Hình 3): rừng thường xanh giàu (TXG): 33 OTC, rừng thường xanh trung bình (TXB): 37 OTC, rừng thường xanh nghèo (TXN): 33 OTC, rừng thường xanh kiệt (TXK): 12 OTC. OTC có diện tích 1000 m² (40 m × 25 m). Trong mỗi OTC tiến hành đo đếm toàn bộ cây gỗ (cây sống) để thu thập các thông tin: tên loài, đường kính ngang ngực (D_{13}) đối với những cây có $D_{13} \geq 6$ cm, chiều cao vút ngọn (H_{vn}). Đối với chỉ tiêu tỷ trọng gỗ (wood density - WD) được sử dụng dữ liệu từ kết quả nghiên cứu ở vùng ở vùng sinh thái Nam Trung Bộ của Bảo Huy và cs. [12]. Trường hợp các loài chưa có trong dữ liệu trên thì sẽ được tra trong dữ liệu của ICRAF tại <http://db.worldagroforestry.org/wd>.

2.2 Phương pháp xây dựng bản đồ hiện trạng rừng

Bản đồ hiện trạng rừng năm 2023 được xây dựng từ ảnh Sentinel 2 nhằm xác định các chỉ số NDVI của từng trạng thái rừng tự nhiên làm cơ sở dữ liệu đầu vào để xây dựng các phương trình tương quan giữa TC và NDVI. Đồng thời kiểm chứng tính đại diện của các OTC đã được lập để đo đếm các chỉ tiêu sinh trưởng. Các bước chính để xây dựng bản đồ hiện trạng rừng từ ảnh Sentinel-s bao gồm:

Xử lý ảnh vệ tinh

Ảnh viễn thám sau khi thu thập đã được xử lý qua các bước sau: Chuyển hệ tọa độ các kênh ảnh (Red, Green, Blue và Near Infrared) về hệ tọa độ VN2000-Đà Nẵng/Quảng Nam, kinh tuyến trục 107,75 múi chiếu 3 độ. Cắt các kênh ảnh theo ranh giới của thành phố Đà Nẵng và gộp

3 kênh ảnh Red, Green, Blue để xây dựng ảnh tổ hợp màu tự nhiên. Toàn bộ công việc trên được thực hiện trên phần mềm QGIS 3.36.3.

Phân loại hiện trạng rừng

– Sử dụng phương pháp phân loại có kiểm định và giám sát để xây dựng bản đồ hiện trạng rừng. Hệ thống phân loại được thể hiện gồm 7 lớp, bao gồm: Rừng tự nhiên (RTN); Rừng trồng (RT); Đất trống không có thực vật (DT1); Đất trống có thực vật/có cây gỗ tái sinh (DT2); Mặt nước (MN); Đất khác gồm dân cư và cơ sở hạ tầng (DK); Mây (MAY).

– Bộ mẫu khóa ảnh gồm 220 điểm mẫu được chọn đại diện cho từng trạng thái, lớp phủ và các khu vực bị mây che phủ để tiến hành phân loại ảnh vệ tinh và đánh giá độ chính xác của kết quả phân loại. Trong đó có 190 mẫu khóa ảnh được khảo sát thực địa vào tháng 06/2023, bao gồm: 40 mẫu khóa lớp phủ rừng tự nhiên, 150 mẫu ảnh chia đều cho 5 lớp phủ. Đối với những khu vực bị mây che phủ (khoảng 2%) đã chọn 30 điểm mẫu trực tiếp trên ảnh mà không tiến hành khảo sát thực địa (Bảng 1).

Bộ mẫu khóa ảnh được chia đôi ngẫu nhiên, trong đó mẫu khóa ảnh được sử dụng cho giải đoán ảnh là 110 mẫu; 110 mẫu khóa ảnh còn lại được sử dụng để kiểm tra và đánh giá độ chính xác của bản đồ phân loại.

Phương pháp đánh giá độ chính xác kết quả giải đoán ảnh

Sử dụng hệ số Kappa (κ), độ chính xác của nhà sản xuất (PA- producer accuracy), độ chính xác của người sử dụng (UA - user accuracy) và độ chính xác tổng thể (OA- overall accuracy)

Bảng 1. Thống kê số lượng mẫu ảnh

TT	Lớp phủ thực vật	Ký hiệu	Số lượng mẫu	Đặc điểm của lớp phủ
1	Rừng tự nhiên	RTN	40	Thảm thực vật dày đặc, mật độ cây nhiều, ít có sự phân biệt giữa các tầng tán.
2	Rừng trồng	RT	30	Thảm thực vật tương đối (trồng theo hàng), đồng nhất về phân xạ phổ, cấu trúc tán cây
3	Đất trống không có thực vật	DT1	30	Đất trống sau khai thác, hoặc đất chưa có rừng
4	Đất trống có thực vật/có cây gỗ tái sinh	DT2	30	Đa số là dây leo, bụi rậm, có một số cây gỗ tái sinh, mật độ không cao
5	Đất khác	DK	30	Đất công trình, nông nghiệp, ...
6	Mặt nước	MN	30	Biển, sông, ao, hồ
7	Mây	MAY	30	Khu vực bị mây che phủ

Nguồn: Kết quả xử lý ảnh kết hợp với kiểm chứng thực địa, 2023

để đánh giá độ chính xác của kết quả giải đoán ảnh [13]. Trong đó hệ số Kappa được tính theo công thức sau [14]:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (1)$$

$$PA = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \times 100 \quad (2)$$

$$UA = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \times 100 \quad (3)$$

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \times 100 \quad (4)$$

trong đó, N: Tổng số pixel lấy mẫu; r: Số lớp đối tượng phân loại; x_{ii} : Số pixel đúng trong lớp thứ nhất; x_{i+} : Tổng pixel lớp thứ i của mẫu; x_{+i} : Tổng pixel của lớp thứ i sau phân loại.

2.3 Phương pháp xây dựng phương trình hồi quy giữa NDVI và trữ lượng carbon

Đo đếm trữ lượng carbon rừng và chỉ số ảnh NDVI

Hệ sinh thái rừng có 5 bể chứa carbon, trong đó bể chứa trong thực vật phân trên mặt đất là quan trọng nhất, vì nó chiếm tỷ trọng lớn và biến động do các hoạt động khai thác sử dụng, bể chứa carbon này thường được ước tính thông quan sinh khối trên mặt đất (AGB). Sinh khối trên mặt đất bao gồm cả cây gỗ và thực vật khác như cây thân thảo, cây bụi; tuy nhiên, do các loài thực vật không phải thân gỗ chiếm tỷ trọng nhỏ và thường biến động, nên đa số các nghiên cứu tập trung vào ước tính sinh khối trên mặt đất của cây gỗ làm cơ sở cho việc ước tính trữ lượng carbon của bể chứa thực vật trên mặt đất của hệ sinh thái rừng [15].

Đối với sinh khối dưới mặt đất (BGB) của rừng tự nhiên thì việc tính toán rất phức tạp và tốn kém nhiều nguồn lực, nên nghiên cứu này đã áp dụng hệ số chuyển đổi từ AGB sang BGB do Mokany và cs. đề xuất [16] và được IPCC (2006) chấp nhận để tính toán lượng carbon hấp thụ hay phát thải trong kiểm kê khí nhà kính [17].

Phương pháp ước tính trữ lượng carbon rừng được trình bày chi tiết dưới đây

Ước tính tổng sinh khối trên mặt đất (AGB) của mỗi OTC

Tại vùng Nam Trung Bộ của Việt Nam đã sử dụng mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất (AGB) cây rừng theo đơn biến $D_{1.3}$: $AGB = 0,10419 \times D_{1.3}^{2,49145}$ (5) (có $R^2 = 0,980$), tuy nhiên để đạt độ tin cậy của giá trị AGB cần áp dụng mô hình có các thêm các biến H và WD, đó là phương trình $AGB_i = 0,59831 \times (D_{1.3}^2 \times H \times WD)^{0,95979}$ (6) (có $R^2 = 0,987$) [12].

Ước tính tổng sinh khối dưới mặt đất (BGB) của mỗi OTC

BGB của mỗi OTC sẽ được ước tính theo công thức sau: $BGB_i = AGB_i \times R$ (7)

trong đó: BGB_i là BGB của OTC i; R là hệ số quy đổi. Nghiên cứu này áp dụng các hệ số R mặc định của Mokany và cs., đó là $R = 0,205$ cho những OTC có $AGB < 125$ tấn/ha và $R = 0,235$ cho những OTC có $AGB > 125$ tấn/ha [16].

Ước tính tổng sinh khối (B) cho mỗi OTC

Tổng sinh khối của OTC_i sẽ bằng tổng AGB và BGB: $B_i = AGB_i + BGB_i$ (8)

Ước tính tổng trữ lượng carbon (TC_i) của OTC

Tổng trữ lượng carbon của OTC được tính như sau:

$$TC_i = \frac{(B_i \times 10^4)}{(10^3 \times 1000)} \times CF = \frac{B_i \times CF}{100} \quad (9)$$

trong đó: TC_i là tổng trữ lượng carbon của OTC_i, tính bằng tấn/ha; B_i là tổng sinh khối của OTC_i, tính bằng kg; CF là hệ số hàm lượng carbon. Giá trị mặc định của hệ số này là 0,47 [17].

Tính toán chỉ số NDVI

Các giá trị của NDVI của ảnh Sentinel-2 được tính toán từ các kênh đỏ (Red) và kênh cận hồng ngoại (Near-Infrared, NIR) [18] thông qua phần mềm QGIS bằng cách thiết lập dải màu thích hợp RdYIGn để màu xanh lá biểu thị vùng có mật độ thảm thực vật cao và màu đỏ biểu thị vùng không có thảm thực vật. Cụ thể NDVI được tính theo công thức sau [18]:

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (10)$$

trong đó: - NIR (Near-Infrared): Kênh 8 (bước sóng khoảng 842 nm) của Sentinel-2; Red: Kênh 4 (bước sóng khoảng 665 nm) của Sentinel-2.

Phương pháp xây dựng phương trình tương quan giữa NDVI và trữ lượng carbon

Chọn mẫu

Chọn ngẫu nhiên 96 OTC đại diện đầy đủ cả 4 trạng thái rừng để tính toán các chỉ số thống kê và xây dựng phương trình tương quan giữa chỉ số NDVI với tổng trữ lượng carbon rừng tự nhiên; 19 OTC còn lại (cũng đại diện đầy đủ cả 4 trạng thái rừng) được sử dụng để đánh giá độ chính xác của phương trình tương quan được chọn (kiểm chứng).

Chọn dạng phương trình

Chỉ số NDVI phản ánh mật độ và tình trạng sinh khối thực vật, qua đó cung cấp thông tin về lượng carbon lưu trữ trong thảm thực vật. Mối quan hệ giữa NDVI và trữ lượng carbon có thể biểu hiện dưới dạng tuyến tính hoặc phi tuyến, phụ thuộc vào cấu trúc thảm thực vật, loại hình rừng, độ tuổi của hệ sinh thái, cùng các yếu tố môi trường khác. Các phương trình toán học đại diện cho những mô hình mô tả mối quan hệ này bao gồm cả mô hình tuyến tính, thường được sử dụng khi NDVI thể hiện sự biến đổi nhỏ về sinh khối, và các mô hình phi tuyến như hàm logarit, bậc hai, hoặc hàm mũ, áp dụng cho những trường hợp phức tạp hơn, khi sinh khối có xu hướng tăng trưởng theo cấp số mũ hoặc giảm dần khi NDVI đạt đến một ngưỡng nhất định. Dựa trên một số nghiên cứu của các nhà khoa học trước đây, đề tài đã sử dụng phần mềm excel để

phân tích mối quan hệ giữa trữ lượng carbon (TC) và NDVI thông qua các mô hình hồi quy theo các dạng phương trình tuyến tính và phi tuyến như sau [19-23]:

$$- Y = a \times X + b \quad (11)$$

$$- Y = a \times \ln X + b \quad (12)$$

$$- Y = a \times X^2 + b \times X + c \quad (13)$$

$$- Y = a \times X^b \quad (14)$$

$$- Y = a \times e^{b \times X} \quad (15)$$

trong đó: biến Y được tính toán là Tổng trữ lượng carbon rừng (TC) và biến X là chỉ số ảnh NDVI.

Xử lý thống kê

- Hệ số xác định (R^2): đo lường tỷ lệ phần trăm biến thiên của biến phụ thuộc được giải thích bởi biến độc lập trong mô hình hồi quy được tính theo công thức sau: [24–27].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (16)$$

- Chỉ số Sai số tuyệt đối trung bình - MAE (Mean Absolute Error): đo lường trung bình của sai số tuyệt đối giữa giá trị dự đoán và giá trị thực tế [28]

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (17)$$

- Chỉ số Sai số bình phương trung bình căn bậc hai - RMSE (Root Mean Squared Error): đo lường độ lệch chuẩn của sai số dự đoán [28].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (18)$$

trong đó: y_i là giá trị thực tế của biến phụ thuộc tại quan sát thứ i ; \hat{y}_i là giá trị dự đoán của biến phụ thuộc tại quan sát thứ i ; \bar{y} là giá trị trung bình của biến phụ thuộc; n là số lượng quan sát.

3 Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1 Xây dựng bản đồ hiện trạng rừng

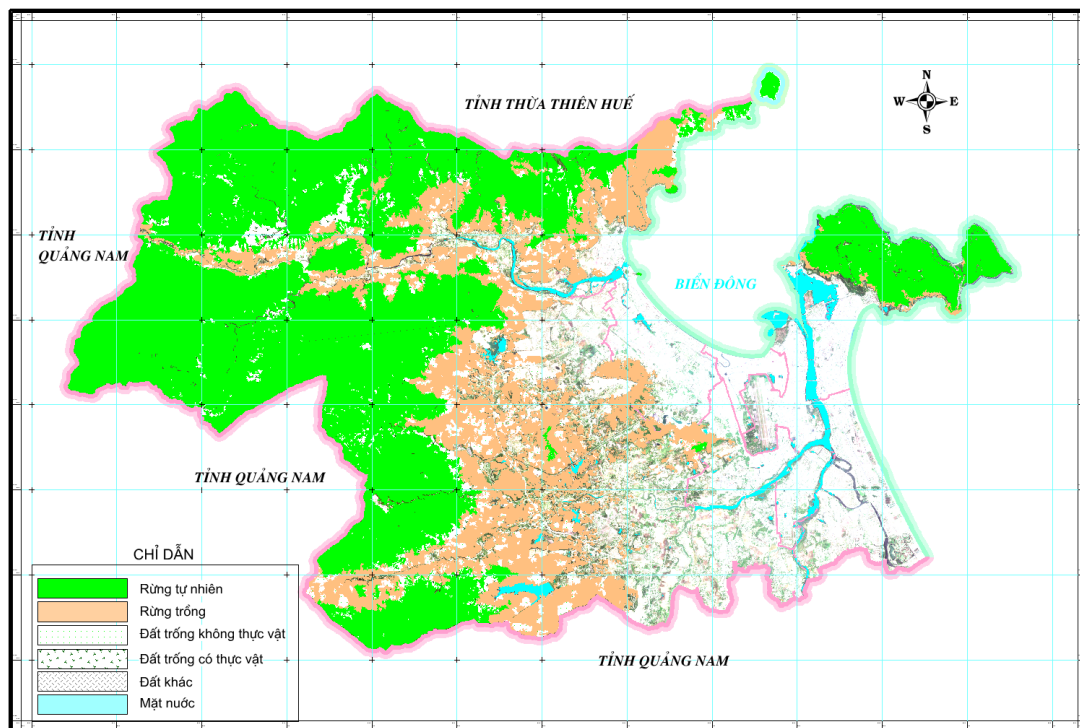
Kết quả xây dựng bản đồ hiện trạng rừng bằng ảnh Sentinel của thành phố Đà Nẵng ở thời điểm tháng 5 năm 2023 được trình bày ở Bảng 2 và Hình 4.

Kết quả ở Bảng 2 cho thấy diện tích rừng tự nhiên từ giải đoán ảnh Sentinel-2 (42.643,3 ha) thấp hơn diện tích rừng tự nhiên được công bố năm 2022 (43.125,5 ha) là 482,2 ha. Tuy nhiên, kết quả này vẫn không ảnh hưởng đến kết quả xây dựng các phương trình tương quan giữa TC và chỉ số NDVI vì các OTC được lập trên thực địa có vị trí (lô, khoảnh, tiểu khu) đều thể hiện (trùng khớp) trên cả bản đồ năm 2022 và năm 2023.

Bảng 2. Chênh lệch diện tích rừng và đất rừng của thành phố Đà Nẵng năm 2002 và 2023

STT	Loại rừng và đất rừng	Diện tích (ha)*		
		5/2023	2022	Chênh lệch (+/-)
1	Đất có rừng	60.353,12	63.044,15	-2.691,03
	Rừng tự nhiên (RTN)	42.643,30	43.125,50	-482,20
	Rừng trồng (RT)	17.709,82	19.918,65	-2.208,83
2	Đất chưa có rừng quy hoạch phát triển rừng	7.384,09	5.592,73	1.791,36
	Đất trống không có thực vật (DT1)	4.670,36	3.309,70	1.360,66
	Đất trống có thực vật (DT2)	2.713,73	2.283,03	430,70

Ghi chú: *: Diện tích năm 2023 được truy xuất từ bản đồ được xây dựng từ ảnh Sentinel 2; diện tích năm 2022 được truy xuất từ bản đồ hiện trạng rừng năm 2022 (thu thập từ Chi cục Kiểm Lâm)



Hình 4. Bản đồ hiện trạng rừng thành phố Đà Nẵng năm 2023

Nghiên cứu đã sử dụng 110 mẫu độc lập với bộ mẫu chạy phân loại ảnh để xây dựng bản đồ để đánh giá độ chính xác của kết quả phân loại. Kết quả đánh giá độ chính xác của bản đồ phân loại được trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả đánh giá độ chính xác Kappa của bản đồ

Người dùng	Lớp tham chiếu								Số mẫu ảnh	Tổng pixel	Độ chính xác của người sử dụng
	MN	May	DT2	RTN	RT	DK	DT1				
MN	4.456	-	-	-	-	-	-	-	15	4.456	1,00
May	-	184	-	-	-	26	-	-	15	210	0,88
DT2	-	-	1.143	-	-	-	17	-	15	1.160	0,99
RTN	-	-	-	1.565	244	-	-	-	20	1.809	0,87
RT	-	-	-	33	1.807	-	-	-	15	1.840	0,98
DK	-	55	-	-	-	160	19	-	15	234	0,68
DT1	-	-	-	-	-	64	962	-	15	1.026	0,94
Số mẫu ảnh	15	15	15	20	15	15	15	15	110		
Tổng pixel	4.456	239	1.143	1.598	2.051	267	981			10.735	
Độ chính xác của nhà sản xuất	1,00	0,77	1,00	0,98	0,88	0,60	0,98				
Độ chính xác tổng thể (Overall Accuracy)	0,96										
Hệ số KIA (Kappa Index of Agreement)	0,94										

Nguồn: Kết quả xử lý số liệu, 2023

Kết quả xây dựng lớp bản đồ rừng tự nhiên (RTN) đạt độ chính xác của nhà sản xuất là 0,98 và độ chính xác của người sử dụng là 0,87. Mặc dù độ chính xác người sử dụng thấp hơn so với nhà sản xuất nhưng vẫn ở mức độ phân loại tốt và đáng tin cậy. Điều này cho phép sử dụng lớp rừng tự nhiên này để phân tích mối tương quan giữa chỉ số NDVI và trữ lượng carbon.

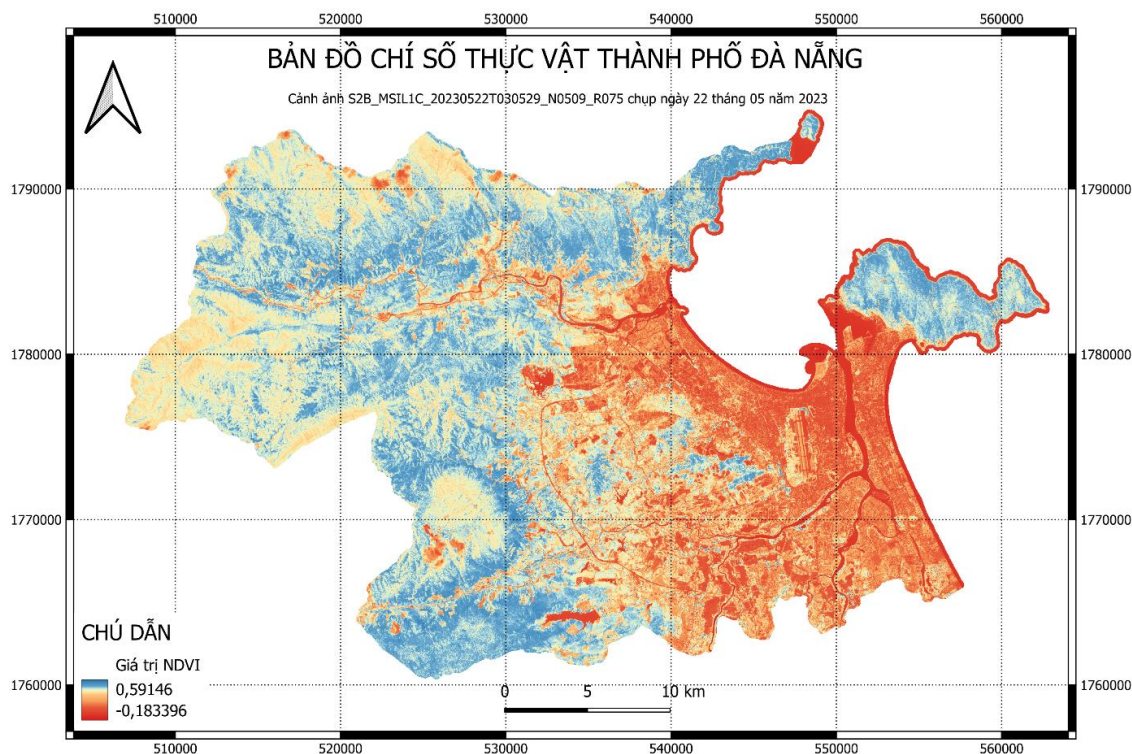
Độ chính xác tổng thể của bản đồ phân loại (Overall Accuracy) đạt 96% (0,96) và hệ số Kappa là 0,94, như vậy có thể kết luận bản đồ phân loại rừng của thành phố Đà Nẵng có độ chính xác đạt yêu cầu.

3.2 Kết quả tính toán chỉ số NDVI của ảnh Sentinel 2

Chỉ số NDVI của thành phố Đà Nẵng có giá trị từ -0,183396 đến 0,59146. Các khu vực rừng giàu, phân bố chủ yếu ở các đỉnh núi, có chỉ số thực vật NDVI thấp hơn so với khu vực rừng trung bình, phân bố chủ yếu ở các vùng thấp (Hình 5).

3.3 Trữ lượng carbon của các trạng thái rừng

Từ kết quả đo đếm các chỉ tiêu sinh trưởng trên 96 OTC, trữ lượng carbon trung bình của các trạng thái rừng từ 19,87 (rừng nghèo) đến 148,94 (rừng giàu). Trữ lượng carbon của rừng giàu có hệ số biến động cao nhất (21,00%), trong khi đó rừng trung bình có hệ số biến động thấp nhất (12,92%). Kết quả tính toán trữ lượng carbon trung bình của các trạng thái rừng được thể hiện ở Bảng 4.



Hình 5. Bản đồ chỉ số NDVI của thành phố Đà Nẵng năm 2023

Bảng 4. Trữ lượng carbon trung bình của các trạng thái rừng

Đơn vị: tấn/ha

STT	Trạng thái rừng	Số OTC	Nhỏ nhất (Min)	Lớn nhất (Max)	Trung bình (Mean)	Độ lệch chuẩn (Stdev)	Hệ số biến động (CV%)
1	TXG	26	90,66	203,48	148,94	31,27	21,00
2	TXB	32	47,21	88,61	76,60	9,90	12,92
3	TXN	27	23,76	48,29	33,63	6,91	20,55
4	TXK	11	15,36	23,72	19,87	2,93	14,75

3.4 Kết quả xây dựng mô hình ước tính carbon rừng tự nhiên từ chỉ số NDVI

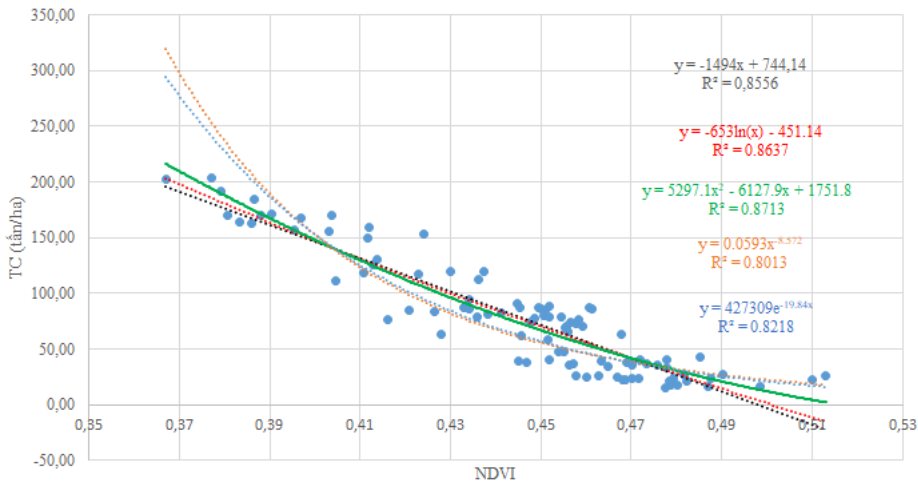
Xây dựng phương trình hồi quy giữa trữ lượng carbon và chỉ số NDVI

Kết quả phân tích hồi quy giữa tổng trữ lượng carbon (TC) rừng tự nhiên của 96 OTC và chỉ số NDVI đã xây dựng được 5 phương trình hồi quy (Hình 6).

Trên cơ sở các phương trình hồi quy được xác định, đề tài tiến hành tính toán các chỉ số thống kê để xác định phương trình phù hợp, kết quả được trình bày ở Bảng 5 và Bảng 6.

Từ kết quả ở Bảng 5 cho thấy: các phương trình đều có $F < 0,05$ và các tham số của các phương trình đều có $P < 0,05$ nên các phương trình đều tồn tại với độ tin cậy 95%.

Từ kết quả ở Bảng 6 cho thấy giữa TC và NDVI có mối tương quan chặt. Các phương trình tương quan giữa TC và NDVI có R^2 dao động từ 0,8013 đến 0,8713 và hệ số MAE dao động từ 15,0904 đến 20,1831. Trong số 5 phương trình đã xây dựng được thì phương trình $TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$ được chọn để đưa vào kiểm chứng thông qua 19 OTC (độc lập với 96 OTC dùng để xây dựng mô hình) đại diện cho cả 4 trạng thái rừng. Kết quả kiểm chứng được thể hiện qua Bảng 7.



Hình 6. Kết quả phân tích hồi quy giữa NDVI và Tổng carbon rừng tự nhiên

Bảng 5. Kết quả phân tích các mô hình hồi quy

STT	Dạng phương trình	F	P		
			a	b	c
1	$TC = -1494 \times NDVI + 744,14$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	
2	$TC = -653 \times \ln(NDVI) - 451,14$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	
3	$TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$	$< 0,0001$	0,0011	$< 0,0001$	$< 0,0001$
4	$TC = 0,0593 \times NDVI^{-8,572}$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	
5	$TC = 427309 \times e^{-19,84 \times NDVI}$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	

Bảng 6. Kết quả phân tích các chỉ số thống kê

STT	Dạng phương trình	Các chỉ tiêu thống kê	
		R ²	MAE
1	$TC = -1494 \times NDVI + 744,14$	0,8556	15,6738
2	$TC = -653 \times \ln(NDVI) - 451,14$	0,8637	15,3279
3	$TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$	0,8713	15,0904
4	$TC = 0,0593 \times NDVI^{-8,572}$	0,8013	20,1831
5	$TC = 423709 \times e^{-19,84 \times NDVI}$	0,8218	18,9837

Ghi chú: In đậm là phương trình được chọn

Bảng 7. Độ chính xác của mô hình $TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$

TT	OTC	NDVI	Trữ lượng carbon từ dữ liệu hiện trường (TC _{tt})	Trữ lượng carbon trích xuất từ mô hình (TC _{mh})	DVT: tấn/ha
					TC _{tt} -TC _{mh}
1	hva_189	0,3818	184,1366	184,2968	0,1603
2	hva_254	0,3876	171,6933	172,5259	0,8326
3	hva_14	0,4034	146,7048	141,8715	- 4,8333
4	hva_154	0,4124	131,3318	125,5587	- 5,7732
5	hva_155	0,4170	120,4981	117,6365	- 2,8616
6	hva_104	0,4288	89,7147	98,1143	8,3996
7	hva_143	0,4306	81,9785	95,3623	13,3838
8	hva_153	0,4401	102,1115	80,9089	- 21,2026
9	hva_60	0,4527	73,6010	63,3604	- 10,2406
10	hva_73	0,4540	60,0164	61,6113	1,5949
11	str_57	0,4598	48,7110	54,1913	5,4803
12	str_1	0,4612	42,9229	52,4207	9,4978
13	hva_102	0,4626	55,2317	50,7205	- 4,5111
14	hva_133	0,4627	32,5851	50,5451	17,9601
15	str_5	0,4720	42,3599	39,6217	- 2,7383
16	hva_57	0,4729	25,8988	38,5475	12,6487
17	hva_208	0,4788	21,3854	32,1750	10,7897
18	lch_7	0,4833	36,2062	27,5175	- 8,6886
19	str_17	0,4859	29,4629	24,9801	- 4,4828
RMSE					9,50

Từ kết quả ở Bảng 7 cho thấy phương trình $TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$ có hệ số RMSE là 9,50 tấn/ha, tương đương với RMSE của sinh khối rừng tự nhiên là 20,212 tấn/ha. Kết quả này tương đồng với phương trình tương quan giữa sinh khối rừng tự nhiên và chỉ số EVI từ ảnh Sentinel-2 ở cao nguyên Kon Hà Nừng (RMSE = 20,982 tấn/ha) [10].

4 Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng phương trình ước tính carbon của rừng tự nhiên của thành phố Đà Nẵng dựa vào chỉ số NDVI của ảnh Sentinel-2 và dữ liệu điều tra từ các OTC đại diện cho các trạng thái rừng. Phương trình $TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$ với hệ số $R^2 = 0,8713$ được chọn để ước tính trữ lượng carbon rừng tự nhiên, phương trình này là cơ sở để có thể áp dụng cho việc tính toán trữ lượng carbon trực tiếp từ ảnh viễn thám, không thông qua điều tra rừng nên tiết kiệm được chi phí (ảnh Sentinel-2 miễn phí, có độ phân giải trung bình) và độ chính xác tương đối cao (RMSE = 9,50 tấn C/ha).

Tài liệu tham khảo

1. Huete, A. R. (1988), A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. doi:10.1016/0034-4257(88)90106-X.
2. Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002), Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87. doi:10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
3. Wu, C., Niu, Z., Tang, Q., & Huang, W. (2010), Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), 464–472. doi:10.1016/j.agrformet.2010.01.003.
4. Tucker, C. J. (1979), Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
5. Baccini, A., Friedl, M. A., Woodcock, C. E., & Warbington, R. (2004), Forest biomass estimation over regional scales using multisource data, *Geophysical Research Letters*, 31(10).
6. Pettorelli, Nathalie et al. (2005), Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>.
7. Askar, N., Nuthammachot, N., Phairuang, W., Wicaksono, P., & Sayektiningsih, T. (2018), Estimating Aboveground Biomass on Private Forest Using Sentinel-2 Imagery, *Journal of Sensors*, Article ID 6745629, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/6745629>.
8. Jędrych, M., Zagajewski, B., & Marcinkowska-Ochtyra, A. (2017), Application of Sentinel-2 and EnMAP new satellite data to the mapping of environmental changes, *Polish Cartographical Review*, 49(3), 107–119. <https://doi.org/10.1515/pcr-2017-0011>.

9. Poudel, A., Shrestha, M. L., Sharma, G., Aryal, S., Kalakheti, R., & Lamsal, D. (2023), Modelling and Mapping Above Ground Biomass Using Sentinel 2 and Planet Scope Remotely Sensed Data in West Usambara Tropical Rainforests, Tanzania, *International Journal of Forestry Research*, Article ID 5553957. <https://doi.org/10.1155/2023/5553957>.
10. Dang, H. N., Ba, D. D., Trung, D.N., & Viet, H. N. H. (2022), A Novel Method for Estimating Biomass and Carbon Sequestration in Tropical Rainforest Areas Based on Remote Sensing Imagery: A Case Study in the Kon Ha Nung Plateau, Vietnam, *Sustainability*, 14, 16857. <https://doi.org/10.3390/su142416857>.
11. Chính phủ Việt Nam (2023), Quyết định số 1287/QĐ-TTg ngày 02 tháng 11 năm 2023 của Thủ tướng Chính phủ Phê duyệt quy hoạch thành phố Đà Nẵng thời kỳ 2021 – 2030, tầm nhìn đến năm 2050.
12. Huy, B., Poudel, K. P., & Temesgen, H. (2016), Aboveground biomass equations for evergreen broadleaf forests in South Central Coastal ecoregion of Viet Nam: Selection of eco-regional or pantropical models, *Forest Ecology and Management*, 376, 276–283.
13. Congalton RG (1991), A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46.
14. Cohen, J. (1960), A coefficient of agreement for nominal scales, *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.
15. Bảo Huy (2013), Mô hình sinh trắc và công nghệ viễn thám-GIS để xác định lượng CO₂ hấp thụ của rừng lá rộng thường xanh vùng Tây Nguyên, Nxb. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
16. Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006), Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes, *Global Change Biology*, 12(1), 84–96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00143.x>.
17. IPCC (2006), *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan.
18. Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. (1997), Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves, *International Journal of Remote Sensing*, 18(12), 2691–2697.
19. Zhu, Z., & Liu, D. (2015), Improved forest biomass estimation by incorporating both optical and SAR data in a machine learning algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 156, 490–499.
20. Wang, Y., et al. (2011), Biomass and carbon estimation in a subtropical forest using lidar and optical remote sensing data, *International Journal of Remote Sensing*, 32(22), 6781–6800.
21. Lu, D., & Batistella, M. (2005), Exploring TM image texture and its relationships with biomass estimation in Rondônia, Brazilian Amazon, *Acta Amazonica*, 35(2), 121–132.

22. Zheng, D., et al. (2004), Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA, *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 402–411.
23. Parresol, B. R. (1999), Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons, *Forest Science*, 45(4), 573–593.
24. Kvalseth, N. (1985), On the Use and Misuse of the Coefficient of Determination in Linear Regression, *The American Statistician*, 39(4), 279–285.
25. Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Wasserman, W. (1996), *Applied Linear Statistical Models*. 4th Edition, McGraw-Hill/Irwin.
26. Draper, N. R., Smith, H. (1998), *Applied Regression Analysis*, 3rd Edition, Wiley-Interscience.
27. Hyndman, R. J., Koehler, A. B. (2006), Another Look at Measures of Forecast Accuracy, *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688.
28. Willmott, C. J., Matsuura, K. (2005), Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model Performance, *Climate Research*, 30(1), 79–82.