

TRANG THÔNG TIN VỀ LUẬN ÁN

Tên luận án: Phân tích và dự báo thay đổi thảm phủ rừng dưới tác động của các nhân tố tự nhiên – kinh tế - xã hội tỉnh Đắk Nông.

Chuyên ngành: Lâm sinh Mã số: 9620205.

Họ tên Nghiên cứu sinh: Cao Thị Hoài

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

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 năm 2021 đến năm 2024 nhằm (i) Phân tích được sự thay đổi thảm phủ sử dụng đất giai đoạn 2010 – 2023 sử dụng ảnh vệ tinh đa thời gian; (ii) Phân tích tương quan không gian xác định được các điểm nóng thay đổi thảm phủ rừng tại khu vực nghiên cứu trong giai đoạn điều tra; (iii) Phân tích và xác định được các nhân tố tự nhiên – kinh tế - xã hội tác động thay đổi thảm phủ rừng tại khu vực nghiên cứu; (iv) Dự báo được xu hướng thay đổi thảm phủ sử dụng đất tại khu vực nghiên cứu đến năm 2035 dưới tác động của các nhân tố đã xác định và v) Đề xuất các giải pháp quản lý tài nguyên rừng trên cơ sở các kết quả nghiên cứu đã đạt được.

Kết quả chính được thể hiện như sau:

- *Phân tích LULCC giai đoạn 2010 – 2023:*

+ So sánh kết quả phân loại thảm phủ sử dụng đất năm 2023 bằng thuật toán RF trên nền tảng Google earth engine, sử dụng i) tổ hợp ảnh Landsat + NDVI và ii) Landsat + tổ hợp các chỉ số (NDVI, NDWI, BSI) + DEM cho thấy: Phân loại dựa vào ảnh Landsat kết hợp tổ hợp các chỉ số đạt độ chính xác OA và K cao hơn đáng kể (tăng 8,64 và 0,11 đơn vị tương ứng) so với chỉ sử dụng tổ hợp ảnh Landsat và chỉ số NDVI. Chính vì vậy phương pháp phân loại này tiếp tục được lựa chọn cho phân loại giai đoạn 2010 – 2022.

+ Phân loại thảm phủ sử dụng đất giai đoạn 2010 – 2022: Kết quả phân loại đạt chính xác phân loại với OA dao động từ khoảng trên 81% đến trên 89% và hệ số K từ 0,77 đến 0,87, điều này cho thấy hiệu suất phân loại đạt mức khá đến cao.

+ Từ kết quả phân loại, bản đồ thảm phủ sử dụng đất giai đoạn 2010–2023 cho thấy sự biến động rõ rệt giữa các loại thảm phủ: Rừng thường xanh và rừng bán thường xanh giảm mạnh, lần lượt 42.459 ha và 995 ha, rừng trồng tăng hơn 5 lần so với năm 2010. Các lớp đất khác và dân cư mở rộng nhanh (~11.700 ha và ~6.500 ha), còn Cao su tăng nhẹ nhưng biến động theo từng giai đoạn. Sự thay đổi của đất nông nghiệp, đất khác và dân cư phản ánh quá trình chuyển đổi sử dụng đất thiếu ổn định, diễn ra tập trung ở vùng giáp khu dân cư, dọc tuyến giao thông và địa hình bằng phẳng.

+ Phân tích thay đổi thảm phủ sử dụng đất giai đoạn 2010–2023 cho thấy quá trình chuyển đổi sử dụng đất tại khu vực nghiên cứu diễn ra mạnh mẽ, đa chiều và phức tạp. rừng thường xanh là lớp suy giảm mạnh nhất, với hơn 43.530 ha bị chuyển

đổi, chủ yếu sang rừng trồng, đất nông nghiệp và đất khác. Các lớp rừng bán thường xanh và rừng khộp cũng giảm đáng kể, chuyển chủ yếu sang nông nghiệp và dân cư. Ngược lại, rừng trồng tăng nhanh nhờ chuyển đổi từ rừng thường xanh và đất nông nghiệp, song đồng thời cũng bị biến động ngược ở một số giai đoạn. nông nghiệp và đất khác là hai loại đất gia tăng mạnh nhất do mở rộng sản xuất và chuyển đổi từ rừng. dân cư mở rộng nhanh từ đất nông nghiệp và đất khác, phản ánh xu hướng đô thị hóa. Mặt nước biến động ít, nhưng có xu hướng tăng, chủ yếu do chuyển đổi từ rừng tự nhiên.

- *Xác định điểm nóng mất rừng bằng phân tích không gian*: Kết quả phân tích điểm nóng cho thấy mất rừng tại hai huyện Đắk Glong và Krông Nô giai đoạn 2010 – 2023 không phân bố ngẫu nhiên mà có quy luật rõ rệt theo không gian – thời gian. Cụ thể, cụm nóng chiếm ưu thế tuyệt đối (90,67%), tập trung vào các giai đoạn mất rừng mạnh (2012–2013 và đặc biệt giai đoạn 2017–2019), trong khi đó cụm lạnh chỉ chiếm tỷ lệ nhỏ (9,33%) và chủ yếu xuất hiện giai đoạn 2014–2016. Đáng chú ý, từ 2018–2023 các điểm nóng giảm đáng kể, đồng thời hầu như không còn cụm lạnh, qua đó phản ánh xu hướng ổn định hơn của FCC trong những năm gần đây.

- *Phân tích mối quan hệ giữa thay đổi thảm phủ rừng với các nhân tố tự nhiên – kinh tế - xã hội*: Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng yếu tố kinh tế - xã hội có tác động trực tiếp mạnh nhất với hệ số tác động 0,46, phản ánh vai trò nổi bật của số lượng dân cư (1,00) và số lượng doanh nghiệp chính đang hoạt động (0,88) tác động đến chuyển đổi diện tích rừng tự nhiên. Khả năng tiếp cận cũng là một yếu tố đáng kể, với hệ số tác động trực tiếp –0,44, cho thấy rừng càng gần khu dân cư, đất nông nghiệp và giao thông thì nguy cơ bị chuyển đổi càng cao. Trong khi đó, khí hậu tuy có hệ số thấp hơn (–0,39) nhưng vẫn có ảnh hưởng, đặc biệt khi nhiệt độ tăng và mưa giảm dẫn đến gia tăng mất rừng. Kết quả này cung cấp cơ sở định lượng quan trọng để thiết kế các mô hình dự báo thay đổi thảm phủ rừng và đề xuất các chính sách quản lý rừng thích ứng biến đổi khí hậu theo hướng khoa học và định hướng không gian.

- *Dự báo thay đổi thảm phủ sử dụng đất đến năm 2035*: Kết quả dự báo đến năm 2035 cho thấy xu hướng suy giảm diện tích rừng là đặc điểm nổi bật nhất, tổng diện tích rừng tự nhiên dự báo năm 2035 giảm gần 5.600 ha và chủ yếu chuyển sang đất nông nghiệp, rừng trồng và đất khác; rừng trồng giảm đến 5.708 ha. Đồng thời, lớp đất khác cũng thu hẹp đáng kể, trong khi đất nông nghiệp và cao su tăng lần lượt 11.500 ha và 10.700 ha, phản ánh động lực phát triển kinh tế nhưng gây sức ép lớn lên hệ sinh thái rừng. Đáng chú ý, phân tích điểm nóng dự báo giai đoạn 2023–2035 cho thấy các cụm nóng mất rừng tập trung ở những khu vực chuyển đổi mạnh sang đất nông nghiệp và cao su, trong khi cụm lạnh xuất hiện rải rác ở các vùng có chính sách bảo vệ hoặc ít biến động. Nghiên cứu xây dựng bản đồ dự báo điểm nóng đến năm 2035 nhằm nhận diện không gian rủi ro mất rừng, cung cấp công cụ khoa học quan trọng cho các chiến lược sử dụng đất cũng như các chính sách quản lý và giám sát bền vững tài nguyên rừng.

- *Đề xuất hệ thống giải pháp quản lý tài nguyên rừng*: Dựa trên các kết quả nghiên cứu, tổng hợp phỏng vấn và tham vấn ý kiến chuyên gia, nghiên cứu đã đề xuất các giải pháp mang tính đồng bộ, khả thi, phù hợp với điều kiện tự nhiên – kinh tế - xã hội của Đắk Glong và Krông Nô. Các nhóm giải pháp bao gồm: (i) quản lý – chính sách như rà soát quy hoạch, khoanh vùng bảo vệ nghiêm ngặt, phối hợp đa ngành và thúc đẩy đồng quản lý cộng đồng; (ii) kỹ thuật – công nghệ như ứng dụng RS–GIS giám sát rừng, dự báo cháy rừng, xây dựng cơ sở dữ liệu tập trung; (iii) kỹ thuật lâm sinh như khoanh nuôi tái sinh, trồng rừng phòng hộ, cải thiện rừng trồng sản xuất; (iv) phát triển sinh kế cộng đồng thông qua mô hình nông lâm kết hợp, phát triển lâm sản ngoài gỗ, cơ chế PFES và đào tạo nâng cao năng lực và (v) Nhóm giải pháp theo vùng trọng điểm điểm nóng cụ thể. Việc triển khai đồng bộ các giải pháp này sẽ góp phần giảm áp lực mất rừng, bảo tồn đa dạng sinh học và thúc đẩy phát triển bền vững ở địa phương.

2. NHỮNG KẾT QUẢ MỚI CỦA LUẬN ÁN

- Luận án tích hợp đồng thời ảnh vệ tinh đa thời gian, hệ thống thông tin địa lý, mô hình phương trình cấu trúc (SEM) và mô hình Cellular Automata – Markov trong cùng một khung phân tích. Sự kết hợp này cho phép mô phỏng quá trình thay đổi thảm phủ sử dụng đất dưới tác động tổng hợp của các yếu tố tự nhiên, kinh tế – xã hội và khoảng cách tiếp cận với độ chính xác mô hình đoán đạt mức vừa đến cao (K giao động từ 0,74 đến 0,82). Đây là bước tiến quan trọng trong ứng dụng mô hình hóa không gian để phân tích biến động rừng ở quy mô cấp tỉnh.

- *Nâng cao độ chính xác phân loại lớp phủ đất nhờ tổ hợp chỉ số phổ và học máy*

Luận án sử dụng thuật toán Random Forest kết hợp các chỉ số phổ NDVI, BSI, NDWI cùng DEM trong xử lý ảnh Landsat đa thời gian. Cách tiếp cận này giúp tăng độ chính xác phân loại OA và K cao hơn đáng kể (tăng 8,64 và 0,11 đơn vị tương ứng) so với chỉ sử dụng tổ hợp ảnh Landsat và chỉ số NDVI. Kết quả phân loại là cơ sở định lượng quan trọng để tính toán ma trận chuyển đổi và phân tích thảm phủ sử dụng đất cho toàn tỉnh Đắk Nông.

- *Làm rõ đặc tính không gian – thời gian của biến động rừng thông qua phân tích điểm nóng (Hotspot Analysis)*

Kết quả tính toán chỉ số Getis-Ord Gi* cho thấy hiện tượng “dịch chuyển cụm nóng” diễn ra rõ rệt theo hướng Đông Nam – Tây Bắc, tập trung tại các xã Quảng Sơn, Đắk Ha, Đắk Som và Buôn Choánh. Các khu vực này hình thành các cụm có ý nghĩa thống kê cao, phản ánh xu thế lan tỏa mất rừng theo hạ tầng và khu dân cư. Phát hiện này khẳng định tính không gian hóa theo thời gian của quá trình mất rừng – một bằng chứng khoa học mới giúp xác định thời điểm và khu vực cần ưu tiên giám sát, can thiệp quản lý bảo vệ rừng.

- *Xác định và lượng hóa được vai trò, cơ chế tác động của các nhóm nhân tố đến mất rừng tự nhiên.*

Kết quả mô hình SEM cho thấy các yếu tố khoảng cách tiếp cận và kinh tế – xã hội có ảnh hưởng mạnh nhất đến biến động diện tích rừng tự nhiên, với hệ số tác động trực tiếp $\beta = -0,44$ và $\beta = 0,46$ ($p < 0,01$). Trong nhóm tiếp cận, khoảng cách tới khu dân cư là biến có tác động lớn nhất (1,15), tiếp đến là khoảng cách tới đất nông nghiệp (1,00) và đường giao thông (0,92); còn trong nhóm kinh tế - xã hội, số lượng dân số và số lượng doanh nghiệp chính đang hoạt động là hai biến chi phối chính. Cơ chế này được xác định là gia tăng khả năng tiếp cận đất rừng và mở rộng sản xuất nông nghiệp khi dân cư, hạ tầng và dịch vụ phát triển.

- Thiết lập mô hình dự báo biến động rừng đến năm 2035 dưới tác động của các nhân tố đã được xác định từ mô hình SEM và nhận diện rủi ro không gian.

Mô hình CA-Markov mô phỏng sự chuyển đổi lớp phủ dựa trên ma trận 2010–2023 cho thấy đến năm 2035, diện tích rừng tự nhiên có thể giảm giảm thêm gần 5.600 ha nếu không có biện pháp quản lý thích ứng. Mức tăng diện tích rừng trồng (RTG) chỉ bù đắp được một phần nhỏ về không gian, nhưng không thay thế được giá trị sinh thái của RTN.

Luận án đã dự báo ba vùng trọng điểm dự báo mất rừng gồm: (i) Tây Bắc Đăk Glong (Quảng Sơn – Quảng Hòa), (ii) Đông Nam Krông Nô (Đăk Som – Buôn Choánh), và (iii) vùng giáp ranh Đăk Ha – Đăk Plao, là những khu vực có nguy cơ suy thoái cao nhất trong giai đoạn 2023 - 2035.

- Đề xuất hệ thống giải pháp quản lý rừng theo đặc thù vùng và loại rừng
Trên cơ sở kết quả định lượng và bản đồ hotspot dự báo, tham khảo ý kiến, luận án đề xuất bộ giải pháp quản lý đa tầng, gồm:

Giải pháp chính sách – quản lý: Rà soát, điều chỉnh quy hoạch 3 loại rừng; tăng cường kiểm soát chuyển đổi mục đích sử dụng đất và vận dụng chi trả PES hiệu quả.

Giải pháp kỹ thuật – công nghệ: Ứng dụng UAV, GIS và nền tảng giám sát cộng đồng trong cảnh báo sớm mất rừng.

Giải pháp sinh kế và vùng trọng điểm: Mô hình nông – lâm kết hợp, đồng quản lý, và phục hồi rừng đầu nguồn, tập trung tại ba khu vực có nguy cơ cao. Hệ thống giải pháp này góp phần định hướng cho quản lý rừng bền vững, thích ứng biến đổi khí hậu và giảm phát thải (REDD+) tại tỉnh Đăk Nông.

Luận án đã kết nối phân tích định lượng – mô hình hóa không gian – dự báo tương lai để làm rõ cơ chế và rủi ro mất rừng ở quy mô địa phương. Các kết quả không chỉ mang giá trị học thuật trong việc nâng cấp phương pháp nghiên cứu thay đổi thảm phủ sử dụng đất ở Việt Nam mà còn cung cấp bằng chứng không gian hóa cụ thể phục vụ công tác quy hoạch, giám sát và ra quyết định quản lý rừng của các cơ quan chức năng tỉnh Đăk Nông.

3. KHẢ ỨNG DỤNG TRONG THỰC TIỄN

3.1. Khả năng ứng dụng trong thực tiễn

- Ứng dụng trong quy hoạch và quản lý tài nguyên rừng cấp tỉnh

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và dữ liệu không gian đáng tin cậy để phục vụ rà soát, điều chỉnh quy hoạch 3 loại rừng và sử dụng đất lâm nghiệp tỉnh Đắk Nông giai đoạn 2025–2035, đặc biệt trong xác định vùng trọng điểm mất rừng, vùng đệm sinh thái và khu vực cần phục hồi rừng đầu nguồn.

Bản đồ LULC 2010–2023 và bản đồ dự báo LULC 2035 có thể được tích hợp trực tiếp vào hệ thống quản lý của Sở NN&PTNT, Chi cục Kiểm lâm, hỗ trợ công tác giám sát rừng định kỳ, cảnh báo sớm và theo dõi các chỉ tiêu bảo vệ rừng.

- Ứng dụng trong giám sát và cảnh báo mất rừng bằng công nghệ số

Luận án đã đề xuất mô hình giám sát rừng thông minh (Smart Forest Monitoring) kết hợp ảnh vệ tinh, UAV và GIS, có thể triển khai tại các Ban quản lý rừng phòng hộ và đặc dụng ở Đắk Nông.

Phương pháp phân tích điểm nóng (Hotspot Analysis) và mô hình CA–Markov có thể được áp dụng để xây dựng hệ thống cảnh báo sớm mất rừng cho các tỉnh Tây Nguyên khác (Đắk Lắk, Gia Lai, Kon Tum), giúp ưu tiên nguồn lực bảo vệ rừng theo rủi ro thực tế.

- Ứng dụng trong xây dựng sinh kế bền vững và phát triển kinh tế lâm nghiệp

Kết quả xác định các vùng trọng điểm mất rừng đã giúp định hướng rõ hơn các mô hình sinh kế nông – lâm kết hợp, đồng quản lý rừng và phát triển được liệu dưới tán rừng.

Các kết quả này có thể áp dụng vào các dự án REDD+, PES hoặc chương trình trồng rừng gỗ lớn, phục hồi rừng đầu nguồn, nhằm giảm phát thải và tăng thu nhập cho cộng đồng sống phụ thuộc vào rừng.

- Ứng dụng trong nghiên cứu và đào tạo lâm nghiệp – GIS – viễn thám

Bộ dữ liệu ảnh Landsat đa thời gian, bản đồ LULC, ma trận biến động và kết quả mô hình SEM, CA–Markov có thể được sử dụng làm tài liệu giảng dạy, thực hành và nghiên cứu cho sinh viên và học viên cao học ngành Lâm học, Quản lý tài nguyên thiên nhiên, GIS & Viễn thám tại Trường Đại học Tây Nguyên và các cơ sở đào tạo tương tự.

3.2. Những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

- Mở rộng mô hình dự báo đa kịch bản

Cần tích hợp các kịch bản chính sách, thị trường và khí hậu vào mô hình CA–Markov để đánh giá độ nhạy và độ bất định của các biến động thảm phủ sử dụng đất trong điều kiện biến đổi khí hậu.

- Phân tích tác động của chính sách và thể chế quản lý

Cần tiếp tục đánh giá định lượng tác động của các chương trình PES, Quy hoạch 3 loại rừng, Nghị định 156/2018/NĐ-CP, cũng như các dự án phát triển kinh tế – xã hội vùng Tây Nguyên đến xu hướng mất rừng, nhằm đề xuất các cơ chế quản lý rừng dựa trên bằng chứng không gian.

- Nghiên cứu mở rộng quy mô và liên vùng

Khuyến nghị áp dụng khung phân tích của luận án cho các tỉnh khác trong vùng Tây Nguyên để so sánh xu hướng biến động rừng liên vùng, qua đó đề xuất giải pháp quản lý tổng hợp cấp vùng sinh thái, phục vụ quy hoạch lâm nghiệp quốc gia đến năm 2050.

Người hướng dẫn

Nghiên cứu sinh

Nguyễn Thị Thanh Hương

Cao Thị Hoài

**XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO
HIỆU TRƯỞNG**

DISSERTATION INFORMATION PAGE

Dissertation Title: Analysis and prediction of forest cover change under the impact of natural, economic, and social factors in Dak Nong Province.

Major: Silviculture – Code: 9620205.

PhD Candidate: Cao Thị Hoài

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nguyễn Thị Thanh Hương

Training Institution: Tay Nguyen University

1. SUMMARY OF THE DISSERTATION CONTENT

The dissertation, conducted from 2021 to 2024, aimed to: (i) analyze land use/land cover changes (LULCC) during 2010–2023 using multi-temporal satellite imagery; (ii) perform spatial correlation analysis to identify forest cover change hotspots in the study area; (iii) quantify the impacts of natural, economic, and social factors on forest cover dynamics; (iv) predict land cover change trends to 2035 under the influence of identified driving factors; and (v) propose forest resource management solutions based on the research findings.

The main results are summarized as follows:

- Analysis of LULCC during 2010–2023:

- + Comparison of land use/land cover classification in 2023 using the Random Forest (RF) algorithm on the Google Earth Engine platform indicated that the combination of Landsat imagery with spectral indices (NDVI, NDWI, BSI) and DEM achieved significantly higher accuracy (an increase of 8.64% in OA and 0.11 in Kappa) compared with using Landsat + NDVI alone. Therefore, this classification approach was applied consistently for all temporal datasets (2010–2022).

- +The classification accuracy for the 2010–2022 period achieved OA values ranging from 81% to 89% and Kappa coefficients between 0.77 and 0.87, reflecting good to high classification performance.

- + The derived LULC maps revealed substantial spatial and temporal variations: evergreen forest (–37.52%, 42,459 ha) and semi-evergreen forest (–25.52%, 995 ha) declined sharply, while planted forests increased more than fivefold compared to 2010. Agricultural land (+11,700 ha) and built-up areas (+6,500 ha) expanded rapidly, whereas rubber plantations increased slightly but fluctuated by period. These changes reflect unstable land-use transitions, concentrated in areas adjacent to settlements, along transportation corridors, and on gentle topography.

- + The LULCC matrix (2010–2023) confirmed extensive, multidirectional, and complex transitions. Evergreen forests experienced the most severe decline (–43,530 ha), mainly converted to planted forests, agricultural land, and other land uses. Semi-evergreen and deciduous forests also decreased substantially, primarily transformed into agricultural and residential areas. In contrast, planted forests increased notably, mainly from conversions of evergreen and agricultural land. Agricultural and

miscellaneous land types expanded strongly, while water bodies fluctuated slightly but tended to increase due to conversion from natural forest areas.

- Hotspot analysis of forest loss: Spatial hotspot analysis revealed that forest loss in Dak Glong and Krong No districts from 2010–2023 was non-random and exhibited distinct spatio-temporal clustering patterns. Hotspot clusters dominated (90.67%), especially during periods of intense deforestation (2012–2013 and 2017–2019), whereas cold spots represented only 9.33% and mainly appeared between 2014–2016. Notably, from 2018–2023, hotspots decreased considerably and cold spots almost disappeared, indicating a more stable forest cover condition in recent years.

- Relationship between forest cover change and driving factors: The structural equation modeling (SEM) results indicated that socio-economic factors exerted the strongest direct influence ($\beta = 0.46$), highlighting the importance of population density (loading = 1.00) and number of active enterprises (loading = 0.88) in driving natural forest conversion. Accessibility factors also showed a significant negative relationship ($\beta = -0.44$), suggesting that forests located closer to settlements, agricultural lands, and roads faced higher conversion risks. Climatic factors had a moderate negative effect ($\beta = -0.39$), implying that increasing temperature and decreasing rainfall intensified forest loss. These findings provide a quantitative basis for spatially explicit modeling and the design of climate-adaptive forest management policies.

- Land use land cover change prediction to 2035: The CA–Markov model forecasted a continuing decline in forested areas. By 2035, natural forests are projected to decrease by nearly 5,600 ha, mainly converted to agricultural land, planted forests, and other uses. Planted forests may also decline (–5,708 ha), while agricultural land and rubber plantations could increase by 11,500 ha and 10,700 ha, respectively. These transitions reflect economic expansion but impose strong pressure on forest ecosystems. The predicted hotspot map for 2023–2035 showed that deforestation hotspots will concentrate in zones undergoing rapid conversion to agriculture and rubber, while scattered cold spots appear in protected or low-disturbance areas. The resulting spatial risk maps serve as a valuable scientific tool for sustainable land-use planning and forest monitoring.

- Proposed forest resource management solutions: Based on analytical results, expert consultation, and stakeholder feedback, the study proposed an integrated and feasible management framework tailored to the biophysical and socio-economic conditions of Dak Glong and Krong No. The main solution groups include: (i) Policy and governance solutions – revising land-use and forest zoning plans, strengthening cross-sectoral coordination, and promoting community-based forest management (CBFM); (ii) Technical and technological solutions – applying RS–GIS for forest monitoring, fire-risk forecasting, and developing centralized spatial databases; (iii) Silvicultural measures – natural regeneration, watershed reforestation, and improving

production forests; (iv) Livelihood development solutions – expanding agroforestry models, enhancing non-timber forest product (NTFP) value chains, implementing payment for forest environmental services (PFES), and capacity-building for local communities; (v) Region-specific interventions – focusing on identified deforestation hotspots for targeted restoration and monitoring. The coordinated implementation of these solutions is expected to reduce deforestation pressure, conserve biodiversity, and promote sustainable forest management in the study area.

2. NEW SCIENTIFIC FINDINGS OF THE DISSERTATION

- Integration of multi-temporal satellite imagery, GIS, SEM, and CA–Markov models in a unified analytical framework: The dissertation integrates multi-temporal satellite imagery, Geographic Information Systems (GIS), Structural Equation Modeling (SEM), and the Cellular Automata–Markov (CA–Markov) model within a single analytical framework. This combination enables the simulation of land use/land cover change (LULCC) processes under the combined influence of natural, socio-economic, and accessibility factors, with model performance ranging from moderate to high (Kappa = 0.74–0.82). This represents an important methodological advancement in spatial modeling of forest cover change at the provincial scale.

- *Improvement of classification accuracy using spectral indices and machine learning.*

The study applied the Random Forest (RF) algorithm, combining spectral indices (NDVI, BSI, NDWI) and Digital Elevation Model (DEM) data in multi-temporal Landsat image processing. This approach improved overall accuracy (OA) and Kappa by 8.64% and 0.11, respectively, compared with using NDVI and Landsat imagery alone. The classified maps provided a robust quantitative basis for LULCC matrix computation and spatial analysis across Dak Nong Province.

- *Characterizing the spatio-temporal dynamics of forest change through Hotspot Analysis.*

The Getis-Ord G_i^* statistic revealed distinct “hotspot migration” patterns moving from Southeast to Northwest, concentrated in the communes of Quảng Sơn, Đắk Ha, Đắk Sơn, and Buôn Choánh. These statistically significant clusters ($p < 0.05$) reflect the spatial diffusion of forest loss along infrastructure and settlement zones. This finding confirms the spatio-temporal nature of deforestation processes—providing new scientific evidence for identifying priority areas and time periods for forest protection and management interventions.

- *Quantifying the role and mechanism of key driving factors of natural forest loss*

The SEM results indicated that accessibility and socio-economic factors exert the strongest direct effects on natural forest loss, with standardized path coefficients $\beta = -0.44$ and $\beta = -0.46$ ($p < 0.01$), respectively. Within the accessibility group, proximity to settlements (1.15) had the greatest influence, followed by distance to agricultural

land (1.00) and roads (0.92). Within the socio-economic group, population size and the number of active enterprises were the dominant variables. The mechanism underlying these relationships reflects the expansion of agricultural production and land encroachment facilitated by population growth, infrastructure development, and improved access to forest areas.

- Establishing a forest cover change prediction model to 2035 and identifying spatial risk zones

The CA–Markov model, calibrated with the 2010–2023 transition matrix, predicted that by 2035 natural forest area could decline by approximately 5,600 ha if adaptive management measures are not implemented. Although the expansion of planted forests partially compensates for spatial loss, it cannot replace the ecological functions of natural forests. The model identified three major deforestation risk zones: (i) Northwestern Dak Glong (Quang Son– Quang Hoa), (ii) Southeastern Krong No (Dak Som – Buon Choah), and (iii) The Dak Ha – Dak Plao boundary area—highlighting regions of the highest projected degradation risk for 2023–2035.

- Proposing a multi-tiered forest management solution system tailored to forest types and spatial risk levels.

Based on quantitative results, predicted hotspot maps, and expert consultations, the dissertation proposes an integrated system of management solutions, including:

Policy and governance: Revising and harmonizing the three-forest-type zoning plan; strengthening land-use change control; and enhancing the effectiveness of Payment for Forest Environmental Services (PFES).

Technical and technological: Applying UAV, GIS, and community-based monitoring platforms for early-warning forest loss detection.

Livelihood and regional interventions: Promoting agroforestry, co-management, and watershed forest restoration focused on the three identified high-risk zones.

This system of solutions provides a scientific basis for sustainable forest management, climate change adaptation, and emission reduction (REDD+) in Dak Nong Province.

- Integrating quantitative analysis, spatial modeling, and predictive simulation.

The dissertation links quantitative modeling, spatial analytics, and future scenario forecasting to clarify mechanisms and spatial risks of forest loss at the local scale. The findings contribute not only to advancing the methodological framework for LULCC research in Vietnam but also provide spatially explicit evidence to support forest planning, monitoring, and decision-making for provincial management authorities in Dak Nong

3. APPLICATIONS AND PRACTICAL IMPLICATIONS

3.1. Practical Applications

- Application in provincial forest planning and management

The research provides a scientific and spatially reliable basis for reviewing and adjusting the three-forest-type zoning plan and forest-land use planning of Dak Nong Province for 2025–2035, particularly in identifying deforestation hotspots, ecological buffer zones, and priority watershed restoration areas.

The LULC maps for 2010–2023 and LULC prediction map for 2035 can be directly integrated into the management systems of the Department of Agriculture and Rural Development (DARD) and the Forest Protection Sub-Department, supporting routine forest monitoring, early-warning systems, and progress tracking of forest protection indicators under the 2017 Forestry Law.

- Application in digital forest monitoring and early-warning systems

The dissertation proposes a Smart Forest Monitoring Model combining satellite imagery, UAVs, and GIS technology, which can be deployed in protection and special-use forest management boards across Dak Nong.

The Hotspot Analysis and CA–Markov simulation methods can be applied to establish early-warning deforestation systems for other provinces in the Central Highlands (Đắk Lắk, Gia Lai, Kon Tum), enabling spatial prioritization of forest protection resources based on actual deforestation risk.

- Application in sustainable livelihoods and forest-based economic development

The identification of deforestation-risk zones provides a foundation for developing agroforestry, co-management, and under-canopy medicinal plant cultivation models suited to local conditions.

These results can be integrated into REDD+, PFES (Payment for Forest Environmental Services), or large-timber reforestation and watershed restoration programs, helping to reduce emissions while improving household income for forest-dependent communities.

- Application in forestry, GIS, and Remote sensing education and research

The dataset of multi-temporal Landsat imagery, LULC maps, transition matrices, and SEM and CA–Markov model outputs can serve as teaching and research materials for students and graduate learners in Forestry, Natural Resource Management, and GIS & Remote Sensing at Tay Nguyen University and similar institutions.

3.2. Future Research Directions

- Expanding Multi - Scenario forecast models

Future studies should integrate policy, market, and climate scenarios into the CA–Markov framework to assess sensitivity and uncertainty of LULCC dynamics under climate change conditions.

- Analyzing policy and institutional impacts

Quantitative assessment of the impacts of PFES programs, Three-Forest-Type Zoning, Decree No. 156/2018/NĐ-CP, and regional socio-economic development

projects in the Central Highlands is needed to propose spatially evidence-based forest governance mechanisms.

- Scaling-up and Cross-Regional Applications

Applying the dissertation's analytical framework to other Central Highlands provinces is recommended to compare inter-provincial forest change patterns and formulate integrated ecosystem-level management strategies, supporting the national forestry planning framework toward 2050.

Supervisor

PhD Candidate

Nguyen Thi Thanh Huong

Cao Thi Hoai

**CERTIFICATION OF TRAINING INSTITUTION
RECTOR**