

ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM

NGUYỄN HỮU TÂM

**XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG TÍCH LŨY CÁC-BON CỦA
CÁC TRẠNG THÁI RỪNG Ở THÀNH PHỐ ĐÀ
NẴNG LÀM CƠ SỞ THAM GIA THỎA THUẬN
CHI TRẢ GIẢM PHÁT THẢI VÙNG NAM TRUNG
BỘ VÀ TÂY NGUYÊN**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ LÂM SINH

HUẾ, NĂM 2025

**ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM**

NGUYỄN HỮU TÂM

**XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG TÍCH LŨY CÁC-BON CỦA
CÁC TRẠNG THÁI RỪNG Ở THÀNH PHỐ ĐÀ
NẴNG LÀM CƠ SỞ THAM GIA THỎA THUẬN
CHI TRẢ GIẢM PHÁT THẢI VÙNG NAM TRUNG
BỘ VÀ TÂY NGUYÊN**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ LÂM SINH

Ngành: Lâm sinh

Mã số: 9620205

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. PGS. TS. HOÀNG HUY TUẤN**
- 2. PGS. TS. NGUYỄN VĂN LỢI**

HUẾ, NĂM 2025

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của vấn đề nghiên cứu

Từ COP13 (2007), hơn 150 dự án REDD+ được triển khai nhằm giảm phát thải và quản lý rừng bền vững. Việt Nam là một trong 13 quốc gia đầu tiên tham gia UN-REDD, với các thỏa thuận tiêu biểu như ERPA (2020) vùng Bắc Trung Bộ và Ý định thư LEAF (2021) vùng Nam Trung Bộ – Tây Nguyên. Trước yêu cầu minh bạch của Thỏa thuận Paris, UN-REDD đã hỗ trợ Việt Nam xây dựng phương trình sinh trắc học ước tính các-bon, song phương pháp này hạn chế về chi phí và quy mô. Vì vậy, việc ứng dụng ảnh Sentinel-2 trong ước tính trữ lượng các-bon rừng tự nhiên ở Đà Nẵng là hướng đi cần thiết, góp phần thực hiện các cam kết giảm phát thải.

2. Mục tiêu của đề tài

2.1. Mục tiêu chung

Xây dựng cơ sở khoa học cho việc ước tính trữ lượng các-bon rừng tự nhiên từ ảnh Sentinel-2, phục vụ trao đổi tín chỉ các-bon và thực thi ERPA tại Nam Trung Bộ và Tây Nguyên.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Ước tính phát thải và hấp thụ các-bon giai đoạn 2016–2023.

- Xây dựng mô hình hồi quy ước tính trữ lượng các-bon từ chỉ số ảnh Sentinel-2.

- Đề xuất mô hình và giải pháp giảm phát thải, hưởng lợi tài chính từ ERPA.

3. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

3.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án bổ sung cơ sở khoa học cho phương pháp xây dựng mô hình sinh trắc học ước tính trữ lượng các-bon rừng tự nhiên từ ảnh Sentinel-2, tích hợp dữ liệu OTC với viễn thám và GIS. Mô hình được phát triển bằng PCA kết hợp thăm định chéo có trọng số trên R-Studio, đảm bảo tính khách quan và phù hợp với dữ liệu lớn, đa nguồn.

3.2. Ý nghĩa thực tiễn

Mô hình cho phép ước tính trữ lượng các-bon rừng tự nhiên từ ảnh Sentinel-2 mà không cần đo đếm trực tiếp, giúp giảm thời gian và chi phí, đồng thời đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy phục vụ giao dịch tín chỉ các-bon và thực hiện ERPA vùng Nam Trung Bộ – Tây Nguyên.

4. Những điểm mới của luận án

Nghiên cứu có ba điểm mới chính:

(1) Lựa chọn và so sánh đồng thời nhiều chỉ số viễn thám (NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI và các dải BLUE, GREEN, RED, NIR) để phân tích mối quan hệ với TAGC

bằng PCA, xác định NDVI, SAVI và NIR có tương quan mạnh nhất và hình thành các tổ hợp chỉ số hiệu quả hơn;

(2) Phát triển mô hình hồi quy phi tuyến đa biến có trọng số giữa TAGC và các chỉ số ảnh, thay thế cách tiếp cận tuyến tính truyền thống;

(3) Áp dụng thẩm định chéo Monte Carlo 100 lần lặp trên R-Studio, lựa chọn mô hình tối ưu theo AIC, R^2 , ASE, RMSE, MPSE - đạt R^2 đến 0,89 và $MPSE < 30\%$, nâng cao độ tin cậy và khả năng ứng dụng so với các nghiên cứu trước.

5. Giới hạn của đề tài

Luận án mới dừng ở việc phân biệt rừng tự nhiên và rừng trồng, chưa xây dựng được bản đồ hiện trạng rừng 2016 và 2023 theo từng trạng thái (TXG, TXB, TXN, TXK). Do đó, việc đánh giá biến động trữ lượng các-bon giai đoạn 2016–2023 dựa trên số liệu ngành Nông nghiệp Đà Nẵng, song dữ liệu này còn sai sót nên kết quả chưa thật khách quan. Nghiên cứu chỉ xác định sinh khối phần trên mặt đất cho cây có $D1.3 \geq 6$ cm và ước tính sinh khối dưới mặt đất bằng hệ số chuyển đổi. Luận án tập trung xây dựng mô hình ước tính TAGC và TC cho rừng tự nhiên từ ảnh Sentinel-2, chưa phân tích sâu rừng trồng do phân bố manh mún và chưa tham gia cơ chế chi trả tín chỉ các-bon.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Chương tổng quan nghiên cứu được trình bày với 02 nội dung chính về cơ sở lý luận và cơ sở thực tiễn.

1. Cơ sở lý luận tập trung vào ba nội dung:

- Chu trình các-bon và vai trò của rừng trong việc hấp thụ các-bon

- Chi trả giảm phát thải và các cấp độ tính toán lượng phát thải/hấp thụ khí nhà kính:

- Cơ sở khoa học của các phương pháp đánh giá khả năng tích lũy các-bon rừng.

2. Cơ sở thực tiễn tập trung vào ba nội dung:

- Tổng quan về Chương trình UN-REDD và Chương trình Chi trả giảm phát thải vùng Bắc Trung Bộ

- Xây dựng các mô hình ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon.

- GIS và viễn thám trong quản lý tài nguyên rừng và trữ lượng các-bon.

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

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

2.1.1. Đối tượng nghiên cứu

- Trữ lượng các-bon trên mặt đất (TAGC) của rừng tự nhiên và rừng trồng (keo lai) nhằm ước lượng phát thải và hấp thụ các-bon do biến động sử dụng đất và rừng giai đoạn 2016–2023 tại thành phố Đà Nẵng.

- Môi quan hệ giữa TAGC rừng tự nhiên với các dải phổ (BLUE, GREEN, RED, NIR) và các chỉ số thực vật (NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI) từ ảnh Sentinel-2.

2.1.2. Phạm vi nghiên cứu

Về không gian: Thành phố Đà Nẵng (cũ).

Về thời gian: Giai đoạn 2016–2023; cập nhật bổ sung dữ liệu năm 2024–2025.

2.2. Nội dung nghiên cứu

(1) Phân tích biến động sử dụng đất và rừng giai đoạn 2016–2023; (2) Đánh giá phát thải và hấp thụ các-bon do biến động rừng; (3) Xây dựng mô hình ước tính TAGC dựa trên ảnh Sentinel-2; (4) Ước tính và phân cấp trữ lượng các-bon rừng tự nhiên; (5) Đề xuất giải pháp giảm phát thải, tăng cường trữ lượng các-bon rừng.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

a) Kế thừa tài liệu thứ cấp: Thu thập số liệu quy hoạch sử dụng đất, kiểm kê và diễn biến rừng từ Sở NN&PTNT, UBND thành phố và Chi cục Kiểm lâm.

b) Ước tính trữ lượng các-bon rừng: Thiết lập 143 ô tiêu chuẩn; đo D1.3, Hvn; tính sinh khối và trữ lượng các-bon theo phương trình Bảo Huy; xác định sai số và hệ số biến động cho từng trạng thái rừng.

c) Phân tích biến động rừng và phát thải/hấp thụ các-bon (2016–2023): Chồng ghép bản đồ hiện trạng rừng; xác định hệ số phát thải/hấp thụ và tính tổng lượng phát thải, hấp thụ theo diện tích biến động.

d) Xây dựng mô hình ước tính trữ lượng các-bon bằng ảnh Sentinel-2: Xử lý ảnh, phân loại lớp phủ và đánh giá độ chính xác; tính các chỉ số thực vật; xây dựng mô hình hồi quy đơn biến và đa biến (tuyến tính, phi tuyến), lựa chọn biến bằng PCA và kiểm định bằng thẩm định chéo Monte Carlo.

e) Phân cấp trữ lượng các-bon: Phân cấp TAGC bằng ANOVA, hiệu chỉnh thực địa và đánh giá sai số để xây dựng bản đồ trữ lượng các-bon rừng tự nhiên.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Biến động sử dụng đất và rừng giai đoạn 2016-2023

- Giai đoạn 2016–2023, tổng diện tích rừng Đà Nẵng tăng từ 56.363,97 ha lên 57.868,48 ha; trong đó rừng tự nhiên giảm 658,08 ha, còn rừng trồng tăng 2.162,59 ha.

- Biến động chủ yếu mang tính kỹ thuật do chuẩn hóa dữ liệu, chỉ một phần nhỏ mất rừng thực tế (~12 ha) do mưa bão và khai thác trái phép.

Tuy nhiên, về khoa học thì dữ liệu chuẩn hóa năm 2016 và 2023 vẫn được dùng làm cơ sở tính toán phát thải và hấp thụ các-bon.

3.2. Sự phát thải và hấp thụ các-bon giai đoạn 2016-2023

- Nghiên cứu ghi nhận 108 loài cây (107 loài tự nhiên, 1 loài Keo lai) tại 143 ô tiêu chuẩn; giá trị WD được tổng hợp từ các nguồn uy tín.

- Trữ lượng các-bon trung bình giảm dần theo trạng thái rừng: TXG 146,02 tC/ha; TXB 74,89; TXN 33,86; TXK 20,00; TG 18,29 tC/ha.

- Hệ số phát thải/hấp thụ (EF/RF) cho thấy rừng phục hồi hấp thụ mạnh (TXN→TXB: +41,0 tC/ha), trong khi mất hoặc suy thoái rừng phát thải lớn (TXG→DTK: –146,0 tC/ha).

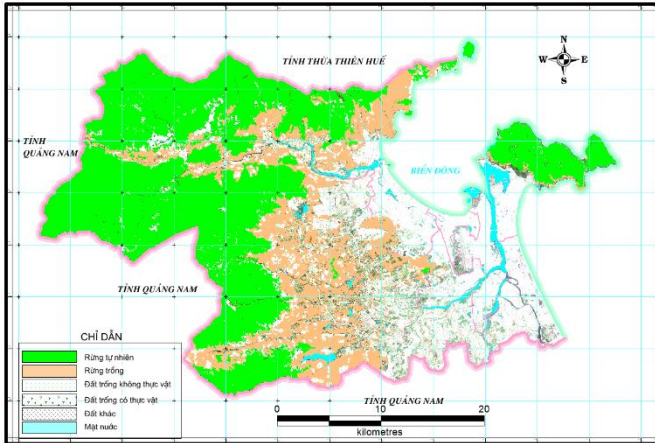
- Tổng biến động 2016–2023: suy thoái 2.326,14 ha; mất/chuyển đổi 4.235,25 ha; tăng chất lượng 788,06 ha; trồng mới 4.980,82 ha.

- Tổng phát thải: 117.851,47 tC; Tổng hấp thụ: 109.584,67 tC; Phát thải ròng: –8.266,80 tC.

3.3. Mô hình ước tính trữ lượng các-bon trên mặt đất dựa vào ảnh Sentinel-2

3.3.1. Xây dựng bản đồ hiện trạng rừng từ ảnh Sentinel-2

Bản đồ hiện trạng rừng năm 2023 của thành phố Đà Nẵng được xây dựng từ ảnh Sentinel-2, xác định tổng diện tích tự nhiên 98.750,1 ha, trong đó đất có rừng 60.353,12 ha (61,12%), gồm rừng tự nhiên 42.643,3 ha (43,18%) và rừng trồng 17.709,82 ha (17,93%). Kết quả kiểm định bằng 110 mẫu độc lập cho thấy độ chính xác tổng thể 96%, hệ số Kappa 0,94, chứng tỏ bản đồ hiện trạng rừng năm 2023 (Hình 4.3) có độ tin cậy cao, đủ cơ sở sử dụng trong các phân tích tiếp theo về NDVI và trữ lượng các-bon

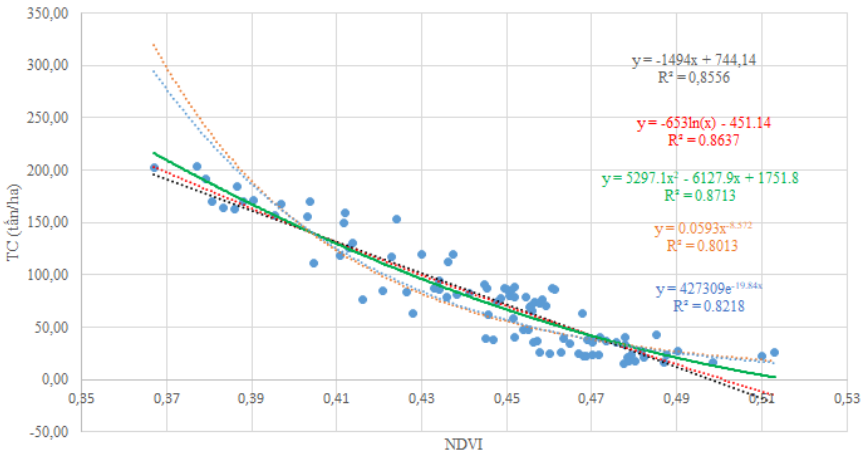


Hình 4.3. Bản đồ hiện trạng rừng thành phố Đà Nẵng năm 2023 – kết quả tính toán từ ảnh vệ tinh Sentinel-2

3.3.2. Mô hình ước tính trữ lượng các-bon dựa vào NDVI

Nghiên cứu sử dụng 96 ô tiêu chuẩn để xây dựng mô hình hồi quy giữa trữ lượng các-bon (TC) và NDVI, trong đó trữ lượng trung bình lần lượt là TXG: 148,94 tC/ha, TXB: 76,60 tC/ha, TXN: 33,63 tC/ha và TXK: 19,87 tC/ha.

Qua tính toán, đã xây dựng được 05 phương trình hồi quy (Hình 4.5).



Hình 4.5. Kết quả phân tích hồi quy giữa NDVI và tổng các-bon rừng tự nhiên

Phân tích hồi quy giữa trữ lượng các-bon (TC) và chỉ số NDVI tại 96 ô tiêu chuẩn cho thấy 5 mô hình đều có ý nghĩa thống kê ($F, P < 0,05$). Mô hình bậc hai $TC = 5297,1 \times NDVI^2 - 6127,9 \times NDVI + 1751,8$ có độ phù hợp cao nhất ($R^2 = 0,8713$; $MAE = 15,09$) và được chọn để kiểm chứng trên 19 ô độc lập. Kết quả kiểm chứng cho sai số $RMSE = 9,5$ tC/ha và độ lệch chuẩn 16,59%.

3.3.3. Mô hình ước tính trữ lượng các-bon trên mặt đất dựa vào các dải quang phổ (kênh ảnh) và các chỉ số thực vật

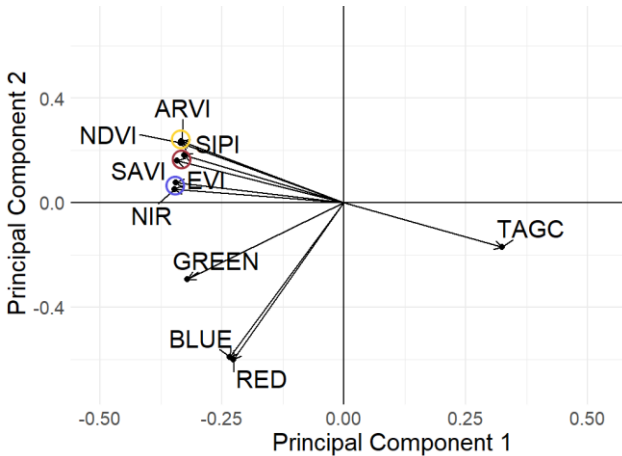
3.3.3.1. Xác định các chỉ số ảnh và dải đa phổ có ảnh hưởng đến tổng lượng các-bon trên mặt đất

Nghiên cứu sử dụng phân tích thành phần chính (PCA) trên 10 biến từ 115 ô tiêu chuẩn để đánh giá ảnh

hưởng của các chỉ số thực vật (NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI) và dải phổ (BLUE, GREEN, RED, NIR) đến tổng trữ lượng các-bon (TAGC). Kết quả cho thấy hai thành phần chính đầu PC1 và PC2 chiếm 96,35% biến thiên, trong đó PC1 (82%) được dùng để xác định trọng số các biến. (*Bảng 4.16*), hai thành phần chính đầu (PC1 và PC2) được chọn để phân tích và xác định các chỉ số thực vật và các giá trị dải quang phổ có ảnh hưởng lớn đến TAGC để thiết lập các mô hình tương quan, vì hai thành phần chính này chiếm 96,35% mức độ biến thiên của bộ dữ liệu gốc.

Bảng 4.16. Tóm tắt kết quả PCA từ 115 bộ dữ liệu gồm 10 biến

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
Độ lệch chuẩn	2,8636	1,1976	0,4521	0,3336	0,2024	0,0923	0,0148	0,0051	0,0026	0,0011
Tỉ lệ phương sai	0,8200	0,1434	0,0204	0,0111	0,0041	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Tỉ lệ tích lũy	0,8200	0,9635	0,9839	0,9950	0,9991	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000



Hình 4.7. Biểu đồ trọng số giữa thành phần chính 1 (Principal Component 1) và thành phần chính 2 (Principal Component 2)

Phương trình thể hiện trọng số của các biến theo thành phần chính đầu tiên (PC1) được trình bày như sau:

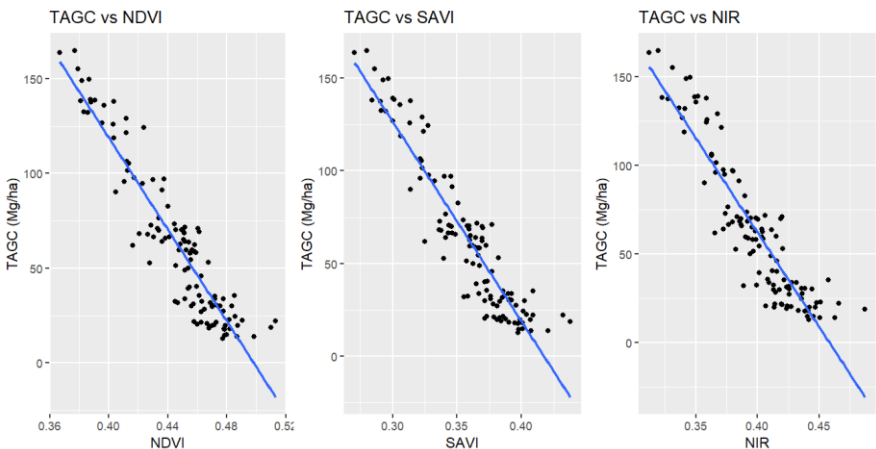
$$PC1 = 0,3243373 \times TAGC - 0,3351920 \times NDVI - 0,3443245 \times EVI - 0,3420016 \times SAVI - 0,3329627 \times ARVI - 0,3270426 \times SIPI - 0,3469365 \times NIR - 0,2269835 \times RED - 0,3204391 \times GREEN - 0,2335349 \times BLUE$$

Các biến BLUE, RED, GREEN có ảnh hưởng yếu nên bị loại. TAGC có mối quan hệ nghịch với NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI, NIR và các biến này được kết hợp thành ba tổ hợp chính biểu thị bằng các vòng tròn màu: vàng (NDVI, ARVI), đỏ (SAVI, SIPI), xanh (NIR, EVI) (Hình 4.7). Trong mỗi tổ hợp, NDVI, SAVI, NIR có trọng số cao

nhất, ảnh hưởng lớn đến TAGC. Kết quả PCA cho thấy ba tổ hợp này hạn chế mất thông tin dữ liệu, tăng khả năng diễn giải.

3.3.3.2. Phát triển các mô hình hồi quy

Khảo sát biến động TAGC theo NDVI, SAVI và NIR (Hình 4.8) cho thấy dữ liệu TAGC phân hóa mạnh khi các chỉ số nhỏ (hiện tượng heteroscedasticity), do đó cần mô hình có trọng số để cải thiện dự đoán. Nghiên cứu đã xây dựng các mô hình đơn biến và đa biến có trọng số.



Hình 4.8. Biến động TAGC theo NDVI, SAVI và NIR.

3.3.3.3. Xử lý thống kê, kiểm chứng mô hình (thảm định chéo)

- Nghiên cứu đã thiết lập 36 mô hình hồi quy TAGC, bao gồm các mô hình đơn biến, đa biến, tuyến tính và phi

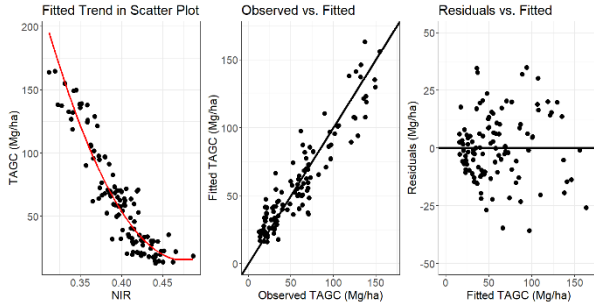
tuyến. Các mô hình được đánh giá qua AIC (trung bình 766,691) và R^2 (từ 0,763–0,891). Trong số này, 16 mô hình có $AIC < 766,691$ và $R^2 > 0,85$ được chọn để ước tính và kiểm tra sự tồn tại của các hệ số.

- Qua kiểm định chéo Monte Carlo (100 lần lặp, 80% dữ liệu xây dựng, 20% thẩm định), 9 mô hình có hệ số với $p\text{-value} < 0,001$ và $MPSE < 30\%$, gồm các mô hình dạng mũ và parabol bậc hai, cả đơn biến và đa biến. Trong số này, các mô hình quadratic (parabol bậc hai) cho kết quả tốt nhất. Hai mô hình tối ưu được xác định:

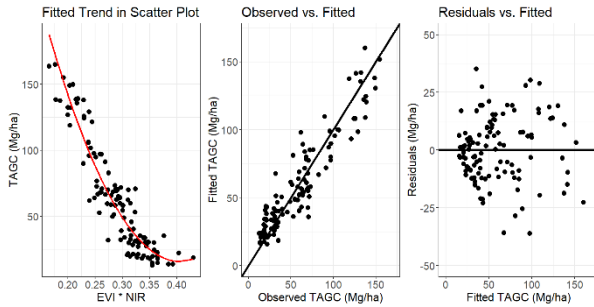
+ Mô hình đơn biến parabol bậc hai: $TAGC = a + b \times NIR + c \times NIR^2$, $MPSE = 22,04\%$.

+ Mô hình tổ hợp biến parabol bậc hai: $TAGC = a + b \times (NIR \times EVI) + c \times (NIR \times EVI)^2$, $MPSE = 21,63\%$.

Cả hai mô hình có giá trị dự đoán chính xác, nằm giữa đám mây dữ liệu quan sát và phần dư phân bố hẹp, được chọn làm phương trình tối ưu để ước tính TAGC từ các chỉ số thực vật và dải phổ Sentinel-2 (Hình 4.9)



$$27. \text{TAGC} = a + b \times \text{NIR} + c \times \text{NIR}^2$$



$$31. \text{TAGC} = a + b \times (\text{NIR} \times \text{EVI}) + c \times (\text{NIR} \times \text{EVI})^2$$

Hình 4.9. So sánh xu hướng dự đoán trên biểu đồ phân tán, giá trị quan sát so với giá trị dự đoán, và phần dư so với giá trị dự đoán (từ trái sang phải) của 9 phương trình được chọn

3.4. Phân cấp trữ lượng các-bon rừng tự nhiên

3.4.1. Phân cấp trữ lượng các-bon rừng tự nhiên

- Dữ liệu cơ sở: 115 ô tiêu chuẩn (OTC) rừng lá rộng thường xanh tại Đà Nẵng, TC trung bình 77,8 tC/ha, dao động từ 15,36–203,48 tC/ha, độ tin cậy 95%: $77,8 \pm 9,44$ tC/ha.

- Phân cấp TC ban đầu (3 cấp): Cấp 1: 15–67 tC/ha (54 OTC); Cấp 2: 68–87 tC/ha (25 OTC); Cấp 3: 88–203 tC/ha (36 OTC)

ANOVA cho thấy khác biệt TC giữa các cấp rất rõ rệt ($F = 256,07$; $P < 0,05$).

- Đề xuất 4 cấp TC để bao quát đầy đủ: Cấp 1: $TC < 15$ tC/ha; Cấp 2: $15 \leq TC < 68$ tC/ha; Cấp 3: $68 \leq TC < 88$ tC/ha; Cấp 4: $TC \geq 88$ tC/ha.

3.4.2. Xác định diện tích theo cấp trữ lượng các-bon rừng tự nhiên

Rừng tự nhiên Đà Nẵng (42.643,3 ha) được phân tích theo 4 cấp trữ lượng các-bon. NDVI cho thấy 2.064,38 ha có $TC < 15$ tC/ha, chủ yếu ở vùng địa hình phức tạp (Bà Nà, giáp Huế), trong khi NIR và $NIR \times EVI$ không xuất hiện mức này. Mô hình $NIR \times EVI$ có R^2 cao nhất, phản ánh chính xác hơn các cấp TC trung bình–cao. Kiểm tra thực địa tại Bà Nà xác nhận không có TC cực thấp, nên phân cấp cuối

cùng được rút gọn còn 3 cấp trữ lượng các-bon, phù hợp đặc trưng rừng tự nhiên địa phương.

3.4.3. Đánh giá sai số của phân cấp sinh khối

- Cấp các-bon 1: Sai số cao nhất, $S\% = 23,72\%$ (NDVI), $19,69\%$ (NIR), $18,53\%$ (NIR×EVI).

- Cấp các-bon 2: Sai số thấp hơn, $S\% = 7,64\%$ (NDVI), $5,76\%$ (NIR), $5,00\%$ (NIR×EVI).

- Cấp các-bon 3: Sai số thấp nhất, $S\% = 5,64\%$ (NDVI), $4,77\%$ (NIR), $4,82\%$ (NIR×EVI).

Trung bình $S\%$: NDVI = $12,33\%$, NIR = $10,07\%$, NIR×EVI = $9,45\%$, cho thấy NIR×EVI ước lượng gần thực tế nhất.

3.4.4. Trữ lượng các-bon của rừng tự nhiên

Trữ lượng các-bon rừng tự nhiên Đà Nẵng năm 2023: Tổng diện tích 42.643 ha. Ước tính theo ba mô hình: NDVI 3,91 triệu tấn, NIR 3,96 triệu tấn, NIR×EVI 4,58 triệu tấn. Các mô hình NIR và NIR×EVI phản ánh trữ lượng cao hơn NDVI, trong đó mô hình NIR×EVI cho kết quả gần với thực tế nhất.

3.5. Đề xuất một số ứng dụng và các giải pháp tăng cường khả năng tích lũy các-bon rừng tự nhiên

3.5.1. Đề xuất mô hình ước tính trữ lượng các-bon trên mặt đất.

Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình TC ($\text{NIR} \times \text{EVI}$) đạt giá trị MPSE thấp nhất (22,09%), đồng thời vẫn duy trì R^2 ở mức cao (0,8764) và sai số tuyệt đối (RMSE, MAE) ở mức chấp nhận được. Điều này khẳng định TC ($\text{NIR} \times \text{EVI}$) là mô hình có tính ổn định và độ tin cậy cao nhất để áp dụng trong ước lượng trữ lượng các-bon từ dữ liệu ảnh Sentinel-2 tại khu vực nghiên cứu.

4.5.2. Các giải pháp hạn chế mất rừng và suy thoái rừng.

- Hoàn thiện cơ chế pháp luật về quản lý rừng, PFES, tín chỉ các-bon; mở rộng cho rừng trồng; tăng cường đồng quản lý giữa Nhà nước, cộng đồng và doanh nghiệp.

- Ứng dụng GIS, viễn thám, MRV trong điều tra và phục hồi rừng theo cấp các-bon; triển khai phục hồi 2.500 ha TXN, cải tạo 1.000 ha TXK, khoanh nuôi 1.000 ha TXB, quản lý 42.643 ha mỗi giai đoạn (2025–2030, 2030–2035), tổng kinh phí ~1.253 tỷ đồng.

- Nâng cao nhận thức, đào tạo, truyền thông, tham vấn cộng đồng và minh bạch hóa dữ liệu về rừng và các-bon.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Xây dựng mô hình ước tính TAGC, TC dựa vào các chỉ số thực vật và dải đa phổ của ảnh Sentinel-2 ngày càng đóng vai trò quan trọng trong việc ước tính trữ lượng các-bon rừng, bởi vì phương pháp này tăng độ tin cậy và giảm chi phí so với phương pháp giải tích cây và có thể áp dụng ở phạm vi lớn như quốc gia, khu vực và toàn cầu. Với bối cảnh trên nghiên cứu này được tiến hành ở thành phố Đà Nẵng đã chỉ ra những phát hiện chính như sau:

Trong giai đoạn 2016-2023, diện tích rừng tự nhiên trên địa bàn thành phố Đà Nẵng (cũ) đã giảm xuống, nguyên nhân chủ yếu và do điều chỉnh kỹ thuật trong quản lý bản đồ diễn biến rừng. Từ đó dẫn đến lượng phát thải do suy thoái rừng và mất rừng là 8.266,7 tấn các-bon.

Thông qua phân tích PCA, các biến NDVI, SAVI, NIR và các tổ hợp biến (NDVI, ARVI), (SAVI, SIPI), (NIR, EVI) được xác định là có mối tương quan hệ chặt chẽ với TAGC, từ đó đã xác định được 9 mô hình (bao gồm cả mô hình phi tuyến đơn biến và tổ hợp biến) thông qua thẩm định chéo với $R^2 = 0,85 - 0,89$ và $MPSE = 21,63\% - 26,32\%$, trong số đó đã chọn được 2 mô hình tối ưu (optimal models) dạng parabol bậc 2 đơn biến và tổ hợp biến. Ngoài ra phương trình tương quan giữa TAGC với NDVI được thiết lập theo phương pháp thẩm định độc lập đã cho kết

quả ước tính trữ lượng các-bon như hai phương trình trên. Tuy nhiên phương trình $TAGC = 505,7588 - 2411,523 \times (NIR \times EVI) + 2967,038 \times (NIR \times EVI)^2$ được đề xuất áp dụng cho việc ước tính trữ lượng các-bon tại vùng sinh thái Nam Trung Bộ của Việt Nam do có sự cân bằng giữa độ phù hợp và độ chính xác tương đối.

Phân cấp trữ lượng các-bon dựa vào hai mô hình được chọn bằng cách kết hợp giữa phân tích PCA và thẩm định chéo phù hợp với phân cấp trữ lượng các-bon dựa vào dữ liệu điều tra rừng (3 cấp), trong khi đó mô hình được thiết lập bằng thẩm định độc lập có 4 cấp trữ lượng các-bon.

2. Kiến nghị

Kết quả nghiên cứu của luận án đã xây dựng được các phương trình ước tính trữ lượng các-bon từ ảnh Sentinel-2 cho rừng tự nhiên tại thành phố Đà Nẵng, đồng thời kiểm chứng độ chính xác bằng số liệu điều tra ô tiêu chuẩn. Do đó, kiến nghị Sở Nông nghiệp và Môi trường, Quỹ Bảo vệ và Phát triển rừng thành phố, cũng như các cơ quan liên quan, sử dụng sản phẩm của luận án trong công tác kiểm kê, giám sát và dự báo biến động trữ lượng các-bon rừng, phục vụ quy hoạch lâm nghiệp bền vững và tham gia thị trường tín chỉ các-bon. Kết quả nghiên cứu cũng có thể tích hợp vào hệ thống GIS quản lý tài nguyên rừng của thành phố, nhằm hỗ trợ công tác theo dõi diễn biến rừng,

xây dựng cơ sở dữ liệu phục vụ cơ chế MRV và các chương trình giảm phát thải như REDD+.

Tuy nhiên, xuất phát từ những giới hạn đã được xác định trong luận án liên quan đến dữ liệu đầu vào, phương pháp và phạm vi nghiên cứu (chưa phân loại đầy đủ các trạng thái rừng trong bản đồ hiện trạng, chưa phân tích bất định theo chuẩn IPCC, phạm vi rừng trồng mới dừng lại ở mức tham khảo, v.v.), trong đó có việc chưa phân tích sâu đối với rừng trồng, cần thiết phải tiếp tục nghiên cứu và mở rộng theo các hướng sau: (i) xây dựng bản đồ hiện trạng rừng đa thời gian với phân loại chi tiết; (ii) bổ sung điều tra sinh khối dưới mặt đất và cây có đường kính nhỏ để giảm sai số; (iii) phát triển mô hình riêng cho rừng trồng; và (iv) triển khai phân tích bất định nhằm nâng cao độ tin cậy của kết quả. Việc chưa phân tích sâu rừng trồng khiến bức tranh các-bon cấp địa phương chưa thật sự toàn diện; tuy nhiên, đây là giới hạn có chủ đích do rừng trồng trên địa bàn phân bố manh mún, chu kỳ kinh doanh ngắn và chưa được tích hợp vào cơ chế tín chỉ các-bon tại thời điểm nghiên cứu. Đây là cơ sở quan trọng để hoàn thiện và nâng cao giá trị ứng dụng của kết quả nghiên cứu trong kiểm kê các-bon cấp thành phố và khu vực.

Trong các giới hạn nêu trên, việc sử dụng hệ số các-bon $CF = 0,47$ và tỷ lệ rễ – thân (R) theo ngưỡng AGB là một nguồn bất định đáng lưu ý. Việc sử dụng hệ số các-bon

CF = 0,47 và tỷ lệ rễ – thân (R) theo ngưỡng AGB giúp chuẩn hóa quy trình tính toán và bảo đảm tính so sánh giữa các nghiên cứu. Tuy nhiên, do các hệ số này mang tính mặc định, chúng không phản ánh đầy đủ sự biến thiên tự nhiên theo loài, trạng thái rừng, điều kiện lập địa và tuổi rừng, từ đó có thể làm gia tăng độ không chắc chắn của kết quả ước tính trữ lượng các-bon. Đặc biệt, trong các trạng thái rừng có cấu trúc phức tạp hoặc sinh khối cao, sự khác biệt của CF và R giữa các nhóm loài và điều kiện sinh thái có thể dẫn đến sai lệch nhất định khi áp dụng một giá trị cố định cho toàn bộ khu vực nghiên cứu. Do đó, trong các nghiên cứu tiếp theo hoặc khi triển khai MRV/ERPA, cần ưu tiên sử dụng hệ số CF và R theo nhóm loài hoặc vùng sinh thái, hoặc các hệ số được xác định từ số liệu thực nghiệm địa phương, nhằm giảm bất định và nâng cao độ tin cậy của kết quả.

Bên cạnh đó, trong bối cảnh phát triển nhanh của dữ liệu viễn thám, việc mở rộng sử dụng thêm các kênh phổ và chỉ số ảnh khác (như các băng red-edge, SWIR hoặc tổ hợp đa chỉ số), cũng như áp dụng các kỹ thuật tiền xử lý nâng cao (hiệu chỉnh địa hình, hiệu chỉnh khí quyển chi tiết, xử lý mây nâng cao, hoặc tích hợp đa nguồn dữ liệu), là những hướng nghiên cứu tiềm năng nhằm cải thiện độ chính xác của mô hình ước tính trữ lượng các-bon rừng trong các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo. Việc chưa khai thác các kênh red-edge và SWIR để phân loại trạng thái trong nghiên

cứu này nhằm bảo đảm tính đồng nhất về độ phân giải không gian, tính nhất quán của quy trình xử lý và khả năng so sánh kết quả mô hình. Nội dung này được xác định là hướng mở rộng trong các nghiên cứu tiếp theo nhằm nâng cao khả năng phân biệt trạng thái và cấu trúc rừng.

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

1. **Nguyễn Hữu Tâm**, Nguyễn Văn Lợi & Hoàng Huy Tuấn (2025). 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. Tạp chí Khoa học Đại học Huế: Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, Tập 134, Số 3A, tr. 101–118.

<https://doi.org/10.26459/hueunijard.v134i3A.7627>

2. **Nguyen Huu Tam**, Nguyen Van Loi, Hoang Huy Tuan (2025). Establishing models for predicting above-ground carbon stock based on Sentinel-2 imagery for evergreen broadleaf forests in South Central Coastal Ecoregion, Vietnam. *Forests*, 16(4), 686.

<https://doi.org/10.3390/f16040686>

**HUE UNIVERSITY
UNIVERSITY OF AGRICULTURE AND FORESTRY**

NGUYEN HUU TAM

**DETERMINATION OF CARBON
ACCUMULATION CAPACITY OF FOREST TYPES
IN DA NANG CITY AS A BASIS FOR
PARTICIPATION IN THE EMISSION REDUCTION
PAYMENT AGREEMENT FOR THE SOUTH
CENTRAL AND CENTRAL HIGHLANDS
REGIONS**

**SUMMARY OF THE DOCTORAL DISSERTATION
IN SILVICULTURE**

HUE, 2025

**HUE UNIVERSITY
UNIVERSITY OF AGRICULTURE AND FORESTRY**

NGUYEN HUU TAM

**DETERMINATION OF CARBON
ACCUMULATION CAPACITY OF FOREST TYPES
IN DA NANG CITY AS A BASIS FOR
PARTICIPATION IN THE EMISSION REDUCTION
PAYMENT AGREEMENT FOR THE SOUTH
CENTRAL AND CENTRAL HIGHLANDS
REGIONS**

**SUMMARY OF THE DOCTORAL DISSERTATION
IN SILVICULTURE**

Major: Silviculture

Code: 9620205

SCIENTIFIC SUPERVISORS:

1. Assoc. Prof. Dr. HOANG HUY TUAN

2. Assoc. Prof. Dr. NGUYEN VAN LOI

HUE, 2025

INTRODUCTION

1. Urgency of the Research Problem

Since COP13 (2007), over 150 REDD+ projects have been implemented worldwide. Viet Nam is among the first 13 UN-REDD countries, with ERPA (2020) in the North Central region and the LEAF Letter of Intent (2021) in the South Central and Central Highlands. Although UN-REDD has supported biometric carbon estimation, these approaches remain costly and limited in scalability. Therefore, applying Sentinel-2 imagery to estimate carbon stocks in natural forests in Da Nang City is necessary to meet emission-reduction commitments under the Paris Agreement.

2. Objectives of the Study

2.1. General Objective

To establish a scientific basis for estimating carbon stocks in natural forests using Sentinel-2 imagery, supporting carbon credit trading and ERPA implementation in the South Central and Central Highlands regions.

2.2. Specific Objectives

- To estimate carbon emissions and sequestration during the period 2016–2023.

- To develop regression models for estimating carbon stocks based on Sentinel-2 image indices.
- To propose models and solutions for emission reduction and financial benefit sharing under ERPA.

3. Scientific and Practical Significance

3.1. Scientific Significance

The dissertation advances biometric modeling for estimating carbon stocks in natural forests using Sentinel-2 imagery by integrating permanent sample plot (OTC) data with remote sensing and GIS. Models were developed using principal component analysis (PCA) and weighted cross-validation in R-Studio, ensuring objectivity and suitability for large, multi-source datasets.

3.2. Practical Significance

The proposed models enable carbon stock estimation without direct field measurements, reducing time and costs while maintaining sufficient accuracy and reliability for carbon credit transactions and ERPA.

4. Novel Contributions of the Dissertation

The dissertation: (i) evaluates multiple spectral bands and vegetation indices using PCA, identifying NDVI, SAVI, and NIR as most strongly correlated with TAGC; (ii) develops weighted multivariate nonlinear

regression models; and (iii) applies Monte Carlo cross-validation (100 iterations), achieving R^2 up to 0.89 and $MPSE < 30\%$.

5. Limitations of the Study

The study has limitations related to data, methods, and scope. Forest status maps do not fully represent all forest conditions, and plantation forests were considered only as references due to fragmented distribution, short rotation cycles, and non-participation in carbon credit mechanisms during the study period. Below-ground biomass and small-diameter trees were not comprehensively inventoried, and uncertainty analysis following IPCC standards was not conducted. The use of default parameters ($CF = 0.47$ and root-to-shoot ratio R) does not fully capture natural variability. In addition, red-edge and SWIR bands and advanced preprocessing techniques were not utilized, limiting further improvements in model accuracy.

CHAPTER 1. OVERVIEW OF RESEARCH ISSUES

This chapter reviews the research background through two main components: the theoretical foundation and the practical foundation.

The theoretical foundation addresses: (i) the carbon cycle and the role of forests in carbon sequestration; (ii) emission reduction payment mechanisms and levels of greenhouse gas emission and removal accounting; and (iii) the scientific basis of methods for assessing forest carbon accumulation capacity.

The practical foundation focuses on: (i) the UN-REDD Programme and the Emission Reduction Payment Programme in the North Central region; (ii) the development of biomass and carbon stock estimation models; and (iii) the application of GIS and remote sensing in forest resource management and carbon stock assessment.

CHAPTER 2. RESEARCH OBJECTS, SCOPE, CONTENTS, AND METHODS

2.1. Research Objects and Scope

2.1.1. Research Objects

The study examines above-ground carbon stocks of natural and plantation forests (hybrid acacia) and their relationships with Sentinel-2 spectral bands (BLUE, GREEN, RED, NIR) and vegetation indices (NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI) in Da Nang City during 2016–2023.

2.1.2. Research Scope

The spatial scope covers Da Nang City (former administrative boundaries), while the temporal scope focuses on 2016–2023, with supplementary updates for 2024–2025.

2.2. Research Contents

The study focuses on (1) analyzing land-use and forest-use changes during 2016–2023; (2) assessing carbon emissions and sequestration over the same period; (3) developing Sentinel-2–based models for estimating above-ground carbon stocks; (4) estimating and classifying carbon stocks in natural forests; and (5) proposing solutions to reduce emissions and enhance forest carbon stocks in the study area.

2.3. Research Methods

a) Secondary data: Land-use planning, forest inventory, and forest change data from relevant authorities.

b) Carbon stock estimation: Field measurements from 143 plots (D1.3, Hvn); biomass and carbon calculation using Bao Huy's equations; error and variability assessment by forest type.

c) Forest change and carbon balance (2016–2023): Overlay of forest maps to derive emission/removal factors and total emissions and sequestration.

d) Sentinel-2–based modeling: Image preprocessing and classification; vegetation index calculation; univariate and multivariate (linear and nonlinear) regression modeling with PCA-based variable selection and Monte Carlo cross-validation.

e) Carbon stock classification: TAGC classification using ANOVA, field adjustment, and error assessment to generate natural forest carbon stock maps.

CHAPTER 3. RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Land-Use and Forest-Use Changes (2016–2023)

During the period 2016–2023, the total forest area of Da Nang City increased from 56,363.97 ha to 57,868.48 ha. Natural forest area decreased by 658.08 ha, whereas plantation forest area increased by 2,162.59 ha.

The observed changes were mainly technical in nature, resulting from data standardization; only a small proportion represented actual forest loss (approximately 12 ha) caused by storms and illegal logging. Nevertheless, from a scientific perspective, the standardized datasets for 2016 and 2023 were consistently used as the basis for calculating carbon emissions and sequestration.

3.2. Carbon Emissions and Sequestration (2016–2023)

- A total of 108 tree species (107 native species and one hybrid acacia species) were recorded across 143 sample plots; wood density (WD) values were compiled from reliable reference sources.

- Mean carbon stocks decreased progressively across forest conditions: TXG 146.02 tC/ha; TXB 74.89 tC/ha; TXN 33.86 tC/ha; TXK 20.00 tC/ha; and TG 18.29 tC/ha.

- Emission and removal factors (EF/RF) indicated strong carbon sequestration in recovering forests (TXN →

TXB: +41.0 tC/ha), whereas forest loss or degradation resulted in substantial emissions (TXG → DTK: −146.0 tC/ha).

- Overall changes during 2016–2023 included forest degradation over 2,326.14 ha, forest loss/conversion over 4,235.25 ha, forest quality improvement over 788.06 ha, and new plantations over 4,980.82 ha.

- Total emissions amounted to 117,851.47 tC, total removals to 109,584.67 tC, resulting in net emissions of −8,266.80 tC.

3.3. Models for Estimating Above-Ground Carbon Stocks Using Sentinel-2 Imagery

3.3.1. Development of the Forest Status Map from Sentinel-2 Imagery

The 2023 forest status map of Da Nang City was developed using Sentinel-2 imagery, identifying a total natural area of 98,750.1 ha, of which forested land accounted for 60,353.12 ha (61.12%), including 42,643.3 ha of natural forests (43.18%) and 17,709.82 ha of plantation forests (17.93%). Accuracy assessment based on 110 independent validation samples yielded an overall accuracy of 96% and a Kappa coefficient of 0.94, demonstrating that the 2023 forest status map (Figure 4.3)

is highly reliable and provides a robust basis for subsequent analyses of NDVI and forest carbon stocks.

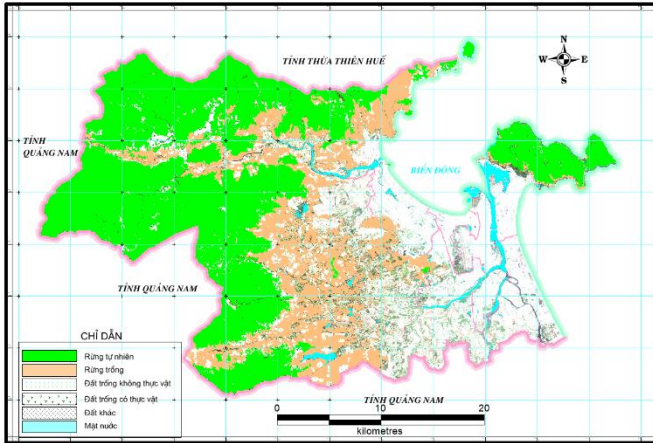


Figure 4.3. Forest status map of Da Nang City in 2023 derived from Sentinel-2 satellite imagery

3.3.2. NDVI-Based Carbon Stock Estimation Models

The study used 96 sample plots to develop regression models describing the relationship between carbon stocks (TC) and NDVI. The mean carbon stocks corresponding to forest conditions were as follows: TXG 148.94 tC/ha, TXB 76.60 tC/ha, TXN 33.63 tC/ha, and TXK 19.87 tC/ha.

Based on the analysis, five regression equations were established (Figure 4.5).

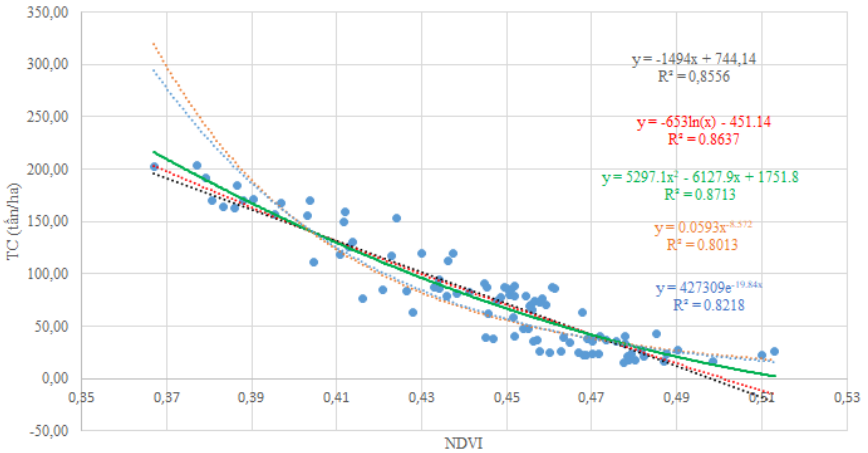


Figure 4.5. Results of regression analysis between NDVI and total carbon stocks of natural forests

The regression analysis between TC and NDVI (96 plots) showed that all five models were statistically significant ($P < 0.05$). The quadratic model $TC = 5297.1 \times NDVI^2 - 6127.9 \times NDVI + 1751.8$ provided the best fit ($R^2 = 0.8713$; $MAE = 15.09$) and, when validated with 19 independent plots, achieved an RMSE of 9.5 tC/ha and a relative standard deviation of 16.59%.

3.3.3. Models for Estimating Above-Ground Carbon Stocks Based on Spectral Bands and Vegetation Indices

3.3.3.1. Identification of Influential Spectral Bands and Vegetation Indices Affecting Total Above-Ground Carbon Stocks

Principal component analysis (PCA) of 10 variables from 115 sample plots, including vegetation indices (NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI) and spectral bands (BLUE, GREEN, RED, NIR), showed that PC1 and PC2 explained 96.35% of the variance in TAGC, with PC1 accounting for 82% and used to derive variable weights, forming the basis for subsequent correlation model development.

Table 4.16. *Summary of PCA results based on 115 datasets with 10 variables*

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
Standard deviation	2.8636	1.1976	0.4521	0.3336	0.2024	0.0923	0.0148	0.0051	0.0026	0.0011
Proportion of variance	0.8200	0.1434	0.0204	0.0111	0.0041	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Cumulative proportion	0.8200	0.9635	0.9839	0.9950	0.9991	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

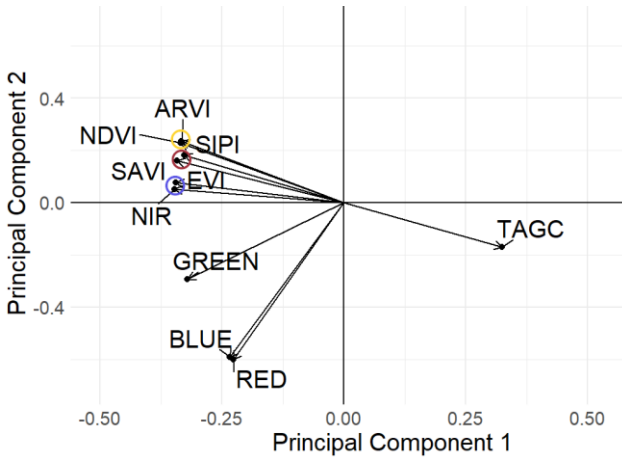


Figure 4.7. *Weighting plot between Principal Component 1 (PC1) and Principal Component 2 (PC2)*

The equation representing the weights of the variables according to the first principal component (PC1) is expressed as follows: $PC1 = 0.3243373 \times TAGC - 0.3351920 \times NDVI - 0.3443245 \times EVI - 0.3420016 \times SAVI - 0.3329627 \times ARVI - 0.3270426 \times SIPI - 0.3469365 \times NIR - 0.2269835 \times RED - 0.3204391 \times GREEN - 0.2335349 \times BLUE$

The BLUE, RED, and GREEN variables exhibited weak influence and were therefore excluded. TAGC showed inverse relationships with NDVI, EVI, SAVI, ARVI, SIPI, and NIR, and these variables were grouped into three principal combinations, represented by colored circles: yellow (NDVI, ARVI), red (SAVI, SIPI), and blue

(NIR, EVI) (Figure 4.7). Within each combination, NDVI, SAVI, and NIR exhibited the highest weights and exerted the strongest influence on TAGC. The PCA results indicate that these three combinations effectively minimize information loss while enhancing interpretability.

3.3.3.2. Development of Regression Models

An examination of TAGC variability with respect to NDVI, SAVI, and NIR (Figure 4.8) revealed pronounced dispersion of TAGC values at low index levels, indicating heteroscedasticity. Consequently, weighted regression models were required to improve predictive performance. Accordingly, the study developed both weighted univariate and multivariate regression models.

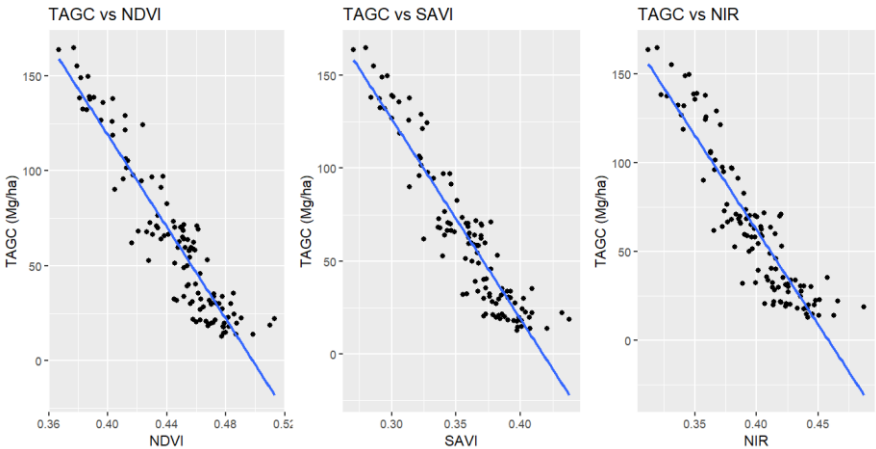


Figure 4.8. Variation of TAGC with NDVI, SAVI, and NIR.

3.3.3.3. *Statistical Processing and Model Validation (Cross-Validation)*

A total of 36 TAGC regression models were developed, including univariate and multivariate, linear and nonlinear formulations. Model performance was evaluated using AIC (mean value: 766.691) and R^2 (ranging from 0.763 to 0.891). Among these, 16 models with $AIC < 766.691$ and $R^2 > 0.85$ were selected for TAGC estimation and coefficient significance testing.

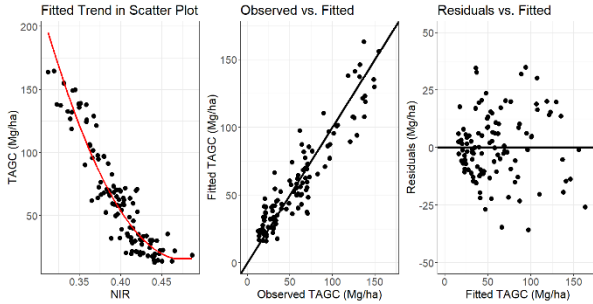
Through Monte Carlo cross-validation (100 iterations, with 80% of the data used for model calibration and 20% for validation), nine models exhibited statistically significant coefficients ($p\text{-value} < 0.001$) and $MPSE < 30\%$. These included both exponential and quadratic (second-order parabolic) models, in univariate and multivariate forms. Overall, quadratic models yielded the best performance. Two optimal models were identified:

Univariate quadratic model: $TAGC = a + b \times NIR + c \times NIR^2$, $MPSE = 22.04\%$.

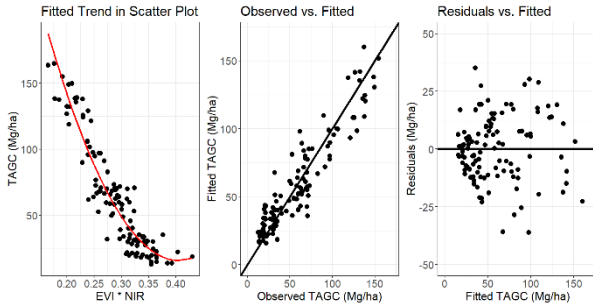
Quadratic combined-variable model: $TAGC = a + b \times (NIR \times EVI) + c \times (NIR \times EVI)^2$, $MPSE = 21.63\%$.

Both models demonstrated high predictive accuracy, with predicted values located within the observed data cloud and narrowly distributed residuals. Consequently,

they were selected as the optimal equations for estimating TAGC from Sentinel-2 vegetation indices and spectral bands (Figure 4.9)



$$27. \text{TAGC} = a + b \times \text{NIR} + c \times \text{NIR}^2$$



$$31. \text{TAGC} = a + b \times (\text{NIR} \times \text{EVI}) + c \times (\text{NIR} \times \text{EVI})^2$$

Figure 4.9. Comparison of prediction trends on scatter plots, observed versus predicted values, and residuals versus predicted values (from left to right) for the nine selected equations

3.4. Classification of Carbon Stocks in Natural Forests

3.4.1. Carbon Stock Classification in Natural Forests

- Baseline data: A total of 115 permanent sample plots (OTCs) in evergreen broadleaf forests in Da Nang City, with a mean carbon stock (TC) of 77.8 tC/ha, ranging from 15.36 to 203.48 tC/ha; the 95% confidence interval was 77.8 ± 9.44 tC/ha.

- Initial TC classification (three classes): Class 1: 15–67 tC/ha (54 plots); Class 2: 68–87 tC/ha (25 plots); Class 3: 88–203 tC/ha (36 plots).

ANOVA indicated highly significant differences in TC among classes ($F = 256.07$; $P < 0.05$).

Proposed refinement to four TC classes to better capture variability: Class 1: $TC < 15$ tC/ha; Class 2: $15 \leq TC < 68$ tC/ha; Class 3: $68 \leq TC < 88$ tC/ha; Class 4: $TC \geq 88$ tC/ha.

3.4.2. Area Estimation by Carbon Stock Class

Natural forests in Da Nang (42,643.3 ha) were analyzed according to four carbon stock classes. NDVI-based estimates indicated 2,064.38 ha with $TC < 15$ tC/ha, mainly in areas with complex terrain (Ba Na Mountains, bordering Hue), whereas NIR and NIR×EVI models did not identify this lowest class. The NIR×EVI model exhibited the highest R^2 and more accurately represented medium-to-

high TC classes. Field verification in the Ba Na area confirmed the absence of extremely low TC values; therefore, the final classification was consolidated into three carbon stock classes, consistent with local natural forest characteristics.

3.4.3. Error Assessment of Biomass Classification

- Carbon Class 1: Highest errors, S% = 23.72% (NDVI), 19.69% (NIR), 18.53% (NIR×EVI).

- Carbon Class 2: Lower errors, S% = 7.64% (NDVI), 5.76% (NIR), 5.00% (NIR×EVI).

- Carbon Class 3: Lowest errors, S% = 5.64% (NDVI), 4.77% (NIR), 4.82% (NIR×EVI).

Mean S% values were 12.33% (NDVI), 10.07% (NIR), and 9.45% (NIR×EVI), indicating that the NIR×EVI model provided estimates closest to observed values.

3.4.4. Carbon Stocks of Natural Forests

In 2023, the total area of natural forests in Da Nang City was 42,643 ha. Total carbon stocks were estimated using three models: 3.91 million tons (NDVI), 3.96 million tons (NIR), and 4.58 million tons (NIR×EVI). The NIR and NIR×EVI models yielded higher estimates than NDVI, with the NIR×EVI model producing results most consistent with field-based observations.

3.5. Proposed Applications and Solutions for Enhancing Carbon Sequestration in Natural Forests

3.5.1. Proposed Model for Estimating Above-Ground Carbon Stocks.

The TC ($\text{NIR} \times \text{EVI}$) model showed the best performance, with the lowest MPSE (22.09%), high explanatory power ($R^2 = 0.8764$), and acceptable RMSE and MAE, confirming its stability and reliability for Sentinel-2–based carbon stock estimation in the study area.

3.5.2. Solutions to Mitigate Deforestation and Forest Degradation.

- Strengthen policies on forest management, PFES, and carbon credits, and promote co-management.

- Apply GIS, remote sensing, and MRV for carbon-based forest restoration and management (42,643 ha per phase; total budget ~VND 1,253 billion).

- Enhance awareness, capacity building, and data transparency.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

1. Conclusions

The development of models for estimating above-ground carbon stocks (TAGC, TC) based on vegetation indices and multispectral bands derived from Sentinel-2 imagery plays an increasingly important role in forest carbon stock assessment, as this approach enhances reliability, reduces costs compared with tree-based allometric methods, and is applicable at large spatial scales, including national, regional, and global levels. Within this context, the present study conducted in Da Nang City yielded the following key findings:

During the period 2016–2023, the area of natural forests in Da Nang City (former administrative boundaries) decreased, primarily due to technical adjustments in forest change map management. As a result, carbon emissions attributable to forest degradation and deforestation amounted to 8,266.7 tons of carbon.

Through PCA, the variables NDVI, SAVI, NIR, and the combined variable groups (NDVI, ARVI), (SAVI, SIPI), and (NIR, EVI) were identified as being strongly correlated with TAGC. Based on these results, nine models—including both univariate nonlinear models and combined-variable models—were identified through cross-validation, achieving R^2 values ranging from 0.85 to 0.89

and MPSE values from 21.63% to 26.32%. Among these, two optimal second-order quadratic (parabolic) models, in univariate and combined-variable forms, were selected. In addition, the correlation equation between TAGC and NDVI established using an independent validation approach produced carbon stock estimates comparable to those obtained from the two optimal models. However, the equation

$$\text{TAGC} = 505.7588 - 2411.523 \times (\text{NIR} \times \text{EVI}) + 2967.038 \times (\text{NIR} \times \text{EVI})^2$$

is proposed for application in estimating carbon stocks in the South Central ecological region of Viet Nam, as it provides a balance between goodness of fit and relative accuracy.

Carbon stock classification based on the two selected models, combining PCA and cross-validation, was consistent with the three-level carbon stock classification derived from forest inventory data, whereas the model established using independent validation resulted in four carbon stock classes.

2. Recommendations

The dissertation successfully developed equations for estimating carbon stocks in natural forests in Da Nang City using Sentinel-2 imagery and validated their accuracy

using permanent sample plot data. Accordingly, it is recommended that the Department of Agriculture and Environment, the City Forest Protection and Development Fund, and relevant agencies apply these outputs in forest carbon inventory, monitoring, and projection activities, serving sustainable forestry planning and participation in carbon credit markets. The research results can also be integrated into the city's forest resource management GIS system to support forest change monitoring, database development for MRV mechanisms, and emission reduction programs such as REDD+.

However, given the limitations identified in the dissertation related to input data, methods, and research scope—such as incomplete classification of forest conditions in forest status maps, the absence of IPCC-compliant uncertainty analysis, and the consideration of plantation forests only at a reference level—it is necessary to continue and expand research in the following directions: (i) developing multi-temporal forest status maps with detailed classification; (ii) supplementing field surveys of below-ground biomass and small-diameter trees to reduce estimation errors; (iii) developing separate models for plantation forests; and (iv) implementing uncertainty analysis to enhance result reliability. The limited analysis of plantation forests means that the local carbon balance is not yet fully comprehensive; however, this was a deliberate

limitation, as plantation forests in the study area are fragmented, have short rotation cycles, and were not integrated into carbon credit mechanisms at the time of the study. This provides an important basis for further refinement and enhancement of the applicability of the research results in city- and regional-level carbon inventories.

Among the identified limitations, the use of a fixed carbon fraction ($CF = 0.47$) and root-to-shoot ratio (R) based on AGB thresholds represents a notable source of uncertainty. While these parameters help standardize calculation procedures and ensure comparability among studies, their default nature does not fully reflect natural variability across species, forest conditions, site characteristics, and stand age, thereby potentially increasing uncertainty in carbon stock estimates. In particular, in forests with complex structures or high biomass, differences in CF and R among species groups and ecological conditions may lead to biases when a single fixed value is applied across the entire study area. Therefore, in future studies or during MRV/ERPA implementation, priority should be given to using CF and R values stratified by species group or ecological region, or coefficients derived from local empirical data, in order to reduce uncertainty and enhance reliability.

In addition, given the rapid advancement of remote sensing data, expanding the use of additional spectral bands and indices—such as red-edge and SWIR bands or multi-index combinations—as well as applying advanced preprocessing techniques (e.g., terrain correction, detailed atmospheric correction, advanced cloud masking, or multi-source data integration), represents a promising research direction for improving the accuracy of forest carbon stock estimation models. The exclusion of red-edge and SWIR bands in this study was intended to ensure spatial resolution consistency, processing uniformity, and result comparability. These aspects are identified as future extensions to enhance discrimination of forest conditions and structural characteristics.

LIST OF PUBLISHED WORKS RELATED TO THE DISSERTATION

1. **Nguyễn Hữu Tâm**, Nguyễn Văn Lợi & Hoàng Huy Tuấn (2025). 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. Tạp chí Khoa học Đại học Huế: Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, Tập 134, Số 3A, tr. 101–118.

<https://doi.org/10.26459/hueunijard.v134i3A.7627>

2. **Nguyen Huu Tam**, Nguyen Van Loi, Hoang Huy Tuan (2025). Establishing models for predicting above-ground carbon stock based on Sentinel-2 imagery for evergreen broadleaf forests in South Central Coastal Ecoregion, Vietnam. *Forests*, 16(4), 686.

<https://doi.org/10.3390/f16040686>