

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÂY NGUYÊN

PHAN THỊ HẰNG

ỨNG DỤNG ĐA PHƯƠNG PHÁP TRONG NGHIÊN CỨU CÁC LOÀI THỰC
VẬT THÂN GỖ QUÝ HIẾM TẠI VƯỜN QUỐC GIA TÀ ĐÙNG, TỈNH
ĐẮK NÔNG

Chuyên ngành: Lâm sinh
Mã số: 9 62 02 05

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ LÂM NGHIỆP

Đắk Lắk, năm 2025

Công trình hoàn thành tại:
TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÂY NGUYÊN

Người hướng dẫn 1: **PGS.TS. Nguyễn Thị Thanh Hương**

Người hướng dẫn 2: **PGS.TS. Lưu Hồng Trường**



Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Trường, họp tại:
Vào hồi giờ phút, ngày tháng năm 2025

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

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	4
1. Sự cần thiết của luận án.....	4
3. Phạm vi nghiên cứu.....	4
4. Những đóng góp mới của đề tài	4
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....	5
6. Kết cấu luận án.....	5
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	5
1.1. Thực vật thân gỗ quý hiếm – Khái niệm và ý nghĩa.....	5
1.2. Viễn thám và GIS trong nghiên cứu tài nguyên rừng.....	5
1.3. Tổng quan về nghiên cứu đa dạng sinh học của thực vật thân gỗ.....	5
1.4. Sử dụng SDMs để dự báo phân bố tiềm năng theo các kịch bản biến đổi khí hậu và xác định các điểm hotspots đa dạng sinh học.....	7
1.5. Thảo luận.....	7
CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG, NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	8
2.1. Đối tượng nghiên cứu.....	8
2.2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu.....	8
2.2.1. Nội dung nghiên cứu.....	8
2.2.2. Phương pháp nghiên cứu.....	8
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN.....	10
3.1. Phân loại và xây dựng bản đồ trạng thái rừng dựa vào ảnh vệ tinh.....	10
3.1.1. Tiền xử lý ảnh và tạo mặt nạ rừng.....	10
3.1.2. Phân loại trạng thái rừng và đánh giá kết quả phân loại.....	11
3.2. Ứng dụng mô hình SDMs để xác định vùng sinh thái tiềm năng, hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa.....	12
3.2.1. Cơ sở dữ liệu để xây dựng mô hình SDMs hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa.....	12
3.2.2. Phân tích mức độ đa cộng tuyến của các biến dữ liệu.....	14
3.2.3. Mô hình hóa vùng sinh thái tiềm năng của các loài TGQH	17
3.2.4. Kiểm định kết quả xây dựng mô hình SDMs	17
3.3. Tính toán các chỉ số đa dạng sinh học và phân tích tác động của địa hình (độ dốc, độ cao) đến đa dạng sinh học của lâm phần.....	20
3.3.1. Tính toán các chỉ số đa dạng sinh học.....	20
3.3.2. Phân tích ảnh hưởng của địa hình đến đa dạng TVTG tại VQG Tà Đùng.....	21
3.4. Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai.....	23
3.4.1. Cơ sở dữ liệu để dự báo phân bố tiềm năng.....	23
3.4.2. Dự báo phân bố tiềm năng của các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng.....	23
3.4.3. Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai.....	27
3.5. Xác định điểm hotspots đa dạng sinh học và đề xuất giải pháp bảo tồn các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng.....	27
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	34
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CÓ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	37

MỞ ĐẦU

1. Sự cần thiết của luận án

Biến đổi khí hậu và suy giảm sinh cảnh đang tác động đến số lượng và chất lượng của các loài thực vật thân gỗ quý hiếm (TV TGQH), dẫn đến suy giảm đa dạng sinh học tài nguyên rừng. Trước thực trạng đó, bảo tồn TV TGQH trở thành nhiệm vụ cần thiết để góp phần phát triển tài nguyên rừng bền vững. Tuy nhiên, công tác bảo tồn hiện nay vẫn còn nhiều hạn chế, đặc biệt trong việc tích hợp các công nghệ hiện đại như viễn thám, GIS và học máy trong nghiên cứu đa dạng sinh học và dự báo sự phân bố của các loài dưới tác động của biến đổi khí hậu. Vườn Quốc gia (VQG) Tà Đùng – khu vực có tính đa dạng sinh học cao – nhưng hiện nay chưa có nghiên cứu ứng dụng tích hợp các công nghệ hiện đại trên vào phân tích và bảo tồn TV TGQH để phục vụ cho công tác quản lý loài, phân tích đặc điểm cấu trúc lâm phần, đánh giá chỉ số đa dạng sinh học, xây dựng bản đồ phân bố tiềm năng và dự báo phân bố dưới các kịch bản biến đổi khí hậu, cũng như xác định các hotspots ưu tiên cho bảo tồn đa dạng sinh học. Xuất phát từ thực tiễn và khoảng trống nghiên cứu nêu trên, luận án này có ý nghĩa khoa học, nhằm xây dựng cơ sở dữ liệu định lượng và mô hình dự báo có tính chính xác cao, từ đó góp phần nâng cao hiệu quả trong công tác quy hoạch, quản lý và bảo tồn TV TGQH trong bối cảnh khí hậu đang thay đổi nhanh chóng và khó lường.

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1. Mục tiêu tổng quát

Nghiên cứu nhằm cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho công tác bảo tồn bền vững tài nguyên rừng, đặc biệt là các loài TV TGQH, thông qua tích hợp dữ liệu thực địa với công nghệ viễn thám, GIS và học máy nhằm nâng cao hiệu quả giám sát, dự báo và quản lý.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- + Phân loại và xác định trạng thái rừng theo mức tác động tại VQG Tà Đùng dựa vào ảnh vệ tinh.
- + Ứng dụng mô hình phân bố loài (SDMs) nhằm hỗ trợ công tác điều tra và khảo sát thực địa.
- + Đánh giá đặc điểm đa dạng sinh học của các lâm phần tại VQG Tà Đùng.
- + Phân tích tác động của kịch bản biến đổi khí hậu đến sự thay đổi phân bố của các loài TGQH, qua đó nhận diện nguy cơ suy giảm đa dạng sinh học trong tương lai.
- + Xác định các vùng ưu tiên về đa dạng sinh học, từ đó đề xuất giải pháp bảo tồn và định hướng quản lý, sử dụng bền vững tài nguyên rừng tại VQG Tà Đùng.

3. Phạm vi nghiên cứu

- Phạm vi đối tượng

Đối tượng nghiên cứu là 10 loài cây gỗ TGQH trong tổng số 21 loài được thống kê tại VQG Tà Đùng, bao gồm: Xá xị (*Cinnamomum balansae*), Dầu baid (*Dipterocarpus baudii*), Trầm hương (*Aquilaria crassna*), Dầu hasselt (*Dipterocarpus hasseltii*), Hồng quang (*Rhodoleia championii*), Thông tre (*Podocarpus neriifolius*), Thông nang (*Dacrycarpus imbricatus*), Dẻ langbian (*Quercus langbianensis*), Sồi ba cạnh (*Trigonobalanus verticillata*), và Trám nâu (*Canarium littorale*).

- Phạm vi không gian

Nghiên cứu được thực hiện trên địa bàn VQG Tà Đùng, nơi có sự phân bố đặc trưng của các loài được nghiên cứu. Đây cũng là khu vực từng chịu áp lực về sử dụng đất và biến đổi rừng trong quá khứ. Mặc dù hiện nay đã được bảo vệ tốt hơn, song khu vực này vẫn tiềm ẩn nguy cơ bị tác động bởi các hoạt động phát triển kinh tế – xã hội vùng đệm và ảnh hưởng của biến đổi khí hậu.

- Phạm vi nội dung

Luận án tập trung chủ yếu vào các vấn đề chính sau:

- + Đánh giá hiện trạng, cấu trúc đa dạng sinh học của lâm phần.
- + Ứng dụng viễn thám, GIS, mô hình phân bố loài (SDMs) và học máy để dự báo phân bố tiềm năng của các loài dưới các kịch bản biến đổi khí hậu.
- + Phân tích các vùng phân bố trọng điểm, làm cơ sở cho bảo tồn và quản lý.

Nghiên cứu không đi sâu vào phân loại hình thái, giải phẫu hay di truyền học của loài, mà chỉ tập trung vào khía cạnh phân bố không gian – thời gian và tác động của các nhân tố môi trường, khí hậu.

- Phạm vi thời gian

Dữ liệu phân tích bao gồm chuỗi số liệu 19 biến khí hậu trung bình giai đoạn 1970–2000, số liệu ảnh viễn thám, GIS và thực địa trong giai đoạn 2022–2024, đồng thời sử dụng các kịch bản biến đổi khí hậu đến năm 2021 và 2100 để dự báo.

4. Những đóng góp mới của đề tài

Luận án mang lại một số đóng góp mới trong lĩnh vực sinh thái và bảo tồn TV TGQH:

i) Tiếp cận liên ngành tích hợp giữa công nghệ và sinh thái học:

Luận án áp dụng cách tiếp cận đa phương pháp, kết hợp dữ liệu thực địa với các công cụ hiện đại như viễn thám, GIS, học máy và phân tích thống kê nhằm nâng cao độ tin cậy trong phân tích đa dạng sinh học và mô hình hóa phân bố loài TGQH.

ii) Đánh giá hiệu quả ứng dụng mô hình SDMs cho các loài TGQH:

Kết quả nghiên cứu của luận án cho thấy tính khả thi của mô hình phân bố loài SDMs với các loài TGQH có mật độ thấp và nhạy cảm với tác động môi trường trong phạm vi nghiên cứu hẹp như vườn quốc gia. SDMs thể hiện hiệu quả trong việc hỗ trợ giám sát sinh cảnh, cảnh báo sớm nguy cơ suy giảm và phục vụ quy hoạch bảo tồn các loài TGQH ở quy mô địa phương.

iii) Mô hình hóa tác động của biến đổi khí hậu theo từng loài cụ thể:

Luận án đã xây dựng được các mô hình dự báo phân bố tiềm năng cho 10 loài TGQH theo kịch bản biến đổi khí hậu SSP5-8.5 với các mốc thời gian trong thế kỷ XXI. Kết quả chỉ ra xu hướng thu hẹp sinh cảnh và nguy cơ suy giảm đa dạng sinh học, cung cấp cơ sở khoa học cho các chiến lược bảo tồn thích ứng với biến đổi khí hậu tại địa phương.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

5.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết và phương pháp luận trong nghiên cứu đa dạng sinh học thông qua việc tích hợp dữ liệu thực địa, ảnh viễn thám, GIS, thuật toán MaxEnt và phân tích thống kê. Việc ứng dụng mô hình phân bố loài (SDMs) không chỉ giúp xác định sinh cảnh tiềm năng và dự báo sự phân bố của các loài dưới tác động của biến đổi khí hậu, mà còn hỗ trợ nhận diện các khu vực ưu tiên cho công tác bảo tồn. Kết quả nghiên cứu góp phần mở rộng khả năng ứng dụng các công cụ mô hình hóa hiện đại vào lĩnh vực bảo tồn thực vật rừng.

5.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học trong công tác quản lý bảo tồn, giám sát các loài TGQH và hỗ trợ chiến lược quản lý đa dạng sinh học dài hạn tại các khu rừng đặc dụng nói chung và VQG Tà Đùng nói riêng trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Hướng tiếp cận tích hợp giữa dữ liệu thực địa, viễn thám và học máy có thể được áp dụng mở rộng cho các hệ sinh thái rừng tự nhiên khác tại Việt Nam, góp phần nâng cao hiệu quả quản lý và sử dụng bền vững tài nguyên rừng.

6. Kết cấu luận án

Luận án có 150 trang với 20 Bảng và 62 Hình. Gồm có phần Mở đầu (5 trang), Chương 1: Tổng quan vấn đề nghiên cứu (25 trang), Chương 2: Đối tượng, phạm vi, nội dung và phương pháp nghiên cứu (26 trang), Chương 3: Kết quả nghiên cứu và thảo luận (76 trang), Kết luận, tồn tại và kiến nghị (5 trang); Tài liệu tham khảo (13 trang); và Phụ lục.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Thực vật thân gỗ quý hiếm – Khái niệm và ý nghĩa.

Theo IUCN (2021), thực vật thân gỗ quý hiếm (TGQH) là nhóm loài có giá trị sinh thái và kinh tế cao nhưng đang bị đe dọa nghiêm trọng do khai thác quá mức và thiếu biện pháp bảo vệ hiệu quả. Các hệ thống phân loại quốc tế (IUCN), văn bản pháp lý quốc gia (Sách đỏ Việt Nam 2007, Nghị định 84/2021/NĐ-CP) và Công ước CITES là cơ sở quan trọng trong quản lý và bảo tồn nhóm loài này. Trong nghiên cứu, việc lựa chọn các loài TGQH tại VQG Tà Đùng dựa trên ba nhóm tiêu chí: (i) cơ sở khoa học – pháp lý; (ii) đặc điểm sinh thái và mức độ suy giảm tại địa phương; và (iii) tính khả thi trong bảo tồn thực địa.

TGQH đóng vai trò thiết yếu trong duy trì cấu trúc và chức năng hệ sinh thái rừng, cung cấp giá trị kinh tế thông qua các sản phẩm như gỗ quý, dược liệu và phục vụ công nghiệp, đồng thời có ý nghĩa văn hóa – xã hội sâu sắc trong đời sống cộng đồng. Bảo tồn và phát triển bền vững nhóm loài này không chỉ góp phần bảo vệ đa dạng sinh học mà còn thúc đẩy sinh kế địa phương, giữ gìn tri thức bản địa và thực hiện các cam kết quốc tế về phát triển bền vững và thích ứng với biến đổi khí hậu.

1.2. Viễn thám và GIS trong nghiên cứu tài nguyên rừng.

1.2.1. Nguyên lý và ứng dụng cơ bản.

Viễn thám, phổ biến từ thập niên 1960, là phương pháp thu thập thông tin gián tiếp qua bức xạ điện từ, cho phép giám sát biến động môi trường, khí hậu và đa dạng sinh học với độ chính xác cao (Lillesand et al., 2014; Zhang et al., 2024). Song song, GIS là nền tảng công nghệ hỗ trợ tích hợp, phân tích và trực quan hóa dữ liệu không gian, đóng vai trò thiết yếu trong quy hoạch và bảo vệ tài nguyên thiên nhiên (Nguyễn T.T. Hương, 2022). Sự kết hợp giữa viễn thám và GIS giúp phân tích sâu về cấu trúc hệ sinh thái và biến động lớp phủ thực vật (Wulder et al., 2004).

Hiện nay, VT-GIS là công cụ chiến lược trong giám sát rừng và thực thi chính sách. Các nền tảng như SEPAL (FAO), EUDR (EU), FIRMS (NASA) và Global Forest Watch cung cấp dữ liệu thời gian thực phục vụ quản lý rừng toàn cầu. Tại Việt Nam, Hệ thống FRMS, REDD+ và chi trả dịch vụ môi trường rừng (PES) đã tích hợp mạnh mẽ dữ liệu VT-GIS nhằm đảm bảo minh bạch và hiệu quả trong quản lý tài nguyên. Những ứng dụng này khẳng định vai trò trung tâm của VT-GIS trong nghiên cứu, hoạch định chính sách và giám sát bền vững tài nguyên rừng.

1.2.2. Ảnh SE-2A trong phân tích rừng.

Dữ liệu viễn thám từ vệ tinh Sentinel-2A, thuộc chương trình Copernicus của Cơ quan Vũ trụ châu Âu (ESA), nổi bật nhờ bộ cảm biến 13 dải phổ từ vùng ánh sáng khả kiến đến cận hồng ngoại, với độ phân giải không gian từ 10–60 m và chu kỳ lặp 5 ngày. Với khả năng cung cấp dữ liệu liên tục, chi tiết và miễn phí, SE-2A đặc biệt hữu ích trong giám sát lớp phủ thực vật, biến động sử dụng đất và quản lý tài nguyên rừng (ESA, 2021).

Trong nghiên cứu này, dữ liệu SE-2A cấp độ xử lý Level-1C được lựa chọn nhờ các ưu điểm: truy cập mở, độ phân giải 10 m phù hợp với phân tích thảm thực vật, và hệ dải phổ đa dạng cho phép đánh giá hiệu quả lớp phủ bề mặt. Dữ liệu Level-1C đã được hiệu chỉnh hình học, phản xạ chuẩn hóa và định vị theo hệ tọa độ UTM/WGS84, giúp tăng độ chính xác và chủ động trong quy trình xử lý, phân loại thảm phủ và xây dựng bản đồ trạng thái rừng.

1.2.3. Phân loại ảnh vệ tinh bằng thuật toán phân loại Support Vector Machine (SVM).

Phân loại ảnh số là bước quan trọng trong xây dựng bản đồ hiện trạng rừng, nhằm nhận diện và phân nhóm các đối tượng dựa trên đặc điểm quang phổ. Trong đó, việc lựa chọn thuật toán phân loại phù hợp có vai trò then chốt đối với độ chính xác kết quả (Nguyễn T.T. Hương, 2021; Aduana et al., 2022). Trong số các thuật toán hiện đại, Support Vector Machine (SVM) nổi bật với khả năng phân loại hiệu quả trong môi trường dữ liệu phức tạp, đa chiều và dễ nhiễu – đặc biệt phù hợp với dữ liệu viễn thám lâm nghiệp (Mountrakis et al., 2011; Ka Hei et al., 2024).

SVM hoạt động bằng cách tìm siêu phẳng tối ưu phân tách các lớp dữ liệu với khoảng cách (margin) lớn nhất, giúp tăng độ ổn định và chính xác. Nhờ khả năng xử lý phi tuyến thông qua ánh xạ không gian đặc trưng và áp dụng lề mềm, SVM cho thấy tính linh hoạt cao trong thực tiễn (Zhu et al., 2017). Các nghiên cứu quốc tế và trong nước đã chứng minh hiệu quả của SVM, vượt trội so với các phương pháp truyền thống như MLC hay Random Forest trong phân loại thảm phủ và ước tính sinh khối rừng (Michellini et al., 2022; Nguyễn T.T. Hương & Đoàn Minh Trung, 2020; Trịnh Thu Thủy & Lê Như Nga, 2025).

Trên cơ sở đó, luận án lựa chọn thuật toán SVM để phân loại trạng thái rừng tại Vườn quốc gia Tà Đùng, với kỳ vọng mang lại độ chính xác cao và dữ liệu đầu vào đáng tin cậy cho các phân tích tiếp theo trong điều kiện rừng nhiệt đới Việt Nam.

1.3. Tổng quan về nghiên cứu đa dạng sinh học của thực vật thân gỗ.

1.3.1. Các chỉ số đa dạng sinh học.

Các chỉ số đa dạng sinh học là công cụ thiết yếu trong nghiên cứu và quản lý hệ sinh thái, cho phép định lượng, so sánh và theo dõi sự thay đổi đa dạng loài theo thời gian và không gian. Dựa trên hai cách tiếp cận chính – phân tích thống kê mật độ loài và lý thuyết thông tin – các chỉ số như Margalef (d), Shannon-Wiener (H') và Simpson (D) đã được sử dụng rộng rãi để đánh giá độ phong phú và đồng đều của các loài trong quần xã.

Những chỉ số này được ứng dụng hiệu quả trong phân tích đa dạng alpha, beta và gamma tại nhiều hệ sinh thái, cho phép lượng hóa ảnh hưởng của điều kiện sinh cảnh đến đa dạng loài (Sabatini et al., 2022; Sinha et al., 2018). Tại Việt Nam, nhiều nghiên cứu đã áp dụng thành công các chỉ số này trong rừng đặc dụng và rừng ngập mặn, phản ánh ảnh hưởng của địa hình, tác động khai thác và trạng thái rừng đến mức độ đa dạng (Nguyễn Văn Hành, 2013; Phạm Hồng Tính & Mai Sỹ Tuấn, 2016; Dương Trung Hiếu et al., 2020).

Trên cơ sở lý thuyết và thực tiễn, luận án đã lựa chọn các chỉ số d , H' , D , IVI và IR để phân tích cấu trúc đa dạng thực vật thân gỗ tại VQG Tà Đùng, nhằm cung cấp dữ liệu khoa học phục vụ quản lý và bảo tồn rừng bền vững.

1.3.2. Ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS trong nghiên cứu đa dạng sinh học.

Công nghệ viễn thám và GIS đã chứng minh hiệu quả trong nghiên cứu đa dạng sinh học nhờ khả năng thu thập và phân tích dữ liệu không gian – thời gian. Việc tích hợp ảnh vệ tinh với dữ liệu thực địa và công cụ phân tích không gian như ArcGIS, QGIS, cùng phần mềm thống kê R Studio, đã mở rộng khả năng định lượng và giám sát các chỉ số đa dạng sinh học. Nhiều nghiên cứu quốc tế và trong nước đã áp dụng các kỹ thuật này để xây dựng bản đồ phân bố loài, phân tích ảnh hưởng của địa hình (độ cao, độ dốc) đến cấu trúc quần xã thực

vật, từ đó phục vụ quản lý và bảo tồn tài nguyên sinh học một cách bền vững. Tuy nhiên, tại Việt Nam, các nghiên cứu tích hợp viễn thám, GIS và R Studio trong đánh giá thực vật thân gỗ quý hiếm vẫn còn hạn chế. Do đó, luận án này hướng đến việc ứng dụng các công nghệ hiện đại nhằm phân tích đa dạng loài theo yếu tố địa hình tại khu vực nghiên cứu, đóng góp cơ sở khoa học cho chiến lược bảo tồn thích ứng với biến đổi khí hậu.

1.4. Sử dụng SDMs để dự báo phân bố tiềm năng theo các kịch bản biến đổi khí hậu và xác định các điểm hotspots đa dạng sinh học.

1.4.1. Khái niệm về kịch bản biến đổi khí hậu và các biến khí hậu.

Biến đổi khí hậu ảnh hưởng sâu rộng đến hệ sinh thái và sự phân bố của các loài, đặc biệt là nhóm thực vật thân gỗ quý hiếm (TGQH) có phạm vi phân bố hẹp và nhạy cảm sinh thái cao (IPCC, 2023). Để đánh giá tác động này, các mô hình khí hậu toàn cầu EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL, thuộc bộ CMIP6, đã được lựa chọn nhằm mô phỏng viễn cảnh khí hậu theo kịch bản phát thải cao SSP5-8.5 – một kịch bản đại diện cho điều kiện khí hậu cực đoan nhất trong thế kỷ XXI (Dobler et al., 2024).

Dữ liệu khí hậu được trích xuất từ bộ cơ sở WorldClim và chuyển đổi thành 19 biến sinh khí hậu (BIO1–BIO19), phản ánh các yếu tố nền tảng như nhiệt độ và lượng mưa, từ đó tích hợp vào mô hình phân bố loài (SDMs) để mô phỏng sự thay đổi hiện tại và tiềm năng của các loài dưới tác động khí hậu tương lai (Thuiller et al., 2009).

Phân tích tổng quan cho thấy phương pháp tiếp cận này không chỉ cung cấp cơ sở khoa học để đánh giá rủi ro sinh thái ở mức cao, mà còn hỗ trợ xây dựng chiến lược thích ứng và bảo tồn chủ động, đặc biệt trong bối cảnh khí hậu ngày càng biến động. Luận án đã áp dụng mô hình này nhằm định lượng tác động khí hậu đến phân bố thực vật TGQH tại khu vực nghiên cứu, góp phần nâng cao năng lực quy hoạch và quản lý tài nguyên rừng theo hướng bền vững.

1.4.2. Giới thiệu về mô hình SDMs.

Mô hình SDMs khi được kết hợp với viễn thám, GIS và học máy (MaxEnt), là công cụ hiệu quả trong nghiên cứu sinh thái và bảo tồn đa dạng sinh học. SDMs dựa trên mối quan hệ giữa phân bố loài và các yếu tố môi trường để xác định phạm vi hiện tại và tiềm năng, từ đó nhận diện các vùng ưu tiên bảo tồn (hotspots) và tối ưu hóa công tác điều tra thực địa.

Tại Việt Nam, ứng dụng SDMs vào phân tích các loài thực vật quý hiếm trong phạm vi phân bố hẹp như các VQG hay Khu bảo tồn còn hạn chế. Vì vậy, luận án này triển khai thử nghiệm ứng dụng mô hình MaxEnt tích hợp dữ liệu viễn thám và GIS để đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến phân bố các loài TV TGQH tại VQG Tà Đùng, góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho công tác bảo tồn và quy hoạch sinh cảnh hiệu quả.

1.4.3. Ứng dụng mô hình SDMs trong dự báo phân bố loài và xác định các điểm nóng đa dạng sinh học.

Trong những năm gần đây, mô hình phân bố sinh cảnh tiềm năng (SDMs) đã trở thành công cụ hiệu quả trong sinh thái học nhằm mô phỏng và dự báo phân bố loài dưới tác động của biến đổi khí hậu. Trong đó, MaxEnt là một trong những thuật toán phổ biến nhất nhờ khả năng xử lý tốt dữ liệu hiện diện hạn chế và hiệu quả cao trong mô phỏng sinh cảnh (Zhang et al., 2024; Xue et al., 2024). Việc tích hợp MaxEnt với dữ liệu viễn thám, GIS và các kịch bản khí hậu như SSP5-8.5 cho phép xây dựng bản đồ phân bố hiện tại và tiềm năng, hỗ trợ định hướng chiến lược bảo tồn thích ứng với biến đổi khí hậu.

Tại Việt Nam, MaxEnt đã bước đầu được ứng dụng để phân bố một số loài thực vật quý hiếm, tuy nhiên phần lớn mới dừng ở mức mô phỏng hiện trạng mà chưa tích hợp đầy đủ các kịch bản khí hậu tương lai hoặc tập trung vào nhóm loài TGQH – vốn có giá trị sinh thái và bảo tồn cao. Các nghiên cứu gần đây cho thấy tiềm năng to lớn của việc tích hợp dữ liệu viễn thám (SE-2, Landsat, MODIS), mô hình số địa hình (DEM), GIS và công cụ thống kê (RStudio) trong phân tích không gian – thời gian phân bố loài và xác định các điểm nóng đa dạng sinh học (Wang et al., 2019; Choe et al., 2021).

Trên cơ sở đó, luận án đã lựa chọn phương pháp SDMs với thuật toán MaxEnt, kết hợp dữ liệu thực địa, ảnh vệ tinh và các kịch bản biến đổi khí hậu để mô phỏng và dự báo phân bố các loài thực vật TGQH tại khu vực nghiên cứu. Cách tiếp cận này không chỉ lấp đầy khoảng trống nghiên cứu trong nước mà còn cung cấp cơ sở khoa học thiết thực cho công tác quy hoạch, quản lý và bảo tồn đa dạng sinh học theo hướng chủ động và bền vững.

1.5. Thảo luận

Mặc dù việc tích hợp dữ liệu thực địa, viễn thám, GIS và mô hình SDMs (đặc biệt MaxEnt) đã chứng minh hiệu quả trong nghiên cứu phân bố loài và bảo tồn đa dạng sinh học, nhưng tại Việt Nam các nghiên cứu ứng dụng này còn hạn chế. Các khoảng trống tồn tại gồm: thiếu mô hình tích hợp cho nhóm TGQH, chưa phân

tích đầy đủ tác động địa hình đến đa dạng sinh học, ít sử dụng dữ liệu khí hậu tương lai, và chưa tận dụng SDMs để hỗ trợ điều tra thực địa.

Xuất phát từ đó, luận án phát triển cách tiếp cận tích hợp (thực địa – viễn thám – GIS – MaxEnt – GEE – RStudio) để: (i) Phân loại và xây dựng bản đồ trạng thái rừng dựa vào ảnh vệ tinh; (ii) Ứng dụng mô hình SDMs để xác định vùng sinh thái tiềm năng, hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa; (iii) Tính toán chỉ số đa dạng sinh học và phân tích tác động của địa hình (độ dốc, độ cao) đến đa dạng sinh học của lâm phần; (iv) Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai; (v) Xác định điểm hotspots đa dạng sinh học và đề xuất giải pháp bảo tồn các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng.

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

2.1. Đối tượng nghiên cứu.

+ Từ tổng số 21 loài thực vật thân gỗ quý hiếm được ghi nhận tại VQG Tà Đùng, nghiên cứu lựa chọn 10 loài tiêu biểu để phân tích, dựa trên các tiêu chí: (i) giá trị bảo tồn theo IUCN và Sách Đỏ Việt Nam; (ii) vai trò sinh thái trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới thường xanh; (iii) giá trị kinh tế – văn hóa và mức độ bị khai thác; (iv) độ tin cậy của dữ liệu phân bố; và (v) ưu tiên bảo tồn theo đánh giá của cán bộ VQG. Việc phân tích các loài này cho phép đánh giá hiện trạng và dự báo phân bố dưới tác động khí hậu, phục vụ quy hoạch bảo tồn bền vững.

+ 10 loài TV TGQH như sau: Xá xị (*Cinnamomum balansae*), Dầu baid (*Dipterocarpus baidii*), Trầm hương hay còn gọi là Gió bầu (*Aquilaria crassna*), Dầu hasselt (*Dipterocarpus hasseltii*), Hồng quang (*Rhodoleia championii*), Thông tre hay còn gọi là thông tre lá dài (*Podocarpus neriifolius*), Thông nang (*Dacrycarpus imbricatus*), Dẻ langbian (*Quercus langbianensis*), Sồi ba cạnh (*Trigonobalanus verticillata*) và Trám nâu (*Canarium littorale*).

+ Địa điểm nghiên cứu: VQG Tà Đùng, tỉnh Đắk Nông (nay là VQG Tà Đùng, tỉnh Lâm Đồng).

2.2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu.

2.2.1. Nội dung nghiên cứu

- (i) Phân loại và xây dựng bản đồ trạng thái rừng dựa vào ảnh vệ tinh;
- (ii) Ứng dụng mô hình SDMs để xác định vùng sinh thái tiềm năng, hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa;
- (iii) Tính toán chỉ số đa dạng sinh học và phân tích tác động của địa hình đến đa dạng sinh học của lâm phần;
- (iv) Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai;
- (v) Xác định điểm hotspots đa dạng sinh học và đề xuất giải pháp bảo tồn các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng.

2.2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.2.1. Phương pháp luận

Nghiên cứu áp dụng phương pháp tổng hợp, kết hợp tiếp cận hệ thống với các công nghệ hiện đại như viễn thám, GIS và học máy nhằm phân tích phân bố, đa dạng sinh học và định hướng bảo tồn các loài TV TGQH tại VQG Tà Đùng trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Dữ liệu thực địa được tích hợp với phân tích thống kê hiện đại thông qua phần mềm RStudio và các thư viện mã nguồn mở (raster, sp, dismo...) để xây dựng mô hình SDMs. Các công cụ GIS như QGIS và ArcGIS hỗ trợ xử lý dữ liệu địa không gian, biên tập bản đồ và trực quan hóa kết quả. Sự kết hợp giữa phần mềm mã nguồn mở và thương mại giúp tối ưu hóa phân tích, nâng cao khả năng ứng dụng và chuyên giao kết quả nghiên cứu.

2.2.2.2. Phương pháp cụ thể

A) Cơ sở lựa chọn đối tượng nghiên cứu.

Quy trình lựa chọn đối tượng nghiên cứu tại VQG Tà Đùng được thực hiện dựa trên danh sách 21 loài cây gỗ quý hiếm, kết hợp phương pháp MCDA và PRA để phân tích năm nhóm tiêu chí chính: (i) cơ sở khoa học và pháp lý; (ii) tính đặc thù sinh thái và nguy cơ suy giảm; (iii) giá trị kinh tế – văn hóa; (iv) tính sẵn có và độ tin cậy của dữ liệu; (v) sự ưu tiên trong quản lý. Ý kiến chuyên gia được lượng hóa để lựa chọn các loài đáp ứng tốt nhất các tiêu chí này. Kết quả, 10 loài tiêu biểu được xác định, trong đó có cả những loài chưa bị đe dọa nghiêm trọng theo phân loại quốc tế nhưng có nguy cơ cao theo đánh giá thực địa. Quy trình này đảm bảo tính khoa học, khách quan và hỗ trợ hiệu quả cho công tác bảo tồn và phục hồi rừng tại địa phương.

B) Phát triển cơ sở dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu không gian và phi không gian từ nguồn sơ cấp và thứ cấp, bao gồm:

- + Bản đồ chuyên đề: Bản đồ hiện trạng rừng (2021, 2024), bản đồ địa hình... từ VQG Tà Đùng và các đề tài liên quan, định dạng số (shapefile, raster), tích hợp trong GIS.
- + Dữ liệu khí hậu: 19 biến khí hậu từ WorldClim (1970–2000) và kịch bản tương lai SSP5-8.5 từ hai mô hình khí hậu toàn cầu (EC-Earth3-Veg, HadGEM3-GC31-LL, thuộc CMIP6).
- + Ảnh vệ tinh và NDVI: Ảnh SE-2 năm 2022 và chỉ số NDVI tính từ ảnh này trên nền tảng GEE.
- + Dữ liệu địa hình và đất: Độ dốc, độ cao, hướng phơi từ DEM; độ pH từ SoilGrids.

+ Dữ liệu thực địa: Tọa độ 584 điểm hiện diện (gồm 156 điểm kế thừa từ các dự án trước và 428 điểm khảo sát mới) và thông số sinh thái thu thập từ 100 ô mẫu (35 ô kế thừa và 65 ô mới)

C) Phân loại và xây dựng bản đồ trạng thái rừng dựa vào ảnh vệ tinh

Trong nghiên cứu này, ảnh vệ tinh SE-2 năm 2022 được thu thập qua nền tảng GEE cho hai mùa (mùa khô và mùa mưa) tại Vườn Quốc gia Tà Đùng. Tổng cộng 17 cảnh ảnh được lựa chọn, sau khi tiền xử lý bằng hiệu chỉnh hình học, lọc mây và nội suy để đảm bảo độ chính xác. Sáu kênh phổ chính (B2, B3, B4, B8, B11, B12) cùng chỉ số NDVI, độ cao và độ dốc được chuẩn hóa và đưa về hệ tọa độ UTM Zone 48.

Bước đầu của nghiên cứu là tạo mặt nạ rừng để tách rừng tự nhiên khỏi các loại đất khác. Quá trình này sử dụng phân loại có giám sát nhị phân (rừng/không rừng) với vùng huấn luyện được khoanh trên ảnh vệ tinh và ảnh nền độ phân giải cao. Mô hình SVM được huấn luyện để phân loại toàn khu vực, kết quả được hậu xử lý nhằm giảm nhiễu và cải thiện độ chính xác. Mặt nạ rừng sau cùng được dùng để cắt ảnh vệ tinh, giữ lại diện tích rừng tự nhiên làm cơ sở cho các bước phân tích tiếp theo.

Dữ liệu mẫu phục vụ phân loại thảm phủ được thu thập ngẫu nhiên và xác minh qua ba nguồn: bản đồ hiện trạng, ảnh độ phân giải cao (Google Earth, PlanetScope) và khảo sát thực địa. Tổng cộng 600 điểm mẫu được thu thập và chia theo tỷ lệ 65:35 để huấn luyện và kiểm định mô hình. Thuật toán SVM được sử dụng để phân loại ảnh viễn thám. Độ chính xác phân loại được đánh giá qua các chỉ số: độ chính xác tổng thể (OA), độ chính xác người sử dụng (UA), độ chính xác người sản xuất (PA), và hệ số Kappa. Sử dụng phần mềm QGIS và ArcGIS để biên tập bản đồ trạng thái rừng.

D) Ứng dụng mô hình SDMs để xác định vùng sinh thái tiềm năng, hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa

Sử dụng thuật toán MaxEnt để mô hình hóa SDMs dự báo các vùng sinh cảnh tiềm năng cho 10 loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng. Dữ liệu đầu vào bao gồm 156 điểm hiện diện loài được kế thừa từ các nghiên cứu trước, kết hợp với 25 biến môi trường (khí hậu, địa hình, thảm phủ, NDVI, pH đất). Các biến môi trường được chuẩn hóa và phân tích cộng tuyến bằng Pearson, PCA và JackKnife; kết quả giữ lại 10 biến đầu vào để xây dựng mô hình.

Hiệu suất mô hình được đánh giá bằng chỉ số AUC thông qua xác thực chéo (k-fold = 10). Mô hình được huấn luyện với 70% điểm hiện diện và kiểm định với 30% còn lại. Kết quả dự báo được phân loại thành bốn mức độ phù hợp sinh cảnh (từ không phù hợp đến phù hợp cao). Quá trình mô hình hóa, phân tích và trực quan hóa được thực hiện trên nền tảng RStudio, kết hợp với QGIS/ArcGIS để biên tập bản đồ. Độ chính xác mô hình được kiểm chứng bằng điều tra thực địa tại các vùng dự báo có xác suất hiện diện trung bình–cao và một số điểm dự báo vắng mặt, nhằm đánh giá tính phân biệt của mô hình.

E) Phương pháp thiết lập ô mẫu, thu thập dữ liệu thực địa

Tuyến điều tra và vị trí các ô mẫu dự kiến được xác định dựa trên sự kết hợp giữa kết quả mô hình SDMs (xác định các khu vực có xác suất hiện diện loài) và thông tin sơ bộ thu thập từ thảo luận có sự tham gia của cán bộ VQG và người dân. Các OTC được bố trí dọc theo tuyến điều tra địa hình từ chân núi lên các đai cao hơn, theo phương pháp bán định hướng (Gillison & Brewer, 1985; Whittaker, 1967). Dựa trên kết quả tổng hợp, 100 ô tiêu chuẩn (OTC), mỗi ô có diện tích 900 m² (30×30 m) tương ứng với kích cỡ 3×3 pixel của ảnh SE – 2A, đã được thiết lập. Sau khi thiết lập ô mẫu ban đầu (OTC1), các ô tiếp theo (OTCn) được bố trí theo bốn hướng chính (Đông, Tây, Nam, Bắc), cách nhau 50 m. Nếu ghi nhận loài cây gỗ quý hiếm, hệ thống ô sẽ tiếp tục mở rộng theo nguyên tắc này cho đến khi không còn phát hiện thêm loài nghiên cứu. Trong mỗi ô, các cá thể cây có đường kính ngang ngực ($D_{1.3}$) ≥ 6 cm được điều tra theo mẫu phiếu tiêu chuẩn. Các thiết bị chuyên dụng như GPS, máy đo laser, thước dây và máy đo pH được sử dụng để đảm bảo độ chính xác của số liệu. Để định danh loài cây gỗ, nhóm nghiên cứu mời chuyên gia thực vật học cùng tham gia khảo sát thực địa. Loài được nhận diện dựa trên đặc điểm hình thái (lá, hoa) và đặc điểm gỗ lõi sau khi đẽo vỏ gốc cây – phương pháp hữu hiệu với các loài không có hoa, quả tại thời điểm khảo sát (Bridson & Forman, 1992). Trong tổng số 100 ô mẫu, có 65 ô được thiết lập mới trong khuôn khổ luận án và 35 ô được kế thừa từ các dự án trước đã triển khai tại VQGTà Đùng.

F) Tính toán chỉ số đa dạng sinh học và phân tích tác động của địa hình đến đa dạng sinh học của lâm phần.

Phân tích đa dạng sinh học được thực hiện thông qua việc tính toán các chỉ số sinh thái học gồm: Tổ thành loài (IVI), chỉ số phong phú Margalef (d), chỉ số đa dạng Shannon–Wiener (H'), Simpson (D) và chỉ số loài hiếm (IR). Các chỉ số này phản ánh mức độ phong phú, phân bố và tần suất xuất hiện của loài trong quần xã và được tính toán bằng gói Vegan trong RStudio.

Để đánh giá ảnh hưởng của yếu tố địa hình, dữ liệu độ cao và độ dốc được trích xuất từ mô hình số độ cao (DEM) với độ phân giải 30m, sau đó phân cấp thành 5 đai cao (H2: 600–800m đến H6: >1400m) và 4 nhóm độ dốc (S1: <15°, S2: 15–20°, S3: 20–25°, S4: >25°). Chỉ số Jaccard và phương pháp phân cấp Ward.D2 được sử dụng để đo lường mức độ tương đồng về thành phần loài giữa các nhóm địa hình. Phân tích đa chiều phi định lượng (NMDS) được sử dụng nhằm nhận diện xu hướng biến đổi trong cấu trúc lâm phần theo độ cao và

độ dốc. Ngoài ra, đặc điểm tái sinh tự nhiên của lâm phần cũng được phân tích theo các đai cao và cấp độ dốc, từ đó đánh giá tác động của địa hình đến khả năng phục hồi của lâm phần.

Toàn bộ quá trình xử lý và phân tích dữ liệu được thực hiện trong môi trường RStudio, với sự hỗ trợ của các gói chuyên biệt phục vụ phân tích sinh thái và thống kê đa biến.

F) Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai.

Thuật toán MaxEnt được ứng dụng để xây dựng mô hình SDMs tiềm năng cho 10 loài nghiên cứu dưới các kịch bản biến đổi khí hậu. Dữ liệu đầu vào gồm 584 điểm hiện diện loài (156 điểm kế thừa, 428 điểm khảo sát mới), 10 biến môi trường chính được lựa chọn thông qua phân tích Pearson, PCA và Jackknife. Dữ liệu khí hậu tương lai được tải từ hai mô hình CMIP6 (EC-Earth3-Veg, HadGEM3-GC31-LL) theo kịch bản SSP585 cho bốn giai đoạn từ 2021 đến 2100.

Mô hình MaxEnt được huấn luyện với 70% dữ liệu và kiểm định bằng 30% còn lại, sử dụng xác thực chéo ($k = 10$) và đánh giá hiệu suất bằng chỉ số AUC. Kết quả được phân thành bốn mức độ sinh cảnh tiềm năng và trực quan hóa qua bản đồ.

G) Xác định điểm hotspots đa dạng sinh học và đề xuất giải pháp bảo tồn các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng

Các điểm nóng (hotspots) đa dạng sinh học được xác định bằng phân tích chồng lớp giữa bản đồ phân bố tiềm năng của loài, hiện trạng thảm phủ, trạng thái rừng và mức độ tác động của con người. Dữ liệu mức độ tác động được thu thập qua quan sát trực tiếp và thảo luận với người dân và cán bộ VQG Tà Đùng, chia thành bốn cấp từ không bị tác động đến tác động cao. Những khu vực có sự chồng lấn giữa phân bố loài và vùng chịu tác động mạnh được xác định là điểm nóng cần ưu tiên bảo tồn. Phân tích được thực hiện trên RStudio, kết hợp ArcGIS và QGIS với các thư viện chuyên dụng.

Dựa trên kết quả nghiên cứu, nhóm thực hiện đã phối hợp với Ban Quản lý và cán bộ kỹ thuật VQG Tà Đùng để thảo luận, đánh giá thực trạng và đề xuất các giải pháp bảo tồn loài TV TGQH. Các giải pháp được xây dựng trên cơ sở kết hợp giữa dữ liệu khoa học và kinh nghiệm địa phương, đảm bảo tính khả thi và phù hợp với điều kiện sinh thái – xã hội của khu vực.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân loại và xây dựng bản đồ trạng thái rừng dựa vào ảnh vệ tinh.

3.1.1. Tiền xử lý ảnh và tạo mặt nạ rừng.

Dữ liệu ảnh SE-2A được thu thập theo ranh giới VQG Tà Đùng cho hai giai đoạn mùa khô (01/01–30/04/2022) và mùa mưa (01/05–31/12/2022). Sau quá trình tiền xử lý, tổng cộng 17 cảnh ảnh đủ điều kiện (tỷ lệ che phủ mây dưới 30%) đã được lựa chọn. Ảnh ở mức xử lý Level-1C được hiệu chỉnh hình học theo mô hình số độ cao (DEM) và đăng ký không gian với sai số dưới 1 pixel.

Bộ dữ liệu đầu vào bao gồm sáu kênh phổ chính (B2, B3, B4, B8, B11, B12) cùng với các thông số địa hình (độ cao, độ dốc) và chỉ số NDVI. Các thuật toán tạo mặt nạ mây và bóng mây đã được áp dụng nhằm loại bỏ nhiễu do điều kiện thời tiết. Dữ liệu ảnh sau đó được tổng hợp trung bình theo từng mùa khô và mùa mưa.



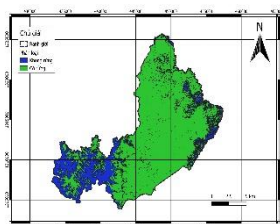
Một cảnh ảnh có mây



Một cảnh ảnh đã loại bỏ vùng đám mây

Hình 3.1. Xử lý ảnh vệ tinh SE-2A của VQG Tà Đùng

Phân loại nhị phân rừng/không rừng từ ảnh SE-2A cho thấy rừng tự nhiên tại VQG Tà Đùng được tách biệt rõ ràng với các loại hình sử dụng đất khác. Sau hậu xử lý, bản đồ mặt nạ rừng đạt tính liên tục cao, giảm nhiễu hiệu quả. Kết quả cho thấy diện tích rừng tự nhiên chiếm 17.261,97 ha (78,54%) trong tổng số 21.977,42 ha, là dữ liệu đầu vào quan trọng phục vụ phân tích và mô hình hóa tiếp theo.



STT	LULC	SE-2A	
		Diện tích (ha)	Tỷ lệ (%)
1	Có rừng	17.261,97	78,54
2	Không rừng	4.715,45	21,46
	Tổng cộng	21.977,42	100

Hình 3.2. Bản đồ phân tách rừng tại VQG Tà Đùng và diện tích (ha) từng lớp phủ

3.1.2. Phân loại trạng thái rừng và đánh giá kết quả phân loại.

3.1.2.1. Xây dựng bộ mẫu giải đoán.

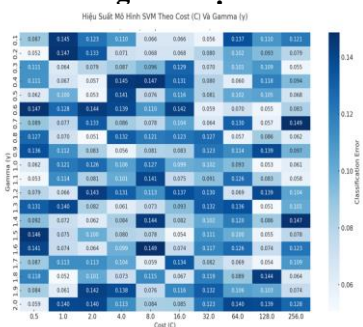
Quá trình thu thập mẫu giải đoán được tiến hành dựa trên bản đồ hiện trạng rừng, kết hợp với ảnh vệ tinh Sentinel-2A, PlanetScope, Google Earth và khảo sát thực địa. Các điểm mẫu được phân loại thành: (i) Rừng bị tác động ít; (ii) Rừng bị tác động trung bình; (iii) Rừng bị tác động mạnh; (iv) Đất khác.

Tổng cộng 600 điểm mẫu đã được thu thập, trong đó 390 điểm (65%) được sử dụng để huấn luyện mô hình phân loại SVM, và 210 điểm (35%) còn lại được dùng để kiểm định độ chính xác.

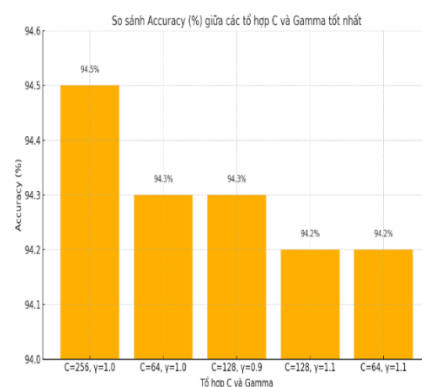
3.1.2.2. Phân loại trạng thái rừng theo mức độ tác động.

Quá trình phân loại được thực hiện trên ảnh vệ tinh SE-2A bằng thuật toán SVM với hàm kernel Radial Basis Function trong môi trường RStudio. Kết quả tại bảng 3.1 cho thấy tổ hợp tham số tối ưu là $C = 256$ và $\gamma = 1.0$, với sai số phân loại thấp (Classification Error = 0.055), tương đương độ chính xác 94.5%. Việc đánh giá hiệu quả mô hình được thực hiện thông qua phương pháp kiểm định chéo k-fold ($k = 10$), với vòng lặp thủ công `for(i in 1:10){}`. Độ chính xác tổng thể (OA) của mô hình đạt 85,24 %, với hệ số Kappa là 0,9 (Bảng 3.2 và Hình 3.3) cho thấy mức độ đồng thuận cao giữa phân loại mô hình và dữ liệu thực tế. Kết quả này nhất quán với nghiên cứu trước đó tại khu vực (Châu Thị Như Quỳnh, 2019). Kết quả phân loại trạng thái dưới mặt nạ rừng (Bảng 3.3) cho thấy trong tổng diện tích rừng tự nhiên với 17.261,97 ha, rừng ít bị tác động chiếm 62%, rừng bị tác động trung bình chiếm 20% và rừng bị tác động mạnh chiếm 18%. Phân bố không gian cho thấy rừng ít bị tác động tập trung chủ yếu tại khu vực lõi của VQG, phản ánh tính nguyên vẹn cao hơn, trong khi các diện tích rừng bị tác động mạnh thường xuất hiện ở vùng rìa rừng hoặc các khu vực tiếp giáp với đất nông nghiệp, nơi chịu áp lực lớn hơn từ hoạt động của con người.

Bảng 3.1 Hiệu suất mô hình SVM theo Cost (C) và Gamma (γ)

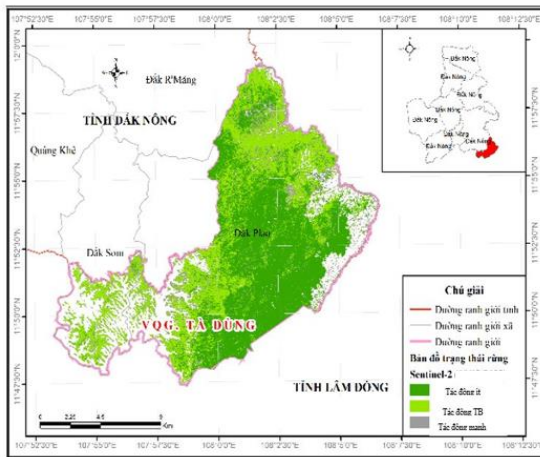


Parameter tuning of 'svm':
- sampling method: 10-fold cross validation
- best parameters:
cost gamma
256 1.0



Bảng 3.2. Đánh giá độ chính xác từng lớp phủ trạng thái rừng

SE-2A	Rừng bị TĐ ít	Rừng bị TĐ TB	Rừng bị TĐ mạnh	Tổng	User's Accuracy (%)
Rừng bị TĐ ít	92	3	5	100	92,0
Rừng bị TĐ TB	3	50	7	60	83,3
Rừng bị TĐ mạnh	5	8	37	50	74,0
Tổng	100	61	49	210	
Producer's Accuracy (%)	92,0	82,0	75,5	Overall Accuracy: 85,24% Kappa Coefficient: 0,76	



Hình 3.3. Bản đồ thăm phủ rừng VQG Tà Đùng

STT	Phân loại thăm phủ rừng	SE-2A	
		Diện tích (ha)	Tỷ lệ (%)
1	Rừng bị tác động ít	10.629,72	62%
2	Rừng bị tác động trung bình	3.520,88	20%
3	Rừng bị tác động mạnh	3.111,37	18%
4	Tổng cộng	17.261,97	100%

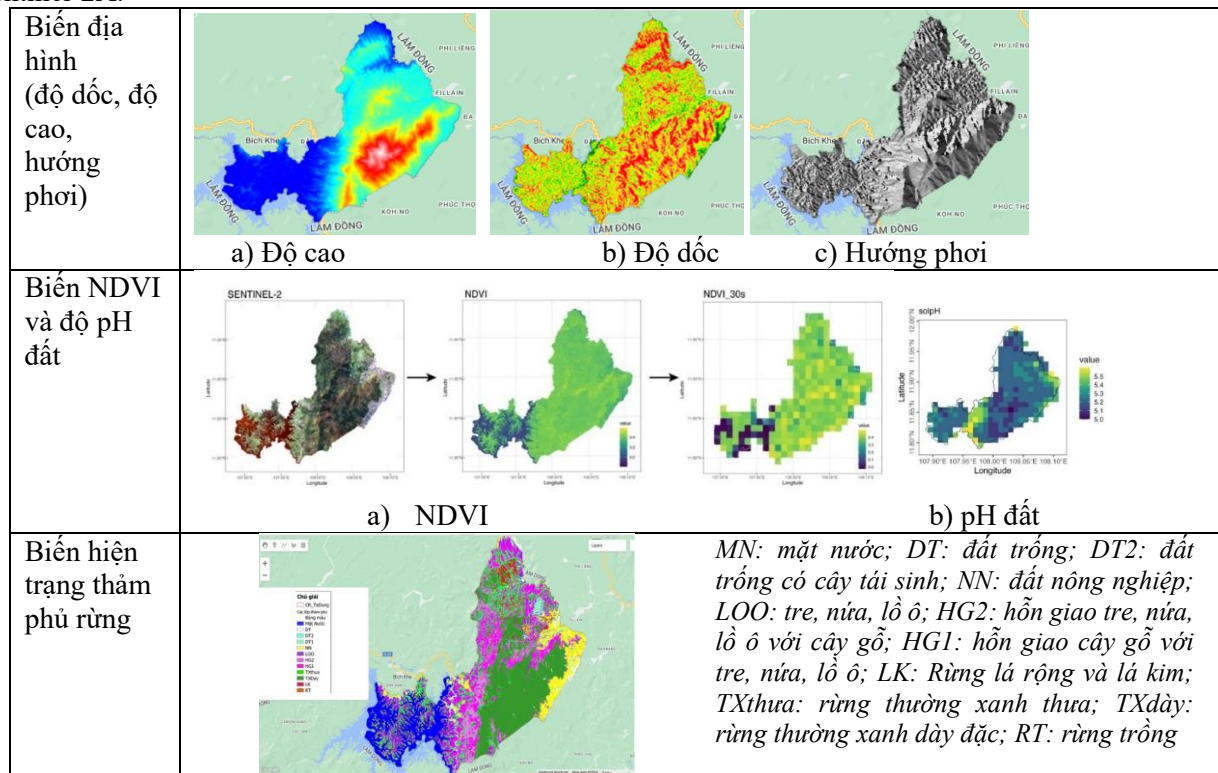
Bảng 3.3. Ước tính diện tích (ha) từng lớp phủ trạng thái rừng

3.2. Ứng dụng mô hình SDMs để xác định vùng sinh thái tiềm năng, hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa.

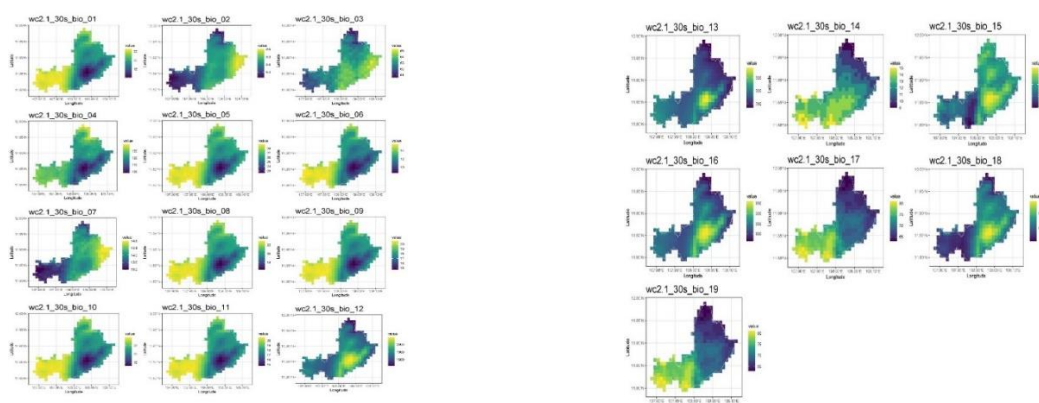
3.2.1. Cơ sở dữ liệu để xây dựng mô hình SDMs hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa.

3.2.1.1. Biến sinh thái và khí hậu.

Trong luận án này, 25 lớp dữ liệu môi trường (Hình 3.4 và Hình 3.5) đã được thu thập và xử lý để xây dựng mô hình SDMs cho 10 loài quan tâm, gồm: 19 biến khí hậu từ WorldClim, 3 biến địa hình (độ cao, độ dốc, hướng phơi) từ DEM trên GEE, và 3 biến sinh thái – NDVI, pH đất và hiện trạng thảm phủ rừng từ ảnh Sentinel-2A.



Hình 3.4. Dữ liệu các biến địa hình, NDVI, độ pH đất và hiện trạng thảm phủ rừng



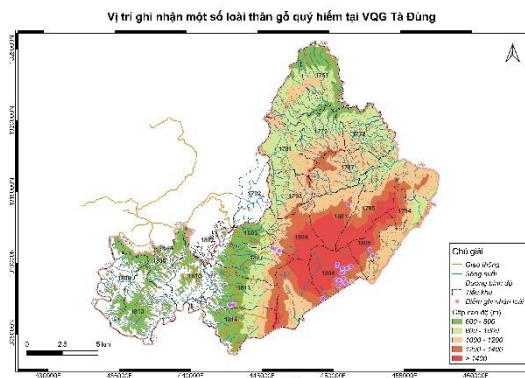
Hình 3.5 Các biến khí hậu được tải từ WorldClim tại VQG Tà Đùng

Bảng 3.4. Mô tả các biến khí hậu

Biến	Đơn vị	Thấp nhất	Cao nhất	Biến khí hậu
Bio01	°C	16,0	22,5	Nhiệt độ trung bình hàng năm
Bio02	°C	8,1	9,6	Phạm vi trung bình ngày
Bio03	%	60,5	65,3	Độ ẩm nhiệt
Bio04	°C	98,0	140,0	Nhiệt độ theo mùa
Bio05	°C	22,5	28,9	Nhiệt độ tối đa của tháng ẩm nhất
Bio06	°C	8,6	15,5	Nhiệt độ tối thiểu của tháng lạnh nhất
Bio07	°C	13,2	14,8	Phạm vi nhiệt độ hàng năm
Bio08	°C	16,4	22,9	Nhiệt độ trung bình của quý ẩm nhất
Bio09	°C	14,7	20,6	Nhiệt độ trung bình của quý khô nhất
Bio10	°C	17,2	23,9	Nhiệt độ trung bình của quý nóng nhất
Bio11	°C	14,7	20,6	Nhiệt độ trung bình của quý lạnh nhất
Bio12	Mm	1715	2093	Lượng mưa hàng năm
Bio13	Mm	274	335	Lượng mưa của tháng ẩm nhất
Bio14	Mm	9	15	Lượng mưa của tháng khô nhất
Bio15	%	66	69,3	Lượng mưa theo mùa
Bio16	Mm	764	960	Lượng mưa của quý ẩm nhất
Bio17	Mm	63	81	Lượng mưa của quý khô nhất
Bio18	Mm	508	640	Lượng mưa của quý nóng nhất
Bio19	Mm	63	81	Lượng mưa của quý lạnh nhất

3.2.1.2. Dữ liệu về điểm hiện diện của loài cây gỗ quý hiếm

Dữ liệu thực địa phục vụ xây dựng bản đồ phân bố tiềm năng cho các loài quan tâm được kế thừa từ hai nguồn dự án chính: dự án PEER (90 điểm) và đề tài B2019-TTN-02 (66 điểm), tổng cộng 156 điểm hiện diện (Hình 3.6).



Hình 3.6. Vị trí ghi nhận 10 loài TQGH tại VQG Tà Đùng

Bảng 3.5. Xác định biến quan trọng làm tăng hoặc giảm AUC nhiều nhất bằng phương pháp JackKnife

Loài	aquicr		canapi		cinnba		dacrim		Diptco		Diptha		trigove		querla		podone		rhodch	
Variable	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D
Bio_01																				
Bio_02																				
Bio_03																				
Bio_04			U		U	D	U		U			D		D	U	D	U	D		
Bio_07																				
Bio_12											U		U							
Bio_13																				
Bio_14																				
Bio_16																				
Bio_19																				
Slope				D															U	
Aspect																				
Elev						D											D			
Hientrang								D												
Ndvi	U	D																		D
Soilph									D											

Ghi chú: **aquicr**: *Aquilaria crassna* (Trầm hương); **canapi**: *Canarium littorale* (Trám nâu); **cinnba**: *Cinnamomum balansae* (Xá xị); **dacrim**: *Dacrycarpus imbricatus* (Thông nàng); **diptco**: *Dipterocarpus costatus* (Dầu baud); **diptha**: *Dipterocarpus hasseltii* (Dầu Hasselt); **trigove**: *Trigonobalanus verticillata* (Sồi vàng); **querla**: *Quercus langbianensis* (Dẻ langbian); **podone**: *Podocarpus neriifolius* (Thông tre); **rhodch**: *Rhodoleia championii* (Hồng quang); **U**: AUC tăng; **D**: AUC giảm; **Aspect**: Hướng phơi; **Slope**: Độ dốc; **Elev**: Độ cao; **Hientrang**: Hiện trạng thảm phủ rừng; **Ndvi**: chỉ số thực vật; **Soilph**: Độ pH đất

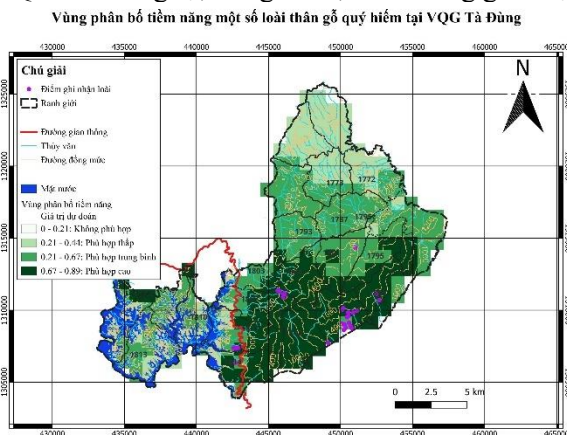
Bảng 3.6. Kết quả phân tích sự ảnh hưởng của các biến đến sự phân bố của các loài quý, hiếm

Loài	Aquicr		Canapi		cinnba		Dacrim		diptco		diptha		trigove		querla		podone		rhodch	
Variable	PC	PI	PC	PI	PC	PI	PC	PI	PC	PI	PC	PI	PC	PI	PC	PI	PC	PI	PC	PI
Bio 01	-	-	5,1	-	3,0	-	8,7	39,9	10,7	-	-	-	-	-	42,6	8,5	-	-	-	-
Bio 02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bio 03	32,6	-	5,6	-	4,9	-	5,8	19,4	10,2	7,3	39,8	43,1	6,3	44,7	1,7	7,0	0,3	0,4	5,2	21,5
Bio 04	-	-	52,9	96,9	41,5	70,8	-	-	14,5	8,7	-	-	16,7	-	55,6	80,7	84,9	99,6	0,1	5,5
Bio 07	-	-	-	-	6,3	17,6	0,9	9,4	-	-	1,6	-	0,2	4,5	-	-	-	-	0,8	14,2
Bio 12	9,8	60	12,4	-	3,6	-	15,8	-	-	-	23,0	-	18,5	47,2	-	-	-	-	-	-
Bio 13	0,9	1,1	-	-	3,9	6,5	-	-	-	-	-	-	2,3	-	-	-	-	-	-	-
Bio 14	-	-	-	-	-	-	3,1	-	0,8	-	21,6	-	5,2	3,7	-	-	-	-	16,0	-
Bio 16	1,0	25,6	3,7	-	14,1	-	28,8	-	55,5	64,2	-	-	50,8	-	-	-	-	-	-	-
Bio 19	-	-	-	-	0,1	-	0,9	1,2	1,0	5,9	2,5	11,4	-	-	-	-	2,3	-	6,1	6,9
Elev	-	-	15,9	3,1	12,3	2,7	-	-	-	-	3,3	-	-	-	0,1	2,8	-	-	32,7	23,2
Slope	-	-	-	-	0,7	-	0,5	0,4	3,2	12,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aspect	-	-	4,4	-	-	-	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,4	-	-	-
Hientrang	-	-	-	-	7,0	-	32,1	29,2	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ndvi	55,7	13,2	-	-	2,1	1,9	2,8	-	-	-	6,8	44,4	-	-	-	1,0	-	-	33,9	16,0
Solph	-	-	-	-	0,4	0,5	-	0,5	2,0	1,7	1,4	1,1	-	-	-	-	-	-	5,2	12,7

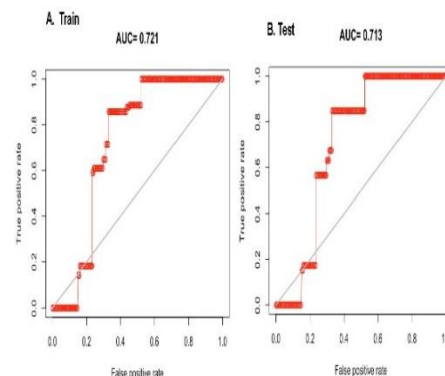
Ghi chú: **aquicr**: *Aquilaria crassna* (Trâm hương); **canapi**: *Canarium littorale* (Trám nâu); **cinnba**: *Cinnamomum balansae* (Xả xỉ); **dacrim**: *Dacrycarpus imbricatus* (Thông nạng); **diptco**: *Dipterocarpus costatus* (Dầu baud); **diptha**: *Dipterocarpus hasseltii* (Dầu Hasselt); **trigove**: *Trigonobalanus verticillata* (Sồi vàng); **Querla**: *Quercus langbianensis* (Dẻ langbian); **podone**: *Podocarpus neriifolius* (Thông tre); **rhodch**: *Rhodoleia championii* (Hồng quang); **U**: AUC tăng; **D**: AUC giảm; **Aspect**: Hướng phơi; **Slope**: Độ dốc; **Elev**: Độ cao; **Hientrang**: Hiện trạng thảm phủ rừng; **Ndvi**: chỉ số thực vật; **Soilph**: Độ pH đất; **PC**: Percent Contribution – tỉ lệ đóng góp; **PI**: Permutation Importance – Tầm quan trọng của hoán vị

3.2.3. Mô hình hóa vùng sinh thái tiềm năng của các loài TGQH, hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa.

Kết quả mô hình được trình bày tại Hình 3.10 và 3.11, với xác suất phân bố dao động từ 0,21 đến 0,89, chia thành bốn mức độ sinh cảnh: không phù hợp ($< 0,21$), phù hợp thấp (0,21–0,44), phù hợp trung bình (0,44–0,67) và phù hợp cao (0,67–0,89) (Liu et al., 2005). Mô hình được huấn luyện qua 700 vòng lặp, sử dụng xác thực chéo k-fold ($k = 10$) để tăng độ tin cậy và hiệu suất, chỉ số AUC = 0,7 với khoảng tin cậy 95%. Kết quả phù hợp với các nghiên cứu trước như Xue et al., 2024 với AUC = 0,8 cho loài hiếm *Picea neoveitchii* tại Trung Quốc, hay Adhikari et al., 2018 với AUC = 0,89 khi nghiên cứu 14 loài thực vật cận núi cao tại các VQG Hàn Quốc. Tương tự, Tang et al., 2020 cũng ghi nhận AUC = 0,7 cho loài *Dendrobium* tại Trung Quốc.



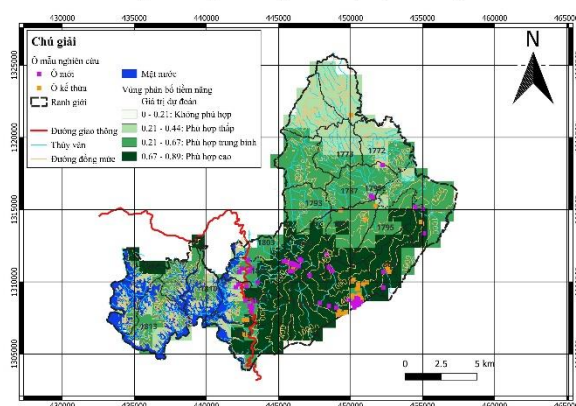
Hình 3.10 Bản đồ phân bố tiềm năng của 10 loài TGQH tại VQG Tà Đùng



Hình 3.11. Kết quả đánh giá chất lượng mô hình dự đoán

Dựa trên bản đồ phân bố tiềm năng của 10 loài thực vật thân gỗ quý hiếm, 67 ô mẫu khảo sát thực địa đã được bố trí tại các khu vực có xác suất xuất hiện trong khoảng 0,44–0,89 (Hình 3.12).

Vị trí thiết lập ô mẫu nghiên cứu tại VQG Tà Đùng



Hình 3.12. Bản đồ vị trí thiết lập ô mẫu nghiên cứu thực địa dự kiến tại VQG Tà Đùng

3.2.4. Kiểm định kết quả xây dựng mô hình SDMs

Để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình SDMs, nghiên cứu tiến hành kiểm tra thực địa tại hai nhóm điểm: các khu vực được dự báo “có” và “không có” loài. Từ bản đồ phân bố sinh thái tiềm năng (Hình 3.13), QGIS được sử dụng để xác định tọa độ trung tâm của 67 ô mẫu nằm trong khoảng giá trị từ 0,44–0,89, làm cơ sở đối chiếu với kết quả khảo sát thực tế nhằm đánh giá độ chính xác của mô hình dự báo.

Kết quả khảo sát thực địa (Bảng 3.7) tại 67 ô mẫu cho thấy 91% số ô (61 ô) ghi nhận sự hiện diện của ít nhất một trong 10 loài TV TGQH, chỉ 9% (6 ô) không ghi nhận loài. Điều này khẳng định độ tin cậy của mô hình SDMs trong dự báo phân bố tiềm năng, góp phần tối ưu hóa thiết kế khảo sát thực địa. Kết quả này tương đồng với nhận định của Cody et al., 2017 và Barlow et al., 2021, khi các tác giả cũng ghi nhận Maxent là công cụ đáng tin cậy trong dự báo vùng phân bố tiềm năng, góp phần nâng cao hiệu quả và độ chính xác trong công tác điều tra thực địa.

Bảng 3.7. Các điểm ghi nhận phân bố của các loài nghiên cứu trong các ô mẫu được dự báo

STT	Tọa độ trung tâm		Loài quý, hiếm có mặt trong ô mẫu dự báo
	X	Y	
1	836633	1314685	Hồng quang
2	833859	1310914	Hồng quang
3	833861	1311986	Dầu baud
4	836539	1316370	Trám nâu
5	836011	1316499	Hồng quang, Trám nâu
6	833036	1317146	Trám nâu
7	832911	1317234	Trám nâu
8	833689	1319389	Dầu baud, Hồng quang
9	824584	1309525	Dầu baud,
10	824549	1311907	Không có mặt loài quý, hiếm
11	824726	1312097	Hồng quang
12	824727	1309167	Hồng quang
13	824757	1309431	Dầu baud, Hồng quang
14	824893	1309826	Hồng quang
15	824312	1309873	Hồng quang
16	825116	1311140	Hồng quang
17	824363	1310870	Không có mặt loài quý, hiếm
18	824036	1312089	Trám nâu
19	823824	1311855	Trám nâu
20	823797	1310987	Dầu baud
21	823616	1310796	Thông nạng
22	824434	1312694	Dầu baud
23	826905	1312616	Hồng quang, Trám nâu
24	827395	1312460	Dẻ langbian
25	827480	1312517	Dầu hasselt
26	827414	1312496	Dầu hasselt, Thông nạng
27	827058	1312642	Hồng quang, Trám nâu
28	827382	1312504	Xá xị
29	827677	1312391	Thông nạng
30	827633	1312457	Xá xị
31	828725	1311700	Thông tre, Thông nạng
32	830295	1312018	Thông tre
33	830052	1312234	Hồng quang
34	829888	1313155	Thông tre
35	829454	1309779	Thông nạng
36	830087	1309565	Xá xị
37	830588	1309480	Thông nạng
38	827898	1312330	Thông nạng
39	827981	1312308	Thông nạng
40	828058	1312726	Hồng quang, Thông nạng
41	828138	1312720	Dầu baud
42	828033	1312795	Thông nạng

STT	Tọa độ trung tâm		Loài quý, hiếm có mặt trong ô mẫu dự báo
	X	Y	
43	827359	1311940	Xá xị
44	827433	1311944	Xá xị
45	827536	1311943	Dầu baud
46	827664	1312391	Thông nạng
47	827594	1312369	Xá xị, Thông nạng
48	831885	1309590	Xá xị, Hồng quang
49	832306	1309880	Xá xị
50	831849	1309499	Xá xị, Thông nạng
51	832070	1309663	Xá xị, Thông nạng
52	832192	1309740	Xá xị
53	831911	1309680	Xá xị, Dẻ langbian
54	831982	1310015	Xá xị
55	831999	1310163	Xá xị
56	832123	1310097	Xá xị, Thông nạng, Dẻ langbian
57	831981	1310016	Xá xị, Thông nạng
58	831746	1309766	Xá xị, Thông nạng, Trám nâu
59	831418	1310020	Xá xị, Thông nạng
60	831879	1309891	Xá xị
61	832364	1310041	Thông nạng
62	832016	1310779	Không có mặt loài quý, hiếm
63	832178	1310408	Thông nạng
64	831698	1310315	Không có mặt loài quý, hiếm
65	831871	1310276	Thông nạng
66	823690	1310786	Không có mặt loài quý, hiếm
67	833660	1310718	Không có mặt loài quý, hiếm

Ghi chú: Vì lý do bảo tồn, các tọa độ loài trong nghiên cứu được giả định. Tọa độ chính xác đã được chuyển giao cho VQG Tà Đùng phục vụ quản lý và bảo vệ tài nguyên rừng bền vững.

Bên cạnh việc kiểm chứng tại các điểm dự báo có khả năng xuất hiện loài, nghiên cứu cũng thực hiện đối chứng tại các khu vực không có sự xuất hiện của các loài nghiên cứu (với giá trị $<0,21$) nhằm kiểm tra tính chính xác của mô hình SDMs. Nghiên cứu đã thực hiện đối chứng tại 35 tọa độ trung tâm của các điểm ngẫu nhiên nằm ngoài khu vực dự báo có loài bằng phương pháp lấy mẫu ngẫu nhiên phân tầng. Kết quả không ghi nhận loài tại các điểm này, khẳng định khả năng phân định tốt những vùng không phù hợp sinh cảnh của mô hình (Bảng 3.8).

Bảng 3.8. Các điểm ghi nhận không có sự hiện diện của các loài nghiên cứu

STT	Tọa độ trung tâm		STT	Tọa độ trung tâm	
	X	Y		X	Y
1	182905	1314474	19	180321	1312200
2	180051	1310764	20	180279	1312281
3	180076	1311836	21	180296	1312276
4	182847	1316161	22	188550	1309932
5	182322	1316301	23	188221	1310674
6	189363	1317013	24	188360	1310295
7	189240	1317103	25	187896	1310216
8	180064	1319240	26	182693	1315274
9	184584	1309525	27	188659	1311012
10	185449	1311907	28	188643	1311000

STT	Tọa độ trung tâm		STT	Tọa độ trung tâm	
	X	Y		X	Y
11	184726	1312097	29	180348	1312063
12	188313	1310728	30	180364	1312055
13	180340	1312052	31	182928	1314485
14	180379	1312249	32	180030	1310743
15	180377	1312221	33	182864	1316168
16	180362	1312221	34	182322	1316301
17	180463	1311839	35	180064	1319240
18	180328	1312215			

Ghi chú: Vì lý do bảo tồn, các tọa độ loài trong nghiên cứu được giả định. Tọa độ chính xác đã được chuyển giao cho VQG Tà Đùng phục vụ quản lý và bảo vệ tài nguyên rừng bền vững.

3.3. Tính toán các chỉ số đa dạng sinh học và phân tích tác động của địa hình (độ dốc, độ cao) đến đa dạng sinh học của lâm phần.

3.3.1. Tính toán các chỉ số đa dạng sinh học.

3.3.1.1. Chỉ số IVI của các loài thực vật cây gỗ trong lâm phần

Kết quả phân tích tại Bảng 3.9, chỉ số giá trị quan trọng (IVI) cho thấy chỉ có 10 loài cây gỗ đạt IVI > 5, trong đó loài Chò xốt (*Schima wallichii*) có IVI cao nhất (8,49), thể hiện vai trò ưu thế trong quần xã thực vật. Nhãn rừng (*Walsura elata*) và Trâm trắng (*Syzygium wightianum*) lần lượt đứng thứ hai và ba với IVI là 7,06 và 6,90.

Bảng 3.9. Chỉ số IVI của nhóm cây gỗ tại VQG Tà Đùng

Tên khoa học	Tên phổ thông	RD	RBA	RF	IVI	Xếp hạng
<i>Schima wallichii</i>	Chò xốt	2,36	5,22	0,91	8,49	1
<i>Walsura elata</i>	Nhãn rừng	2,8	2,51	1,74	7,06	2
<i>Syzygium wightianum</i>	Trâm trắng	0,62	5,23	1,05	6,9	3
<i>Lithocarpus</i> sp.	Dẻ	2,25	3,01	1,32	6,58	4
<i>Neolitsea poilanei</i>	Tân bời lời	3,19	2,06	1,32	6,58	5
<i>Dacrycarpus imbricatus</i>	Thông nàng	1,9	2,48	1,99	6,37	6
<i>Phoebe angustifolia</i>	Sự lá hẹp	3,01	1,03	1,99	6,03	7
<i>Dysoxylum poilanei</i>	Huỳnh đường	1,23	3,31	1,32	5,87	8
<i>Michelia mediocris</i>	Giổi xanh	1,61	2,9	1,36	5,87	9
<i>Cinnamomum iners</i>	Quế rừng	2,56	1,23	2,06	5,85	10

Ghi chú: n - Số cây, sG - tổng tiết diện ngang; f - tần suất ô xuất hiện; RD - Mật độ tương đối (%); RF - Tần suất tương đối (%); RBA là tiết diện ngang tương đối của loài so với tổng tiết diện ngang của các loài trong lâm phần (%); IVI - Chỉ số quan trọng (%).

Bảng 3.10. Kết quả phân tích chỉ số IVI cho 10 loài lựa chọn nghiên cứu

Tên khoa học	Tên phổ thông	RD	RBA	RF	IVI	Xếp hạng
<i>Dacrycarpus imbricatus</i>	Thông nàng	1,9	2,48	1,99	6,37	6
<i>Cinnamomum balansae</i>	Xá xị	0,55	3,41	0,8	4,77	16
<i>Rhodoleia championii</i>	Hồng quang	2,29	1,4	0,59	4,28	18
<i>Quercus langbianensis</i>	Dẻ langbian	0,23	0,78	0,35	1,35	63
<i>Dipterocarpus baudii</i>	Dầu baud	0,3	0,06	0,45	0,81	95
<i>Canarium littorale</i>	Trám nâu	0,24	0,15	0,38	0,77	101
<i>Dipterocarpus hasseltii</i>	Dầu Hasselt	0,18	0,44	0,1	0,72	105
<i>Trigonobalanus verticillata</i>	Sồi vàng	0,14	0,14	0,17	0,45	136
<i>Podocarpus neriifolius</i>	Thông tre	0,06	0,03	0,14	0,23	190
<i>Aquilaria crassna</i>	Trầm hương	0,01	0,01	0,03	0,06	258

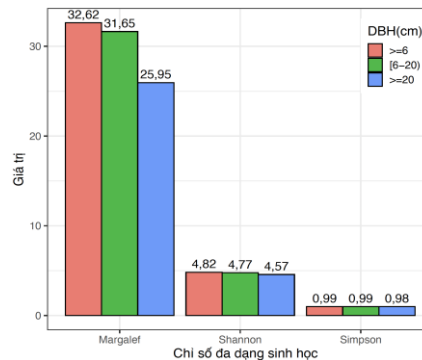
Kết quả phân tích chỉ số IVI của 10 loài cây gỗ quý hiếm (Bảng 3.11) phản ánh mức độ ưu thế sinh thái và vai trò của từng loài trong cấu trúc quần xã rừng tại khu vực nghiên cứu. Trong đó, *Dacrycarpus*

imbricatus (Thông nạng) có IVI cao nhất (6,37), *Cinnamomum balansae* (Xá xị) và *Rhodoleia championii* (Hồng quang) cũng có IVI tương đối cao, lần lượt là 4,77 và 4,28, phản ánh vai trò nhất định trong quần xã. Tuy nhiên, các loài còn lại, bao gồm *Quercus langbianensis*. (Dẻ langbian), *Dipterocarpus baudii* (Dầu baud), *Canarium littorale* (Trám nâu), *Dipterocarpus hasseltii* (Dầu Hasselt), và *Trigonobalanus verticillata* (Sồi vàng), có IVI dưới 2, thể hiện sự phân bố hạn chế về mặt mật độ và sinh khối.

Đặc biệt, *Podocarpus nerifolius* (Thông tre) và *Aquilaria crassna* (Trầm hương) có IVI rất thấp (0,23 và 0,06), cho thấy đây là những loài hiếm gặp.

3.3.1.2. Chỉ số Margalef (d), Shannon – Wiener (H'), Simpson (D) của lâm phần

Các chỉ số đa dạng sinh học tại VQG Tà Đùng tại Hình 3.13 cho thấy mức độ đa dạng cao và ổn định. Cụ thể, chỉ số Simpson dao động từ 0,98–0,99, phản ánh tính đa dạng cao và tương đồng với các nghiên cứu trong khu vực. Chỉ số Shannon (H') cũng cho thấy xu hướng giảm nhẹ theo kích thước cây: toàn bộ cây gỗ ($H' = 4,82$), cây trung bình ($H' = 4,77$) và cây lớn ($H' = 4,57$), phù hợp với quy luật phân tầng sinh thái. Chỉ số Margalef phản ánh sự phong phú loài cao, đặc biệt ở nhóm cây trung bình ($d = 31,65$) và toàn bộ cây gỗ ($d = 32,62$).



Hình 3.13. Chỉ số đa dạng sinh học của lâm phần tại VQG Tà Đùng

3.3.1.3. Chỉ số loài hiếm của lâm phần

Trong nghiên cứu tại VQG Tà Đùng, có 82/294 loài được xác định là loài ít xuất hiện (chiếm 18%), với chỉ số độ hiếm tương đối là 0,1807. Trong đó, 47 loài chỉ ghi nhận một cá thể. Trầm hương (*Aquilaria crassna*) là loài duy nhất trong 10 loài quan tâm thuộc nhóm này. Tuy nhiên, độ chính xác của chỉ số loài hiếm phụ thuộc lớn vào phạm vi khảo sát. Do nghiên cứu mới chỉ tập trung vào các khu vực điển hình, việc mở rộng khảo sát toàn diện trong tương lai là cần thiết để nâng cao tính đại diện và hỗ trợ bảo tồn hiệu quả.

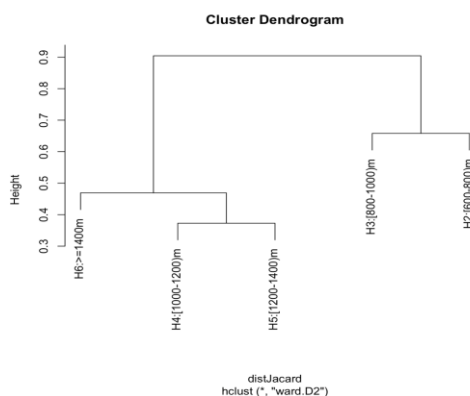
3.3.2. Phân tích ảnh hưởng của địa hình đến đa dạng TVTG tại VQG Tà Đùng.

3.3.2.1. Phân tích sự tương đồng thành phần loài theo địa hình bằng chỉ số Jaccard và phân cấp Ward.D2

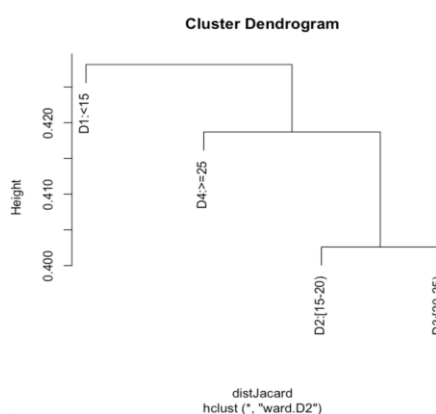
Phân tích thành phần loài theo độ cao chia thành hai nhóm chính: nhóm từ 600–1000m (H2, H3) và nhóm trên 1000m (H4, H5, H6). Chỉ số Jaccard (d_j) ở nhóm dưới 1000m đạt khoảng 0,7, trong khi ở nhóm trên 1000m dao động từ 0,4–0,5, phản ánh sự thay đổi về cấu trúc quần xã theo độ cao.

Kết quả tại Hình 3.14 cho thấy độ cao ảnh hưởng đến cấu trúc và thành phần loài, phản ánh sự thích nghi của thực vật với điều kiện sinh thái khác nhau. Các sinh cảnh ≥ 1400 m xuất hiện các loài chuyên biệt vùng cao, cần được ưu tiên bảo tồn nhằm duy trì đa dạng sinh học. Vùng chuyển tiếp 1000–1400 m đóng vai trò vùng đệm sinh thái, hỗ trợ kết nối giữa sinh cảnh thấp và cao. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Sanjeewani et al., 2024 về vai trò của độ cao trong định hình cấu trúc quần xã tại rừng mưa nhiệt đới.

Tương tự, theo độ dốc (Hình 3.15), chỉ số d_j chia thành hai nhóm: D1 ($<15^\circ$) và D4 ($\geq 25^\circ$); D2 ($15^\circ-20^\circ$) và D3 ($20^\circ-25^\circ$). Các chỉ số d_j giữa các cấp dốc khá tương đồng, dao động quanh 0,4, cho thấy sự ổn định tương đối trong thành phần loài giữa các mức dốc khác nhau. Nhận định này phù hợp với nghiên cứu của Lolila et al., 2023 tại rừng cận núi Tanzania, cho rằng độ dốc ảnh hưởng thứ yếu so với độ cao và khí hậu. Điều này cho thấy các loài cây gỗ tại VQG Tà Đùng có khả năng thích nghi tốt với biến đổi độ dốc, góp phần duy trì sự ổn định quần xã ở nhiều cấp địa hình.



Hình 3.14. Chỉ số Jaccard về thành phần loài ở các cấp độ cao



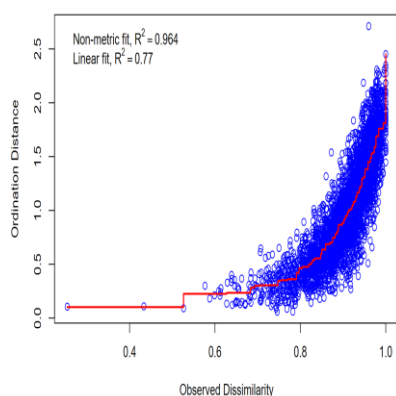
Hình 3.15. Chỉ số Jaccard về thành phần loài ở các cấp độ dốc

3.3.2.2. Phân tích đa chiều phi định lượng NMDS

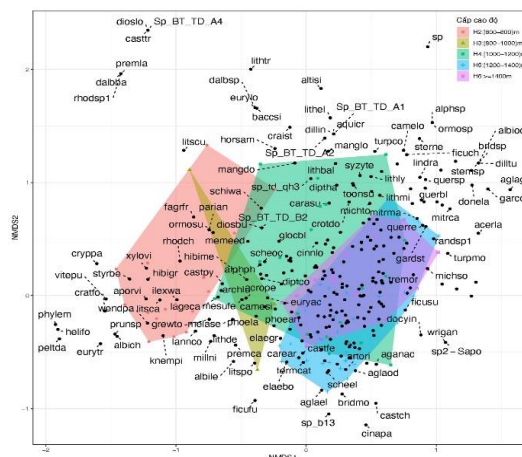
- Phân tích NMDS theo độ cao

Phân tích NMDS (Hình 3.16 và Hình 3.17) cho thấy mô hình có độ phù hợp cao với $R^2 = 0.964$ và giá trị stress = 0,18, nằm trong ngưỡng đáng tin cậy. Kết quả trực quan hóa cho thấy sự phân tách rõ giữa các ô mẫu ở đai cao thấp (H2, H3) và các đai cao hơn (H4, H5, H6), phản ánh sự khác biệt về thành phần loài theo độ cao. Nguyên nhân chính đến từ tác động của con người mạnh ở độ cao thấp và ảnh hưởng của địa hình, khí hậu ở độ cao cao hơn. Một số loài có sự phân bố linh hoạt, xuất hiện ở ranh giới giữa các nhóm độ cao, cho thấy khả năng thích nghi rộng với điều kiện môi trường khác nhau. Nhận định này cũng phù hợp với nghiên cứu của Hương et al., 2018, cho thấy rừng ở độ cao thấp có mức đa dạng loài thấp hơn do chịu tác động mạnh từ con người. Tương tự, Xiaoyang et al., 2021 ghi nhận rằng tại tỉnh Vân Nam (Trung Quốc), độ cao có ảnh hưởng rõ rệt đến đa dạng loài, với sự phong phú cao hơn ở các vùng cao ít bị tác động nhân sinh. Mặt khác, địa hình dốc, khó tiếp cận tại các khu vực trên 1000 m giúp hạn chế tác động nhân sinh, góp phần duy trì sự ổn định và đa dạng sinh học cao (Körner, 2021). Sự thay đổi khí hậu theo độ cao (nhiệt độ, độ ẩm, đất...) ảnh hưởng trực tiếp đến chu kỳ sinh trưởng, cấu trúc quần xã và thành phần loài. Theo Thái Văn Trùng (1978), khí hậu và địa hình là yếu tố then chốt phân chia các vành đai thực vật.

Kết quả tại Phụ lục 6 trong luận án cho thấy các loài có xu hướng phân cụm theo độ cao, phản ánh khả năng thích nghi với điều kiện sinh thái đặc thù, đồng thời cũng ghi nhận một số loài có biên độ sinh thái rộng tại ranh giới giữa các đai.



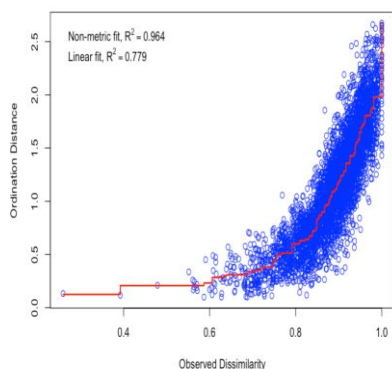
Hình 3.16 Biểu đồ Shepard của các đai cao



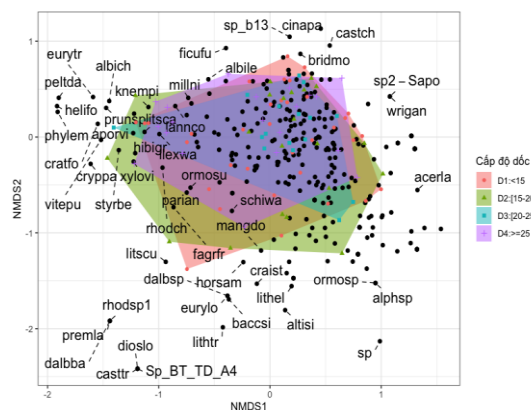
Hình 3.17. Phân tích NMDS của các đai cao

-Phân tích NMDS theo độ dốc

Biểu đồ Shepard xác nhận mô hình NMDS tái hiện tốt cấu trúc dữ liệu phi tuyến với $R^2 = 0.964$. Phân tích cho thấy độ dốc không gây ra sự phân tách rõ ràng về thành phần loài (Hình 3.18 và Hình 3.19), trong khi độ cao đóng vai trò chi phối mạnh đến sự biến đổi quần xã thực vật thân gỗ tại VQG Tà Đùng.



Hình 3.18. Biểu đồ Shepard của các cấp độ độc



Hình 3.19. Phân tích NMDS của các đại độ độc

3.4. Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai.

3.4.1. Cơ sở dữ liệu để dự báo phân bố tiềm năng.

- Dữ liệu thực địa: Tổng cộng 584 điểm phân bố của 10 loài quan tâm đã được ghi nhận tại VQG Tà Đùng, bao gồm 156 điểm kế thừa từ nghiên cứu trước và 428 điểm thu thập mới (Bảng 3.11).

Bảng 3.12. Số lượng điểm ghi nhận 10 loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng

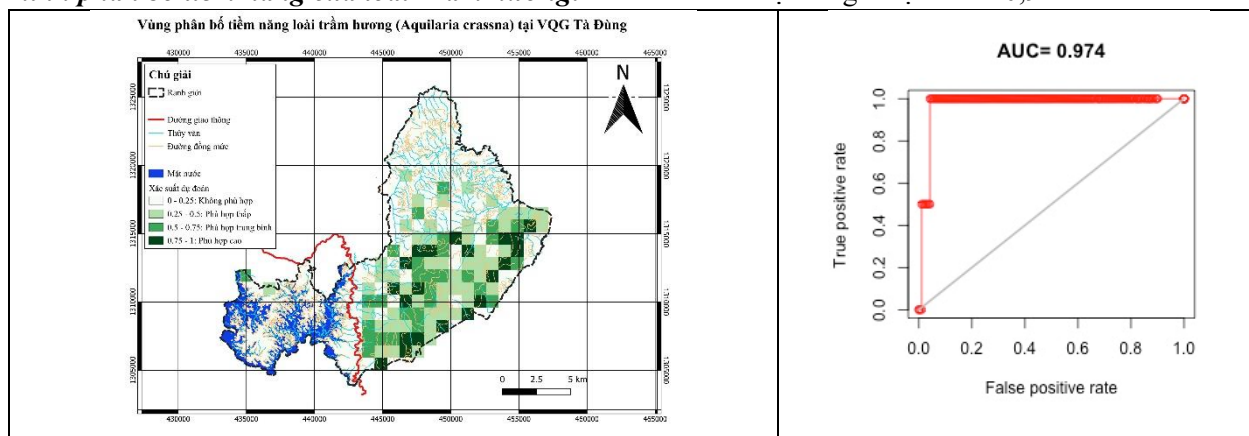
STT	Tên loài	Số lượng điểm ghi nhận ngoài thực địa	Tên loài	Số lượng điểm ghi nhận ngoài thực địa
1	Trầm hương	2	Dầu Hasselt	25
2	Trám nâu	25	Sồi vàng	28
3	Xá xị	81	Dẻ langbian	34
4	Thông nang	99	Thông tre	14
5	Dầu baud	91	Hồng quang	185

- Dữ liệu sinh thái: Sau khi tính toán tương quan Pearson, phân tích PCA và Jackknife còn lại 10 biến đầu vào (Bio01, Bio03, Bio04, Bio12, Bio16, NDVI, hiện trạng thảm phủ rừng, độ dốc, độ cao, và pH đất) để chạy mô phỏng phân bố tiềm năng.

- Dữ liệu kịch bản biến đổi khí hậu: Luận án sử dụng dữ liệu khí hậu từ hai mô hình toàn cầu EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL theo kịch bản SSP585, với độ phân giải 30s từ WorldClim.

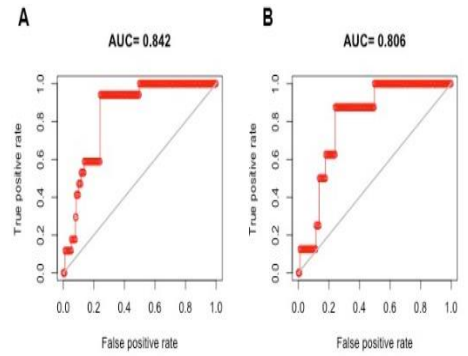
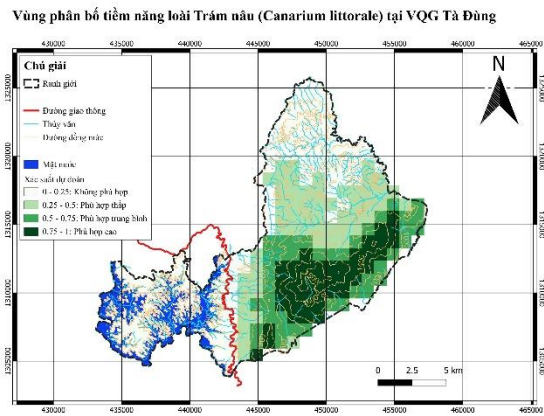
3.4.2. Dự báo phân bố tiềm năng của các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng (Hình 3.20 đến Hình 3.29)

- Mô hình phân bố tiềm năng của loài Trầm hương: Mô hình thu được có giá trị AUC = 0,9.



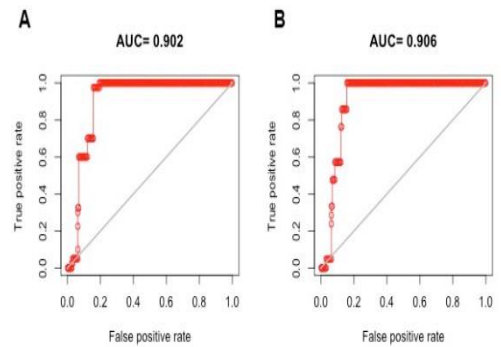
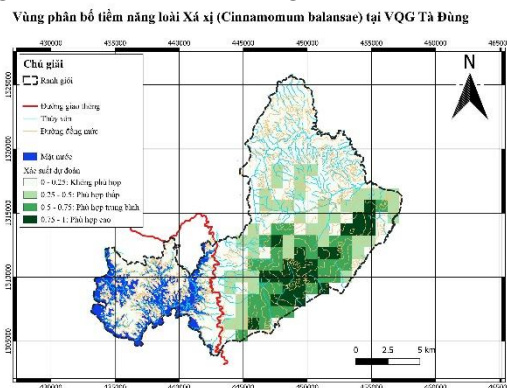
Hình 3.20. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Trầm hương tại VQG Tà Đùng

- Mô hình phân bố tiềm năng của loài Trám nâu: AUC mô hình đạt 0,84 tại các điểm dừng xây dựng mô hình và đạt 0,8 tại 8 điểm (30%) ghi nhận dùng kiểm tra.



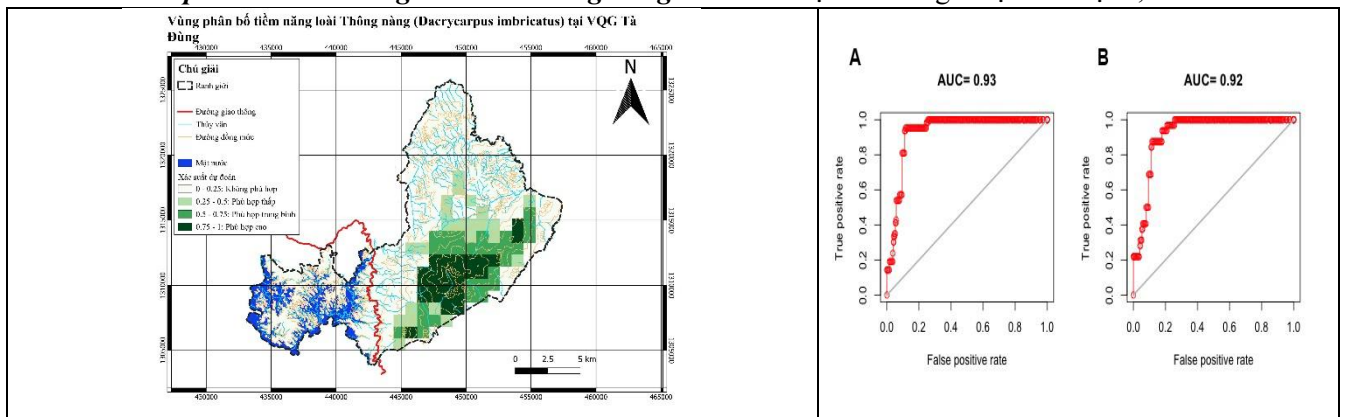
Hình 3.21 Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Trám nâu tại VQG Tà Đùng

- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Xá xị:** Giá trị AUC đạt 0,9, cho thấy mô hình có khả năng phân biệt hiệu quả giữa khu vực có và không có loài.



Hình 3.22. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Xá xị tại VQG Tà Đùng

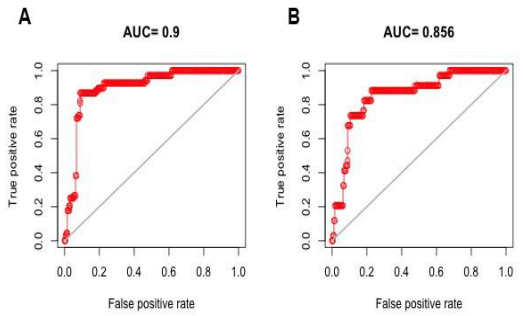
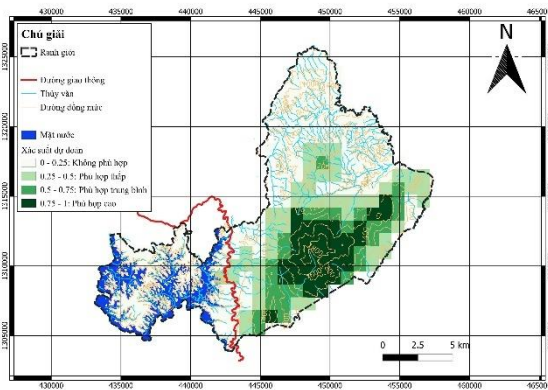
- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Thông nạng:** Mô hình dự đoán có giá trị AUC đạt 0,93.



Hình 3.23. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Thông nạng tại VQG Tà Đùng

- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Dầu baid:** AUC của mô hình đạt 0,9 cho các điểm dùng chạy mô hình và 0,86 cho các điểm kiểm tra.

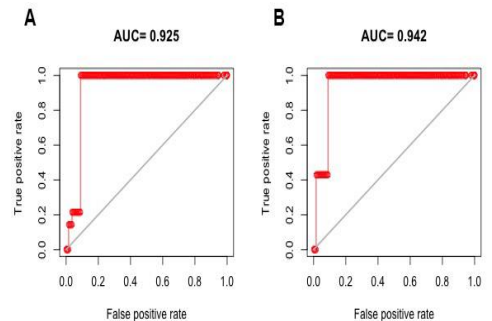
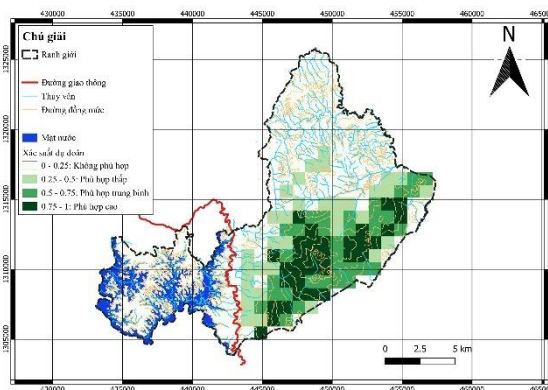
Vùng phân bố tiềm năng loài Dầu baud (Dipterocarpus baudi) tại VQG Tà Đùng



Hình 3.24. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Dầu baud tại VQG Tà Đùng

- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Dầu Hasselt:** AUC đánh giá đối với các điểm dùng xây dựng mô hình và điểm kiểm tra đều đạt cao với lần lượt là 0,93 và 0,94.

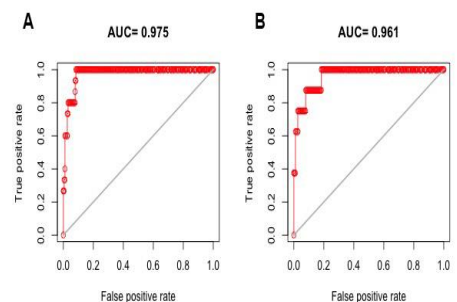
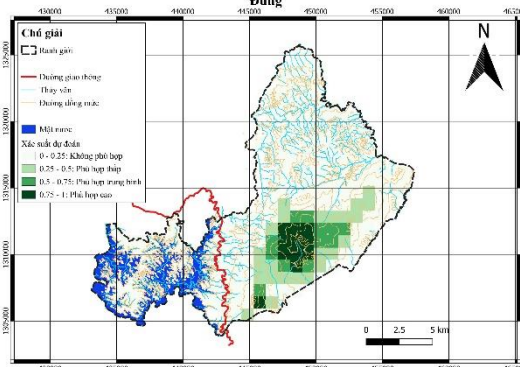
Vùng phân bố tiềm năng loài Dầu Hasselt (Dipterocarpus hasseltii) tại VQG Tà Đùng



Hình 3.25. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Dầu Hasselt tại VQG Tà Đùng

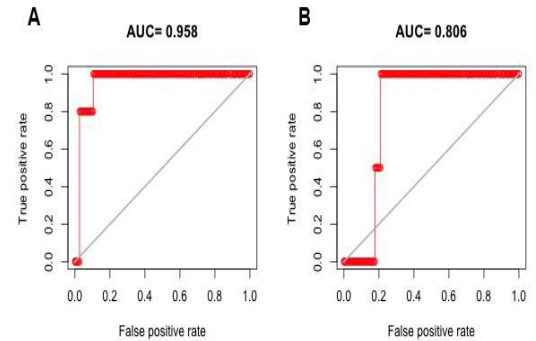
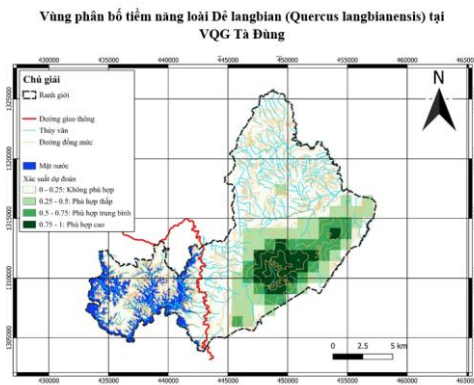
- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Sồi ba cạnh:** Giá trị AUC đánh giá mô hình trên 15 điểm xây dựng và 8 điểm kiểm tra lần lượt là 0,97 và 0,96.

Vùng phân bố tiềm năng loài Sồi ba cạnh (Trigonobalanus verticillata) tại VQG Tà Đùng



Hình 3.26. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Sồi ba cạnh tại VQG Tà Đùng

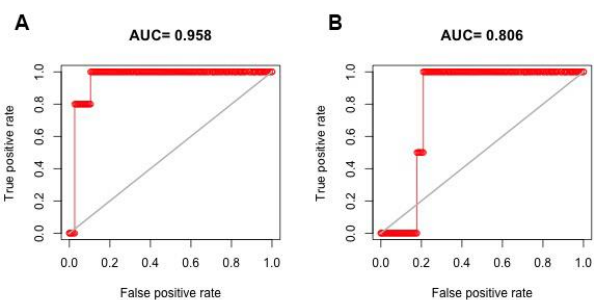
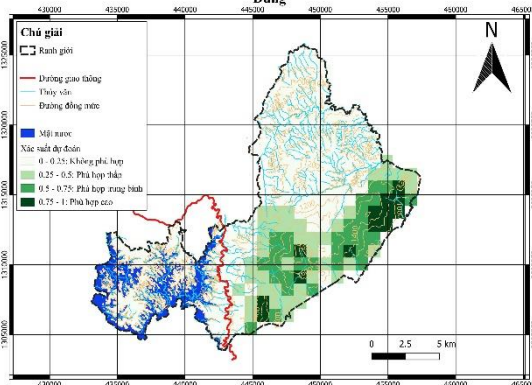
- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Dẻ langbian:** Giá trị AUC đạt 0,94 đối với các điểm xây dựng (23 điểm) và 0,92 đối với 11 điểm dùng kiểm tra.



Hình 3.27. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Dẻ langbian tại VQG Tà Đùng

- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Thông tre:** AUC đánh giá tại 5 điểm xây dựng đạt 0,96 và với 2 điểm kiểm tra là 0,8.

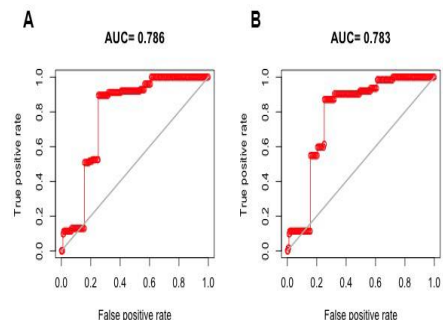
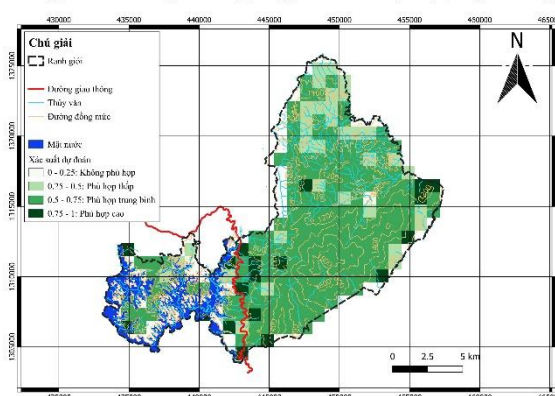
Vùng phân bố tiềm năng loài Thông tre lá dài (Podocarpus neriifolius) tại VQG Tà Đùng



Hình 3.28. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Thông tre tại VQG Tà Đùng

- **Mô hình phân bố tiềm năng của loài Hồng quang:** Giá trị AUC đánh giá mô hình trên 125 vị trí sử dụng xây dựng mô hình và 62 điểm dùng kiểm tra đều đạt 0,78.

Vùng phân bố tiềm năng loài Hồng quang (Rhodoleia championii) tại VQG Tà Đùng



Hình 3.29. Bản đồ vùng phân bố tiềm năng của loài Hồng quang tại VQG Tà Đùng

Mô hình Maxent cho kết quả AUC từ 0,78 đến 0,97 với khoảng tin cậy 95% phản ánh độ tin cậy cao trong dự báo phân bố tiềm năng của các loài TV TGQH tại VQG Tà Đùng. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu quốc tế (Zang et al., 2024; Wei et al., 2024), khẳng định hiệu quả của Maxent trong đánh giá sự thích nghi sinh thái dựa trên các biến môi trường. Hầu hết các loài có xu hướng phân bố tập trung ở phía Đông Nam VQG, nơi có địa hình đồi núi phức tạp (độ cao >1000 m, dốc >15°), rừng giàu trữ lượng và điều kiện vi khí hậu ổn định, ít bị tác động nhân sinh. Ngược lại, khu vực Tây và Tây Bắc có độ cao thấp, độ che phủ rừng kém và chịu ảnh hưởng mạnh từ suy thoái đất, nông nghiệp và rừng trồng, dẫn đến điều kiện sinh thái không thuận lợi, làm suy giảm sự hiện diện của các loài TV TGQH.

Phân bố tiềm năng của 10 loài cây gỗ quý hiếm có thể được tóm tắt như sau:

- Thông tre (*Podocarpus neriifolius*) và Thông nàng (*Dacrycarpus imbricatus*): Chủ yếu xuất hiện tại rừng nguyên sinh giàu trữ lượng (HG1, HG2) ở độ cao trên 1.200 m và độ dốc lớn ($>25^\circ$). Khu vực này có khí hậu mát mẻ, độ ẩm ổn định, tạo điều kiện lý tưởng cho sự phát triển của các loài hạt trần đặc trưng.

- Trầm hương (*Aquilaria crassna*), Xá xị (*Cinnamomum balansae*), Dầu baud (*Dipterocarpus costatus*), Sồi vàng (*Trigonobalanus verticillata*), Dầu Hasselt (*Dipterocarpus hasseltii*) và Dẻ langbian (*Quercus langbianensis*): Phân bố chủ yếu ở vùng có độ cao trung bình từ 1.000 - 1.400 m và độ dốc từ 15° - 25° . Đây là khu vực có rừng tự nhiên, hệ thống sông suối phong phú, giúp duy trì độ ẩm đất cao và vi khí hậu ổn định.

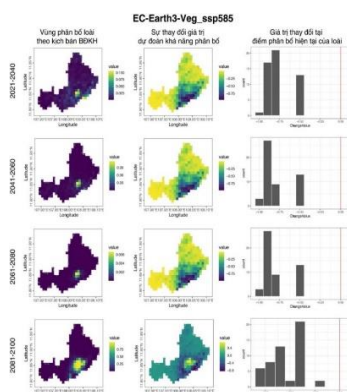
- Hồng quang (*Rhodoleia championii*) và Trám nâu (*Canarium littorale*): Có phân bố rộng hơn so với các loài khác, xuất hiện ở độ cao từ 600 m trở lên và độ dốc từ 15° - 25° .

3.4.3. Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai.

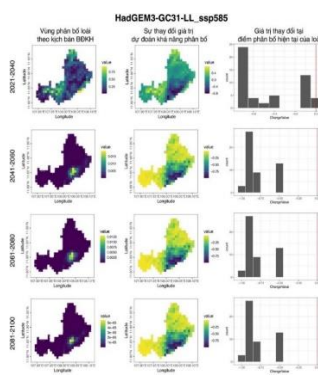
* **Dự báo phân bố tiềm năng của loài Xá xị tại VQG Tà Đùng theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai.**

Kết quả mô phỏng từ hai mô hình khí hậu EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL theo kịch bản phát thải cao SSP5-8.5 cho thấy loài Xá xị sẽ phải đối mặt với sự suy giảm nghiêm trọng trong phạm vi phân bố tiềm năng trong suốt thế kỷ 21. Đặc biệt, mô hình EC-Earth3-Veg dự báo sự thu hẹp mạnh mẽ trong giai đoạn 2061–2080, với xác suất xuất hiện tại các khu vực phù hợp giảm xuống mức rất thấp. Tuy nhiên, đến giai đoạn 2081–2100, mô hình này ghi nhận dấu hiệu phục hồi nhẹ tại một số khu vực trung tâm, phản ánh khả năng thích nghi và mở rộng trở lại của loài (Hình 3.30 và Hình 3.31)

Ngược lại, mô hình HadGEM3-GC31-LL cho thấy mức độ suy giảm còn nghiêm trọng hơn, với phần lớn khu vực tiềm năng hiện tại trở nên không phù hợp vào giữa thế kỷ. Dù cũng ghi nhận một số tín hiệu ổn định vào cuối thế kỷ, nhưng xu hướng phục hồi không rõ ràng như ở mô hình EC-Earth3-Veg (Hình 3.30 và Hình 3.31)



Hình 3.30. Dự đoán vùng phân bố loài Xá xị theo kịch bản BĐKH mô hình EC-Earth3-Veg, ssp585



Hình 3.31. Dự đoán vùng phân bố loài Xá xị theo kịch bản BĐKH mô hình HadGEM3-GC31-LL, ssp585

* **Dự báo phân bố của loài Trầm hương tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu**

Theo mô phỏng từ hai mô hình EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL (kịch bản SSP5-8.5), loài Trầm hương có xu hướng suy giảm mạnh về phạm vi phân bố trong thế kỷ 21. Giai đoạn 2061–2100 ghi nhận sự thu hẹp nghiêm trọng vùng sinh cảnh phù hợp, với nhiều khu vực giảm gần bằng 0 về mức độ phù hợp sinh thái. Mặc dù một số tín hiệu phục hồi nhẹ xuất hiện vào cuối thế kỷ, nhưng không đủ để bù đắp sự suy giảm kéo dài. Đặc biệt, mô hình HadGEM3-GC31-LL dự báo tình trạng nghiêm trọng hơn, làm gia tăng nguy cơ mất sinh cảnh hoàn toàn nếu không có biện pháp bảo tồn kịp thời (Hình 3.32 và Hình 3.33)

* **Dự báo phân bố của loài Trám nâu tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu.**

Kết quả cho thấy loài Trám nâu có xu hướng suy giảm phạm vi phân bố trong nửa đầu thế kỷ 21, theo mô hình EC-Earth3-Veg, với xác suất xuất hiện giảm rõ rệt và nguy cơ mất sinh cảnh tăng cao. Tuy nhiên, đến cuối thế kỷ (2081–2100), mô hình này ghi nhận dấu hiệu ổn định nhẹ tại một số khu vực trung tâm, phản ánh tiềm năng thích nghi sinh thái của loài. Trái lại, mô hình HadGEM3-GC31-LL cho thấy sự mở rộng sinh cảnh trong giai đoạn đầu thế kỷ, đặc biệt ở phía Nam và Đông Nam, nhưng bắt đầu suy giảm nhẹ từ giữa thế kỷ và rõ nét hơn vào cuối thế kỷ, khi mức độ phù hợp môi trường sống giảm xuống (Hình 3.32 và Hình 3.33)

* **Dự báo phân bố của loài Thông nàng tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu**

Thông nàng có xu hướng suy giảm nhẹ phạm vi phân bố trong thế kỷ 21, nhưng không có nguy cơ mất hoàn toàn sinh cảnh vào cuối thế kỷ. Mô hình EC-Earth3-Veg ghi nhận sự thu hẹp dần theo thời gian, đặc biệt

từ 2061–2080, nhưng đến 2081–2100, quá trình suy giảm chững lại, phản ánh khả năng thích nghi sinh thái của loài. Tương tự, mô hình HadGEM3-GC31-LL cho thấy sự ổn định trong nửa đầu thế kỷ, sau đó thu hẹp nhẹ vào cuối thế kỷ, chủ yếu tại các khu vực rìa sinh cảnh. Cả hai mô hình đều cho thấy mức suy giảm tương đối nhỏ, với giá trị thay đổi trong giới hạn từ -0,4 đến 0,3. Thông năng có khả năng thích nghi một phần với biến đổi khí hậu, nhưng vẫn cần các chiến lược bảo tồn phù hợp để duy trì sinh cảnh ổn định lâu dài (Hình 3.32 và Hình 3.33).

***Dự báo phân bố của loài Dầu baud tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu.**

Dầu baud có phạm vi phân bố biến động trong thế kỷ 21, với xu hướng suy giảm giữa thế kỷ và phục hồi nhẹ vào cuối thế kỷ. Theo mô hình EC-Earth3-Veg, sinh cảnh của loài duy trì ổn định trong nửa đầu thế kỷ, sau đó thu hẹp từ 2061–2080, nhưng có dấu hiệu mở rộng trở lại vào 2081–2100, đặc biệt tại các vùng trung tâm. Giá trị thay đổi khả năng phân bố phản ánh quá trình này, với xu hướng giảm ban đầu rồi tăng nhẹ vào cuối thế kỷ. Tương tự, mô hình HadGEM3-GC31-LL cho thấy phạm vi sinh cảnh ổn định đến 2080, trước khi thu hẹp nhẹ vào cuối thế kỷ. Giá trị thay đổi cũng chuyển từ tích cực trong nửa đầu thế kỷ sang giảm nhẹ vào giai đoạn 2081–2100. (Hình 3.32 và Hình 3.33).

***Dự báo phân bố của loài Dầu Hasselt tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu**

Theo kết quả mô phỏng từ hai mô hình EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL, Dầu Hasselt có xu hướng suy giảm mạnh về phạm vi sinh cảnh trong thế kỷ 21, đặc biệt trong nửa sau thế kỷ. Mô hình EC-Earth3-Veg cho thấy suy giảm diễn ra từ sớm và nghiêm trọng nhất vào giai đoạn 2061–2080, khi xác suất xuất hiện giảm xuống dưới 0,1, phản ánh môi trường sống gần như không còn phù hợp. Dù có dấu hiệu phục hồi nhẹ vào cuối thế kỷ, phạm vi phân bố vẫn bị thu hẹp đáng kể. Mô hình HadGEM3-GC31-LL phản ánh sự ổn định hơn trong nửa đầu thế kỷ, nhưng ghi nhận suy giảm rõ rệt từ giữa đến cuối thế kỷ. Đến năm 2100, sinh cảnh vẫn tiếp tục bị thu hẹp, làm tăng nguy cơ mất loài. (Hình 3.32 và Hình 3.33).

*** Dự báo phân bố của loài Sồi vàng tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu**

Kết quả tại cho thấy loài Sồi vàng có xu hướng suy giảm rõ rệt phạm vi phân bố trong thế kỷ 21, với mức độ khác nhau giữa hai mô hình. Mô hình EC-Earth3-Veg dự báo suy giảm mạnh và liên tục, với nguy cơ mất hoàn toàn sinh cảnh phù hợp vào cuối thế kỷ, đặc biệt trong giai đoạn 2061–2100. Giá trị dự đoán khả năng phân bố giảm sâu, nhiều khu vực dưới 0,1 và giá trị thay đổi xuống dưới -0,75. Ngược lại, mô hình HadGEM3-GC31-LL phản ánh sự ổn định tương đối trong nửa đầu thế kỷ, trước khi suy giảm dần về cuối thế kỷ. (Hình 3.32 và Hình 3.33).

*** Dự báo phân bố của loài Dẻ langbian tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu**

Theo kết quả mô phỏng từ hai mô hình EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL, Dẻ langbian có nguy cơ suy giảm mạnh phạm vi sinh cảnh trong thế kỷ 21, với khả năng mất sinh cảnh gần như hoàn toàn vào cuối thế kỷ. Mô hình EC-Earth3-Veg ghi nhận suy giảm bắt đầu từ giai đoạn 2021–2040 và trở nên nghiêm trọng từ 2061–2100, khi xác suất xuất hiện tại nhiều khu vực giảm xuống dưới 0,1. Giá trị thay đổi khả năng phân bố cũng giảm mạnh, từ -0,3 đến -1,0, phản ánh sự suy thoái sâu sắc của môi trường sống. Tương tự, mô hình HadGEM3-GC31-LL cho thấy xu hướng suy giảm rõ rệt, mặc dù diễn ra chậm hơn. Sinh cảnh vẫn được duy trì một phần trong nửa đầu thế kỷ, nhưng từ 2061 trở đi, sự suy giảm diễn ra nhanh chóng, với nhiều khu vực không còn phù hợp vào cuối thế kỷ. (Hình 3.32 và Hình 3.33)

*** Dự báo phân bố của loài Thông tre tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu**

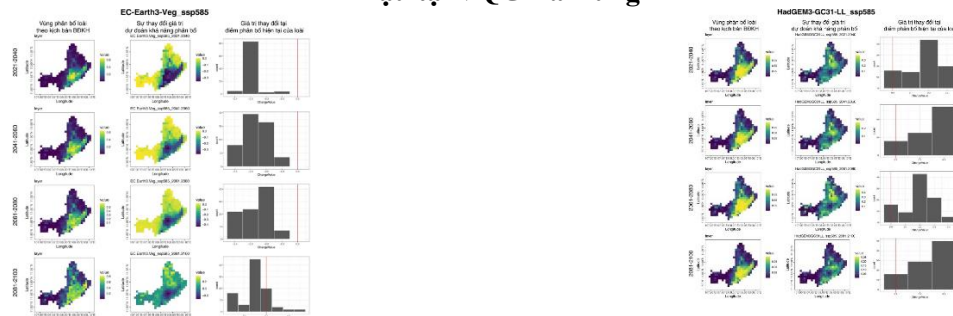
Theo mô phỏng từ hai mô hình EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL, loài Thông tre có xu hướng suy giảm mạnh về phạm vi phân bố dưới kịch bản khí hậu SSP5-8.5. Mô hình EC-Earth3-Veg dự báo sự suy thoái nghiêm trọng ngay từ giữa thế kỷ 21, với nguy cơ mất hoàn toàn sinh cảnh phù hợp vào cuối thế kỷ. Đặc biệt, giai đoạn 2061–2100 ghi nhận sự sụt giảm mạnh khả năng sinh tồn, khi các giá trị dự đoán phân bố tiệm cận bằng 0. Ngược lại, mô hình HadGEM3-GC31-LL cho thấy mức suy giảm diễn ra chậm hơn, với khả năng duy trì sinh cảnh ở một số khu vực đến cuối thế kỷ, phản ánh tiềm năng thích nghi hoặc điều chỉnh sinh thái của loài. (Hình 3.32 và Hình 3.33)

*** Dự báo phân bố của loài Hồng quang tại VQG Tà Đùng dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu**

Theo kết quả mô phỏng từ hai mô hình EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL, loài Hồng quang cho thấy sự ổn định tương đối về phạm vi phân bố trong suốt thế kỷ 21, với một số biến động nhẹ nhưng không

đáng kể. Cả hai mô hình đều dự báo rằng sinh cảnh phù hợp vẫn được duy trì, chủ yếu tập trung tại khu vực phía Đông Nam, với xác suất xuất hiện dao động ổn định từ 0,2 đến 0,75. (Hình 3.32 và Hình 3.33).

Hình 3. 32. Dự đoán vùng phân bố của một số loài cây gỗ quý hiếm theo các kịch bản biến đổi khí hậu tại VQG Tà Đùng



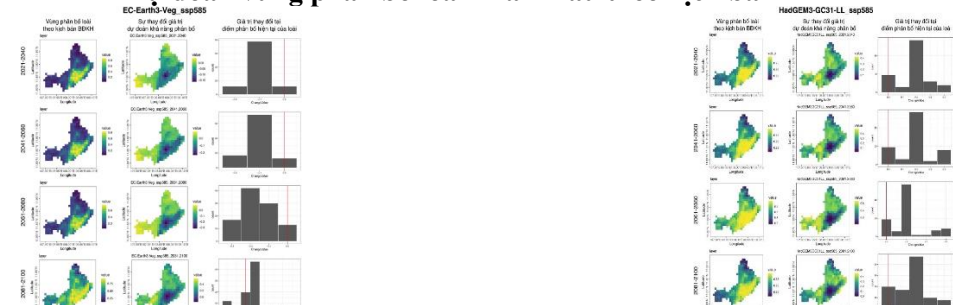
Dự đoán vùng phân bố loài Thông nạng theo kịch bản BDKH



Dự đoán vùng phân bố loài Trầm hương theo kịch bản BDKH



Dự đoán vùng phân bố loài Trám nâu theo kịch bản BDKH



Dự đoán vùng phân bố loài Dầu baid theo kịch bản BDKH



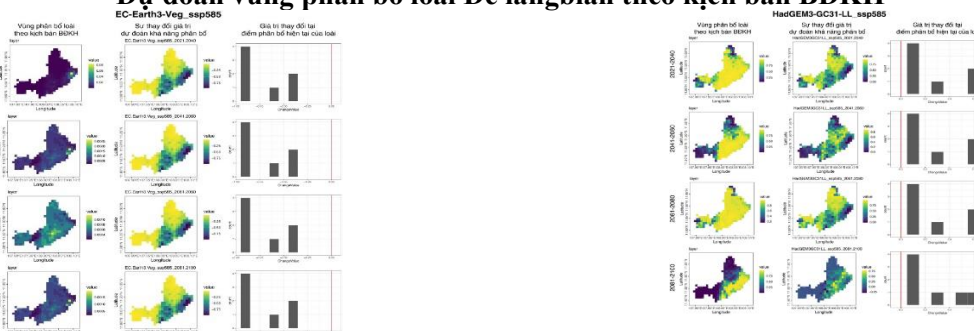
Dự đoán vùng phân bố loài Dầu Hasselt theo kịch bản BDKH



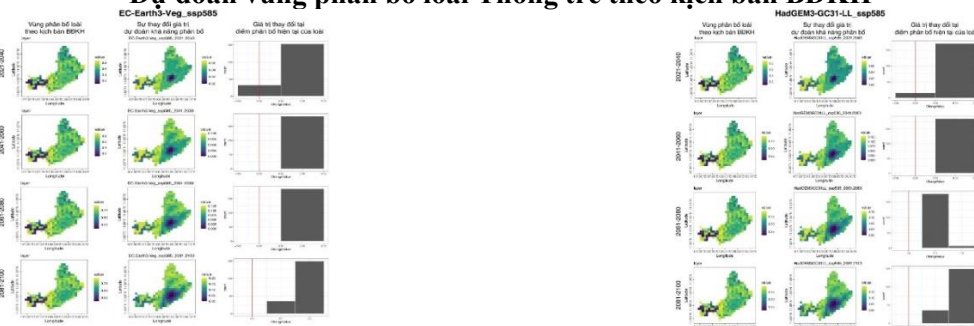
Dự đoán vùng phân bố loài Sôi vàng theo kịch bản BĐKH



Dự đoán vùng phân bố loài Dẻ langbian theo kịch bản BĐKH

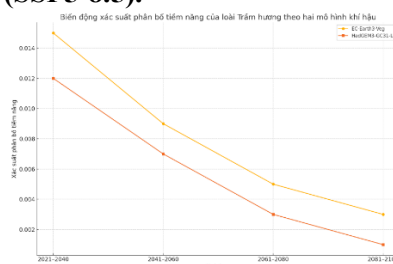


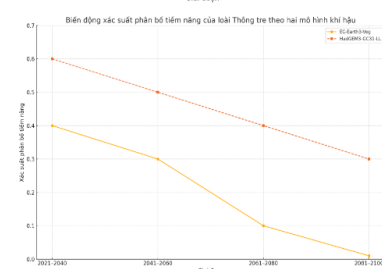
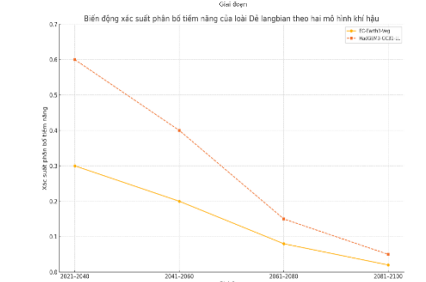
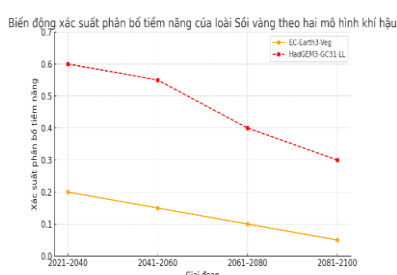
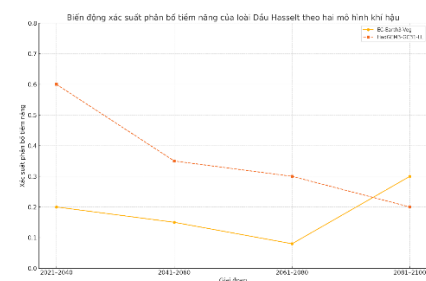
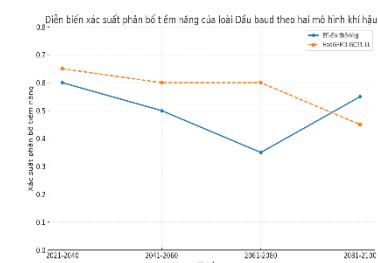
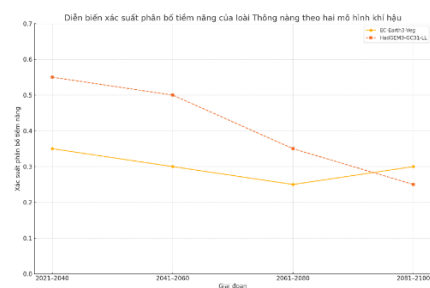
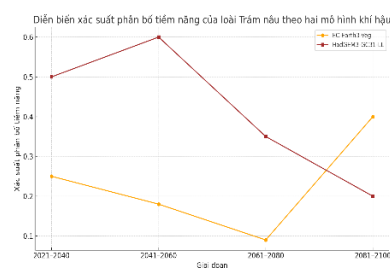
Dự đoán vùng phân bố loài Thông tre theo kịch bản BĐKH



Dự đoán vùng phân bố loài Hồng quang theo kịch bản BĐKH

Hình 3.33. Xu hướng biến đổi xác suất phân bố tiềm năng của các loài quan tâm theo thời gian dưới tác động của biến đổi khí hậu (SSP5-8.5).





3.4.4. Tác động của biến đổi khí hậu đến phân bố địa lý của 10 loài TGQH tại VQG Tà Đùng
Bảng 3.14. Bảng so sánh 10 loài theo hai mô hình khí hậu và bốn thời kỳ khác nhau

Loài	EC-Earth3-Veg				HadGEM3-GC31-LL			
	2021–2040	2041–2060	2061–2080	2081–2100	2021–2040	2041–2060	2061–2080	2081–2100
Xá xị	Suy giảm nhẹ	Tiếp tục suy giảm	Suy giảm mạnh nhất	Phục hồi nhẹ	Suy giảm nhẹ	Suy giảm nhẹ	Suy giảm rõ	Phục hồi chậm
Trám hương	Suy giảm	Suy giảm mạnh	Suy giảm nghiêm trọng	Không phục hồi	Suy giảm	Suy giảm mạnh	Suy giảm nghiêm trọng	Không phục hồi
Trám nâu	Suy giảm	Tiếp tục suy giảm	Thu hẹp rõ	Phục hồi nhẹ	Ổn định	Tiếp tục suy giảm	Suy giảm	Suy giảm
Thông nạng	Thu hẹp nhẹ	Thu hẹp dần	Chững lại	Phục hồi nhẹ	Thu hẹp nhẹ	Thu hẹp dần	Chững lại	Thu hẹp
Dầu baid	Thu hẹp nhẹ	Suy giảm nhẹ	Suy giảm mạnh	Phục hồi nhẹ	Thu hẹp nhẹ	Suy giảm nhẹ	Phục hồi nhẹ	Suy giảm nhẹ
Dầu Hasselt	Suy giảm	Tiếp tục suy giảm	Suy giảm mạnh	Phục hồi không đáng kể	Suy giảm	Tiếp tục suy giảm	Suy giảm rõ	Mất sinh cảnh
Sồi vàng	Bắt đầu suy giảm	Tiếp tục suy giảm	Suy giảm mạnh	Mất sinh cảnh	Suy giảm	Suy giảm nhẹ	Suy giảm mạnh	Mất sinh cảnh
Dẻ Langbian	Suy giảm	Suy giảm rõ rệt	Suy thoái mạnh	Khó duy trì	Bắt đầu suy giảm	Suy giảm	Suy giảm	Suy giảm mạnh

Thông tre	Suy giảm	Tiếp tục suy giảm	Suy giảm mạnh	Suy giảm mạnh	Suy giảm	Tiếp tục suy giảm	Suy giảm rõ	Mất sinh cảnh
Hồng quang	Thu hẹp nhẹ	Thu hẹp	Phục hồi	Phục hồi	Thu hẹp nhẹ	Thu hẹp	Phục hồi	Phục hồi

Kết quả tại Bảng 3.14 cho thấy:

- Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến phân bố loài thực vật TGQH: Phân tích từ hai mô hình khí hậu (EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL) cho thấy nhiệt độ tăng và độ ẩm giảm có tác động mạnh đến phân bố tiềm năng của các loài TV TGQH. Năm loài như Sồi vàng, Trầm hương, Dầu Hasselt, Dẻ Langbian và Thông tre có nguy cơ thu hẹp mạnh sinh cảnh, thậm chí tuyệt chủng cục bộ vào cuối thế kỷ XXI. Ngược lại, các loài như Xá xị, Trám nâu, Dầu baud, Thông nằng và Hồng quang thể hiện khả năng duy trì sinh cảnh ổn định hơn, nhờ khả năng thích nghi tốt hơn với điều kiện biến đổi.

- Xu hướng suy giảm phân bố theo thời gian: Cả hai mô hình đều ghi nhận sự suy giảm mạnh trong ba giai đoạn đầu thế kỷ XXI, đặc biệt rõ nét ở giai đoạn 2061–2080. Nguyên nhân chính là nhiệt độ vượt ngưỡng thích nghi sinh thái và suy giảm độ ẩm trong các kịch bản phát thải cao (SSP5-8.5), phù hợp với xu hướng toàn cầu được ghi nhận trong các nghiên cứu của Wei et al., 2024, Xue et al., 2024, và Tang et al., 2020.

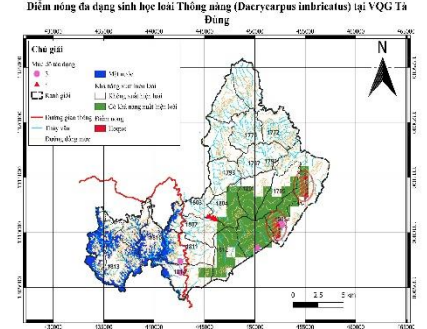
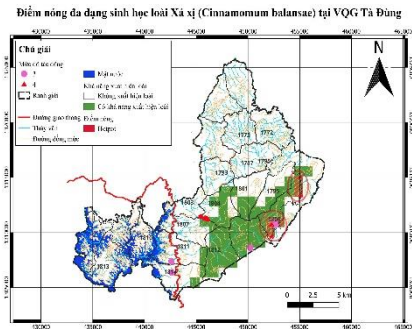
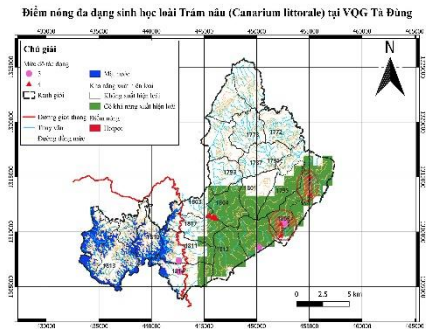
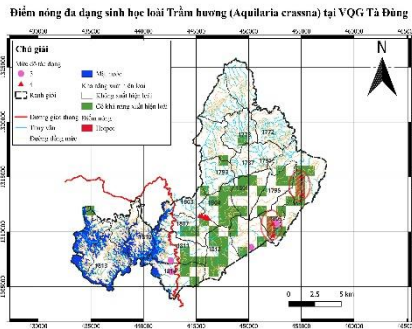
- Khả năng phục hồi và thích nghi sinh thái: Trong số 10 loài nghiên cứu, các loài như Sồi vàng, Trầm hương, Dầu Hasselt, Dẻ langbian, Thông tre có xu hướng suy giảm mạnh, với nguy cơ tuyệt chủng cục bộ vào cuối thế kỷ XXI. cho thấy dấu hiệu phục hồi sinh cảnh vào giai đoạn 2081–2100. Cả hai mô hình EC-Earth3-Veg và HadGEM3-GC31-LL đều dự báo sự ổn định cục bộ, phản ánh khả năng thích nghi muộn của các loài lâu năm (IPCC, 2022). Tuy vậy, mức phục hồi này không đủ bù đắp tổn thất tích lũy trước đó. Nếu quần thể suy giảm dưới ngưỡng phục hồi, nguy cơ mất đa dạng di truyền và giảm khả năng thích nghi sẽ gia tăng. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Giovanni et al., 2022, cho thấy các dấu hiệu phục hồi sinh thái không nhất thiết đảm bảo khả năng phục hồi hoàn toàn nếu vượt qua ngưỡng sinh thái then chốt.

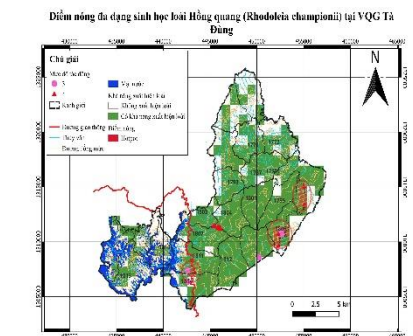
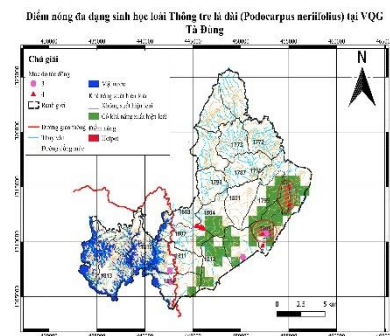
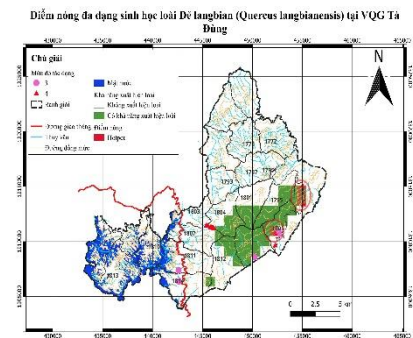
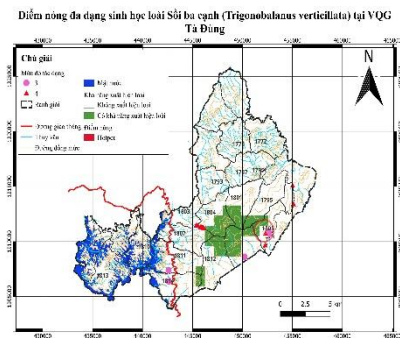
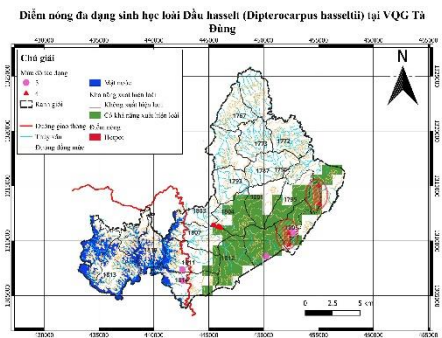
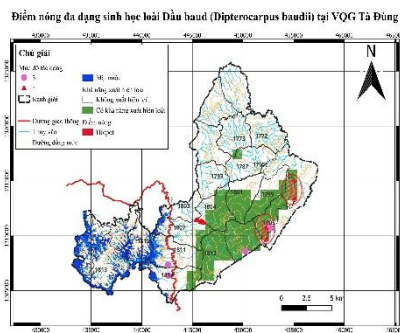
So sánh hai mô hình cho thấy EC-Earth3-Veg dự báo xu hướng suy giảm nhẹ hơn và khả năng phục hồi sinh cảnh tốt hơn vào cuối thế kỷ XXI. Ngược lại, HadGEM3-GC31-LL đưa ra kịch bản tiêu cực hơn, với suy giảm mạnh trong ba giai đoạn đầu và phục hồi hạn chế. Sự khác biệt chủ yếu do đặc điểm mô hình hóa: HadGEM3-GC31-LL có độ phân giải cao, nhạy với khí hậu cực đoạn, trong khi EC-Earth3-Veg tích hợp sâu các yếu tố sinh quyển như vòng tuần hoàn carbon và cơ chế phục hồi sinh học.

3.5. Xác định điểm hotspots đa dạng sinh học và đề xuất giải pháp bảo tồn các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng.

* Xác định điểm hotspots đa dạng sinh học

Kết quả tại hình 3.34 và Bảng 3.15, cho thấy các tiểu khu thường xuyên xuất hiện trong các vùng hotspots của 10 loài quan tâm bao gồm: 1795, 1801, 1805, 1804, 1812, 1811 và 1814





Hình 3.34. Bản đồ vùng điểm nóng đa dạng sinh học của 10 loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng

Bảng 3.15. Các tiểu khu ưu tiên bảo tồn theo từng loài quan tâm

Loài	Tiểu khu ưu tiên bảo tồn
Trầm hương	1795, 1805, 1804, 1812
Trám nâu	1795, 1805, 1804, 1812
Xá xị	1795, 1805, 1804, 1812
Thông nạng	1795, 1805, 1804, 1812
Dầu baud	1795, 1805, 1801, 1804, 1812
Dầu hasselt	1795, 1805, 1801, 1804, 1812
Sồi ba cạnh	1805, 1812, 1804
Dẻ langbian	1795, 1805, 1804
Thông tre	1795, 1805, 1804, 1812
Hồng quang	1795, 1805, 1812, 1814, 1811, 1804

Trên cơ sở phân tích phân bố tiềm năng và mức độ tác động nhân sinh, nghiên cứu đã xác định các tiểu khu có giá trị bảo tồn cao cho từng loài thực vật TGQH tại VQG Tà Đùng. Hầu hết các loài đều tập trung ở

khu vực phía Đông, Đông Nam và trung tâm VQG– nơi đồng thời có mức độ chồng lớp cao giữa sinh cảnh phù hợp và áp lực con người.

Các tiểu khu như 1795, 1801, 1805, 1804, 1812, 1811 và 1814 được xác định là vùng trọng điểm cần ưu tiên quản lý và bảo tồn, do là nơi tập trung phân bố tiềm năng của nhiều loài như Trầm hương, Xá xị, Trám nâu, Thông nang, Dầu baud, Dầu Hasselt, Sồi vàng, Dẻ Langbian, Thông tre và Hồng quang.

Việc xác định các khu vực này có ý nghĩa thiết thực trong việc xây dựng chiến lược bảo tồn hiệu quả, góp phần duy trì đa dạng sinh học và sự ổn định lâu dài của hệ sinh thái rừng tại VQG Tà Đùng.

*** Đề xuất giải pháp bảo tồn tại VQG Tà Đùng dưới ảnh hưởng của biến đổi khí hậu**

Dựa trên kết quả nghiên cứu, nhóm thực hiện đã phối hợp tổ chức hội thảo với Ban lãnh đạo và cán bộ kỹ thuật VQG Tà Đùng nhằm thảo luận và đề xuất giải pháp bảo tồn phù hợp. Công cụ phân tích SWOT được sử dụng để nhận diện các điểm mạnh, điểm yếu, cơ hội và thách thức đặc thù của khu vực. Từ đó, các khuyến nghị bảo tồn được xây dựng trên cơ sở kết hợp giữa dữ liệu khoa học và điều kiện thực tiễn, đảm bảo tính khả thi và hiệu quả trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

Bảng 3.16. Phân tích SWOT trong công tác bảo tồn đa dạng sinh học tại Vườn quốc gia Tà Đùng trong bối cảnh biến đổi khí hậu

Strengthenness (Điểm mạnh) - VQG Tà Đùng có diện tích rừng tự nhiên lớn (≈ 17.200 ha), độ che phủ cao, nhiều vùng còn giữ được tính nguyên sinh. - Đa dạng sinh học phong phú: ghi nhận 294 loài cây gỗ, trong đó có nhiều loài quý hiếm nằm trong Sách Đỏ Việt Nam và IUCN. - Địa hình phức tạp, khó tiếp cận (trên 1.200 m), giúp giảm áp lực khai thác trực tiếp của con người. - Đã có hệ thống bản đồ phân bố tiềm năng và hotspots từ kết quả nghiên cứu, hỗ trợ trực tiếp cho công tác quản lý và giám sát. - Ban Quản lý VQG có đội ngũ cán bộ kỹ thuật chuyên trách, kinh nghiệm trong công tác bảo tồn và hợp tác nghiên cứu.	Weaknesses (Điểm yếu) - Nguồn lực tài chính, nhân lực và trang thiết bị phục vụ tuần tra – giám sát còn hạn chế. - Hệ thống giám sát sinh cảnh chủ yếu dựa vào phương pháp truyền thống, chưa ứng dụng đồng bộ UAV, LiDAR và dữ liệu vệ tinh. - Công tác kiểm chứng thực địa chưa bao phủ hết các sinh cảnh, đặc biệt tại vùng có xác suất phân bố loài thấp. - Nhiều loài TGQH (như Trầm hương, Thông tre, Dầu hasselt) có mật độ cá thể thấp, dẫn đến khó khăn trong phục hồi và nhân giống. - Sự phối hợp giữa các bên liên quan (cộng đồng, chính quyền, doanh nghiệp) chưa thực sự chặt chẽ và hiệu quả.
Opportunities (Cơ hội) - Sự quan tâm của Nhà nước và các tổ chức quốc tế đến bảo tồn đa dạng sinh học và thích ứng biến đổi khí hậu ngày càng tăng. - Khả năng tích hợp kết quả nghiên cứu (SDMs, hotspots) vào quy hoạch bảo tồn và phát triển kinh tế – xã hội địa phương. - Các công nghệ mới (AI, viễn thám, UAV, GIS) mở ra cơ hội nâng cao năng lực giám sát và quản lý tài nguyên rừng. - Xu hướng phát triển sinh kế bền vững gắn với bảo tồn (CBNRM, du lịch sinh thái, chi trả dịch vụ môi trường rừng). - Mạng lưới hợp tác nghiên cứu quốc tế, các dự án hỗ trợ kỹ thuật và tài chính (Erasmus+, USAID, WWF, IUCN) sẵn có.	Threats (Thách thức) - Tác động của biến đổi khí hậu (nhiệt độ tăng, lượng mưa biến động) làm suy giảm hoặc dịch chuyển sinh cảnh phù hợp của nhiều loài. - Áp lực từ các hoạt động nhân sinh: khai thác trái phép, cháy rừng, chuyển đổi mục đích sử dụng đất, phát triển nông nghiệp. - Sự xâm lấn của loài ngoại lai và suy thoái đất tại các khu vực rìa rừng. - Suy giảm quần thể tự nhiên ở một số loài TGQH, nguy cơ mất đa dạng di truyền. - Tốc độ phát triển kinh tế – xã hội tại khu vực Tây Nguyên làm gia tăng nguy cơ xung đột giữa mục tiêu bảo tồn và phát triển.

- Các nhóm giải pháp chính

Phân tích SWOT cho thấy công tác bảo tồn đa dạng sinh học tại VQG Tà Đùng có lợi thế về tính đa dạng loài và địa hình, song còn hạn chế về nguồn lực và chịu nhiều thách thức từ khai thác cũng như biến đổi khí hậu. Trên cơ sở đó, bốn nhóm giải pháp được xây dựng. Nhóm SO tập trung ứng dụng công nghệ hiện đại, mở rộng hợp tác quốc tế, gắn bảo tồn với du lịch sinh thái và cộng đồng. Nhóm ST khoanh vùng bảo vệ nghiêm ngặt, thiết lập vùng lõi và tăng cường cảnh báo, kiểm soát khai thác trái phép. Nhóm WO chú trọng nâng cấp hạ tầng quản lý, đào tạo nhân lực và hoàn thiện cơ sở dữ liệu đa dạng sinh học. Nhóm WT kiểm soát khai thác, phục hồi sinh cảnh, xây dựng hành lang sinh học và tích hợp kịch bản khí hậu vào quy hoạch. Cách tiếp cận này định hướng bảo tồn theo hướng chủ động, khoa học và bền vững.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

A. Kết luận: Luận án rút ra một số kết luận chính như sau:

i) *Phân loại và xây dựng bản đồ trạng thái rừng dựa vào ảnh vệ tinh:* Kết quả phân loại rừng tại VQG Tà Đùng đạt độ tin cậy $OA = 85.24\%$, $Kappa = 0,76$ đối với trạng thái thảm phủ. Diện tích rừng ít bị tác động chiếm 62%, rừng tác động trung bình và rừng tác động mạnh lần lượt là 20% và 18%.

ii) *Ứng dụng mô hình SDMs để xác định vùng sinh thái tiềm năng, hỗ trợ điều tra khảo sát thực địa:* Nghiên cứu đã lựa chọn 10 biến đầu vào (Bio01, Bio03, Bio04, Bio12, Bio16, NDVI, hiện trạng thảm phủ rừng, độ dốc, độ cao và pH đất) để xây dựng mô hình SDMs dự báo phân bố tiềm năng của 10 loài TGQH với kết quả mô hình đạt AUC = 0,7, khoảng tin cậy 95% cho thấy độ tin cậy trong đánh giá. Kết quả kiểm chứng thực địa cho thấy 91% ô mẫu dự báo có ghi nhận loài, khẳng định tính khả thi của SDMs trong điều kiện dữ liệu hạn chế và hiệu quả trong tối ưu hóa khảo sát thực địa.

iii) *Tính toán chỉ số đa dạng sinh học và phân tích tác động của địa hình (độ dốc, độ cao) đến đa dạng sinh học của lâm phần:*

Hệ sinh thái rừng tại VQG Tà Đùng được đặc trưng bởi sự ưu thế của các loài phổ biến như Chò xót, Nhãn rừng, Trâm trắng, trong khi 10 loài cây gỗ quý hiếm có giá trị IVI thấp, phản ánh tình trạng suy giảm quần thể. Quần xã thực vật thể hiện mức độ đa dạng và ổn định cao với các chỉ số Shannon = 4,82, Simpson = 0,99 và Margalef = 32,62, phản ánh tính đa dạng cao đặc trưng của rừng mưa nhiệt đới tại Tà Đùng. Độ cao là yếu tố chi phối chính đến phân hóa thành phần loài, trong khi độ dốc chỉ đóng vai trò thứ yếu. Vùng sinh cảnh trên 1.200m có mức đa dạng sinh học cao hơn, trong khi các khu vực thấp (<1.000m) bị suy giảm thành phần loài do ảnh hưởng từ các hoạt động của con người.

vi) *Dự báo phân bố tiềm năng của các loài TGQH theo các kịch bản biến đổi khí hậu trong tương lai:* Thuật toán MaxEnt đã dự báo hiệu quả vùng phân bố tiềm năng của các loài cây gỗ quý hiếm tại VQG Tà Đùng với AUC giao động từ 0,78–0,97, khoảng tin cậy 95% cho thấy độ tin cậy trong đánh giá. Kết quả chỉ ra rằng phần lớn các loài tập trung ở phía Đông–Đông Nam và trung tâm VQG. Dưới kịch bản biến đổi khí hậu SSP5-8.5, cả hai mô hình khí hậu (EC-Earth3-Veg, HadGEM3-GC31-LL) đều dự báo sự suy giảm mạnh phạm vi phân bố trong thế kỷ XXI, đặc biệt giai đoạn 2061–2080. Các loài như Sồi ba cạnh, Trâm hương, Dầu hasselt, Dẻ langbian và Thông tre có nguy cơ suy giảm nghiêm trọng, trong khi Xá xị, Trám nâu, Dầu baud, Thông nang và Hồng quang cho thấy khả năng thích nghi và phục hồi cục bộ vào cuối thế kỷ.

v) *Xác định điểm hotspots đa dạng sinh học và đề xuất giải pháp bảo tồn các loài nghiên cứu tại VQG Tà Đùng:*

Các tiểu khu 1795, 1801, 1805, 1804, 1812, 1811 và 1814 là những khu vực ưu tiên về bảo tồn đa dạng sinh học.

Các ứng dụng và giải pháp bảo tồn tại VQG Tà Đùng trong bối cảnh biến đổi khí hậu như sau:

- + Thiết lập hệ thống giám sát rừng thông minh dựa trên nền tảng GEE, QGIS và UAV/Drone.
- + Khoanh vùng bảo tồn trọng điểm tại các tiểu khu 1795, 1801, 1805, 1804, 1812, 1811 và 1814, kết hợp với chốt bảo vệ, tuần tra định kỳ và UAV để giảm áp lực xâm lấn.
- + Hỗ trợ giám sát và tuần tra thông qua dữ liệu bản đồ phân bố tiềm năng và hotspots, xây dựng thiết kế tuyến tuần tra và lắp đặt thiết bị cảnh báo sớm suy thoái sinh cảnh.
- + Ưu tiên phục hồi và quản lý rủi ro tại các khu vực phía Tây và Tây Bắc của VQG – nơi sinh cảnh ít phù hợp, cùng một số tiểu khu có mức độ tác động cao như 1795, 1801, 1805, 1804, 1812, 1811 và 1814 – cần được đưa vào kế hoạch phục hồi rừng (trồng bổ sung cây bản địa, xúc tiến tái sinh tự nhiên). Đồng thời, cần triển khai biện pháp quản lý rủi ro, bao gồm kiểm soát cháy rừng, khai thác trái phép và chuyển đổi mục đích sử dụng đất, nhằm giảm thêm áp lực đối với các sinh cảnh vốn đã nhạy cảm.
- + Tích hợp quy hoạch bảo tồn bằng cách đưa dữ liệu hotspots vào quy hoạch bảo tồn phát triển của VQG, đồng thời xây dựng hành lang sinh học kết nối Tà Đùng với các khu bảo tồn lân cận.

Các giải pháp bảo tồn tại VQG Tà Đùng được định hướng theo cách tiếp cận tổng hợp, kết hợp giữa thiết lập các vùng bảo tồn nghiêm ngặt, phục hồi sinh cảnh và ứng dụng công nghệ hiện đại trong giám sát – quản lý.

B. Kiến nghị:

* **Tồn tại:** Bên cạnh những kết quả đạt được, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế. Thứ nhất, phạm vi phân tích mới chỉ tập trung vào 10/21 loài cây gỗ quý hiếm tại VQG Tà Đùng, nên chưa phản ánh đầy đủ tính đa dạng loài. Thứ hai, việc kiểm chứng mô hình chủ yếu thực hiện ở các khu vực có xác suất phân bố cao, trong khi các vùng tiềm năng thấp và trung bình chưa được khảo sát toàn diện. Thứ ba, kiểm chứng thực địa đối với các điểm vắng mặt còn hạn chế, có thể ảnh hưởng đến độ đặc hiệu của mô hình. Cuối cùng, nghiên cứu mới sử dụng MaxEnt mà chưa đối sánh với các mô hình khác (RF, GAM, Ensemble...), do đó chưa xác định được mô hình tối ưu nhất.

*** Kiến nghị:**

Để nâng cao hiệu quả nghiên cứu và bảo tồn, các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng phạm vi sang toàn bộ 21 loài cây gỗ quý hiếm tại VQG Tà Đùng, tăng cường kiểm chứng thực địa ở các khu vực có xác suất phân bố thấp, và thử nghiệm nhiều mô hình dự báo khác nhau (RF, GAM, BIOMOD2, Ensemble) bên cạnh MaxEnt. Ngoài ra, việc tích hợp thêm các biến môi trường động và yếu tố kinh tế – xã hội sẽ giúp phân tích toàn diện hơn.

Về quản lý, cần xây dựng mạng lưới giám sát dài hạn ứng dụng UAV, LiDAR, dữ liệu vệ tinh; khoanh vùng bảo tồn trọng điểm và phục hồi sinh cảnh bằng loài bản địa; đồng thời tích hợp bản đồ hotspots và phân bố tiềm năng vào quy hoạch nhằm hình thành hành lang sinh học liên vùng.

Ở cấp cộng đồng và chính sách, nên thúc đẩy bảo tồn dựa vào cộng đồng gắn với sinh kế bền vững, tăng cường kiểm soát khai thác trái phép, mở rộng hợp tác kỹ thuật – tài chính, và phát triển chiến lược thích ứng biến đổi khí hậu để bảo đảm tính bền vững lâu dài cho hệ sinh thái rừng.

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

A. Tạp chí

1. Application of species distribution models to predict the distribution model of *Cinnamomum balansae* Lecomte in Ta Dung National Park, Dak Nong, Viet Nam. International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJLERA). ISSN: 2455-7137. Volume – 09, Issue – 09, September 2024, PP – 01-11. DOI.10.56581/IJLERA.9.9.01-11. IF=2,105
2. Classification of forest cover of Ta Dung National Park, Vietnam using optical satellite images. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1391 012018. DOI 10.1088/1755-1315/1391/1/012018.SCOPUS
3. Đánh giá hiệu suất của ảnh vệ tinh Sentinel 2A và PlanetScope trong phân loại thảm phủ rừng tại Vườn Quốc gia Tà Dung, Đắk Nông, Việt Nam. Tạp chí Khoa học Lâm Nghiệp. Số 02.2024. Page: 84-98
4. Ứng dụng của công nghệ viễn thám và GIS trong việc mô hình hóa không gian phân bố thực vật thích ứng với biến đổi khí hậu. Tạp chí Khoa học Lâm Nghiệp. Số 04.2024. Page: 93-113.
5. Assessment of stand structure characteristics in forest compartments containing *Cinnamomum balansae* in Ta Dung National Park, Dak Nong Province, Viet Nam. International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJLERA). ISSN: 2455-7137. pp 01 - 12, Vol 10 - No. 03, 2025. 10.56581/IJLERA.10.3.01-12. IF=2,105

B. Bài báo hội thảo Quốc tế

1. “Application of GIS technology, remote sensing, and data analysis for studying woody plant biodiversity in Ta Dung National Park, Dak Nong”, hội thảo ASTRA 2024 (2nd National Conference on Advances in Science and Technology for Regenerative Agriculture) do Viện Công nghệ Bannari Amman, Sathyamangalam, Ấn Độ, hợp tác với Đại học Brunei Darussalam tổ chức (đã có chấp nhận đăng của Ban tổ chức hội thảo).