

TRANG THÔNG TIN VÀ NHỮNG ĐIỂM MỚI CỦA LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Tên luận án: “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”

Ngành: Lâm sinh Mã số: 9620205

Họ tên Nghiên cứu sinh: Phan Thị Hằng

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

PGS. TS. Lưu Hồng Trường

Cơ sở đào tạo: Trường Đại học Tây Nguyên

1. TÓM TẮT NỘI DUNG LUẬN ÁN

Đề tài luận án đã được tiến hành từ 2021 đến 2024 nhằm

i) Phân loại và xác định trạng thái rừng theo mức tác động tại VQG Tà Đùng dựa vào ảnh vệ tinh.

ii) Ứng dụng SDMs nhằm hỗ trợ công tác điều tra và khảo sát thực địa.

iii) Đánh giá đặc điểm đa dạng sinh học của các lâm phần tại VQG Tà Đùng.

iv) 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.

v) 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.

Các kết quả chính đã đạt được:

+ *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%.

+ *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.

+ *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.

+ *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 theo các kịch bản biến đổi khí hậu của các loài TGQH 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 nghiên cứu 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, Trầm 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.

+ *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.

2. NHỮNG KẾT QUẢ MỚI CỦA LUẬN ÁN

2.1. Đóng góp khoa học của luận án

Luận án mang lại một số đóng góp mới trong lĩnh vực nghiên cứu sinh thái và bảo tồn các loài thực vật TGQH, cụ thể như sau:

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 SDMs với các loài TGQH có mật độ thấp và nhạy cảm với tác động môi trường trong phạm vi nghiên cứu hẹp như VQG. 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.

2.2. Ý nghĩa thực tiễn

- 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 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.

- 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.

3. CÁC ỨNG DỤNG/KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG TRONG THỰC TIỄN, NHỮNG VẤN ĐỀ CẦN TIẾP TỤC NGHIÊN CỨU

3.1. Khả năng ứng dụng trong thực tiễn

Kết quả nghiên cứu của luận án cung cấp cơ sở khoa học có giá trị thực tiễn, phục vụ cho công tác quy hoạch bảo tồn, quản lý tài nguyên rừng và giám sát đa dạng sinh học tại Vườn quốc gia Tà Đùng, đồng thời có tiềm năng mở rộng ứng dụng tại các hệ sinh thái rừng tương tự tại Việt Nam. Các kết quả nghiên cứu có thể được ứng dụng trong các lĩnh vực sau:

+ *Hỗ trợ quy hoạch bảo tồn và phân vùng quản lý sinh cảnh:*

Bản đồ phân bố tiềm năng của các loài thực vật thân gỗ quý hiếm cung cấp dữ liệu giúp các cơ quan quản lý như Ban quản lý Vườn quốc gia, Chi cục Kiểm lâm, Sở Nông nghiệp và Phát triển nông thôn,... xác định các khu vực có giá trị sinh thái cao. Những vùng có mức độ phù hợp sinh cảnh cao có thể được ưu tiên đưa vào quy hoạch vùng lõi hoặc khu vực phục hồi sinh thái.

+ *Tối ưu hóa điều tra thực địa và giám sát sinh cảnh:*

Việc kết hợp bản đồ phân bố tiềm năng và phân loại trạng thái rừng giúp định hướng khảo sát hiệu quả, tiết kiệm chi phí và nâng cao độ chính xác, đặc biệt đối với các loài có dữ liệu hiện diện hạn chế. Các khu vực điểm nóng đa dạng sinh học có thể được ưu tiên theo dõi thường xuyên, góp phần phát hiện sớm nguy cơ suy thoái sinh cảnh và mất loài.

+ *Cơ sở phục hồi rừng và kiểm soát suy thoái sinh cảnh:*

Những khu vực bị tác động mạnh nhưng vẫn còn tiềm năng sinh thái có thể được áp dụng các biện pháp khôi phục như khoanh nuôi tái sinh, trồng bổ sung cây bản địa, hoặc kiểm soát loài ngoại lai xâm hại. Việc tích hợp kết quả nghiên cứu với sự tham gia của cộng đồng địa phương còn góp phần thúc đẩy bảo tồn gắn liền với phát triển sinh kế bền vững.

+ *Định hướng chiến lược bảo tồn trong bối cảnh biến đổi khí hậu:*

Thông qua việc xây dựng mô hình SDMs kết hợp với kịch bản biến đổi khí hậu SSP5-8.5, luận án đã cung cấp công cụ hữu ích để đánh giá xu hướng thay đổi sinh cảnh của các loài quý hiếm trong tương lai. Kết quả mô hình hóa cho phép phân tích nguy cơ suy giảm hoặc dịch chuyển vùng phân bố loài dưới tác động của khí hậu, từ đó xây dựng kế hoạch bảo tồn linh hoạt theo từng giai đoạn:

2021–2040: Tập trung bảo vệ vùng sinh cảnh hiện hữu và tăng cường giám sát tại các khu vực dễ bị tổn thương.

2041–2080: Ưu tiên phục hồi rừng, bảo tồn nguồn gen và gia tăng tính chống chịu của sinh cảnh.

2081–2100: Triển khai các giải pháp chủ động như di dời loài đến vùng thích hợp hơn hoặc nhân giống phục hồi tại các khu vực có điều kiện sinh thái mới phù hợp.

Ngoài ra, dữ liệu bản đồ phân bố và điểm nóng đa dạng sinh học còn có thể tích hợp vào các hệ thống hỗ trợ ra quyết định trong quy hoạch sử dụng đất, điều chỉnh

chính sách bảo tồn ứng phó với biến đổi khí hậu, và xây dựng các hành lang sinh học thích ứng nhằm duy trì tính liên tục của sinh cảnh trong dài hạn.

Tóm lại, các kết quả nghiên cứu của luận án không chỉ đóng góp cho lý luận mà còn có giá trị thực tiễn cao, có thể hỗ trợ các cơ quan quản lý, tổ chức bảo tồn và cộng đồng địa phương trong việc xây dựng các giải pháp quản lý rừng hiệu quả, thích ứng với biến đổi khí hậu và hướng đến phát triển bền vững tài nguyên rừng.

3.2. Những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

Bên cạnh những kết quả đã đạt được, nghiên cứu vẫn còn những vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu như sau:

+ Mở rộng phạm vi nghiên cứu về loài và khu vực: Các nghiên cứu tiếp theo nên mở rộng điều tra toàn bộ 21 loài thực vật thân gỗ quý hiếm đã được ghi nhận tại Vườn quốc gia Tà Đùng, đồng thời áp dụng tại các khu rừng đặc dụng khác có điều kiện tương đồng nhằm kiểm định tính khái quát hóa và độ ổn định của mô hình SDMs.

+ Bổ sung khảo sát thực địa tại các vùng có xác suất phân bố trung bình và thấp: Việc kiểm chứng mô hình nên được thực hiện đầy đủ trên các vùng có xác suất phân bố khác nhau, bao gồm cả các sinh cảnh rìa và sinh cảnh thứ cấp, nhằm đánh giá toàn diện hiệu suất và mức độ phù hợp sinh thái tiềm năng của từng loài.

+ So sánh đa mô hình và xây dựng mô hình tổ hợp: Các nghiên cứu tiếp theo nên thử nghiệm nhiều loại mô hình khác nhau như BIOMOD2, Random Forest (RF), Generalized Additive Models (GAM), cũng như các mô hình tổ hợp (ensemble models) để so sánh hiệu quả, từ đó lựa chọn mô hình tối ưu theo đặc điểm sinh thái của từng loài và từng khu vực.

Người hướng dẫn 1
(Ký tên, họ tên)

Nghiên cứu sinh
(Ký tên, họ tên)

PGS.TS Nguyễn Thị Thanh Hương
Người hướng dẫn 2
(Ký tên, họ tên)

Phan Thị Hằng

PGS. TS. Lưu Hồng Trường
XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO
HIỆU TRƯỞNG

INFORMATION SUMMARY AND NOVEL CONTRIBUTIONS OF THE DOCTORAL THESIS

Title of the thesis: "Application of mul-timethod approaches in the study of rare and valuable woody plant species in Ta Dung National Park, Đak Nong Province"

Field of Study: Silviculture Code: 9620205

Ph Candidate: Phan Thi Hang

Academic Supervisors: + Assoc. Prof. Dr. Nguyen Thi Thanh Huong

+ Assoc. Prof. Dr. Luu Hong Truong

Institution: Tay Nguyen University

1. SUMMARY OF THE DISSERTATION CONTENT

The dissertation was conducted from 2021 to 2024 with the following objectives:

i) To classify and assess forest status according to anthropogenic impact levels in Ta Dung National Park using satellite imagery.

ii) To apply species distribution models (SDMs) to support field investigations and survey efforts.

iii) To evaluate the biodiversity characteristics of forest compartments in Ta Dung National Park.

iv) To analyze the impacts of climate change scenarios on the distribution shifts of rare and endangered tree species, thereby identifying potential risks of biodiversity loss.

v) To identify priority biodiversity areas and propose conservation strategies and sustainable forest resource management approaches for Ta Dung National Park.

The main results achieved are as follows:

+ *Forest classification and status mapping from satellite imagery:* Forest mapping in Ta Dung National Park achieved high accuracy, with an overall accuracy (OA) of 85.24% and a Kappa coefficient of 0.76 for canopy cover classification. Minimally impacted forests occupy 62% of the park, while moderately and heavily impacted forests account for 20% and 18%, respectively.

+ *Application of SDMs for identifying potential ecological zones and supporting field surveys:* Ten predictor variables (Bio01, Bio03, Bio04, Bio12, Bio16, NDVI, current canopy cover status, slope, elevation, and soil pH) were used to construct SDMs predicting the potential distribution of ten rare and endangered tree species. The model achieved an AUC of 0.7 with a 95% confidence interval, indicating reliable performance. Field validation revealed that 91% of predicted presence grids matched actual observations, confirming the feasibility of SDMs in data-limited conditions and their effectiveness in optimizing fieldwork.

+ *Biodiversity index calculation and analysis of topographic influences:* The forest ecosystem of Ta Dung is dominated by common species such as Schima

wallichii, Walsura elata, and Syzygium wightianum. In contrast, the ten rare tree species exhibit low Importance Value Index (IVI), indicating population decline. Vegetation communities demonstrate high diversity and structural stability, with indices: Shannon = 4.82, Simpson = 0.99, and Margalef = 32.62 — consistent with typical tropical rainforest biodiversity. Elevation significantly influences species composition, while slope plays a lesser role. Areas above 1,200 m show higher biodiversity, while zones below 1,000 m suffer from anthropogenic pressures resulting in species loss.

+ *Forecasting potential distributions under climate change scenarios*: Using the MaxEnt algorithm, potential distribution zones were projected under SSP5-8.5 climate change scenarios. AUC values ranged from 0.78 to 0.97 with 95% confidence intervals. Most species were predicted to occur in the eastern, southeastern, and central regions of the park. Both climate models (EC-Earth3-Veg and HadGEM3-GC31-LL) projected sharp distribution declines during the 21st century, especially between 2061–2080. Species like *Trigonobalanus verticillata*, *Aquilaria crassna*, *Dipterocarpus hasseltii*, *Quercus langbianensis*, and *Podocarpus neriifolius* are at high risk of range loss. In contrast, *Cinnamomum balansae*, *Canarium littorale*, *Dipterocarpus baudii*, *Dacrycarpus imbricatus*, and *Rhodoleia championii* show some potential for local adaptation or recovery toward the century's end.

+ *Biodiversity hotspot identification and conservation recommendations*: Sub-compartments 1795, 1801, 1805, 1804, 1812, 1811 and 1814 were identified as biodiversity conservation priorities.

+ *Conservation applications for Ta Dung National Park under climate change include*:

Establishing a smart forest monitoring system using GEE, QGIS, and UAV/Drone platforms.

Zoning core conservation areas (1795, 1801, 1805, 1804, 1812, 1811 and 1814) and reinforcing them with guard posts, patrol schedules, and drone surveillance.

Supporting monitoring and patrol efforts with SDM maps and hotspot data, route planning, and early warning systems.

Prioritizing ecological restoration and risk management in the western and northwestern zones and highly impacted compartments through native species reforestation, natural regeneration, fire prevention, and regulation of land-use changes.

Integrating hotspot data into the park's conservation master plan and establishing biological corridors linking Ta Dung with nearby protected areas.

These conservation strategies adopt an integrated approach that combines strict protection, habitat restoration, and advanced technology for monitoring and management.

2. NEW SCIENTIFIC FINDINGS OF THE DISSERTATION

2.1. Scientific contributions

The dissertation contributes several novel findings to the field of ecological research and conservation of rare and endangered tree species, specifically as follows:

i) Interdisciplinary integration of technology and ecology:

The study employs a multi-method approach, combining field-based data with advanced tools such as remote sensing, geographic information systems (GIS), machine learning, and statistical analysis. This integration enhances the reliability of biodiversity assessments and improves the accuracy of species distribution modeling for rare and endangered tree species.

ii) Evaluation of the effectiveness of SDMs for rare and endangered tree species:

The findings demonstrate the feasibility of applying species distribution models (SDMs) to species with low population densities and high environmental sensitivity, particularly within spatially restricted areas such as national parks. SDMs proved effective in supporting habitat monitoring, providing early warnings of potential population decline, and informing conservation planning at the local scale.

iii) Species-specific modeling of climate change impacts:

The dissertation developed predictive models of potential distribution for ten rare and endangered tree species under the SSP5-8.5 climate change scenario, across various timeframes throughout the 21st century. The results reveal a trend of habitat contraction and increased biodiversity risk, offering a scientific foundation for designing localized conservation strategies to adapt to future climate conditions.

2.2. Practical significance

+ The dissertation contributes to the advancement of theoretical and methodological frameworks in biodiversity research through the integration of field data, remote sensing imagery, geographic information systems (GIS), the MaxEnt algorithm, and statistical analysis. The application of species distribution models (SDMs) not only facilitates the identification of potential habitats and the prediction of species distribution under climate change scenarios but also aids in delineating priority areas for conservation. The findings expand the applicability of modern modeling tools in forest plant conservation efforts.

+ The research outcomes provide a scientific basis for conservation management and species monitoring, particularly for rare and endangered tree species (RETS), and support the development of long-term biodiversity management strategies within special-use forests, especially in Ta Dung National Park, under the impacts of climate change. The integrated approach—combining field data, remote sensing, and machine learning—can be extended to other natural forest ecosystems in Vietnam, thereby enhancing the effectiveness of forest resource management and promoting sustainable use.

3. APPLICATIONS AND PRACTICAL IMPLICATIONS

3.1. Practical applications

The findings of this dissertation provide a scientific foundation with significant practical value, supporting conservation planning, forest resource management, and biodiversity monitoring in Ta Dung National Park. Moreover, these results hold potential for broader application in other similar forest ecosystems across Vietnam. The research outcomes can be applied in the following areas:

+ *Supporting conservation planning and habitat zoning*: Potential distribution maps of rare and endangered tree species offer essential data for management agencies—such as national park authorities, forest protection departments, and provincial Departments of Agriculture and Rural Development—to identify areas of high ecological value. Zones with high habitat suitability can be prioritized for designation as core conservation areas or ecological restoration zones.

+ *Optimizing field surveys and habitat monitoring*: The integration of potential distribution modeling and forest status classification enhances the efficiency of field surveys, reduces costs, and improves accuracy—especially for species with limited occurrence data. Identified biodiversity hotspots can be prioritized for regular monitoring to facilitate early detection of habitat degradation or species decline.

+ *Informing forest restoration and habitat degradation control*: Highly impacted areas that still possess ecological potential can be targeted for restoration using approaches such as assisted natural regeneration, enrichment planting with native species, or control of invasive alien species. Incorporating scientific findings with community-based participation further strengthens conservation outcomes while promoting sustainable livelihoods.

+ *Guiding conservation strategies under climate change*: By developing species distribution models (SDMs) integrated with the SSP5-8.5 climate change scenario, this study provides a practical tool for assessing future habitat shifts of rare and endangered tree species. The modeling results allow for risk analysis of range contraction or displacement due to climate pressures, thereby informing flexible, phase-based conservation planning:

2021–2040: Focus on protecting existing habitats and intensifying monitoring in vulnerable areas.

2041–2080: Prioritize forest restoration, genetic resource conservation, and resilience enhancement.

2081–2100: Implement proactive measures such as assisted migration or ex-situ propagation in areas with newly suitable ecological conditions.

In addition, the spatial data on species distribution and biodiversity hotspots can be integrated into decision-support systems for land-use planning, adaptive conservation policymaking, and the development of climate-resilient biological corridors to maintain long-term habitat connectivity.

In summary, the dissertation not only contributes to theoretical advancement but also delivers strong practical value, enabling government agencies, conservation

organizations, and local communities to develop effective forest management solutions that are adaptive to climate change and aligned with sustainable forest resource development.

3.2. Future Research Directions

Despite the promising results achieved, several issues remain that warrant further investigation:

+ *Expanding the scope of species and geographic coverage*: Future studies should extend the investigation to encompass all 21 rare and endangered tree species recorded in Ta Dung National Park. In addition, the modeling framework should be applied to other special-use forests with similar ecological conditions to test the generalizability and stability of SDMs across broader landscapes.

+ *Enhancing field validation in areas with medium and low habitat suitability*: Model validation should be expanded to include a full range of predicted habitat suitability zones, particularly marginal and secondary habitats. This would allow for a more comprehensive evaluation of model performance and improve the accuracy of ecological suitability assessments for each species.

Comparative modeling and development of ensemble approaches: Subsequent research should explore alternative modeling techniques such as BIOMOD2, Random Forest (RF), and Generalized Additive Models (GAM), as well as ensemble modeling approaches. This will facilitate performance comparisons and enable the selection of the most suitable models based on the ecological characteristics of individual species and study areas.

1. Main Academic Supervisor

Doctoral candidate

Assoc. Prof. Dr. Nguyen Thi Thanh Huong

Phan Thi Hang

2. Academic Co-supervisor

Assoc. Prof. Dr. Luu Hong Truong

**CONFIRMATION FROM THE TRAINING INSTITUTION
RECTOR**