

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

NGUYỄN HỮU VIỆT HIỆU

NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG
BẰNG CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM VÀ GIS,
THÍ ĐIỂM TẠI CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG, TỈNH GIA LAI

LUẬN ÁN TIẾN SĨ ĐỊA LÝ

Hà Nội - 2026

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Nguyễn Hữu Việt Hiệu

NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG
BẰNG CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM VÀ GIS,
THÍ ĐIỂM TẠI CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG, TỈNH GIA LAI

Chuyên ngành: Bản đồ, viễn thám và hệ thống tin địa lý

Mã số: 9440214

LUẬN ÁN TIẾN SĨ ĐỊA LÝ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

GS.TS Nguyễn Ngọc Thạch

TS. Phạm Văn Mạnh

Hà Nội - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Hà Nội, ngày 07 tháng 09 năm 2026

Tác giả

Nguyễn Hữu Việt Hiệu

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội đã quan tâm và giúp đỡ nghiên cứu sinh trong suốt quá trình đào tạo. Tác giả xin chân thành cảm ơn Ban lãnh đạo, giảng viên Khoa Địa lý, Bộ môn Công nghệ Địa không gian đã trực tiếp giảng dạy, trao đổi và đóng góp nhiều ý kiến quý báu, cũng như động viên tinh thần để tác giả hoàn thành luận án. Đặc biệt bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới GS.TS Nguyễn Ngọc Thạch và TS. Phạm Văn Mạnh đã tận tình hướng dẫn trong suốt quá trình tác giả nghiên cứu và hoàn thiện luận án.

Tác giả xin trân trọng cảm ơn Ban giám đốc Trung tâm Viễn thám và Công nghệ thông tin, Ban lãnh đạo Viện Điều tra, Quy hoạch rừng và lãnh đạo, đồng nghiệp phòng Khoa học kỹ thuật, phòng Công nghệ viễn thám và Cơ sở dữ liệu - nơi tác giả công tác đã tạo điều kiện, giúp đỡ, chia sẻ công việc để tác giả có thể hoàn thành luận án. Tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Ban lãnh đạo Phòng Sinh thái Môi trường Quân sự, Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga: TS. Đinh Bá Duy, TS. Ngô Trung Dũng đã hỗ trợ chuyên môn và tạo điều kiện để NCS thực hiện các chuyến khảo sát thực địa tại cao nguyên Kon Hà Nừng trong giai đoạn 2021–2023. Tác giả xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ và tạo điều kiện của Lãnh đạo Hạt Kiểm lâm Vườn quốc gia Kon Ka Kinh và Ban quản lý khu bảo tồn Kon Chư Răng trong suốt quá trình khảo sát, nghiên cứu thực địa.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn tới gia đình, người thân, đồng nghiệp và bạn bè đã luôn chia sẻ, động viên tinh thần trong thời gian tác giả thực hiện luận án.

NCS Nguyễn Hữu Việt Hiệu được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2023.TS.036.

Tác giả

Nguyễn Hữu Việt Hiệu

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	1
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT	5
DANH MỤC BẢNG.....	7
DANH MỤC HÌNH	9
MỞ ĐẦU	11
1. Tính cấp thiết.....	11
2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu.....	14
3. Phạm vi nghiên cứu.....	15
4. Những điểm mới	16
5. Luận điểm bảo vệ	16
6. Ý nghĩa lý luận và thực tiễn	16
7. Cơ sở dữ liệu	17
8. Cấu trúc luận án	17
CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ LUẬN VỀ NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG	18
1.1. TỔNG QUAN TÀI LIỆU VỀ NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG	18
1.1.1. Các khái niệm cơ bản liên quan tới nội dung luận án.....	18
1.1.2. Tổng quan tình hình nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng trên thế giới và Việt Nam	22
1.1.3. Mức hấp thụ và phát thải tham chiếu các-bon	39
1.1.4. Các nguồn dữ liệu ảnh viễn thám trong ước tính sinh khối khu vực nghiên cứu.....	42

1.1.5. Các công trình nghiên cứu về vùng Tây Nguyên và cao nguyên Kon Hà Nừng liên quan đến luận án	47
1.2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VỀ BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG	52
1.2.1. Tiêu chí phân loại rừng và sinh khối rừng	52
1.2.2. Các phương pháp phân loại ảnh viễn thám.....	57
1.2.3. Cơ sở lý luận các phương pháp phát hiện biến động bằng viễn thám	58
1.2.4. Phân loại biến động trạng thái rừng sử dụng trong luận án.....	59
1.2.5. Lựa chọn ảnh viễn thám sử dụng trong luận án.....	62
1.3. QUAN ĐIỂM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	63
1.3.1. Quan điểm nghiên cứu.....	63
1.3.2. Nhiệm vụ nghiên cứu.....	64
1.3.3. Phương pháp và quy trình nghiên cứu.....	65
Tiểu kết chương 1.....	68
CHƯƠNG 2. ĐẶC ĐIỂM KHU VỰC NGHIÊN CỨU VÀ QUY TRÌNH XÂY DỰNG BẢN ĐỒ TRẠNG THÁI, SINH KHỐI RỪNG TẠI CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG	69
2.1. ĐẶC ĐIỂM KHU VỰC NGHIÊN CỨU.....	69
2.1.1. Điều kiện tự nhiên.....	69
2.1.2. Điều kiện kinh tế - xã hội	77
2.2. DỮ LIỆU VÀ QUY TRÌNH THỰC HIỆN	81
2.2.1. Thu thập và xử lý ảnh vệ tinh	81
2.2.2. Xây dựng bộ mẫu chìa khóa ảnh	84
2.2.3. Xây dựng bản đồ trạng thái rừng	87
2.2.4. Đánh giá biến động trước phân loại.....	96
2.2.5. Đánh giá biến động sau phân loại.....	96

2.3. ỨNG DỤNG VIỄN THÁM VÀ GIS TRONG ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG SINH KHỐI.....	97
2.3.1. Xây dựng phương trình ước tính sinh khối trên mặt đất cho các kiểu rừng	98
2.3.2. Phương pháp xây dựng đường tham chiếu rừng (FRL) và ước tính năng lực hấp thụ CO ₂ rừng tự nhiên	107
2.4. ĐỊNH GIÁ RỪNG TRỒNG	108
2.4.1. Phương pháp định giá rừng trồng	109
2.4.2. Phân tích ước tính thu nhập từ rừng tự nhiên và rừng trồng tại cao nguyên Kon Hà Nừng , tỉnh Gia Lai.....	110
Tiêu kết chương 2.....	111
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI, SINH KHỐI RỪNG VÀ ĐỊNH HƯỚNG QUẢN LÝ BẢO VỆ RỪNG CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG.....	112
3.1. ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI RỪNG QUA CÁC GIAI ĐOẠN 2000 - 2010 VÀ 2010 - 2022	112
3.1.1. Kết quả thành lập bản đồ trạng thái rừng	112
3.1.2. Biến động trạng thái rừng và sự thay đổi chỉ số NDVI theo các năm 2000, 2010, 2022.....	120
3.2. BIẾN ĐỘNG SINH KHỐI RỪNG TẠI CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG QUA CÁC GIAI ĐOẠN 2000 - 2010 VÀ 2010 - 2022	135
3.2.1. Sinh khối rừng cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai qua các giai đoạn	135
3.2.2. Tính toán và theo dõi biến động lượng phát thải – hấp thụ CO ₂ tại khu vực nghiên cứu.....	140

3.3. XÂY DỰNG ĐƯỜNG THAM CHIẾU RỪNG (FRL) CẤP CƠ SỞ KHOA HỌC THAM GIA CHƯƠNG TRÌNH GIẢM PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH THÔNG QUA CÁC HOẠT ĐỘNG GIẢM SUY THOÁI VÀ MẤT RỪNG.....	141
3.3.1. Tỷ lệ các loại hình biến động rừng tự nhiên theo giai đoạn 2000 - 2010 và 2010 - 2022	141
3.3.2. Kịch bản giảm mất rừng, suy thoái rừng	143
3.4. ĐỀ XUẤT ĐỊNH HƯỚNG SỬ DỤNG, BẢO VỆ VÀ PHÁT TRIỂN RỪNG KHU VỰC CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG.....	149
3.4.1. Các nguyên nhân dẫn đến mất rừng và suy thoái rừng.....	150
3.4.2. Sự tham gia của sản phẩm rừng trồng trong thu nhập cộng đồng dân cư tại cao nguyên Kon Hà Nừng.....	153
3.4.3. Định hướng thu nhập từ sản phẩm và dịch vụ hệ sinh thái rừng	157
3.4.4. Đề xuất các hoạt động REDD+ tại khu vực nghiên cứu.....	159
3.4.5. Nhận định chung về dịch vụ môi trường rừng và ổn định sinh kế	163
3.4.6. Thảo luận về kết quả nghiên cứu và mục tiêu đạt Net-Zero vào năm 2050 tại Việt Nam	164
Tiểu kết chương 3.....	167
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	168
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	172
TÀI LIỆU THAM KHẢO	173
PHỤ LỤC	-1-

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

ACC	Accuracy (<i>Độ chính xác</i>)
AGB	Above-Ground Biomass (<i>Sinh khối trên mặt đất</i>)
ANN	Artificial Neural Network (<i>Mạng nơ-ron nhân tạo</i>)
AUC	Area Under the Curve (<i>Diện tích dưới đường cong</i>)
BOA	Bottom of Atmosphere (<i>Phản xạ tại đáy khí quyển – sau hiệu chỉnh khí quyển</i>)
BGB	Below-Ground Biomass (<i>Sinh khối dưới mặt đất</i>)
CDM	Clean Development Mechanism (<i>Cơ chế phát triển sạch</i>)
CNN	Convolutional Neural Network (<i>Mạng nơ-ron tích chập sâu</i>)
DBH	Diameter at Breast Height (<i>Đường kính thân cây tại vị trí ngang ngực 1,3 m</i>)
DEM	Digital Elevation Model (<i>Mô hình số độ cao</i>)
EVI	Enhanced Vegetation Index (<i>Chỉ số thực vật tăng cường</i>)
FAO	Food and Agriculture Organization (<i>Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc</i>)
FRL	Forest Reference Level (<i>Mức tham chiếu rừng</i>)
GED	Global Ecosystem Dynamics Investigation (<i>Hệ thống điều tra động lực học hệ sinh thái toàn cầu</i>)
GIS	Geographic Information System (<i>Hệ thống thông tin địa lý</i>)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (<i>Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu</i>)
KS	Kolmogorov-Smirnov Test (<i>Chỉ số đánh giá độ chính xác Kolmogorov-Smirnov</i>)
LULC	Land Use and Land Cover (<i>Sử dụng đất – lớp phủ đất</i>)
MLP-Net	Multilayer Perceptron Fusion Network (<i>Mạng nơ-ron Perceptron đa lớp kết hợp</i>)

MRV	Measurement, Reporting and Verification (Đo đếm, báo cáo và thẩm định)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa)
NIR	Near-Infrared (Cận hồng ngoại)
REDD+	Degradation (Giảm phát thải khí nhà kính từ mất rừng và suy thoái rừng)
REL	Reduction in Emissions Level (Mức giảm phát thải)
RF	Random Forest (Rừng ngẫu nhiên)
RMSE	Root Mean Squared Error (Sai số bình phương trung bình)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Ra-đa khẩu độ tổng hợp)
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index (Chỉ số thực vật hiệu chỉnh đất)
SVM	Support Vector Machine (Máy vector hỗ trợ)
SWIR	Short-Wave Infrared (Hồng ngoại sóng ngắn)
TOA	Top of Atmosphere (Phản xạ tại đỉnh khí quyển)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Thiết bị bay không người lái)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Công ước khung của Liên Hợp Quốc về biến đổi khí hậu)
UN-REDD	United Nations Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (Chương trình Liên Hợp Quốc về giảm phát thải từ phá rừng và suy thoái rừng)

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. So sánh hiệu quả các thuật toán phân loại ảnh viễn thám theo quy mô bản đồ ứng dụng trong nghiên cứu biến động rừng.....	26
Bảng 1.2. Bảng thống kê một số nguồn ảnh quang học khu vực nghiên cứu (năm 2000, 2010 và 2022).....	43
Bảng 1.3. Bảng thống kê một số nguồn ảnh radar khu vực nghiên cứu (năm 2000, 2010 và 2022).....	45
Bảng 1.4. Bảng hệ thống phân loại sử dụng trong luận án	54
Bảng 1.5. Ma trận nguyên tắc ánh xạ trong xây dựng bản đồ biến động.....	60
Bảng 2.1. Thông số ảnh vệ tinh khu vực nghiên cứu.....	82
Bảng 2.2. Một số chìa khóa giải đoán ảnh thu thập tại hiện trường	86
Bảng 2.3. Mã hóa các loại rừng khu vực nghiên cứu.....	103
Bảng 3.1. Thống kê diện tích hiện trạng, trạng thái rừng và lớp phủ khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng các năm 2000, 2010, và 2022	115
Bảng 3.2. Ma trận sai số kết quả phân loại	118
Bảng 3.3. Biến động diện tích rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2010.....	120
Bảng 3.4. Biến động diện tích rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2010 - 2022	124
Bảng 3.5. Biến động rừng tự nhiên thống kê từ bản đồ biến động	128
Bảng 3.6. Thống kê biến động chỉ số NDVI theo trạng thái rừng.....	129
Bảng 3.7. Kết quả tính toán giá trị sinh khối rừng tự nhiên khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng các năm 2000, 2010 và 2022	135
Bảng 3.8. Trữ lượng các-bon rừng tự nhiên khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng năm 2010 và 2022	137
Bảng 3.9. Biến động sinh khối rừng theo các khu vực biến động	141
Bảng 3.10. Tỷ lệ các loại hình biến động rừng tự nhiên.....	142
Bảng 3.11. Diện tích các loại hình biến động rừng tự nhiên đến 2030 theo kịch bản giảm mất rừng, suy thoái rừng	145
Bảng 3.12. Lượng phát thải và hấp thụ CO ₂ giai đoạn 2023 - 2030 theo loại hình biến động	146
Bảng 3.13. Diện tích rừng tự nhiên đến 2030 theo kịch bản giảm tỷ lệ mất rừng.....	147

Bảng 3.14. Lượng CO ₂ hấp thụ/ phát thải theo các kịch bản giảm phát thải.....	147
Bảng 3.15. Thống kê diện tích rừng trồng t khu vực nghiên cứu	155
Bảng 3.16. Khung giá rừng áp dụng cho rừng trồng Keo và Bạch đàn.....	156
Bảng 3.17. Giá trị rừng trồng khu vực nghiên cứu	157
Bảng 3.18. Tổng hợp đơn giá DVMTR cao nguyên Kon Hà Nừng	158

DANH MỤC HÌNH

Hình 1.1. Ảnh viễn thám radar khu vực nghiên cứu.	44
Hình 1.2. Sơ đồ quy trình nghiên cứu.....	67
Hình 2.1. Sơ đồ vị trí cao nguyên Kon Hà Nừng	70
Hình 2.2. Ảnh vệ tinh đa thời gian và vị trí mẫu chia khóa ảnh.....	83
Hình 2.3. Công tác thu thập mẫu chia khóa ảnh kiểm chứng hiện trường bằng UAV	85
<i>Hình 2.4. Ví dụ tìm giá trị tối ưu cho tham số phân mảnh ảnh SPOT-4 năm 2010.....</i>	<i>89</i>
Hình 2.5. Thuật toán Random Forest.....	90
Hình 2.6. Ảnh hưởng của số lượng cây và số lượng biến phân chia ngẫu nhiên tại mỗi nút (mtry) đến độ chính xác tổng thể của việc phân loại RF khi sử dụng toàn bộ dữ liệu mẫu huấn luyện (Thanh Noi et al., 2017).	92
Hình 2.7. Dữ liệu độ cao, độ dốc và hướng khu vực nghiên cứu	94
Hình 2.8. Sơ đồ quy trình giải đoán ảnh thành lập bản đồ LULC.....	95
Hình 2.9. Mô tả thành lập bản đồ biến động LULC.....	97
Hình 2.10. Thiết kế ô sơ cấp (a) và chùm ô (b)	99
Hình 2.11. Vị trí các ô tiêu chuẩn sử dụng trong nghiên cứu.....	100
Hình 2.12. Đo đếm ô tiêu chuẩn tại hiện trường	102
Hình 3.1. Bản đồ hiện trạng, trạng thái rừng và lớp phủ khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2022	114
Hình 3.2. Tỷ lệ diện tích hiện trạng, trạng thái rừng và lớp phủ khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2022	116
Hình 3.3. Biến động trạng thái rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2010	122
Hình 3.4. Biến động trạng thái rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2010 - 2022	125
Hình 3.5. Biến động chỉ số NDVI trung bình theo trạng thái rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2022	130
Hình 3.6. Chỉ số NDVI tại cao nguyên Kon Hà Nừng và sự biến động qua các giai đoạn	131
Hình 3.7. Thay đổi chỉ số NDVI trung bình theo các trạng thái rừng tự nhiên.....	133

Hình 3.8. Bản đồ trạng thái rừng và chỉ số NDVI qua các năm 2000, 2010 và 2022 .	134
Hình 3.9. Bản đồ sinh khối khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng năm 2000, 2010 và 2022	136
Hình 3.10. Bản đồ trữ lượng các-bon khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng các năm 2000, 2010 và 2022	139
Hình 3.11. Biến động diện tích và tỷ lệ các loại hình rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000–2022	142
Hình 3.12. So sánh diện tích các loại hình biến động rừng tự nhiên đến năm 2030 theo 3 kịch bản REDD+ tại cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai	145
Hình 3.13. Lượng CO ₂ phát thải (+) và hấp thu (–) giai đoạn 2023 - 2030 theo loại hình biến động và 3 kịch bản REDD+ tại cao nguyên Kon Hà Nừng	146
Hình 3.14. Đường tham chiếu rừng (FRL) và các kịch bản giảm phát thải trong giai đoạn 2023 - 2030	148
Hình 3.15. Bản đồ phân bố rừng trồng thành lập từ ảnh Sentinel-2 năm 2022	154

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Thảm thực vật trên bề mặt Trái Đất nói chung và các hệ sinh thái rừng nói riêng có vai trò quan trọng trong việc điều hòa khí hậu Trái Đất. Nhiều thuật toán xử lý ảnh vệ tinh được giới thiệu trong các công trình nghiên cứu nhằm mục đích nâng cao độ chính xác trong giám sát rừng thông qua công nghệ viễn thám và GIS [10]. Cùng với đó, các hệ sinh thái đóng góp trong việc giảm nhẹ biến đổi khí hậu toàn cầu bằng cách hấp thụ các khí nhà kính, mà chủ yếu là CO₂, H₂O (hơi nước) và CH₄ được lưu giữ trong các bể dưới dạng bể các-bon quy đổi; ngược lại làm suy thoái rừng, mất rừng dẫn đến lượng khí nhà kính sẽ trở lại khí quyển và làm gia tăng nguy cơ gây nên hiện tượng biến đổi khí hậu. Theo các ước tính, khoảng trên 18% lượng phát thải toàn cầu xuất phát từ mất rừng và suy thoái rừng. Giảm phát thải thông qua việc tăng cường hấp thụ các khí nhà kính bởi hệ sinh thái rừng là một trong những giải pháp xanh nhằm giúp ngăn ngừa nguy cơ biến đổi khí hậu, giảm thiểu tác động của thiên tai và các hiện tượng thời tiết cực đoan. Mặt khác, đây cũng là cơ hội để các quốc gia, tổ chức, đơn vị có rừng có thể nhận được tín dụng từ việc bán hạn ngạch khí thải. Việt Nam đang đối mặt với tốc độ phát thải khí nhà kính nhanh nhất khu vực Đông Nam Á, với lượng CO₂ quy đổi từ 502,1 triệu tấn vào năm 2020 dự kiến tăng lên 888,8 triệu tấn vào năm 2030, tương đương mức gia tăng 51% chỉ trong một thập kỷ. Thực trạng này đã đặt ra thách thức lớn đối với mục tiêu tăng trưởng xanh và phát triển bền vững của quốc gia.

Việt Nam khởi động giao dịch tín chỉ các-bon lâm nghiệp từ năm 2014 thông qua cơ chế phát triển sạch (CDM). Đến tháng 2/2020, Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn cùng Ngân hàng Thế giới ký Thỏa thuận giảm phát thải khu vực Bắc Trung Bộ (gồm Thanh Hóa, Nghệ An, Hà Tĩnh, Quảng Bình, Quảng Trị, Thừa Thiên Huế) và lần đầu chuyển nhượng 10,3 triệu tCO₂ (tương đương 10,3 triệu tín chỉ) với giá 5 USD/tCO₂, thu về 51,5 triệu USD. Áp dụng đa dạng các loại rừng: rừng tự nhiên (Thừa Thiên Huế có khoảng 205.000 ha), rừng trồng được chứng nhận bởi Hội đồng Quản lý rừng Thế giới (Forest Stewardship Council - FSC) đạt khoảng 12.000 ha,

rừng ngập mặn và rừng kinh tế quy mô lớn. Nguồn thu từ bán tín chỉ được chi trả trực tiếp cho chủ rừng, chính quyền địa phương và cộng đồng, đồng thời được tái đầu tư vào bảo tồn, phục hồi và quản lý rừng bền vững. Theo lộ trình quốc gia, Việt Nam sẽ thí điểm thị trường tín chỉ các-bon nội địa giai đoạn 2025–2026, vận hành sàn giao dịch bắt buộc từ 2028 và phân đấu đưa 20–30 triệu tCO₂ ra thị trường vào năm 2030.

Cao nguyên Kon Hà Nừng được Tổ chức Giáo dục, Khoa học và Văn hóa của Liên Hợp Quốc (UNESCO) công nhận là Khu dự trữ sinh quyển thế giới vào tháng 9 năm 2021 với tổng diện tích vùng lõi và vùng đệm khoảng 242.000 ha, đóng vai trò như một "lá phổi xanh" quan trọng của khu vực. Vùng lõi của khu dự trữ bao gồm Vườn quốc gia Kon Ka Kinh và Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng, nơi sở hữu hệ sinh thái rừng nhiệt đới trên núi cao còn nguyên vẹn và có tính đa dạng sinh học cao.

Trong bối cảnh Việt Nam đã cam kết tại Hội nghị các bên tham gia công ước khung của Liên Hợp Quốc về biến đổi khí hậu lần thứ 26 sẽ đạt mức phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 (chương trình Net-Zero) và giảm phát thải khí mê-tan 30 % vào năm 2030, việc quản lý và bảo vệ rừng, đặc biệt tại các khu vực như Kon Hà Nừng, trở nên thiết yếu. Dữ liệu về biến động sinh khối cung cấp nền tảng khoa học cho công tác hoạch định chính sách, triển khai các biện pháp bảo tồn và thực hiện các chiến lược giảm phát thải hiệu quả. Hơn nữa, việc đánh giá chính xác sinh khối còn mở ra cơ hội cho Việt Nam tham gia các cơ chế tài chính quốc tế như REDD+, qua đó thu hút nguồn lực hỗ trợ bảo vệ và phát triển rừng bền vững. Đây cũng là cách để cộng đồng địa phương tại Kon Hà Nừng tham gia vào quá trình bảo tồn, cải thiện sinh kế và nâng cao nhận thức về tầm quan trọng của rừng.

Đánh giá biến động sinh khối tại cao nguyên Kon Hà Nừng như một bước đi chiến lược, kết nối giữa khoa học, chính sách và hành động thực tiễn. Kết quả nghiên cứu không chỉ góp phần vào nỗ lực quốc gia trong việc chống biến đổi khí hậu mà còn góp phần bảo vệ một di sản thiên nhiên quý giá cho thế hệ mai sau. Đầu tư vào công tác hạn chế tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu chính là đầu tư cho một tương lai bền vững của Việt Nam và toàn cầu. Cần có sự hiểu biết toàn diện về động thái sinh khối rừng để tạo điều kiện thuận lợi cho việc thực hiện các thỏa thuận, công ước

quốc tế như Nghị định thư Kyoto và Chương trình Liên Hợp Quốc về giảm phát thải từ mất rừng và suy thoái rừng. Đặc biệt, kiến thức về không gian và thời gian của sự thay đổi sinh khối có thể hỗ trợ quá trình hoạch định chính sách nhằm bảo tồn tính toàn vẹn của hệ sinh thái trong rừng, giảm phát thải khí nhà kính và đáp ứng nhu cầu của con người. Đối với hệ thống giám sát sinh khối rừng, việc tích hợp thay đổi sinh khối trên mặt đất (Above Ground Biomass - AGB) với các tác nhân gây biến động giúp xác định thời gian phục hồi và mức độ tổn thất AGB liên quan đến các yếu tố cụ thể. Để giám sát AGB trong tương lai, giá trị trung bình của mức độ mất AGB đối với từng kịch bản xáo trộn có thể được sử dụng làm “hệ số thay đổi” để tính toán sự thay đổi trữ lượng AGB rừng ở quy mô khu vực. Cụ thể, sự thay đổi AGB tiếp theo có thể được ước tính bằng cách kết hợp các yếu tố thay đổi với các đặc điểm không gian của sự thay đổi (tức là tác nhân và mức độ nhiễu). Kết quả nghiên cứu của luận án sẽ chỉ ra rằng thời gian cần cho sự phục hồi phụ thuộc vào nhiều yếu tố cả nhân sinh lẫn tự nhiên và có thể dự báo mức độ tích trữ AGB trong tương lai căn cứ trên cơ sở nghiên cứu biến động trong quá khứ.

Giám sát và báo cáo sinh khối rừng theo truyền thống phụ thuộc vào các chương trình kiểm kê rừng quốc gia, thường được triển khai thông qua việc thiết lập và đo đạc theo hệ thống các ô tiêu chuẩn. Tuy nhiên, việc thực hiện các chương trình kiểm kê rừng đang gặp nhiều thách thức ở nhiều vùng rừng, đặc biệt là ở các nước đang phát triển, vốn thường thiếu năng lực kỹ thuật, tài chính và thể chế. Do đó, việc báo cáo sự thay đổi sinh khối theo thời gian ở những khu vực rừng núi thường bị hạn chế do chỉ có dữ liệu kiểm kê tại một thời điểm duy nhất và không thể chuyển đổi thành ước tính mức độ thay đổi. Ngay cả khi có sẵn dữ liệu kiểm kê lặp lại, chúng cũng có phạm vi bao phủ không gian rất hạn chế, không đủ để tạo ra các dự báo không gian liên tục về sinh khối rừng. Những vấn đề này có thể được giải quyết bằng cách kết hợp kiểm kê rừng với dữ liệu viễn thám. Từ khoảng trống nêu trên, việc xây dựng một quy trình liên thông, minh bạch và có khả năng tái lập để đồng thời đánh giá biến động trạng thái, ước tính sinh khối và hạch toán các-bon rừng là yêu cầu cấp thiết cả về mặt khoa học lẫn thực tiễn quản lý. Nhu cầu này càng trở nên bức thiết trong bối

cảnh Việt Nam thực hiện cam kết trung hòa các-bon (Net-Zero) vào năm 2050 và từng bước tham gia thị trường tín chỉ các-bon rừng.

Nhằm góp phần bổ sung, phát triển tổ chức không gian dựa trên kết quả đánh giá biến động rừng đồng thời làm sáng tỏ khả năng ứng dụng kết quả nghiên cứu biến động sinh khối rừng trong hoạch định không gian sử dụng hợp lý tài nguyên, phát triển kinh tế gắn với bảo tồn đa dạng sinh học, nghiên cứu sinh đã lựa chọn thực hiện đề tài luận án: *“Nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng bằng công nghệ viễn thám và GIS, thí điểm tại cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai”* trong khuôn khổ chương trình đào tạo tiến sĩ.

Những kết quả nghiên cứu của đề tài có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, góp phần phục vụ công tác quản lý tài nguyên rừng gắn với phát triển kinh tế và ổn định sinh kế của nhân dân trong khu vực nghiên cứu.

2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu

a) Mục tiêu

- Đề xuất quy trình công nghệ hợp lý ứng dụng công nghệ Viễn thám - GIS trong việc xác định biến động trạng thái và sinh khối rừng cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2022.

- Hoàn thiện mô hình đánh giá mức phát thải và hấp thụ CO₂ do biến động trạng thái rừng trên cảnh quan địa lý của khu vực Tây Nguyên, nhằm cung cấp thông tin chính xác phục vụ việc tham gia thị trường mua bán tín chỉ các-bon nội địa và từng bước tham gia thị trường thế giới.

- Đề xuất định hướng quản lý, định giá và chia sẻ lợi ích từ rừng (gồm định giá rừng trồng và dịch vụ hệ sinh thái rừng) gắn với các hoạt động REDD+ tại cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai.

b) Nội dung

Nội dung 1: Hoàn chỉnh cơ sở khoa học và phương pháp nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng từ dữ liệu viễn thám và tài liệu thực địa tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai.

Nội dung 2: Xác định trạng thái và biến động trạng thái rừng, bao gồm cả biến động sinh khối rừng tại khu vực nghiên cứu trong giai đoạn 2000 – 2022.

Nội dung 3: Hoàn thiện mô hình tính toán xây dựng mức phát thải tham chiếu liên quan đến biến động trạng thái và sinh khối rừng nhằm cung cấp thông tin chính xác cho việc tham gia thị trường mua bán tín chỉ cacbon nội địa và của thế giới.

Nội dung 4: Đề xuất định hướng quản lý, định giá rừng trồng và dịch vụ hệ sinh thái rừng gắn với các hoạt động REDD+, nhằm phục vụ công tác quản lý, bảo vệ và phát triển rừng bền vững tại khu vực nghiên cứu.

3. Phạm vi nghiên cứu

a) Phạm vi không gian

Được giới hạn trong ranh giới khu dự trữ sinh quyển cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai với tổng diện tích tự nhiên khoảng 242.000 ha.

b) Phạm vi thời gian

Khu vực nghiên cứu, cao nguyên Kon Hà Nừng, có hệ sinh thái rừng tự nhiên gần như nguyên sơ nhất tại Việt Nam; tuy nhiên, cũng có nhiều biến động về diện tích rừng. Để đảm bảo mục tiêu và các nội dung nghiên cứu, khoảng thời gian được lựa chọn để đánh giá là từ năm 2000 đến 2022, trong đó bao gồm 2 giai đoạn: 2000 – 2010 và 2010 – 2022. Năm 2010 là mốc 1 thập kỷ, đồng thời đánh dấu nhiều chính sách mới trong quản lý tài nguyên rừng giai đoạn sau 2010 đến nay.

c) Phạm vi khoa học

Xây dựng mô hình nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng trên mặt đất tại cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai bằng tư liệu viễn thám và công cụ phân tích không gian GIS. Áp dụng cho rừng tự nhiên trong khu vực nghiên cứu. Phạm vi ước tính sinh khối trên mặt đất chỉ áp dụng cho thực vật sống, không bao gồm các phần gỗ mục, thảm mục hay thảm tươi; các đối tượng khác sẽ được quy đổi theo các công thức tính toán tương ứng. Xây dựng mức phát thải tham chiếu rừng gắn với biến động và trạng thái rừng, từ đó xây dựng kịch bản giảm phát thải thông qua giảm mất rừng và suy thoái rừng, đồng thời ước tính giá trị số tín chỉ cacbon tại khu vực nghiên cứu nếu tham gia thị trường cacbon.

4. Những điểm mới

- Đã xây dựng bộ phương trình tổng quát $AGB = f(VI, LR)$, phù hợp với các kiểu rừng chủ yếu trong khu vực. Đây là cơ sở khoa học để lập bản đồ sinh khối/các-bon theo thời gian, phục vụ việc theo dõi và triển khai REDD+.

- Quy trình gắn kết từ đánh giá biến động trạng thái rừng, ước tính sinh khối/các-bon đến việc xây dựng mức phát thải tham chiếu rừng (FRL) và ước tính tiềm năng tín chỉ các-bon cho rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2022.

5. Luận điểm bảo vệ

Luận điểm 1: Việc tích hợp ảnh viễn thám đa thời gian với hệ thống ô tiêu chuẩn và các mô hình phân tích cho phép xác định biến động trạng thái rừng và ước tính sinh khối rừng với độ tin cậy cao. Qua đó phản ánh được quy mô và loại hình biến động về diện tích, trạng thái và sinh khối rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng trong giai đoạn 2000 – 2022.

Luận điểm 2: Kết quả đánh giá biến động trạng thái rừng và sinh khối là cơ sở khoa học để xác định lượng các-bon tích lũy, phát thải và hấp thụ CO_2 , đồng thời xây dựng mức phát thải tham chiếu rừng (FRL). Đây là nền tảng phục vụ quản lý tài nguyên rừng, hỗ trợ triển khai REDD+ và tham gia thị trường tín chỉ các-bon.

6. Ý nghĩa lý luận và thực tiễn

Ý nghĩa lý luận:

- Góp phần bổ sung cơ sở lý luận: Nghiên cứu đóng góp vào cơ sở khoa học về biến động trạng thái và sinh khối rừng.

- Xác định hiệu quả của việc áp dụng phương trình hồi quy tuyến tính trong việc ước tính sinh khối dựa trên ảnh viễn thám kết hợp với dữ liệu đo đạc trực tiếp.

- Xây dựng phương pháp mức tham chiếu rừng (Forest Reference Level - FRL) để giám sát phát thải/hấp thụ CO_2 do suy thoái và mất rừng tự nhiên.

Ý nghĩa thực tiễn:

- Kết quả nghiên cứu xây dựng hoàn chỉnh quy trình ứng dụng kết hợp viễn thám và GIS, phục vụ giám sát biến động trạng thái và sinh khối rừng.

- Cung cấp cơ sở khoa học cho việc tính toán các-bon: Tạo ra dữ liệu định lượng thông qua phương pháp viễn thám – GIS, hỗ trợ tính toán khả năng hấp thụ và phát thải các-bon của các hệ sinh thái rừng.

- Đóng góp vào bảo tồn và quản lý rừng: Cung cấp cơ sở để đề xuất các giải pháp quản lý bền vững và bảo tồn đa dạng sinh học, đồng thời tăng cường hiệu quả giám sát tài nguyên tại khu vực nghiên cứu.

7. Cơ sở dữ liệu

Luận án được thực hiện dựa trên các nguồn dữ liệu chính sau:

- Cơ sở dữ liệu bản đồ: Bản đồ địa hình tỷ lệ 1/50.000; 1/10.000 khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng; Dữ liệu phụ trợ gồm các yếu tố trắc lượng hình thái địa hình như: mô hình số độ cao, độ dốc, hướng phơi.

- Ảnh viễn thám SPOT-4 năm 2000, 2010; ảnh Sentinel-2 năm 2022 tại khu vực nghiên cứu; ảnh Landsat tháng 4 các năm 2000, 2010 và 2022 phục vụ đánh giá trước phân loại thông qua chỉ số NDVI.

- Kết quả ô tiêu chuẩn thuộc “Chương trình điều tra, đánh giá và theo dõi diễn biến tài nguyên rừng toàn quốc”;

- Kết quả điều tra, khảo sát thực địa, đo đếm trữ lượng, mẫu chìa khóa ảnh, dữ liệu UAV 06/08/2022, 12/03/2023, được thực hiện bởi nghiên cứu sinh tại cao nguyên Kon Hà Nừng.

8. Cấu trúc luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và các phụ lục, luận án được bố cục trong 3 chương:

Chương 1: Cơ sở lý luận về nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng.

Chương 2: Đặc điểm khu vực nghiên cứu và quy trình xây dựng bản đồ trạng thái, sinh khối rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng.

Chương 3: Kết quả đánh giá biến động trạng thái, sinh khối rừng và định hướng quản lý bảo vệ rừng cao nguyên Kon Hà Nừng.

CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ LUẬN VỀ NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG

1.1. TỔNG QUAN TÀI LIỆU VỀ NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG

1.1.1. Các khái niệm cơ bản liên quan tới nội dung luận án

1.1.1.1. Khái niệm rừng

Năm 2000, Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc (FAO) đã đưa ra khái niệm về rừng là khu vực đất có diện tích tối thiểu 0,5 ha, có độ che phủ cây trên 10% và cây cối có khả năng phát triển đạt chiều cao ít nhất 5 m khi trưởng thành trong môi trường tự nhiên. Khái niệm này được đưa ra nhằm xác định và phân loại rừng phục vụ mục đích quản lý, bảo tồn và phát triển bền vững. Nghị định số 156/2018/NĐ-CP đưa ra khái niệm chung về rừng [3] như sau: Rừng là một hệ sinh thái đặc trưng với thành phần chính là các loài cây lâu năm thân gỗ, cau dừa, có chiều cao vượt ngọn từ 5 m trở lên, mang khả năng cung cấp gỗ, lâm sản ngoài gỗ và các giá trị khác như bảo vệ môi trường, cảnh quan, và bảo tồn đa dạng sinh học. Diện tích rừng cần đạt mức liên khoảnh trên 0,3 ha; hoặc nếu là dải cây rừng thì phải có chiều rộng tối thiểu 20 m, với ít nhất 3 hàng cây. Những khu vực cây rừng tập trung có diện tích dưới 0,3 ha hoặc các dải rừng hẹp dưới 20 m được xếp vào loại cây phân tán.

1.1.1.2. Khái niệm về hiện trạng, trạng thái rừng và biến động

Các khái niệm được định nghĩa cụ thể trong các văn bản áp dụng trong lĩnh vực lâm nghiệp: Luật Lâm nghiệp số 16/2017/QH14 ngày 15 tháng 11 năm 2017 của Quốc hội nước Cộng hòa Xã hội Chủ nghĩa Việt Nam, Nghị định số 156/2018/NĐ-CP ngày 16 tháng 11 năm 2018 của Chính phủ quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Lâm nghiệp và Thông tư số 16/2023/TT-BNNPTNT của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn quy định về điều tra, kiểm kê và theo dõi diễn biến rừng. Các tài liệu trên cung cấp định nghĩa và hướng dẫn chi tiết về biến động trạng thái rừng, cùng với quy trình theo dõi, báo cáo và xử lý các biến động rừng trong quản lý lâm nghiệp tại Việt Nam. Cụ thể như sau:

- *Hiện trạng rừng*: Mô tả tình hình hiện tại của rừng (tại một thời điểm trong năm), bao gồm các đặc điểm về cấu trúc, thành phần loài cây, mật độ, độ che phủ, độ tuổi rừng và các đặc điểm sinh thái khác. Việc xác định hiện trạng rừng giúp các nhà quản lý lâm nghiệp có được thông tin về hiện trạng lớp phủ thực tế, từ đó đưa ra các biện pháp bảo vệ, phát triển và sử dụng rừng bền vững.

- *Trạng thái rừng*: Thể hiện chất lượng và sức khỏe của hệ sinh thái rừng, bao gồm mức độ che phủ, cấu trúc tầng tán, đa dạng loài, khả năng phục hồi và mức độ suy thoái. Khái niệm này giúp đánh giá tiềm năng cung cấp dịch vụ của hệ sinh thái và mức độ suy giảm hoặc phục hồi của rừng.

- *Biến động hiện trạng và trạng thái rừng*: Biến động hiện trạng và trạng thái rừng là sự thay đổi về diện tích, cấu trúc, thành phần loài, mật độ và chất lượng sinh thái theo thời gian. Các hiện tượng tự nhiên như bão, lũ lụt hay cháy rừng có thể góp phần gây ra sự thay đổi trong LULC. Tuy nhiên, nguyên nhân chủ yếu là do tác động của con người như khai thác gỗ, chuyển đổi đất rừng để trồng trọt hoặc xây dựng gây ra sự biến đổi đáng kể LULC [2, 4, 15].

Trong nội dung luận án, “hiện trạng rừng” được hiểu là mô tả thực tế về diện tích, phân loại lớp phủ và phân bố không gian của rừng tại các mốc thời gian xác định (bản đồ LULC, rừng tự nhiên/rừng trồng, diện tích theo lớp), được xác định chủ yếu bằng phân loại ảnh viễn thám và kiểm chứng thực địa; “trạng thái rừng” được hiểu là đánh giá chất lượng sinh thái và chức năng của rừng tại cùng các mốc thời gian (mật độ và cấu trúc tán, độ che phủ, đa dạng loài, mức suy thoái hoặc phục hồi, sinh khối và khả năng lưu trữ các-bon), được xác định bằng các chỉ số viễn thám, chỉ số sinh thái, mô hình ước tính sinh khối và dữ liệu điều tra ô tiêu chuẩn. Khi luận án đề cập đến “biến động trạng thái” sẽ bao gồm cả biến động hiện trạng (thay đổi diện tích, chuyển đổi lớp phủ) và biến động chất lượng (thay đổi sinh khối, suy thoái/phục hồi, thay đổi cấu trúc sinh thái); các định nghĩa vận hành này sẽ được áp dụng nhất quán trong toàn bộ luận án để đảm bảo rõ ràng phương pháp, chỉ tiêu đo lường và cách diễn giải kết quả.

1.1.1.3. Khái niệm sinh khối rừng

- Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc (FAO) định nghĩa sinh khối là khối lượng của các vật chất hữu cơ sống, trên mặt đất hoặc dưới mặt đất, được biểu thị trên một đơn vị diện tích của đất [7].

- Trong khi đó, Ủy ban Liên chính phủ về biến đổi khí hậu (IPCC) đưa ra khái niệm sinh khối là tổng khối lượng (trọng lượng khô) của các sinh vật sống trên một diện tích đất hoặc thể tích nước tại một thời điểm nhất định [49].

- Giáo trình sinh thái rừng của Trường Đại học Lâm nghiệp định nghĩa sinh khối rừng là tổng khối lượng vật chất sinh học của tất cả các thành phần thực vật sống trong rừng, phản ánh khả năng sản xuất sinh học của hệ sinh thái [13]. Như vậy, sinh khối rừng được hiểu là tổng khối lượng của tất cả các thực vật sống trong một khu rừng tại một thời điểm.

- *Sinh khối rừng trên mặt đất (AGB)*: Khối lượng của toàn bộ phần thực vật sống trên mặt đất (thân, cành, lá). Đây là chỉ số quan trọng để ước tính lượng các-bon tích lũy và khả năng hấp thụ CO₂ [7].

- *Biến động sinh khối*: Sự thay đổi lượng sinh khối theo thời gian do sinh trưởng, khai thác, cháy rừng, sâu bệnh hoặc thay đổi trạng thái rừng. Biến động sinh khối phản ánh lượng các-bon phát thải hoặc hấp thụ trong hệ sinh thái [49].

1.1.1.4. REDD+ và các khái niệm liên quan

REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation): giảm phát thải CO₂ từ rừng bằng cách trả giá tài chính hoặc hỗ trợ cho các quốc gia/địa phương khi họ chứng minh được việc giảm mất rừng và suy thoái rừng.

- *Lưu trữ các-bon*: Lượng CO₂ được hấp thụ qua quá trình quang hợp của lá cây rừng.

- *Phát thải các-bon*: Quá trình giải phóng CO₂ khi sinh khối bị phân hủy hoặc khai thác.

- *Phát thải ròng*: Trong khuôn khổ kỹ thuật của IPCC, phát thải ròng được hiểu là thay đổi tổng lượng các-bon dự trữ trong rừng qua một giai đoạn [103].

- *Mức tham chiếu rừng (Forest Reference Level - FRL)*: Giá trị nền về phát thải khí nhà kính từ rừng trong kịch bản “không can thiệp”, dùng để so sánh và đánh giá hiệu quả các hoạt động giảm phát thải trong khuôn khổ REDD+ [135].

- *Đường cơ sở (Baseline)*: Xu hướng biến động rừng và phát thải khí nhà kính nếu không có biện pháp quản lý bổ sung [49].

- *Thị trường tín chỉ các-bon*: Thị trường tín chỉ các-bon là cơ chế giao dịch trong đó mỗi tín chỉ đại diện cho việc giảm phát thải hoặc loại bỏ 1 tấn CO₂ tương đương, thường thông qua các dự án bảo vệ rừng, phục hồi hệ sinh thái hoặc chuyển đổi sang năng lượng sạch. Khái niệm này được sử dụng rộng rãi trong các tài liệu quốc tế như UNFCCC, IETA và World Bank, coi tín chỉ các-bon là chứng chỉ thương mại hóa cho lượng phát thải giảm hoặc loại trừ. Giá trị tín chỉ biến động tùy theo thị trường bắt buộc hay tự nguyện, tiêu chuẩn cấp tín chỉ và mức độ khan hiếm của nguồn giảm phát thải. Hiện nay, các hệ thống giao dịch khí thải như hệ thống giao dịch phát thải của Liên minh châu Âu (European Union Emissions Trading System - EU ETS) cùng thị trường tự nguyện toàn cầu đang phát triển mạnh, trở thành công cụ quan trọng trong việc thực hiện các cam kết giảm phát thải khí nhà kính và thúc đẩy quản lý bền vững tài nguyên rừng.

Các mô hình tính mức hấp thụ và phát thải tham chiếu các-bon:

- *Mô hình thay đổi dự trữ (stock-change)*: đo và so sánh trữ lượng các-bon ở các thời điểm khác nhau dựa trên số liệu hiện trường; phù hợp khi có mạng lưới quan trắc.

- *Mô hình tăng–giảm (gain–loss)*: ước tính các luồng tăng và giảm (ví dụ: sinh trưởng, khai thác, cháy rừng) để tính phát thải ròng; thích hợp khi cần mô tả các quá trình động lực học.

- *Mô hình hệ số phát thải (emission factor × activity)*: dùng hệ số mặc định hoặc hệ số quốc gia nhân với chỉ số hoạt động (ví dụ: diện tích chuyển đổi); thích hợp cho Tier 1/Tier 2 khi dữ liệu còn hạn chế.

- *Mô hình quá trình (process-based) và bookkeeping*: mô phỏng cơ chế sinh học và chu trình các-bon để dự báo dưới các kịch bản quản lý khác nhau; thường dùng cho phân tích kịch bản và đánh giá bất định [137].

1.1.2. Tổng quan tình hình nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng trên thế giới và Việt Nam

1.1.2.1. Nghiên cứu biến động trạng thái rừng

Xây dựng bản đồ LULC dựa trên dữ liệu viễn thám hiện nay đóng vai trò then chốt trong công tác quản lý tài nguyên và ứng phó với biến đổi khí hậu. Các bản đồ LULC không chỉ cung cấp thông tin về hiện trạng sử dụng đất và sự biến đổi của thảm thực vật theo thời gian mà còn hỗ trợ xây dựng chiến lược bảo tồn, phát triển kinh tế xanh và tham gia các dự án REDD+. Trong bối cảnh học máy và các công nghệ xử lý ảnh viễn thám phát triển, nhiều thuật toán đã được áp dụng để phân loại các lớp sử dụng đất, như Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), mạng nơ-ron (ANN/CNN), hay các kiến trúc deep learning (ví dụ: U-net), nhằm đạt được kết quả phân loại tối ưu.

Các loại tư liệu viễn thám được sử dụng

- Ảnh quang học: Ảnh Landsat (30 m) và Sentinel-2 (10–20 m), cho phép phân loại LULC và giám sát biến động theo chu kỳ năm hoặc mùa vụ [138]. Các ảnh Landsat cho phép phân tích xu hướng thay đổi của LULC trên diện tích rộng lớn [138]. Dữ liệu MODIS, với độ phân giải khoảng 250–500 m, thường được sử dụng để theo dõi những thay đổi tổng quát thường niên hoặc theo mùa trên toàn cầu [139]. Những ảnh vệ tinh mới có độ phân giải cao khoảng 5 m như Planet được áp dụng tại một số nghiên cứu, nhất là trong các ứng dụng yêu cầu độ chi tiết cao như lập bản đồ độ che phủ cây và phát hiện mất rừng [138]. Ảnh Sentinel-2 với độ phân giải 10 - 20 m và khả năng thu thập dữ liệu đa thời gian được sử dụng chủ yếu trong xây dựng bản đồ LULC cho cả khu vực đô thị và nông thôn, miền núi [132]. Trong khi VNREDSat-1 và các vệ tinh địa phương có vai trò tăng cường độ chính xác của sản phẩm bản đồ thông qua dữ liệu có độ phân giải tương đương.

- Ảnh radar: Từ những năm 2000 đến nay, dữ liệu SAR đã được thu thập bởi các vệ tinh ở băng C-band (Envisat ASAR, Radarsat-1/2, Sentinel-1A/B), L-band (ALOS PALSAR trên ALOS-1 và PALSAR-2 trên ALOS-2) và X-band (TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed), cung cấp tín hiệu phản hồi đa phân cực (VV,

VH, HH, HV) với khả năng xuyên mây ngày đêm, đo ẩm đất và phân biệt cấu trúc thảm thực vật ngay cả trong mùa mưa nhiệt đới [139]. Trên thế giới, việc kết hợp phân tích phân cực và kỹ thuật giao thoa SAR với các thuật toán máy học như Random Forest hay tăng cường gradient cực độ (Extreme Gradient Boosting - XGBoost) đã giúp cải thiện 20–30 % độ chính xác phân loại LULC và đạt tỷ lệ ước tính sinh khối trên 90 % [38].

- Ảnh chụp từ máy bay: Trước đây, các chương trình điều tra rừng quốc gia ở Việt Nam sử dụng máy ảnh định dạng lớn (Large Format Camera) gắn trên máy bay cánh cố định bay ở độ cao 2.000–3.000 m, thu ảnh CIR (Color Infrared) và ảnh quang phổ đa dải với độ phân giải không gian 1–5 m để lập bản đồ ô lưới kiểm kê, đánh giá chi tiết cấu trúc tầng tán và mật độ thảm thực vật [30]. Trên thế giới, các cơ quan như USGS (Mỹ), Ordnance Survey (Anh) và IGN (Pháp) khai thác ảnh hàng không phân giải 0,5–2 m phối trộn dải đỏ, xanh lá và cận hồng ngoại (NIR) để xây dựng bản đồ LULC cấp hành chính, đồng thời tạo mô hình số bề mặt (DSM) phục vụ tính toán sinh khối bằng phương pháp ảnh không gian (photogrammetry) [127, 140]. Gần đây, ảnh LiDAR bay lượn (airborne LiDAR) cung cấp đám mây điểm độ cao chi tiết (< 1 m) đã được áp dụng rộng rãi cho ước tính sinh khối cây rừng với sai số dưới 5 % nhờ đo đạc trực tiếp chiều cao và cấu trúc tán lá [140]. Tại Việt Nam, từ năm 2017 Viện Điều tra và Quy hoạch rừng phối hợp với Tổng cục Lâm nghiệp triển khai chuyến bay thu thập đồng thời ảnh CIR và LiDAR cho khu bảo tồn Pù Mát (Nghệ An), đạt độ phân giải 2 m, hỗ trợ xây dựng bản đồ LULC chi tiết và tính toán trữ lượng carbon mặt đất vùng rừng nhiệt đới mưa mùa [31].

- Ảnh UAV: Máy bay không người lái hiện đại được trang bị cảm biến đa phổ (RGB, NIR, SWIR) và LiDAR, cung cấp ảnh tiền xử lý theo pixel với độ phân giải không gian từ 0,05 đến 5 m, cho phép lập bản đồ LULC chi tiết cho khu vực nhỏ, đo trực tiếp một số chỉ tiêu lâm phần và đánh giá đa dạng tầng tán [128]. Trên thế giới, Saponaro và Tarantino (2022) đã sử dụng orthomosaic UAV kết hợp Random Forest và K-means để phân loại LULC với độ chính xác lên tới 93 % [117]. Aydın và Sefercik (2025) ghi nhận việc tích hợp lớp Normalized Digital Surface Model

(NDSM) chính xác vào bộ dữ liệu UAV đã nâng Overall Accuracy thêm 4–7 % và đạt 94,65 % khi áp dụng XGBoost [36]. Li và cộng sự (2024) kết hợp dữ liệu đa phổ từ UAV và LiDAR thông qua mạng DA-GCN để phân loại loài cây đô thị, đạt hệ số Kappa 0,87 và F1-score 89,80% [84]. Tại Việt Nam, UAV đang được thử nghiệm trong các dự án giám sát phục hồi rừng và đánh giá trữ lượng các-bon ở những khu bảo tồn, mở ra cơ hội cải thiện độ chi tiết và tần suất cập nhật bản đồ rừng ở cấp xã, nơi mà trước đây phương pháp truyền thống khó tiếp cận.

Các tỉ lệ bản đồ cần xây dựng

- Bản đồ tỉ lệ nhỏ ($< 1:100.000$): Dùng để đánh giá tổng quát cấp quốc gia hoặc vùng liên tỉnh, thể hiện phân bố rừng sản xuất, rừng phòng hộ, rừng đặc dụng và quy hoạch bảo tồn. Ví dụ: bản đồ che phủ rừng 1:200.000 dựa trên dữ liệu MODIS (250 - 500 m) và CCI-LC (300 m) giúp so sánh qua nhiều năm nhằm xác định điểm nóng mất rừng nhiệt đới [139]. Các sản phẩm bản đồ toàn cầu thường được xây dựng với tỷ lệ bản đồ tổng quát (ví dụ: 1:1,000,000 hoặc 1:500,000) để đảm bảo khả năng so sánh và đánh giá biến động LULC trên phạm vi toàn cầu. Ở quy mô toàn cầu, việc xây dựng bản đồ LULC thường dựa trên dữ liệu viễn thám, có khả năng bao phủ diện tích rộng và theo dõi xu hướng theo thời gian.

Các bản đồ LULC tỷ lệ nhỏ khi sử dụng dữ liệu từ Landsat, MODIS và Planet NICFI cho thấy độ chính xác tổng thể của các mô hình RF thường ổn định, với hệ số Kappa trung bình khoảng 0.89, cho thấy khả năng phân loại hiệu quả ngay cả khi dữ liệu có nhiều nhiễu hoặc đến từ nhiều nguồn khác nhau [139]. So sánh với các phương pháp khác, có thể thấy mặc dù các mô hình deep learning như U-net có thể đạt được kết quả phân loại xuất sắc ($F1 > 0.98$) [138], nhưng chi phí tính toán và yêu cầu tài nguyên phần cứng lớn là điểm hạn chế khi áp dụng trên quy mô toàn cầu. RF lại cho thấy lợi thế về tính mở rộng và khả năng triển khai hiệu quả trên các tập dữ liệu lớn mà không cần tối ưu hóa các tham số quá phức tạp.

- Bản đồ tỉ lệ trung bình (1:100.000–1:50.000): Áp dụng cho quy hoạch cấp tỉnh, bản đồ trữ lượng gỗ, sinh khối và lớp phủ sinh thái. Thông tin nền kết hợp

Landsat (30 m), Sentinel-2 (10–20 m) và radar Sentinel-1 độ phân giải trung bình cho phép ước tính trữ lượng gỗ và các-bon chính xác hơn so với tỉ lệ nhỏ [47].

Bản đồ tỉ lệ lớn và chi tiết ($> 1:50.000$): phục vụ kiểm kê rừng, tính toán sinh khối và đánh giá tác động của dự án REDD+. Tỉ lệ điển hình 1:25 000 - 1:10.000 sử dụng ảnh quang học độ phân giải cao, radar phân giải cao, ảnh máy bay và UAV [53]. Dữ liệu về lô, khoảnh, tiểu khu rừng được cập nhật thường xuyên, hỗ trợ việc cấp phép khai thác và giám sát diện tích rừng. Các nghiên cứu trên mẫu lớn cho thấy thuật toán RF đạt độ chính xác tổng thể từ 90,7% đến 91,1% và hệ số Kappa từ 0,85 đến 0,87. Với độ chính xác như vậy sẽ giúp xác định có tin cậy diện tích các lớp LULC, đặc biệt là trong các khu vực có sự chuyển đổi nhanh giữa rừng, đất nông nghiệp và đô thị [133]. Các thuật toán khác như SVM, mặc dù có khả năng phân chia tốt, nhưng đòi hỏi tối ưu hóa tham số nặng nề, nhất là khi dữ liệu đầu vào không đồng nhất. MLP-Net đạt được các chỉ số như ACC và AUC cao, nhưng lại đòi hỏi bộ dữ liệu huấn luyện phong phú và phụ thuộc vào cấu trúc của mô hình.

Sản phẩm bản đồ LULC toàn cầu tiêu biểu như GLC2000 (1:1.000.000, JRC/ISRIC), MODIS MCD12Q1 (500 m, NASA) và GlobCover (300 m, ESA) đã sử dụng RF, SVM và deep learning để lập bản đồ phân loại 17 lớp che phủ đất trên toàn cầu. Những sản phẩm này đã được đánh giá độ chính xác tổng thể khoảng 85–90 % với hệ số Kappa khoảng 0,80–0,90, hỗ trợ các báo cáo IPCC và NDCs quốc gia [138].

Nghiên cứu tại khu vực Đông Nam Á cho thấy bản đồ LULC tỷ lệ 1:250.000 từ CCI-LC phù hợp để phân tích chuyển đổi rừng nhiệt đới mưa mùa, nhưng cần hình học ảnh và mô hình đa nguồn để cải thiện độ chính xác vùng mây dày. Báo cáo của FAO và UN-REDD chỉ ra rằng sự kết hợp radar và quang học tăng 10 - 15 % độ chính xác lớp che phủ rừng so với chỉ dùng ảnh quang học [132].

Bản đồ LULC cấp quốc gia của Việt Nam thường sử dụng tỷ lệ 1:250.000–1:100.000, dựa trên ảnh Sentinel-2, Landsat và vệ tinh quốc gia VNREDSat-1. Nghiên cứu của Trương Văn Thịnh (2024) áp dụng U-net trên Sentinel-2 trong sáu mùa, cho kết quả độ chính xác tổng thể $90,5 \pm 1,2$ % [105]. RF và SVM cũng được sử dụng phổ biến với độ chính xác 85–90 % và Kappa 0,85–0,90 trong các dự án điều

tra rừng toàn quốc [40]. Ở cấp tỉnh và cấp xã, tỷ lệ bản đồ 1:10.000–1:50.000 sử dụng ảnh SPOT, UAV (0,3–5 m) và Sentinel-2. Ví dụ, tại xã Văn Yên (tỉnh Yên Bái), RF đạt độ chính xác 90,7–91,1 % và Kappa 0,85–0,87 trong phân loại 5 lớp LULC [106]. Nghiên cứu ở Sơn La so sánh RF, SVM và MLP-Net trong đánh giá nguy cơ cháy rừng, ghi nhận MLP-Net đạt ACC = 81,7 %, AUC = 0,894, nhưng RF ổn định hơn về độ chính xác và chi phí tính toán [128].

Các công trình nghiên cứu ở Việt Nam cho thấy vẫn còn nhiều thách thức và khó khăn khi áp dụng công nghệ viễn thám - GIS trong nghiên cứu tài nguyên rừng. Do dữ liệu thực địa không đồng nhất, việc thu thập số liệu hiệu chỉnh cho UAV và LiDAR ở vùng núi cao gặp khó khăn, dẫn đến thiếu vắng mẫu huấn luyện chuẩn [20]. Ngoài ra, yếu tố gây nhiễu khí quyển như mây, sương mù và bóng đổ gây sai số trong ảnh quang học, đặc biệt ở vùng nhiệt đới; cần kết hợp radar để bù đắp [139]. Sự khác biệt khái niệm “lớp phủ đất” và “sử dụng đất” gây khó khăn khi so sánh kết quả giữa khu vực và quốc gia [20]. Những hạn chế trong đầu tư kinh phí và hạ tầng không phù hợp với chi phí triển khai deep learning và LiDAR vốn thường ở mức cao, do vậy, các nghiên cứu ứng dụng chưa phổ biến trong các tổ chức nghiên cứu và quản lý tại Việt Nam.

Dưới đây là tóm tắt so sánh giữa RF và các phương pháp phân loại khác dựa trên các tài liệu tham khảo trong luận án, cũng như đánh giá mức độ phù hợp của RF đối với bản đồ tỷ lệ nhỏ, bản đồ tỷ lệ trung bình, bản đồ tỷ lệ lớn và bản đồ tỷ lệ chi tiết.

Bảng 1.1. So sánh hiệu quả các thuật toán phân loại ảnh viễn thám theo quy mô bản đồ ứng dụng trong nghiên cứu biến động rừng

Quy mô	Dữ liệu ảnh vệ tinh sử dụng	Phương pháp phân loại	Độ chính xác	Ưu điểm RF	Nhược điểm và thách thức
Bản đồ tỉ lệ nhỏ (< 1:100.000)	Landsat, MODIS, Planet NICFI	RF, SVM, ANN, Deep Learning (U-Net)	RF: Kappa ~0,89; U-net: F1 > 0,98	Xử lý dữ liệu lớn; ổn định trên các vùng dữ liệu đa dạng	Đòi hỏi xử lý tập dữ liệu lớn, hạn chế hiện tượng quá khớp của deep learning

Quy mô	Dữ liệu ảnh vệ tinh sử dụng	Phương pháp phân loại	Độ chính xác	Ưu điểm RF	Nhược điểm và thách thức
Bản đồ tỉ lệ trung bình (1:100.000–1:50.000)	Sentinel-2, Landsat, VNREDSat-1	CNN (U-Net), RF, SVM	RF: Overall Accuracy 85–90%, Kappa 0,85–0,90; CNN: 90,5% ± 1,2%	Ứng dụng rộng rãi trên toàn quốc; khả năng mở rộng và dễ triển khai	Yêu cầu dữ liệu thực địa chất lượng cao để hiệu chỉnh kết quả
Bản đồ tỉ lệ lớn và chi tiết (> 1:50.000)	Sentinel-2, PlanetScope, UAV (0,3–5m)	RF, SVM, CART, MLP-Net	RF: Accuracy ~90,7–91,1%, Kappa 0,85–0,87; MLP-Net: ACC ~81,7%, KS ~0,633, AUC ~0,894;	Xử lý tốt dữ liệu độ phân giải cao; ổn định trong môi trường địa hình phức tạp	Thu thập dữ liệu thực địa không đồng nhất; ảnh hưởng của nhiễu khí quyển;

Nguồn: NCS tổng hợp từ các công trình nghiên cứu được trích dẫn trong phần tổng quan tài liệu của luận án.

Các thuật toán phân loại trong công nghệ viễn thám – GIS đã và đang được áp dụng trong ước tính sinh khối rừng

Trong công nghệ viễn thám – GIS hiện đại, khâu phân loại ảnh và phát hiện biến động đóng vai trò trung tâm, quyết định chất lượng sản phẩm bản đồ LULC. Các thuật toán học máy hiện là nhóm phương pháp phân loại chủ đạo và phổ biến nhất trong lĩnh vực này, bao gồm:

- Random Forest (RF): Khả năng xử lý dữ liệu đa chiều, giảm thiểu quá khớp và mở rộng quy mô toàn cầu với độ ổn định cao, đạt hệ số Kappa ~0,89 trên dữ liệu Landsat, MODIS và Planet NICFI [139]. Được sử dụng phổ biến nhờ khả năng xử lý tốt các tập dữ liệu đa chiều và giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu. Ví dụ, ở khu vực xã Văn Yên (tỉnh Yên Bái), RF đã cho độ chính xác tổng thể từ 90,7% đến 91,1% và hệ số Kappa từ 0,85 đến 0,87 [133].

- Support Vector Machine (SVM): Phân tách không gian đặc trưng hiệu quả, nhưng yêu cầu tinh chỉnh tham số tỉ mỉ hơn RF; thường dùng cho quy mô quốc gia với dữ liệu Sentinel-2 [40].

Thực trạng, một số nghiên cứu tại đồng bằng và vùng có diện tích lớn sử dụng SVM và CART cũng cho kết quả khá tốt (Kappa khoảng 0,85 trên diện tích lớn); tuy nhiên, CART gặp hạn chế khi xử lý các lớp LULC có diện tích nhỏ.

- Mạng nơ-ron (ANN/CNN): Các kiến trúc như U-net đã được áp dụng để phân loại các lớp LULC, đặc biệt với dữ liệu có độ phân giải cao từ hệ thống Planet NICFI [122]. Một nghiên cứu tại Brazil cho thấy U-net đạt điểm F1 vượt trội (> 0.98) trong việc lập bản đồ độ che phủ cây [138]. Nghiên cứu của Trương Văn Thịnh năm 2024 cho thấy sử dụng mô hình CNN chạy trên dữ liệu Sentinel-2 trải dài 6 mùa đã cho kết quả với độ chính xác tổng thể $90,5\% \pm 1,2\%$ [132].

- Mạng nơ-ron đa lớp (MLP-Net): Trong đánh giá nguy cơ cháy rừng tại các xã thuộc Hạt Kiểm lâm khu vực III (tỉnh Sơn La), MLP-Net, RF và SVM đã được so sánh. Kết quả cho thấy MLP-Net đạt $ACC = 81,7\%$, $KS = 0,633$ và $AUC = 0,894$, trong khi RF đạt $ACC = 81,1\%$, $KS = 0,621$ và $AUC = 0,883$. Mặc dù MLP-Net có một số ưu điểm, RF lại cho thấy ổn định hơn về mặt kết quả và khả năng xử lý dữ liệu phức tạp [128].

1.1.2.2. Nghiên cứu biến động sinh khối rừng

Các nghiên cứu ước tính sinh khối rừng truyền thống chủ yếu dựa vào ảnh vệ tinh quang học như SPOT-5, Landsat-8 và Sentinel-2 kết hợp với dữ liệu đo tại các ô tiêu chuẩn trên mặt đất nhằm hiệu chỉnh mô hình ước tính [4]. Nhờ đó, các mô hình có thể khai thác tối đa thông tin đặc trưng về đặc điểm quang học và các thuộc tính sinh học của rừng. Trong những năm gần đây, khi mây che phủ thường xuyên cản trở việc thu thập ảnh quang học, ảnh radar (SAR) như ALOS PALSAR hay Sentinel-1 đã được ứng dụng để ước tính sinh khối nhờ khả năng xuyên mây. Ví dụ, kết quả nghiên cứu của Trần Tuấn Ngọc [12] đã chỉ ra rằng viễn thám radar cho phép ước tính sinh khối rừng với độ chính xác cao ($RMSE \approx 3,2$ tấn/ha) tại Hòa Bình nhờ sinh khối trung bình (~ 40 tấn/ha) ít bị bão hòa tán xạ. Việc kết hợp phân cực HH–HV,

ảnh đa thời gian cùng kênh L–C càng nâng cao độ chính xác và hạn chế bão hòa tín hiệu, mở ra triển vọng ứng dụng rộng khắp tại Việt Nam. Tuy nhiên, khi nói đến các giai đoạn lịch sử, nhất là trước năm 2010, kho dữ liệu radar có nhiều hạn chế về chuỗi thời gian và độ liên tục. Do đó, các nghiên cứu ước tính sinh khối cho các năm trước 2010 vẫn ưu tiên sử dụng ảnh quang học vì chúng có dữ liệu lâu dài, liên tục và được hiệu chuẩn kỹ lưỡng thông qua các chiến dịch đo đạc tại địa phương [6, 70, 109].

Các phương pháp truyền thống dựa trên công thức phương trình tương quan sinh trắc học (allometric equation) sử dụng các thông số như đường kính cây tại 1,3 m và chiều cao cây, đã được mở rộng thông qua việc ứng dụng các mô hình học máy tiên tiến như kNN, RF, SVM và ANN nhằm khai thác tối đa thông tin từ dữ liệu quang học và dữ liệu thực địa [6, 70]. Chẳng hạn, nghiên cứu của Nguyễn Thị Thanh Hương cho thấy khi sử dụng ảnh SPOT-5 để phân tích riêng từng tầng của lâm phần, sai số ước tính (RMSE) giảm đáng kể so với việc chỉ dựa vào chỉ số NDVI đơn thuần [6]. Ngoài ra, các nghiên cứu ứng dụng dữ liệu radar cũng đã bắt đầu sử dụng các mô hình hồi quy và các thuật toán học máy tương tự để ước tính sinh khối. Các nghiên cứu đã khai thác thông tin từ độ phản xạ và đặc trưng xạ hình của ảnh radar, từ đó xây dựng các mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số radar và sinh khối rừng. Nhiều công trình cho thấy việc kết hợp dữ liệu radar với ảnh quang học có thể giúp cải thiện đáng kể độ chính xác, nhất là ở những vùng có điều kiện thời tiết và địa hình phức tạp. Ví dụ như nghiên cứu của Trần Anh Tuấn [27] đã xây dựng thành công quy trình lọc mây và phân loại ảnh Landsat đa thời gian trên nền tảng Google Earth Engine kết hợp với ảnh Sentinel-1A, qua đó nâng độ chính xác phân loại rừng rụng lá (rừng khộp) lên 81,67% (riêng ưu hợp rừng khộp đạt 92,40%) và xác định chính xác quy mô, vị trí cùng trạng thái chuyển đổi rừng khộp Đắc Lắc, trong đó diện tích rừng khộp giai đoạn 2000–2015 giảm 16,9% (42.489 ha).

Các sản phẩm viễn thám tích hợp này đã thiết lập cơ sở khoa học vững chắc cho công tác quản lý, bảo tồn và phát triển rừng khộp, đồng thời mở ra hướng ứng dụng rộng rãi trong giám sát tài nguyên thiên nhiên theo mùa. Tuy nhiên, một yếu tố cần lưu ý là do dữ liệu radar chưa trải dài đủ thời gian trước năm 2010, nên các mô hình

ước tính sinh khối dựa vào radar cho giai đoạn trước 2010 gặp hạn chế, đồng thời ảnh hưởng đến độ tin cậy khi đánh giá biến động sinh khối trong quá khứ. Đó là lý do tại sao trong các nghiên cứu lịch sử, ước tính sinh khối sử dụng dữ liệu quang học kết hợp với dữ liệu thực địa lại được xem là giải pháp tối ưu [6, 70, 109].

a) Trên thế giới

Nghiên cứu biến động LULC và sinh khối rừng bằng công nghệ viễn thám và GIS đã trở thành một hướng tiếp cận chủ đạo trong giám sát tài nguyên rừng, đánh giá trữ lượng các-bon và hỗ trợ xây dựng mức phát thải tham chiếu trong khuôn khổ REDD+ ở quy mô khu vực và toàn cầu. Trong khoảng hai thập kỷ gần đây, hướng nghiên cứu này phát triển mạnh dựa trên ba trụ cột chính, gồm: sự đa dạng của nguồn dữ liệu viễn thám đa thời gian (ảnh quang học, SAR, LiDAR/GEDI), sự tiến bộ của các thuật toán xử lý và học máy, cùng với khả năng phân tích dữ liệu không gian trên các nền tảng điện toán đám mây. Vì vậy, tổng quan trong mục này tập trung vào ba từ khóa cốt lõi của luận án, bao gồm: biến động LULC, sinh khối rừng, và công nghệ viễn thám – GIS; từ đó làm rõ các hướng tiếp cận đã được sử dụng trên thế giới và ở Việt Nam, đồng thời xác định khoảng trống nghiên cứu mà luận án hướng tới bổ sung.

Trong giai đoạn gần đây, nghiên cứu về ước tính và theo dõi biến động sinh khối rừng (above-ground biomass, AGB) đã đạt được bước tiến đáng kể nhờ sự hội tụ của 3 yếu tố: sự phát triển của cảm biến viễn thám (GEDI, LiDAR hàng không, SAR băng L), khả năng xử lý dữ liệu lớn và tiến bộ trong các thuật toán học máy. Các nghiên cứu tập trung không chỉ vào việc tạo bản đồ AGB tĩnh mà còn vào bản đồ AGB theo thời gian để phát hiện mất rừng, suy thoái và phục hồi, phục vụ báo cáo khí hậu, cơ chế REDD+ và thị trường các-bon [54, 129, 150]. Nghiên cứu định lượng về sinh khối rừng ở các khu vực quy mô lớn có vai trò quan trọng trong việc lượng hóa vai trò của thảm thực vật rừng đối với chu trình các-bon toàn cầu, vai trò của hệ sinh thái rừng trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Các phương pháp tiếp cận truyền thống dựa trên đo đạc thực địa có độ chính xác cao, nhưng chỉ phù hợp với phạm vi nghiên cứu nhỏ và khó thực hiện ở các khu vực rộng lớn. Với tiến bộ khoa học kỹ thuật và công nghệ trong việc thu thập định lượng các thông số rừng như chiều cao rừng, mật

độ tán, ... viễn thám đã trở thành nguồn dữ liệu chính để ước tính sinh khối [83, 141]. Kết hợp đa dạng các dữ liệu và phương pháp viễn thám trong ước tính sinh khối rừng là một giải pháp hữu ích phục vụ ước tính trữ lượng các-bon và đánh giá các hệ sinh thái rừng [63].

Chuỗi dữ liệu Landsat (5/7/8/9) với lịch sử quan trắc liên tục từ thập niên 1970 đến nay là nền tảng được sử dụng phổ biến nhất cho nghiên cứu biến động rừng dài hạn ở quy mô toàn cầu và khu vực. Nguồn dữ liệu chủ đạo gồm: (1) ảnh quang học đa thời gian (Landsat, Sentinel-2) dùng cho phân lớp che phủ và phát hiện thay đổi; (2) SAR, đặc biệt băng tần L (ALOS-PALSAR, ALOS-2/4), có ưu thế ở vùng nhiệt đới nhiều mây; (3) LiDAR hàng không và dữ liệu GEDI cung cấp thông tin chiều cao tán và cấu trúc dọc theo trục, là cơ sở để hiệu chỉnh phương trình tương quan sinh trắc học; (4) dữ liệu hiện trường (ô tiêu chuẩn) dùng để xây dựng và kiểm định mô hình. Các nghiên cứu gần đây nhấn mạnh hợp nhất đa nguồn (data fusion) như con đường chính để giảm sai số và mở rộng độ tin cậy không gian-thời gian của bản đồ AGB [129, 150].

Sentinel-2, với độ phân giải không gian 10 m và chu kỳ lặp 5 ngày, cải thiện đáng kể khả năng phát hiện các biến động quy mô nhỏ, đặc biệt nhờ tích hợp các kênh phổ red-edge. Một nghiên cứu gần đây cho thấy với ảnh Sentinel-2, mô hình XGBoost đạt $R^2 = 0,82$ và RMSE = 0,73 Mg/ha, Random Forest đạt $R^2 = 0,74$ và RMSE = 0,93 Mg/ha; với Landsat-9, XGBoost đạt $R^2 = 0,80$ và Random Forest đạt $R^2 = 0,72$. Kết quả cho thấy Sentinel-2 có ưu thế hơn Landsat ở quy mô địa phương nhờ độ phân giải không gian và phổ cao hơn [152].

Dữ liệu SAR băng tần L (ALOS PALSAR) có khả năng xuyên qua tán rừng dày và ít bị ảnh hưởng bởi mây. Đây là một đặc điểm quan trọng trong điều kiện nhiệt đới. Sử dụng ALOS PALSAR đánh giá sinh khối rừng tại Việt Nam trong khuôn khổ Chương trình Kyoto & Carbon (K&C), xác nhận PALSAR [107] có thể phát hiện biến động trạng thái rừng (mất rừng, tái sinh) giai đoạn 2007–2009 với độ chính xác phân loại đạt 87,28% năm 2007 và 91,60% năm 2010. Tuy nhiên, hiện tượng bão hòa

tín hiệu SAR ở ngưỡng AGB > 100–150 Mg/ha là một hạn chế kỹ thuật quan trọng cần lưu ý khi áp dụng tại các khu rừng giàu sinh khối như Kon Hà Nừng.

GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) là công nghệ LiDAR sóng toàn phần được triển khai trên Trạm vũ trụ quốc tế từ tháng 12/2018, với mục tiêu đo cấu trúc ba chiều của rừng nhằm nâng cao độ chính xác ước tính sinh khối trên mặt đất ở quy mô toàn cầu. Các nghiên cứu cho thấy trong rừng ôn đới với độ che phủ tán ~80 %, GEDI cho sai lệch hệ thống (bias) của mô hình cao độ mặt đất khoảng -1 m; tuy nhiên trong rừng mưa nhiệt đới dày đặc hơn (độ che phủ >90%), sai số tăng lên ~4 m và sau khi hiệu chỉnh bằng mô hình học máy có thể giảm còn 1,4 m [100]. Do GEDI chỉ bắt đầu thu thập dữ liệu từ năm 2019, công nghệ này không thể áp dụng cho các mốc thời gian 2000 và 2010 trong phạm vi luận án; đây là giới hạn khách quan của dữ liệu, không phải hạn chế về thiết kế nghiên cứu.

Xu hướng tích hợp đa nguồn hiện được khẳng định rõ trong nhiều nghiên cứu: khi kết hợp chuỗi thời gian Sentinel-2 và Sentinel-1, việc bổ sung SAR giúp tăng R^2 thêm 0,155 - 0,240 và giảm RMSE từ 11,09 đến 18,39 Mg/ha so với chỉ sử dụng SAR đơn lẻ [149]. Mặc dù vậy, mô hình hồi quy tuyến tính kết hợp ô tiêu chuẩn vẫn giữ vai trò quan trọng nhờ tính minh bạch, dễ kiểm chứng và phù hợp trong điều kiện bộ mẫu thực địa hạn chế; đây là lý do cơ bản để luận án lựa chọn phương pháp này làm đường cơ sở cho ước tính AGB tại cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2022.

- Phương pháp luận hiện hành và xu hướng kỹ thuật

+ Hợp nhất dữ liệu và mô hình hóa đa nguồn: Các nghiên cứu hiện đại thường kết hợp các đặc trưng quang học (chỉ số NDVI, EVI, các băng phổ), các đặc trưng SAR (tán xạ ngược - backscatter, các chỉ số phân cực - polarimetric metrics) và các chỉ số cấu trúc từ LiDAR/GEDI để sử dụng làm biến đầu vào cho mô hình ước tính AGB. Việc kết hợp này giúp khắc phục hạn chế riêng của từng nguồn: quang học dễ bão hòa và bị mây che phủ; SAR giảm ảnh hưởng của mây nhưng vẫn bão hòa ở AGB rất cao; LiDAR cung cấp chiều cao tán nhưng có độ phủ điểm hạn chế [54, 150].

+ Học máy và deep learning: Thuật toán Random Forest và XGBoost được sử dụng rộng rãi nhờ tính ổn định và khả năng xử lý các biến phi tuyến; đồng thời, các

mô hình deep learning (CNN, transformer-based) bắt đầu được áp dụng để khai thác các cấu trúc không gian phức tạp trong ảnh vệ tinh. Nhiều nghiên cứu cho thấy mô hình học máy đa nguồn cải thiện độ chính xác so với hồi quy tuyến tính truyền thống, nhưng đòi hỏi bộ mẫu huấn luyện lớn và kiểm định chéo nghiêm ngặt để tránh hiện tượng quá khớp (overfitting) [67, 129].

+ Chuỗi thời gian và phát hiện biến động: Kết hợp chuỗi thời gian Landsat/Sentinel-2 với SAR và điểm LiDAR (GEDI) cho phép phát hiện mất rừng tức thời và ước tính mức độ thay đổi của sinh khối. Các phương pháp change-detection hiện nay không chỉ phát hiện các thay đổi che phủ mà còn ước lượng lượng sinh khối bị mất hoặc phục hồi nếu có dữ liệu chiều cao tán đủ tốt. Tuy nhiên, độ nhạy giảm ở vùng có AGB rất cao do bão hòa tín hiệu vẫn là thách thức [54, 116].

- *Thách thức kỹ thuật và tồn tại*

+ Bão hòa tín hiệu và giới hạn cảm biến

Đối với ảnh quang học, các chỉ số phổ như NDVI/EVI bão hòa ở tán rậm, làm giảm khả năng phân biệt các mức sinh khối cao. Trong khi đó, ảnh SAR cho thấy mặc dù L-band nhạy hơn với sinh khối lớn so với C-band, nhưng vẫn gặp bão hòa khi AGB vượt ngưỡng nhất định; polarimetry và interferometry giúp phần nào nhưng không hoàn toàn khắc phục được. Ngoài ra, LiDAR/GEDI cung cấp chiều cao tán chính xác nhưng có độ phủ điểm hạn chế; GEDI là dữ liệu điểm theo dải, không phủ toàn diện, nên cần nội suy hoặc kết hợp với dữ liệu quang/SAR để tạo bản đồ lưới [54, 150]. Hậu quả là các bản đồ AGB toàn cầu có độ tin cậy không đồng đều, đặc biệt ở các khu rừng nhiệt đới giàu sinh khối.

+ Thiếu dữ liệu hiện trường chuẩn hóa và vấn đề tương quan sinh trưởng: Nhiều khu vực, đặc biệt ở châu Phi, Đông Nam Á và Nam Mỹ, thiếu các bộ mẫu hiện trường tiêu chuẩn (ô tiêu chuẩn để đo đếm) nhằm hiệu chuẩn mô hình. Công thức tương quan khác nhau giữa các loài, kiểu rừng và vùng sinh thái dẫn tới sai số hệ thống khi áp dụng công thức không phù hợp. Việc thu thập hiện trường tốn kém và đòi hỏi kỹ thuật đo đếm chuẩn, nên nhiều nghiên cứu phải dựa vào dữ liệu hiện trường không đồng nhất, làm giảm khả năng so sánh giữa các nghiên cứu [129, 150].

+ Vấn đề chuỗi thời gian và tính đồng nhất dữ liệu ảnh vệ tinh: Mây che phủ, thay đổi cảm biến và khác biệt quang-điện tử giữa các nhiệm vụ vệ tinh gây gián đoạn chuỗi thời gian. Cần các kỹ thuật gap-filling, harmonization và chuẩn hóa băng tần để đảm bảo tính liên tục khi phân tích biến động dài hạn [137].

+ Đánh giá sai số và minh bạch: Nhiều sản phẩm AGB chưa cung cấp bản đồ sai số không gian-thời gian chi tiết; điều này hạn chế khả năng ứng dụng trong báo cáo khí hậu và thị trường các-bon, nơi yêu cầu độ tin cậy cao. Việc báo cáo sai số cần bao gồm nguồn sai số (phương trình tương quan sinh trắc học, mẫu hiện trường, bão hòa cảm biến, mô hình) và phân bố không gian của sai số [67, 129].

+ Vấn đề quy mô và chuyển giao mô hình: Mô hình huấn luyện ở quy mô địa phương thường không chuyển giao tốt sang khu vực khác do khác biệt về loài, cấu trúc rừng và điều kiện môi trường. Cần chiến lược phân tầng không gian và mô hình hóa theo vùng sinh thái để tăng tính tổng quát [129].

- Vai trò và giá trị của phương pháp truyền thống hồi quy tuyến tính kết hợp điều tra ô tiêu chuẩn

Mặc dù xu hướng hiện nay là học máy và kết hợp dữ liệu, các phương pháp truyền thống dựa trên hồi quy tuyến tính kết hợp dữ liệu điều tra mặt đất (ô tiêu chuẩn đo đếm) vẫn giữ vai trò quan trọng trong nhiều tình huống thực tế. Lý do và lợi thế cụ thể gồm:

+ Độ minh bạch và tính giải thích được: Hồi quy tuyến tính cho phép hiểu rõ mối quan hệ giữa chỉ số vệ tinh và sinh khối, thuận tiện cho việc kiểm tra giả thuyết sinh thái và giải thích kết quả cho nhà quản lý.

+ Hiệu quả khi dữ liệu hạn chế: Ở những khu vực thiếu dữ liệu hiện trường hoặc khi số lượng biến đầu vào hạn chế, mô hình tuyến tính có thể cho kết quả ổn định hơn và ít bị quá khớp hơn so với các mô hình phức tạp.

+ Chi phí tính toán thấp và dễ triển khai: Trong bối cảnh nguồn lực hạn chế (ví dụ: cơ quan quản lý địa phương), hồi quy tuyến tính kết hợp với ô tiêu chuẩn là phương pháp thực tiễn để nhanh chóng ước tính AGB và theo dõi các biến động cơ bản.

+ Chuẩn hóa và so sánh theo thời gian: Khi các ô tiêu chuẩn được đo đếm theo quy trình chuẩn, các chuỗi thời gian hồi quy tuyến tính có thể so sánh được qua các năm, hỗ trợ đánh giá xu hướng dài hạn.

+ Lợi thế trong kiểm định độc lập: Kết quả từ mô hình tuyến tính dễ kiểm định bằng các phép đo hiện trường bổ sung, giúp xác nhận hoặc hiệu chỉnh các bản đồ phức tạp hơn.

Do đó, không thể loại bỏ hoàn toàn phương pháp truyền thống; thay vào đó, cần kết hợp tiếp cận: dùng hồi quy tuyến tính và ô tiêu chuẩn để thiết lập đường cơ sở, sau đó áp dụng học máy và kết hợp các nguồn dữ liệu để cải thiện độ phân giải và độ chính xác, đồng thời dùng đường cơ sở để kiểm định và minh bạch hóa sai số [67, 80, 116, 129]. Giai đoạn 2020–2025 ghi nhận tiến bộ rõ rệt trong nghiên cứu sinh khối trên mặt đất (AGB) nhờ hợp nhất dữ liệu viễn thám và ứng dụng học máy: GEDI và LiDAR hàng không cải thiện hiệu chuẩn chiều cao tán; SAR băng L mở rộng khả năng theo dõi ở vùng nhiều mây; các mô hình học máy nâng cao khả năng suy luận phi tuyến và khai thác đặc trưng đa nguồn. Tuy nhiên, những rào cản còn tồn tại gồm bão hòa tín hiệu ở AGB cao, thiếu dữ liệu hiện trường được chuẩn hóa và vấn đề công thức phương trình tương quan sinh trắc học, gián đoạn chuỗi thời gian do mây và khác biệt cảm biến, cùng thiếu minh bạch về phân bố sai số; điều này hạn chế ứng dụng cho báo cáo khí hậu và thị trường các-bon [54, 67, 116, 129, 150]. Do đó cần các biện pháp đồng bộ: thiết kế chương trình hiện trường chuẩn hóa với mạng lưới ô phân tầng và đo cao cây để xây dựng phương trình tương quan sinh trắc học phù hợp; hợp nhất Sentinel-2, Sentinel-1, ALOS L-band và GEDI/LiDAR bằng phương pháp trộn có trọng số và đồng nhất dữ liệu - harmonization để vá các lỗi khi xử lý ảnh vệ tinh; áp dụng chiến lược mô hình kết hợp (hồi quy tuyến tính trên ô tiêu chuẩn làm đường cơ sở, sau đó triển khai học máy) kèm kiểm định chéo và bản đồ sai số; thúc đẩy hợp tác liên ngành và nghiên cứu giảm bão hòa bằng SAR đa phân cực và tích hợp LiDAR [81, 80, 125, 129].

b) Tại Việt Nam

- Xu hướng nghiên cứu và mục tiêu ứng dụng:

Các nghiên cứu trong nước tập trung vào một số mục tiêu chính: (1) xây dựng bản đồ sinh khối ở quy mô tỉnh/khu vực; (2) hồi cứu biến động sinh khối theo chuỗi thời gian để đánh giá mất mát và phục hồi rừng; (3) ước tính trữ lượng các-bon và hỗ trợ xây dựng đường FRL; (4) cung cấp dữ liệu đầu vào cho mô hình chu trình các-bon và đánh giá dịch vụ hệ sinh thái. Ở Việt Nam, do hạn chế về nguồn lực và dữ liệu thực địa chuẩn hóa, nhiều nghiên cứu được thực hiện ở quy mô khu vực (tỉnh, lưu vực, khu bảo tồn) và thường lấy các vùng điển hình (ví dụ Tây Nguyên, Bắc Trung Bộ, Duyên hải miền Trung) làm mẫu để phát triển phương pháp và kiểm chứng.

Trong bối cảnh chính sách quốc gia về giảm phát thải, nhu cầu có bản đồ sinh khối liên tục, minh bạch và có báo cáo bất định rõ ràng ngày càng tăng. Do đó, các nghiên cứu trong nước không chỉ tập trung vào độ chính xác của mô hình mà còn chú trọng đến khả năng lặp lại, tính minh bạch trong báo cáo sai số (RMSE, sai lệch hệ thống của mô hình) và tính liên kết với thống kê rừng quốc gia.

- *Nguồn dữ liệu viễn thám và dữ liệu thực địa tham chiếu*

+ Dữ liệu vệ tinh đa thời gian: Landsat (chuỗi Landsat 5/7/8) vẫn là nguồn dữ liệu chủ đạo cho phân tích biến động lịch sử nhờ chuỗi quan sát dài từ thập niên 1980 đến nay; nhiều nghiên cứu sử dụng chuỗi Landsat để phân tích sự thay đổi về che phủ và suy giảm sinh khối theo các mốc thời gian. Sentinel-2 được ứng dụng rộng rãi cho bản đồ LULC nhờ độ phân giải không gian cao hơn, thuận lợi cho phân lớp loài và ước tính sinh khối ở quy mô mảnh nhỏ hơn; các công trình trong nước đã trình bày quy trình sử dụng Sentinel-2 để xây dựng phương trình ước tính trữ lượng các-bon cho rừng lá rộng ven biển và đô thị. Việc kết hợp Landsat cho nghiên cứu lịch sử biến động dài hạn và Sentinel-2 cho bản đồ LULC là chiến lược thực tiễn được nhiều nghiên cứu trong nước khuyến nghị [19].

Dữ liệu radar (ALOS PALSAR, Sentinel-1) được dùng để khắc phục che phủ mây và giảm bão hòa chỉ số quang ở vùng có sinh khối lớn; một số nghiên cứu khu vực tại Việt Nam đã so sánh hiệu quả giữa dữ liệu radar và quang học, cho thấy radar bổ sung giá trị khi sinh khối cao hoặc che phủ dày. LiDAR, mặc dù phạm vi còn hạn chế ở Việt Nam, được sử dụng trong các chiến dịch khu vực để hiệu chuẩn mô hình

ước tính sinh khối từ ảnh quang học và giảm sai số hệ thống khi chuyển từ chỉ số vệ tinh sang sinh khối thực địa.

+ Dữ liệu thực địa và phương trình tương quan sinh trắc học: Dữ liệu thực địa (đường kính gốc, chiều cao, mật độ loài) là nền tảng để xây dựng bộ mẫu huấn luyện và kiểm định mô hình ước tính AGB. Ở Việt Nam, nhiều luận văn và báo cáo viện nghiên cứu đã thu thập mẫu thực địa tại các khu vực điển hình như tại các vùng sinh thái và sử dụng các phương trình tương quan phù hợp theo loài cây và loại rừng. Tuy nhiên, tính phân tán và thiếu chuẩn hóa trong phương pháp đo (kích thước ô, cách đo chiều cao, lựa chọn phương trình tương quan sinh trắc học) là một hạn chế lớn khi muốn tổng hợp kết quả ở quy mô lớn; do đó, việc chuẩn hóa mạng ô tiêu chuẩn và công bố đầy đủ thông tin phương pháp là yêu cầu cần thiết cho nghiên cứu liên vùng.

- Phương pháp phân tích và mô hình hóa được áp dụng tại Việt Nam

+ Hồi quy truyền thống và chỉ số quang phổ: Các nghiên cứu ban đầu tại Việt Nam thường sử dụng hồi quy tuyến tính hoặc phi tuyến tính giữa các chỉ số quang phổ (NDVI, EVI, SAVI) và sinh khối thực địa. Phương pháp này có ưu điểm là minh bạch, dễ giải thích và phù hợp để làm baseline để kiểm chứng các mô hình phức tạp hơn. Tuy nhiên, hạn chế lớn là hiện tượng bão hòa chỉ số quang phổ ở dải sinh khối cao và khó xử lý khi nhiều biến ảnh hưởng đồng thời.

+ Học máy và mô hình ensemble: Trong những năm gần đây, các mô hình học máy như Random Forest, XGBoost, hồi quy vector hỗ trợ (Support Vector Regression - SVR) được áp dụng rộng rãi ở các nghiên cứu trong nước nhờ khả năng xử lý nhiều biến đầu vào (chỉ số quang, đặc trưng kết cấu ảnh, dữ liệu topo, dữ liệu radar) và cải thiện độ chính xác khi có bộ mẫu thực địa đủ lớn. Nhiều nghiên cứu so sánh cho thấy học máy thường giảm RMSE so với hồi quy truyền thống trong các khu vực nghiên cứu tại Việt Nam, đặc biệt khi kết hợp các đặc trưng kết cấu ảnh và dữ liệu đa nguồn.

+ Tiền xử lý chuỗi thời gian: Để phân tích biến động, các nghiên cứu áp dụng kỹ thuật lọc mây, compositing (median composite, cloud-free mosaics) và phân đoạn chuỗi thời gian (temporal segmentation) nhằm phát hiện các thay đổi về che phủ và suy giảm sinh khối theo từng mốc thời gian. Ở Việt Nam, việc xử lý chuỗi Landsat

dài hạn kèm theo compositing hợp lý là bước then chốt để hồi cứu biến động sinh khối qua nhiều thập kỷ.

+ Tích hợp đa nguồn dữ liệu: Chiến lược kết hợp Landsat (hồi cứu) với Sentinel-2 (hiện trạng), radar và LiDAR (hiệu chuẩn) là xu hướng phổ biến nhằm tận dụng ưu thế của từng nguồn dữ liệu và giảm bất định trong việc ước tính sinh khối. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm tại Việt Nam đã chứng minh rằng tích hợp dữ liệu đa nguồn giúp cải thiện độ tin cậy bản đồ sinh khối, đặc biệt ở vùng địa hình phức tạp và rừng hỗn hợp [8].

Nhiều nghiên cứu gần đây ở Việt Nam đã chứng minh hiệu quả của việc kết hợp ảnh viễn thám đa thời gian với dữ liệu thực địa để ước tính sinh khối rừng, trong đó có 2 công trình tiêu biểu năm 2025 cung cấp bằng chứng thực nghiệm quan trọng. Nghiên cứu tại tỉnh Đắk Lắk sử dụng chuỗi Landsat-8 kết hợp ô tiêu chuẩn và mẫu thực địa để xây dựng mô hình ước tính AGB ở quy mô tỉnh; tác giả so sánh hiệu năng giữa các phương pháp thống kê truyền thống và mô hình học máy, báo cáo các chỉ số đánh giá như RMSE và R^2 theo từng lớp rừng, và kết luận rằng tổ hợp Landsat + dữ liệu thực địa đạt độ chính xác thực tiễn đủ cho mục tiêu quản lý tỉnh và theo dõi biến động lâu dài [39]. Trong khi đó, nghiên cứu của Nguyễn Hữu Tâm [19] dùng Sentinel-2 để dự đoán trữ lượng các-bon cho rừng lá rộng ở duyên hải miền Trung: từ tiền xử lý ảnh, trích xuất chỉ số quang (NDVI, EVI, các chỉ số phổ khác), đến xây dựng và đánh giá chéo các mô hình hồi quy và học máy; kết quả nhấn mạnh rằng Sentinel-2 với độ phân giải không gian cao cho phép lập bản đồ trữ lượng các-bon có độ chi tiết và độ tin cậy cao, đặc biệt hữu ích cho phân lớp loài và quản lý địa phương.

Tuy nhiên, qua tổng quan có thể thấy rằng phần lớn các nghiên cứu trong nước mới tập trung vào một trong hai hướng riêng rẽ: hoặc xây dựng bản đồ trạng thái/biến động rừng, hoặc ước tính sinh khối tại một thời điểm. Các nghiên cứu tích hợp đồng thời phân tích biến động trạng thái, biến động sinh khối và mức phát thải tham chiếu trên cùng một khu vực, đặc biệt tại cao nguyên Kon Hà Nừng, còn rất hạn chế; đây chính là khoảng trống khoa học và thực tiễn mà luận án hướng tới giải quyết thông qua việc kết hợp dữ liệu ảnh SPOT-4, Sentinel-2, số liệu ô tiêu chuẩn và công nghệ

GIS để đánh giá đồng thời biến động trạng thái rừng, sinh khối và tiềm năng phát thải – hấp thụ các-bon tại khu vực nghiên cứu.

1.1.3. Mức hấp thụ và phát thải tham chiếu các-bon

Sự nỗ lực quốc tế trong việc chống lại biến đổi khí hậu bắt đầu từ những năm 80 và 90 của thế kỷ trước. Trong giai đoạn này, bằng chứng khoa học về biến đổi khí hậu toàn cầu liên tục được công bố, thu hút sự quan tâm rộng rãi của công chúng. Kết quả này dẫn tới hàng loạt hội nghị quốc tế được tổ chức và 155 quốc gia thông qua Công ước khung của Liên Hợp Quốc về biến đổi khí hậu vào tháng 6 năm 1992, với mục tiêu ổn định nồng độ khí nhà kính ở mức ngăn ngừa các tác động nguy hiểm do hoạt động của con người. Công ước nói trên được cụ thể hóa bằng Nghị định thư Kyoto vào tháng 12 năm 1997, có hiệu lực từ ngày 16/02/2005, đưa ra quy định về việc giảm phát thải đối với các quốc gia phát triển và hình thức xử phạt nếu không tuân thủ. Nghị định thư yêu cầu các nước thành viên giảm 5% lượng phát thải khí nhà kính so với mức năm 1990 - một thách thức lớn đối với các quốc gia công nghiệp hóa. Để hỗ trợ các quốc gia công nghiệp hóa, ba cơ chế linh hoạt được đề xuất: cơ chế đồng thực hiện (Joint Implementation - JI), cơ chế buôn bán quyền phát thải quốc tế (International Emission Trading - IET) và cơ chế phát triển sạch (Clean Development Mechanism - CDM). Trong đó, JI và IET liên quan đến các giao dịch giữa các nước công nghiệp, còn CDM là cơ hội cho các nước đang phát triển như Việt Nam nhận đầu tư cho các dự án trồng rừng, phục hồi rừng, hạn chế chuyển đổi đất lâm nghiệp sang nông nghiệp và thúc đẩy nông lâm kết hợp, hướng tới phát triển bền vững. Trong các dịch vụ môi trường mà cộng đồng vùng cao có thể được đền bù như hấp thụ các-bon, bảo vệ đầu nguồn và bảo tồn đa dạng sinh học, cơ chế đền bù cho thị trường các-bon là cao nhất [33]. Việc xác lập mức tham chiếu các-bon chuẩn chuyển cam kết quốc tế và nội địa thành hành động giảm phát thải, giúp đo lường, theo dõi và định giá tín chỉ các-bon, đồng thời tạo nền tảng cho việc hoạch định chính sách và chiến lược giảm phát thải. Dữ liệu mức tham chiếu hỗ trợ xây dựng thị trường tín chỉ hiệu quả, thúc đẩy bảo tồn tài nguyên tự nhiên và phát triển kinh tế xanh. Nhờ

đó, dự án giảm phát thải được đánh giá đúng, góp phần bảo đảm hiệu quả về môi trường và phát triển bền vững.

Trao đổi các-bon cho phép các công ty ở các nước công nghiệp hỗ trợ tài chính cho các dự án lưu giữ khí nhà kính trong sinh khối rừng, cân bằng lượng các-bon họ phát thải. Từ đó hình thành khái niệm "Rừng các-bon", tức là các khu rừng được xác định để điều hòa và lưu giữ khí các-bon từ hoạt động công nghiệp. Những dự án giảm phát thải thường gắn với việc cải thiện đời sống cho người dân sống trong và gần rừng, những người bảo vệ rừng và những người chịu ảnh hưởng bởi biến đổi khí hậu. Do đó, cần có sự đền bù thích hợp để nâng cao sinh kế cho họ và bảo vệ môi trường khí hậu bền vững. Nói cách khác, các hoạt động tích lũy các-bon dựa vào cộng đồng chỉ thành công khi có cơ chế duy trì và bảo vệ lượng các-bon lưu trữ, gắn với sinh kế địa phương. Việc xác định REL là cốt lõi trong việc đánh giá và triển khai các dự án REDD+ (giảm phát thải từ mất rừng và suy thoái rừng). Tại các hội thảo xây dựng năng lực kỹ thuật REDD+, trong chương trình bảo tồn đa dạng sinh học khu vực châu Á do Cơ quan Phát triển Quốc tế Hoa Kỳ tài trợ và WinRock thực hiện, đã tập trung thảo luận về Baseline, REL và MRV. REL là cơ sở để theo dõi hiệu quả của các can thiệp giảm mất rừng, làm nền tảng cho việc tính toán tổng lượng CO₂ giảm phát thải và hấp thụ, từ đó xác định tín chỉ CO₂ để mua bán. MRV (Giám sát, báo cáo, kiểm chứng) là hệ thống cần thiết để đánh giá tác động của các chương trình REDD+, phản ánh chính xác mức giảm phát thải và mức tăng hấp thụ khí nhà kính từ rừng so với REL.

Điểm chung giữa các phương pháp đánh giá mức hấp thụ và phát thải tham chiếu các-bon là chúng đều nhằm đảm bảo tính minh bạch, chính xác và nhất quán trong việc đo lường, báo cáo và kiểm chứng lượng các-bon. Tuy nhiên, mỗi phương pháp có điểm khác biệt về cách tiếp cận, độ phức tạp và yêu cầu dữ liệu đầu vào. Ưu điểm của các phương pháp hiện đại như sử dụng công nghệ viễn thám, GIS và mô hình hóa sinh khối là cho phép đánh giá nhanh chóng, trên diện rộng và đồng bộ. Chúng giúp tiết kiệm thời gian, chi phí và nhân lực so với phương pháp truyền thống dựa trên điều tra thực địa. Tuy nhiên, nhược điểm là đòi hỏi dữ liệu đầu vào phức tạp,

công nghệ cao và đội ngũ chuyên gia có trình độ cao. Đây có thể là một thách thức đối với các nước đang phát triển như Việt Nam. Hơn nữa, hiệu quả áp dụng các công nghệ hiện đại trong các hệ sinh thái rừng phức tạp như ở các nước nhiệt đới chưa cao. Sự đa dạng sinh học cao, cấu trúc rừng phức tạp và biến động môi trường khiến việc thu thập và phân tích dữ liệu trở nên khó khăn hơn. Do đó, cần kết hợp các phương pháp hiện đại và truyền thống để đảm bảo tính chính xác và tính khả thi.

Minh chứng cụ thể, năm 2019, một nhóm nghiên cứu đã khám phá sự thay đổi LULC trong các hệ sinh thái nhiệt đới. Nghiên cứu nhấn mạnh rằng việc có dữ liệu chi tiết hơn về dấu chân các-bon là cần thiết để xác định các chiến lược nhằm tăng cường bể chứa các-bon. Nghiên cứu đã đánh giá LULCC và lượng khí thải các-bon liên quan trong các hệ sinh thái tự nhiên khác nhau và thiết lập các mức tham chiếu rừng. Kết quả nêu bật sự cần thiết phải bảo tồn và quản lý đầy đủ, đồng thời xem xét các chi tiết cụ thể về LULC, qua đó cung cấp cơ sở hữu ích cho các hoạt động REDD+ ở các quốc gia có hệ sinh thái tương tự [42]. Việt Nam, thuộc nhóm các nước đang phát triển và không thuộc diện phải cắt giảm lượng phát thải khí nhà kính, đã nhanh chóng tham gia các diễn đàn quốc tế về biến đổi khí hậu, ký Công ước khung của Liên Hợp Quốc về biến đổi khí hậu và Nghị định thư Kyoto. Việt Nam nhận thức rõ tầm quan trọng của việc bảo vệ môi trường và tham gia vào các nỗ lực toàn cầu. Mặc dù thị trường mua bán giảm phát thải khí nhà kính còn mới mẻ và các doanh nghiệp trong nước còn thiếu thông tin, tiềm năng của Việt Nam vẫn rất lớn. Việc xác định mức phát thải và hấp thụ các-bon cho các hệ sinh thái rừng tại Việt Nam là cần thiết và khả thi. Với diện tích rừng lớn và đa dạng sinh học phong phú, Việt Nam có thể phát triển các dự án rừng các-bon, thu hút đầu tư từ các nước phát triển thông qua cơ chế CDM. Thách thức đặt ra là việc triển khai các phương pháp đánh giá cần sự hỗ trợ về kỹ thuật, tài chính và nguồn nhân lực. Nhà nước cần phổ biến rộng rãi hơn, cung cấp nhiều thông tin hơn cho các doanh nghiệp và cộng đồng về thị trường các-bon. Một số quốc gia đã tiến hành các dự án thành công trong việc bảo vệ rừng và mua bán tín chỉ các-bon. Ví dụ, tổ chức phi chính phủ Flora and Fauna International

đã hợp tác với các ngân hàng và quỹ đầu tư để triển khai các dự án bảo vệ rừng tại Indonesia [33]. Những mô hình ước tính có thể tham khảo và áp dụng tại Việt Nam. Việc đánh giá mức hấp thụ và phát thải tham chiếu các-bon là bước quan trọng để Việt Nam tham gia tích cực vào các cơ chế quốc tế về biến đổi khí hậu. Mặc dù đối mặt với những hạn chế về kỹ thuật và nguồn lực, song với sự nỗ lực của chính phủ, cộng đồng và sự hỗ trợ quốc tế, Việt Nam hoàn toàn có thể xác định và thực hiện các chiến lược phù hợp. Đánh giá mức hấp thụ và phát thải các-bon không chỉ giúp bảo vệ môi trường, ứng phó với biến đổi khí hậu mà còn mang lại lợi ích kinh tế, cải thiện sinh kế cho người dân vùng rừng, hướng tới phát triển bền vững.

1.1.4. Các nguồn dữ liệu ảnh viễn thám trong ước tính sinh khối khu vực nghiên cứu

a) Ảnh viễn thám quang học

Mục tiêu chính là theo dõi biến động trạng thái và biến động sinh khối trên mặt đất tại cao nguyên Kon Hà Nừng, Gia Lai trong các năm 2000, 2010 và 2022. Dữ liệu cần đủ khả năng:

- Phân biệt rõ các lớp phủ rừng, đất trống và cây gỗ thay đổi chất lượng;
- Ước tính sinh khối thông qua các chỉ số quang phổ (NDVI, EVI, các chỉ số phổ cận đỏ - red-edge indices...);
- Có tính liên tục về thời gian để so sánh sự thay đổi trên chuỗi ba mốc.

Ảnh quang học cung cấp giá trị phản xạ từ các lớp lá và bề mặt thảm thực vật. Điều này cho phép tính toán các chỉ số thực vật như NDVI, EVI... để ước tính sinh khối. Tuy nhiên, các chỉ số này chủ yếu phản ánh tình trạng xanh của lá, không thể hiện đầy đủ thông tin về chiều cao cây, mật độ cây và cấu trúc 3D của rừng.

Trường hợp chỉ sử dụng ảnh quang học cần có bộ dữ liệu hiện trường mạnh nhằm khắc phục cho các nhược điểm ở những khu vực rừng rậm với độ che phủ lá dày, các chỉ số quang học thường bị bão hòa (saturation), tức là giá trị không tăng đồng bộ với việc gia tăng sinh khối. Điều này dẫn đến hạn chế trong khả năng phân biệt các mức tăng sinh khối ở rừng có tán lá quá dày.

Bảng 1.2. Bảng thống kê một số nguồn ảnh quang học khu vực nghiên cứu (năm 2000, 2010 và 2022)

Nguồn ảnh	Năm	Độ phân giải	Dải phổ	Chu kỳ lặp	Chi phí
Landsat 5 TM	2000	30 m	VNIR; NIR; SWIR	16 ngày	Miễn phí
Landsat 7 ETM+	2010	30 m	VNIR; NIR; SWIR	16 ngày	Miễn phí
Landsat 8 OLI	2022	30 m	VNIR; NIR; SWIR	16 ngày	Miễn phí
Sentinel-2 MSI	2022	10 m	VNIR; red-edge; SWIR	5 ngày	Miễn phí
ASTER (Terra)	2000; 2010	15 m VNIR; 30 m SWIR; 90 m TIR	VNIR; SWIR; TIR	16 ngày	Miễn phí
SPOT-4/5	2000; 2010	2,5 - 10 m	VNIR; NIR	2–4 ngày	Miễn phí
Planet Scope	2022	5 m	RGB, NIR	1 ngày	Miễn phí

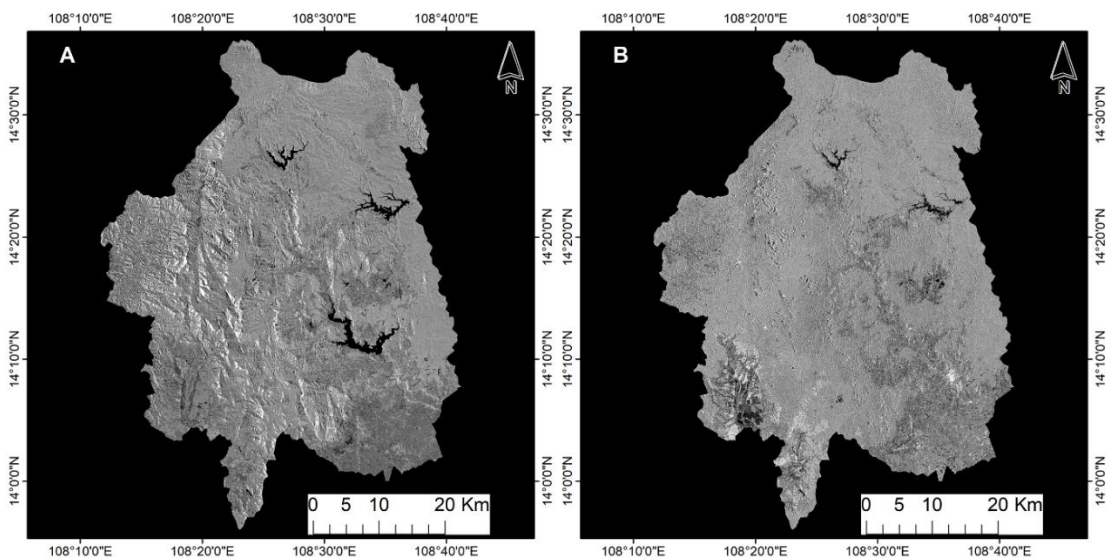
Nguồn: Tổng hợp của tác giả từ tài liệu kỹ thuật và trang chủ của các cơ quan vận hành vệ tinh, bao gồm: USGS/NASA (Landsat), ESA Copernicus (Sentinel-1, Sentinel-2), CNES/Airbus (SPOT-4), Planet Labs (PlanetScope) và NASA/USGS (ASTER/Terra). Thông tin được đối chiếu với các công bố khoa học có liên quan.

b) Ảnh viễn thám radar

Để phục vụ mục tiêu ước tính sinh khối rừng trên cao nguyên Kon Hà Nừng cho năm 2000, nghiên cứu dựa trên 2 cảm biến SAR băng C: ERS-2 và RADARSAT-1. ERS-2, hoạt động từ 1995 đến 2011, cung cấp dữ liệu băng C với tần số khoảng 5,3 GHz, nổi bật bởi khả năng phủ sóng toàn cầu và kho dữ liệu lịch sử phong phú, có thể truy cập thông qua nền tảng ESA Earth Online. Bên cạnh đó, RADARSAT-1 (1995–2013) cũng hoạt động trên băng C 5,3 GHz nhưng bổ sung các chế độ thu như ScanSAR, Fine và Standard, cho phép lựa chọn linh hoạt cỡ mẫu và cường độ phản hồi của tín hiệu. Dữ liệu có thể được tra cứu tại MDA Radarsat Archive. Sự kết hợp giữa hai nguồn này tạo nền tảng ban đầu vững chắc để đánh giá biến động sinh khối với độ bao phủ rộng và khả năng phân tích chuyên sâu hơn.

Đến năm 2010, quy mô dữ liệu SAR được mở rộng và đa dạng hơn khi bổ sung ENVISAT ASAR, RADARSAT-2, ALOS PALSAR và TerraSAR-X. ENVISAT ASAR (2002–2012) vẫn sử dụng băng C 5,3 GHz nhưng hỗ trợ đồng thời 3 chế độ

thu gồm Wave, Image và Alternating Polarization, giúp điều chỉnh linh hoạt theo mục đích phân tích. RADARSAT-2, khởi động từ 2007 và tiếp tục hoạt động đến nay, đã gia tăng độ phân giải và hỗ trợ đa cực hóa dual- và quad-polarization, qua đó tăng cường khả năng tách tín hiệu nền của các loại cây đa dạng. ALOS PALSAR (2006–2011) chuyển sang băng L 1,2 GHz, giúp xuyên sâu qua tán cây tốt hơn và giảm hiện tượng bão hòa khi sinh khối cao. Cuối cùng, TerraSAR-X (2007–nay) vận hành trên băng X 9,6 GHz với độ phân giải vài chục centimet, cho phép phân tích chi tiết cấu trúc vi mô của tán rừng.



Hình 1.1. Ảnh viễn thám radar khu vực nghiên cứu: (A) Sentinel-1 C-band VV/VH; (B) ALOS PALSAR (L-band) Yearly Mosaic 2010; Nguồn: JAXA/ALOS/PALSAR/YEARLY/FNF (ALOS PALSAR 2010) & COPERNICUS/SI_GRD (Sentinel-1 VV/VH 2022), Google Earth Engine, truy cập 12/09/2023.

Năm 2022 đánh dấu giai đoạn phong phú và toàn diện nhất trong việc thu thập dữ liệu SAR về sinh khối rừng. Sentinel-1A/B (2014–nay) cung cấp ảnh băng C 5,4 GHz miễn phí toàn cầu với chu kỳ lặp (revisit cycle) 6–12 ngày qua Copernicus Open Access Hub, phù hợp cho giám sát liên tục. ALOS-2 PALSAR-2 (2014–nay) vẫn duy trì băng L 1,2 GHz nhưng cải tiến khả năng xuyên tán và hỗ trợ dual-pol, truy cập qua ASF DAAC. RADARSAT-2 tiếp tục phát huy ưu thế đa cực hóa, trong khi cặp TerraSAR-X/TanDEM-X cung cấp DEM có độ chính xác cao, giúp đánh giá biến động độ cao của rừng. COSMO-SkyMed (2007–nay) và các vệ tinh thương mại như ICEYE, Capella (khoảng từ 2018) bổ sung dữ liệu X-band có độ phân giải dưới mét,

với chu kỳ tái quan sát từ 2–4 ngày và khả năng đặt lịch linh hoạt, cho phép theo dõi nhanh diễn biến sinh khối ở quy mô nhỏ nhất.

Trong nghiên cứu ước tính sinh khối rừng bằng dữ liệu radar, tín hiệu phân cực chéo (HV/VH) ở dải C-band được đánh giá là đặc biệt hiệu quả nhờ khả năng phản ánh tán xạ thể tích bên trong tán cây, từ đó duy trì mối tương quan chặt chẽ với sinh khối ở giai đoạn thấp đến trung bình. Ngược lại, tín hiệu cùng cực (HH/VV) chủ yếu biểu thị tán xạ từ bề mặt và các cấu trúc lớn như thân cây, cành nhánh, và do đó thường được kết hợp với phân cực chéo để xây dựng các mô hình hồi quy đa biến, đồng thời khai thác cả tán xạ thể tích và tán xạ bề mặt. Trong khi đó, dữ liệu X-band ở phân cực HH cung cấp độ phân giải không gian rất cao nhưng chỉ xuyên thấu lớp vỏ ngoài của lá và cành, dễ gặp hiện tượng bão hòa tín hiệu khi sinh khối ở mức cao, nên thường được sử dụng chủ yếu để kiểm định cấu trúc hoặc giám sát các thay đổi nhỏ trong tán rừng. Việc kết hợp dữ liệu C-band và X-band, với sự đa dạng về độ phân giải và kênh phân cực, đã được chứng minh là mở rộng đáng kể dải sinh khối có thể ước tính, đồng thời giảm thiểu điểm bão hòa ở mức cao và nâng cao độ chính xác tổng thể của mô hình ước tính sinh khối.

Bảng 1.3. Bảng thống kê một số nguồn ảnh radar khu vực nghiên cứu (năm 2000, 2010 và 2022)

Nguồn ảnh	Năm	Độ phân giải	Băng tần	Chu kỳ lặp	Chi phí
ERS-2 ASAR	2000	30 m; 100 m	C-band (~5,3 GHz)	35 ngày	Miễn phí
RADARSAT-1	2000	8 m; 25 m; 100 m	C-band (~5,3 GHz)	24 ngày	Mất phí
ENVISAT ASAR	2010	30 m; 150 m; 1000 m	C-band (~5,3 GHz)	35 ngày	Miễn phí
RADARSAT-2	2010	3 m; 5 m; 25 m; 100 m	C-band (~5,4 GHz)	24 ngày	Mất phí
ALOS PALSAR	2010	10 m; 30 m; 100 m	L-band (~1,2 GHz)	46 ngày	Miễn phí
TerraSAR-X	2010	1 m; 3 m; 18 m; 40 m	X-band (~9,6 GHz)	11 ngày	Mất phí
Sentinel-1A/B	2022	5 m; 20 m; 40 m	C-band (~5,4 GHz)	6 ngày	Miễn phí
ALOS-2 PALSAR-2	2022	10 m; 30 m; 100 m	L-band (~1,2 GHz)	14 ngày	Miễn phí

Nguồn ảnh	Năm	Độ phân giải	Băng tần	Chu kỳ lặp	Chi phí
RADARSAT-2	2022	3 m; 5 m; 25 m; 100 m	C-band (~5,4 GHz)	24 ngày	Mất phí
TerraSAR-X / TanDEM-X	2022	1 m; 3 m; 18 m; 40 m	X-band (~9,6 GHz)	11 ngày	Mất phí
COSMO-SkyMed	2022	1 m; 3 m	X-band (~9,6 GHz)	2 ngày	Mất phí
ICEYE; Capella	2022	0.5 m; 1 m	X-band (~9,6 GHz)	< 1 ngày	Mất phí

Nguồn: Tổng hợp của tác giả từ tài liệu kỹ thuật và trang chủ của các cơ quan vận hành vệ tinh, bao gồm: USGS/NASA (Landsat), ESA Copernicus (Sentinel-1, Sentinel-2), CNES/Airbus (SPOT-4), JAXA (ALOS PALSAR), Planet Labs (PlanetScope) và NASA/USGS (ASTER/Terra). Thông tin được đối chiếu với các công bố khoa học có liên quan.

Việc sử dụng ảnh radar để ước tính sinh khối rừng gặp nhiều thách thức. Thứ nhất, nguồn ảnh miễn phí chủ yếu chỉ bao gồm các cảm biến C-band và L-band với độ phân giải trung bình, trong khi dữ liệu X-band có độ phân giải cao hơn thường phải trả phí bản quyền, làm hạn chế khả năng tiếp cận và mở rộng quy mô nghiên cứu. Thứ hai, sự không đồng nhất về độ phân giải giữa các nhiệm vụ theo các mốc thời gian (từ 30 m của ERS-2 năm 2000 đến sub-meter của ICEYE/Capella năm 2022) buộc phải thực hiện tái mẫu và làm mịn ảnh, dẫn đến sai số trong việc so sánh chuỗi thời gian. Thứ ba, các băng tần và chế độ phân cực khác nhau (single-, dual-, quad-pol) đòi hỏi quy chuẩn phức tạp để hiệu chỉnh hệ số phản xạ và khả năng xuyên tán, nhằm đảm bảo tính nhất quán của tín hiệu chuyển thành mật độ sinh khối. Thứ tư, chu kỳ lặp không đồng đều (từ 35 ngày của ERS-2 đến dưới 1 ngày của ICEYE/Capella) khiến việc theo dõi biến động sinh khối theo mùa hoặc các sự kiện bất thường trở nên khó khăn, buộc phải kết hợp nhiều nguồn dữ liệu với sai số về thời gian. Cuối cùng, bước tiền xử lý ảnh radar bao gồm hiệu chuẩn, lọc nhiễu hạt và định chuẩn không gian, phức tạp hơn nhiều so với ảnh quang học, đặc biệt khi dữ liệu đến từ các cảm biến khác nhau qua nhiều thập kỷ, qua đó tăng thêm rủi ro mất mát thông tin và sai lệch trong kết quả ước tính. Mặc dù vậy, ảnh radar vẫn có ưu điểm vượt trội: khả năng thu thập dữ liệu bất chấp điều kiện mây mù, mưa hay ban đêm, cùng khả năng xuyên qua tán cây, giúp cung cấp thông tin bổ sung về cấu trúc rừng và độ ẩm bề mặt cho mô hình sinh khối.

c) Trường hợp sử dụng kết hợp ảnh quang học và radar

Trong nghiên cứu biến động sinh khối mặt đất tại cao nguyên Kon Hà Nừng, mặc dù tích hợp ảnh radar và quang học đã được chứng minh là phương pháp đa nguồn tiềm năng trong nhiều nghiên cứu toàn cầu [120]. Nhưng thực tiễn áp dụng cho vùng địa hình phức tạp này lại cho thấy nhiều bất cập khiến giải pháp thuần ảnh quang không kinh tế và hiệu quả. Thứ nhất, hiệu chỉnh địa hình cho dữ liệu SAR đòi hỏi quy trình Range–Doppler phức tạp, sử dụng DEM chất lượng cao và bước lọc nhiễu speckle chuyên sâu (Lee filter, Gamma-MAP), đồng thời phải khống chế hiện tượng chồng lớp tín hiệu (layover) và vùng bóng tín hiệu (shadow) ở sườn đồi, dễ tạo ra sai số không gian còn sót lại và tiêu tốn thời gian xử lý lớn [95]. Thứ hai, khai thác ảnh radar miễn phí cho giai đoạn năm 2000 (ERS-2, RADARSAT-1) gặp khó khăn về truy xuất dữ liệu độ phân giải gốc, toàn phân cực do hạn chế lưu trữ và chi phí sao chép từ ESA, CSA từ đầu những năm 2000, trong khi radar thương mại (ICEYE, Capella, TerraSAR-X) lại phát sinh chi phí bản quyền và lưu trữ hàng chục nghìn đô la cho diện tích 400.000 ha. Thứ ba, việc gộp kênh phân cực (HH, HV, VV, VH) với các chỉ số NDVI/EVI không chỉ làm gia tăng hiện tượng đa cộng tuyến mà còn làm phức tạp mô hình hồi quy tuyến tính đơn giản $Biomass = a + b \cdot NDVI/EVI$, khiến sai số chuẩn của mô hình tăng và hệ số xác định R^2 giảm so với việc chỉ sử dụng ảnh quang [143]. Hơn nữa, tín hiệu C-band và L-band thường bão hòa ở sinh khối > 100 Mg/ha, làm giảm độ nhạy tại vùng rừng mật độ trung bình–cao, trong khi mối tương quan tuyến tính giữa NDVI/EVI và sinh khối vẫn duy trì ổn định ($R^2 > 0,8$) ở ngưỡng > 100 Mg/ha [34, 35]. Như vậy, việc sử dụng thuần ảnh quang học (SPOT-2, SPOT-4, Sentinel-2) không chỉ giảm thiểu chi phí và bước xử lý phức tạp, mà còn đảm bảo tính đồng nhất, độ ổn định mô hình và độ tin cậy cao hơn trong ước tính biến động sinh khối trên cao nguyên Kon Hà Nừng nơi có trạng thái rừng có trữ lượng ở mức độ giàu và trung bình là chủ yếu.

1.1.5. Các công trình nghiên cứu về vùng Tây Nguyên và cao nguyên Kon Hà Nừng liên quan đến luận án

1.1.5.1. Nghiên cứu về biến động trạng thái rừng khu vực Tây Nguyên

Các công trình nghiên cứu về biến động LULC khu vực Tây Nguyên đều khai thác dữ liệu viễn thám từ các nguồn đa dạng như ảnh MODIS, Sentinel-2, Landsat 8 và sản phẩm trích xuất các chỉ số quan trọng (ví dụ: phần trăm độ che phủ, thoát hơi nước, nhiệt độ bề mặt và tổng năng suất sơ cấp) để nắm bắt diễn biến và xu hướng thay đổi của thảm thực vật rừng cùng với các yếu tố khí hậu kèm theo. Các nghiên cứu đã tận dụng chuỗi dữ liệu dài hạn từ năm 2001 đến 2019 [131], nhằm định lượng sự thay đổi độ che phủ rừng qua các biến số quan trọng; đồng thời, dữ liệu ảnh vệ tinh được sử dụng để xây dựng bản đồ LULC (ví dụ 2010, 2015, 2020 của Nguyễn Hữu Cường) [69]. Những kết quả nghiên cứu không chỉ giúp theo dõi biến động theo thời gian mà còn cung cấp cái nhìn đa chiều về môi trường địa phương, góp phần quan trọng trong việc đánh giá quá trình biến đổi của hệ sinh thái rừng Tây Nguyên.

Về phương pháp và thuật toán thực hiện, các nghiên cứu đã áp dụng nhiều kỹ thuật khác nhau, từ các mô hình hồi quy truyền thống đến các thuật toán học máy hiện đại. Cụ thể, Trần Duy áp dụng hồi quy không gian theo thời gian, kết hợp xu hướng trung vị Theil-Sen và thử nghiệm Mann-Kendall để phân tích xu hướng và tốc độ thay đổi độ che phủ rừng, đồng thời kết hợp phân tích điểm nóng xuất hiện nhằm xác định các điểm nóng phá rừng [131]. Trong khi đó, Nguyễn Hữu Cường đã sử dụng mô hình hồi quy logistic dựa trên 6 hệ số động lực (bao gồm khoảng cách từ các yếu tố cơ sở hạ tầng đến các khu vực cần phân loại) để dự báo sự thay đổi LULC tại tỉnh Lâm Đồng [69]. Một số nghiên cứu khác của Nguyễn Thị Thanh Hương [110] đã thử nghiệm việc kết hợp các bộ phân loại học máy phi tham số như k-NN, SVM và đặc biệt là thuật toán RF, nhằm xử lý dữ liệu đa thời gian và đa phổ của hệ thống rừng nhiệt đới. Bên cạnh đó, một số công trình tích hợp viễn thám với GIS [16] hoặc kết hợp CART với RF trên nền tảng Google Earth Engine [22] cũng đã được triển khai nhằm ước tính diện tích và phân loại mức độ biến động LULC. Kết quả đánh giá độ chính xác cho thấy các mô hình hồi quy logistic đạt độ chính xác tổng thể từ 90% đến hơn 96%, với hệ số Kappa dao động từ 0,87 đến 0,95 [69]. Mặc dù đối với một số phương pháp phân loại như ở Đắc Nông, kết quả dao động từ 63,9% đến 80,3% với Kappa từ 0,611 đến 0,813, nhưng điểm mạnh của thuật toán RF thể hiện rõ qua

khả năng xử lý dữ liệu đa chiều và giảm thiểu hiện tượng quá khớp, từ đó cải thiện độ tin cậy của kết quả phân loại [22, 110].

Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm, các nghiên cứu cũng chỉ ra một số hạn chế nhất định của các phương pháp phân loại đã được đề cập. Các phương pháp dựa trên chỉ số viễn thám hoặc mô hình hồi quy truyền thống tuy đơn giản và dễ triển khai nhưng lại dễ bị ảnh hưởng bởi điều kiện khí hậu và môi trường, đồng thời gặp khó khăn trong việc xử lý dữ liệu phức tạp. Thêm vào đó, việc lựa chọn và làm sạch dữ liệu đầu vào đòi hỏi thời gian và nguồn lực đáng kể, khi số lượng mẫu cần khai thác lớn và chất lượng rất quan trọng. Để khắc phục những hạn chế, cần tăng cường ứng dụng các nền tảng xử lý dữ liệu lớn như Google Earth Engine, tối ưu hóa các tham số của thuật toán RF (số lượng cây, độ sâu cây, số lượng biến ngẫu nhiên) và triển khai quy trình tiền xử lý dữ liệu hiệu quả. Việc tích hợp công nghệ hiện đại cùng với đầu tư vào dữ liệu chất lượng cao sẽ góp phần nâng cao tính tổng quát và độ tin cậy của các nghiên cứu về biến động rừng ở Tây Nguyên.

1.1.5.2. Các công trình nghiên cứu về hệ sinh thái rừng Tây Nguyên

Các hệ sinh thái ở Tây Nguyên đóng vai trò sống còn trong việc bảo vệ môi trường và duy trì đa dạng sinh học của khu vực. Theo Tổ chức Bảo tồn Thiên nhiên Quốc tế (WWF), vùng Tây Nguyên sở hữu nhiều hệ sinh thái khác nhau như rừng nhiệt đới cây gỗ trên đồng cỏ, rừng rậm cây gỗ mưa và rừng biến mây – mỗi hệ thống có những đặc điểm sinh thái riêng biệt, góp phần duy trì chu trình nước và cung cấp môi trường sống cho nhiều loài động – thực vật quý hiếm [1]. Bên cạnh đó, theo nhận định của Thái Văn Trùng, ngoài các hệ sinh thái rừng nói trên, trong khu vực còn có thêm các hệ sinh thái như rừng khô cây cỏ có khả năng chịu hạn tốt, rừng cây lá kim, cùng với rừng ẩm nhiệt đới trải dài từ Lâm Đồng tới Gia Lai. Những hệ sinh thái tại khu vực nghiên cứu không chỉ phản ánh sự đa dạng về cấu trúc và chức năng sinh thái mà còn thể hiện bản chất độc đáo của rừng Tây Nguyên, đòi hỏi các biện pháp bảo tồn và nghiên cứu chuyên sâu [1].

Trong những năm gần đây, phương pháp viễn thám đã được ứng dụng rộng rãi để nghiên cứu và giám sát các hệ sinh thái rừng. Một ví dụ điển hình là nghiên cứu

của Phạm Thế Anh và cộng sự (2022) tại 3 vùng địa lý Quảng Bình, Thừa Thiên Huế và Gia Lai nhằm khảo sát mối quan hệ giữa đa dạng loài và sinh khối rừng lá rộng thường xanh. Dữ liệu thu thập từ các ô nghiên cứu kích thước 2 ha với cây thân gỗ có đường kính từ 2,5 cm cho thấy sự khác biệt rõ rệt về đa dạng loài giữa các khu vực, phản ánh ảnh hưởng của các điều kiện môi trường như khí hậu, địa hình và đất đai. Tuy mối tương quan giữa đa dạng loài và sinh khối chỉ ở mức yếu đến vừa, kết quả nghiên cứu đã nhấn mạnh tính phức tạp của quần xã thực vật và cho thấy tầm quan trọng của việc tích hợp các yếu tố môi trường vào phân tích [1]. Song song đó, ứng dụng UAV trong nghiên cứu cấu trúc hệ sinh thái do Hà Quý Quỳnh thực hiện đã thu thập được 2.898 cảnh ảnh năm 2020 từ 25 khu vực, phủ diện tích hơn 1.000 ha [17]. Ưu điểm nổi bật của công nghệ viễn thám qua UAV là cung cấp hình ảnh chi tiết, khả năng hoạt động trong điều kiện thời tiết không thuận lợi cho ảnh vệ tinh, giúp khai thác nhiều thông tin quý báu về cấu trúc hệ sinh thái núi. Tuy nhiên, một số khó khăn như việc xử lý khối lượng dữ liệu lớn, phụ thuộc vào độ phân giải ảnh cũng như điều kiện thời tiết, cần được lưu ý khi áp dụng phương pháp viễn thám tại khu vực Tây Nguyên.

Ngoài ra, nghiên cứu đánh giá tính tổn thương của hệ sinh thái rừng thông qua phương pháp phân tích theo ô lưới của Đoàn Ngọc Nguyên Phong [14], và đánh giá ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến sinh trưởng của thông 5 lá do Lê Cảnh Nam [11] thực hiện càng phản ánh tính phức tạp cũng như sự nhạy cảm của các hệ sinh thái. Kết quả nghiên cứu gợi ý các hướng khắc phục hạn chế trong các nghiên cứu sau này bằng cách kết hợp chặt chẽ dữ liệu viễn thám với quan sát thực địa, áp dụng công nghệ phân tích dữ liệu tiên tiến và mở rộng phạm vi khảo sát để hiểu sâu hơn mối quan hệ giữa các yếu tố hữu sinh và vô sinh. Qua đó, việc quản lý, bảo tồn và phát triển bền vững hệ sinh thái rừng Tây Nguyên sẽ trở nên khả thi và hiệu quả hơn trong tương lai.

1.1.5.3. Các nghiên cứu về ước tính sinh khối gắn với hoạt động REDD+ khu vực Tây Nguyên

1) Phương pháp điều tra mặt đất truyền thống: Độ chính xác cao nhưng hạn chế về quy mô không gian

Nghiên cứu của Vũ Đức Quỳnh [18] trên rừng khộp Tây Nguyên sử dụng ô tiêu chuẩn và chặt hạ mẫu đã xác định sinh khối của sáu loài ưu thế, trong đó dầu trà beng đạt cao nhất (472,34 kg/cây). Kết quả cũng chỉ ra sinh khối tập trung chủ yếu ở thân (50 %), cành (17,14%), rễ (15,84%) và lá (3,25%). Ở cấp lâm phần, tầng cây gỗ đóng góp 88,72% (116,26 tấn/ha) tổng sinh khối [18]. Dù phương pháp này cung cấp dữ liệu chi tiết, nhưng cũng đối mặt với nhiều thách thức: (i) Chi phí nhân lực, trang thiết bị và hậu cần cao; (ii) Khó tiếp cận các khu vực địa hình hiểm trở; (iii) Giới hạn phạm vi không gian và tần suất thu thập dữ liệu. Tuy nhiên, dữ liệu mặt đất vẫn đóng vai trò thiết yếu trong việc hiệu chỉnh mô hình viễn thám, đảm bảo tính chính xác của ước tính sinh khối, nhất là trong bối cảnh REDD+ đòi hỏi dữ liệu đáng tin cậy cho kiểm kê khí nhà kính và thị trường các-bon.

2) Ứng dụng viễn thám trong ước tính sinh khối: Mở rộng quy mô nhưng độ chính xác biến động. Để khắc phục hạn chế của phương pháp truyền thống, viễn thám được áp dụng rộng rãi. Nguyễn Thị Thanh Hương đã kết hợp ảnh SPOT 5 và thuật toán kNN, giá trị RMSE đạt $\pm 27,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ (15,6%), cao hơn so với NDVI (RMSE $37,7 \text{ m}^3/\text{ha}$) [6]. Đáng chú ý, việc phân tích từng tầng rừng riêng biệt cải thiện độ chính xác, nhưng trong rừng bị xáo trộn mạnh (Loại 1), NDVI lại cho hiệu quả tốt hơn (RMSE $25 \text{ m}^3/\text{ha}$) [6]. Nghiên cứu khác của Huỳnh Thị Kiều Trinh về rừng lồ ô sử dụng kết hợp viễn thám và mặt đất, cho thấy khả năng lưu trữ CO_2 từ 601–1.880 tấn/ha tùy mật độ cây [24]. Ưu điểm của viễn thám bao gồm: (i) Phủ sóng trên diện rộng, phù hợp với địa hình Tây Nguyên; (ii) Giám sát theo thời gian thực; (iii) Giảm chi phí. Tuy nhiên, hạn chế chính là độ chính xác thấp ở rừng có cấu trúc phức tạp, ảnh hưởng của mây/mù và yêu cầu chuyên môn cao trong quá trình xử lý dữ liệu.

Các nghiên cứu ước tính sinh khối tại Tây Nguyên hiện đang đối mặt với những hạn chế chồng chéo giữa hai phương pháp tiếp cận. Phương pháp điều tra mặt đất truyền thống, dù chính xác ở cấp độ ô tiêu chuẩn, gặp khó khăn trong triển khai quy mô lớn do địa hình phức tạp, chi phí cao và hạn chế về tần suất thu thập dữ liệu. Trong

khi đó, viễn thám – dù khắc phục được bài toán quy mô – lại phụ thuộc vào chất lượng ảnh (ảnh hưởng bởi mây, sương mù), độ phân giải không gian và khả năng nắm bắt biến động sinh khối dưới tán rừng có cấu trúc phức tạp. Thêm vào đó, việc thiếu các phương trình sinh khối đặc thù cho hệ sinh thái địa phương dẫn đến việc ước tính chưa phản ánh chính xác thực tế, đặc biệt đối với loài ưu thế. Để giải quyết những tồn tại, cần kết hợp linh hoạt giữa dữ liệu mặt đất và viễn thám thông qua các công nghệ tiên tiến như LiDAR hoặc ảnh vệ tinh độ phân giải cao (SPOT 6/7, Sentinel), giúp tăng độ chi tiết trong phân tích cấu trúc rừng. Bên cạnh đó, việc phát triển mô hình địa phương dựa trên các biến số dễ đo đạc (đường kính tại 1,3 m, chiều cao cây) cho từng loài chủ lực sẽ nâng cao độ tin cậy của các ước tính. Đồng thời, cần chuyển đổi hệ thống giám sát theo hướng dẫn của IPCC từ cấp độ 1 (giá trị mặc định) sang cấp độ 2-3 bằng cách tích hợp số liệu quốc gia, GIS và dữ liệu viễn thám theo thời gian, nhằm đảm bảo đáp ứng yêu cầu báo cáo khí nhà kính toàn cầu. Mặt khác, đầu tư tăng cường chất lượng xử lý ảnh vệ tinh và phân tích đa biến là yếu tố then chốt để tối ưu hóa quy trình kỹ thuật, từ đó thu hẹp khoảng cách giữa nghiên cứu khoa học và ứng dụng thực tiễn trong quản lý rừng bền vững.

Có thể thấy, phần lớn các công trình đã công bố mới tập trung giải quyết từng khâu riêng lẻ hoặc phân loại trạng thái rừng, hoặc ước tính sinh khối, hoặc hạch toán các-bon mà chưa thiết lập được một quy trình liên thông trên cùng nền tảng viễn thám – GIS, gắn kết đồng bộ từ biến động trạng thái rừng → sinh khối → phát thải/hấp thụ CO₂ → mức phát thải tham chiếu rừng (FRL) → tín chỉ các-bon cho một địa bàn rừng tự nhiên điển hình ở Tây Nguyên với chuỗi thời gian dài. Đây chính là khoảng trống khoa học mà luận án hướng tới để giải quyết.

1.2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VỀ BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI VÀ SINH KHỐI RỪNG

1.2.1. Tiêu chí phân loại rừng và sinh khối rừng

1.2.1.1. Tiêu chí phân loại rừng

Nghị định số 156/2018/NĐ-CP có nêu rõ tiêu chí phân loại rừng theo nguồn gốc [4] bao gồm các tiêu chí như sau:

Tiêu chí rừng tự nhiên bao gồm các khu rừng nguyên sinh và thứ sinh, được xác định bởi các đặc điểm cụ thể sau: độ che phủ của các loài cây thân gỗ, tre nứa và cây thuộc họ cau—những loài cây chính tạo nên rừng tự nhiên—đạt từ 10% trở lên. Khu vực rừng cần có diện tích liên tục tối thiểu 0,3 ha. Chiều cao trung bình của cây rừng được phân loại theo điều kiện lập địa. Cụ thể, cây rừng tại các khu vực đồi núi đất và đồng bằng phải đạt chiều cao trung bình từ 5 m trở lên; tại đất ngập nước ngọt từ 2 m trở lên; tại đất ngập phèn từ 1,5 m trở lên; và tại núi đá, đất cát, đất ngập mặn hoặc những điều kiện sinh thái đặc biệt khác, chiều cao trung bình từ 1 m trở lên. Những tiêu chí phân loại rừng giúp phân định và đánh giá rừng tự nhiên một cách rõ ràng, chính xác.

Tiêu chí rừng trồng được xác định bao gồm các khu vực rừng trồng mới, rừng trồng lại sau khai thác, rừng trồng cải tạo các khu rừng tự nhiên nghèo kiệt và rừng tái sinh sau khai thác. Các khu rừng đáp ứng các yêu cầu sau: Độ che phủ của cây rừng trồng đạt từ 10% trở lên, với diện tích liên vùng không nhỏ hơn 0,3 ha. Chiều cao trung bình của cây rừng thay đổi tùy theo điều kiện lập địa: cây rừng trồng trên đồi, núi đất, đồng bằng, và đất ngập phèn phải đạt chiều cao trung bình từ 5 m trở lên; cây rừng trồng trên núi đá có đất xen kẽ và đất ngập nước ngọt phải đạt từ 2 m trở lên; và cây rừng trồng trên đất cát hoặc đất ngập mặn cần đạt chiều cao trung bình từ 1 m trở lên.

- Theo mục đích sử dụng, rừng được phân thành 3 loại: (i) Rừng đặc dụng là rừng được sử dụng vào mục đích bảo tồn thiên nhiên, bảo tồn nguồn gen thực vật và động vật rừng, phục vụ nghiên cứu khoa học, bảo vệ di tích lịch sử, du lịch nghỉ dưỡng và tham quan. (ii) Rừng phòng hộ là rừng được sử dụng để phục vụ điều tiết nguồn nước, giảm thiểu thiên tai; bảo vệ đất, chống xói mòn, chống cát bay, chắn sóng biển, điều hòa khí hậu, bảo đảm cân bằng sinh thái và an ninh môi trường. (iii) Rừng sản xuất là rừng sử dụng cho mục đích sản xuất, kinh doanh lâm sản và cân bằng sinh thái, kết hợp với phòng hộ môi trường.

- Phân loại rừng theo điều kiện lập địa bao gồm: (i) Rừng núi đất là rừng phát triển trên nền núi đất; (ii) Rừng núi đá là rừng phát triển trên nền núi đá; (iii) Rừng

ngập nước là rừng phát triển trên các diện tích ngập nước quanh năm hoặc ngập nước không thường xuyên; (iv) Rừng trên đất cát là rừng mọc trên các cồn cát, bãi cát.

- Phân loại rừng theo trữ lượng bao gồm: rừng rất giàu, rừng giàu, rừng trung bình, rừng nghèo và rừng chưa có trữ lượng.

Trong phạm vi luận án, nghiên cứu sinh sẽ tập trung phân tích trạng thái rừng dựa trên các thông tin khách quan thu nhận từ vệ tinh viễn thám. Cho đến nay, chưa có một hệ thống phân loại nào được công nhận và sử dụng chung trên toàn cầu [73]. Do đó, hiện vẫn tồn tại nhiều hệ thống phân loại song song và các hệ thống phân loại LULC thường được điều chỉnh để phù hợp với từng dự án cụ thể. Tổng hợp lại, các hệ thống phân loại chủ yếu hiện nay bao gồm:

- Hệ thống phân loại theo Thông tư 16/2023/TT-BNNPTNT [2];
- Hệ thống phân loại Cục Địa chất Liên bang Mỹ (USGS) [96];
- Hệ thống phân loại FAO [82];
- Hệ thống tiêu chuẩn phân loại dựa trên đất đai (Land - Based Classification Standard-LBCS) [75].

Bảng 1.4. Bảng hệ thống phân loại sử dụng trong luận án

Stt	Trạng thái	Ghi chú
1	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu (TXG)	Trữ lượng trên 200 m ³ /ha
2	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình (TXB)	Trữ lượng từ 100 đến 200 m ³ /ha
3	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo (TXN)	Trữ lượng từ 10 đến 100 m ³ /ha
4	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi (TXP)	Trữ lượng < 10 m ³ /ha
5	Rừng trồng	
6	Mặt nước	
7	Diện tích khác	

Sau khi nghiên cứu các hệ thống phân loại, nghiên cứu sinh nhận thấy: Hệ thống phân loại của FAO được thiết kế nhằm hài hòa và liên kết các hệ thống phân loại hiện có trên toàn cầu, nhưng không đưa ra các nguyên tắc cụ thể để phục vụ việc lập bản

đồ lớp phủ từ tư liệu viễn thám. Trong khi đó, hệ thống phân loại LBCS chỉ tập trung vào các mã liên quan đến LULC đô thị hoặc ven đô, như khu công nghiệp, khu thương mại, nhưng không cung cấp dữ liệu về rừng. Hệ thống phân loại đòi hỏi ảnh đầu vào có độ phân giải cao ở cấp độ thửa đất, khiến hệ thống không phù hợp để nghiên cứu bằng tư liệu ảnh SPOT-4 và Sentinel-2 với độ phân giải 10–20 m trong phạm vi luận án. Hệ thống phân loại của Bộ Nông nghiệp và Môi trường được đánh giá phù hợp với nội dung nghiên cứu; tuy nhiên, cần điều chỉnh để phù hợp hơn.

Như vậy, nội dung nghiên cứu luận án sẽ áp dụng các tiêu chí về rừng tự nhiên, rừng trồng; tiêu chí phân loại rừng theo trữ lượng; và điều chỉnh hệ thống phân loại theo Thông tư 16/2023/TT-BNNPTNT, dựa trên đặc điểm địa lý và hệ sinh thái tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, đồng thời phù hợp với mục tiêu nghiên cứu. Hệ thống phân loại gồm các lớp đối tượng cụ thể được trình bày tại Bảng 1.4.

1.2.1.2. Tiêu chí phân loại sinh khối rừng

Sinh khối rừng được phân thành 5 bể chứa chính: (1) sinh khối trên mặt đất (AGB), (2) sinh khối dưới mặt đất (BGB / rễ), (3) gỗ chết, (4) lớp mục và thực vật tầng thấp, và (5) các-bon hữu cơ đất [7]. Mỗi bể chứa yêu cầu các hợp phần đo đạc và các hệ số chuyển đổi khác nhau.

- Sinh khối trên mặt đất: bao gồm các thành phần chính như thân cây sống, cành lớn, cành nhỏ, lá và tán cây; trong nhiều nghiên cứu còn phân biệt rừng trồng và rừng tự nhiên để phản ánh sự khác biệt về cấu trúc và mật độ sinh khối. Việc ước tính phần sinh khối này dựa trên đo đạc thực địa có hệ thống: đo đường kính thân ở độ cao 1,3 m cho tất cả các cây vượt ngưỡng quy định, đo chiều cao cho các mẫu đại diện và xác định loài để áp dụng mật độ gỗ đặc trưng. Chuyển từ kích thước cây sang khối lượng sinh khối được thực hiện bằng các phương trình tương quan sinh trắc học đã được kiểm chứng; ưu tiên sử dụng mô hình phát triển tại địa phương khi có dữ liệu phù hợp, nếu không thì áp dụng mô hình tổng quát đã được thừa nhận [58, 90]. Khi kết hợp với ảnh viễn thám đa phổ, các chỉ số quang phổ được dùng làm biến giải thích, còn dữ liệu đo cấu trúc rừng cung cấp thông tin về chiều cao tán để nâng cao độ chính

xác. Mọi ước tính cần kèm theo báo cáo khoảng tin cậy và phân tích các nguồn sai số (do lấy mẫu, do mô hình và do đo đạc).

- Sinh khối dưới mặt đất: bao gồm rễ chính, rễ phụ và rễ mảnh, là thành phần khó đo trực tiếp do yêu cầu khai quật và xử lý mẫu. Ở quy mô lớn, việc đo rễ trực tiếp ít được thực hiện; thay vào đó, người ta thường ước lượng bằng hệ số tỉ lệ giữa rễ và phần trên mặt đất hoặc bằng mô hình liên hệ giữa rễ và thân dựa trên dữ liệu cục bộ. Khi có điều kiện thực hiện khai quật cục bộ, cần thu mẫu rễ thô và rễ mịn theo độ sâu chuẩn (ví dụ: 0-30 cm) để hiệu chỉnh hệ số tỉ lệ và giảm sai số của hệ thống. Trong phần phương pháp phải nêu rõ phạm vi độ sâu, kỹ thuật khai quật, quy trình xử lý mẫu và cách chuyển đổi khối lượng ướt sang khối lượng khô [50].

- Gỗ chết: bao gồm cây chết đứng, thân gãy, khúc gỗ nằm và các mảnh gỗ lớn, là một bể chứa có tính biến động cao và ảnh hưởng đáng kể tới ước tính tổng sinh khối nếu không được xử lý đúng. Việc ước tính gỗ chết đòi hỏi phân loại theo kích thước và mức độ phân hủy, đo chiều dài và đường kính để tính thể tích, sau đó nhân với mật độ gỗ tương ứng theo từng giai đoạn phân hủy để quy về khối lượng. Gỗ chết thường được khảo sát trong các ô tiêu chuẩn bổ sung hoặc ô con chuyên biệt; cần mô tả rõ phương pháp phân loại phân hủy, hệ số chuyển đổi sử dụng và cách xử lý các khúc gỗ nằm nhằm đảm bảo tính nhất quán và giảm sai số [58, 90].

- Lớp mục và thực vật tầng thấp: gồm lá rụng, cành nhỏ, thực vật thảm, rêu và lớp mùn bề mặt, có tính không đồng nhất cao và dao động theo mùa. Tiêu chí ước tính yêu cầu thu mẫu theo các ô nhỏ có kích thước chuẩn, cân ướt rồi sấy khô để xác định khối lượng khô trên đơn vị diện tích, sau đó quy về khối lượng khô trên đơn vị diện tích của ô khảo sát. Cần xác định rõ độ sâu lớp mục được thu, tần suất lấy mẫu theo mùa và quy trình xử lý mẫu nhằm đảm bảo khả năng lặp lại và so sánh giữa các thời điểm khảo sát.

- Các-bon hữu cơ đất: biểu thị lượng các-bon được lưu giữ trong các tầng đất và thường được báo cáo theo các lớp độ sâu chuẩn (ví dụ 0-30 cm và/hoặc 0-100 cm) để thuận tiện cho việc so sánh và tổng hợp ở quy mô vùng hoặc quốc gia. Việc ước tính trữ lượng các-bon đất đòi hỏi lấy lõi đất theo độ sâu đã xác định, xác định mật độ

khối đất và đo hàm lượng các-bon hữu cơ bằng phương pháp phân tích phù hợp (ví dụ phân tích nguyên tố bằng máy đốt-phân tích hoặc phương pháp hóa học đã được hiệu chỉnh), sau đó tính trữ lượng các-bon cho từng lớp bằng cách kết hợp các thông số trên. Mô tả phương pháp phải nêu rõ mọi thông số kỹ thuật, độ sâu mẫu, kích thước lõi, phương pháp phân tích, hiệu chỉnh cho thành phần đá mẹ hoặc các-bonat và kèm theo ước lượng bất định để đảm bảo minh bạch và khả năng so sánh, bởi vì các-bon hữu cơ đất thường chiếm phần lớn trữ lượng các-bon dài hạn của hệ sinh thái đất-rừng [41, 58, 90].

Như vậy, trong khuôn khổ nghiên cứu luận án, việc phân tích và ước tính sinh khối chỉ tập trung vào sinh khối trên mặt đất (AGB). Đây là thành phần có dữ liệu thực địa và viễn thám đầy đủ, phản ánh trực tiếp khả năng lưu trữ các-bon và biến động rừng, đồng thời phù hợp với mục tiêu nghiên cứu xây dựng bản đồ biến động và mức phát thải tham chiếu tại cao nguyên Kon Hà Nừng.

1.2.2. Các phương pháp phân loại ảnh viễn thám

1.2.2.1. Phân loại đa phổ

Phân loại pixel-based (dựa trên điểm ảnh): Đây là phương pháp truyền thống trong phân loại ảnh viễn thám, trong đó mỗi pixel được coi là một đơn vị riêng biệt và được gán vào một lớp dựa trên đặc tính phổ của nó. Phân loại pixel-based bao gồm hai dạng chính:

- *Phân loại không giám sát*: Phương pháp phân loại không giám sát được sử dụng để khám phá ban đầu cách thức phân chia các lớp phủ trong khu vực nghiên cứu, đặc biệt hữu ích khi thiếu hoặc có rất ít thông tin về lớp phủ trên bề mặt. Phân loại không giám sát dựa trên các thuật toán phân nhóm, trong đó số lượng và dạng thức của các lớp chưa được xác định trước. Các thuật toán ở đây tập trung hoàn toàn vào thông tin phổ, không cần đến dữ liệu mẫu [88]. Cụ thể, các pixel trong ảnh được gom lại thành các nhóm phổ dựa trên những đặc tính tự nhiên, được biểu hiện qua các giá trị độ xám.

- *Phân loại có giám sát*: Trong phương pháp phân loại có giám sát, nhà phân tích sử dụng thông tin sẵn có về đặc tính phổ của các lớp để thu thập mẫu và xác lập

ranh giới cho từng lớp trong không gian phổ. Mỗi pixel nằm trong phạm vi ranh giới đó sẽ cuối cùng được gán cho lớp tương ứng.

1.2.2.2. Phân loại hướng đối tượng

Phân loại hướng đối tượng kết hợp thông tin phổ với đặc trưng hình thái và ngữ cảnh không gian. Quy trình gồm hai bước: (1) phân mảnh ảnh thành các vùng đồng nhất dựa trên màu sắc, hình dạng, kích thước và cấu trúc; (2) phân loại các đối tượng này theo đặc tính phổ, hình thái và mối quan hệ với các đối tượng lân cận. Phương pháp này khắc phục hạn chế của pixel-based khi xử lý ảnh độ phân giải cao, giúp tăng độ chính xác và phản ánh tốt hơn cấu trúc cảnh quan [88].

Như vậy, do khả năng giảm nhiễu điểm, nhận diện cấu trúc rừng (rìa, mảng, khoảng trống) và kết hợp đặc trưng hình thái với phổ, phân loại hướng đối tượng được áp dụng trong nghiên cứu nhằm tăng tính thực tiễn và độ tin cậy của bản đồ trạng thái và giám sát biến động rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng.

1.2.3. Cơ sở lý luận các phương pháp phát hiện biến động bằng viễn thám

Trong nghiên cứu biến động, việc áp dụng viễn thám rất đa dạng, với các loại tư liệu như ảnh quang học, ảnh hồng ngoại nhiệt và ảnh radar. Mặc dù việc phân loại các phương pháp nghiên cứu mang tính tương đối, với nhiều hướng tiếp cận khác nhau, nghiên cứu sinh trong khuôn khổ luận án sẽ trình bày một số phương pháp sau đây.

1.2.3.1. Phát hiện biến động trước phân loại

Đây là phương pháp xử lý số và bao gồm 3 kỹ thuật chính sau:

- Phân loại trực tiếp từ ảnh đa thời gian: Phân tích tổ hợp là kỹ thuật phân loại biến động lớp phủ dựa trên sự thay đổi của phổ theo thời gian. Phương pháp trước phân loại sử dụng bộ dữ liệu ảnh đa thời gian, kết hợp nhận dạng mô hình chuẩn với phân loại phổ, nhằm phát hiện các khu vực có biến động [148]. Phương pháp sử dụng chỉ số NDVI đánh giá trước phân loại tương tự như các nghiên cứu của Yang, Perry hay Bondur [43, 113, 146]. Bên cạnh đó, chỉ số thực vật NDVI cũng được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu liên quan tới năng suất sơ cấp hay các nghiên cứu về thảm thực vật [60].

- Phân tích vector biến động: Khi lớp phủ biến động, phỏ của vector cũng sẽ thay đổi, được thể hiện qua vector biến đổi có điểm gốc tương ứng với thời điểm thứ nhất và đỉnh tại thời điểm thứ hai, với độ lớn bằng khoảng cách giữa hai thời điểm đó. Nếu độ lớn của vector vượt qua ngưỡng đặt ra, ta có thể khẳng định lớp phủ đã bị biến đổi. Hơn nữa, hướng của vector mang lại thông tin về loại lớp phủ, ví dụ có thể cho biết rừng đã bị phát quang hay đang trong giai đoạn tái sinh [91].

- Trừ raster: Trong phân tích biến động, ảnh thời điểm 1 được coi là nền và ảnh thời điểm 2 được trừ khỏi ảnh nền để tạo ra ảnh hiệu. Trên ảnh hiệu, vùng có mức xám đồng đều với giá trị =0 chỉ ra vùng không có biến đổi, vùng có giá trị (+) biểu diễn các khu vực có biến động tích cực và vùng có giá trị (-) là vùng có biến động tiêu cực về rừng [91].

1.2.3.2. Phát hiện biến động sau phân loại

Phương pháp phân tích biến động sử dụng 2 ảnh độc lập để tạo bản đồ lớp phủ ở các thời điểm, rồi so sánh để trích xuất thông tin về sự thay đổi. Quá trình trích xuất thực hiện bằng mắt hoặc phương pháp phân loại đa phỏ và được hỗ trợ bởi GIS với dữ liệu đầu vào dạng vector hay raster [91]. Phương pháp được áp dụng từ cuối những năm 1970 không yêu cầu hiệu chỉnh, chuẩn hóa phỏ hay thu nhận ảnh cùng mùa, nhưng độ chính xác phụ thuộc vào độ tin cậy của quá trình phân loại.

Như vậy, với ưu thế cho phép so sánh trực tiếp bản đồ ở các thời điểm, dễ kiểm định bằng thực địa và phân tích ma trận sai lẫn, phương pháp nghiên cứu biến động sau phân loại được chọn cho nghiên cứu nhằm đánh giá biến động về diện tích rừng. Trong khi đó, luận án sử dụng phương pháp đánh giá biến động trước phân loại thông qua chỉ số NDVI tính từ ảnh viễn thám nhằm đánh giá trạng thái rừng về mặt chất lượng, khả năng che phủ thực vật, độ xanh và hoạt động quang hợp tương đối.

1.2.4. Phân loại biến động trạng thái rừng sử dụng trong luận án

1.2.4.1. Biến động về diện tích

Phân loại biến động sử dụng trong nghiên cứu được lựa chọn các loại hình sau: (1) Mất rừng; (2) Suy thoái rừng; (3) Thêm rừng; (4) Tăng cường chất lượng rừng; (5) Biến động khác. Nguyên tắc ánh xạ trong xây dựng bản đồ biến động được thể

hiện trong 2 bảng ma trận nguyên tắc dưới đây, trong đó rừng tự nhiên được phân thành 4 cấp trạng thái trữ lượng (TXG, TXB, TXN, TXP) theo tiêu chí phân loại sinh khối rừng đã được trình bày tại mục 1.2.1.

Bảng 1.5. Ma trận nguyên tắc ảnh xạ trong xây dựng bản đồ biến động

Năm	2022							
2000	LULC	Rừng tự nhiên (TXG)	Rừng tự nhiên (TXB)	Rừng tự nhiên (TXN)	Rừng tự nhiên (TXP)	Rừng trồng (TG)	Mặt nước (MN)	Diện tích khác (DTK)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	(1)	11	12	13	14	15	16	17
	(2)	21	22	23	24	25	26	27
	(3)	31	32	33	2	35	36	37
	(4)	41	42	43	44	45	46	47
	(5)	51	52	53	54	55	56	57
	(6)	61	62	63	64	65	66	67
	(7)	71	72	73	74	75	76	77

Ghi chú: Dọc đường chéo là các loại hình không biến động; hai phía đường chéo là các loại hình biến động.

Sau khi gộp bản đồ biến động gồm: 8 - Mất rừng; 9 - Suy thoái rừng; 10 - Thêm rừng; 11 - Tăng cường chất lượng rừng; 12 - Biến động khác.

Năm	2022							
2000	LULC	Rừng tự nhiên (TXG)	Rừng tự nhiên (TXB)	Rừng tự nhiên (TXN)	Rừng tự nhiên (TXP)	Rừng trồng (TG)	Mặt nước (MN)	Diện tích khác (DTK)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	(1)	1	9	9	9	8	8	8
	(2)	11	2	9	9	8	8	8
	(3)	11	11	3	2	8	8	8
	(4)	11	11	11	4	8	8	8
	(5)	10	10	10	10	5	12	12
	(6)	10	10	10	10	12	6	12
	(7)	10	10	10	10	12	12	7

Ký hiệu TXG, TXB, TXN, TXP là 4 cấp trữ lượng của rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá, được phân chia theo tiêu chí trữ lượng gỗ (m³/ha). Chi tiết tiêu chí phân loại được trình bày tại mục 1.2.1 và hệ thống mã hóa đầy đủ được trình bày tại Bảng 2.3.

Trong bảng nguyên tắc, đáng chú ý là các mã 8, 9, 10, 11 là các loại hình biến động liên quan đến trạng thái rừng tự nhiên, sẽ được tập trung nghiên cứu trong luận

án. Các diện tích biến động nhỏ (dưới 10 ha/giai đoạn) sẽ được xem xét không đưa vào phân tích, đánh giá.

Đầu tiên, mất rừng thể hiện các diện tích rừng tự nhiên bị chuyển đổi sang trạng thái không còn là rừng, như đất trống, đất nông nghiệp hoặc đất xây dựng. Hiện tượng mất rừng không chỉ làm mất đi hệ sinh thái rừng phong phú mà còn khiến mất đi các dịch vụ sinh thái quan trọng như hấp thụ các-bon, điều hòa khí hậu và bảo tồn đa dạng sinh học. Khi rừng mất đi, sự thiếu hụt nguồn tài nguyên tự nhiên dẫn đến những tác động tiêu cực sâu rộng đến môi trường, đồng thời gây ra hậu quả kinh tế và xã hội nghiêm trọng đối với cộng đồng địa phương.

Tiếp theo, suy thoái rừng phản ánh sự suy giảm dần trữ lượng gỗ của rừng tự nhiên. Suy thoái rừng có thể xảy ra khi rừng giàu (có trữ lượng trên 200 m³/ha) chuyển sang trạng thái trung bình (100-200 m³/ha) hoặc các mức trữ lượng thấp hơn, như rừng nghèo và rừng nghèo kiệt, phản ánh sự suy giảm chức năng của rừng. Suy thoái rừng phát sinh do hoạt động khai thác quá mức, tác động của thiên tai hoặc các yếu tố do con người gây ra.

Ngược lại với mất rừng, thêm rừng đề cập đến việc mở rộng diện tích rừng tự nhiên thông qua quá trình chuyển đổi từ trạng thái không có rừng sang trạng thái có rừng. Hiện tượng thêm rừng có thể xuất phát từ những nỗ lực trồng và phục hồi rừng, góp phần cải thiện chất lượng môi trường và đa dạng sinh học. Việc trồng rừng không chỉ bù đắp phần tổn thất do mất rừng mà còn tạo động lực cho sự cân bằng sinh thái, tăng khả năng hấp thụ CO₂ và giảm thiểu hiệu ứng nhà kính. Sự chuyển đổi theo hướng tích cực, nếu được thực hiện đồng bộ và bài bản, có thể tái thiết những khu rừng tự nhiên phong phú, góp phần quan trọng vào chiến lược phát triển bền vững.

Tăng cường chất lượng rừng đánh dấu giai đoạn nâng cao trữ lượng gỗ và cải thiện tình trạng rừng tự nhiên. Quá trình tăng cường chất lượng rừng thể hiện sự thay đổi tích cực, khi rừng phục hồi chuyển từ trạng thái yếu sang rừng nghèo, hoặc từ rừng nghèo tiến tới rừng trung bình. Đây là kết quả của việc quản lý, phục hồi và đầu tư hiệu quả vào hệ sinh thái rừng, đồng thời phản ánh sự phục hồi về mặt sinh thái cũng như việc tăng cường tính tự duy trì của rừng.

Cuối cùng, hai loại hình biến động không liên quan đến rừng tự nhiên gồm biến động khác và biến động không liên quan. Trong đó, biến động khác là các loại biến động liên quan giữa trạng thái rừng trồng và diện tích khác, mặt nước.

Như vậy, trong đánh giá biến động trạng thái rừng tại khu vực nghiên cứu, sẽ tập trung đánh giá, phân tích 04 loại hình biến động chính: (1) Mất rừng; (2) Suy thoái rừng; (3) Thêm rừng; (4) Tăng cường chất lượng rừng. Trong đó, mất rừng và suy thoái rừng sẽ được sử dụng để xây dựng kịch bản REDD+ tại khu vực nghiên cứu và ước tính giá trị thu về khi tham gia chương trình giảm phát thải khí nhà kính thông qua việc giảm mất rừng và suy thoái rừng. Do hai hoạt động này tạo ra phần lớn phát thải các-bon dễ đo lường và tránh được bằng biện pháp quản lý; việc tính toán, giám sát và chứng nhận tăng rừng hoặc nâng cao chất lượng rừng phức tạp hơn, dễ bị đảo ngược và khó đảm bảo lợi ích khí hậu lâu dài (áp dụng cho bối cảnh Việt Nam và các quốc gia đang phát triển).

1.2.4.2. Biến động về trạng thái

Biến động trạng thái rừng được mô tả là bao gồm cả thay đổi sinh khối trên mặt đất và biến động chỉ số NDVI tại các ô tiêu chuẩn. Sự thay đổi NDVI theo thời gian phản ánh mức độ che phủ và sức khỏe của thảm thực vật, trong khi biến động sinh khối phản ánh tác động của sinh trưởng, khai thác, cháy và sự thay đổi trong mục đích sử dụng đất. Việc so sánh chuỗi NDVI tại các ô tiêu chuẩn theo các mốc 2000, 2010, 2022 cho phép đánh giá chất lượng rừng ở cùng một trạng thái tại các thời điểm khác nhau, từ đó có các nhận định khách quan và sâu sắc hơn về biến động chất lượng rừng tại khu vực nghiên cứu.

1.2.5. Lựa chọn ảnh viễn thám sử dụng trong luận án

Ưu thế sử dụng thuần ảnh quang học (SPOT-2, SPOT-4, Sentinel-2) cho nghiên cứu biến động sinh khối được thể hiện qua một số điểm như sau:

Đầu tiên, hệ thống dữ liệu dài hạn, chi phí thấp: SPOT-2 và SPOT-4 đã phủ sóng từ cuối thập niên 1990 với ảnh đa phổ GSD 20 m và ảnh panchromatic GSD 10 m có thể pan-sharpen để đạt ~10 m cho bản đồ tỷ lệ 1:50.000; Sentinel-2 MSI (10 m đa phổ) khởi động từ 2015, nối tiếp mốc 2022, và mọi ảnh Landsat, SPOT, Sentinel-

2 đều miễn phí, dễ tiếp cận qua USGS, ESA hoặc SPOT Science Centre. Thứ hai, mối tương quan quang phổ - sinh khối ổn định: nghiên cứu của Muhe & Argaw ghi nhận hệ số tương quan tuyến tính (r) từ 0,65 đến 0,74 giữa NDVI/EVI và sinh khối thân lá trong rừng nhiệt đới afro - montane [102], và phân tích của Netsianda & Mhangara trên đồng cỏ cũng cho kết quả $R^2 \approx 0,64$ cho NDVI với AGB, khẳng định độ nhạy của chỉ số này trong nhiều hệ sinh thái khác nhau [105]. Thứ ba, hạn chế bão hòa của radar: theo Yu & Saatchi, radar L-band bão hòa ở khoảng 100 Mg/ha, trong khi C-band thường bão hòa khi sinh khối vượt 80–100 Mg/ha, làm giảm độ nhạy với biến động sinh khối cao so với ảnh quang đa phổ [147]. Thứ tư, trong nghiên cứu có sử dụng thêm ô tiêu chuẩn để đo đếm hiện trường tại các thời điểm 2000, 2010 và 2022 nhằm khắc phục và bù đắp các hạn chế của ảnh viễn thám quang học trong nghiên cứu sinh khối. Cuối cùng, khả năng chọn ảnh không mây và quy trình xử lý đã được chuẩn hóa: vùng cao 1.000 - 1.200 m tại Kon Hà Nừng vào mùa khô ít mây, thuận lợi cho việc chọn ảnh quang sạch; trong khi ảnh radar đòi hỏi xử lý speckle, multilook và khử nhiễu địa hình phức tạp.

Như vậy, luận án lựa chọn sử dụng ảnh viễn thám quang học đa phổ trong nghiên cứu, bởi nguồn dữ liệu này đảm bảo tính liên tục theo thời gian và không gian, miễn phí, đồng thời có độ phân giải không gian và phổ phù hợp với bản đồ tỷ lệ 1:50.000 tại khu vực nghiên cứu. Ảnh quang học thể hiện mối tương quan chặt chẽ với sinh khối rừng; quy trình xử lý đã được chuẩn hóa, giúp mô tả biến động sinh khối chính xác, hạn chế hiện tượng bão hòa và tối ưu hóa nguồn lực so với các loại ảnh khác.

1.3. QUAN ĐIỂM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

1.3.1. Quan điểm nghiên cứu

1.3.1.1. Quan điểm hệ thống và tổng hợp

Quan điểm hệ thống và tổng hợp đánh giá biến động lớp phủ rừng thông qua mối quan hệ giữa các nhân tố tự nhiên và kinh tế - xã hội, từ khí hậu, địa hình đến hoạt động khai thác và hạ tầng. Phạm vi nghiên cứu luận án và cách tiếp cận giúp xác định tác động của từng yếu tố, đồng thời phân tích quá trình hình thành, thay đổi và

biến động ở cao nguyên Kon Hà Nừng. Vì khi tác động vào một thành phần hay bộ phận nào đó thì các hợp phần khác cũng thay đổi theo phản ứng dây chuyền. Nhờ đó, kết quả thu được sẽ hỗ trợ xây dựng chiến lược bảo tồn, quản lý rừng bền vững và đưa ra các giải pháp tối ưu dựa trên sự tương tác đa chiều của hệ thống.

1.3.1.2. Quan điểm lãnh thổ

Quan điểm lãnh thổ khẳng định rằng mỗi đối tượng địa lý có không gian và đặc điểm riêng, đồng thời có mối quan hệ với môi trường xung quanh. Trong nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng, góc nhìn lãnh thổ giúp lựa chọn phương pháp xử lý ảnh vệ tinh chính xác, xác định lớp phủ rừng đặc trưng và phát hiện biến động ở từng khu vực. Phân tích theo phạm vi lãnh thổ cụ thể góp phần làm rõ ảnh hưởng của các yếu tố tự nhiên và đô thị hóa đến cấu trúc rừng, từ đó tạo điều kiện cho quy hoạch và quản lý tài nguyên hiệu quả trong bối cảnh thực tế của cao nguyên Kon Hà Nừng.

1.3.1.3. Quan điểm phát triển bền vững

Quan điểm phát triển bền vững nhấn mạnh sự hài hòa giữa con người và tự nhiên, hướng tới việc quản lý tài nguyên hiệu quả. Trong nội dung luận án, trọng tâm được đặt vào việc đánh giá biến động trạng thái và sinh khối rừng gắn với sự phát triển kinh tế - xã hội. Ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS cho phép xây dựng chiến lược bảo tồn, duy trì không gian xanh và phát triển kinh tế rừng bền vững tại cao nguyên Kon Hà Nừng, từ đó nâng cao giá trị sinh thái và hỗ trợ phát triển cộng đồng một cách cân bằng, lâu dài.

1.3.2. Nhiệm vụ nghiên cứu

1.3.2.1. Nhiệm vụ xây dựng bản đồ trạng thái và biến động rừng

Thu thập, tiền xử lý và tích hợp ảnh SPOT-4 (2000, 2010), Sentinel-2 (2022), DEM và dữ liệu phụ trợ; áp dụng phân đoạn theo hướng đối tượng và thuật toán Random Forest với tham số tối ưu để phân loại LULC, kiểm định bằng mẫu thực địa và ma trận sai lẫn; hoàn thiện bản đồ LULC và bản đồ biến động theo các mốc thời gian.

1.3.2.2. Nhiệm vụ xác định phương trình ước tính sinh khối trên mặt đất

Thiết kế và hiệu chỉnh các phương trình tương quan sinh trắc học phù hợp với vùng Tây Nguyên; xây dựng mô hình hồi quy kết hợp chỉ số quang phổ và các tiêu chuẩn đo đếm thực tế; đánh giá hiệu năng bằng R^2 và RMSE; chuyển đổi sinh khối sang trữ lượng các-bon theo hệ số IPCC.

1.3.2.3. Nhiệm vụ xác lập đường FRL và đề xuất kịch bản quản lý

Tính toán phát thải và hấp thụ CO_2 giai đoạn 2000–2022 dựa trên biến động diện tích và sinh khối; xây dựng đường FRL, mô phỏng 3 kịch bản REDD+ và đánh giá giá trị tín chỉ các-bon; đề xuất ưu tiên quản lý, phục hồi và chính sách hỗ trợ sinh kế cộng đồng.

1.3.3. Phương pháp và quy trình nghiên cứu

1.3.3.1. Phương pháp nghiên cứu

a) Phương pháp tổng hợp và phân tích tài liệu

Phương pháp tổng hợp và phân tích tài liệu là bước khởi đầu của luận án, trong đó nghiên cứu sinh thu thập tài liệu về điều kiện tự nhiên, tài nguyên, kinh tế - xã hội cùng tư liệu hình ảnh và bản đồ. Các tài liệu được phân tích và tổng hợp nhằm xây dựng cơ sở lý luận, quy trình nghiên cứu và đồng bộ dữ liệu. Công nghệ thông tin và điều tra thực địa hỗ trợ không gian hóa thông tin chuyên đề, tạo nền tảng quan trọng cho quá trình nghiên cứu.

b) Phương pháp khảo sát thực địa

Phương pháp điều tra khảo sát thực địa là công cụ truyền thống trong khoa học địa lý, hỗ trợ kiểm chứng và đối chiếu thông tin nhằm khẳng định các nhân tố chủ đạo ảnh hưởng đến quy luật biến động của trạng thái và sinh khối rừng. Trong nội dung nghiên cứu luận án, công tác khảo sát được triển khai tại các khu rừng của cao nguyên Kon Hà Nừng, phối hợp với các cơ quan chuyên môn để thu thập tài liệu, số liệu thống kê, phương án quản lý và các định hướng phát triển bền vững của địa phương. Bộ dữ liệu thu thập được thông qua việc mô tả thực địa các điểm khảo sát được chuẩn hóa về hệ tọa độ của GIS, với thông tin được nhập vào các trường thuộc tính làm mẫu đào tạo, kiểm chứng và đánh giá độ chính xác của kết quả phân loại từ

ảnh viễn thám. Đây là nguồn tư liệu thực tế quan trọng, góp phần minh họa và bổ sung cho các nghiên cứu lý thuyết của luận án.

c) Phương pháp viễn thám

Phương pháp viễn thám được áp dụng để thu thập thông tin về biến động trạng thái và sinh khối rừng thông qua các giá trị số đo từ ảnh đa phổ có độ phân giải không gian cao. Luận án sử dụng dữ liệu gồm ảnh SPOT-4 năm 2000, 2010 và ảnh Sentinel-2 năm 2022. Các giá trị của tất cả các kênh ảnh được khai thác thông qua phương pháp phân loại dựa trên đối tượng (object-based) để chiết tách chính xác các đối tượng rừng, từ đó đánh giá quá trình biến động trạng thái rừng tại khu vực nghiên cứu.

d) Phương pháp phân tích tương quan và hồi quy

Hồi quy là phương pháp định lượng mối quan hệ giữa biến độc lập và biến phụ thuộc, qua đó dự báo giá trị của biến phụ thuộc khi biến độc lập thay đổi. Mô hình hồi quy được áp dụng để ước tính sinh khối rừng bằng cách kết hợp dữ liệu ô tiêu chuẩn và dữ liệu ảnh viễn thám. Qua việc sử dụng hồi quy tuyến tính đơn và đa biến, nghiên cứu làm rõ mối liên hệ giữa chỉ số ảnh và sinh khối trên mặt đất.

e) Phương pháp bản đồ và GIS

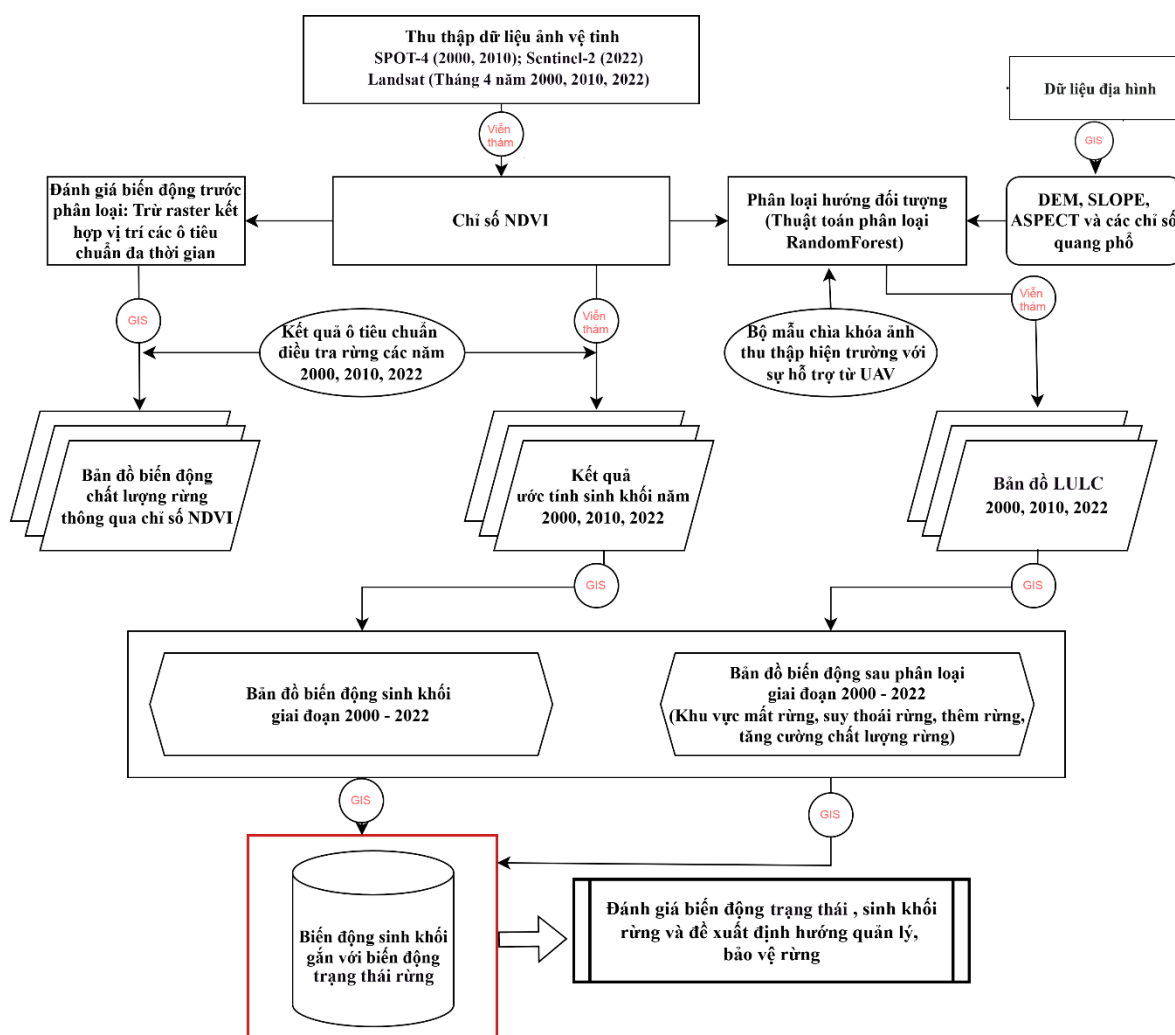
Phương pháp bản đồ và phân tích không gian bằng GIS là công cụ hiện đại và cơ bản trong nghiên cứu địa lý. Áp dụng trong nghiên cứu biến động trạng thái và sinh khối rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng. Bản đồ dựa trên tư liệu viễn thám và dữ liệu nền, giúp nắm bắt đặc điểm khu vực, hỗ trợ khảo sát và cung cấp thông tin về hình thái, điều kiện tự nhiên, kinh tế – xã hội, phân bố đất và LULC. Bản đồ thể hiện sự biến động của rừng, tạo cơ sở cho quyết định quy hoạch lãnh thổ.

1.3.3.2. Quy trình nghiên cứu

Từ kết quả tổng quan tài liệu và cơ sở lý luận, nghiên cứu sinh đã xây dựng sơ đồ các bước chính thực hiện trong nội dung luận án như ở Hình 1.2.

Sơ đồ quy trình gồm ba phần chính: Xây dựng bản đồ biến động chỉ số NDVI đánh giá biến động trạng thái rừng; xây dựng bản đồ ước tính sinh khối các năm 2000, 2010 và 2022 nhằm đánh giá biến động sinh khối rừng (trên mặt đất); Xây dựng

bản đồ LULC các năm 2000, 2010 và 2022 từ đó thành lập bản đồ biến động sau phân loại và sử dụng ma trận chuyển đổi, đánh giá biến động về tính chất và diện tích rừng.



Hình 1.2. Sơ đồ quy trình nghiên cứu

Các ô tiêu chuẩn sử dụng trong nghiên cứu được điều tra trong quá khứ theo các thời điểm, ngoại trừ năm 2022 sử dụng dữ liệu chùm ô thuộc chu kỳ V (2016 – 2020) có lập 12 ô tiêu chuẩn bổ sung (06 ô năm 2021 và 06 ô năm 2022), dữ liệu ô tiêu chuẩn năm 2000 và 2010 hoàn toàn kế thừa từ dự án “Chương trình điều tra, đánh giá và theo dõi diễn biến tài nguyên rừng toàn quốc” chu kỳ III (2001 - 2005) và chu kỳ IV (2006 – 2010). Chi tiết các bước trong quy trình nghiên cứu sẽ được trình bày cụ thể trong Chương 2 của luận án.

Tiểu kết chương 1

1. Nội dung Chương 1 đã xây dựng nền tảng lý luận về trạng thái, biến động trạng thái và sinh khối rừng, từ đó làm rõ mối liên hệ giữa các đặc điểm sinh thái, cấu trúc rừng và khả năng lưu trữ các-bon của hệ sinh thái. Các khái niệm cơ bản về trạng thái rừng và biến động trạng thái rừng được định nghĩa dựa trên các văn bản pháp lý hiện hành, giúp tạo ra khung tham chiếu chuẩn để đánh giá và theo dõi sự thay đổi của rừng theo thời gian. Cùng với đó, khái niệm sinh khối rừng và các định nghĩa liên quan từ FAO, IPCC cho đến các tài liệu giáo trình chuyên ngành đã chỉ ra tầm quan trọng của việc đo lường tổng khối lượng sinh khối trong hệ sinh thái, như một chỉ số đánh giá khả năng sản xuất sinh học và vai trò lưu trữ các-bon của rừng.

2. Trong nội dung Chương 1 đã tổng hợp các phương pháp nghiên cứu hiện đại trong việc xây dựng bản đồ LULC từ dữ liệu ảnh vệ tinh như Landsat, Sentinel-2, MODIS, Planet NICFI và VNREDSat-1, từ đó chỉ ra mức độ phù hợp của từng nguồn dữ liệu ở các quy mô khác nhau: toàn cầu, quốc gia và khu vực. Các thuật toán phân loại như RF, SVM và các mô hình học sâu (ví dụ U-net) đã được so sánh, đánh giá về độ chính xác và khả năng xử lý tập dữ liệu lớn với hiệu suất ổn định, đặc biệt trong bối cảnh các hiện tượng tự nhiên và tác động của con người liên tục thay đổi.

3. Bên cạnh việc phân loại và ước tính sinh khối rừng dựa trên các chỉ số trọng yếu từ dữ liệu quang học lẫn dữ liệu radar, các nghiên cứu về ứng dụng viễn thám còn mở rộng sang lĩnh vực dự báo mức độ phát thải và hấp thụ các-bon, góp phần thực hiện các chương trình REDD+ và xác định mức tham chiếu rừng (FRL).

Nhìn chung, Chương 1 đã khẳng định tầm quan trọng của việc tích hợp các khái niệm lý thuyết, khung pháp lý và các phương pháp định lượng hiện đại nhằm xây dựng một quy trình nghiên cứu toàn diện về biến động trạng thái và sinh khối rừng. Các kết quả và cơ sở lý luận đã được trình bày trong chương này trở thành nền tảng cho các nghiên cứu sâu hơn trong các chương sau.

CHƯƠNG 2. ĐẶC ĐIỂM KHU VỰC NGHIÊN CỨU VÀ QUY TRÌNH XÂY DỰNG BẢN ĐỒ TRẠNG THÁI, SINH KHỐI RỪNG TẠI CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG

2.1. ĐẶC ĐIỂM KHU VỰC NGHIÊN CỨU

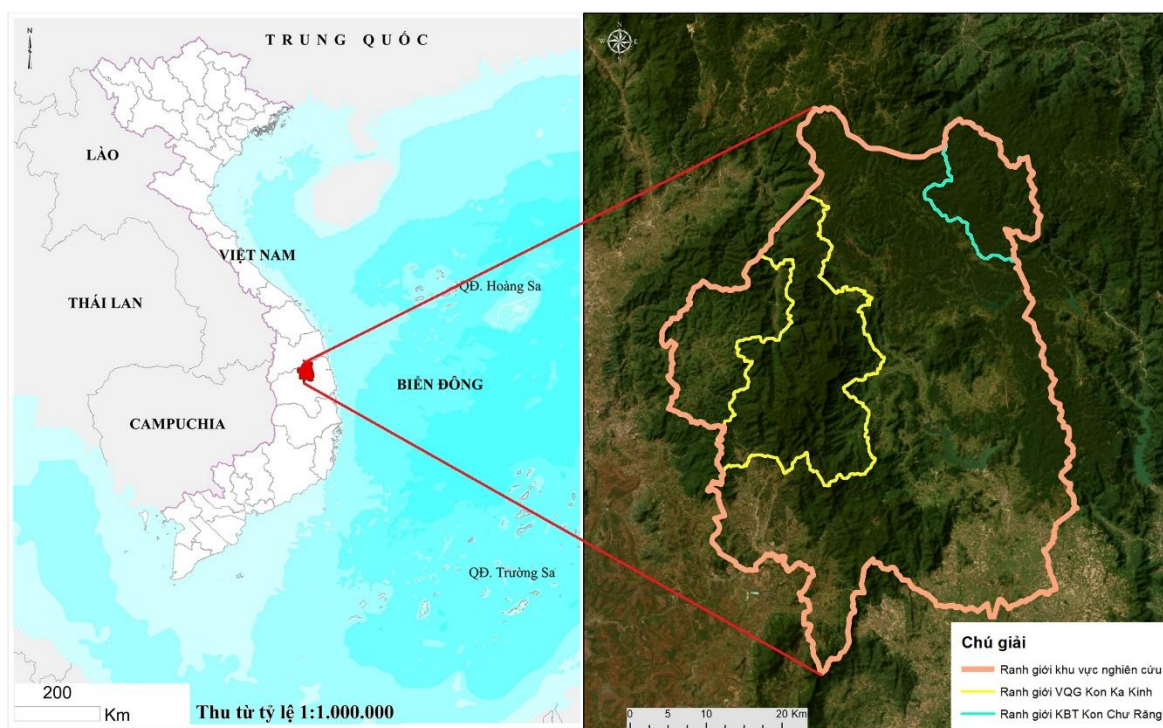
2.1.1. Điều kiện tự nhiên

2.1.1.1. Vị trí địa lý

Khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng là vùng miền núi phía Đông Trường Sơn, nằm ở phía Đông Bắc tỉnh Gia Lai, cách phường Pleiku theo quốc lộ 19 và quốc lộ Trường Sơn Đông khoảng 100 km, tổng diện tích tự nhiên: 416.810,16 ha [28]. Trong đó, diện tích vùng lõi và vùng đệm được nghiên cứu trong luận án là khoảng 242.000 ha (Hình 2.1). Ranh giới của khu vực nghiên cứu có vị trí như sau:

- + Phía Bắc giáp các xã: Kon Plong, Đăk Rve, Ba Xa, Ba Tô (tỉnh Quảng Ngãi);
- + Phía Đông giáp các xã: An Toàn, Vĩnh Sơn, Vĩnh Thạnh (tỉnh Gia Lai);
- + Phía Nam giáp các xã: An Khê, An Bình, Đăk Pơ (tỉnh Gia Lai);
- + Phía Tây giáp hai xã Ia Khroi và Mang Yang (tỉnh Gia Lai).

Cao nguyên Kon Hà Nừng được chia thành 3 khu chức năng chính: vùng lõi, vùng đệm và vùng chuyển tiếp. Vùng lõi có diện tích 57.589,28 ha, bao gồm 2 khu vực quan trọng: Vườn quốc gia Kon Ka Kinh với 42.143,25 ha và Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng với 15.446,03 ha. Vùng đệm bao quanh vùng lõi với diện tích 153.009,98 ha, bao gồm các khu vực như Công ty TNHH MTV Lâm nghiệp Trạm Lập (10.528,13 ha), Công ty TNHH MTV Lâm nghiệp Đăk Rong (15.874,86 ha), cùng cụm xã Biển Hồ, Đăk Đoa, Đăk Somei (38.137,48 ha), xã Mang Yang, Ayun (33.138,82 ha), xã Kbang, Sơn Lang (55.330,69 ha). Vùng chuyển tiếp có diện tích lớn nhất, 206.210,9 ha, bao gồm các xã Ia Khroi (30.388,95 ha), xã Đăk Đoa, Kon Gang (19.821,69 ha), xã Mang Yang, Lơ Phang (32.008,51 ha), xã Đăk Pơ, An Bình (50.373,35 ha), xã Kông Bơ La, Tơ Tung (53.553,19 ha) và phường An Khê, Cửu An (20.065,21 ha).



Hình 2.1. Sơ đồ vị trí cao nguyên Kon Hà Nừng

Vùng lõi 1, Vườn quốc gia Kon Ka Kinh, có diện tích tự nhiên 42.143,25 ha, trong đó rừng tự nhiên chiếm 39.170,27 ha, tương đương 93% tổng diện tích. Nơi đây bảo tồn các kiểu sinh cảnh rừng núi đặc trưng, đặc biệt là 2.000 ha rừng hỗn giao giữa cây lá rộng và lá kim, nơi cư trú của loài Pơ mu (*Fokienia hodginsii*). Kon Ka Kinh lưu giữ hầu hết các sinh cảnh và cảnh quan tự nhiên ở phía đông bắc tỉnh Gia Lai, và có khả năng bảo tồn các quần xã động thực vật nguyên sơ nhất ở vùng núi Trung Trường Sơn. Đặc biệt, đây là nơi sinh sống của các loài thú đang bị đe dọa tuyệt chủng toàn cầu như voọc vá chân xám (*Pygathrix cinerea*), vượn đen má hung (*Hylobates gabriellae*) và hổ Đông Dương (*Panthera tigris*) [26]. Bảo tồn các loài sinh vật không chỉ quan trọng đối với Việt Nam mà còn đóng góp vào việc bảo vệ đa dạng sinh học trên toàn cầu. Vườn quốc gia cũng nằm trong vùng chim đặc hữu, ghi nhận sự xuất hiện của 6 loài chim có vùng phân bố giới hạn, trong đó có Khướu Kon Ka Kinh (*Garrulax konkakhinhensis*), loài chim đặc hữu đang bị đe dọa toàn cầu ở mức sắp nguy cấp. Kon Ka Kinh là một điểm nóng về đa dạng sinh học, cần được quan tâm và bảo vệ đặc biệt. Kon Ka Kinh được công nhận là một trong 63 vùng chim quan trọng tại Việt Nam và là khu vực quan trọng quốc tế cho công tác bảo tồn

các loài bò sát và ếch nhái, với nhiều loài mới đối với khoa học như *Leptobrachium banae*, *Leptobrachium xanthospilum*, *Hylarana attigua* và *Rhacophorus baliogaster* [23]. Sự phát hiện các loài mới cho thấy hệ sinh thái tại đây vẫn còn giữ được tính nguyên sơ và là môi trường sống lý tưởng cho nhiều loài động vật quý hiếm.

Vùng lõi 2, Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng, có diện tích tự nhiên 15.446,03 ha, trong đó rừng tự nhiên chiếm 15.210,39 ha, tương đương 98% tổng diện tích. Kiểu rừng chính ở đây là rừng nhiệt đới lá rộng thường xanh, phân bố ở độ cao 900–1.000 m phía tây bắc khu bảo tồn, chiếm 70–80 % diện tích rừng. Thực vật ưu thế bao gồm các loài thuộc họ Dẻ (*Fagaceae*), họ Re (*Lauraceae*), họ Mộc lan (*Magnoliaceae*), hỗn giao với các loài lá kim như Thông nàng (*Podocarpus imbricatus*) và Hoàng đàn giả (*Dacrydium elatum*). Hệ thực vật đã ghi nhận 546 loài thực vật bậc cao có mạch, thuộc 376 chi và 122 họ, trong đó có 201 loài cây gỗ, 121 loài cây dược liệu và 48 loài cây cảnh. Sự phong phú phản ánh tính đa dạng cao của hệ sinh thái rừng tại Kon Chư Răng, góp phần quan trọng trong việc duy trì sự cân bằng sinh thái trong khu vực. Nhiều loài thực vật đang bị đe dọa toàn cầu, đặc biệt là 9 loài đặc hữu của Việt Nam, cho thấy tầm quan trọng của việc bảo tồn. Về động vật, Kon Chư Răng ghi nhận 62 loài thú, 169 loài chim và 161 loài bướm, trong đó có 8 loài thú bị đe dọa toàn cầu và 17 loài được ghi trong Sách Đỏ Việt Nam. Đặc biệt, sự hiện diện của 3 loài thú đặc hữu Đông Dương là Vượn má hung (*Hylobates gabriellae*), Voọc vá chân xám (*Pygathrix nemaeus cinereus*) và Mang lớn (*Megamuntiacus vuquangensis*) nhấn mạnh tính nguyên vẹn của hệ sinh thái và vai trò quan trọng của Kon Chư Răng trong công tác bảo tồn đa dạng sinh học. Kon Chư Răng được công nhận là một trong những vùng quan trọng về chim tại Việt Nam [23]. Vườn quốc gia Kon Ka Kinh và Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng có hệ sinh thái rừng tương đối nguyên vẹn, với các hệ sinh thái đặc trưng như rừng kín nhiệt đới thường xanh lá rộng, trảng cây bụi, trảng cỏ và các khu vực đất nông nghiệp, khu dân cư. Đây là vùng có tính đa dạng sinh học cao, đặc trưng cho hệ sinh thái rừng của Tây Nguyên, đóng vai trò quan trọng trong công tác bảo tồn và nghiên cứu khoa học về đa dạng sinh học và môi trường. Sự đa dạng và phong phú của các loài động thực vật,

cùng với việc phát hiện nhiều loài mới phục vụ khoa học, cho thấy khu vực Kon Hà Nừng là một kho báu sinh học cần được bảo vệ nghiêm ngặt. Bảo tồn sẽ tạo cơ hội cho các nghiên cứu khoa học, giáo dục môi trường và phát triển du lịch sinh thái bền vững, góp phần nâng cao nhận thức cộng đồng về tầm quan trọng của việc bảo tồn đa dạng sinh học.

2.1.1.2. Đặc điểm địa hình

Địa hình cao nguyên Kon Hà Nừng chủ yếu là núi trung bình, chiếm 98,5% diện tích tự nhiên, với độ cao từ 700 đến 1.700 m, phân bố gần như toàn bộ cao nguyên và thấp dần từ Bắc xuống Nam, tạo nên cảnh quan đặc trưng với những dãy núi nối tiếp và các thung lũng sâu. Ngoài ra, cao nguyên còn có kiểu địa hình núi cao, mặc dù chỉ chiếm 0,1% diện tích nhưng đóng vai trò quan trọng, phân bố ở đỉnh Kon Ka Kinh cao 1.748 m – điểm cao nhất của cao nguyên – và khu bảo tồn Kon Chư Răng. Khu vực nghiên cứu là nơi sinh sống của nhiều loài động thực vật quý hiếm, có giá trị đa dạng sinh học cao. Bên cạnh đó, kiểu địa hình núi thấp chiếm 1,4% diện tích, với độ cao từ 600 đến 700 m, phân bố ở vùng đất phía Đông. Kon Hà Nừng đóng vai trò là cầu nối giữa cao nguyên và đồng bằng, góp phần đa dạng hóa cảnh quan và hệ sinh thái. Sự đa dạng về địa hình ảnh hưởng mạnh mẽ đến khí hậu, thổ nhưỡng và sinh thái của khu vực, tạo môi trường sống thích hợp cho nhiều loài sinh vật, đồng thời mang lại tiềm năng lớn cho phát triển du lịch sinh thái và nghiên cứu khoa học tại cao nguyên Kon Hà Nừng.

Cao nguyên Kon Hà Nừng được đặc trưng bởi địa hình đồi núi phức tạp. Theo nghiên cứu của Nguyễn Văn Thành về địa hình Tây Nguyên, khu vực nghiên cứu có độ cao từ 700 đến 1700 mét so với mực nước biển, trong đó địa hình núi trung bình chiếm chủ yếu. Địa hình bao gồm nhiều đỉnh núi cao và trung bình, dốc đứng, tạo điều kiện không thuận lợi cho sự hình thành rừng rụng lá. Rừng rụng lá thường xuất hiện ở những vùng đất bằng phẳng và thấp. Những điều kiện kể trên đã tạo ra sự đa dạng về độ cao và môi trường sống, thúc đẩy sự phát triển của nhiều loài cây gỗ khác nhau [9].

2.1.1.3. Địa chất và thổ nhưỡng

Cao nguyên Kon Hà Nừng có nền địa chất được hình thành từ bốn nhóm đá mẹ chính: đá macma axit, chủ yếu là granít; đá macma phun trào có thành phần bazơ, chủ yếu là bazan (hàm lượng SiO_2 : khoảng 45 - 52 %); đá phiến sét biến chất, bao gồm phiến thạch sét và phiến thạch mica; và vật chất dốc tụ ven suối, chủ yếu là phù sa mới. Trên cơ sở địa chất đa dạng, khu vực nghiên cứu có 6 loại đất chính.

Thứ nhất, đất feralit mùn vàng đỏ phát triển trên đá macma axit (FHa) chiếm 54,2% tổng diện tích tự nhiên, phân bố tập trung ở vùng trung tâm và sườn phía tây trên đỉnh các dãy núi cao trên 1.200 m. Đất được hình thành trong điều kiện khí hậu lạnh, ẩm, thường có tầng thảm mục thô chưa phân hủy dày từ 5 - 8 cm; đất hơi chua (pHKCl 4,0 - 4,6); thành phần cơ giới thịt trung bình và thịt nặng, thích hợp với các loài cây hạt trần như hồng tùng, pơ mu, thông năm lá.

Thứ hai, đất feralit mùn nâu vàng trên đá macma kiềm trung tính (FHk) chiếm 12,4% diện tích, có đất hơi chua (pHKCl < 5,5), thành phần cơ giới thịt nhẹ đến trung bình, tầng mùn mỏng, đất hơi chua, độ dày tầng đất trung bình từ 50 - 100 cm, phù hợp cho các loài cây lâm nghiệp như giổi xanh, bời lời nhót, bời lời đỏ, thông ba lá, sao đen.

Thứ ba, đất feralit mùn vàng đỏ trên đá sét biến chất (FHs) chiếm 2,7% diện tích, đất ít chua, thành phần cơ giới thịt nhẹ, tầng mùn mỏng, thích hợp với các loài cây lâm nghiệp tương tự FHk.

Thứ tư, đất feralit đỏ vàng trên đá macma axit (Fa) chiếm 13,2% diện tích, phân bố chủ yếu trên sườn đông bắc dãy Kon Ka Kinh và khu vực xã Kbang. Đất chua (pHKCl 3,9 - 4,7), tỷ lệ mùn thấp (0,5 - 0,7%), thành phần cơ giới thịt nhẹ và thịt pha sét, thích hợp với các loài cây lâm nghiệp như giổi xanh, bời lời, thông ba lá, sao đen.

Thứ năm, đất feralit nâu đỏ trên đá macma kiềm trung tính (Fk) chiếm khoảng 16% diện tích Vườn quốc gia, có tầng đất dày trên 100 cm, hơi chua (pHKCl < 5,5), thành phần cơ giới thịt nhẹ đến trung bình, hàm lượng hữu cơ cao, phù hợp cho cây trồng nông lâm nghiệp, đặc biệt là cây công nghiệp như cà phê, cao su, cây ăn quả lâu năm.

Cuối cùng, đất phù sa ven sông suối (P) chiếm khoảng 1,5% diện tích, phân bố dọc theo thung lũng sông suối, đất trung tính (pHKCl 7,0 - 7,2), thành phần cơ giới thịt trung bình, tỷ lệ mùn 2,7 - 3,2%, độ dày tầng đất 50 - 100 cm, thích hợp cho cây trồng nông nghiệp như lúa, ngô, khoai, đậu.

Nền địa chất đa dạng tạo ra các loại đất với đặc tính hóa học và vật lý khác nhau, ảnh hưởng trực tiếp đến sự phân bố và phát triển của thảm thực vật. Đá macma axit và kiềm trung tính hình thành nên các loại đất feralit với độ chua và thành phần cơ giới khác nhau, quy định khả năng sinh trưởng của các loài cây đặc trưng. Ví dụ, đất FHa trên đá granít ở vùng cao, khí hậu lạnh ẩm, với tầng thảm mục dày, tạo môi trường lý tưởng cho các loài cây hạt trần như hồng tùng, pơ mu, thông năm lá. Đất FHK và Fk trên đá bazan có hàm lượng hữu cơ cao, phù hợp với các loài cây lá rộng và cây công nghiệp như cà phê, cao su. Đất Fa chua và nghèo mùn thích hợp cho một số loài cây lâm nghiệp chịu axit. Đất phù sa ven sông suối với độ phì nhiêu cao hỗ trợ sự phát triển của cây trồng nông nghiệp, góp phần tạo nên sự đa dạng sinh thái trong khu vực. Sự kết hợp giữa địa chất, thổ nhưỡng và điều kiện khí hậu đã hình thành nên hệ sinh thái rừng phong phú và đa dạng của cao nguyên Kon Hà Nừng, đòi hỏi các chiến lược quản lý và bảo tồn phù hợp nhằm duy trì và phát triển bền vững tài nguyên rừng tại khu vực nghiên cứu. Khu vực nghiên cứu có thành phần thổ nhưỡng chủ yếu là đất Feralit mùn vàng đỏ phát triển trên đá Mắc-ma axit giàu dinh dưỡng, phù hợp với cây rừng thường xanh có nhu cầu dinh dưỡng cao. Các nhóm đất khác cũng hỗ trợ sự phát triển của rừng thường xanh hơn là rừng khộp, vốn thường phát triển trên đất cát nghèo dinh dưỡng. Tại khu vực nghiên cứu không có đất cát nghèo dinh dưỡng trong khi rừng rụng lá thường xuất hiện trên đất cát, nghèo dinh dưỡng và thoát nước tốt. Đây cũng là một trong các nguyên nhân khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng không phát hiện hệ sinh thái rừng rụng lá (rừng khộp) [5, 25].

2.1.1.4. Đặc điểm khí hậu

Cao nguyên Kon Hà Nừng nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa, với hai mùa phân biệt rõ rệt trong năm: mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11, và mùa khô bắt đầu từ tháng 12 đến tháng 4 năm sau. Nhiệt độ trung bình hàng năm dao động từ 21

đến 25 °C. Tháng nóng nhất là tháng 5 với nhiệt độ trung bình 25°C, trong khi tháng lạnh nhất là tháng 1 với nhiệt độ trung bình 16°C; đặc biệt, khu vực đỉnh Kon Ka Kinh có nhiệt độ dưới 15°C. Lượng mưa trung bình hằng năm biến động từ 2.000 đến 2.800 mm, tập trung chủ yếu vào mùa mưa, chiếm 70-75% tổng lượng mưa trong cả năm. Tháng 8 ghi nhận lượng mưa cao nhất, ngược lại, tháng 1 có lượng mưa thấp nhất. Độ ẩm bình quân năm đạt khoảng 80 %, với độ ẩm cao nhất vào các tháng mùa mưa (87%) và thấp nhất vào mùa khô (71%). Chế độ gió trong khu vực có 2 hướng chính: gió mùa Tây Nam thổi vào mùa mưa và gió mùa Đông Bắc thổi vào mùa khô. Mùa mưa kéo dài với lượng mưa lớn tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của thảm thực vật, cung cấp đủ nước cho cây cối và duy trì độ ẩm cần thiết cho đất. Nhiệt độ ôn hòa kết hợp với độ ẩm cao thúc đẩy quá trình sinh trưởng và đa dạng sinh học của các loài thực vật và động vật nhiệt đới. Tuy nhiên, mùa khô kéo dài và độ ẩm thấp có thể dẫn đến hiện tượng khô hạn, làm giảm sức sống của cây rừng và tăng nguy cơ cháy rừng. Chế độ gió thay đổi theo mùa không chỉ ảnh hưởng đến khí hậu vi mô mà còn tác động đến quá trình phát tán hạt giống và phấn hoa, qua đó ảnh hưởng đến khả năng tự tái sinh của rừng. Như vậy, khí hậu nhiệt đới gió mùa với những đặc trưng riêng biệt đã định hình hệ sinh thái rừng phong phú và đa dạng của cao nguyên Kon Hà Nừng, đồng thời đặt ra những thách thức trong công tác quản lý và bảo tồn nguồn tài nguyên rừng tại đây. Tóm lại, lượng mưa tại khu vực nghiên cứu cao và phân bố đều. Kon Hà Nừng có lượng mưa trung bình cao hơn so với các khu vực rừng khộp, nơi thường có mùa khô kéo dài và khắc nghiệt. Thêm nữa, khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng chịu ảnh hưởng của khí hậu Đông Trường Sơn, tạo nên môi trường ẩm ướt, thuận lợi cho sự phát triển của rừng thường xanh nhiệt đới hơn là rừng rụng lá. Mùa khô tại khu vực nghiên cứu không rõ rệt; rừng khộp thường phát triển ở những nơi có mùa khô rõ rệt và kéo dài, nhưng tại Kon Hà Nừng, mùa khô không quá khắc nghiệt nên không tạo điều kiện cho rừng khộp hình thành [29].

2.1.1.5. Hệ thống thủy văn

Lưu vực sông Ba là hệ thống sông lớn nhất, bắt nguồn từ các nhánh suối ở phía Bắc xã Đăk Roong, chảy theo hướng Bắc - Nam, đi qua Vườn quốc gia Kon Ka Kinh

tại tiểu khu 18 với chiều dài khoảng 11 km. Các hệ thống suối ở mạn sườn Đông Bắc và Đông Nam Kon Ka Kinh đều thuộc lưu vực sông Ba, với diện tích khoảng 230 km². Mô đun dòng chảy trung bình toàn lưu vực đạt 22,2 l/s/km²; vùng thượng lưu có lưu lượng dòng chảy trung bình năm cao, đạt 40–50 l/s/km²; hệ số dòng chảy lưu vực thấp, trung bình đạt 0,41. Lưu vực sông Đăk Pnê bắt nguồn từ nhiều nhánh suối ở sườn Tây dãy Kon Ka Kinh thuộc địa bàn xã Kon Pnê, với diện tích lưu vực khoảng 144 km². Sông Đăk Pnê chảy theo hướng Bắc, nhập vào sông Đăk Bla tại xã Kon Plông, chảy qua thành phố Kon Tum, tiếp nối với sông Pô Kô và cung cấp nước cho Nhà máy thủy điện Ya Ly, thủy điện Sê San III. Lưu vực sông A Yun bắt nguồn từ sườn Nam của dãy Kon Ka Kinh, với tổng diện tích lưu vực là 60 km².

Mùa mưa kéo dài từ tháng 5 đến tháng 11 mang lại lượng mưa dồi dào, duy trì lưu lượng nước lớn cho các hệ thống suối và sông, tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển mạnh mẽ của thảm thực vật và sự đa dạng sinh học. Nguồn nước phong phú trong mùa mưa không chỉ thúc đẩy quá trình sinh trưởng của cây rừng mà còn cung cấp môi trường sống cho nhiều loài động thực vật thủy sinh, góp phần duy trì cân bằng hệ sinh thái. Tuy nhiên, mùa khô từ tháng 12 đến tháng 4 năm sau, với lưu lượng nước giảm mạnh, dẫn đến nguy cơ khô hạn, ảnh hưởng đến sức sống của cây rừng và khả năng tự tái sinh. Sự biến đổi lưu lượng nước giữa hai mùa cũng tác động đến chế độ lũ và hạn hán, có thể gây xói lở đất, mất mát dinh dưỡng và đe dọa sự ổn định của môi trường sống. Như vậy, khí hậu không chỉ ảnh hưởng trực tiếp đến hệ sinh thái rừng mà còn gián tiếp tác động đến các hoạt động kinh tế và xã hội trong vùng, qua đó nhấn mạnh tầm quan trọng của việc quản lý bền vững và thích ứng với biến đổi khí hậu tại cao nguyên Kon Hà Nừng. Có thể thấy cao nguyên Kon Hà Nừng sở hữu hệ thống 3 con sông (Sông Ba, Sông Kôn, sông Đăk PôKô), cung cấp và điều hòa nguồn nước tốt hơn so với các khu vực có rừng khộp tại vùng Tây Nguyên, tạo ra sự đa dạng về vi khí hậu và độ ẩm, không hình thành một mùa khô đủ dài và khắc nghiệt để hình thành rừng rụng lá [21].

Nhận xét chung về điều kiện tự nhiên

Cao nguyên Kon Hà Nừng chứa đựng nhiều kiểu rừng khác nhau, đặc biệt là rừng kín thường xanh và rừng kín hỗn giao cây lá rộng và lá kim trên cao nguyên rất

có giá trị cho công tác bảo tồn. Địa hình nơi đây khá phức tạp, chia cắt mạnh, độ dốc lớn, cùng với nhiều đai cao khác nhau, tạo nên nhiều tiểu vùng sinh cảnh, là môi trường sống của nhiều loài động thực vật và chứa đựng nhiều giá trị về đa dạng sinh học. Đất đai chủ yếu là đất Feralit, thích hợp với nhiều loài cây trồng trong nông lâm nghiệp và công nghiệp. Đây là một lợi thế rất lớn để ổn định và phát triển kinh tế - xã hội địa phương.

Sự kết hợp của địa hình đồi núi phức tạp, khí hậu ẩm với lượng mưa cao và thổ nhưỡng giàu dinh dưỡng đã tạo nên môi trường thuận lợi cho rừng thường xanh nhiệt đới tại Kon Hà Nừng. Ngược lại, những điều kiện như vậy không phù hợp với sự phát triển của hệ sinh thái rừng rụng lá, giống như các khu vực khác tại Tây Nguyên.

Nơi đây là nơi sinh sống của nhiều loài động thực vật, đặc biệt có nhiều loài có giá trị rất cao về mặt khoa học và kinh tế. Bên cạnh đó, một số công trình nghiên cứu khoa học mới đây đã khẳng định rằng tại 2 khu bảo tồn trong phạm vi cao nguyên vẫn còn nhiều giá trị về đa dạng sinh học chưa được biết đến. Với địa thế là vùng đầu nguồn của sông Ba và sông Đăk Pnê, khu vực nghiên cứu có vai trò quan trọng trong việc phòng hộ cho các vùng hạ lưu, góp phần bảo đảm ổn định nguồn nước phục vụ sản xuất nông nghiệp cũng như phát triển kinh tế - xã hội của địa phương.

2.1.2. Điều kiện kinh tế - xã hội

2.1.2.1. Đặc điểm kinh tế

Cộng đồng dân tộc Ba Na, người bản địa, đã sinh sống lâu đời tại khu vực này, cư trú trong các thôn ven trục đường giao thông và khe sông suối; mỗi thôn có khoảng 20 đến 50 ngôi nhà sàn. Nhà rông có mặt ở các thôn nhưng thường thiếu tiện nghi hoặc xuống cấp; một số thôn có nhà thờ hoặc nhà truyền thống. Người Ba Na truyền thống canh tác nương rẫy và khai thác tài nguyên rừng, nhưng diện tích đất canh tác manh mún, nhỏ lẻ khiến việc áp dụng các kỹ thuật tiên tiến gặp nhiều khó khăn. Gần đây, họ bắt đầu canh tác lúa nước, nhưng diện tích và năng suất vẫn còn hạn chế. Văn hóa phong phú của họ bao gồm công chiêng, lễ hội đâm trâu, bỏ mả, cưới hỏi, với tính cộng đồng cao. Tuy nhiên, một số nét văn hóa truyền thống đã bị mai một do ảnh hưởng của văn hóa dân tộc Kinh. Phong tục mẫu hệ vẫn tồn tại, phụ nữ được đề cao và con cái mang họ mẹ, nhưng họ cũng gánh vác lao động nặng nhọc hàng ngày,

trong khi đàn ông làm các công việc như hạ cây, làm nhà, làm rẫy, đan lát, săn bắn. Cộng đồng các dân tộc thiểu số khác, chủ yếu là người di cư từ các tỉnh phía Bắc sau năm 1975, chiếm tỷ lệ nhỏ và phân bố rải rác ở các xã như A Yun và Kroong. Gồm chín dân tộc (Tày, Nùng, Hmông, Dao...), có đặc trưng văn hóa riêng ít được biểu hiện nhưng khác biệt so với người Ba Na về phong tục ma chay, cưới hỏi. Họ đã áp dụng thâm canh, tăng vụ và sản xuất nông lâm kết hợp. Cộng đồng dân tộc Kinh, chủ yếu di cư từ miền Bắc và miền Trung, có kinh nghiệm và kiến thức trong sản xuất nông, lâm nghiệp, buôn bán và dịch vụ nhỏ lẻ, nhưng thường thiếu vốn và đất do là hộ nghèo mới di cư.

An ninh lương thực tại các xã vùng đệm chưa được đảm bảo; nhiều hộ thiếu lương thực từ 4 đến 5 tháng trong năm, thường vào mùa giáp hạt. Người dân đối phó bằng cách thu hái lâm sản phụ, vay mượn, bán nông sản non và chờ hỗ trợ từ Nhà nước. Điều kiện kinh tế tác động mạnh mẽ đến sự biến động của hệ sinh thái rừng trong khu vực nghiên cứu. Hạn chế về đất đai và tình trạng thiếu lương thực buộc cộng đồng phụ thuộc nhiều vào tài nguyên rừng để sinh sống và kiếm thu nhập, dẫn đến việc khai thác và suy thoái rừng gia tăng. Mặc dù một số nhóm đã áp dụng thâm canh và sản xuất nông lâm kết hợp, nhưng thiếu vốn và hỗ trợ kỹ thuật đã cản trở việc thực hành theo hướng bền vững. Các hoạt động văn hóa gắn liền với nhu cầu kinh tế càng tạo áp lực lên rừng. Do đó, giải quyết thách thức kinh tế bằng cách nâng cao năng suất nông nghiệp, cung cấp sinh kế thay thế và cải thiện cơ hội kinh tế là cần thiết để giảm tác động của con người lên hệ sinh thái rừng và thúc đẩy quản lý bền vững trong khu vực.

2.1.2.2. Đặc điểm xã hội

Điều kiện xã hội trong khu vực nghiên cứu, bao gồm giáo dục, y tế và văn hóa, có ảnh hưởng sâu sắc đến biến động của hệ sinh thái rừng. Hiện nay, mặc dù các xã đều có trường học tại trung tâm và hơn 60 phòng học ở các thôn bản, học sinh phổ thông vẫn phải đến các trường dân tộc nội trú hoặc trung học phổ thông tại trung tâm xã. Cơ sở hạ tầng giáo dục còn nghèo nàn, trang thiết bị dạy học thiếu thốn dẫn đến chất lượng giáo dục chưa cao. Dân trí thấp và kinh tế khó khăn khiến người dân chưa

nhận thức đầy đủ về tầm quan trọng của việc học tập, là nguyên nhân chính dẫn đến trình độ dân trí và năng suất lao động thấp.

Về y tế, mạng lưới cơ sở đã được củng cố với trạm y tế tại mỗi xã; một số trạm xá được nâng cấp và bổ sung cán bộ y tế. Các chương trình y tế dự phòng quốc gia như phòng chống bướu cổ, phong, sốt rét, tiêm chủng mở rộng được triển khai hiệu quả. Tuy nhiên, khả năng khám, chữa bệnh tại các trạm y tế xã còn hạn chế do trang thiết bị còn sơ sài, thiếu thuốc men cả về số lượng lẫn chủng loại, không đáp ứng được nhu cầu chăm sóc sức khỏe của nhân dân.

Về văn hóa, khoảng cách đến trung tâm văn hóa - xã hội gây khó khăn cho việc tiếp cận các tiến bộ khoa học - kỹ thuật. Dù có trạm phát sóng điện thoại Viettel, mức độ phủ sóng chưa khép kín; mạng Wi-Fi không ổn định; hệ thống điện lưới quốc gia thường gặp sự cố, đặc biệt vào mùa mưa, dẫn đến mất điện thường xuyên.

Những hạn chế trong giáo dục, y tế và văn hóa đã tác động tiêu cực đến hệ sinh thái rừng. Trình độ dân trí thấp và thiếu nhận thức về vai trò của rừng làm gia tăng các hoạt động khai thác tài nguyên rừng không bền vững, gây suy thoái môi trường. Hạn chế trong y tế ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng, khiến người dân phụ thuộc nhiều hơn vào rừng để tìm kiếm dược liệu và thực phẩm. Khó khăn trong việc tiếp cận thông tin và khoa học kỹ thuật cản trở việc áp dụng các phương thức canh tác bền vững, qua đó gia tăng áp lực lên tài nguyên rừng. Do đó, cải thiện điều kiện xã hội là yếu tố then chốt để giảm thiểu tác động tiêu cực lên hệ sinh thái rừng và thúc đẩy quản lý bền vững tài nguyên trong khu vực nghiên cứu.

2.1.2.3. Đặc điểm mạng lưới giao thông

Hệ thống mạng lưới giao thông trong khu vực nghiên cứu bao gồm các đường mòn dưới tán rừng, như đường vận xuất lâm nghiệp cũ rộng 5 m và đường mòn dân sinh rộng khoảng 1,5 m. Tuy nhiên, việc đi lại hiện tại gặp nhiều khó khăn do đường sá ẩm ướt, trơn trượt, cần được đầu tư sửa chữa, nâng cấp để phục vụ tốt công tác tuần tra, bảo vệ rừng kết hợp du lịch sinh thái. Việc xây dựng hệ thống đường trục chính và đường tuần tra không ảnh hưởng đến độ che phủ rừng. Khu vực có các trục đường huyết mạch như Quốc lộ Đông Trường Sơn, nối liền các xã của Gia Lai với

Quảng Ngãi. Đường dẫn vào phân khu dịch vụ hành chính Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng, cách đường Đông Trường Sơn 3 km, đã được xây dựng. Các tuyến đường trục, đường tuần tra kết hợp du lịch sinh thái hầu hết đã và đang được quy hoạch, nâng cấp.

Mặt khác, Quốc lộ 19 là trục đường chính kết nối Đắk Lắk và Gia Lai. Đường liên xã và liên thôn dẫn vào trụ sở chính của vườn quốc gia, cũng như các tuyến du lịch, phần lớn đã được đầu tư nâng cấp. Hệ thống giao thông trong vườn quốc gia Kon Ka Kinh bao gồm: Quốc lộ 19 qua địa phận xã Hà Ra và A Yun dài khoảng 20 km, chất lượng tốt; tuyến đường 669 dài khoảng 90 km, bắt đầu từ Quốc lộ 19 tại Thị xã An Khê, qua Thị trấn K'Bang, xã Krong, Đắk Rong, cắt qua vườn quốc gia Kon Ka Kinh khoảng 10 km và đến xã Kon Pné, chất lượng tương đối tốt. Tuyến đường liên xã từ Quốc lộ 19 (ngã ba Lơ Bông) qua xã Mang Yang đến xã Hà Đông, dài khoảng 40 km; trong đó 18 km là đường nhựa, còn lại là đường đất chất lượng thấp, rất khó đi lại vào mùa mưa. Đoạn qua Vườn quốc gia Kon Ka Kinh khoảng 8 km. Tuyến đường nội bộ Vườn quốc gia dài khoảng 5 km, mặt đường nhựa chất lượng tốt. Ngoài ra, còn có khoảng 50 km đường liên thôn chất lượng thấp, đi lại khó khăn vào mùa mưa.

Mạng lưới giao thông, mặc dù thúc đẩy phát triển kinh tế và du lịch, nhưng cũng gây ảnh hưởng đáng kể đến sự biến động và sự phân mảnh của hệ sinh thái rừng trong khu vực. Việc mở rộng và nâng cấp đường giao thông dẫn đến việc phân chia liên tục cảnh quan rừng thành các mảnh nhỏ hơn, làm giảm tính kết nối của sinh cảnh, ảnh hưởng đến khả năng di chuyển và giao lưu di truyền của các loài. Hoạt động xây dựng đường có thể gây mất rừng dọc hành lang, tăng hiệu ứng rìa và tạo điều kiện cho các loài ngoại lai xâm nhập. Hơn nữa, sự tiếp cận dễ dàng hơn có thể gia tăng áp lực từ con người như khai thác gỗ trái phép, săn bắt và khai thác tài nguyên không bền vững, góp phần vào suy thoái rừng. Do đó, trong quá trình nâng cấp hạ tầng giao thông, cần có quy hoạch chặt chẽ và các biện pháp giảm thiểu tác động đến môi trường nhằm bảo tồn hệ sinh thái rừng trong khu vực nghiên cứu.

Nhận xét chung về dân sinh, kinh tế - xã hội

Những lợi thế

- Tài nguyên đất đai và khí hậu khá thuận lợi cho việc phát triển sản xuất nông lâm nghiệp tập trung. Đây là yếu tố rất quan trọng trong việc chuyển đổi, đa dạng hóa cơ cấu cây trồng, vật nuôi trong sản xuất, kinh doanh nhằm ổn định và nâng cao đời sống kinh tế của nhân dân vùng đệm.

- Lực lượng lao động phổ thông có số lượng lớn là điều kiện tốt để phát triển sản xuất nông, lâm nghiệp.

- Nhân dân trong vùng có truyền thống cách mạng, có đức tính cần cù, chịu thương chịu khó trong lao động sản xuất, góp phần phát triển kinh tế.

Những hạn chế

- Tình hình phát triển kinh tế - xã hội tại khu vực nghiên cứu đã có sự chuyển biến tích cực trong vài năm gần đây, tuy nhiên, vẫn còn rất khó khăn.

- Trình độ dân trí thấp, khả năng tiếp cận và ứng dụng khoa học kỹ thuật vào sản xuất và đời sống của nhân dân trong vùng còn nhiều hạn chế. Đây là nguyên nhân dẫn đến trình độ dân trí, canh tác cũng như nhận thức của nhân dân về vai trò của rừng, đa dạng sinh học... chưa cao.

- Một bộ phận dân cư vẫn còn tập quán du canh du cư, sản xuất nông nghiệp chủ yếu dựa vào tự nhiên nên hiệu quả không cao, dẫn đến cuộc sống rất khó khăn.

- Vùng đệm của vườn quốc gia và khu bảo tồn có vị trí cách xa các trung tâm kinh tế của các xã, cũng như của tỉnh Gia Lai; địa hình phức tạp, dân cư sinh sống phân tán, dân trí thấp... gây rất nhiều khó khăn cho công tác đầu tư xây dựng cơ sở hạ tầng cũng như phát triển kinh tế.

- Cơ sở hạ tầng của vùng đã được cải thiện rất nhiều so với trước; tuy nhiên, vẫn còn nhiều hạn chế như giao thông đi lại khó khăn vào mùa mưa, hệ thống giáo dục và y tế chưa hiện đại, chưa thực sự đáp ứng nhu cầu của nhân dân địa phương.

2.2. DỮ LIỆU VÀ QUY TRÌNH THỰC HIỆN

2.2.1. Thu thập và xử lý ảnh vệ tinh

2.2.1.1. Thu thập ảnh vệ tinh

Trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh đã sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh SPOT-4 năm 2000, 2010 và Sentinel-2 năm 2022 để lập bản đồ LULC khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai (Bảng 2.1 và Hình 2.2).

Bảng 2.1. Thông số ảnh vệ tinh khu vực nghiên cứu

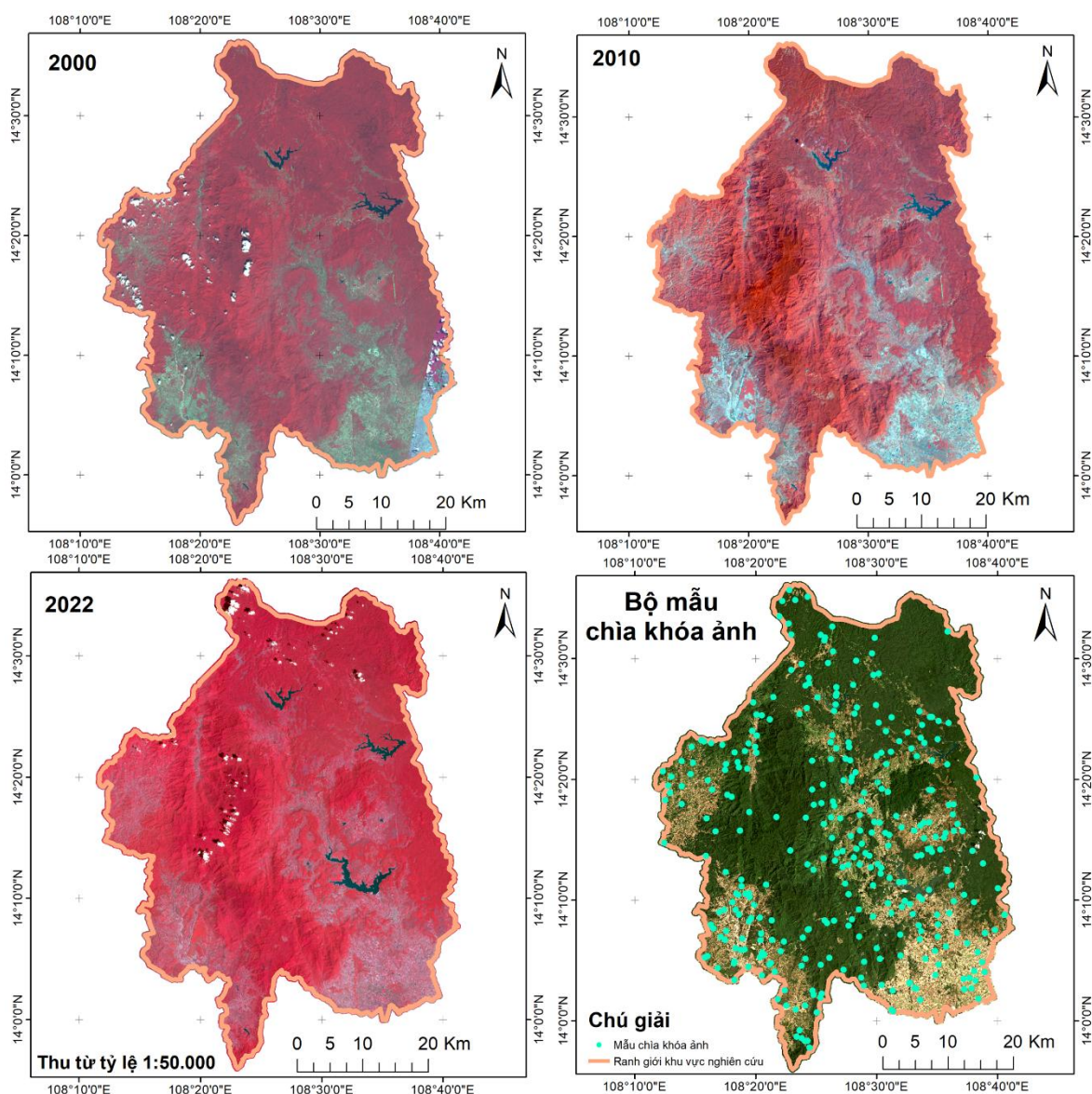
Ngày chụp	Loại ảnh	Số hiệu cảnh ảnh	Kênh ảnh	Độ phân giải
14/02/2000	SPOT-4	4278321 0002140 330182I	Green (0.50 - 0.59 μm) Red (0.61 - 0.68 μm) Near-Infrared (0.79-0.89 μm) SWIR (1.53 - 1.75 μm)	Panchromatic: 10 m x 10 m Multispectral: 20 m x 20 m
02/03/2010	SPOT-4	4278321 1003020 258271I	Green (0.50 - 0.59 μm) Red (0.61 - 0.68 μm) Near-Infrared (0.79-0.89 μm) SWIR (1.53 - 1.75 μm)	Panchromatic: 10 m x 10 m Multispectral: 20 m x 20 m
30/01/2022	Sentinel-2	2022013 0_23583 4_1013	Blue (0.490 μm) Green (0.560 μm) Red (0.665 μm) Near-Infrared (0.842 μm) SWIR (1.610 μm)	Multispectral: 10 m x 10 m

Nguồn: USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>); ESA Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>); CNES/SPOT Image - REGARDS Data Portal (<https://regards.cnes.fr>).

Nghiên cứu sử dụng ảnh SPOT-4 (năm 2000, 2010) và Sentinel-2 (năm 2022) để lập bản đồ LULC cho khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng (Bảng 2.1). Ảnh được chọn vào mùa khô (tháng 1–3) nhằm hạn chế che phủ bởi mây và đảm bảo tính nhất quán của phổ giữa các thời điểm.

Ảnh SPOT-4 (14/02/2000 và 02/03/2010) có độ phân giải 10 m (panchromatic) và 20 m (đa phổ), với 4 kênh: Green, Red, NIR và SWIR, phù hợp cho việc phân loại chi tiết lớp phủ rừng nhiệt đới. Ảnh được cung cấp bởi Cục Viễn thám Quốc gia và Công Dữ liệu REGARDS/CNES.

Ảnh Sentinel-2 (30/01/2022) có độ phân giải 10 m ở các kênh Blue, Green, Red, NIR và bổ sung 4 kênh Red-edge nhạy cảm với biến động thảm thực vật, chu kỳ bay lặp lại 5 ngày. Ảnh được tải miễn phí từ ESA Copernicus Open Access Hub.



Hình 2.2. Ảnh vệ tinh đa thời gian và vị trí mẫu chìa khóa ảnh

Khi phân loại, ảnh SPOT-4 sử dụng tổ hợp màu giả NIR–Red–Green (B3–B2–B1) để làm nổi bật thảm thực vật; ảnh Sentinel-2 sử dụng tổ hợp NIR–Red–Green (B8–B4–B3). Cả hai tổ hợp này hiển thị thực vật khỏe mạnh ở tông đỏ, đất trống ở tông nâu/vàng và mặt nước ở tông tối, hỗ trợ mắt đọc ảnh và thuận lợi cho việc thu thập mẫu chìa khóa. Do Chương trình điều tra, theo dõi diễn biến tài nguyên rừng toàn quốc được thực hiện theo chu kỳ 5 năm, nghiên cứu đã ghép nối mỗi mốc ảnh (2000, 2010, 2022) với dữ liệu ô tiêu chuẩn của kỳ điều tra gần nhất, đồng thời kết hợp bộ mẫu chìa khóa ảnh và kết quả khảo sát thực địa của nghiên cứu sinh (2021-

2023) để hiệu chỉnh, bảo đảm tính đồng bộ tương đối giữa dữ liệu ảnh và dữ liệu mặt đất, phù hợp với điều kiện thực tế của nguồn số liệu.

2.2.1.2. Tiền xử lý dữ liệu ảnh vệ tinh

Tiền xử lý là bước then chốt để đạt được sự đồng nhất và tính nhất quán của dữ liệu, loại bỏ ảnh hưởng của mây, bóng mây và đặc biệt là tác động của khí quyển đối với chất lượng ảnh. Đối với ảnh Sentinel-2 và SPOT-4, việc lựa chọn giữa hai phương pháp phản xạ tại đỉnh khí quyển (TOA - Top Of Atmosphere) và phản xạ tại đáy khí quyển (BOA - Bottom Of Atmosphere) quyết định độ chính xác của phân tích. Phương pháp TOA ghi nhận giá trị phản xạ tại đỉnh khí quyển, bao gồm cả ảnh hưởng của tán xạ và hấp thụ của khí quyển. Điều đó dẫn đến sự sai lệch trong việc phản ánh giá trị thực tế của bề mặt Trái Đất. Mặt khác, phương pháp BOA loại bỏ các tác động của khí quyển, cung cấp giá trị phản xạ chính xác tại bề mặt đất. Đây là cơ sở để phân tích định lượng chính xác và so sánh dữ liệu theo thời gian và không gian.

Vì vậy, việc lựa chọn phương pháp BOA cho ảnh Sentinel-2 và SPOT-4 là cần thiết. Đặc biệt, Sentinel-2 cung cấp dữ liệu Level-2A (BOA) đã được hiệu chỉnh khí quyển thông qua thuật toán Sen2Cor, giúp tiết kiệm thời gian và nâng cao độ tin cậy của dữ liệu.

Các bước tiền xử lý bao gồm:

- Chuyển đổi giá trị ảnh sang phổ phản xạ tại bề mặt đất: Áp dụng hiệu chỉnh khí quyển cho ảnh Sentinel-2 và SPOT-4, chuyển đổi từ TOA sang BOA để loại bỏ ảnh hưởng của khí quyển.

- Phát hiện và loại bỏ mây, bóng mây: Tính toán để phát hiện mây và bóng mây, đồng thời tạo mặt nạ không mây cho từng ảnh đơn, đảm bảo chất lượng dữ liệu.

- Thực hiện trên nền tảng Google Colab: Sử dụng các thư viện Python như OpenCV và Numpy để xử lý dữ liệu hiệu quả và tự động.

2.2.2. Xây dựng bộ mẫu chìa khóa ảnh

Xây dựng bộ mẫu chìa khóa ảnh theo hệ thống phân loại tại Chương 1 (mục 1.2.1). Việc xây dựng bản đồ LULC thông qua giải đoán ảnh thường dựa vào việc lấy mẫu chìa khóa ảnh ngoài thực địa để suy ra tên trạng thái rừng cho các vùng không

có mẫu, dựa trên trạng thái và độ xám của ảnh. Tuy nhiên, do số lượng mẫu hạn chế, từ vài trăm đến vài nghìn điểm, và chỉ được lấy tại những vùng đặc trưng, quá trình phân tích có thể bỏ sót nhiều dạng khác nhau trong cùng một trạng thái rừng.



Hình 2.3. Công tác thu thập mẫu chìa khóa ảnh kiểm chứng hiện trường bằng UAV

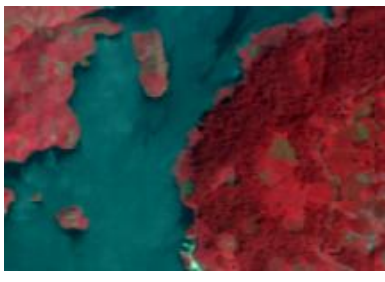
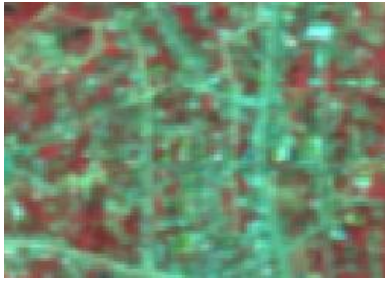
Có thể nhận thấy rằng cần mở rộng phạm vi lấy mẫu và áp dụng các kỹ thuật phân tích ảnh tiên tiến hơn để tăng độ chính xác và độ bao quát của bản đồ LULC. Việc kết hợp các phương pháp mới có thể giúp phát hiện các dạng rừng bị bỏ sót và cung cấp cái nhìn toàn diện hơn về hệ sinh thái rừng hiện nay [26].

Trong trường hợp tại Kon Hà Nừng, nghiên cứu sinh sử dụng phương pháp rút mẫu ngẫu nhiên phân tầng. Bộ mẫu chìa khóa giải đoán ảnh (Interpretation keys - MKA) bao gồm 1.650 mẫu, được sử dụng cho giải đoán ảnh năm 2022 và được đưa vào giải đoán trên Collect Earth. Phần mềm Collect Earth sử dụng giao diện Google

Earth kết hợp với biểu nhập số liệu trên nền ngôn ngữ đánh dấu siêu văn bản (Hypertext Markup Language- HTML). Các biểu mẫu có thể được tùy chỉnh cho phù hợp với hệ thống phân loại cụ thể của từng quốc gia và tuân thủ các hướng dẫn của IPCC. Ảnh sử dụng trong Google Earth, Bing Maps và công cụ Google Earth Engine không chỉ khác nhau về độ phân giải không gian mà còn về độ phân giải theo thời gian. Collect Earth cho phép người sử dụng nhập số liệu về các thay đổi LULC hiện tại và trong quá khứ. Tiếp theo, 80% tổng số mẫu (1.320 mẫu) được dùng để phân loại ảnh sau khi chạy phân mảnh trong phần mềm eCognition; 20% MKA còn lại (330 mẫu) được dùng để kiểm chứng và đánh giá độ chính xác. Đối với các bộ MKA năm 2000 và 2010, đưa bộ MKA năm 2022 đã được giải đoán bằng phần mềm Collect Earth và sử dụng ảnh Google Earth để gán trạng thái phục vụ giải đoán LULC. Bộ mẫu chìa khóa ảnh được thu thập tại hiện trường, được kiểm chứng thông qua điều tra trực tiếp hoặc bằng cách bay UAV để chụp ảnh.

Bảng 2.2. Một số chìa khóa giải đoán ảnh thu thập tại hiện trường

Stt	Trạng thái	Ảnh vệ tinh	Ảnh thực tế
1	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu		
2	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình		
3	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo		

Stt	Trạng thái	Ảnh vệ tinh	Ảnh thực tế
4	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi		
5	Rừng trồng		
6	Mặt nước		
7	Diện tích khác		

Ghi chú: Ảnh vệ tinh Sentinel-2 trong bảng được hiển thị theo tổ hợp kênh phổ B8-B4-B3 (NIR-Red-Green: tổ hợp màu giả chuẩn (Standard False Color)). Ảnh hiện trường được chụp theo màu thật (True Color).

2.2.3. Xây dựng bản đồ trạng thái rừng

2.2.3.1. Phân loại ảnh

Trong nghiên cứu, luận án sử dụng phân loại ảnh hướng đối tượng (Object-Based). Phần mềm eCognition là công cụ chuyên dụng trong xử lý và giải đoán ảnh vệ tinh, đặc biệt hiệu quả trong việc phân đoạn và phân loại ảnh dựa trên các đối tượng [72]. Trong nghiên cứu, eCognition được sử dụng để xây dựng bản đồ LULC

khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng vào các năm 2000, 2010 và 2022, dựa trên tư liệu ảnh vệ tinh đa thời điểm. Thuật toán phân đoạn Multiresolution segmentation do Baatz giới thiệu là kỹ thuật hợp nhất vùng từ dưới lên, nhóm các điểm ảnh có giá trị quang phổ tương tự và lân cận thành các đối tượng dựa trên tiêu chí đồng nhất [37]. Theo Kavzoglu (2014), phân đoạn ảnh sẽ tạo ra các đối tượng bằng cách nhóm các đặc tính quang phổ tương tự trên ảnh, giúp phản ánh chính xác các đối tượng hoặc khu vực trong thực tế [77]. Phân đoạn ảnh không chỉ xác định vị trí các đối tượng mà còn xác định ranh giới giữa chúng, đóng vai trò quan trọng trong việc phân loại và giải nghĩa ảnh vệ tinh. Quá trình phân đoạn sẽ dừng lại khi độ không đồng nhất giữa các đối tượng vượt quá ngưỡng được xác định bởi tham số tỷ lệ. Sự không đồng nhất về quang phổ hoặc màu sắc được mô tả theo công thức [76]:

$$H = 1 - \frac{S}{S_{\max}} \quad (2.1)$$

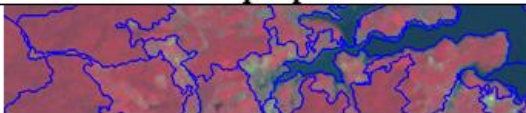
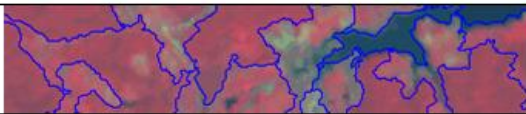
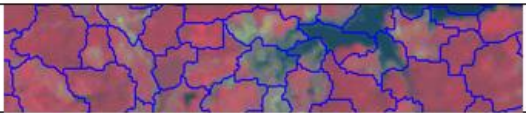
Trong đó, H là độ không đồng nhất giữa các đối tượng; S là tổng độ tương đồng giữa các pixel trong một đối tượng; $S_{\max}$ là mức độ tương đồng tối đa có thể đạt được. Cụ thể hơn, độ tương đồng S được tính theo công thức [56]:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \cdot d(p_i, p_j) \quad (2.2)$$

Trong đó $d(p_i, p_j)$ là hàm khoảng cách giữa các pixel từ i đến j , W_{ij} là trọng số áp dụng cho các pixel.

Phần mềm eCognition được sử dụng để phân mảnh và phân loại ảnh nhằm lập bản đồ LULC tại khu vực nghiên cứu. Những thông số chính được sử dụng để chạy phân mảnh ảnh hướng đối tượng (Object-based) bao gồm: tham số quy mô (Scale parameter), tham số hình dạng (Shape) và tham số độ chặt (Compactness). Các thông số cần thay đổi theo loại ảnh sử dụng, tỷ lệ bản đồ thành quả và mức độ chi tiết của hệ thống phân loại LULC. Trong đó, tham số quy mô giúp xác định kích thước của các đối tượng phân mảnh trong hình ảnh. Quy mô sẽ ảnh hưởng đến mức độ chi tiết của các đối tượng được phân mảnh; nếu chỉ số quy mô cao, các đối tượng sẽ lớn hơn và số lượng phân mảnh sẽ ít hơn. Ngược lại, nếu giá trị nhỏ, số lượng phân mảnh sẽ tăng lên, tạo ra nhiều đối tượng nhỏ hơn. Tham số hình dạng có vai trò điều chỉnh

mức độ ảnh hưởng của hình dạng đến quá trình phân mảnh. Nếu tham số hình dạng cao, các đối tượng sẽ được phân tích theo hình dạng của chúng, dẫn đến các đối tượng có hình dạng không đều, vì hình dạng sẽ được xem xét nhiều hơn. Giá trị thấp hơn sẽ tạo ra các đối tượng có hình dạng gần giống nhau, thường là hình chữ nhật hoặc hình vuông.

Tên tham số	Giá trị	Kết quả phân mảnh
Scale parameter	100	
Shape	0.25	
Compactness	0.45	
Scale parameter	80	
Shape	0.25	
Compactness	0.45	
Scale parameter	30	
Shape	0.25	
Compactness	0.45	

Hình 2.4. Ví dụ tìm giá trị tối ưu cho tham số phân mảnh đối với ảnh SPOT-4 năm 2010

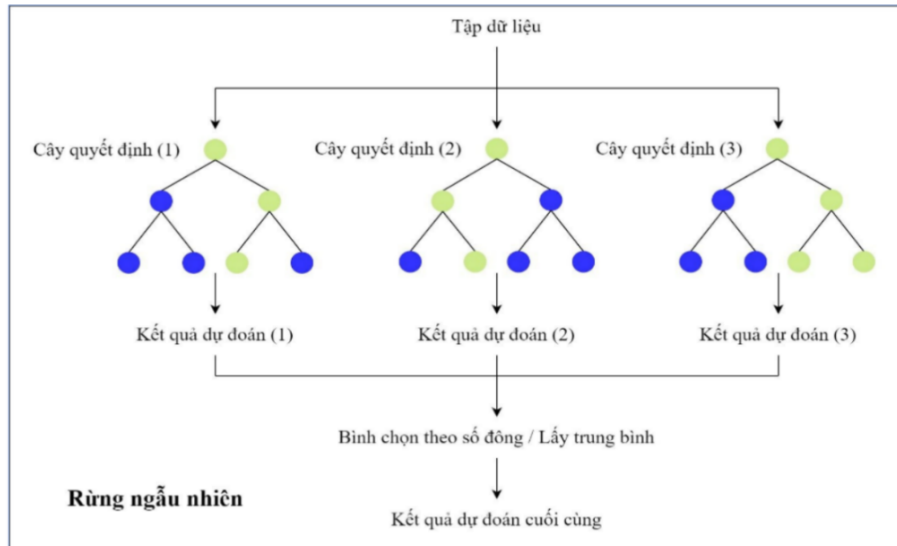
Tham số tính chặt chẽ quyết định mức độ chặt chẽ của các đối tượng được phân mảnh. Nếu giá trị tính chặt chẽ cao, các đối tượng sẽ được phân mảnh theo cách làm cho chúng gần gũi hơn về mặt hình học, giúp tạo ra các đối tượng có hình dạng gọn gàng và gần nhau. Ngược lại, nếu tham số tính chặt chẽ thấp, các đối tượng có thể trở nên phức tạp và rộng hơn.

Nguyên tắc chung để xác định các tham số như sau: Giữ nguyên giá trị của hai biến, thay đổi giá trị của một biến để tìm giá trị phù hợp cho biến đó. Thay đổi giá trị của một biến khác cho đến khi tìm được giá trị phù hợp. Cuối cùng là thay đổi giá trị của các biến còn lại. Kết quả cho thấy tham số Scale parameter = 80, Shape = 0,3, Compactness = 0,5 đối với ảnh SPOT-4 và Scale parameter = 100, Shape = 0,4, Compactness = 0,6 đối với ảnh Sentinel-2 là hai bộ tham số đánh giá tối ưu nhất và được đưa vào sử dụng để chạy phân đoạn ảnh.

Thuật toán Random Forest trong phân loại hướng đối tượng

Phương pháp phân loại bằng rừng ngẫu nhiên (RF) sau khi phân đoạn ảnh bằng phần mềm eCognition đã được Genuer phát triển và công bố vào năm 2020. RF là

một thuật toán học máy mạnh mẽ, được áp dụng cho phân loại, hồi quy và các nhiệm vụ khác, bằng cách xây dựng nhiều cây quyết định độc lập trong quá trình huấn luyện. Mỗi cây quyết định được tạo ra từ việc lấy mẫu ngẫu nhiên dữ liệu và chọn ngẫu nhiên các thuộc tính để xây dựng cây [64].



Hình 2.5. Thuật toán *Random Forest*

(Nguồn: <https://interactivechaos.com/en/wiki/random-forest>)

Vì mỗi cây quyết định chỉ sử dụng một phần dữ liệu huấn luyện và thuộc tính, nên mỗi cây riêng lẻ có thể dự đoán không chính xác (có độ lệch cao). Tuy nhiên, khi tổng hợp kết quả từ nhiều cây, các sai lệch được bù đắp lẫn nhau, dẫn đến mô hình tổng thể có độ lệch và phương sai thấp hơn, từ đó cho kết quả dự đoán chính xác hơn. Do đó, RF trở thành một trong những thuật toán phổ biến và hiệu quả trong học máy. Ý tưởng tổng hợp các cây quyết định trong RF tương tự như "Sự thông thái của đám đông" (The Wisdom of Crowds) được James Surowiecki đề xuất năm 2005. Theo đó, việc kết hợp thông tin từ một nhóm thường mang lại kết quả tốt hơn so với việc kết hợp từ một cá nhân. Trong lĩnh vực viễn thám ứng dụng trong lâm nghiệp, RF đã được áp dụng rộng rãi để cải thiện độ chính xác trong phân loại và dự đoán, nhờ khả năng xử lý dữ liệu lớn và phức tạp một cách hiệu quả. [126].

Mặc dù vậy, việc chỉ sử dụng thông tin quang phổ trong quá trình phân loại có thể dẫn đến hiệu suất kém ở những khu vực có đặc điểm cảnh quan không đồng nhất. Để khắc phục vấn đề hiệu suất kém, dữ liệu phụ trợ thường được sử dụng nhằm cải

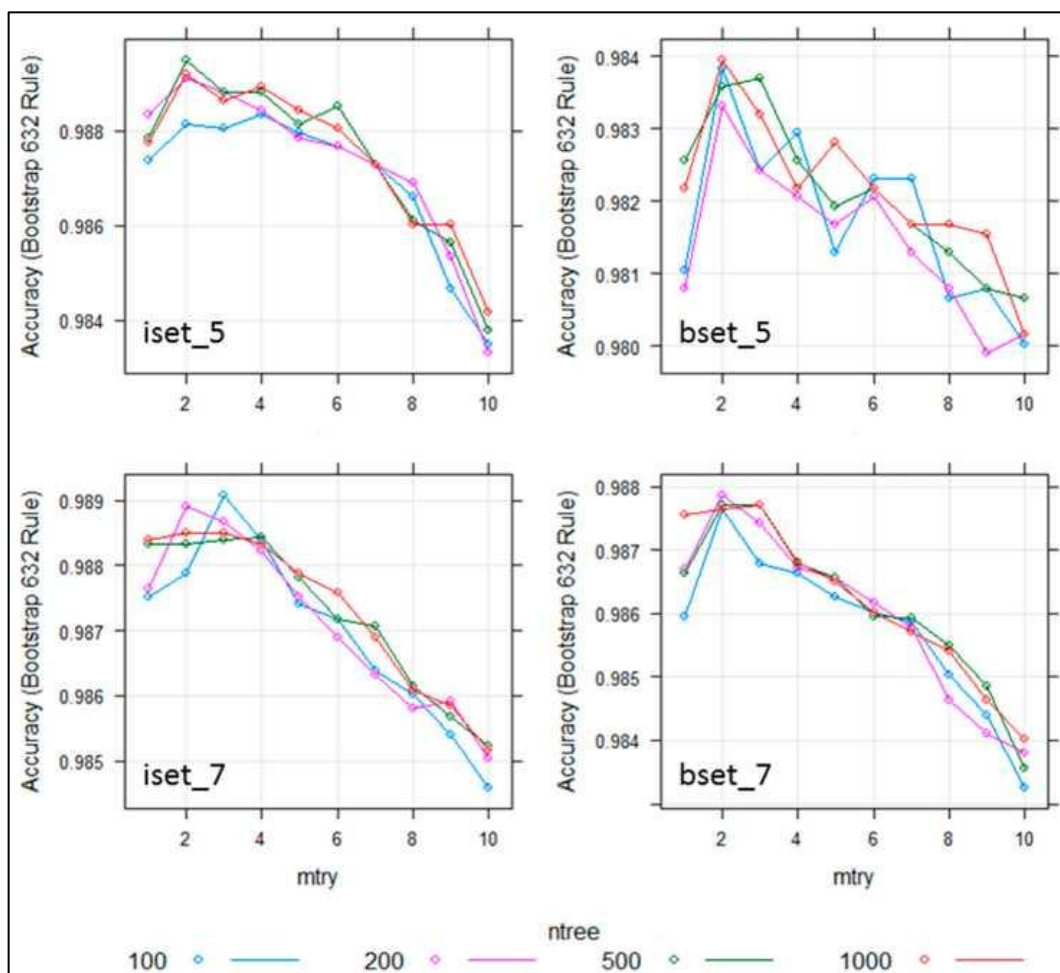
thiện độ chính xác của việc phân loại [78]. Để triển khai RF, cần thiết lập 2 tham số: số lượng cây (ntree) và số lượng đối tượng trong mỗi phần phân chia (mtry). Một số nghiên cứu đã tuyên bố rằng có thể đạt được kết quả khả quan với các thông số mặc định. Tuy nhiên, theo Liaw & Wiener, số lượng cây lớn sẽ mang lại kết quả ổn định với tầm quan trọng khác nhau [87]. Ngoài ra, Breiman cho rằng việc sử dụng số lượng cây lớn hơn có thể không cần thiết nhưng cũng không gây hại cho mô hình [44]. Ngoài ra, Feng và cộng sự cho rằng với ntree = 200, RF có thể đạt được độ chính xác cao [59]. Về tham số mtry, có nhiều nghiên cứu sử dụng giá trị mặc định mtry, trong đó p là số biến dự đoán [55]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu, để tìm ra mô hình RF tối ưu cho việc phân loại, một loạt giá trị cho cả hai tham số đã được kiểm tra và đánh giá: ntree = 100, 200, 500 và 1000; mtry = 1:10 với bước 1.

Theo kết quả nghiên cứu của Phan Thanh Noi (2017), có 2 tham số ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất tập của bộ phân loại RF: ntree và mtry. Trong trường hợp sử dụng Sentinel-2 với 10 băng tần để phân loại, nghĩa là dữ liệu đầu vào có 10 biến. Để tìm thông số tối ưu cho bộ phân loại RF, một số giá trị (mtry = 1:10; ntree = 100, 200, 500 và 1000) đã được thử nghiệm trên tất cả 14 tập dữ liệu phụ. Kết quả cao nhất được thu được cho tất cả các tập dữ liệu với mtry = 2, 3 hoặc 4.

Như được hiển thị trong Hình 2.6, khi mtry là 2, 3 hoặc 4 thì kết quả của ntree với 200, 500 và 1000 đều tương tự nhau. Ngoài ra, sai số ngoài túi mẫu (Out-of-Bag error - OOB) giảm mạnh khi ntree tăng từ 1 lên 100. Khi ntree tăng từ 101 lên 400, các tập dữ liệu con khác nhau có xu hướng hơi khác nhau; tuy nhiên, nhìn chung, các OOB đã giảm nhẹ ở tất cả các tập dữ liệu con. Tất cả OOB của tất cả các tập dữ liệu con hầu như vẫn ổn định khi ntree tăng từ 400 lên 500. Do đó, ntree = 500 được sử dụng làm giá trị tối ưu cho các bộ phân loại RF.

Giá trị mtry được chọn dựa trên kết quả tối ưu khi mtry = 2, 3 hoặc 4. Nghiên cứu sinh chạy thử nghiệm và dùng chung bộ MKA để kiểm chứng ảnh Sentinel-2A năm 2022. Kết quả cho thấy mtry = 3 cho độ chính xác tổng thể cao nhất (90,53%), trong khi mtry = 2 và mtry = 4 cho OA thấp hơn, lần lượt là 89,2% và 88,8%. Do

vậy, trong mô hình thực hiện sau đây, nghiên cứu sinh lựa chọn thông số phân loại RF với $n_{tree} = 500$ và $m_{try} = 3$.



Hình 2.6. Ảnh hưởng của số lượng cây và số lượng biến phân chia ngẫu nhiên tại mỗi nút (m_{try}) đến độ chính xác tổng thể của việc phân loại RF khi sử dụng toàn bộ dữ liệu mẫu huấn luyện (Thanh Noi et al., 2017).

2.2.3.2. Dữ liệu phụ trợ trong phân loại ảnh

Đầu vào của phân loại hướng đối tượng gồm các kênh phổ Green, Red, NIR, SWIR, cùng các chỉ số thực vật (NDVI, AVI, ARVI) được chiết xuất từ ảnh SPOT-4/Sentinel-2. Dữ liệu phụ trợ địa hình (mô hình số độ cao DEM, độ dốc, hướng phơi) được bổ sung nhằm phân tách các trạng thái rừng có đặc trưng phổ tương đồng nhưng phân bố khác nhau theo địa hình (ví dụ, rừng giàu phân bố ở địa hình cao, dốc so với đất canh tác ở thung lũng), qua đó nâng cao độ chính xác phân loại.

Các dữ liệu phụ trợ sử dụng gồm các chỉ số quang phổ:

+ Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) có công thức chung:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2.3)$$

+ Chỉ số thực vật nâng cao (AVI - Advanced Vegetation Index) là một chỉ số toán học tương tự như NDVI, sử dụng 2 kênh phổ đỏ và cận hồng ngoại để đánh giá mật độ và sức khỏe của thảm thực vật. AVI nhạy cảm hơn với sự biến đổi của thảm thực vật dày đặc, đặc biệt trong các khu vực có mật độ thực vật cao hoặc biến động mạnh.

Công thức tính như sau:

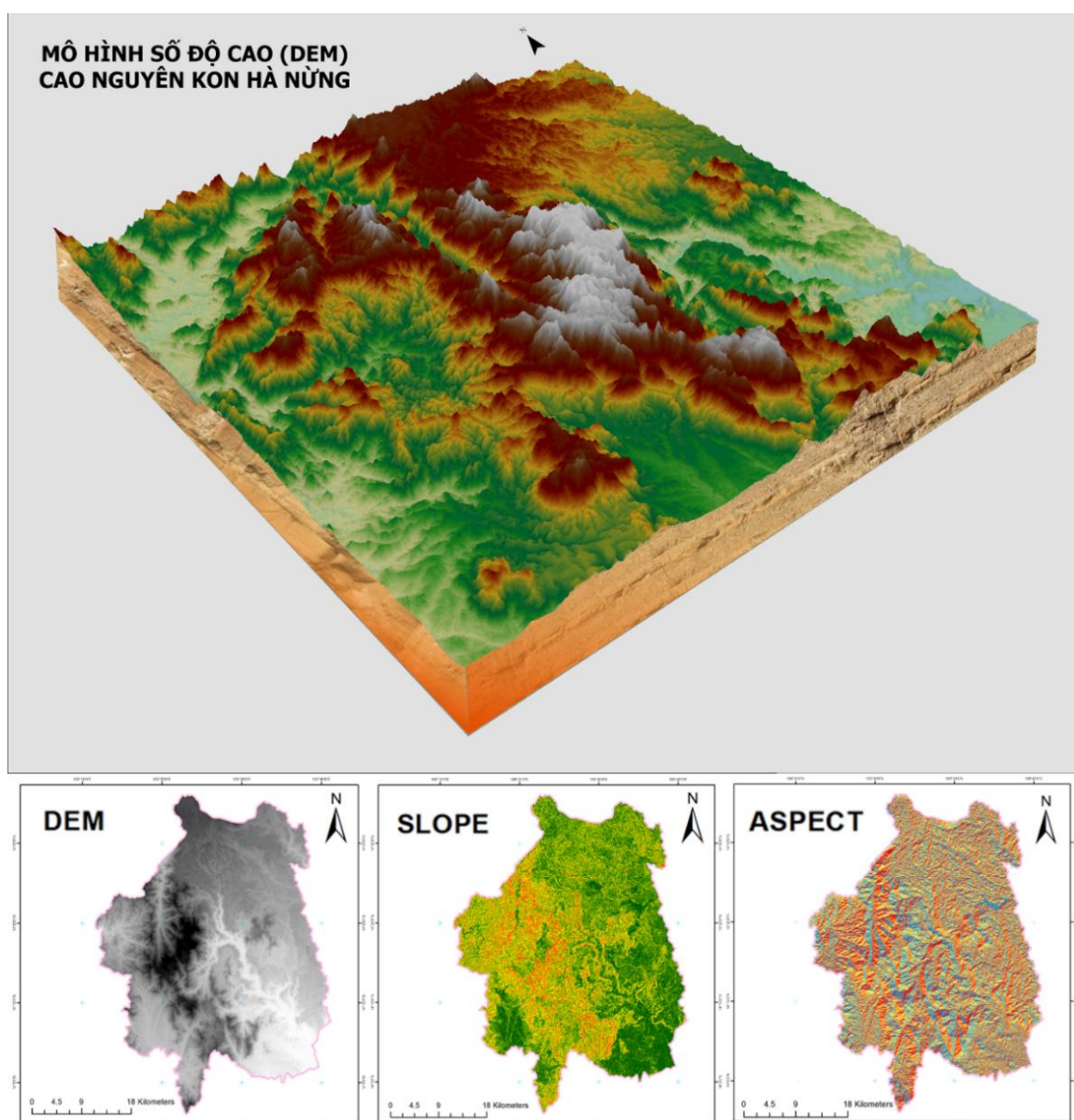
$$AVI = [NIR \cdot (1 - Red) \cdot (NIR - Red)]^{1/3} \quad (2.4)$$

AVI được ứng dụng rộng rãi trong các nghiên cứu giám sát cây trồng và thảm phủ theo chuỗi thời gian, giúp theo dõi sự phát triển và biến động của thảm thực vật một cách chi tiết hơn. Khi kết hợp sử dụng AVI và NDVI, người dùng có thể phân biệt rõ ràng hơn giữa các nhóm thực vật khác nhau, nâng cao độ chính xác trong phân loại và giám sát thảm thực vật so với việc chỉ sử dụng một chỉ số. Việc sử dụng AVI không chỉ tăng cường khả năng phát hiện sự khác biệt về mật độ và loại hình thảm thực vật mà còn giảm thiểu hiện tượng bão hòa tín hiệu thường gặp trong NDVI ở các khu vực có mật độ thảm thực vật rất cao. Chỉ số AVI giúp các nhà nghiên cứu có góc nhìn toàn diện hơn về tình trạng sức khỏe và sự phát triển của thảm thực vật, qua đó hỗ trợ hiệu quả trong quản lý tài nguyên rừng và nông nghiệp.

+ Chỉ số thực vật kháng khí quyển (ARVI - Atmospherically Resistant Vegetation Index): Chỉ số ARVI – một chỉ số toán học tương tự NDVI nhưng ít phụ thuộc vào điều kiện khí quyển nhờ sử dụng thêm kênh xanh lam và được tính theo công thức:

$$ARVI = \frac{NIR - 2 \cdot Red + Blue}{NIR + 2 \cdot Red + Blue} \quad (2.5)$$

Khi kết hợp với AVI sử dụng hai kênh đỏ và cận hồng ngoại, giúp người dùng giám sát cây trồng và thảm phủ theo chuỗi thời gian hiệu quả hơn, đồng thời xác định tốt hơn sự khác biệt giữa các nhóm thực vật so với việc chỉ sử dụng một chỉ số.



Hình 2.7. Dữ liệu độ cao, độ dốc và hướng khu vực nghiên cứu

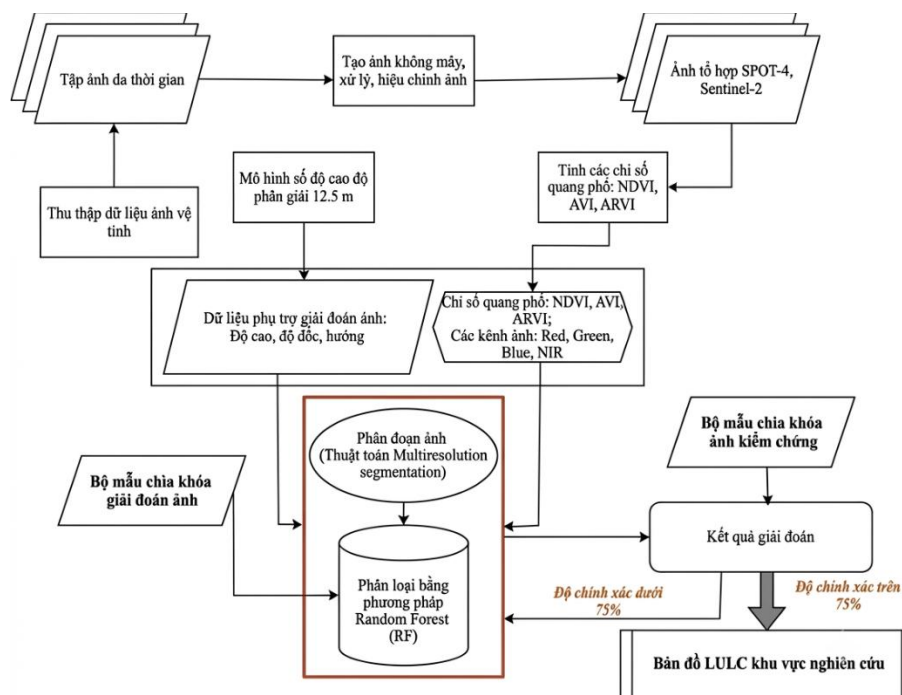
(Nguồn: Mô hình số độ cao 12,5 m từ vệ tinh ALOS PALSAR. <https://search.asf.alaska.edu/>)

Dữ liệu phụ trợ tích hợp: Theo mục tiêu luận án, dữ liệu về độ dốc, hướng và độ cao được sử dụng làm dữ liệu phụ trợ nhằm tăng cường độ chính xác của kết quả phân loại. Dữ liệu DEM có độ phân giải không gian 12,5 m được lấy từ vệ tinh ALOS PALSAR và được sử dụng trong nghiên cứu.

2.2.3.3. Kiểm định kết quả phân loại

Để đánh giá kết quả phân loại ảnh, nghiên cứu áp dụng phương pháp chọn mẫu ngẫu nhiên phân tầng, lựa chọn tối thiểu 10 điểm kiểm tra cho mỗi trạng thái rừng.

Sau đó, tiến hành kiểm chứng thực địa để so sánh các điều kiện thực tế với kết quả phân loại. Nếu độ chính xác tổng thể thấp hơn 75%, quy trình phân loại và phương pháp lựa chọn khóa giải đoán sẽ được xem xét lại nhằm nâng cao độ chính xác của bản đồ cuối cùng [153]. Quy trình đánh giá bao gồm:



Hình 2.8. Sơ đồ quy trình giải đoán ảnh thành lập bản đồ LULC

Xây dựng ma trận sai số (ma trận nhầm lẫn) giữa kết quả phân loại và mẫu kiểm chứng, từ đó tính toán hệ số Kappa (K). Theo Congalton (1999), ma trận sai số là phương pháp hiệu quả nhất để đánh giá độ chính xác trong phân loại viễn thám [52]:

- Tính toán độ chính xác tổng thể (Overall Accuracy) thể hiện tỷ lệ phần trăm số điểm được phân loại đúng so với tổng số điểm được kiểm tra.
- Xác định độ chính xác của người dùng (User Accuracy) cho mỗi lớp, cho biết khả năng một điểm được phân loại vào lớp cụ thể đó thực sự thuộc lớp đó.
- Xác định độ chính xác của nhà sản xuất (Producer Accuracy) cho mỗi lớp, phản ánh khả năng một điểm thực tế thuộc lớp đó được phân loại đúng.

Hệ số Kappa cung cấp một thước đo toàn diện về độ chính xác phân loại bằng cách xem xét toàn bộ ma trận sai số và tính đến khả năng sự đồng ý xảy ra ngẫu nhiên [97]. Công thức tính hệ số Kappa như sau:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} - X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} - X_{+i})} \quad (2.6)$$

Trong đó: r : Số lượng lớp trong phân loại; X_{ii} : Số điểm được phân loại đúng ở lớp i (phần tử trên đường chéo chính); X_{i+} : Tổng số điểm được phân loại vào lớp i ; X_{+i} : Tổng số điểm thực tế thuộc lớp i ; và N : Tổng số điểm được đánh giá.

Chỉ số Kappa thường nằm trong khoảng từ 0 đến 1; giá trị càng cao cho thấy sự phù hợp giữa bản đồ phân loại và dữ liệu kiểm chứng càng tốt. Theo Cục Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ, giá trị Kappa được phân loại như sau: $K \geq 0,8$ (độ chính xác cao); $0,4 \leq K < 0,8$ (độ chính xác trung bình); và $K < 0,4$ (độ chính xác thấp).

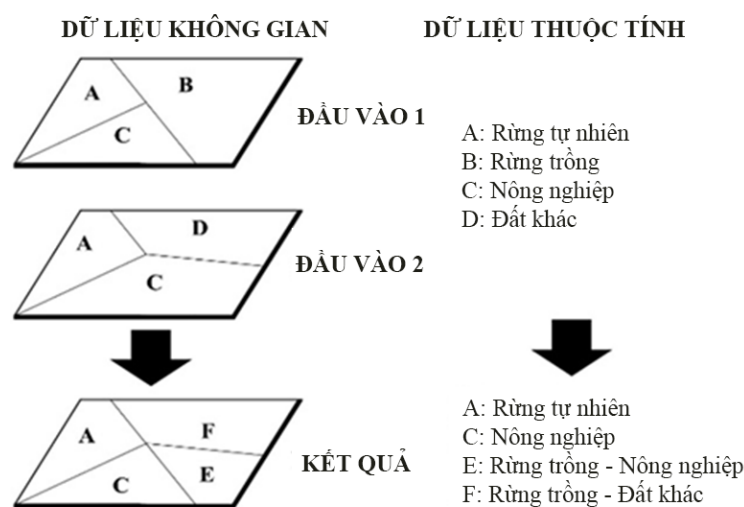
2.2.4. Đánh giá biến động trước phân loại

Để đảm bảo đồng nhất về điều kiện thu nhận ảnh và giảm thiểu ảnh hưởng của sự thay đổi về đặc điểm thực vật, dữ liệu đầu vào cần được thu thập từ các thời điểm khác nhau nhưng phải cùng mùa. Chỉ số thực vật NDVI, dựa trên tư liệu ảnh viễn thám, được sử dụng để đánh giá sự thay đổi về chất lượng rừng qua các giai đoạn. Các trạng thái rừng có thể vẫn đảm bảo trữ lượng theo khung phân loại nên không bị đổi trạng thái, nhưng thực tế chất lượng có biến động; tuy nhiên, khoảng biến động này chưa đến mức làm thay đổi trạng thái của loại rừng.

NDVI từ ảnh viễn thám (các mốc 2000, 2010, 2022, cùng tháng 4) được sử dụng làm chỉ báo quang phổ về mức độ xanh của tán lá và hoạt động quang hợp bề mặt, do NDVI phản ánh tỷ lệ phản xạ đỏ gần hồng ngoại liên quan đến sinh khối lá và che phủ thực vật. Việc chọn ảnh cùng tháng giúp giảm sai khác do chu kỳ sinh trưởng và điều kiện mùa vụ, tạo cơ sở để so sánh theo thời gian biến động của trạng thái rừng. Tuy nhiên, NDVI là chỉ báo gián tiếp: ở tán rừng dày, NDVI có thể bão hòa và không phản ánh đúng chất lượng rừng; đồng thời, chỉ báo này còn bị ảnh hưởng bởi nền đất, góc quan sát và điều kiện khí quyển.

2.2.5. Đánh giá biến động sau phân loại

Nghiên cứu thành lập bản đồ biến động LULC sau phân loại và kiểm chứng độ chính xác, đồng thời rà soát kết quả bản đồ LULC tại các thời điểm.



Hình 2.9. Mô tả thành lập bản đồ biến động LULC

Để thành lập bản đồ biến động LULC cho các giai đoạn 2000–2010 và 2010–2022 tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, đầu tiên cần xác định thuộc tính che phủ đất hiện tại cho từng đường viền của bản đồ LULC trong các giai đoạn 2000 – 2010 và 2010 – 2022. Theo đó, có bảy loại LULC, đó là rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu, trung bình, nghèo và phục hồi; rừng trồng; mặt nước; và diện tích khác.

Thứ hai, chồng xếp hai lớp bản đồ có các thuộc tính lớp phủ mặt đất đồng nhất theo các năm tương ứng của bản đồ biến đổi thảm thực vật, dựa trên thuật toán Intersect trong phần mềm ArcGIS Pro 3.0. Kết quả chồng xếp sẽ được sử dụng để xây dựng ma trận biến động và đánh giá biến động trong sự thay đổi về diện tích rừng. Nguyên tắc xây dựng ma trận biến động như đã trình bày tại mục 1.2.4. Phương pháp chồng xếp bản đồ được mô phỏng như trong Hình 2.9.

2.3. ỨNG DỤNG VIỄN THÁM VÀ GIS TRONG ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG SINH KHỐI

Việc lựa chọn dữ liệu quang học và mô hình hồi quy tuyến tính trong luận án dựa trên các căn cứ sau: (i) với hai mốc lịch sử 2000 và 2010, các nguồn dữ liệu thế hệ mới không tồn tại - GEDI chỉ có từ năm 2019, Sentinel-1 SAR từ năm 2014 - nên không thể sử dụng để hồi cứu, trong khi SPOT-4 là lựa chọn khả thi và có căn cứ; (ii) hồi quy tuyến tính bảo đảm tính minh bạch, giải thích được và phù hợp với quy mô

mẫu ô tiêu chuẩn hiện có ở cấp Tier 2 của IPCC, trong khi học sâu đòi hỏi bộ mẫu lớn và dễ quá khớp. Các hướng khai thác GEDI, SAR đa phân cực, LiDAR và học sâu được phân tích và đề xuất cho nghiên cứu tiếp theo tại Mục 3.4.6.

2.3.1. Xây dựng phương trình ước tính sinh khối trên mặt đất cho các kiểu rừng

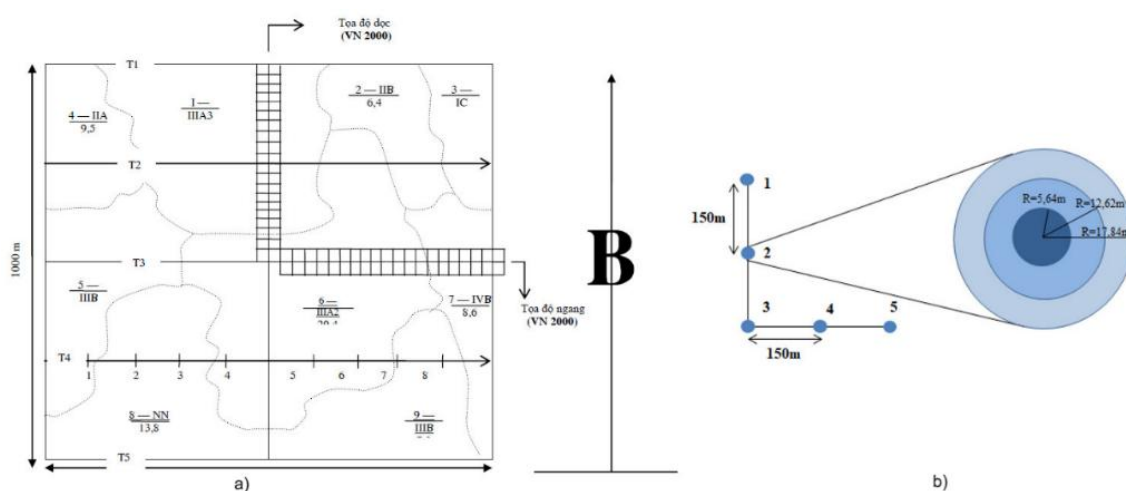
Phương pháp hồi quy tuyến tính là một công cụ dùng để xây dựng các mô hình hồi quy tương quan nhằm ước tính sinh khối bằng cách sử dụng dữ liệu viễn thám và dữ liệu đo đếm tại các ô tiêu chuẩn trên thực địa. Ô tiêu chuẩn thực địa được chọn ngẫu nhiên nhằm xác định mật độ và trữ lượng cây. Dữ liệu các ô tiêu chuẩn thường bao gồm đường kính thân cây tại 1,3 m, chiều cao và loại cây. Một số ô tiêu chuẩn cũng có thể bao gồm các thông số bổ sung như tuổi cây, diện tích và chỉ số sinh trưởng. Sử dụng các chỉ số đo từ ảnh viễn thám như chỉ số thực vật, chỉ số ánh sáng và vị trí không gian để tạo ra các biến độc lập cho phương trình ước tính sinh khối. Quá trình ước tính sinh khối bắt đầu bằng việc xây dựng phương trình hồi quy tuyến tính từ các biến độc lập trong dữ liệu ảnh viễn thám và dữ liệu ô tiêu chuẩn thực địa. Thông thường, các biến độc lập được lựa chọn dựa trên hiểu biết về mối quan hệ giữa trạng thái rừng và ảnh viễn thám. Sau khi phương trình được xây dựng, có thể sử dụng phương trình này để ước tính sinh khối cho các khu vực trong rừng không có dữ liệu sinh khối trực tiếp. Bằng cách áp dụng phương trình cho dữ liệu ảnh viễn thám, có thể dự đoán sinh khối cây ở các vùng khác nhau trong rừng. Phương pháp hồi quy tuyến tính mang lại nhiều lợi ích trong việc ước tính sinh khối từ dữ liệu đo trữ lượng mặt đất và dữ liệu ảnh viễn thám. Phương pháp này cho phép chúng ta tiết kiệm thời gian và nguồn lực so với việc thực hiện các phép đo sinh khối trực tiếp trên toàn bộ khu rừng.

Điều quan trọng là cần đảm bảo tính chính xác của dữ liệu ô tiêu chuẩn và dữ liệu ảnh viễn thám, đồng thời áp dụng các biến độc lập phù hợp. Ngoài ra, việc hiểu và tinh chỉnh các yếu tố khác như đặc trưng của loài cây và đặc điểm môi trường cũng quan trọng để đạt được kết quả chính xác. Ngoài các bước thu thập và xử lý ảnh vệ tinh, quy trình ước tính sinh khối bằng phương trình hồi quy tuyến tính được thực

hiện thông qua 2 bước chính: xác định sinh khối tại điểm ô tiêu chuẩn và xác định phương trình ước tính sinh khối trên mặt đất cho từng kiểu rừng.

2.3.1.1. Xác định sinh khối tại điểm ô tiêu chuẩn

Nghiên cứu khảo sát 04 công thức tính sinh khối thực nghiệm. Các công thức đều sử dụng các chỉ tiêu đo đếm cơ bản, phù hợp với dữ liệu tiêu chuẩn kế thừa từ kết quả dự án “Chương trình điều tra, đánh giá và theo dõi diễn biến tài nguyên rừng toàn quốc” chu kỳ III (2001 - 2005), chu kỳ IV (2006 - 2010), chu kỳ V (2016 - 2020) do Bộ Nông nghiệp và PTNT chủ trì.

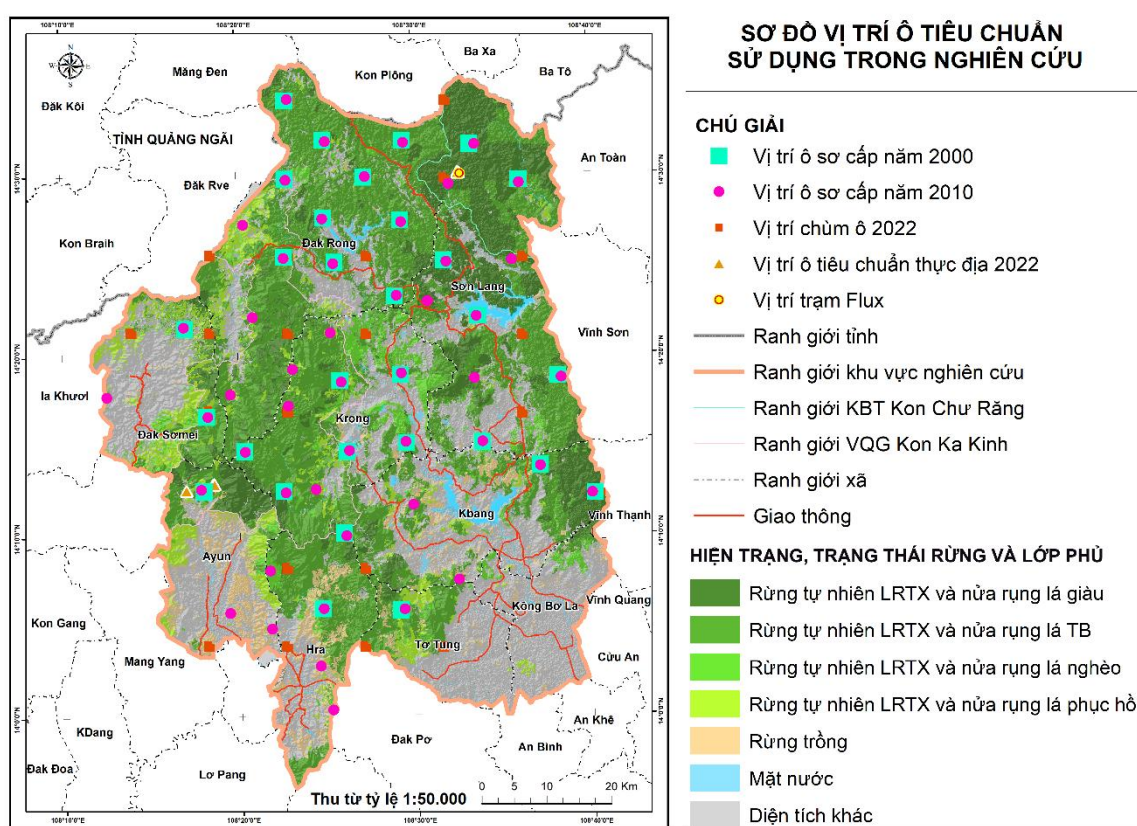


Hình 2.10. Thiết kế ô sơ cấp (a) và chùm ô (b)

Trong đó, chu kỳ III và IV sử dụng hệ thống ô sơ cấp, trong khi chu kỳ V sử dụng hệ thống chùm ô theo dõi (Hình 2.10).

Sử dụng bộ dữ liệu 82 ô tiêu chuẩn đo tại thời điểm đầu chu kỳ (năm 2001) tại tỉnh Gia Lai để chuẩn hóa và tính toán sinh khối; đối với năm 2010, sử dụng dữ liệu 80 ô tiêu chuẩn đo vào cuối chu kỳ IV (năm 2010). Theo đó, diện tích mỗi ô tiêu chuẩn là 500 m² (20 m x 25 m) được thực hiện theo “Biện pháp kỹ thuật điều tra ô sơ cấp của Viện Điều tra, Quy hoạch rừng”. Mỗi vị trí ô sơ cấp bao gồm 40 ô tiêu chuẩn, được chia thành hai dãy, mỗi dãy 20 ô tiêu chuẩn, cách nhau 25 m: từ tâm ô sơ cấp về hướng bắc và từ tâm ô sơ cấp về hướng đông. Cự ly giữa các ô sơ cấp điều tra trữ lượng được giữ nguyên như từ chu kỳ đầu, là 5,65 x 5,65 km, nhằm bảo đảm tính hệ thống và tính kế thừa để theo dõi liên tục.

Đối với năm 2022, sử dụng dữ liệu từ 120 ô tiêu chuẩn trong các chùm ô thuộc Dự án "Điều tra, đánh giá và giám sát tài nguyên rừng quốc gia, giai đoạn 2016-2020". Dữ liệu được sử dụng là từ chùm ô tỉnh Gia Lai, thực hiện năm 2020, kết hợp với điều tra bổ sung năm 2021 và 2022. Trên mỗi chùm ô tiêu chuẩn, thiết lập 05 ô tiêu chuẩn hình tròn theo dạng chữ L; diện tích ô tiêu chuẩn là 1000 m², khoảng cách giữa tâm của 2 ô tiêu chuẩn liền kề là 150 m. Các chỉ tiêu đo đếm trong ô tiêu chuẩn thuộc hệ thống ô sơ cấp và chùm ô bao gồm: đường kính các cây gỗ tại vị trí chiều cao ngang ngực (1,3 m), tên cây gỗ, phẩm chất cây, chiều cao vút ngọn và chiều cao dưới cành của 03 cây gần tâm ô nhất.



Hình 2.11. Vị trí các ô tiêu chuẩn sử dụng trong nghiên cứu

Các chỉ tiêu đo đếm tại ô tiêu chuẩn được sử dụng trong các công thức bao gồm: đường kính cây đo lại 1,3 m; số lượng và chiều cao cây trong ô tiêu chuẩn.

Để xác định sinh khối tại các ô tiêu chuẩn, nghiên cứu sinh đã tìm hiểu nhiều phương trình ước tính sinh khối trong và ngoài nước trong đó nổi bật có 4 phương trình của các tác giả Chave [50], Chaiyo [48], phương trình sinh khối áp dụng cho

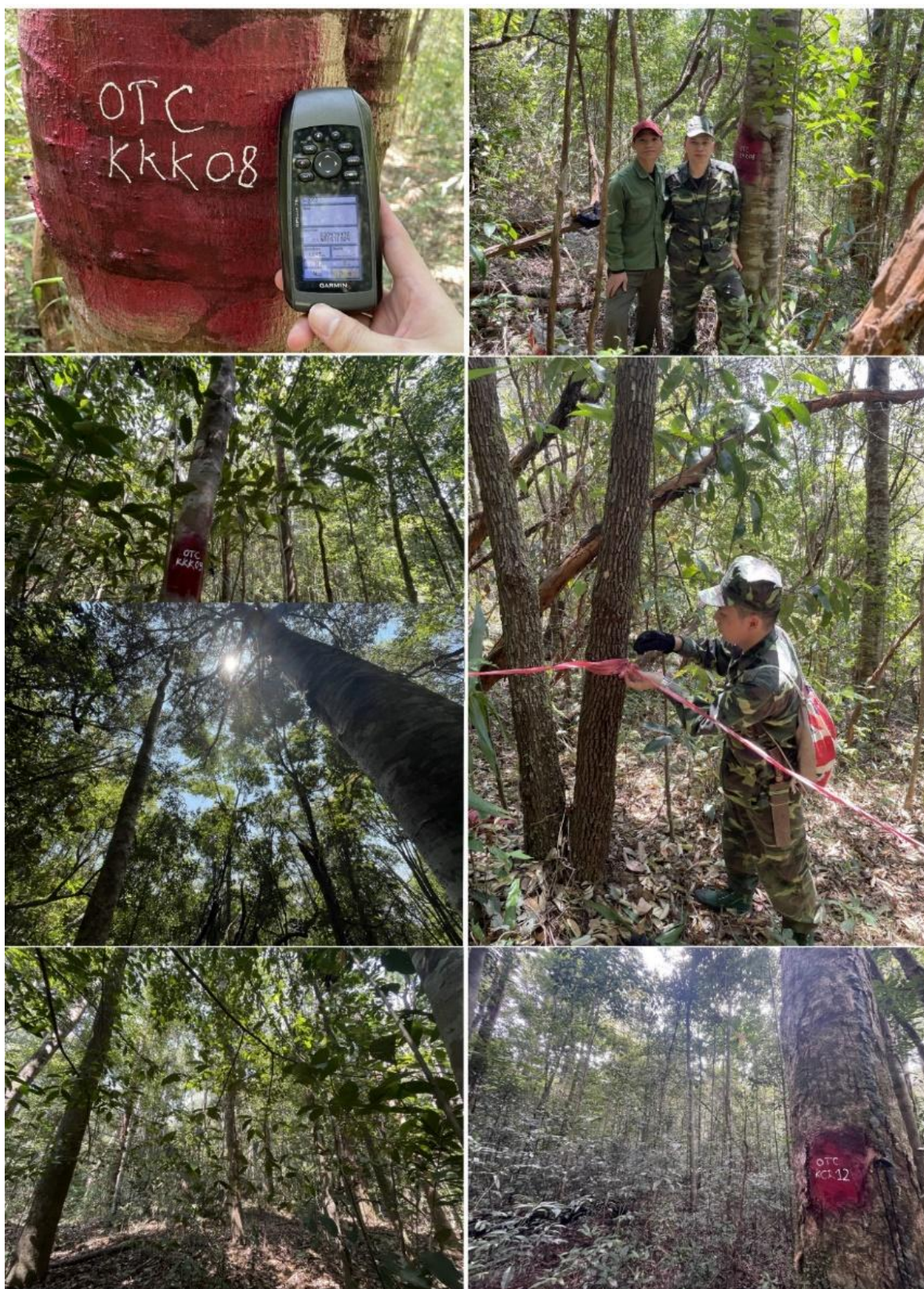
rừng thường xanh khu vực nhiệt đới Việt Nam được xây dựng tuân theo các hướng dẫn của IPCC [49] và phương trình từ kết quả nghiên cứu của tác giả Bảo Huy và cộng sự.

Nghiên cứu lựa chọn sử dụng phương trình của nhóm tác giả Bảo Huy năm 2016 khi nghiên cứu xây dựng phương trình thực nghiệm xác định sinh khối cho khu vực Tây Nguyên [70].

$$AGB = 304,1668(D^2H^{0,7})^{0,95102} \quad (2.7)$$

Trong đó, D là đường kính cây tại 1,3 m và H là chiều cao vút ngọn của cây. Cần lưu ý rằng để giảm khả năng phát sinh sai số hệ thống, các phương trình thực nghiệm xác định sinh khối lựa chọn cần đáp ứng các yêu cầu sau: (1) Các phương trình thực nghiệm được xây dựng trên cơ sở khoa học vững chắc, trên tập số liệu có dung lượng lớn; (2) Chất lượng và độ tin cậy của phương trình ước tính sinh khối có thể được nâng cao khi có nhiều nhất sự tham gia của các biến số lâm phần như mật độ gỗ... và thực hiện theo các quy mô không gian khác nhau; (3) Các phương trình thực nghiệm địa phương có thể là sự thay thế tốt hơn và dự kiến sẽ cung cấp độ tin cậy cao hơn so với phương trình chung Chave và cộng sự (2014); (4) Hiệu quả của phương trình thực nghiệm ngoài thể hiện ở các chỉ số đánh giá sai số phương trình thì yếu tố đơn giản, dễ thực hiện triển khai ở quy mô lớn cũng cần được xem xét.

Bộ ô tiêu chuẩn được chia theo tỷ lệ: một phần dùng để xây dựng (huấn luyện) phương trình hồi quy sinh khối và một phần độc lập dùng để kiểm định (đánh giá qua R^2 và RMSE). Đối với các ô rơi vào đai rừng giàu, nơi chỉ số quang học dễ bão hòa, việc lựa chọn dạng hàm Lin–Log (logarit hóa VI) giúp giảm hiện tượng bão hòa ở giá trị VI cao; đồng thời, biến trạng thái rừng (LR) được đưa vào nhằm bổ khuyết thông tin cấu trúc khi tín hiệu phổ đã bão hòa.



Hình 2.12. Đo đếm ô tiêu chuẩn tại hiện trường

2.3.1.2. Xác định phương trình sinh khối trên mặt đất cho các kiểu rừng

a) Gán mã số cho các kiểu, loại rừng

Trước tiên, cần gán mã số theo cấp trữ lượng cho các kiểu rừng tại khu vực nghiên cứu, căn cứ vào kết quả giải đoán ảnh để xây dựng bản đồ LULC của khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng. Căn cứ vào hệ thống phân loại, gán mã cho loại đất và loại rừng theo Bảng 2.3. Mã hóa các loại rừng theo thứ tự từ trữ lượng thấp đến cao, tương ứng với các mức từ 1 đến 4.

Bảng 2.3. Mã hóa các loại rừng khu vực nghiên cứu

STT	Ký hiệu	Loại rừng	Trữ lượng (m ³ /ha)	Mã hóa
1	TXP	Rừng lá rộng thường xanh phục hồi	< 10	1
2	TXN	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rừng lá nghèo	10 - 100	2
3	TXB	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rừng lá trung bình	100 - 200	3
4	TXG	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rừng lá giàu	> 200	4

b) Tính toán chỉ số thực vật

Chỉ số thực vật (vegetation index - VI) là giá trị thể hiện sự kết hợp mức độ phản xạ bề mặt ở 2 hay nhiều bước sóng trở lên, được thiết kế để làm nổi bật một đặc tính cụ thể của thực vật. Mỗi VI được thiết kế để làm nổi bật một đặc tính thực vật cụ thể và cho phép so sánh theo không gian và theo thời gian về hoạt động quang hợp và cấu trúc tầng tán thực vật. Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) là công cụ quan trọng trong nghiên cứu sinh thái, giúp theo dõi sự tăng trưởng, phát triển và biến động của lớp thực vật. Chỉ số NDVI được ứng dụng rộng rãi trong nông nghiệp và lâm nghiệp để phát hiện biến động thực vật qua các thời kỳ, cảnh báo dịch bệnh, đánh giá sự phát triển của cây trồng và dự báo năng suất, đặc biệt thông qua việc sử dụng ảnh viễn thám.

Chỉ số NDVI được tính toán theo công thức 2.3 [115, 134].

c) Xây dựng phương trình ước tính sinh khối cho các kiểu rừng

Trên cơ sở sinh khối xác định được tại các ô tiêu chuẩn và các chỉ số thực vật được xác định từ sản phẩm ảnh viễn thám quy về vị trí ô tiêu chuẩn, việc xây dựng các phương trình ước tính sinh khối cho toàn khu vực nghiên cứu có thể được biểu diễn tổng quát dưới dạng hàm $AGB=f(VI, LR)$. Trong mô hình, biến phụ thuộc là sinh khối trên mặt đất (AGB); các biến độc lập gồm chỉ số thực vật (VI) - đại lượng liên tục và kiểu/trạng thái rừng (LR) - biến định hạng theo cấp trữ lượng (Bảng 2.3). Do mô hình chỉ gồm hai biến độc lập, mức tương quan tuyến tính giữa VI và LR là thấp; kết quả kiểm tra cho thấy không xuất hiện hiện tượng đa cộng tuyến nghiêm trọng. Việc lựa chọn dạng hàm không mang tính tiên nghiệm mà dựa trên khảo sát đồng thời cả bốn dạng (Log-Log, Log-Lin, Lin-Log, Lin-Lin) cho từng thời điểm, sau đó chọn dạng cho hệ số xác định R^2 cao nhất và sai số RMSE thấp nhất; theo tiêu chí này, dạng Lin-Log phù hợp nhất cho các năm 2000, 2010 và dạng Log-Lin cho năm 2022.

Một số phương trình hồi quy đơn giản thường được sử dụng trong các tài liệu khoa học có 4 dạng cơ bản sau đây:

$$\log Y = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i \cdot \log X_i \quad (2.8); \quad \log Y = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i \cdot X_i \quad (2.9)$$

$$Y = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i \cdot \log X_i \quad (2.10); \quad Y = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i \cdot X_i \quad (2.11)$$

Thực tế, khảo sát số liệu sinh khối của các ô tiêu chuẩn cho thấy giá trị AGB thường có quy mô bậc 4, trong khi giá trị VI, LR có quy mô bậc 0 hoặc 1. Do vậy, để đảm bảo nguyên tắc thống kê và tránh sai số trong quá trình ước lượng, tính toán, các dạng thức chẳng hạn như hàm logarit được sử dụng nhằm làm giảm bậc của biến nhân tố và các yếu tố được xét đến. Với cách tiếp cận như vậy, nghiên cứu khảo sát 4 phương trình như sau:

$$1. \text{ Dạng Log - Log: } \log_{10}(AGB) = a \cdot \log_{10}(VI) + b \cdot LR + c \quad (2.12)$$

$$2. \text{ Dạng Log - Lin: } \log_{10}(AGB) = a \cdot (VI) + b \cdot LR + c \quad (2.13)$$

$$3. \text{Dạng Lin - Log: } AGB = a.\log_{10}(VI) + b. LR - c \quad (2.14)$$

$$4. \text{Dạng Lin - Lin: } AGB = a.(VI) + b. LR - c \quad (2.15)$$

Dạng Log-Log: Dạng log-log tuyến tính hóa mối quan hệ phi tuyến giữa AGB và VI, giúp xử lý dữ liệu có phân phối lệch và giảm ảnh hưởng của các giá trị ngoại lai. Việc áp dụng logarit cho cả hai biến giúp mô hình phản ánh tốt hơn sự tăng trưởng theo cấp số nhân của sinh khối khi VI tăng [111]. Nhiều nghiên cứu đã cho thấy dạng log-log cải thiện độ chính xác trong ước tính AGB, đặc biệt trong các khu vực rừng nhiệt đới với thảm thực vật dày đặc [92].

Dạng Log - Lin: Chỉ áp dụng logarit cho AGB, giúp điều chỉnh phân phối của biến phụ thuộc và làm giảm ảnh hưởng của các giá trị sinh khối lớn bất thường. VI được giữ nguyên để phản ánh mối quan hệ tuyến tính trực tiếp với AGB sau khi đã được logarit hóa. Dạng này phù hợp khi sự thay đổi nhỏ trong VI dẫn đến sự thay đổi tỷ lệ trong AGB, đơn giản hóa mô hình mà vẫn giữ được tính chính xác [119].

Dạng Lin - Log: Sử dụng hàm logarit hóa VI giúp giảm thiểu hiện tượng bão hòa ở các giá trị VI cao, thường xảy ra trong các khu vực có thảm thực vật dày đặc. Điều này làm tăng độ nhạy của mô hình đối với sự thay đổi của VI ở mức cao [62]. Dạng Lin - Log hữu ích khi AGB tăng tuyến tính với logarit của VI, cho phép mô hình phản ánh tốt hơn mối quan hệ thực tế giữa VI và AGB [144].

Dạng Lin - Lin: Đây là dạng tuyến tính đơn giản, không sử dụng biến đổi logarit, phù hợp khi mối quan hệ giữa VI, LR và AGB là tuyến tính hoặc gần tuyến tính. Đây là mô hình dễ hiểu, dễ áp dụng và thường được sử dụng trong các trường hợp dữ liệu có phân phối chuẩn [104]. Mô hình đơn giản, tiết kiệm thời gian tính toán và dễ triển khai trong thực tế. Tuy nhiên, hiệu quả có thể giảm nếu dữ liệu có hiện tượng phi tuyến mạnh [74].

Lựa chọn phương trình thích hợp là việc lựa chọn hàm có các trọng số phản ánh mối quan hệ khách quan giữa giá trị sinh khối và phản xạ phổ ảnh viễn thám, cũng như kiểu loại rừng. Một trong nhiều cách tiếp cận để xây dựng các phương trình là dựa trên lý thuyết hàm hồi quy, kết hợp với việc xử lý và tổ hợp ảnh ở cấp độ cao. Kết quả của bước thực hiện sẽ được kiểm tra, đánh giá bằng cách thực hiện các phép

đo trên ảnh giá trị sinh khối để đối chứng với các số liệu quan trắc ô tiêu chuẩn điều tra rừng cùng thời gian với số liệu đã đưa vào xử lý.

d) Kiểm chứng tính chính xác của phương trình

Việc lập bản đồ trữ lượng sinh khối bắt đầu bằng việc xây dựng mối quan hệ giữa các biến số như bản đồ LULC, thảm thực vật, phân loại trữ lượng rừng, giá trị các chỉ số thực vật (VI) dựa trên ảnh viễn thám, cùng với dữ liệu sinh khối được tính toán từ số liệu đo đạc tại các ô tiêu chuẩn. Phân tích tương quan và hồi quy tuyến tính được sử dụng để thiết lập mối quan hệ. Trước khi tiến hành phân tích, kiểm định Kolmogorov-Smirnov được áp dụng để kiểm tra tính chuẩn của dữ liệu, đảm bảo các giả định thống kê của mô hình hồi quy được đáp ứng. Các phần mềm thống kê như SPSS, R hoặc Excel được sử dụng để phân tích mối quan hệ giữa các giá trị VI từ ảnh và trạng thái rừng đã được gán giá trị AGB thực tế từ các ô tiêu chuẩn, từ đó tính toán hệ số tương quan (r) biểu thị mức độ liên quan giữa chúng. Trong mô hình ước tính, VI và trạng thái rừng (LR) là các biến độc lập, trong khi AGB là biến phụ thuộc.

Để đánh giá độ chính xác của mô hình, hệ số xác định R^2 và sai số RMSE được sử dụng. Hệ số xác định R^2 được tính theo công thức [61]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum e^2}{\sum y^2} \quad (2.16)$$

Trong đó, e là sai số dự đoán (giữa giá trị dự đoán và giá trị thực tế); y là hiệu giữa giá trị thực tế và giá trị trung bình của biến phụ thuộc. Tuy nhiên, việc đánh giá R^2 cần xem xét trong bối cảnh cụ thể và lĩnh vực nghiên cứu, bởi R^2 cao không nhất thiết đảm bảo mô hình phù hợp.

Nếu $R = 1$, mối liên hệ giữa x và y được xác định; nghĩa là, cho bất kỳ giá trị nào của x , chúng ta có thể xác định được giá trị của y . Nếu $R = 0$, hai biến x và y hoàn toàn độc lập, không có mối liên hệ với nhau. Giá trị R^2 được phân loại như sau: $0,1 \leq R^2 < 0,3$ cho biết mối tương quan yếu, $0,3 \leq R^2 < 0,5$ cho biết mối tương quan trung bình, $0,5 \leq R^2$ cho biết mối tương quan mạnh [61].

Kết hợp sử dụng sai số RMSE để đánh giá chất lượng và số lượng của trữ lượng sinh khối trên mặt đất (tức là AGB thu được từ phân tích hồi quy tuyến tính) bằng cách so sánh chúng với trữ lượng sinh khối đo được ngoài thực địa. Giá trị RMSE

càng thấp thì độ chính xác càng cao. Sai số RMSE giữa giá trị mô hình và giá trị đo thực tế tại ô tiêu chuẩn cũng được nghiên cứu. Sai số RMSE tính theo công thức [49]:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2.17)$$

Trong đó y là hiệu giữa giá trị thực tế và giá trị trung bình của biến phụ thuộc; n là số lượng mẫu; y_i là giá trị thực tế và $\hat{y}_i$ là giá trị dự đoán. RMSE đánh giá độ chính xác định lượng của sinh khối trên mặt đất (AGB) dự đoán từ mô hình hồi quy bằng cách so sánh với giá trị AGB đo được tại thực địa. Giá trị RMSE càng thấp cho thấy mô hình dự đoán càng chính xác. Việc kết hợp sử dụng cả R^2 và RMSE giúp đánh giá toàn diện độ phù hợp và hiệu suất của mô hình hồi quy trong ước tính sinh khối, đảm bảo kết quả đáng tin cậy, phục vụ công tác quản lý và quy hoạch lâm nghiệp.

e) Xác định trữ lượng các-bon

Từ bản đồ ước tính sinh khối cho khu vực nghiên cứu, trữ lượng các-bon của khu vực nghiên cứu được xác định thông qua hệ số chuyển đổi sau:

$$\text{Trữ lượng các-bon} = 0,47 \times \text{Sinh khối} \quad (2.18)$$

Trong công thức 2.19, hệ số chuyển đổi 0,47 đại diện cho tỷ lệ trung bình các-bon lưu trữ trong sinh khối khô theo hướng dẫn IPCC [49]. Sinh khối cây được ước tính thông qua các phương pháp toán học dựa trên các thông số như đường kính ngang ngực, chiều cao cây hoặc khối lượng gỗ. Sau khi tính được sinh khối, nhân với hệ số 0,47 để xác định lượng các-bon lưu trữ. Công thức sẽ giúp các nhà khoa học đánh giá khả năng hấp thụ các-bon của rừng.

2.3.2. Phương pháp xây dựng đường tham chiếu rừng (FRL) và ước tính năng lực hấp thụ CO₂ rừng tự nhiên

Đường tham chiếu rừng (FRL) được xây dựng theo khung phương pháp luận của IPCC (2006) và hướng dẫn kỹ thuật của Chương trình UN-REDD (2014), trong đó lượng CO₂ phát thải hoặc hấp thụ được tính dựa trên sự thay đổi bể chứa các-bon sinh khối trên mặt đất (AGB) giữa hai thời điểm quan trắc theo công thức: $\Delta C = (AGB_{t2} - AGB_{t1}) \times f_c \times \frac{44}{12}$, với hệ số các-bon trong sinh khối $f_c = 0,47$ theo quy

định mức định của IPCC cho rừng nhiệt đới [112]. Phạm vi tính toán được giới hạn ở bề chứa sinh khối trên mặt đất (AGB) do tính khả thi của nguồn dữ liệu hiện có. Đây là lựa chọn phù hợp với Tier 2 trong hướng dẫn IPCC khi có số liệu từ điều tra thực địa kết hợp với viễn thám. Dữ liệu lịch sử phát thải/hấp thụ CO₂ giai đoạn 2000 - 2022 được tính từ chênh lệch sinh khối qua ba mốc thời gian (từ ảnh SPOT-4 năm 2000, 2010 và Sentinel-2 năm 2022 kết hợp hệ thống ô tiêu chuẩn), sau đó được sử dụng để lập đường FRL theo hai phương án của UN-REDD [45, 49]: nếu xu hướng phát thải có quy luật thì dùng mô hình hồi quy tuyến tính để dự báo cho các năm tiếp theo; nếu phát thải mang tính ngẫu nhiên thì FRL tương lai là giá trị trung bình phát thải hàng năm trong quá khứ.

Trên cơ sở đường FRL lịch sử này, ba kịch bản giảm mất rừng và suy thoái rừng (giảm 30 %, 50 % và 80 % phát thải) được xây dựng nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho chương trình REDD+ và ước tính giá trị tín chỉ các-bon tiềm năng tại cao nguyên Kon Hà Nừng, theo quy định trong hướng dẫn IPCC/REDD [112]. Trong luận án, đường FRL được xây dựng theo phương án rỗng có ghép nối: lượng phát thải từ mất rừng và suy thoái rừng giảm theo tỷ lệ kịch bản, đồng thời lượng hấp thụ trên phần diện tích tránh được mất rừng được cập nhật qua hệ số phục hồi $\phi = 0,70$ (suy từ tỷ lệ phục hồi rừng tự nhiên giai đoạn 2010 – 2022) và hệ số chiết khấu rủi ro đảo ngược $buffer = 0,85$ (tương ứng mức trích lập dự phòng 15 % theo Chương trình giảm phát thải vùng Nam Trung Bộ và Tây Nguyên, thuộc Liên minh LEAF).

2.4. ĐỊNH GIÁ RỪNG TRỒNG

Ngoài rừng tự nhiên, rừng trồng cũng chiếm một tỷ lệ diện tích nhất định tại cao nguyên Kon Hà Nừng và có xu hướng tăng trong giai đoạn 2000 – 2022. Việc đánh giá giá trị kinh tế của rừng trồng trong mục này không nhằm mục đích thẩm định tài sản, mà nhằm: (i) lý giải động lực kinh tế của các hoạt động chuyển đổi rừng tự nhiên sang rừng trồng một trong các nguyên nhân trực tiếp của biến động LULC; và (ii) cung cấp cơ sở định lượng để so sánh hiệu quả kinh tế giữa rừng trồng và dịch vụ hệ sinh thái từ rừng tự nhiên, phục vụ cho việc đề xuất các giải pháp sinh kế và định hướng quản lý bảo vệ rừng bền vững.

2.4.1. Phương pháp định giá rừng trồng

Theo Thông tư số 32/2018/TT-BNNPTNT ngày 16 tháng 11 năm 2018 của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn về quy định phương pháp định giá rừng và khung giá rừng, giá rừng đặc dụng, rừng phòng hộ và rừng sản xuất là rừng trồng được tính bằng tiền (đồng/ha) cho mỗi hecta rừng trồng mà chủ rừng được hưởng trong thời gian được giao hoặc cho thuê rừng. Giá trị rừng trồng (Grt) bao gồm tổng chi phí đã đầu tư tạo rừng (CPrt) và thu nhập dự kiến (TNrt) từ rừng trồng tại thời điểm định giá, được tính theo công thức:

$$Grt = CPrt + TNrt \quad (2.19)$$

Trong trường hợp rừng mới trồng chưa thành rừng và có liên quan đến hoạt động thu hồi, chuyển đổi mục đích sử dụng đất, giá rừng trồng tối thiểu được xác định bằng tổng chi phí đã đầu tư để tạo rừng (CPrt). Tổng chi phí đầu tư được xác định như sau:

$$CPrt = \sum_{i=1}^n Ci(1+r)^i \quad (2.20)$$

Trong đó: CPrt: Tổng chi phí đã đầu tư tạo rừng; Ci: Chi phí đầu tư tạo rừng trong năm thứ i; i: Năm thứ i, bắt đầu từ i = 1 đến năm định giá n; r: Tỷ lệ chiết khấu được xác định theo quy định tại điểm b khoản 4 Điều 5 Thông tư 32/2018/TT-BNNPTNT; n: Thời gian tính từ năm bắt đầu đầu tư đến năm định giá.

Thu nhập dự kiến của rừng trồng được tính như sau:

$$TNrt = \frac{B - C}{(1+r)^t} \quad (2.21)$$

Trong đó: B là tổng doanh thu (đồng) của khu rừng cần định giá từ lâm sản (gỗ, lâm sản ngoài gỗ), dịch vụ môi trường rừng, hoạt động nghiên cứu khoa học, giảng dạy, thực tập, du lịch sinh thái, nghỉ dưỡng, giải trí và các nguồn thu khác, tính từ thời điểm định giá đến hết chu kỳ kinh doanh của rừng trồng. Đối với rừng phòng hộ và rừng đặc dụng là rừng trồng, thời gian tính được cộng thêm 10 năm kể từ thời điểm định giá; C là tổng chi phí (đồng) của khu rừng cần định giá, tính từ thời điểm định giá đến hết chu kỳ kinh doanh của rừng trồng; r là tỷ lệ chiết khấu được xác định theo quy định tại điểm b khoản 4 Điều 5 Thông tư 32/2018/TT-BNNPTNT; và t là thời

gian sử dụng rừng còn lại (tính bằng năm) từ năm định giá đến hết thời hạn được giao rừng hoặc cho thuê rừng.

Việc áp dụng các công thức trên giúp xác định chính xác giá trị kinh tế của rừng trồng, phù hợp với quy định pháp luật hiện hành và tạo cơ sở cho việc quản lý, khai thác và sử dụng rừng bền vững.

2.4.2. Phân tích ước tính thu nhập từ rừng tự nhiên và rừng trồng tại cao nguyên Kon Hà Nừng , tỉnh Gia Lai

Phương pháp phân tích ước tính thu nhập từ rừng tự nhiên và rừng trồng tại cao nguyên Kon Hà Nừng được triển khai theo một quy trình tích hợp viễn thám - GIS - điều tra thực địa và mô hình kinh tế, nhằm đảm bảo tính không gian, tính thời gian và tính kinh tế của các nguồn thu. Trước hết, sử dụng ảnh Sentinel-2 (2022) kết hợp với phân loại hướng đối tượng và thuật toán Random Forest để tách lô rừng trồng, xác định diện tích theo loài cây và năm trồng; bản đồ diện tích rừng tự nhiên được xây dựng từ chuỗi ảnh SPOT-4 (2000, 2010) và Sentinel-2 (2022) nhằm xác định biến động diện tích. Trên cơ sở bản đồ và ô tiêu chuẩn điều tra thực địa, ước tính sinh khối trên mặt đất (AGB) cho từng đơn vị không gian bằng mô hình hồi quy giữa các chỉ số quang học, thông số địa hình và dữ liệu đo đếm cây (N, D, H); AGB được chuyển đổi thành trữ lượng các-bon bằng hệ số chuyển đổi. Thu nhập từ các-bon được tính bằng cách quy đổi thay đổi trữ lượng các-bon so với đường FRL thành CO₂ tương đương, rồi nhân với giá tín chỉ các-bon theo kịch bản REDD+. Đối với rừng trồng, giá trị rừng được xác định theo khung quy định, áp dụng chi phí đầu tư và thu nhập dự kiến theo loài cây để tính thu nhập bình quân/ha/năm. Ngoài ra, tích hợp các nguồn thu dịch vụ môi trường (PES, giao khoán bảo vệ) và thực hiện phân tích độ nhạy trước biến động giá các-bon, năng suất rừng và tỷ lệ chiết khấu để đánh giá rủi ro và khoảng tin cậy của ước tính thu nhập.

Tiểu kết chương 2

1. Nội dung Chương 2 trình bày các điều kiện tự nhiên và kinh tế - xã hội của cao nguyên Kon Hà Nừng. Tại khu vực nghiên cứu có điều kiện tự nhiên thuận lợi cho rừng kín thường xanh: vị trí địa lý thuộc vùng núi trung bình với đai cao phân bố đa dạng, địa hình chia cắt mạnh tạo nhiều tiểu vùng sinh cảnh, hệ thủy văn dày đặc cung cấp nguồn nước ổn định; địa chất và thổ nhưỡng phong phú hình thành các nhóm đất feralit và phù sa ven suối, cung cấp dinh dưỡng và độ ẩm phù hợp; khí hậu nhiệt đới gió mùa với lượng mưa lớn thúc đẩy tái sinh và duy trì đa dạng sinh học. Cơ cấu dân cư và điều kiện kinh tế-xã hội đặt áp lực lên tài nguyên rừng: cộng đồng chủ yếu là người Ba Na với sinh kế dựa vào nương rẫy, khai thác lâm sản và canh tác manh mún; hạn chế về giáo dục, y tế và hạ tầng dẫn tới an ninh lương thực bấp bênh và phụ thuộc vào rừng. Những yếu tố sinh thái và xã hội-kinh tế này vừa giải thích phân bố kiểu rừng và trạng thái bảo tồn tại vùng lõi, vừa chỉ ra nhu cầu can thiệp của chính sách nhằm giảm áp lực khai thác và tăng cường sinh kế bền vững.

2. Chương 2 đã trình bày phương pháp luận để thiết lập khung kỹ thuật cho toàn bộ luận án bằng cách tích hợp viễn thám đa thời gian và GIS với dữ liệu thực địa. Quy trình bao gồm ảnh viễn thám qua học đa phổ đã được tiền xử lý BOA và lọc mây; tính toán chỉ số thực vật (NDVI, AVI, ARVI) và sử dụng DEM; thu mẫu thực địa theo ô tiêu chuẩn, chuẩn hóa dữ liệu các ô tiêu chuẩn được kế thừa, kiểm chứng chìa khóa giải đoán ảnh bằng Collect Earth và UAV; phân đoạn hướng đối tượng và phân loại bằng Random Forest; kiểm định bằng ma trận sai số và hệ số Kappa để đảm bảo độ chính xác bản đồ LULC.

3. Chương này đã trình bày phương pháp ước tính sinh khối và chuyển đổi sang trữ lượng các-bon, cũng như phương pháp thiết lập đường tham chiếu rừng (FRL). Tổng hợp phương pháp và dữ liệu trong Chương 2 cung cấp nền tảng khoa học cho các phân tích biến động rừng và ước tính các-bon ở các chương sau, đồng thời làm rõ các giới hạn dữ liệu, nguồn sai số tiềm ẩn và các giả định quan trọng.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI, SINH KHỐI RỪNG VÀ ĐỊNH HƯỚNG QUẢN LÝ BẢO VỆ RỪNG CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG

3.1. ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG TRẠNG THÁI RỪNG QUA CÁC GIAI ĐOẠN 2000 - 2010 VÀ 2010 - 2022

3.1.1. Kết quả thành lập bản đồ trạng thái rừng

3.1.1.1. Bản đồ trạng thái rừng

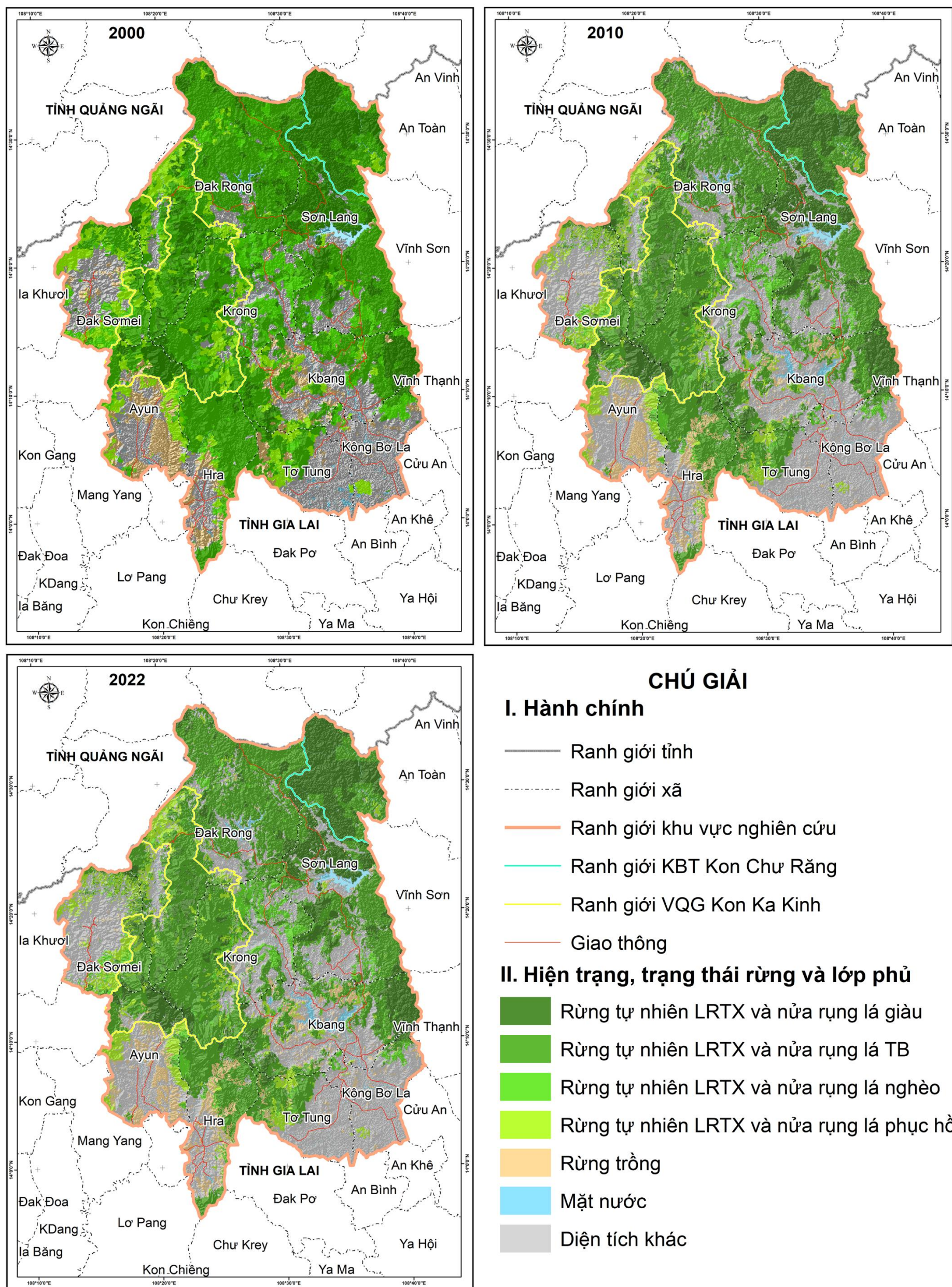
Dựa trên quy trình giải đoán ảnh viễn thám đa thời gian và đánh giá kết quả phân loại ảnh, đã thành lập được các bản đồ lớp phủ khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng tại 3 thời điểm: 2000, 2010 và 2022 (Hình 3.1).

Theo Bảng 3.1, diện tích rừng tự nhiên tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng ở cả 3 thời điểm đều chiếm diện tích lớn nhất trong bản đồ LULC năm 2000, 2010 và 2022 (trên 150.000 ha trong giai đoạn 2000 - 2022). Đáng chú ý, diện tích rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình đạt mức cao (trên 80.000 ha) tại cả 3 thời điểm. Diện tích rừng tự nhiên trung bình có xu hướng giảm nhẹ trong 2 giai đoạn, giảm khoảng 1,38%/năm ở giai đoạn 2000 - 2010 và 0,05%/năm ở giai đoạn 2010 - 2022. Trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu chiếm diện tích lớn thứ hai trong các trạng thái rừng tự nhiên (trên 30.000 ha tại cả 3 thời điểm). Diện tích rừng tự nhiên giàu có xu hướng tăng qua 2 giai đoạn (tăng 0,45%/năm ở giai đoạn 1 và 0,35%/năm ở giai đoạn 2). Điều này là do một số diện tích rừng tự nhiên trung bình và nghèo phát triển tăng trữ lượng; thêm vào đó, một số diện tích được khoanh nuôi, bảo vệ trong hai khu bảo tồn thiên nhiên, và việc trồng bổ sung các cây bản địa thuộc các dự án phát triển rừng giúp tăng cường trữ lượng và chất lượng rừng. Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo có nhiều biến động trong cả hai giai đoạn. Trong giai đoạn 1, diện tích này giảm khoảng 1.666 ha (trung bình 0,87%/năm) do chuyển sang các loại rừng tự nhiên khác. Ngược lại, trong giai đoạn 2, diện tích tăng mạnh (3,81%/năm), tương ứng với hơn 6.600 ha được tăng từ các trạng thái rừng tự nhiên phục hồi và một phần từ các trạng thái đất có cây tái sinh phát triển.

Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi giảm từ 23.036,9 ha (2000) xuống 17.130,3 ha (2010) và tiếp tục giảm nhẹ còn 15.101,7 ha (2022); mức giảm mạnh nhất rơi vào giai đoạn 2000 - 2010 (giảm 5.906,6 ha, tương ứng khoảng 2,56%/năm), sau đó tốc độ giảm chậm lại (2010 - 2022) giảm 2.028,6 ha (khoảng 1,18%/năm). Giai đoạn đầu (2000 - 2010), rừng tự nhiên phục hồi chịu áp lực từ các hoạt động kinh tế như mở rộng đất nông nghiệp, trồng cây công nghiệp, xây dựng hạ tầng và khai thác gỗ, dẫn tới suy giảm rừng thứ sinh, trong đó có rừng tự nhiên phục hồi. Kết quả là trạng thái diện tích khác (DTK) tăng đột biến (+21.507,7 ha) trong cùng thời kỳ, cho thấy sự chuyển đổi sang đất canh tác, bãi chăn thả hoặc đất trống. Giai đoạn sau (2010 - 2022) cho thấy sự chững lại của xu hướng giảm diện tích rừng tự nhiên phục hồi, một phần do chính sách bảo vệ rừng, chương trình trồng rừng, quản lý cộng đồng và nhận thức địa phương được cải thiện; đồng thời một số diện tích rừng tự nhiên khác (TXN) thậm chí tăng, cho thấy khả năng phục hồi ở những nơi có điều kiện thuận lợi. Cần nhấn mạnh tính dễ tổn thương của rừng tự nhiên phục hồi: thường là rừng thứ sinh, cấu trúc đơn giản, giá trị kinh tế thấp và ít được ưu tiên bảo vệ hơn các khu rừng nguyên sinh hoặc thứ sinh có trữ lượng lớn, nên dễ bị chuyển đổi; chúng thường nằm gần khu dân cư và đường giao thông, thuận lợi cho việc khai thác và canh tác. Thêm vào đó, các yếu tố như cháy rừng, chăn thả gia súc, xói mòn đất và biến đổi khí hậu làm giảm khả năng tự phục hồi.

Trạng thái rừng trồng có xu hướng giảm trong cả hai giai đoạn, với tốc độ giảm trung bình 1,8%/năm trong giai đoạn 2000 - 2010 và 2,9%/năm trong giai đoạn 2010 - 2022. Điều này có thể được lý giải do chuyển đổi xu hướng cây trồng từ rừng trồng sang các loại cây công nghiệp có giá trị cao tại khu vực nghiên cứu như cà phê, cao su, hồ tiêu. Mặc dù có bổ sung rừng trồng từ một số diện tích đất trống, nông nghiệp tuy nhiên không đáng kể so với tốc độ giảm của trạng thái rừng trồng.

Diện tích khác (bao gồm các khu vực trồng cây công nghiệp, nông nghiệp, đất trống, xây dựng...) trong cả giai đoạn 2010 - 2022 lớn thứ hai so với các trạng thái khác, với nhiều biến động trong cả hai giai đoạn, với tỷ lệ tăng 4,2%/năm trong giai đoạn 2000 - 2010 và giảm nhẹ khoảng 0,3%/năm trong giai đoạn 2010 - 2022.



Nguồn: Kết quả giải đoán ảnh vệ tinh SPOT-4 (2000, 2010) và Sentinel-2 (2022);
Dữ liệu nền địa lý quốc gia tỷ lệ 1:50.000.

THU TỪ TỶ LỆ 1:50.000
0 2,5 5 10 15 20 Km

Thành lập: NCS. Nguyễn Hữu Việt Hiệu
GV hướng dẫn: GS. TS. Nguyễn Ngọc Thạch
TS. Phạm Văn Mạnh

Hình 3.1. Bản đồ hiện trạng, trạng thái rừng và lớp phủ khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2022

Năm 2000, tỷ lệ diện tích rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình của khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng là cao nhất, chiếm 39% tổng diện tích khu vực (Hình 3.2). Tỷ lệ diện tích rừng tự nhiên giàu và phục hồi lần lượt đứng thứ 2 và thứ 3 (15% và 10%). Trong khi đó, diện tích rừng trồng và mặt nước chỉ chiếm tỷ lệ không đáng kể.

Bảng 3.1. Thống kê diện tích hiện trạng, trạng thái rừng và lớp phủ khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng các năm 2000, 2010, và 2022

Đơn vị: ha

LULC	Diện tích			2010- 2000	2022- 2010	2010- 2000 tỷ lệ tăng/giảm theo năm	2022- 2010 tỷ lệ tăng/giảm theo năm
	2000	2010	2022	Thay đổi diện tích	Thay đổi diện tích	(% y ⁻¹)	(%y ⁻¹)
Rừng tự nhiên (TXG)	35.656,3	37.257,7	38.557,7	1.601,4	1.300,0	0,45	0,35
Rừng tự nhiên (TXB)	95.543,9	82.333,3	81.952,5	-13.210,6	-380,8	-1,38	-0,05
Rừng tự nhiên (TXN)	19.061,5	17.395,5	24.022,4	-1.666,0	6.626,9	-0,87	3,81
Rừng tự nhiên (TXP)	23.036,9	17.130,3	15.101,7	-5.906,6	-2.028,6	-2,56	-1,18
Rừng trồng (TG)	14.439,3	11.897,7	8.482,0	-2.541,6	-3.415,7	-1,76	-2,87
Mặt nước (MN)	3.138,1	3.353,7	3.356,5	215,7	2,8	0,69	0,01
Diện tích khác (DTK)	50.753,8	72.261,5	70.157,1	21.507,7	-2.104,5	4,24	-0,29
Tổng	242.000,00						

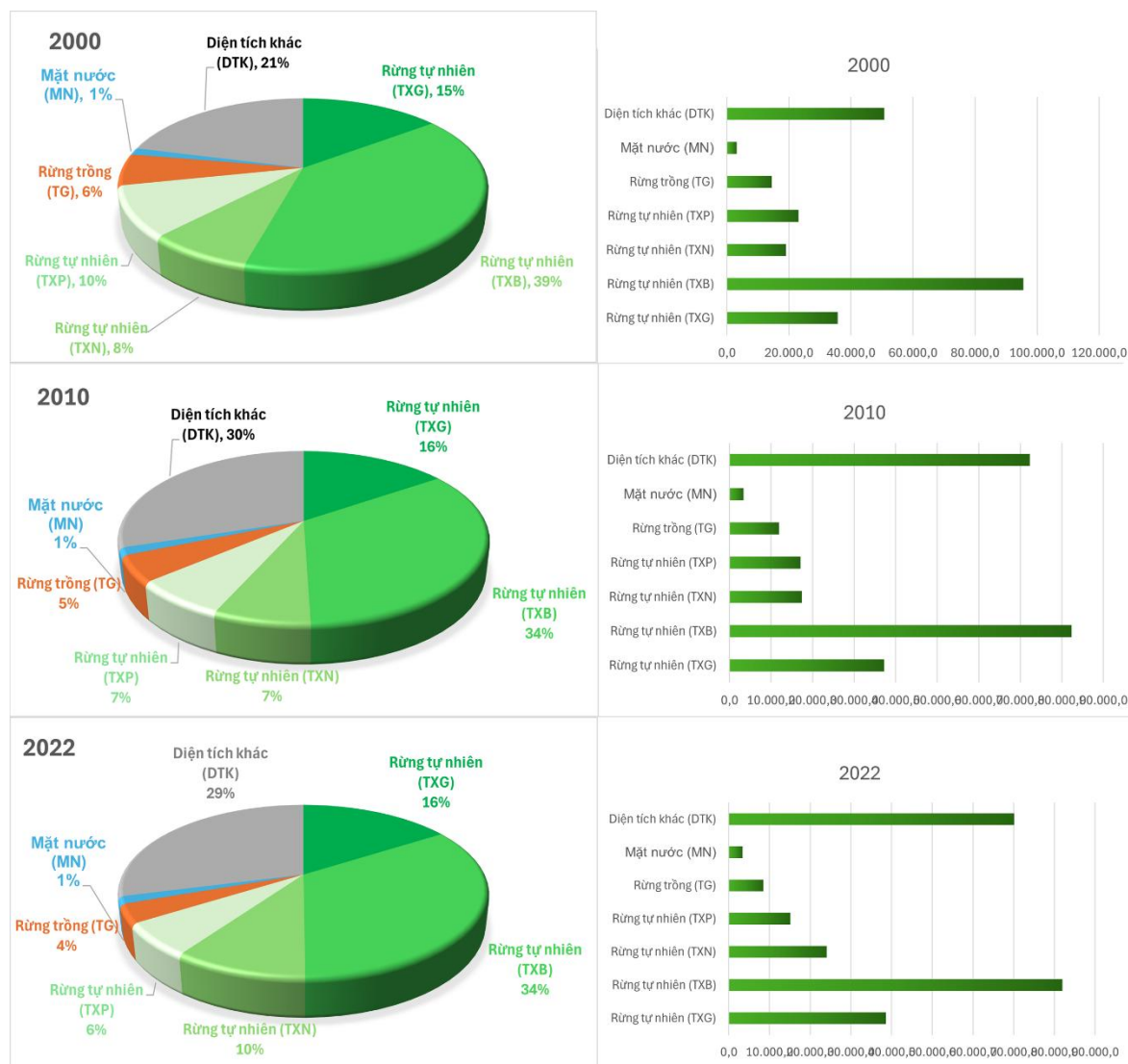
**Ghi chú*

- TXG: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu;
- TXB: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình;
- TXN: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo;
- TXP: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi.

Tỷ lệ diện tích trạng thái rừng năm 2010 và 2022 không thay đổi nhiều. Trong đó, tỷ lệ diện tích rừng tự nhiên trung bình ở mức 39 % (2000) và 34 % (2010, 2022). Trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo có tỷ lệ cao hơn so với năm 2000 (đạt 10 % năm 2022), mặc dù thời điểm trước đó (năm 2010) chỉ đạt 7 %, thấp hơn so với tỷ lệ 8 % năm 2000.

Phân tích diễn biến tỷ lệ phần trăm diện tích rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng trong các mốc 2000, 2010, 2022 cho thấy những chuyển dịch có ý nghĩa cả về mặt sinh thái lẫn quản lý tài nguyên. Đánh giá tổng thể, rừng tự nhiên trung bình duy trì

tỷ lệ lớn nhất nhưng giảm từ 39 % (2000) xuống 34 % (2010) và giữ ổn định 34 % (2022); rừng tự nhiên giàu tương đối ổn định ở mức tỷ lệ 15 - 16 %; rừng tự nhiên nghèo giảm xuống 7 % vào 2010 nhưng phục hồi lên 10 % vào 2022; rừng tự nhiên phục hồi và rừng trồng có xu hướng giảm nhẹ theo tỷ lệ phần trăm; phần diện tích khác tăng mạnh từ 21 % lên 30 % rồi nhẹ giảm còn 29 %, trong khi mặt nước duy trì ~1%.



Hình 3.2. Tỷ lệ diện tích hiện trạng, trạng thái rừng và lớp phủ khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2022

Ngoài các yếu tố chuyển đổi sử dụng đất và phát triển kinh tế, những biến động trên có thể được lý giải thông qua diễn thế sinh thái. Phân mảnh cảnh quan và suy giảm cấu trúc rừng dẫn tới thay đổi điều kiện vi khí hậu, làm giảm khả năng tái sinh

tự nhiên của loài ưu thế trong rừng tự nhiên giàu và rừng tự nhiên trung bình. Bên cạnh đó, quá trình thoái hóa đất và suy giảm tầng mùn làm giảm năng suất sinh trưởng, khiến diện tích rừng trồng và các trạng thái rừng phục hồi, nghèo chiếm tỷ lệ nhỏ hơn so với tổng diện tích. Ngược lại, sự phục hồi tỷ lệ rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo sau năm 2010 phản ánh khả năng diễn thế ngược chiều hoặc phục hồi tự nhiên trên các diện tích bị bỏ hoang khi áp lực khai thác giảm và các biện pháp bảo vệ được thực hiện; quá trình tái sinh chọn lọc, tái cấu trúc loài và tăng cường che phủ thực vật gốc góp phần nâng cao chất lượng rừng tự nhiên mà không nhất thiết biểu hiện bằng gia tăng rừng trồng. Các số liệu cụ thể đã cho thấy ảnh viễn thám đa thời gian là một công cụ phù hợp để phục vụ giám sát, theo dõi và đánh giá biến động của tài nguyên rừng và các trạng thái liên quan [57, 108]. Đây là cơ sở cho công tác quản lý, giám sát, bảo tồn và phát triển bền vững tài nguyên rừng đối với các nhà quản lý cũng như chính quyền địa phương [46].

3.1.1.2. Kết quả kiểm định phân loại

Dựa trên kết quả kiểm định các mẫu chìa khóa giải đoán ảnh và công thức tính hệ số K, nghiên cứu đã thành lập bảng ma trận sai lẫn và tính chỉ số độ chính xác tổng thể đối với bản đồ LULC khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng năm 2022 (Bảng 3.2).

Theo Bảng 3.2, chỉ số độ chính xác tổng thể năm 2022 đạt 90,44 %, tương ứng với $K = 0,88$. Kết quả độ chính xác được đánh giá đạt mức cao, tương đương với kết quả nghiên cứu do Rajath Kumar và cộng sự thực hiện về phân loại LULC trên ảnh Sentinel-2 tại Vazhikkadavu, Kerala, Ấn Độ [79]. Theo đó, các đối tượng mặt nước dễ nhận biết nhất với tổng số 27/30 mẫu chìa khóa ảnh đúng với thực tế. Trạng thái rừng tự nhiên nói chung đạt độ tin cậy cao; tuy nhiên, vẫn còn một số hạn chế, trong đó trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá có tổng số 8/100 mẫu chìa khóa ảnh kiểm chứng bị sai lẫn. Do cấu trúc trên ảnh vệ tinh của các trạng thái lá rộng thường xanh và nửa rụng lá có nhiều nét tương đồng với nhau, độ phân giải ảnh viễn thám đa phổ được sử dụng trong nghiên cứu chỉ ở mức 10 m, vì vậy có thể xảy ra sai khác trong quá trình phân loại ảnh. Trạng thái rừng trồng cũng có tỷ lệ nhỏ bị lẫn với các trạng thái rừng tự nhiên và các trạng thái khác (3/40 mẫu). Trong đó,

sai khác liên quan đến các trạng thái rừng tự nhiên và rừng trồng là 1/40 mẫu; giữa rừng trồng và mặt nước là 2/40 mẫu.

Bảng 3.2. Ma trận sai số kết quả phân loại

Ma trận sai số kết quả phân loại từ ảnh vệ tinh		Điểm kiểm chứng mặt đất							Tổng
		TXG	TXB	TXN	TXP	TG	MN	DTK	
Bản đồ LULC	Rừng tự nhiên (TXG)	92	4	2	1	1	0	0	100
	Rừng tự nhiên (TXB)	1	43	3	2	1	0	0	50
	Rừng tự nhiên (TXN)	1	2	45	1	1	0	0	50
	Rừng tự nhiên (TXP)	1	0	1	36	1	1	0	40
	Rừng trồng (TG)	0	0	0	1	37	1	1	40
	Mặt nước (MN)	0	0	0	2	1	27	0	30
	Diện tích khác (DTK)	0	0	0	0	1	0	19	20
Tổng		95	49	51	43	43	29	20	330
Độ chính xác bản đồ (%)		96,84	87,76	88,24	83,72	86,05	93,10	95,00	90,10
Độ chính xác người dùng (%)		92,00	86,00	90,00	90,00	92,50	90,00	95,00	90,79
Độ chính xác tổng thể (%)									90,44

*Ghi chú

- TXG: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu;
- TXB: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình;
- TXN: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo;
- TXP: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi.

Nhìn chung, tất cả các trạng thái được đưa vào phân loại ảnh đều có độ chính xác trên 80%. Trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu, diện tích khác và mặt nước có độ chính xác người dùng cao (lần lượt là 96,84 %; 93,1 % và 95,0 %). Trong khi đó, độ chính xác của bản đồ trạng thái diện tích là cao nhất trong tất cả các loại hình (95 %). Trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi có độ chính xác của người dùng thấp (83,72 %). Trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình có độ chính xác cao hơn rừng tự nhiên phục hồi, nhưng vẫn thuộc nhóm thấp (87,76 %).

Phương pháp sử dụng ảnh viễn thám độ phân giải cao mang lại tính chính xác khi lập bản đồ LULC tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng (Độ chính xác tổng thể = 90,44 %, K = 0,88). Đây là độ chính xác cao khi so sánh với một số nghiên cứu như sử dụng ảnh vệ tinh Landsat-8 và Sentinel-2 (Độ chính xác tổng thể = 75 %, K = 0,65) [121], hay hợp nhất các loại dữ liệu ảnh Sentinel-2A, Sentinel-1A, Landsat-8 và DEM tại nghiên cứu ở Vũ Hán, Trung Quốc có độ chính xác tổng thể đạt 82,78 % [92], hay

sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel-1 và Sentinel-2 tại Tây Ban Nha và Brazil (giá trị Kappa trung bình chỉ dao động 0,59–0,83 đối với ảnh Sentinel-2 và 0,28–0,72 đối với ảnh Sentinel-1) [99]. Việc kết hợp các dạng ảnh viễn thám đa thời gian cũng với dữ liệu địa hình cũng góp phần tăng cường độ chính xác cho bản đồ, điều này tương tự như kết quả sử dụng ảnh vệ tinh Landsat liên tiếp trong chuỗi thời gian có độ chính xác tổng thể lên tới 90,52 %, sau khi kết hợp dữ liệu địa hình đã cải thiện độ chính xác tổng thể lên 92,63 % tại Vinton County, đông nam Ohio [151].

Trong nội dung luận án, nghiên cứu sinh đã tăng cường độ chính xác của bản đồ bằng phương pháp phân loại rừng dựa trên thuật toán RF kết hợp với dữ liệu hỗ trợ. Đây là phương pháp góp phần tăng cường đáng kể độ chính xác trong việc thành lập bản đồ lớp phủ [68]. Các dạng ảnh vệ tinh Sentinel-2 và Landsat-8 được sử dụng giải đoán dựa trên phân loại rừng bằng thuật toán RF mang lại độ chính xác tốt hơn, như tại Brazil với hệ số K trong khoảng 0,9 [124], tương đương với kết quả của luận án. Trong nghiên cứu tại Gabon, ảnh vệ tinh Sentinel-2 kết hợp với bộ phân loại RF cho độ chính xác tổng thể dao động từ 83,4 đến 97,4 % [143]. Ngoài ra, phương pháp còn được ứng dụng trong phân loại các loài cây với độ chính xác tổng thể cũng tương đối cao (84,5 %, giá trị Kappa 0,73) [114], hay độ chính xác tổng thể = 82 % tại Austria [71].

Sự sai khác trong quá trình phân loại ảnh khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng tập trung chủ yếu vào các trạng thái rừng tự nhiên phân theo trữ lượng, giữa rừng tự nhiên và rừng trồng, phù hợp với nghiên cứu của Hoàng Thanh Tùng và cộng sự về LULC độ phân giải cao của JAXA [69]. Đây là các trạng thái có những sự tương đồng nhất định về cấu trúc trên dữ liệu ảnh vệ tinh, dễ gây nhầm lẫn trong quá trình phân loại. Ngoài ra, các mẫu chìa khóa ảnh giữa rừng trồng và các diện tích khác (cây công nghiệp, nông nghiệp, cây ăn quả) cũng có tỷ lệ sai lẫn tương đối lớn, do chúng có nhiều điểm tương đồng về cấu trúc trên ảnh vệ tinh.

Đối với hai bản đồ lịch sử năm 2000 và 2010, do không còn điều kiện thu thập mẫu kiểm chứng thực địa đồng thời như năm 2022, độ tin cậy được kiểm chứng theo phương pháp hồi cứu: (i) sử dụng bộ mẫu chìa khóa ảnh; (ii) đối chiếu với số liệu ô tiêu chuẩn cùng kỳ của Chương trình điều tra, theo dõi diễn biến tài nguyên rừng toàn

quốc; và (iii) đối chiếu chỉ số NDVI thông qua công cụ Collect Earth. Đồng thời, để bảo đảm tính nhất quán của chuỗi dữ liệu đa cảm biến, nghiên cứu đã thực hiện hiệu chỉnh chéo phổ (cross-calibration) giữa ảnh SPOT-4 và Sentinel-2 trước khi phân tích biến động, nhằm hạn chế ảnh hưởng của khác biệt về độ phân giải và đặc trưng phổ giữa hai nguồn ảnh.

3.1.2. Biến động trạng thái rừng và sự thay đổi chỉ số NDVI theo các năm 2000, 2010, 2022

3.1.2.1. Phân bố không gian và biến động trạng thái rừng

Dựa trên bản đồ LULC ở 3 thời điểm: năm 2000, 2010 và 2022, đã thành lập được 2 bản đồ biến động và bảng đánh giá biến động diện tích các trạng thái khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng qua 2 giai đoạn bao gồm: 2000 - 2010 và 2010 - 2022 (Bảng 3.3, 3.4).

Bảng 3.3. Biến động diện tích rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 – 2010

Đơn vị: ha

Năm	2010								
2000	LULC	Rừng tự nhiên (TXG)	Rừng tự nhiên (TXB)	Rừng tự nhiên (TXN)	Rừng tự nhiên (TXP)	Rừng trồng (TG)	Mặt nước (MN)	Diện tích khác (DTK)	Tổng
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
	(1)	28.585,6	3.553,4	1.302,9	681,8	21,6		1.510,9	35.656,3
	(2)	7.383,4	69.961,4	987,3	3.213,1	1.715,1	50,8	12.232,7	95.543,9
	(3)	651,7	3.616,8	7.124,5	1.265,3	559,5	954,8	4.888,8	19.061,5
	(4)	385,0	3.106,3	4.014,1	8.905,8	814,4	16,3	5.795,0	23.036,9
	(5)	153,6	840,7	991,4	932,5	5.653,8	21,2	5.846,2	14.439,3
	(6)	3,5		77,9	115,5	87,4	2.212,4	641,3	3.138,1
	(7)	94,9	1.254,7	2.897,3	2.016,2	3.045,9	98,3	41.346,6	50.753,8
	Tổng	37.257,7	82.333,3	17.395,5	17.130,3	11.897,7	3.353,7	70.750,6	242.000,0

**Ghi chú*

- TXG: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu;
- TXB: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình;
- TXN: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo;
- TXP: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi.

Theo Bảng 3.3, trong giai đoạn 10 năm (2000 - 2010), diện tích rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình, nghèo và phục hồi tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng có xu hướng giảm, chủ yếu do chuyển đổi sang các trạng thái rừng tự nhiên khác, rừng trồng và các diện tích khác. Rừng tự nhiên trung bình có

thay đổi lớn nhất với tổng diện tích giảm 13.210,6 ha (3.553,4 ha tăng từ rừng tự nhiên giàu, 987,3 ha chuyển sang rừng nghèo, và 3.213,1 ha chuyển trạng thái sang rừng tự nhiên phục hồi). Tuy nhiên, cũng có tới 12.371,9 ha tăng chủ yếu từ các trạng thái rừng tự nhiên khác chuyển sang: rừng giàu (3.553,4 ha), rừng nghèo (3.616,8 ha) và rừng phục hồi (3.106,3 ha).



Nguồn: Kết quả giải đoán ảnh vệ tinh SPOT-4 (2000, 2010) và Sentinel-2 (2022);
Dữ liệu nền địa lý quốc gia tỷ lệ 1:50.000.

THU TỪ TỶ LỆ 1:50.000

Thành lập: NCS. Nguyễn Hữu Việt Hiệu
GV hướng dẫn: GS. TS. Nguyễn Ngọc Thạch
TS. Phạm Văn Mạnh

Hình 3.3. Biến động trạng thái rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2010

Trong giai đoạn 2000 - 2010, diện tích rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và lá rụng nửa có sự tăng nhẹ. Mặc dù có 7.070,7 ha chuyển sang các trạng thái khác (rừng trung bình 3.553,4 ha; rừng nghèo 1.302,9 ha; rừng phục hồi 681,8 ha; rừng trồng và diện tích khác khoảng 1.500 ha). Diện tích rừng giàu tăng khoảng 1.600 ha khi các diện tích rừng tự nhiên và rừng trồng khác chuyển sang rừng giàu. Đáng chú ý, diện tích lớn nhất (7.383,4 ha) được nhận từ rừng tự nhiên trung bình chuyển sang.

Bảng ma trận biến động diện tích rừng giai đoạn 2010 - 2022 cho thấy cơ cấu rừng biến động theo các luồng chuyển đổi có ý nghĩa sinh thái và quản lý. Cụ thể, nhóm rừng tự nhiên trung bình thể hiện tính ổn định cao khi có 77.542,5 ha không biến động, trong khi rừng tự nhiên giàu duy trì phần lõi 36.212,0 ha và được tăng thêm 1.538,5 ha từ rừng trung bình và 790,1 ha từ rừng phục hồi, cho thấy khả năng bảo tồn và phục hồi chất lượng rừng giàu. Ngược lại, rừng tự nhiên phục hồi và rừng trồng có xu hướng giảm trong suốt giai đoạn này. Đối với rừng phục hồi, mặc dù có 4.082,1 ha giữ ổn định vẫn có 7.404,9 ha chuyển sang các trạng thái khác (diện tích chuyển sang các diện tích khác là chủ yếu: 7.397,3 ha), tổng thể trạng thái rừng phục hồi vẫn suy giảm, phản ánh tính nhạy cảm và dễ tổn thương của trạng thái rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi tại khu vực nghiên cứu.

Mặt nước tương đối ổn định với 3.353,7 ha giữ nguyên, trong khi diện tích khác tăng tích lũy và nhận diện tích chuyển sang từ nhiều trạng thái, đạt 70.152,0 ha vào năm 2022, là dấu hiệu rõ ràng của áp lực chuyển đổi sử dụng đất. Giai đoạn 2010 - 2022, diện tích các trạng thái khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng có sự biến động khá mạnh; tuy nhiên, mức độ thay đổi tổng thể trong giai đoạn này thấp hơn so với giai đoạn trước (2000 - 2010). Chi tiết sự thay đổi diện tích các trạng thái xem Bảng 3.4.

Bên cạnh đó, khoảng 1.300 ha diện tích các trạng thái chuyển đổi sang trạng thái rừng tự nhiên giàu, điển hình như 1.538,5 ha rừng tự nhiên trung bình, 7,3 ha rừng nghèo và 790,1 ha rừng trồng đã chuyển sang rừng tự nhiên giàu. Diện tích rừng trồng có sự biến động mạnh (tổng giảm khoảng 3.400 ha tính đến 2022), chủ yếu do chuyển sang diện tích rừng tự nhiên nghèo và diện tích phục hồi, cũng như diện tích khác (tổng số hơn 4.300 ha chuyển đổi). Ngược lại, cũng có 976 ha diện tích các trạng

thái khác đã chuyển sang diện tích rừng trồng, chủ yếu là diện tích khác (941,4 ha), rừng tự nhiên trung bình (19,9 ha) và rừng tự nhiên nghèo (7,6 ha).

Một trạng thái biến đổi rất mạnh trong giai đoạn 2010–2022 là sự biến đổi của rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo. Cụ thể, diện tích rừng tự nhiên nghèo tăng mạnh lên 6.626,9 ha. Trong đó, có 530,9 ha diện tích rừng tự nhiên trung bình suy giảm trữ lượng và chuyển sang trạng thái rừng tự nhiên nghèo. Diện tích chuyển từ rừng giàu sang rừng rất ít (54,3 ha), trong khi diện tích tăng trưởng từ rừng phục hồi sang rừng nghèo và từ rừng trồng sang rừng nghèo là phần diện tích tăng trưởng chủ yếu (lần lượt 2.909,4 ha rừng phục hồi và 3.075,6 ha rừng trồng).

Bảng 3.4. Biến động diện tích rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2010 – 2022

Đơn vị: ha

Năm	2022								
	LULC	Rừng tự nhiên (TXG)	Rừng tự nhiên (TXB)	Rừng tự nhiên (TXN)	Rừng tự nhiên (TXP)	Rừng trồng (TG)	Mặt nước (MN)	Diện tích khác (DTK)	Tổng
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
2010	(1)	36.212,0	984,7	54,3	1,5	0,0	0,1	5,1	37.257,7
	(2)	1.538,5	77.542,5	530,9	9,2	19,9		2.692,3	82.333,3
	(3)	7,3	1.481,5	13.975,8	514,1	7,6	0,2	1.408,9	17.395,4
	(4)	790,1	1.943,8	2.909,4	4.082,1	7,1	0,5	7.397,3	17.130,3
	(5)			3.075,6	956,5	7.505,9	0,0	359,6	11.897,6
	(6)						3.353,7		3.353,7
	(7)	9,7		3.476,4	9.538,3	941,4	1,9	58.293,8	72.261,5
	Tổng	38.557,7	81.952,5	24.022,4	15.101,7	8.482,0	3.356,5	70.152,0	242.000,0

**Ghi chú*

- TXG: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu;
- TXB: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình;
- TXN: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo;
- TXP: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi.



Hình 3.4. Biến động trạng thái rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2010 - 2022

Trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2022, chính quyền địa phương đã ban hành nhiều chính sách nhằm tăng cường quản lý, bảo vệ và phát triển tài nguyên rừng tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng. Những chính sách đã có tác động cụ thể đến sự biến động diện tích các trạng thái trong khu vực, điển hình là sự biến động diện tích các trạng thái rừng tự nhiên, rừng trồng và diện tích khác (đất trồng cây công nghiệp và đất nông nghiệp...).

Theo đó, trong giai đoạn từ 2000 đến năm 2010, diện tích các loại hình rừng trồng, đất trồng cây công nghiệp và đất nông nghiệp tăng đáng kể. Quyết định số 10/2003/CT-UB về việc thu hồi các diện tích lấn chiếm trái phép để trồng cây công nghiệp và cây nông nghiệp được triển khai là nguyên nhân dẫn đến sự biến động của diện tích các trạng thái trong khu vực nghiên cứu. Ngoài ra, việc chuyển đổi Lâm trường Hà Nừng thành Công ty Lâm nghiệp Hà Nừng và sự phát triển các công ty lâm nghiệp theo hướng kinh tế mới cũng là một trong những nguyên nhân dẫn đến sự biến động của các trạng thái đất trống và đất trống có cây tái sinh có thể phục hồi thành rừng tự nhiên. Mặc dù trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2010 đã có khá nhiều chính sách về bảo vệ, phát triển tài nguyên rừng, giao khoán bảo vệ rừng, tuy nhiên, hiệu quả của các chính sách này chưa cao. Diện tích rừng vẫn bị sụt giảm trong giai đoạn 2000 - 2010, với tỷ lệ mất rừng lên đến 1,9 %/năm.

Để giảm sự suy giảm các trạng thái rừng tại khu vực nghiên cứu, vai trò của các chính sách tăng cường quản lý, bảo vệ rừng (QĐ số 18/2007/QĐ-TTg, QĐ số 38-CTr/TU), thực hiện giao khoán bảo vệ rừng (QĐ số 75/2015/NĐ-CP) là rất lớn. Đặc biệt, chính sách về giao khoán bảo vệ rừng, hỗ trợ đồng bào dân tộc thiểu số ổn định sinh kế được coi là rất phù hợp với khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, nơi có tới 80% dân số là người dân tộc thiểu số. Nhờ vậy, tổng diện tích rừng tự nhiên tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng trong giai đoạn đã tương đối ổn định, biến động không lớn. Trong đó, diện tích rừng tự nhiên tại 2 khu vực rừng đặc dụng trên địa bàn cao nguyên Kon Hà Nừng (Vườn quốc gia Kon Ka Kinh và Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng) được giữ ổn định. Đây là kết quả của nhiều chính sách kiện toàn bộ máy quản lý của các ban quản lý rừng, cũng như các chính sách tăng cường bảo vệ tài nguyên rừng đặc dụng tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng. Tuy nhiên, sự biến

động diện tích giữa rừng tự nhiên và các trạng thái khác trong giai đoạn này vẫn còn tương đối cao, tập trung nhiều ở các khu vực rừng sản xuất và khu vực cạnh các thôn bản. QĐ số 75/2015/NĐ-CP còn hỗ trợ cây giống, phân bón, vật tư cho đồng bào dân tộc thiểu số, giúp phục hồi các diện tích cây bụi, trảng cỏ và đất trống trên địa bàn khu vực thành diện tích rừng trồng trong giai đoạn 2010 - 2022.

Có thể thấy, trong giai đoạn 2000 - 2022, đã có rất nhiều chính sách tăng cường quản lý, bảo vệ và phát triển tài nguyên rừng được áp dụng trên địa bàn cao nguyên Kon Hà Nừng. Các chính sách đã phần nào giảm thiểu tình trạng mất rừng tự nhiên như trước những năm 2000, tuy nhiên, vẫn chưa đem lại hiệu quả rõ rệt. Trong số đó, QĐ số 75/2015/NĐ-CP được coi là quan trọng nhất, góp phần ổn định sinh kế của đồng bào dân tộc thiểu số tại địa phương, gắn việc quản lý bảo vệ rừng với cộng đồng thôn bản, hỗ trợ người dân trồng rừng phục hồi, ... Đây cũng là chủ trương chung của chính phủ Việt Nam đối với công tác quản lý, bảo vệ và phát triển bền vững tài nguyên rừng trên cả nước. Những tiềm năng của văn hóa của những tộc người bản địa, hiểu biết về thiên nhiên, kỹ năng thích ứng với môi trường liên quan đến rừng góp phần quan trọng trong công tác bảo tồn tài nguyên thiên nhiên, phát triển kinh tế và gắn kết xã hội của những khu vực miền núi [106].

3.1.2.2. Phân tích các loại hình biến động liên quan đến rừng tự nhiên tại khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu biến động rừng tự nhiên ở cao nguyên Kon Hà Nừng, Gia Lai giúp xác định trạng thái rừng thay đổi diễn ra khi nào, ở đâu và vì sao rừng thay đổi, từ đó hỗ trợ quản lý và phục hồi rừng phù hợp với điều kiện địa phương. Phân tích cho thấy mức độ mất rừng, suy thoái do khai thác hay cháy rừng, phân mảnh sinh cảnh, chuyển đổi sang nông nghiệp hoặc đô thị, và khu vực tái sinh tự nhiên; những thông tin này quyết định ưu tiên bảo tồn đa dạng sinh học, duy trì dịch vụ hệ sinh thái như điều hòa khí hậu và bảo vệ nguồn nước, đồng thời giảm rủi ro lũ lụt và xói mòn. Trong 5 loại hình biến động có 4 loại hình liên quan đến rừng tự nhiên bao gồm:

- 1) Mất rừng
- 2) Suy thoái rừng
- 3) Thêm rừng

4) Tăng cường chất lượng rừng

Kết quả nghiên cứu cụ thể về diện tích và loại hình biến động được thống kê trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5. Biến động rừng tự nhiên thống kê từ bản đồ biến động

Đơn vị: ha

Stt	Hạng mục	Diện tích biến động giai đoạn 2000 - 2010	Diện tích biến động giai đoạn 2010 - 2022	Tổng giai đoạn 2000 - 2022	Bình quân năm 2000 - 2022
I	Mất rừng	28.560,0	11.539,1	40.099,0	20.049,5
1	Rừng giàu	1.532,6	5,2	1.537,8	768,9
2	Rừng trung bình	13.998,6	2.712,2	16.710,8	8.355,4
3	Rừng nghèo	6.403,1	1.416,8	7.819,9	3.909,9
4	Rừng phục hồi	6.625,7	7.404,9	14.030,6	7.015,3
II	Suy thoái rừng	11.003,9	2.094,6	13.098,5	6.549,3
1	Rừng giàu	5.538,1	1.040,4	6.578,6	3.289,3
2	Rừng trung bình	4.200,5	540,0	4.740,5	2.370,2
3	Rừng nghèo	1.265,3	514,1	1.779,5	889,7
III	Thêm rừng	9.378,2	17.056,6	26.434,7	13.217,4
1	Rừng giàu	252,0	9,7	261,7	130,8
2	Rừng trung bình	2.095,4		2.095,4	1.047,7
3	Rừng nghèo	3.966,5	6.552,0	10.518,5	5.259,3
4	Rừng phục hồi	3.064,3	10.494,9	13.559,1	6.779,6
IV	Tăng cường CLR	19.157,4	8.670,6	27.828,0	13.914,0
1	Rừng trung bình	7.383,4	1.538,5	8.922,0	4.461,0
2	Rừng nghèo	4.268,5	1.488,8	5.757,3	2.878,7
3	Rừng phục hồi	7.505,4	5.643,3	13.148,7	6.574,4

Tổng kết giai đoạn 2000 - 2022, diện tích mất rừng tại khu vực nghiên cứu đạt 40.099 ha, trong khi diện tích tăng thêm đạt 26.434,7 ha. Tổng diện tích rừng tự nhiên giảm 13.664,3 ha (khoảng 7,8 %). Tổng diện tích suy thoái rừng là 13.098,5 ha, trong khi diện tích rừng tự nhiên tăng cường chất lượng rừng đạt 27.828,0 ha (tăng cường chất lượng lớn hơn suy thoái rừng 1.393 ha), tăng trưởng chất lượng rừng tự nhiên tổng thể đạt 0,8 %.

Như vậy, tổng diện tích các loại hình biến động rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng có nhiều thay đổi lớn từ năm 2000 đến 2022, trong đó có cả tăng và

giảm về diện tích và chất lượng rừng. Mặc dù diện tích rừng tự nhiên tổng thể giảm 7,8 % tính đến năm 2022, diện tích tăng trưởng chất lượng rừng cho thấy con số tích cực khi đạt mức 0,8 % trong cả giai đoạn.

3.1.2.3. Đánh giá trạng thái rừng thông qua chỉ số NDVI

Bên cạnh bản đồ LULC được tạo thành bằng thuật toán RF từ ảnh SPOT-4 và Sentinel-2 (Mục 3.1.1), luận án bổ sung đánh giá biến động trạng thái và chất lượng rừng thông qua chỉ số NDVI theo phương pháp biến động trước phân loại. Đây là hai bước đánh giá bổ sung cho nhau: bản đồ RF phản ánh biến động diện tích (mất rừng, suy thoái, thêm rừng...), trong khi NDVI phản ánh biến động chất lượng tán rừng (sức khỏe thực vật, mức độ xanh của tán, xu hướng phục hồi hay suy giảm) tại từng trạng thái rừng theo từng thời điểm.

Ảnh Landsat được lựa chọn cho phân tích NDVI vì đây là bộ cảm biến duy nhất có chuỗi dữ liệu đồng bộ và liên tục trong tháng 4 (mùa khô, ít mây, tán lá thực vật ổn định) cho cả 3 thời điểm 2000, 2010 và 2022 - điều kiện bắt buộc để đảm bảo tính nhất quán khi so sánh NDVI đa thời gian. Ảnh SPOT-4 không có đủ dữ liệu tháng 4 cho cả 3 năm trong kho lưu trữ; ảnh Sentinel-2 chỉ có từ năm 2015 nên không đáp ứng yêu cầu về chuỗi thời gian. Ngoài ra, NDVI được sử dụng để phân tích xu hướng thống kê tại các ô tiêu chuẩn và trên toàn bộ khu vực. Với mục tiêu như vậy, độ phân giải 30 m của Landsat hoàn toàn chấp nhận được. Ảnh Landsat cũng được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu đánh giá NDVI đa thời gian, tương tự như tại Tây Nguyên, vì lý do về sự đồng bộ và tính liên tục của độ phân giải theo thời gian như trên.

Dữ liệu NDVI được gán trực tiếp cho các ô tiêu chuẩn tại các mốc 2000, 2010 và 2022 (ảnh vệ tinh Landsat, cùng tháng 4 trong năm) đã phản ánh biến động trạng thái che phủ thực vật và mức độ xanh của tán lá của 4 lớp rừng tự nhiên: TXG (giàu), TXB (trung bình), TXN (nghèo), TXP (phục hồi). Bảng số liệu chi tiết về các biến động của chỉ số NDVI được trình bày trong Bảng 3.6.

Bảng 3.6. Thống kê biến động chỉ số NDVI theo trạng thái rừng qua các giai đoạn

GIÁ TRỊ NDVI TẠI Ô TIÊU CHUẨN								
TT	Ký hiệu	NDVI cực đại (Max)			Chênh lệch 2000 - 2010	Chênh lệch 2010 - 2022	Chênh lệch 2000 - 2022	
		2000	2010	2022			Giá trị	%

1	TXG	0,895	0,732	0,855	-0,163	0,123	-0,040	-4,47
2	TXB	0,831	0,669	0,824	-0,162	0,155	-0,007	-0,84
3	TXN	0,754	0,603	0,753	-0,151	0,151	0,000	0,00
4	TXP	0,678	0,542	0,702	-0,136	0,160	0,024	3,54
TT	Ký hiệu	NDVI cực tiểu (Min)			Chênh lệch 2000 - 2010	Chênh lệch 2010 - 2022	Chênh lệch 2000 - 2022	
		2000	2010	2022			Giá trị	%
1	TXG	0,797	0,680	0,781	-0,117	0,101	-0,016	-2,0
2	TXB	0,708	0,576	0,738	-0,132	0,162	0,030	4,2
3	TXN	0,614	0,503	0,722	-0,111	0,219	0,108	17,6
4	TXP	0,474	0,345	0,678	-0,129	0,333	0,204	43,0
TT	Ký hiệu	NDVI trung bình (Mean)			Chênh lệch 2000 - 2010	Chênh lệch 2010 - 2022	Chênh lệch 2000 - 2022	
		2000	2010	2022			Giá trị	%
1	TXG	0,850	0,688	0,801	-0,162	0,113	-0,049	-5,8
2	TXB	0,776	0,626	0,754	-0,150	0,128	-0,022	-2,8
3	TXN	0,703	0,562	0,731	-0,141	0,169	0,028	4,0
4	TXP	0,545	0,436	0,681	-0,109	0,245	0,136	25,0

*Ghi chú

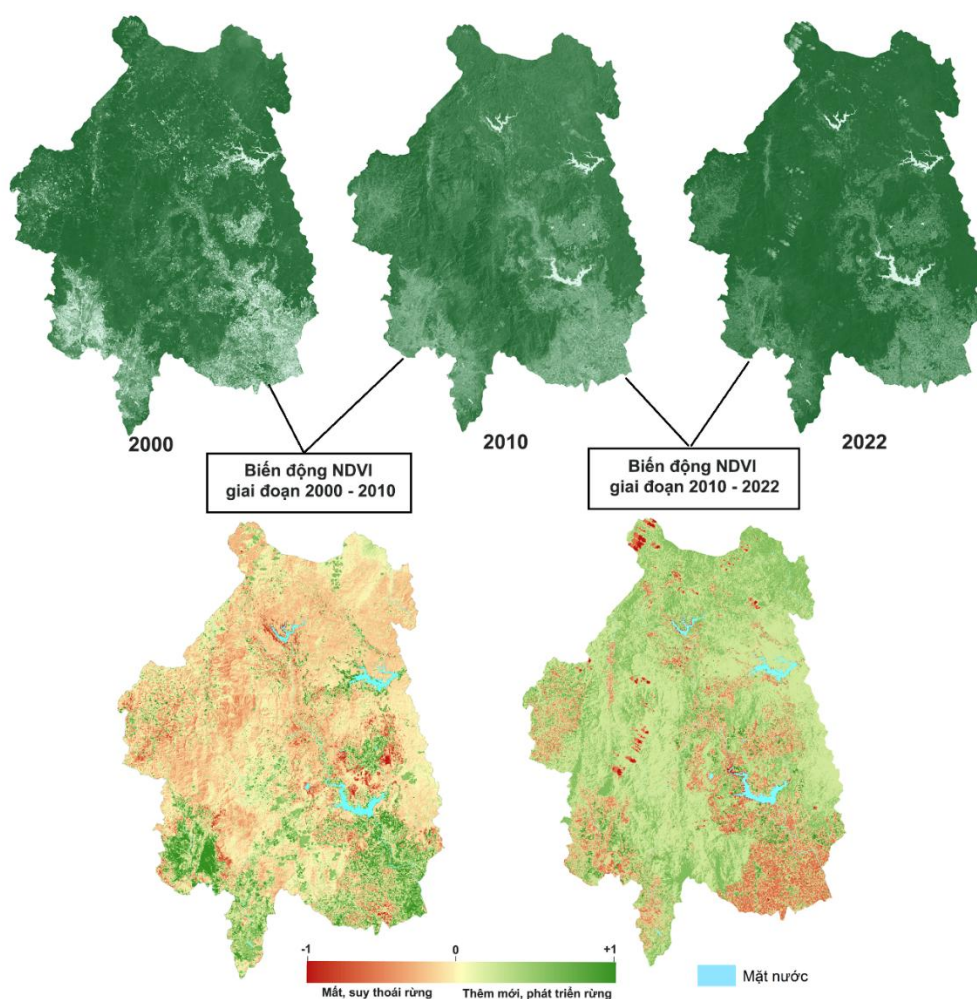
- TXG: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá giàu;
- TXB: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá trung bình;
- TXN: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá nghèo;
- TXP: Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh và nửa rụng lá phục hồi.



Hình 3.5. Biến động chỉ số NDVI trung bình theo trạng thái rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2022

Về giá trị NDVI trung bình, TXG giảm từ 0,850 (2000) xuống 0,688 (2010), sau đó tăng lên 0,801 (2022), mức suy giảm ròng 0,047 (khoảng 5,8 %) so với năm 2000; TXB giảm nhẹ ròng 0,022 (2,8 %); TXN tăng 0,028 (4,0 %); TXP tăng mạnh

0,136 (25 %). Có thể thấy tổng thể vùng nghiên cứu trải qua giai đoạn suy giảm NDVI 2000 - 2010, sau đó phục hồi 2010 - 2022, với mức phục hồi mạnh nhất ở rừng tự nhiên phục hồi (TXP), sau đó là lớp rừng tự nhiên nghèo (TXN), trong khi lớp giàu (TXG) phục hồi nhưng chưa hoàn toàn khôi phục các giá trị cực đại ban đầu. Xét giá trị NDVI cực đại (max), TXG và TXB đều giảm trong giai đoạn 2000 - 2010 (-0,163; -0,162) và chỉ phục hồi một phần trong giai đoạn 2010 - 2022, dẫn tới giảm ròn về cực đại so với 2000 (TXG -4,47 %; TXB -0,84 %).



Hình 3.6. Chỉ số NDVI tại cao nguyên Kon Hà Nừng và sự biến động qua các giai đoạn

TXN gần như giữ được giá trị cực đại ban đầu (giảm ròn 0,001, tương ứng 0,13 %), còn TXP suy giảm nhẹ (giảm ròn -0,024; 3,54 %). Về giá trị cực tiểu của chỉ số NDVI, ngoại trừ rừng tự nhiên giàu suy giảm nhẹ (2 %). Giá trị cực tiểu (min)

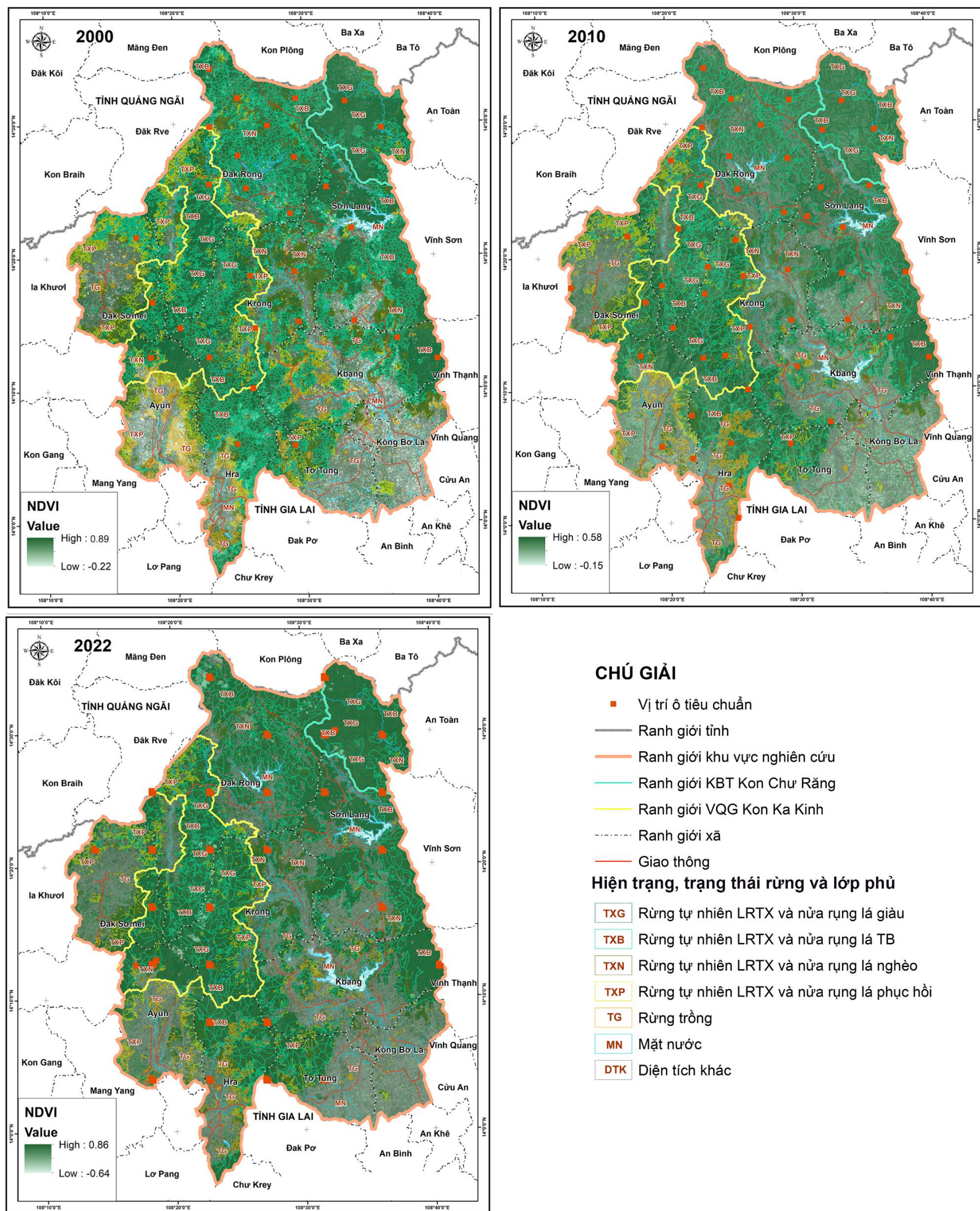
của tất cả các lớp rừng tự nhiên còn lại đều tăng từ năm 2000 đến năm 2022. Đặc biệt, TXP tăng rất mạnh lên +0,204 (43%), cho thấy phần diện tích có NDVI thấp đã được cải thiện rõ rệt. Như vậy, phân bố nội bộ chất lượng rừng đã thu hẹp về phía các giá trị thấp hơn; vùng có NDVI thấp đã được cải thiện, nhưng các điểm cực đại (các cấu phần rừng có tán dày nhất) vẫn chưa hoàn toàn phục hồi.

Lý giải khả năng biến động cho sự thay đổi này bao gồm: (1) tác động suy giảm 2000 - 2010 do khai thác gỗ, cháy rừng, chuyển đổi mục đích sử dụng đất hoặc điều kiện khí hậu bất lợi; (2) chính sách bảo vệ, phục hồi rừng và tái sinh tự nhiên sau 2010 dẫn tới phục hồi NDVI, đặc biệt hiệu quả ở các khu vực nghèo và phục hồi; (3) đặc thù sinh thái: cây lớn và tầng tán giàu (đóng góp vào giá trị cực đại) phục hồi chậm hơn so với tầng cây thấp và bụi (ảnh hưởng đến trung bình và cực tiểu). Do sử dụng dữ liệu từ các điểm đo thực tế tại ô tiêu chuẩn, đảm bảo về trạng thái nên thông tin có độ tin cậy cao. Tuy nhiên cần lưu ý các giới hạn, mặc dù ảnh cùng tháng 4 giảm sai số mùa vụ, khác biệt sensor Landsat qua các thế hệ và hiệu chỉnh khí quyển có thể tạo sai số nhỏ.

Như vậy, dữ liệu NDVI cho thấy chu kỳ suy giảm 2000 - 2010 và phục hồi 2010 - 2022, với mức phục hồi rõ rệt ở TXP và TXN; phục hồi trung bình ở TXG nhưng các điểm cực đại vẫn còn mất mát; và TXB gần về mức ban đầu nhưng chưa hoàn toàn phục hồi. Chi tiết số liệu NDVI được minh họa trong biểu đồ ở Hình 3.7.



Hình 3.7. Thay đổi chỉ số NDVI trung bình theo các trạng thái rừng tự nhiên



Nguồn: Kết quả giải đoán ảnh vệ tinh SPOT-4 (2000, 2010) và Sentinel-2 (2022);
Dữ liệu nền địa lý quốc gia tỷ lệ 1:50.000.

THU TỪ TỶ LỆ 1:50.000

Thành lập: NCS. Nguyễn Hữu Việt Hiệu
GV hướng dẫn: GS. TS. Nguyễn Ngọc Thạch
TS. Phạm Văn Mạnh

Hình 3.8. Bản đồ trạng thái rừng và chỉ số NDVI qua các năm 2000, 2010 và 2022

3.2. BIẾN ĐỘNG SINH KHỐI RỪNG TẠI CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG QUA CÁC GIAI ĐOẠN 2000 - 2010 VÀ 2010 - 2022

3.2.1. Sinh khối rừng cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai qua các giai đoạn

Dựa trên kết quả các phương trình hồi quy được lựa chọn có độ chính xác cao nhất (phương trình Lin – Log cho năm 2000, 2010 và phương trình Log – Lin cho năm 2022), các bản đồ ước tính sinh khối cho khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng được thành lập và trình bày tại Hình 3.9, với một số đặc điểm theo các ngưỡng sinh khối như tại Bảng 3.7 dưới đây.

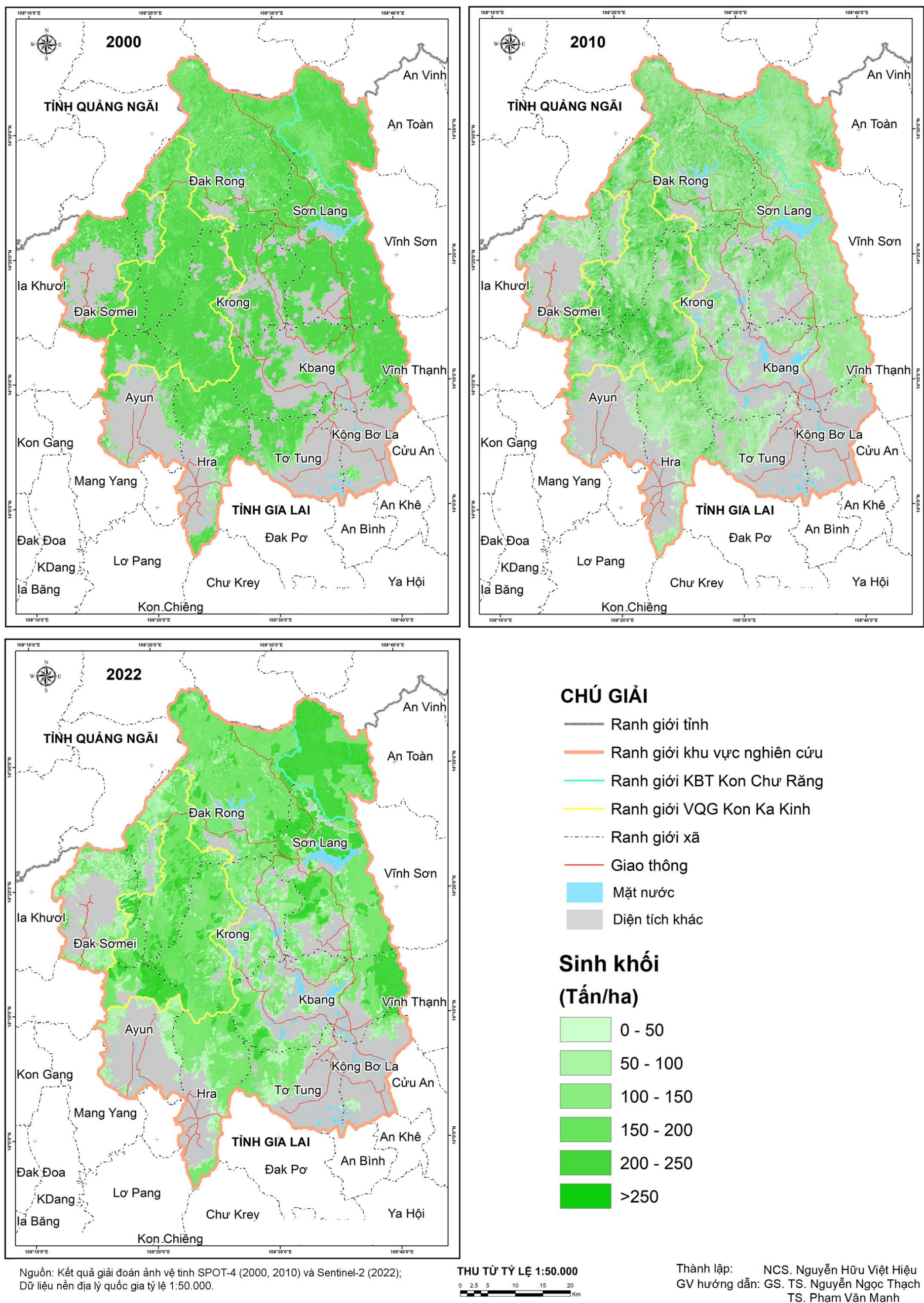
Bảng 3.7. Kết quả tính toán giá trị sinh khối rừng tự nhiên khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng các năm 2000, 2010 và 2022

Đơn vị: tấn/ha

Khoảng giá trị sinh khối		0 - 50	50 - 100	100 - 150	150 - 200	200 - 250	>250
2000	Diện tích (ha)	17.909,0	19.062,0	36.771,0	14.060,9	34.095,3	28.953,2
	%	11,9	12,6	24,4	9,3	22,6	19,2
2010	Diện tích (ha)	38.500,4	21.870,0	38.124,7	11.735,0	25.500,5	14.200,1
	%	25,7	14,6	25,4	7,8	17,0	9,5
2022	Diện tích (ha)	16.532,4	23.870,0	34.433,7	12.347,0	37.700,5	24.421,2
	%	11,1	16,0	23,1	8,3	25,3	16,4

Theo đó, đối với năm 2000, các khu vực có giá trị sinh khối trong khoảng 100 - 150 tấn/ha có diện tích trên 36.000 ha, chiếm 24,4 % tổng diện tích rừng tự nhiên, trong khi đó, các vùng có giá trị sinh khối nhỏ hơn 50 tấn/ha chỉ chiếm 11,9 % tổng diện tích rừng tự nhiên, tương đương 17.000 ha.

Đối với năm 2010, các vùng có giá trị sinh khối trong khoảng 0 - 50 tấn/ha có diện tích trên 38.000 ha, chiếm 25,7 % tổng diện tích rừng tự nhiên. Trong khi đó, các vùng có giá trị sinh khối trong khoảng 150 - 200 tấn/ha có tổng diện tích nhỏ nhất, với hơn 11.000 ha (chiếm 7,8 % tổng diện tích rừng tự nhiên). Đối với khoảng giá trị sinh khối lớn hơn 250 tấn/ha, tỷ lệ diện tích trong các năm 2010 và 2022 lần lượt là 9,5% và 16,4%. Khoảng giá trị sinh khối nhỏ hơn 50 tấn/ha có sự biến động rõ rệt trong giai đoạn 2010 - 2022, khi giảm từ 38.000 ha năm 2010 xuống còn khoảng 16.000 ha năm 2022.



Hình 3.9. Bản đồ sinh khối khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng năm 2000, 2010 và 2022

Các khu vực có giá trị sinh khối cao phân bố tập trung tại vùng lõi Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng, Vườn quốc gia Kon Ka Kinh và khu vực rừng phòng hộ đầu nguồn phía đông nam của cao nguyên Kon Hà Nừng. Đây là những khu vực có hệ sinh thái rừng kín thường xanh, cây lá rộng nguyên sinh chiếm ưu thế, cấu trúc ổn định và được bảo vệ nghiêm ngặt. Trong khi đó, những khu vực có giá trị sinh khối thấp tập trung ở phía nam cao nguyên Kon Hà Nừng và khu vực phía tây Vườn quốc gia Kon Ka Kinh (Hình 3.9).

Kết quả ước tính sinh khối tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng cho thấy giá trị sinh khối thảm thực vật rừng tự nhiên tại đây đạt trung bình 90 tấn/ha năm 2010 và 105 tấn/ha năm 2022. Đây là giá trị tương đối cao khi so sánh với sinh khối rừng tự nhiên tại Úc trung bình 72,9 tấn/ha và 85,7 tấn/ha (được xác định thông qua ảnh Landsat) [86], hay với giá trị sinh khối rừng ở mức 63,3 tấn/ha tại Gabon, hoặc khu vực rừng thuộc Madagascar với giá trị sinh khối trung bình đạt 81 tấn/ha [58]. Tuy nhiên, giá trị sinh khối tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng lại cho thấy thấp hơn so với một số khu vực rừng mưa nhiệt đới trên thế giới, ví dụ như tại French Guiana sinh khối đạt tới giá trị 250 - 500 tấn/ha [85].

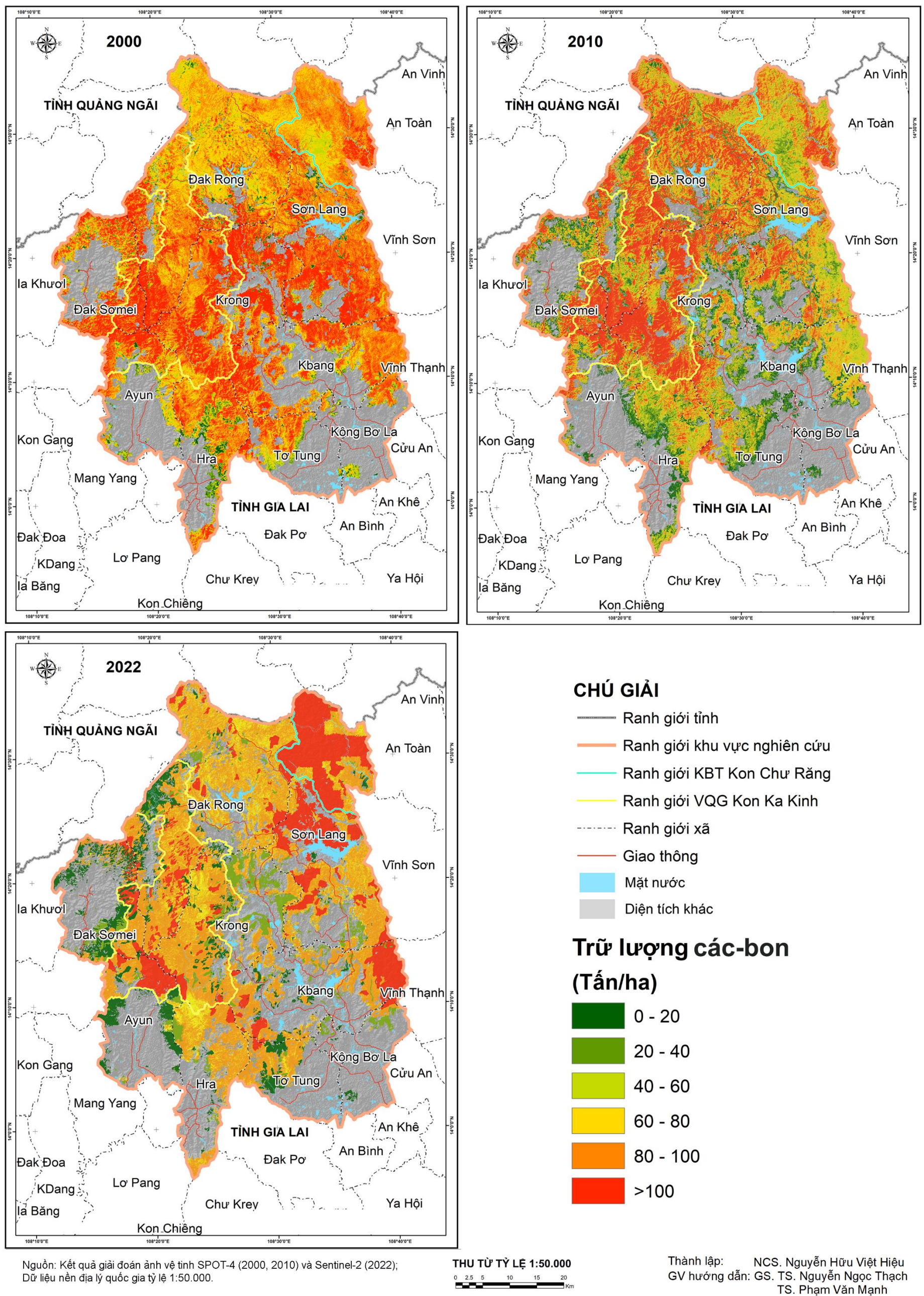
Dựa trên kết quả ước tính sinh khối năm 2010 và 2022 và công thức hồi quy tuyến tính, đã thành lập bản đồ trữ lượng các-bon năm 2010 và 2022 cho khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng (Hình 3.10) và thống kê số liệu theo bảng sau:

Bảng 3.8. Trữ lượng các-bon rừng tự nhiên khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng năm 2010 và 2022

Trữ lượng các-bon (tấn/ha)		0-20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	>100
2000	Diện tích (ha)	2.499	4.387	8.976	40.806	68.433	47.459
	%	1,45	2,54	5,20	23,65	39,66	27,50
2010	Diện tích (ha)	22.334	13.940	19.738	60.083	13.190	10.022,3
	%	18,22	9,63	10,49	41,52	9,35	7,09
2022	Diện tích (ha)	15.113	10.224	21.232	69.081	10.044	25.733
	%	10,02	6,87	14,03	46,19	7,11	15,91

Theo số liệu từ Bảng 3.8, những khu vực có trữ lượng các-bon trong khoảng từ 60 đến 80 tấn/ha có diện tích trên 60.000 ha, chiếm trên 41 % vào năm 2010 và trên 46 % vào năm 2022; trong khi đó, vào năm 2000, phần diện tích có giá trị nói trên đạt khoảng 40.000 ha (23,65 %). Đối với năm 2000, giá trị trữ lượng các-bon trên 100 tấn/ha chiếm ưu thế với khoảng 47.000 ha, tương ứng với 27,5 % diện tích.

Những khu vực rừng tự nhiên có trữ lượng các-bon trong khoảng giá trị trên 100 tấn/ha năm 2022 tăng mạnh, từ 7,09 % (2010) tăng lên 15,91 % (2022), với tổng diện tích rừng tự nhiên khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, phân bố chủ yếu ở vùng lõi Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng (Hình 3.10). Trong khi giai đoạn trước giảm mạnh từ 27,5 % năm 2000 xuống 7,09 % năm 2010. Những khu vực rừng tự nhiên có trữ lượng các-bon thấp tập trung chủ yếu ở phía tây Vườn quốc gia Kon Ka Kinh và phía nam cao nguyên Kon Hà Nừng.



Hình 3.10. Bản đồ trữ lượng các-bon khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng các năm 2000, 2010 và 2022

Kết quả nghiên cứu cho thấy tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, giá trị sinh khối cũng như trữ lượng các-bon của thảm thực vật rừng mưa nhiệt đới đang có dấu hiệu tích cực, thể hiện qua mức gia tăng trong giai đoạn 2010 - 2022. Những chính sách lâm nghiệp đối với hệ sinh thái rừng tại đây đã có tác động tích cực đến việc gia tăng AGB, đặc biệt là đối với những vùng thuộc khu bảo tồn thiên nhiên hay vườn quốc gia [142]. Các chính sách lâm nghiệp là điều quan trọng trong công tác quản lý rừng, giúp định hướng hành động của những người làm rừng hoặc quản lý tài nguyên thiên nhiên tại địa phương [65]. Trong những năm gần đây, các chính sách lâm nghiệp về bảo vệ rừng, bảo vệ các hệ sinh thái rừng tự nhiên và bảo tồn đa dạng sinh học tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng được đẩy mạnh đáng kể, đặc biệt là các chính sách về giao khoán bảo vệ rừng và chi trả dịch vụ môi trường rừng. Tại Việt Nam, chi trả dịch vụ môi trường rừng đang dần trở nên phổ biến với các cộng đồng quản lý rừng, tuy nhiên, chúng chưa trở thành nguồn thu nhập ổn định cho người dân địa phương, làm cho tính hiệu quả của chương trình bị hạn chế [130]. Về lâu dài, việc quản lý, bảo vệ rừng và đa dạng sinh học vẫn phải gắn liền với đời sống của người dân bản địa tại các khu vực có rừng. Chính sách phù hợp của nhà nước, văn hóa của những tộc người bản địa, hiểu biết về thiên nhiên, kỹ năng thích ứng với môi trường liên quan đến rừng góp phần quan trọng trong phát triển kinh tế - xã hội gắn với công tác bảo vệ, phát triển rừng, bảo tồn đa dạng sinh học cho khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng nói riêng, những khu vực miền núi cao nguyên nói chung [106].

3.2.2. Tính toán và theo dõi biến động lượng phát thải – hấp thụ CO₂ tại khu vực nghiên cứu

Từ số liệu biến động trạng thái rừng tự nhiên theo các loại, số liệu tổng hợp về diện tích mất rừng, suy thoái rừng, tăng cường chất lượng rừng và thêm rừng được trình bày trong Bảng 3.9.

Bảng 3.9. Biến động sinh khối rừng theo các khu vực biến động trạng thái rừng

Đơn vị: ha

Hạng mục	CO ₂ hấp thụ/ phát thải giai đoạn 2000 - 2010	CO ₂ hấp thụ/ phát thải giai đoạn 2010 - 2022	Tổng giai đoạn 2000 - 2022	Bình quân năm 2000 - 2022
Mất rừng	4.916.380	7.842.813	12.759.193	579.963
Suy thoái rừng	1.304.778	430.544	1.735.321	78.878
Thêm rừng	-1.106.484	-700.650	-1.807.134	-82.142
Tăng cường chất lượng rừng	-3.221.733	-4.460.000	-7.681.733	-349.170
Ròng	1.892.941	3.112.707	5.005.647	227.529

Ghi chú: dấu (-) là hấp thụ, dấu (+) là phát thải.

Căn cứ theo cách tính mức tham chiếu rừng (FRL): Trong giai đoạn quá khứ từ 2000 - 2022, tổng lượng phát thải từ mất rừng và suy thoái rừng khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng ở mức 14.494.515 tấn CO₂, tổng lượng hấp thụ là -9.488.867 tấn CO₂; lượng phát thải - hấp thụ ròng tại khu vực nghiên cứu có giá trị dương khoảng 5.005.647 tấn CO₂/22 năm tương đương 227.529 tấn CO₂/năm. Kết quả cho thấy tài nguyên rừng Kon Hà Nừng đang tạo ra lượng phát thải CO₂ lớn hơn lượng CO₂ mà rừng có thể hấp thụ.

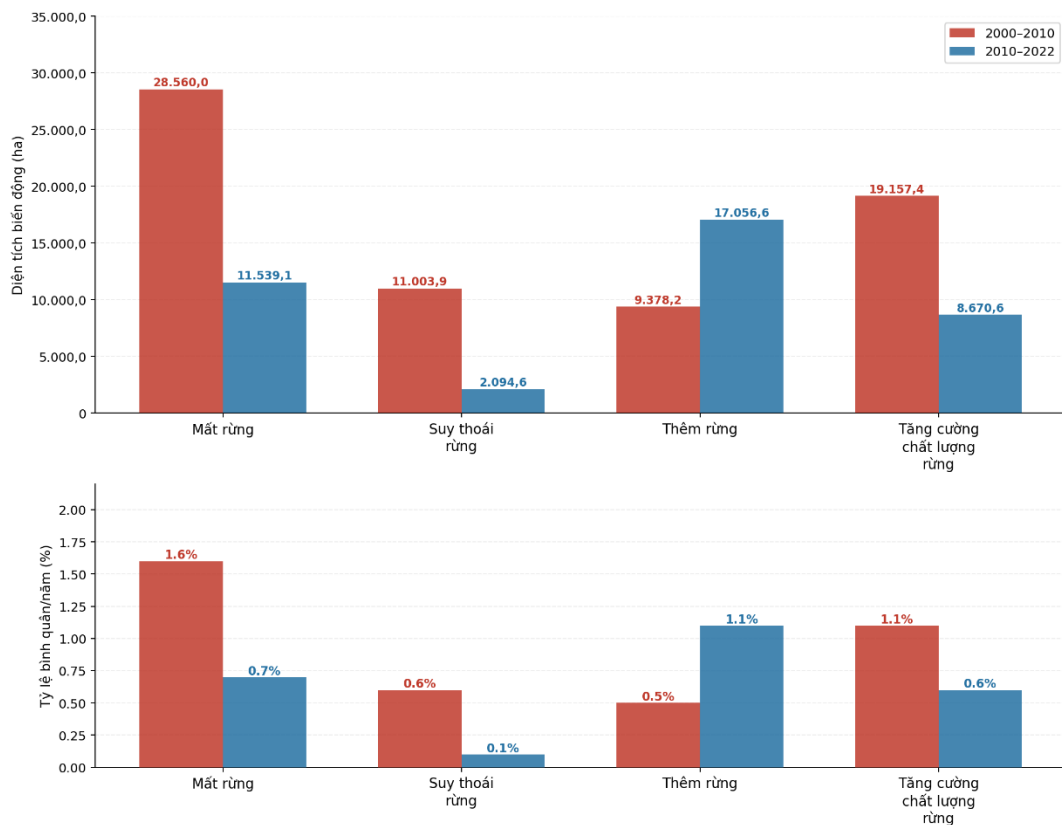
3.3. XÂY DỰNG ĐƯỜNG THAM CHIẾU RỪNG (FRL) CẤP CƠ SỞ KHOA HỌC THAM GIA CHƯƠNG TRÌNH GIẢM PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH THÔNG QUA CÁC HOẠT ĐỘNG GIẢM SUY THOÁI VÀ MẤT RỪNG

3.3.1. Tỷ lệ các loại hình biến động rừng tự nhiên theo giai đoạn 2000 - 2010 và 2010 - 2022

Từ dữ liệu biến động trạng thái rừng cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2022, nghiên cứu ước lượng tỷ lệ các loại hình biến động rừng tự nhiên bình quân giai đoạn như trong Bảng 3.10.

Bảng 3.10. Tỷ lệ các loại hình biến động rừng tự nhiên

Nội dung	Giai đoạn 2000 - 2010	Giai đoạn 2010 - 2022	Bình quân/năm giai đoạn 2000 - 2022
Diện tích đất có rừng	173.298,6	154.116,8	159.634,2
Mất rừng	28.560,0	11.539,1	20.049,5
- Tỷ lệ mất rừng bình quân/năm (ha)	2.856,0	1.153,9	2.005,0
- Tỷ lệ mất rừng bình quân/năm (%)	1,6	0,7	1,3
Suy thoái rừng	11.003,9	2.094,6	6.549,3
- Tỷ lệ suy thoái rừng bình quân/năm (ha)	1.100,4	209,5	654,9
- Tỷ lệ suy thoái rừng bình quân/năm (%)	0,6	0,1	0,4
Thêm rừng	9.378,2	17.056,6	13.217,4
- Tỷ lệ thêm rừng bình quân/năm (ha)	937,8	1.705,7	1.321,7
- Tỷ lệ thêm rừng bình quân/năm (%)	0,5	1,1	0,8
Tăng cường chất lượng rừng	19.157,4	8.670,6	13.914,0
- Tỷ lệ tăng cường chất lượng rừng bình quân/năm (ha)	1.915,7	867,1	1.391,4
- Tỷ lệ tăng cường chất lượng rừng bình quân/năm (%)	1,1	0,6	0,9



Hình 3.11. Biến động diện tích và tỷ lệ các loại hình rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000–2022

Bảng 3.10 cho thấy diễn biến khác biệt giữa hai giai đoạn 2000 - 2010 và 2010 - 2022 về các loại hình biến động rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng. Về tổng diện tích biến động, giá trị tuyệt đối của tổng diện tích biến động giảm từ 68.099,4 ha xuống còn 39.360,9 ha, cho thấy cường độ biến động chung giảm trong giai đoạn sau. Mất rừng giảm về diện tích tuyệt đối (28.560,0 ha xuống 11.539,1 ha) và về tỷ lệ bình quân/năm theo ha (2.856,0 xuống 1.153,9 ha/năm), nhưng tỷ lệ mất rừng theo phần trăm giảm (1,6 % xuống 0,7 %).

Suy thoái rừng giảm rõ rệt cả về diện tích và tỷ lệ bình quân/năm (từ 11.003,9 ha xuống 2.094,6 ha; bình quân theo năm giảm từ 1.100,4 xuống 209,5 ha/năm), phản ánh hiệu quả bước đầu của các biện pháp bảo vệ hoặc sự thay đổi trong áp lực khai thác. Ngược lại, diện tích rừng tăng về diện tích tuyệt đối và bình quân/năm (9.378,2 lên 17.056,6 ha; 937,8 lên 1.705,7 ha/năm), cho thấy hoạt động phục hồi/trồng rừng được đẩy mạnh trong giai đoạn sau. Tăng cường chất lượng rừng giảm cả về diện tích và tốc độ hàng năm, nhưng tỷ lệ phần trăm tăng cường chất lượng rừng biến động lớn giữa hai giai đoạn.

3.3.2. Kịch bản giảm mất rừng, suy thoái rừng

Từ dữ liệu về diện tích biến động và tỷ lệ phần trăm bình quân theo năm, nghiên cứu đã xác định diện tích rừng tự nhiên giai đoạn 2023 - 2030 theo 3 kịch bản đề xuất nhằm giảm tỷ lệ mất rừng so với giai đoạn 2000 - 2022 (Bảng 3.11).

Phạm vi áp dụng giả thiết của phân tích kịch bản tập trung vào giảm phát thải do mất rừng và suy thoái: các kịch bản chỉ điều chỉnh trực tiếp lượng phát thải sinh ra từ những chuyển đổi làm giảm sinh khối trên mặt đất (ΔAGB) trong giai đoạn tham chiếu, đồng thời lượng hấp thụ được cập nhật theo cơ chế ghép nối: phần diện tích rừng tránh được mất rừng sẽ phục hồi và gia tăng hấp thụ, áp dụng hệ số phục hồi (ϕ) và hệ số chiết khấu rủi ro đảo ngược (buffer) theo hướng dẫn FCPF. Việc áp dụng hệ số phục hồi và chiết khấu rủi ro cho phép so sánh trực tiếp giữa đường cơ sở lịch sử và các kịch bản giảm phát thải, đồng thời giảm thiểu nhiễu do độ trễ sinh học và bất định lớn liên quan đến hiệu quả hấp thụ của các hoạt động trồng rừng hoặc nâng cao chất lượng (ví dụ: thời gian sinh trưởng, rủi ro đảo ngược). Thời gian thực hiện giả

định rằng mức giảm phần trăm nêu đạt được trong toàn bộ giai đoạn tham chiếu tương ứng (tức là giảm tổng phát thải giai đoạn 2000 - 2022 theo tỷ lệ đã chọn), nhằm phản ánh một thay đổi chính sách/biện pháp quản lý có hiệu lực liên tục trong giai đoạn đó và thuận tiện cho việc so sánh tổng tích lũy phát thải giữa các kịch bản.

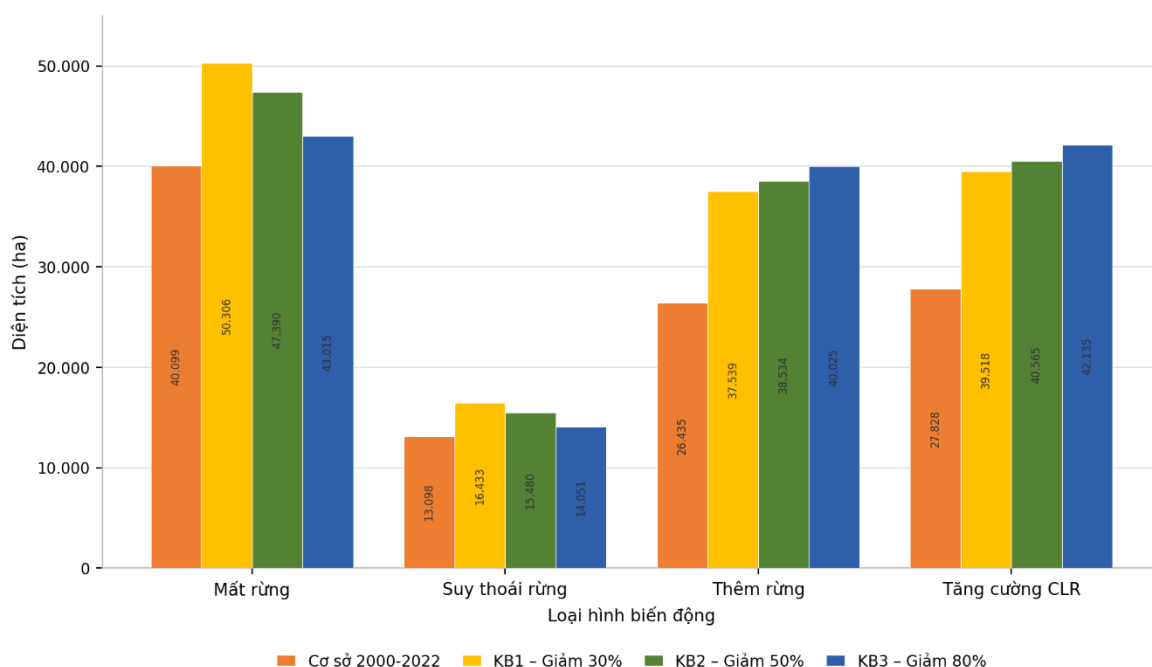
Lựa chọn ba mức giảm 30 % / 50 % / 80 % được biện minh dựa trên cơ sở khoa học và chính sách quản lý: mức 30 % đại diện cho kịch bản giảm vừa phải, khả thi trong ngắn - trung hạn khi triển khai các biện pháp quản lý cơ bản (tăng tuần tra, thi hành pháp luật, hỗ trợ sinh kế cộng đồng) và thường phù hợp với các kịch bản chính sách ban đầu trong nhiều nghiên cứu; mức 50 % phản ánh kịch bản tham vọng hơn, có thể đạt được khi có hỗ trợ tài chính và kỹ thuật đáng kể (ví dụ dự án REDD+, cơ chế thị trường các-bon, chương trình phục hồi quy mô lớn), phù hợp để đánh giá tác động chính sách mạnh; mức 80 % là kịch bản rất tham vọng (gần như không phá rừng) dùng để kiểm tra giới hạn tiềm năng giảm phát thải, đánh giá tính nhạy cảm của lợi ích khí hậu và ước lượng tối đa các tín chỉ các-bon có thể tạo ra, đồng thời làm rõ nhu cầu đầu tư, thay đổi thể chế và rủi ro thực hiện. Ba mức này cho phép phân tích nhạy cảm một cách hệ thống: so sánh chi phí-lợi ích, rủi ro và yêu cầu nguồn lực giữa các kịch bản khả thi, kịch bản được hỗ trợ và kịch bản tối đa, đồng thời cung cấp thông tin thực tiễn để hoạch định chính sách và lập lộ trình nhằm đạt các mục tiêu khí hậu trung hạn và dài hạn.

Các kịch bản được xây dựng theo hướng mở, phụ thuộc vào năng lực và khả năng thực hiện các hoạt động của dự án REDD+, nhằm giám sát hiệu quả việc triển khai REDD+ tại địa phương. Việc đề xuất kịch bản giảm mất rừng và suy thoái rừng theo hướng mở là cần thiết, vì kết quả phụ thuộc vào nhiều yếu tố kinh tế, xã hội, tự nhiên và chính sách quản lý của Nhà nước. Biến động kinh tế có thể ảnh hưởng đến nguồn lực bảo vệ rừng; các yếu tố xã hội như nhận thức cộng đồng, di cư và nhu cầu đất đai cũng tác động lớn đến rừng. Các điều kiện tự nhiên như biến đổi khí hậu, thiên tai có thể làm thay đổi trạng thái rừng và lớp phủ ngoài dự đoán. Chính sách quản lý và sự hỗ trợ từ chính quyền quyết định hiệu quả của việc thực hiện các giải pháp. Do đó, các tham số kịch bản mở cho phép các nhà hoạch định chính sách linh hoạt điều

chính mục tiêu dựa trên tình hình thực tế, đảm bảo các giải pháp đưa ra phù hợp và khả thi. Cách tiếp cận như vậy sẽ tạo điều kiện cho sự tham gia của cộng đồng và các bên liên quan, hướng tới mục tiêu chung là bảo vệ và phát triển bền vững tài nguyên rừng. Các loại hình biến động rừng tự nhiên tại khu vực nghiên cứu được ước tính như bảng sau:

Bảng 3.11. Diện tích các loại hình biến động rừng tự nhiên đến 2030 theo kịch bản giảm mất rừng, suy thoái rừng

TT	Trạng thái	Diện tích rừng biến động đến năm 2022 (ha)	Tỷ lệ biến động giai đoạn 2000 - 2022 (%/năm)	Diện tích các loại hình biến động đến 2030 theo kịch bản giảm tỷ lệ mất rừng, suy thoái rừng so với giai đoạn 2000 - 2022 (ha)		
				30 %	50 %	80 %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	Mất rừng	40.099,0	1,3	50.306,0	47.389,7	43.015,3
2	Suy thoái rừng	13.098,5	0,4	16.432,7	15.480,0	14.051,1
3	Thêm rừng	26.434,7	0,8	37.539,0	38.533,5	40.025,3
4	Tăng cường CLR	27.828,0	0,9	39.517,7	40.564,6	42.134,9



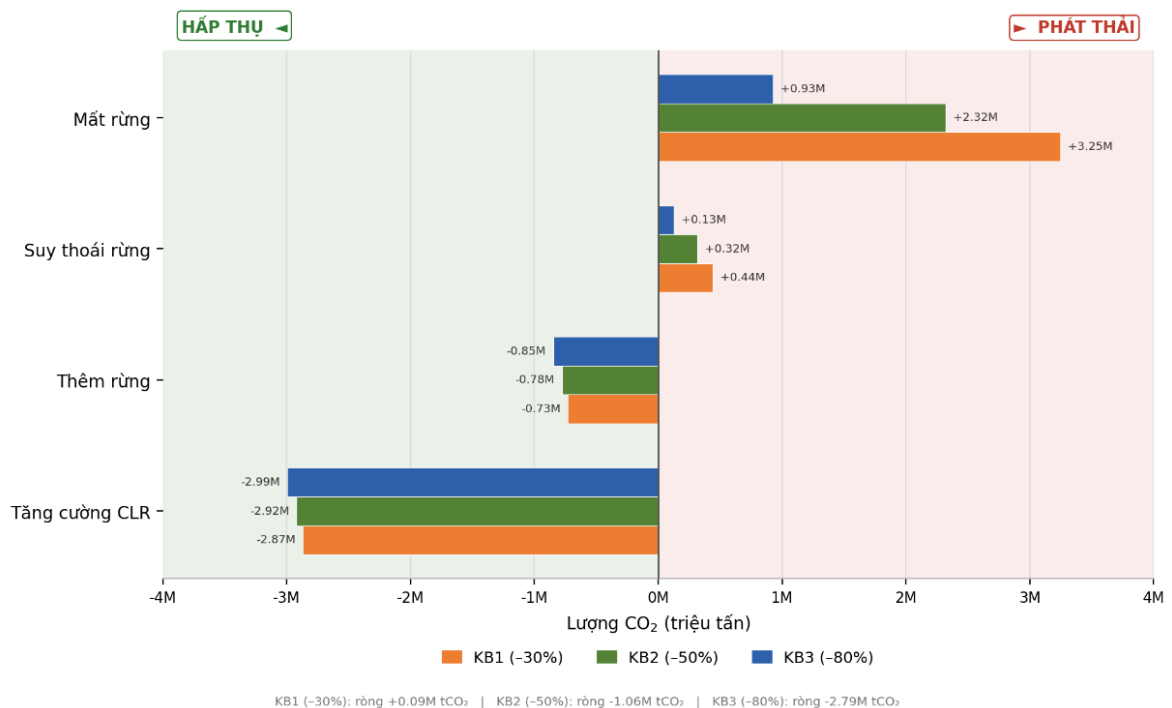
Hình 3.12. So sánh diện tích các loại hình biến động rừng tự nhiên đến năm 2030 theo 3 kịch bản REDD+ tại cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai

Tương ứng với 3 kịch bản được đề xuất, nghiên cứu xác định được lượng phát thải và hấp thụ CO₂ giai đoạn 2023 - 2030 tại Kon Hà Nừng như trong Bảng 3.12.

Bảng 3.12. Lượng phát thải và hấp thụ CO₂ giai đoạn 2023 – 2030 theo loại hình biến động

TT	Trạng thái	Diện tích rừng biến động đến năm 2022 (ha)	Tỷ lệ biến động giai đoạn 2000 - 2022 (%/năm)	CO ₂ hấp thụ/phát thải loại hình biến động đến 2030 theo kịch bản giảm tỷ lệ mất rừng, suy thoái rừng so với giai đoạn 2000 - 2022 (Tấn)		
				30 %	50 %	80 %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	Mất rừng	40.099,0	1,3	3.247.793	2.319.852	927.941
2	Suy thoái rừng	13.098,5	0,4	441.717	315.512	126.205
3	Thêm rừng	26.434,7	0,8	-728.745	-776.484	-848.093
4	Tăng cường CLR	27.828,0	0,9	-2.868.744	-2.918.999	-2.994.383
5	ΔR (*)			-146.993	-244.988	-391.980

(*) ΔR : phần hấp thụ ghép nối từ giảm mất và suy thoái rừng, đã gộp trong Thêm rừng và Tăng cường chất lượng rừng.



Hình 3.13. Lượng CO₂ phát thải (+) và hấp thụ (-) giai đoạn 2023–2030 theo loại hình biến động và 3 kịch bản REDD+ tại cao nguyên Kon Hà Nừng, tỉnh Gia Lai

Bảng 3.13. Diện tích rừng tự nhiên đến 2030 theo kịch bản giảm tỷ lệ mất rừng

TT	Trạng thái	Diện tích rừng tự nhiên năm 2022 (ha)	Tỷ lệ diện tích rừng tự nhiên bị mất giai đoạn 2000 - 2022 (%/năm)	Diện tích rừng tự nhiên đến 2030 theo kịch bản giảm tỷ lệ mất rừng so với giai đoạn 2000 - 2022 (ha)		
				30 %	50 %	80 %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	Rừng giàu	38.557,7	1,3	35.750,7	36.552,7	37.755,7
2	Rừng trung bình	81.952,5		75.986,4	77.691,0	80.247,9
3	Rừng nghèo	24.022,4		22.273,6	22.773,2	23.522,7
4	Rừng phục hồi	15.101,7		14.002,3	14.316,4	14.787,6
Tổng		159.634,2		148.013,0	151.333,3	156.313,9

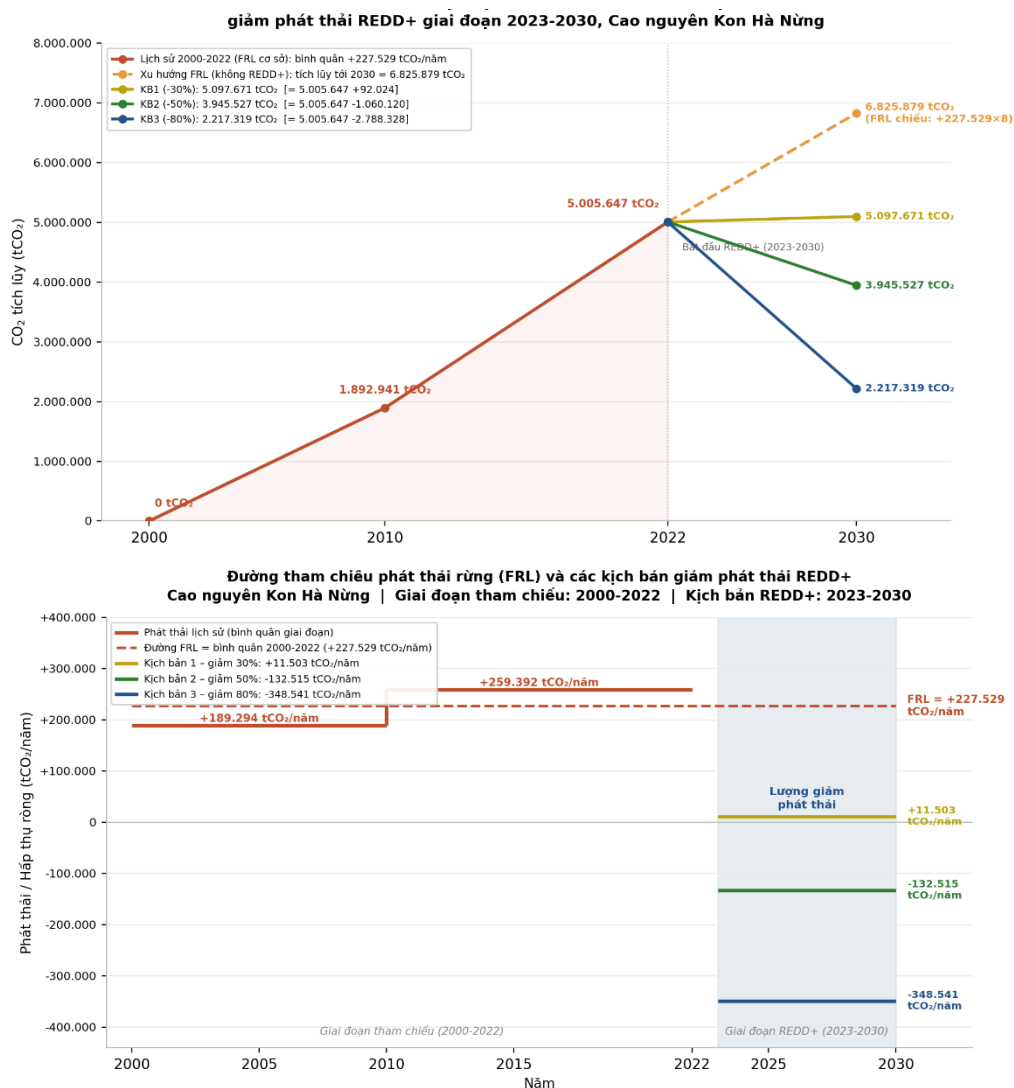
Ghi chú: (5) hoặc (6) hoặc (7) = (3)-[(3)(4)*(100% - 30 % hoặc 50 % hoặc 80 %)*8 năm]*

Các kịch bản giảm phát thải được tổng hợp lại như sau:

Bảng 3.14. Lượng CO₂ hấp thụ/phát thải theo các kịch bản giảm phát thải

TT	Kịch bản	Lượng CO ₂ phát thải 2023 - 2030 (tấn/năm)	Lượng CO ₂ hấp thụ 2023 - 2030 (tấn/năm)	Ròng 2023 - 2030 (tấn/năm)	Ròng 2000 - 2022	So sánh với ròng 2000 - 2022 (tấn/năm)
1	Kịch bản 1 (30 %)	461.189	-449.686	11.503	227.529	-216.026
2	Kịch bản 2 (50 %)	329.420	-461.935	-132.515	227.529	-360.044
3	Kịch bản 3 (80 %)	131.768	-480.309	-348.541	227.529	-576.070

Ghi chú: dấu (-) là hấp thụ, dấu (+) là phát thải.



Hình 3.14. Đường tham chiếu rừng (FRL) và các kịch bản giảm phát thải trong giai đoạn 2023-2030

Kết quả ròng giai đoạn 2023–2030 (đường phát thải) của từng kịch bản được minh họa trong Hình 3.14. Với các kết quả tính toán nêu trên, trong giai đoạn 2023 - 2030, khi thực hiện REDD+ theo cả 3 kịch bản, lượng phát thải CO₂ đều giảm xuống dưới mức phát thải cơ sở so với giai đoạn 2000 - 2022. Áp dụng mức giá tạm tính cho mỗi tấn chỉ CO₂, được quy định tại Quyết định số 5399/BNN ngày 25/12/2015, là 5 đô la Mỹ/tấn CO₂. Mức 5 USD/tấn CO₂ được sử dụng là đơn giá tham chiếu thận trọng, căn cứ theo mức chi trả giảm phát thải (ERPA) đã áp dụng cho vùng Bắc Trung Bộ và khung LEAF cho vùng Nam Trung Bộ – Tây Nguyên; đây là giá tạm tính để ước tính tiềm năng, không phải giá giao dịch cam kết. Do giá trị tín chỉ tỷ lệ thuận

tuyến tính với đơn giá, kết quả có thể được quy đổi tương ứng khi áp dụng các mức giá khác nhau (phân tích độ nhạy). Việc xem xét lựa chọn một trong ba kịch bản được đánh giá như sau:

Trong kịch bản 1: Khi thực hiện các biện pháp giảm 30% lượng phát thải từ mất rừng và suy thoái rừng, phát thải ròng giảm từ mức nền 227.529 tấn CO₂/năm xuống còn 11.503 tấn CO₂/năm. Mặc dù vẫn còn phát thải ròng dương, lượng giảm phát thải so với đường tham chiếu (FRL) đạt 216.026 tấn CO₂/năm, tương đương 1.728.208 tấn CO₂ trong giai đoạn 2023 - 2030. Do tín chỉ các-bon được tính trên lượng giảm phát thải so với đường tham chiếu chứ không phụ thuộc vào phát thải ròng còn dương hay âm, kịch bản này vẫn tạo ra khoảng 8,6 triệu USD (~216 tỷ đồng).

Trong kịch bản 2: Giảm 50 % lượng phát thải từ mất rừng và suy thoái rừng giúp phát thải ròng giảm từ 227.529 xuống -132.515 tấn CO₂/năm (chuyển sang hấp thụ ròng). Lượng giảm phát thải so với đường tham chiếu đạt 360.044 tấn CO₂/năm, tương đương 2.880.352 tấn CO₂ trong giai đoạn 2023 - 2030, mang lại khoảng 14,4 triệu USD (~360 tỷ đồng).

Trong kịch bản 3: Giảm tới 80 % lượng phát thải giúp phát thải ròng giảm xuống -348.541 tấn CO₂/năm (hấp thụ ròng). Lượng giảm phát thải so với đường tham chiếu đạt 576.070 tấn CO₂/năm, tương đương 4.608.560 tấn CO₂ trong giai đoạn 2023 - 2030, mang lại khoảng 23,0 triệu USD (~576 tỷ đồng).

Các kịch bản đều theo hướng mở và phụ thuộc vào năng lực thực hiện dự án, giám sát hiệu quả hoạt động REDD+ của địa phương. Việc linh hoạt trong mục tiêu giúp các nhà hoạch định dễ dàng điều chỉnh theo tình hình thực tế, đảm bảo giảm phát thải CO₂ tối ưu và bảo vệ rừng hiệu quả.

3.4. ĐỀ XUẤT ĐỊNH HƯỚNG SỬ DỤNG, BẢO VỆ VÀ PHÁT TRIỂN RỪNG KHU VỰC CAO NGUYÊN KON HÀ NỪNG

Cần lưu ý rằng nội dung định giá rừng trồng, dịch vụ hệ sinh thái và đề xuất các hoạt động REDD+ trong phần này là bước ứng dụng, khai thác kết quả phân tích viễn thám – GIS nhằm phục vụ định hướng quản lý và chia sẻ lợi ích; đây không phải là đối tượng chính của mô hình ước tính sinh khối rừng tự nhiên vốn là trọng tâm chuyên môn của luận án.

3.4.1. Các nguyên nhân dẫn đến mất rừng và suy thoái rừng

Dựa trên việc xác định các nguyên nhân chủ yếu dẫn đến mất rừng và suy thoái rừng, nghiên cứu đã tìm hiểu và kế thừa các nguồn tài liệu nhằm xác định ảnh hưởng của các yếu tố kinh tế - xã hội. Các nguyên nhân mất rừng và suy thoái rừng ở cao nguyên Kon Hà Nừng chịu sự chi phối của các yếu tố kinh tế - xã hội như nhu cầu sử dụng gỗ, phát triển kinh tế hộ gia đình, nhu cầu sử dụng củi, phát triển chăn nuôi, nhu cầu lương thực, phát triển cơ sở hạ tầng và phát triển cây công nghiệp.

Việc phát triển kinh tế - xã hội là cần thiết đối với mỗi địa phương, đặc biệt ở vùng sâu, vùng xa và vùng có điều kiện đặc biệt khó khăn. Tuy nhiên, phát triển kinh tế - xã hội cần gắn với việc bảo tồn và phát triển tài nguyên rừng. Nếu không có quy hoạch và quản lý bền vững, các hoạt động kinh tế có thể dẫn đến khai thác quá mức tài nguyên rừng, gây mất rừng và suy thoái rừng. Qua kết quả nghiên cứu, có thể thấy rõ mối tương quan chặt chẽ giữa biến động LULC và sự phát triển kinh tế - xã hội, cũng như các điều kiện tự nhiên. Các hình ảnh viễn thám cho phép quan sát và phân tích sự thay đổi diện tích rừng theo thời gian, từ đó đánh giá tác động của các hoạt động kinh tế đối với rừng. Sự mở rộng nông nghiệp và phát triển cơ sở hạ tầng thường đi kèm với việc suy giảm diện tích rừng. Đồng thời, các điều kiện tự nhiên như địa hình và khí hậu cũng ảnh hưởng đến tốc độ và mức độ suy thoái rừng. Do đó, cần có sự cân bằng giữa phát triển kinh tế và bảo vệ môi trường, đồng thời áp dụng công nghệ hiện đại trong quản lý và giám sát rừng để bảo đảm phát triển bền vững. Nguyên nhân biến động LULC, bao gồm cả nguyên nhân trực tiếp và gián tiếp, sẽ được trình bày chi tiết trong phần tiếp theo.

3.4.1.1. Nguyên nhân trực tiếp

Chuyển đổi trạng thái rừng tự nhiên sang các trạng thái cây trồng kinh tế: Giai đoạn từ năm 2000 đến 2022 chứng kiến sự suy giảm tương đối lớn về diện tích rừng tự nhiên. Diện tích rừng bị mất chủ yếu do chuyển đổi sang trồng các loại cây nông nghiệp có giá trị kinh tế cao như cà phê, hồ tiêu, sắn... Việc chuyển đổi tiêu cực không chỉ làm giảm diện tích rừng mà còn ảnh hưởng đến môi trường sống của nhiều loài sinh vật, gây mất cân bằng hệ sinh thái và tăng nguy cơ xảy ra thiên tai như lũ lụt, xói lở đất.

Chuyển rừng nghèo sang trồng rừng nguyên liệu, cao su, điều và hồ tiêu: Đến năm 2022, diện tích rừng trồng tại khu vực nghiên cứu đạt hơn 8.000 ha, chủ yếu trồng các loài cây như keo, thông, cao su, xoan... Mặc dù việc trồng rừng nguyên liệu nhằm mục đích kinh tế, nhưng năng suất và chất lượng rừng trồng ở khu vực nghiên cứu tương đối thấp. Nguyên nhân có thể do thiếu kỹ thuật chăm sóc, quản lý bền vững và lựa chọn giống cây chưa phù hợp với điều kiện tự nhiên của địa phương. Việc trồng rừng đơn loài cũng làm giảm đa dạng sinh học, ảnh hưởng đến sức chống chịu của rừng trước sâu bệnh và biến đổi khí hậu.

Ảnh hưởng của khai thác đến suy thoái rừng tự nhiên: Trước năm 2010, việc khai thác gỗ từ rừng tự nhiên vẫn được Nhà nước cấp phép. Tuy nhiên, việc thực hiện các kỹ thuật khai thác theo quy trình còn hạn chế, dẫn đến ảnh hưởng lớn đến tính đa dạng sinh học của khu rừng. Khai thác không bền vững gây ra suy thoái rừng, làm mất đi các loài cây quý hiếm, phá vỡ cấu trúc và chức năng của hệ sinh thái. Hậu quả là rừng mất khả năng cung cấp các dịch vụ môi trường quan trọng như điều tiết nước, bảo vệ đất đai và lưu trữ các-bon.

3.4.1.2. Nguyên nhân gián tiếp

- Tăng dân số: Năm 2000, dân số tại các xã thuộc khu vực nghiên cứu là 41.528 người, phần lớn là người dân tộc thiểu số. Việc nâng cao nhận thức cho người dân về chính sách dân số - kế hoạch hóa gia đình (DS-KHHGĐ) vẫn còn gặp nhiều khó khăn. Theo thống kê của Trung tâm DS-KHHGĐ, năm 2022, tỷ lệ sinh con thứ 3 trở lên chiếm 32,3 %, tăng 5,2 % so với năm 2021. Áp lực dân số tăng nhanh do tăng cơ học và di cư tự do từ nơi khác đến, dẫn đến nhu cầu về đất ở và đất canh tác tăng cao. Nhiều hộ gia đình gặp khó khăn về kinh tế, sinh kế chủ yếu dựa vào việc khai thác tài nguyên rừng. Di cư tự do diễn biến phức tạp, chưa được kiểm soát; việc thực hiện các dự án ổn định dân cư di cư tự do còn chậm, góp phần gia tăng tình trạng phá rừng, lấn chiếm đất rừng.

- Giá nông sản cao: Giá cả một số mặt hàng nông sản như cà phê, hồ tiêu tăng cao, thúc đẩy người dân mở rộng diện tích canh tác để trồng các loại cây có giá trị cao. Nhu cầu về đất canh tác tăng, dẫn đến việc phá rừng, lấn chiếm đất để trồng trọt hoặc buôn bán đất, sang nhượng trái phép nhằm thu lợi. Việc thiếu sự quản lý và giám

sát chặt chẽ từ cơ quan chức năng khiến tình trạng đội giá nông sản khó được ngăn chặn hiệu quả.

- Thiếu kinh phí bảo vệ rừng: Tình trạng người dân phá rừng, lấn chiếm đất rừng trái phép để phục vụ mục đích khác diễn ra mạnh mẽ tại Kon Hà Nừng. Bên cạnh đó, có một số rào cản trong việc nâng cao diện tích và chất lượng rừng. Diện tích rừng tự nhiên chủ yếu được giao cho các chủ rừng lớn, nhưng ranh giới chủ rừng không ổn định, gây khó khăn cho công tác quản lý và bảo vệ. Việc đầu tư bảo vệ và phát triển rừng tự nhiên mới chỉ dừng lại ở khâu bảo vệ, chưa chú trọng đến việc phát triển và phục hồi rừng. Chính sách hưởng lợi cho các hộ gia đình, cá nhân, tổ chức tham gia phát triển rừng chưa thực sự hợp lý, chưa thu hút được các thành phần kinh tế, nhất là các doanh nghiệp sản xuất kinh doanh lâu dài. Việc đầu tư cho công tác trồng rừng phòng hộ, đặc dụng còn thấp, không đáp ứng được nhu cầu cấp thiết về bảo vệ môi trường và đa dạng sinh học.

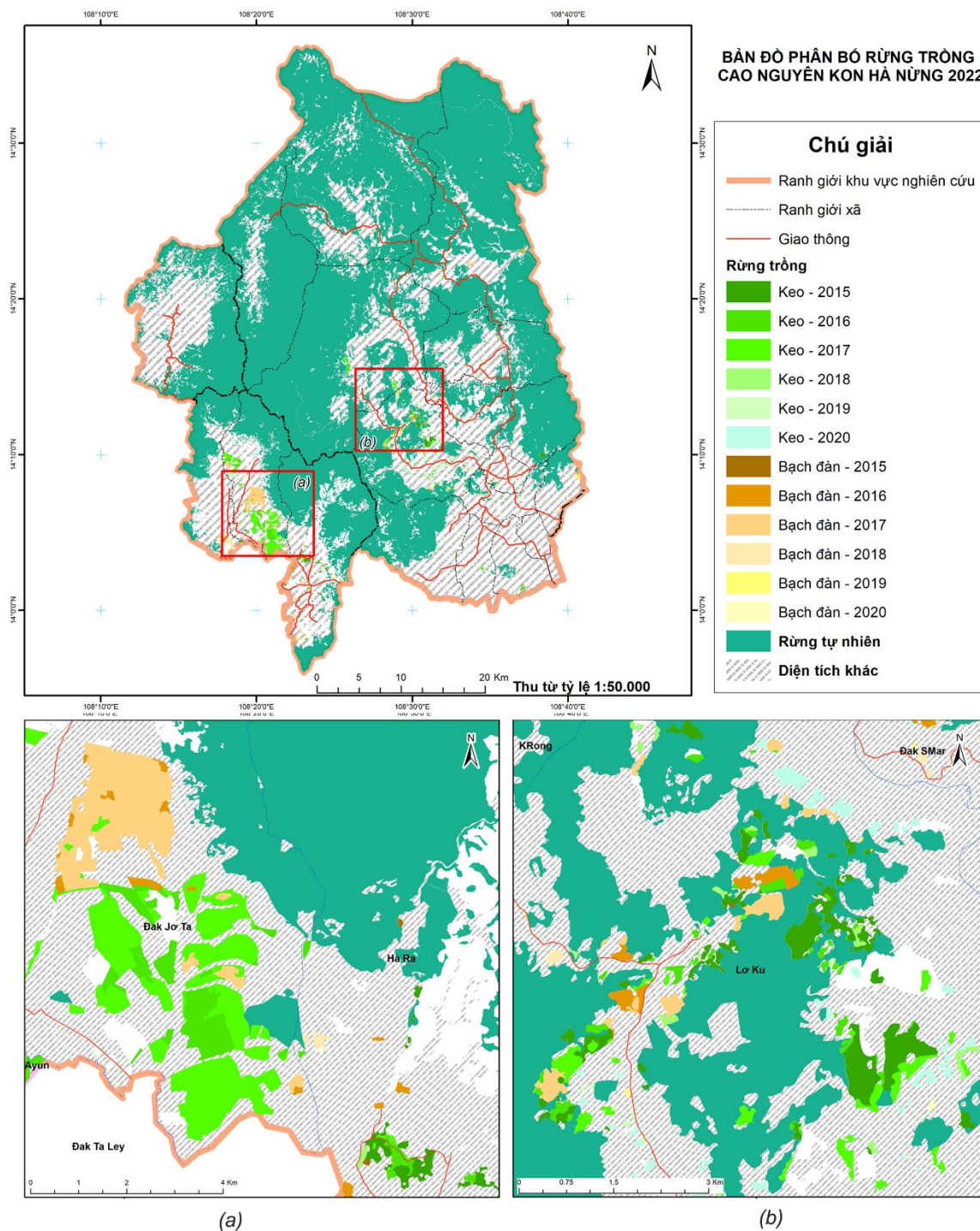
Biến động trạng thái rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng có mối quan hệ chặt chẽ với sự phát triển kinh tế - xã hội và các điều kiện tự nhiên. Sự phát triển kinh tế - xã hội mang lại nhiều lợi ích như nâng cao đời sống người dân, phát triển hạ tầng, nhưng cũng tạo áp lực lớn lên tài nguyên rừng. Phát triển nông nghiệp: Nhu cầu mở rộng diện tích canh tác để trồng các loại cây có giá trị kinh tế cao dẫn đến việc chuyển đổi mục đích sử dụng đất rừng. Di cư và dân số: Gia tăng dân số và di cư tự do làm tăng nhu cầu đất ở và đất sản xuất, dẫn đến xâm lấn rừng. Lợi nhuận kinh tế trước mắt: Người dân phá rừng để trồng cây nông sản có giá trị cao hoặc buôn bán đất, ít quan tâm đến các hậu quả dài hạn đối với môi trường. Quản lý và chính sách: Thiếu kinh phí và chính sách hợp lý trong việc bảo vệ và phát triển rừng, quản lý rừng chưa hiệu quả, dẫn đến suy thoái rừng. Các điều kiện tự nhiên như địa hình, khí hậu cũng ảnh hưởng đến khả năng phục hồi rừng và hiệu quả của các biện pháp bảo vệ. Khu vực Kon Hà Nừng có địa hình phức tạp, khí hậu khắc nghiệt, khiến việc quản lý và bảo vệ rừng gặp nhiều khó khăn hơn.

Với những khó khăn trên khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, cần có những giải pháp phù hợp để bảo đảm sự hài hòa giữa việc bảo tồn rừng và phát triển sinh kế của người dân địa phương. Đề xuất được các giải pháp phù hợp cho mục tiêu bảo vệ

và phát triển rừng cần xác định được các yếu tố kinh tế - xã hội có ảnh hưởng lớn đến mất rừng và suy thoái rừng từ đó có những giải pháp và chính sách phù hợp, như vậy thì các chương trình, giải pháp đưa ra mới có tính khả thi và có thể triển khai được một cách hiệu quả trong thực tế.

3.4.2. Sự tham gia của sản phẩm rừng trồng trong thu nhập cộng đồng dân cư tại cao nguyên Kon Hà Nừng

Rừng trồng không chỉ đem lại hiệu quả kinh tế ngay lập tức từ các sản phẩm trực tiếp từ gỗ mà còn có ý nghĩa lớn về mặt môi trường trong bối cảnh Trái Đất chịu các tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu và hiện tượng nóng lên toàn cầu. Với sự phát triển của công nghệ viễn thám, GIS trong thời gian qua, công tác phân loại, đánh giá hiện trạng rừng và định giá rừng được đẩy mạnh và đem lại nhiều tác động tích cực trong hoạt động bảo tồn và phát triển tài nguyên rừng [101, 145].



Hình 3.15. Bản đồ phân bố rừng trồng thành lập từ ảnh Sentinel-2 năm 2022

Ứng dụng viễn thám trong nghiên cứu lớp phủ rừng giúp giải quyết các vấn đề thực tiễn trong lĩnh vực lâm nghiệp, đem lại hiệu quả cao với chi phí hợp lý, tiết kiệm thời gian và tăng độ chính xác so với các phương pháp truyền thống [123]. Bản đồ lớp phủ rừng giúp xác định quy mô và diện tích các loại rừng trồng ở quy mô lớn,

phục vụ chính xác công tác định giá rừng trồng, đồng thời giúp xác định hiệu quả kinh tế của mô hình rừng trồng trong khu vực nghiên cứu [94]. Tại Việt Nam, định giá rừng trồng đã và đang là hoạt động thường xuyên trong ngành lâm nghiệp, giúp xác định hiệu quả kinh tế cho người dân địa phương, đặc biệt ở các khu vực miền núi. Trong bối cảnh đó, việc kết hợp giữa phát triển kinh tế rừng trồng và các hoạt động chi trả dịch vụ môi trường rừng, cùng với việc giao khoán bảo vệ rừng tại Việt Nam, là một giải pháp quan trọng giúp ổn định sinh kế cho người dân miền núi, đồng thời góp phần bảo tồn và phát triển bền vững tài nguyên rừng.

Từ bản đồ hiện trạng rừng được lập từ ảnh Sentinel-2 năm 2022, tách các lô rừng trồng để đối soát với số liệu khung giá rừng được xây dựng cho tỉnh Gia Lai theo loài cây và năm trồng. Từ đó, thống kê được diện tích và ước tính giá trị rừng trồng của khu vực nghiên cứu. Theo kết quả thống kê từ bản đồ, tổng diện tích rừng trồng Keo và Bạch đàn khu vực nghiên cứu gồm có 3.692,4 ha, nằm trên phạm vi 02 cụm xã Mang Yang và Kbang như sau:

Bảng 3.15. Thống kê diện tích rừng trồng theo loài cây và năm trồng khu vực nghiên cứu

TT	Loài cây	Diện tích theo năm trồng (ha)						Tổng
		2015 - Năm 8	2016 - Năm 7	2017 - Năm 6	2018 - Năm 5	2019 - Năm 4	2020 - Năm 3	
A	X. Kbang	280,1	193,9	601,1	153,5	64,3	206,8	1.499,7
1	Bạch đàn	5,3	65,0	279,5	54,6	35,2	35,2	474,7
2	Keo	274,8	128,9	321,6	99,0	29,1	171,6	1.025,0
B	X. Mang Yang	109,9	469,7	1.318,	213,2	75,2	6,6	2.192,7
1	Bạch đàn	3,1	104,1	501,7	206,2	21,3	6,6	843,0
2	Keo	106,8	365,7	816,3	7,0	53,9		1.349,7
Tổng		390,0	663,7	1.919,	366,8	139,5	213,4	3.692,4

Thời điểm xác định giá trị rừng trồng là năm 2022, do đó năm trồng được xác định theo quyết định công bố khung giá rừng tỉnh Gia Lai theo mức tương quan sau:

2015: năm trồng 8

2016: năm trồng 7

2017: năm trồng 6

2018: năm trồng 5

2019: năm trồng 4

2020: năm trồng 3

Cần phân biệt hai phạm vi số liệu: con số khoảng 8.000 ha là tổng diện tích rừng trồng của toàn khu vực (gồm nhiều loài như keo, thông, cao su, xoan...), trong khi 3.692,4 ha là diện tích riêng của hai loài keo và bạch đàn được đưa vào phân tích định giá do có đủ dữ liệu về sinh trưởng và giá thị trường.

Bảng 3.16. Khung giá rừng áp dụng cho rừng trồng Keo và Bạch đàn

Stt	Năm định giá	Khung giá rừng (Ngàn đồng/ha)	
		Giá tối thiểu	Giá tối đa
I	Keo		
1	Giá trị rừng năm 1	36.045	39.764
2	Giá trị rừng năm 2	59.314	63.490
3	Giá trị rừng năm 3	75.355	80.095
4	Giá trị rừng năm 4	77.929	83.568
5	Giá trị rừng năm 5	80.314	86.555
6	Giá trị rừng năm 6	82.851	89.732
7	Giá trị rừng năm 7	85.217	92.448
8	Giá trị rừng năm 8	88.087	96.043
9	Giá trị rừng năm 9	91.140	99.867
10	Giá trị rừng năm 10	97.143	107.776
II	Bạch đàn		
1	Giá trị rừng năm 1	33.063	47.844
2	Giá trị rừng năm 2	56.044	73.515
3	Giá trị rừng năm 3	72.223	92.316
4	Giá trị rừng năm 4	76.210	98.361
5	Giá trị rừng năm 5	79.974	104.041
6	Giá trị rừng năm 6	83.513	109.356
7	Giá trị rừng năm 7	86.828	114.306
8	Giá trị rừng năm 8	89.919	118.890
9	Giá trị rừng năm 9	92.810	123.149
10	Giá trị rừng năm 10	95.502	127.084

Khung giá rừng áp dụng cho hai loài cây Keo và Bạch đàn được xác định từ kết quả điều tra trữ lượng, xác định tổng chi phí đầu tư theo hồ sơ trồng rừng năm đầu và chăm sóc rừng các năm tiếp theo, kết quả xác định thu nhập dự kiến dựa trên kết quả điều tra phỏng vấn các xưởng thu mua gỗ trên địa bàn và bảng giá thu mua gỗ cây đứng, hồ sơ thiết kế khai thác các công ty lâm nghiệp tại địa phương. Giá rừng trồng

bao gồm tổng chi phí đã đầu tư vào việc tạo rừng và thu nhập dự kiến tại thời điểm định giá, được nêu cụ thể trong Bảng 3.17.

Căn cứ vào bảng khung giá rừng áp dụng cho rừng trồng, nghiên cứu đã xác định tổng giá trị của 3.692,4 ha rừng trồng trong khu vực nghiên cứu đạt khoảng 317 tỷ đồng. Trong đó, xã Mang Yang với tổng diện tích 2.192,7 ha đạt tổng giá trị rừng 199 tỷ; xã Kbang với tổng diện tích rừng trồng 1.499,7 ha tương ứng với giá trị rừng 118 tỷ. Như vậy, thu nhập bình quân một năm trồng keo đạt 17.160.000 đồng và thu nhập bình quân một năm trồng bạch đàn đạt 14.300.000 đồng.

Bảng 3.17. Giá trị rừng trồng khu vực nghiên cứu

TT		Giá trị rừng theo loài cây, năm trồng (Ngàn đồng)						Tổng
		2015 - Năm 8	2016 - Năm 7	2017 - Năm 6	2018 - Năm 5	2019 - Năm 4	2020 - Năm 3	
A	X. Kbang	25.851.204	17.991.101	54.707.679	13.276.542	5.417.950	16.231.122	118.156.549
1	Bạch đàn	548.123	6.538.859	26.955.417	5.019.017	3.068.971	2.895.055	42.611.087
2	Keo	25.303.082	11.452.242	27.752.262	8.257.525	2.348.979	13.336.066	75.545.462
B	X. Mang Yang	10.154.633	42.948.246	118.820.292	19.559.529	6.214.969	546.268	198.609.742
1	Bạch đàn	318.433	10.464.991	48.381.271	18.973.818	1.861.807	546.268	80.481.020
2	Keo	9.836.200	32.483.255	70.439.021	585.711	4.353.162	0	118.128.722
Giá trị rừng trồng								316.766.291

3.4.3. Định hướng thu nhập từ sản phẩm và dịch vụ hệ sinh thái rừng

Theo kết quả, trong 3 kịch bản giảm mất rừng, suy thoái rừng, nghiên cứu nhận định kịch bản giảm 30 % diện tích mất rừng, suy thoái rừng đến 2030 là có khả năng dễ thực hiện nhất; kịch bản 2 giảm 50 % khó thực hiện; và kịch bản 3 giảm 80 % không khả thi. Do đó, lựa chọn kịch bản 1, tính toán giá trị thu về từ việc bán tín chỉ các-bon kết hợp với các nguồn kinh phí dịch vụ môi trường rừng khác tại khu vực nghiên cứu, nhằm thiết lập cơ sở ước tính thu nhập cho diện tích có rừng tại Kon Hà Nừng.

Theo QĐ số 75/2015/NĐ-CP ngày 09 tháng 09 năm 2015 của Thủ tướng Chính phủ Việt Nam về cơ chế, chính sách bảo vệ và phát triển rừng, gắn với chính sách

giảm nghèo nhanh, bền vững và hỗ trợ đồng bào dân tộc thiểu số giai đoạn 2015 - 2020. Theo đó, các hộ gia đình kinh tế khó khăn, miền núi, đồng bào dân tộc thiểu số khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng được ưu tiên thực hiện các công tác liên quan đến quản lý và bảo vệ rừng, nhận giao khoán rừng, với số tiền hỗ trợ là 400.000 đ/ha/năm. Theo số liệu khảo sát của nhóm nghiên cứu năm 2022 tại khu vực Vườn quốc gia Kon Ka Kinh (20 hộ được phỏng vấn) và Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng (25 hộ được phỏng vấn), giá trị kinh tế từ giao khoán bảo vệ rừng dao động trong khoảng từ 12.000.000 đ/năm đến 23.000.000 đ/năm.

Theo Quyết định số 123/QĐ-UBND ngày 26 tháng 01 năm 2022 UBND tỉnh Gia Lai về việc phê duyệt kế hoạch thu, chi tiền dịch vụ môi trường rừng lưu vực thủy điện, nước sạch, nước công nghiệp năm 2022:

- Kế hoạch thu năm 2022: 110.000.372 nghìn đồng, trong đó: Đối tượng đưa vào xây dựng kế hoạch chi năm 2022, gồm: 43 chủ rừng là tổ chức, 28 chủ rừng là cộng đồng dân cư, 112 UBND cấp xã (giảm 03 chủ rừng là tổ chức, tăng 06 cộng đồng dân cư và 02 UBND cấp xã so với kế hoạch năm 2021) với tổng diện tích rừng cung ứng 472.451,26 ha.

+ Kinh phí 87% chi trả cho các bên cung ứng: 93.689.430 nghìn đồng;

Như vậy, trung bình 1 ha có rừng nằm trong lưu vực thủy điện, nước sạch, nước công nghiệp được chi trả 198.000 đồng.

Từ kết quả ước tính giá trị thu về từ bán tín chỉ các-bon, các dịch vụ môi trường rừng tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, kết quả định giá rừng trồng đánh giá tổng hợp thu nhập từ rừng dự kiến tại khu vực nghiên cứu khi có sự tham gia chương trình giảm phát thải như sau:

Bảng 3.18. Tổng hợp đơn giá dịch vụ môi trường rừng cao nguyên Kon Hà Nừng

TT	Kịch bản giảm 30 % mất rừng, suy thoái rừng đến 2030	Thu nhập khai thác gỗ rừng trồng (Đồng/ha)	Đơn giá chi trả DVMTR (Đồng/ha)	Đơn giá khoán bảo vệ rừng (Đồng/ha)	Đơn giá hoạt động REDD+ (Đồng/ha)	Tổng đơn giá áp dụng (Đồng/ha)
1	Rừng tự nhiên	0	198.305	400.000	307.158	905.463
2	Rừng trồng	17.160.000	178.474	0	0	17.338.474

Ngoài ra, còn được hỗ trợ trồng rừng bổ sung với kinh phí 1.600.000 đ/ha/năm trong 3 năm đầu và 600.000 đ/ha/năm trong 3 năm tiếp theo. Hỗ trợ 5.000.000 đ đến 10.000.000 đ/ha để mua cây giống, phân bón và các chi phí khác cho việc trồng rừng. Được hỗ trợ gạo với mức 15 kg/khẩu/tháng hoặc bằng tiền tương ứng nhưng không quá 7 năm. Ngoài ra, còn có một số chính sách hỗ trợ vay vốn khác nhằm thúc đẩy kinh tế đối với các hộ gia đình khó khăn và đồng bào dân tộc thiểu số.

Trong khi đó, chi phí nhận được từ dịch vụ môi trường rừng tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng cho mỗi ha rừng là 198.000 đồng. Như vậy, trung bình giá trị nhận được từ các hoạt động giao khoán bảo vệ rừng và chi trả dịch vụ môi trường rừng dao động từ 22.200.000 đ đến 25.200.000 đ/năm. Ví dụ cụ thể, theo Quyết định số 716/QĐ-UBND của tỉnh Gia Lai đã phê duyệt phương án quản lý rừng bền vững giai đoạn 2021 - 2030 của ban quản lý Khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng, hàng năm tham gia cung ứng dịch vụ môi trường rừng với tổng diện tích đất có rừng là 15.270,02 ha, với đơn giá bình quân dự kiến khoảng 182.068 đồng/ha; thì hàng năm tổng tiền thu được của khu bảo tồn khoảng trên 2,78 tỷ đồng.

3.4.4. Đề xuất các hoạt động REDD+ tại khu vực nghiên cứu

Xây dựng các giải pháp thực hiện REDD+ nhằm can thiệp vào việc giảm thiểu mất rừng, suy thoái rừng, tăng cường trữ lượng các-bon, bảo tồn trữ lượng các-bon rừng và quản lý rừng bền vững là một nội dung quan trọng trong tiến trình thực hiện REDD+ ở mỗi địa phương.

Với kết quả phân tích như đã được đề cập ở trên, nghiên cứu đã tiến hành tham vấn các bên liên quan (Chi cục Kiểm lâm, Hạt Kiểm lâm Mang Yang, Kbang, các xã thuộc ranh giới cao nguyên Kon Hà Nừng và một số công ty lâm nghiệp ở địa phương). Kết quả tham vấn các bên liên quan đã xác định đề xuất các hoạt động chính như sau:

3.4.4.1. Tăng cường quản lý, bảo vệ rừng và ứng dụng công nghệ viễn thám trong giám sát biến động rừng

Tiếp tục thực hiện giao khoán bảo vệ rừng cho cộng đồng dân cư và hộ gia đình; tăng cường lực lượng kiểm lâm địa bàn; thực thi nghiêm các quy định pháp luật về quản lý, bảo vệ rừng. Nâng cao năng lực cho chủ rừng: đánh giá và củng cố năng lực

bảo vệ và phát triển rừng của các chủ rừng, đặc biệt là các chủ rừng quy mô nhỏ; tổ chức đào tạo về quản lý rừng bền vững, kỹ thuật lâm sinh hiện đại và kiến thức về chuỗi giá trị lâm sản. Bên cạnh các biện pháp quản lý hành chính và cộng đồng nêu trên, việc ứng dụng công nghệ viễn thám và hệ thống thông tin địa lý đóng vai trò then chốt trong việc giám sát diễn biến rừng và phát hiện sớm các hoạt động khai thác trái phép, từ đó đưa ra biện pháp ứng phó kịp thời.

Cụ thể, cần xây dựng hệ thống giám sát rừng tự động dựa trên ảnh vệ tinh Sentinel-2 (độ phân giải không gian 10 m, chu kỳ lặp 5 ngày), tích hợp với ảnh Sentinel-1 SAR vốn không bị ảnh hưởng bởi mây, trên nền tảng điện toán đám mây Google Earth Engine. Hệ thống này cho phép tự động phát hiện biến động rừng theo chu kỳ tháng và gửi cảnh báo đến Hạt Kiểm lâm thông qua ứng dụng di động trong vòng 24–48 giờ sau khi biến động xảy ra. Để kiểm tra, xác minh các điểm cảnh báo tại những khu vực địa hình hiểm trở thuộc vùng lõi Khu bảo tồn Kon Chư Răng và VQG Kon Ka Kinh, cần triển khai thiết bị bay không người lái (UAV) với chi phí vận hành thấp hơn đáng kể so với phương tiện bay có người lái. Ngoài ra, ứng dụng mô hình học máy (Random Forest, XGBoost) để dự báo không gian nguy cơ mất rừng tích hợp các biến như khoảng cách đến đường giao thông, mật độ dân số, độ dốc địa hình và lịch sử biến động sẽ cung cấp bản đồ phân vùng nguy cơ giai đoạn 2025 - 2030, hỗ trợ phân bổ nguồn lực tuần tra một cách có trọng tâm và hiệu quả hơn. Thực hiện chứng chỉ rừng bền vững: hỗ trợ các chủ rừng đạt được chứng chỉ quản lý rừng bền vững như FSC (Forest Stewardship Council), đảm bảo việc quản lý rừng tuân thủ các tiêu chuẩn quốc tế.

3.4.4.2. Phục hồi và nâng cao chất lượng rừng thông qua khoanh nuôi tái sinh và làm giàu rừng

Khoanh nuôi tái sinh tự nhiên: áp dụng các biện pháp bảo vệ, thúc đẩy quá trình tái sinh tự nhiên trên diện tích đất trống có cây gỗ tái sinh (2.241,8 ha), giúp tăng trữ lượng các-bon và đa dạng sinh học. Làm giàu rừng bằng cây bản địa: trồng bổ sung các loài cây gỗ quý, cây bản địa nhằm nâng cao chất lượng rừng và giá trị kinh tế. Hỗ trợ vườn ươm và kỹ thuật: xây dựng, nâng cấp các vườn ươm cây giống chất lượng

cao, cung cấp hỗ trợ kỹ thuật và kinh phí cho cộng đồng và chủ rừng tham gia hoạt động phục hồi rừng.

Để nâng cao hiệu quả và tính chính xác của công tác phục hồi, cần ứng dụng dữ liệu viễn thám đa chỉ số thực vật. Dữ liệu NDVI đa thời gian từ Sentinel-2, kết hợp với các chỉ số EVI và NBR, cho phép lập bản đồ các khu vực có tiềm năng phục hồi cao, xác định chính xác các vị trí ưu tiên khoanh nuôi tái sinh, thay vì chỉ đánh giá định tính dựa trên thực địa đơn thuần. Song song đó, việc tích hợp dữ liệu GEDI LiDAR (Global Ecosystem Dynamics Investigation) từ trạm không gian quốc tế ISS vào mô hình ước tính sinh khối cho các kỳ cập nhật tiếp theo (sau năm 2022) sẽ giúp theo dõi sự gia tăng sinh khối theo từng năm với độ chính xác cao hơn đáng kể so với mô hình hồi quy đơn biến hiện đang được sử dụng. Toàn bộ thông tin về loài cây trồng, năm trồng, tỷ lệ sống sót và sinh trưởng cần được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu GIS để theo dõi tiến độ phục hồi và cung cấp đầu vào có hệ thống cho báo cáo MRV định kỳ theo yêu cầu của chương trình UN-REDD.

3.4.4.3. Phát triển rừng trồng gỗ lớn và mô hình nông lâm kết hợp gắn với hệ thống quản lý dữ liệu GIS

Chuyển đổi trồng mới rừng gỗ lớn: thực hiện trồng rừng trên diện tích đất trống (4.061,5 ha), chuyển đổi 500 ha rừng trồng gỗ nhỏ sang rừng gỗ lớn và trồng mới 1.000 ha rừng gỗ lớn sau khai thác. Mô hình nông lâm kết hợp: phát triển các mô hình kết hợp giữa trồng rừng và canh tác nông nghiệp, giúp người dân tăng thu nhập, đồng thời giảm áp lực lên rừng tự nhiên. Lựa chọn cây trồng hiệu quả: nghiên cứu, lựa chọn các loài cây phù hợp với điều kiện địa phương, có giá trị kinh tế và khả năng hấp thụ các-bon cao.

Để quản lý hiệu quả các diện tích rừng trồng đang mở rộng, cần triển khai ứng dụng UAV độ phân giải cao ($GSD < 5\text{ cm}$), kết hợp phần mềm xử lý ảnh UAV chuyên dụng, nhằm đánh giá mật độ, chiều cao và sinh trưởng rừng trồng theo từng lô, thay thế công tác đo đếm thủ công tốn thời gian và chi phí. Trên cơ sở dữ liệu ô tiêu chuẩn kết hợp với ảnh vệ tinh, có thể xây dựng mô hình tăng trưởng rừng trồng số hóa, dự báo sản lượng gỗ và trữ lượng các-bon tích lũy theo từng kịch bản quản lý, hỗ trợ quyết định thời điểm khai thác tối ưu về cả kinh tế lẫn khả năng hấp thụ các-bon. Bên

cạnh đó, hệ thống thông tin GIS di động (mobile GIS) cho phép cán bộ lâm nghiệp và người dân cập nhật, tra cứu thông tin lô rừng trồng trực tiếp tại thực địa qua thiết bị di động, góp phần nâng cao tính kịp thời và tính minh bạch của dữ liệu quản lý.

3.4.4.4. Phát triển lâm sản ngoài gỗ và nâng cao sinh kế cộng đồng địa phương

Khảo sát và phát triển lâm sản ngoài gỗ: đánh giá tiềm năng phát triển các sản phẩm như dược liệu, mật ong, nhựa cây, góp phần đa dạng hóa nguồn thu nhập cho cộng đồng. Xây dựng chuỗi giá trị: hỗ trợ thành lập nhóm, tổ, hợp tác xã, xây dựng thương hiệu, chỉ dẫn địa lý và tiếp cận thị trường cho sản phẩm lâm sản ngoài gỗ. Đào tạo và hỗ trợ kỹ thuật: tập huấn kỹ thuật khai thác bền vững, quản lý và phát triển sản phẩm, cung cấp hỗ trợ về cây giống, vật tư và tín dụng.

Nhằm tối ưu hóa không gian thu hái và kiểm soát cường độ khai thác, có thể ứng dụng mô hình MaxEnt tích hợp dữ liệu ảnh vệ tinh, mô hình số độ cao (DEM) và dữ liệu khí hậu để xây dựng bản đồ phân bố tiềm năng các loài lâm sản ngoài gỗ có giá trị trong đó bao gồm các loài dược liệu quý như sâm Ngọc Linh, lan kim tuyến phục vụ quy hoạch vùng thu hái bền vững. Nền tảng GIS web-based (ArcGIS Online hoặc QGIS Server) cho phép công bố công khai bản đồ vùng lâm sản ngoài gỗ cho cộng đồng và kết hợp với hệ thống đăng ký thu hái trực tuyến, đảm bảo kiểm soát được cường độ khai thác theo không gian và thời gian. Ở cấp độ thị trường, hệ thống truy xuất nguồn gốc sản phẩm rừng tích hợp mã QR gắn với dữ liệu GIS về lô rừng, loại sản phẩm và thời điểm thu hái sẽ nâng cao giá trị thương mại, đáp ứng các tiêu chuẩn chứng chỉ rừng FSC và tạo thêm động lực kinh tế cho cộng đồng tham gia bảo vệ rừng.

3.4.4.5. Hoàn thiện thể chế, tăng cường hợp tác và xây dựng hạ tầng dữ liệu GIS phục vụ báo cáo MRV

Xây dựng và thực hiện phương án quản lý rừng bền vững: điều tra bổ sung tài nguyên rừng và đa dạng sinh học; đánh giá tác động môi trường và xã hội; xây dựng kế hoạch quản lý rừng đáp ứng các tiêu chuẩn quốc tế. Tăng cường hợp tác và phối hợp: rà soát, bổ sung và thực hiện quy chế phối hợp giữa các cấp xã, tỉnh và các đơn vị chủ rừng, qua đó nâng cao hiệu quả quản lý, bảo vệ rừng. Huy động nguồn lực tài chính và kỹ thuật: tích cực kêu gọi các dự án, nguồn vốn đầu tư, liên kết với các tổ

chức quốc tế và các chương trình REDD+ nhằm đa dạng hóa nguồn lực để thực hiện kế hoạch.

Tính bền vững của toàn bộ hệ thống quản lý rừng phụ thuộc không nhỏ vào việc thiết lập nền tảng dữ liệu và năng lực kỹ thuật tại địa phương. Về hạ tầng dữ liệu, cần xây dựng hệ thống cơ sở dữ liệu GIS tập trung (cloud-based GIS) lưu trữ toàn bộ dữ liệu bản đồ trạng thái rừng, sinh khối và biến động qua các giai đoạn, phục vụ báo cáo MRV định kỳ theo yêu cầu của chương trình UN-REDD và lộ trình Net-Zero 2050 của Việt Nam. Hệ thống này cần được xây dựng theo chuẩn IPCC Tier 2/3, tích hợp dữ liệu đa nguồn (ảnh vệ tinh, kiểm kê rừng, dữ liệu khí hậu, kinh tế – xã hội), bảo đảm tính minh bạch, khả năng kiểm chứng và tương thích với các hệ thống báo cáo quốc tế. Về nhân lực, cần tổ chức các khóa đào tạo ngắn hạn về viễn thám và GIS cho cán bộ kiểm lâm, Ban quản lý rừng tại địa phương sử dụng các công cụ mã nguồn mở (Google Earth Engine, QGIS), bảo đảm tính tự chủ trong vận hành hệ thống giám sát sau khi các dự án REDD+ kết thúc; đây là điều kiện tiên quyết để các kết quả nghiên cứu được chuyển giao và phát huy lâu dài trong thực tiễn quản lý rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng.

3.4.5. Nhận định chung về dịch vụ môi trường rừng và ổn định sinh kế

Phát triển kinh tế lâm nghiệp có vai trò quan trọng trong việc ổn định sinh kế của người dân khu vực miền núi Việt Nam, góp phần bảo tồn và phát triển tài nguyên rừng. Các chức năng kinh tế, môi trường, xã hội, văn hóa và thẩm mỹ của rừng đóng góp đáng kể vào sự thịnh vượng của các cộng đồng sống phụ thuộc vào rừng [98]. Tại Việt Nam, trong một vài năm gần đây, diện tích rừng bao phủ nhanh với tốc độ trung bình 240.000 ha/năm và có khoảng 13,39 triệu ha trong năm 2020 đã góp phần vào việc sử dụng đất trồng, tạo việc làm và cải thiện đời sống cho 25 % dân số sống ở khu vực miền núi của Việt Nam [93]. Bên cạnh đó, các chính sách và quy định của chính phủ đã cung cấp một nền tảng vững chắc cho việc phát triển diện tích trồng rừng và bảo tồn hệ sinh thái rừng, mặc dù rừng và đất rừng đã được giao và khoán cho các tổ chức, hộ gia đình và cá nhân.

Dữ liệu viễn thám là công cụ đáng tin cậy trong phân tích không gian và lập bản đồ phân bố rừng trồng, cũng như các chỉ cây ưu thế liên quan [32]. Cũng giống như

khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng, tại Kenya, rừng trồng bạch đàn cũng là loài cây được trồng phổ biến ở các khu vực đồi núi nhằm cải thiện sinh kế cho người dân [51]. Các dịch vụ hệ sinh thái rừng mang lại nguồn thu nhập hàng năm đáng kể, giúp người dân khu vực miền núi ổn định sinh kế. Giá trị các dịch vụ hệ sinh thái rừng tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng (22.200.000 đ đến 25.200.000 đ/năm) cao hơn đáng kể so với giá trị dịch vụ môi trường rừng tại Trung Quốc (USD 430.89–646.12) [66].

Tuy nhiên, giá trị dịch vụ hệ sinh thái rừng không chỉ đem lại về mặt kinh tế trực tiếp cho người dân bản địa [136], mà còn thông qua nhiều giá trị lợi ích khác bao gồm an ninh lương thực và sinh kế, ngăn ngừa xói mòn đất và lở đất [118]. Để bảo tồn và giữ vững giá trị tài nguyên rừng, cần xây dựng các khung chính sách hợp lý, góp phần ổn định sinh kế cho người dân khu vực miền núi. Khung chính sách lâm nghiệp là công cụ đặt ra các điều kiện chung về pháp lý, hành chính, khuyến khích, truyền thông và các điều kiện khác cho quản lý rừng [89]. Vì vậy, dựa trên kết quả nghiên cứu luận án và đánh giá hiệu quả của các chính sách lâm nghiệp địa phương, có thể giúp các nhà quản lý xây dựng một "Khung quản lý rừng bền vững", cung cấp một cách tiếp cận toàn diện để lập kế hoạch quản lý rừng và bảo tồn tài nguyên rừng bền vững.

3.4.6. Thảo luận về kết quả nghiên cứu và mục tiêu đạt Net-Zero vào năm 2050 tại Việt Nam

3.4.6.1. Thảo luận về lựa chọn dữ liệu, độ tin cậy kết quả và hạn chế nghiên cứu

Việc tích hợp ảnh SPOT-4 (năm 2000, 2010) và Sentinel-2 (năm 2022) là lựa chọn có cơ sở khoa học vững chắc, đảm bảo tính liên tục của chuỗi quan sát kéo dài hơn hai thập kỷ, điều mà rất ít nghiên cứu về sinh khối rừng nhiệt đới ở quy mô khu vực có thể đạt được. Hai nguồn tư liệu này cung cấp đầy đủ các kênh phổ cần thiết (Green, Red, NIR, SWIR) để tính toán các chỉ số thực vật như NDVI và EVI phục vụ phân loại LULC và ước tính sinh khối trên mặt đất. Đặc biệt, điểm khác biệt quan trọng của nghiên cứu này so với các nghiên cứu tương tự là sự hiện diện của bộ dữ liệu đo đạc thực địa đầy đủ cho cả 3 thời điểm 2000, 2010 và 2022, bao gồm hệ thống ô tiêu chuẩn với các chỉ tiêu được thu thập trực tiếp tại khu vực nghiên cứu. Chính bộ dữ liệu thực địa đa thời điểm này đã khắc phục được phần lớn hạn chế vốn có của

ảnh quang học đơn lẻ, cho phép kiểm chứng và hiệu chỉnh kết quả viễn thám một cách độc lập và nhất quán ở từng giai đoạn. Kết quả cho thấy sự kết hợp giữa dữ liệu viễn thám và điều tra thực địa đa thời gian là nền tảng phương pháp luận đáng tin cậy, đáp ứng đầy đủ yêu cầu khoa học của mục tiêu nghiên cứu đã đặt ra.

Tại cao nguyên Kon Hà Nừng, nơi rừng giàu và rừng trung bình chiếm tỷ trọng lớn trong cơ cấu diện tích, tương quan giữa các chỉ số quang phổ và sinh khối thực địa duy trì ở mức chặt chẽ và ổn định, qua đó khẳng định tính phù hợp của phương pháp trong điều kiện địa hình và thảm thực vật đặc thù của khu vực. Như mọi nghiên cứu dựa trên ảnh quang học, dữ liệu có thể bị ảnh hưởng bởi điều kiện mây che phủ trong mùa mưa Tây Nguyên; tuy nhiên, hạn chế này đã được xử lý thông qua việc lựa chọn ảnh tháng khô (tháng 1-4) và áp dụng bước hiệu chỉnh chéo phổ giữa SPOT-4 và Sentinel-2 nhằm đảm bảo tính nhất quán của chuỗi dữ liệu đa thời điểm. Bên cạnh đó, do phạm vi ước tính sinh khối được xác định trong khuôn khổ thực tế của luận án, kết quả tập trung vào thành phần sinh khối trên mặt đất của thực vật sống thành phần có cơ sở dữ liệu thực địa đầy đủ và phương pháp kiểm chứng rõ ràng nhất; các bể chứa các-bon bổ sung như gỗ mục, thảm mục và các-bon hữu cơ trong đất sẽ là hướng mở rộng tự nhiên trong các nghiên cứu tiếp theo khi điều kiện thu thập số liệu cho phép. Những điều chỉnh về phạm vi và phương pháp nêu trên phản ánh cách tiếp cận khoa học nghiêm túc và có chủ đích, không làm giảm giá trị của các kết quả đã đạt được mà ngược lại, là cơ sở để các nghiên cứu kế tiếp có thể kế thừa và phát triển một cách có hệ thống.

Độ bất định của kết quả bắt nguồn và lan truyền qua toàn bộ chuỗi tính toán: sai số phân loại trạng thái rừng → sai số của phương trình ước tính sinh khối (thể hiện qua R^2 và RMSE) → sai số của hệ số chuyển đổi các-bon (0,47) → sai số quy đổi CO_2 . Đây là giới hạn được nhận diện của nghiên cứu; hướng khắc phục trong các nghiên cứu tiếp theo là áp dụng mô phỏng Monte Carlo theo cấp độ IPCC Tier 2/3 để định lượng khoảng tin cậy cho từng bước và cho kết quả cuối cùng.

3.4.6.2. Đóng góp của kết quả nghiên cứu vào mục tiêu Net-Zero 2050 và định hướng nghiên cứu tiếp theo

Kết quả xây dựng đường phát thải tham chiếu và phân tích kịch bản tại Mục 3.3 cho thấy, trong giai đoạn 2000 - 2022, cao nguyên Kon Hà Nừng duy trì trạng thái phát thải ròng CO₂ với mức trung bình khoảng 227.529 tCO₂/năm (Bảng 3.14; nguồn: tác giả, tính toán từ kết quả phân tích ảnh vệ tinh). Kết quả này đặt ra yêu cầu cấp thiết về các biện pháp quản lý chủ động, phù hợp với cam kết của Việt Nam đạt mức phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050 tại COP26. Trong bối cảnh đó, IPCC nhấn mạnh rằng ngăn chặn mất rừng là một trong những biện pháp có chi phí - hiệu quả cao nhất và có tác dụng khí hậu tức thời, do sinh khối bị mất giải phóng CO₂ nhanh vào khí quyển, khác biệt về tốc độ tác động so với các giải pháp công nghiệp cần nhiều năm triển khai. Kịch bản giảm 80 % mất rừng và suy thoái rừng tại Mục 3.3.2, nếu được thực hiện song song với các hoạt động REDD+ đề xuất tại Mục 3.4.4, có tiềm năng chuyển khu vực nghiên cứu từ nguồn phát thải thành bể hấp thụ ròng, đóng góp trực tiếp vào lộ trình Net-Zero quốc gia. Tuy nhiên, tính khả thi của kịch bản này cần được kiểm chứng thêm thông qua phân tích chi phí - lợi ích và đánh giá bất định theo chuẩn IPCC Tier 2/3, bao gồm mô phỏng Monte Carlo để báo cáo khoảng tin cậy cho các ước tính các-bon.

Về định hướng nghiên cứu tiếp theo, một số ưu tiên được xác định dựa trực tiếp trên các giới hạn kỹ thuật đã nêu. (i) Tích hợp ảnh SAR đa thời gian (Sentinel-1 C-band, ALOS-2 PALSAR-2 L-band) nhằm khắc phục ảnh hưởng của mây che phủ và bổ sung thông tin cấu trúc tán; kết hợp dữ liệu LiDAR không gian từ hệ thống GEDI để cung cấp thông tin chiều cao tán và mở rộng ước tính sang các bể chứa các-bon chưa được đưa vào phạm vi nghiên cứu. (ii) Áp dụng kỹ thuật hòa hợp phổ (spectral harmonization) giữa SPOT-4 và Sentinel-2 nhằm giảm sai số hệ thống khi so sánh dữ liệu đa thời điểm. (iii) Khám phá tiềm năng của các kiến trúc học sâu như U-Net hoặc mô hình tích hợp đa nguồn (quang học + SAR + LiDAR) trong phân loại rừng hỗn giao nhiều tầng tán và ước tính sinh khối tại khu vực. (iv) Thiết lập mạng lưới ô tiêu chuẩn quan trắc dài hạn, chuẩn hóa theo yêu cầu của UN-REDD, tạo nguồn dữ liệu thực địa liên tục phục vụ kiểm định, hiệu chỉnh mô hình và đáp ứng yêu cầu báo cáo MRV định kỳ trong lộ trình Net-Zero 2050 của Việt Nam.

Tiểu kết chương 3

1. Trong nội dung Chương 3 đã phân tích biến động sinh khối rừng giai đoạn 2000 - 2022 tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng. Có thể thấy sinh khối rừng tại cao nguyên Kon Hà Nừng có xu hướng gia tăng nhưng không đồng đều. Kết quả nghiên cứu cho thấy sinh khối rừng tự nhiên tại cao nguyên Kon Hà Nừng có sự gia tăng đáng kể trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2022. Giá trị sinh khối trung bình của thảm thực vật rừng đã tăng từ 90 tấn/ha năm 2010 lên 105 tấn/ha năm 2022. Sự gia tăng này chủ yếu diễn ra tại các khu vực rừng được bảo tồn nghiêm ngặt như khu bảo tồn thiên nhiên Kon Chư Răng và vườn quốc gia Kon Ka Kinh, nơi có hệ sinh thái rừng nguyên sinh và được quản lý chặt chẽ. Tuy nhiên, sự gia tăng sinh khối không đồng đều giữa các khu vực. Những khu vực chịu tác động của con người, như phía nam cao nguyên Kon Hà Nừng, lại có xu hướng suy giảm sinh khối. Kết quả này cho thấy việc bảo vệ rừng và duy trì hệ sinh thái tự nhiên đóng vai trò quan trọng trong việc gia tăng sinh khối, đồng thời đòi hỏi các chính sách bảo vệ rừng hợp lý nhằm bảo đảm phát triển bền vững.

2. Xác định được lượng phát thải - hấp thụ ròng của khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2022 có giá trị dương khoảng 5.005.647 tấn CO₂/22 năm, tương đương 227.529 tấn CO₂/năm. Kết quả nghiên cứu cho thấy rừng cao nguyên Kon Hà Nừng đang tạo ra lượng phát thải CO₂ lớn hơn lượng CO₂ mà rừng có thể hấp thụ. Từ đó xây dựng được 3 kịch bản phát thải các-bon cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2023 - 2030. Lợi ích ròng của cả 3 kịch bản đều khá cao. Kịch bản xây dựng dự kiến đều làm giảm lượng phát thải xuống dưới mức đường tham chiếu (FRL) và có khả năng đạt được nhiều lợi ích kinh tế khi tham gia thị trường các-bon.

3. Giá trị sản phẩm và dịch vụ của hệ sinh thái rừng mang lại nguồn thu nhập đáng kể cho người dân khu vực nghiên cứu, góp phần ổn định sinh kế và bảo tồn tài nguyên rừng. Ước tính tổng giá trị rừng trồng cho khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng là 317 tỷ đồng, gồm 2 loài rừng trồng keo và bạch đàn. Các giá trị từ việc chi trả dịch vụ hệ sinh thái rừng cũng đem lại nguồn thu nhập đáng kể cho người dân địa phương thông qua các hoạt động giao khoán bảo vệ rừng và chi trả dịch vụ môi trường rừng.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

A. Kết luận

1. Nghiên cứu trạng thái rừng và biến động trạng thái rừng có lịch sử nghiên cứu lâu đời, bao gồm nhiều chương trình giám sát theo dõi diễn biến tài nguyên rừng quốc gia. Xây dựng bản đồ trạng thái rừng dựa trên học máy cần có mô hình hoàn chỉnh, dựa trên dữ liệu miễn phí, và được chứng minh về độ tin cậy và độ chính xác để có thể áp dụng rộng rãi. Vì vậy, việc xây dựng bản đồ LULC bằng công nghệ học máy, học sâu mà đề tài triển khai là hướng mới hiện đại, giúp giải quyết các vấn đề liên quan đến quản lý và sử dụng hợp lý tài nguyên, bảo tồn đa dạng sinh học và giám sát rừng một cách chính xác.

2. Để nghiên cứu trạng thái rừng, luận án đã áp dụng phương pháp phân tích ảnh trước phân loại bằng chỉ số NDVI, kết hợp với thông tin về loài cây và sinh khối từ hệ thống ô tiêu chuẩn. Với dữ liệu quang học đa thời gian của SPOT-4 và Sentinel-2, kỹ thuật GIS cho phép theo dõi biến động trạng thái rừng trong 2 giai đoạn 2000–2010 và 2010–2022.

3. Để theo dõi biến động trạng thái rừng, luận án đã sử dụng ảnh SPOT có độ phân giải cao và áp dụng nguyên tắc phân loại theo đối tượng (Object-based). Qua tổng quan tài liệu nghiên cứu, đã lựa chọn sử dụng thuật toán “rừng ngẫu nhiên – Random Forest” với tham số được thử nghiệm và điều chỉnh tối ưu, cùng dữ liệu hỗ trợ, áp dụng cho phân loại LULC, cho kết quả có độ chính xác tổng thể và hệ số Kappa cao so với các nghiên cứu cùng loại. Dựa trên kết quả kiểm định các mẫu chia khóa giải đoán ảnh và công thức tính hệ số K, nghiên cứu đã thành lập bảng ma trận sai lẫn và tính chỉ số độ chính xác tổng thể đối với bản đồ LULC khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng năm 2022. Chỉ số độ chính xác tổng thể năm 2022 đạt 90,44 %, tương ứng với $K = 0,88$. Kết quả này có độ chính xác cao khi so sánh với một số nghiên cứu trên thế giới khi sử dụng ảnh vệ tinh Landsat-8 và Sentinel-2.

4. Để nghiên cứu biến động trạng thái rừng, luận án đã sử dụng phương pháp theo dõi biến động sau phân loại, với các ma trận biến động theo các thời kỳ khác nhau (2000 đến 2010 và 2010 đến 2022). Với 7 loại hình trạng thái rừng và lớp phủ, kỹ thuật phân tích ma trận cho phép gộp 42 loại hình biến động thành 5 nhóm biến

động chính: mất rừng, suy thoái rừng, mở rộng diện tích rừng, nâng cao chất lượng rừng và biến động khác. Bản đồ biến động với kỹ thuật gộp cho phép theo dõi mọi loại hình biến động theo tính chất một cách linh hoạt và theo không gian; từ đó, công tác quản lý sẽ được thực hiện chính xác và đầy đủ.

5. Đề tài đã thành lập bản đồ LULC và đánh giá biến động trạng thái rừng khu vực Kon Hà Nừng, góp phần tạo cơ sở tin cậy cho công tác quản lý, bảo tồn tài nguyên rừng và phát triển bền vững vùng núi. Dựa trên tư liệu ảnh viễn thám đa thời gian, tích hợp với phương pháp kiểm chứng thực địa, nghiên cứu đã thành lập 3 bản đồ LULC khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng tại 3 thời điểm (2000, 2010 và 2022) với độ chính xác tổng thể là 90,44 %, tương ứng với $K = 0,88$. Theo đó, giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2010 chứng kiến nhiều biến động mạnh mẽ liên quan đến rừng tự nhiên. Trong giai đoạn 2010–2022, bên cạnh xu hướng phục hồi làm tăng diện tích rừng tự nhiên rỗng, khu vực vẫn tồn tại các điểm nóng mất rừng cục bộ. Ở đây, “mất rừng” được hiểu là diện tích rừng tự nhiên bị chuyển đổi (biến động gộp theo loại hình), khác với biến động rỗng của diện tích rừng tự nhiên; do đồng thời có quá trình phục hồi và nâng cao chất lượng rừng nên diện tích rừng tự nhiên rỗng năm 2022 vẫn tăng so với năm 2010.

6. Trên tập dữ liệu đo đạc sinh khối thực địa, chỉ số thực vật tính toán từ ảnh vệ tinh Sentinel-2 của nghiên cứu đã xác định phương trình ước tính giá trị sinh khối thảm thực vật rừng tự nhiên tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng với hệ số tương quan $R^2 = 0,72$ cho phương trình Lin-Log năm 2010 và $R^2 = 0,76$ cho phương trình Log-Lin năm 2022. Các chỉ số thực vật khảo sát, tính toán từ sản phẩm viễn thám của khu vực nghiên cứu, cho thấy mức độ tương quan cao và sự đồng nhất. Mặc dù được lựa chọn ở cùng độ phân giải và thời điểm bay chụp, song do sự khác nhau nhất định giữa các dải ảnh, các chỉ số thực vật khảo sát trong nghiên cứu được tính toán từ sản phẩm ảnh SPOT-4 (2000, 2010) có dải giá trị khác biệt so với sản phẩm Sentinel-2 (2022).

7. Kết quả nghiên cứu cho thấy diện tích rừng và sinh khối rừng tự nhiên giai đoạn 2000 - 2022 tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng có nhiều thay đổi, cụ thể: Tổng diện tích rừng tự nhiên giảm khoảng 7,8 % cho cả giai đoạn, trong khi chất

lượng rừng tăng trung bình 0,8 %. Xác định được lượng phát thải - hấp thụ ròng của khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2000 - 2022 có giá trị dương khoảng 5.005.647 tấn CO₂/22 năm, tương đương 227.529 tấn CO₂/năm. Rừng cao nguyên Kon Hà Nừng đang tạo ra lượng phát thải CO₂ lớn hơn lượng CO₂ mà rừng có thể hấp thụ. Từ đó, đề xuất được 3 kịch bản phát thải các-bon cao nguyên Kon Hà Nừng giai đoạn 2023 - 2030. Lợi ích ròng của cả 3 kịch bản đều mang lại giá trị kinh tế khá cao. Kịch bản xây dựng dự kiến đều làm giảm lượng phát thải xuống dưới mức tham chiếu và có khả năng đạt được nhiều lợi ích từ các-bon.

8. Kết quả nghiên cứu cho thấy giá trị của rừng trồng cùng các dịch vụ hệ sinh thái rừng đi kèm mang lại nguồn thu nhập đáng kể cho người dân khu vực nghiên cứu, góp phần ổn định sinh kế và bảo tồn tài nguyên rừng. Kết hợp phương pháp viễn thám và khảo sát thực địa, đã xây dựng được bản đồ phân loại rừng trồng và ước tính tổng giá trị rừng trồng cho khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng là 317 tỷ đồng, tương ứng với 2 loài rừng trồng keo và bạch đàn. Các giá trị từ việc chi trả dịch vụ hệ sinh thái rừng cũng đem lại nguồn thu nhập đáng kể cho người dân địa phương thông qua các hoạt động giao khoán bảo vệ rừng và chi trả dịch vụ môi trường rừng.

9. Luận án đã đề xuất các hoạt động đưa vào kế hoạch thực hiện REDD+ nhằm bảo vệ rừng, ngăn chặn tình trạng mất rừng và suy thoái rừng, duy trì và làm tăng trữ lượng các-bon rừng cao nguyên Kon Hà Nừng. Ở quy mô rộng hơn, đề tài đã xây dựng được mô hình có độ tin cậy trong việc xác định lượng phát thải và hấp thụ CO₂ và cung cấp thông tin về sai số của phương pháp khi ước tính sinh khối, các-bon cây rừng ở các kiểu rừng, vùng sinh thái khác nhau trong cả nước. Kết quả nghiên cứu có thể cung cấp cơ sở khoa học đáng tin cậy cho việc triển khai các đề tài thuộc chương trình của Liên Hiệp Quốc: “Giảm phát thải khí nhà kính từ mất rừng và suy thoái rừng - UN-REDD”.

10. Quy trình nghiên cứu viễn thám – GIS là quy trình ứng dụng kết hợp viễn thám và GIS phục vụ việc giám sát sự biến động trạng thái và sinh khối rừng; luận án xây dựng có thể áp dụng rộng rãi cho nhiều cảnh quan – các bể các-bon khác. Phương pháp nghiên cứu mà luận án áp dụng có thể cung cấp cơ sở khoa học cho việc tính toán khả năng hấp thụ và phát thải các-bon các hệ sinh thái rừng. Về mặt ứng dụng,

đề tài nghiên cứu có thể cung cấp cơ sở khoa học và dữ liệu phục vụ việc đề xuất các giải pháp quản lý bền vững và bảo tồn đa dạng sinh học, đồng thời nâng cao hiệu quả giám sát tài nguyên tại khu vực nghiên cứu.

B. Kiến nghị

1. Trên cơ sở kết quả nghiên cứu, có thể mở rộng trong các nhiệm vụ, dự án ưu tiên để nghiên cứu đầy đủ hơn về cấu trúc rừng, động lực và nguyên nhân biến đổi LULC tại Kon Hà Nừng nói riêng và ở Việt Nam nói chung, trong đó tập trung vào các nghiên cứu về hệ sinh thái rừng tự nhiên. Từ đó, hoàn thiện hệ thống mô hình để xác định mức phát thải và hấp thụ CO₂ của các trạng thái rừng tự nhiên.

2. Việc nghiên cứu, xác định biến động trạng thái rừng gắn với sinh khối cho các hệ sinh thái rừng tự nhiên Việt Nam cần thiết áp dụng công nghệ và phương pháp hiện đại, nhất là về tư liệu viễn thám phi quang học (radar, lidar...), thiết bị đo đạc tự động đặt trên phương tiện nghiên cứu không người lái, đo đạc định lượng mức độ hấp thụ và phát thải CO₂ làm cơ sở tham chiếu cho các phương pháp tính toán khác như học máy, học sâu.

3. Xây dựng chi tiết các mô hình ổn định kinh tế dân sinh gắn với bảo vệ và phát triển lâm nghiệp. Khuyến khích sự tham gia của các nhà khoa học quốc tế trong công tác quản lý tài nguyên rừng và bảo tồn đa dạng sinh học tại khu vực cao nguyên Kon Hà Nừng.

4. Phân tích kịch bản giảm phát thải cần được nghiên cứu sâu hơn, bao quát đánh giá bất định và phân tích chi phí - khả thi, giúp tăng khả năng chuyển giao kết quả vào chính sách. Kiến nghị thực hiện mô phỏng ngẫu nhiên (Monte Carlo) để ước lượng khoảng tin cậy cho các ước tính các-bon, đồng thời bổ sung phân tích chi phí - lợi ích và khảo sát xã hội nhằm thiết kế các biện pháp giảm mất rừng phù hợp với cộng đồng và khả thi về tài chính trong các hướng nghiên cứu tiếp theo.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Hieu Huu Viet Nguyen**, Thạch Ngọc Nguyễn, Manh Van Pham, Tung Cao Nguyen, Hung Anh Le (2025), “Estimating economic value and developing scenarios for carbon emission reduction from biomass fluctuations and forest status in Kon Ha Nung Plateau, Gia Lai province, period 2022 – 2030”, *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, Vol 41 No 1.
<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5177>.
2. **Hieu Huu Viet Nguyen**, Thạch Ngọc Nguyễn, Manh Van Pham, Ngọc Thi Dang, Tung Cao Nguyen, Hung Anh Le, Duy Dinh Ba and Dung Trung Ngo (2024), “Valuation of plantations to stabilize livelihoods for the highlands of Kon Ha Nung, Gia Lai province based on remote sensing and GIS technology”, *Proceedings of The XI International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-XI 2025)*, 11/2024, Namangan, Uzbekistan, Volume 613.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561303007>.
3. **Hieu Huu Viet Nguyen**, Thạch Ngọc Nguyễn, Manh Van Pham, Tung Cao Nguyen, Hung Anh Le and Nhu Khanh Tran (2024), “Estimate the amount of carbon emissions from deforestation and forest degradation over two decades in Kon Ha Nung plateau, Gia Lai province, Vietnam”, *Proceedings of The Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth & Allied Sciences - GIS - IDEAS 2024 conference*, 12/2024, Chiang Rai, Thailand, pp. 79-88.
4. Duy Ba Dinh, Dung Trung Ngo, Hoi Dang Nguyen, **Hieu Huu Viet Nguyen**, Ngọc Thi Dang (2022), “Free satellite image data application for monitoring land use cover changes in the Kon Ha Nung plateau, Vietnam (Q1)”, *Published by Elsevier Ltd*.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12864>.
5. Hoi Nguyen Dang, Duy Dinh Ba, Dung Ngo Trung and **Hieu Nguyen Huu Viet** (2022), “A Novel Method for Estimating Biomass and carbon Sequestration in Tropical Rainforest Areas Based on Remote Sensing Imagery: A Case Study in the Kon Ha Nung Plateau, Vietnam (Q1)”, *Sustainability*, 14(24), 16857.
<https://doi.org/10.3390/su142416857>.
6. Dung Trung Ngo, Hoi Dang Nguyen, **Hieu Huu Viet Nguyen**, Ngọc Thi Dang, Roman Gorbunov, Nhung Cam Pham (2026), “Protocol for biomass and carbon storage estimation in tropical rainforests via remote sensing imagery (Q1)”, *STAR Protocols* 7, 104346. Published by Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.xpro.2025.104346>
7. Nguyễn Thị Thu Hằng, Đỗ Diệu Anh, Đặng Đỗ Lâm Phương, Đỗ Thị Nhung, Nguyễn Thị Diễm My, **Nguyễn Hữu Việt Hiệu**, Nguyễn Viết Dương, Phạm Văn Mạnh (2025), “Ứng dụng công nghệ địa không gian và thuật toán học máy lập bản đồ nguy cơ cháy rừng nhiệt đới theo mùa khu vực Tây Nguyên, Việt Nam”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp*, 14(4).
<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.14.4.2025>.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Phạm Thế Anh, Vũ Tiến Hưng, Cao Thị Thu Hiền, Hoàng Thị Dung, Vi Việt Đức, Nguyễn Hồng Hải (2022), "Quan hệ giữa đa dạng loài và sinh khối của rừng lá rộng thường xanh ở miền Trung-Tây Nguyên", *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển*, 21 (1).
2. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2023), "Thông tư số 16/2023/TT-BNNPTNT của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn: Sửa đổi, bổ sung một số điều của Thông tư số 33/2018/TT-BNNPTNT ngày 16 tháng 11 năm 2018 của Bộ trưởng Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn quy định về điều tra, kiểm kê và theo dõi diễn biến rừng", 59-63.
3. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2018), "Thông tư số 33/2018/TT-BNNPTNT ngày 16/11/2018 của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn quy định về điều tra, kiểm kê và theo dõi diễn biến rừng", 5-11.
4. Chính phủ (2018), "Nghị định số 156/2018/NĐ-CP của Chính phủ: Quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Lâm nghiệp", 3-5.
5. Lê Thị Thu Hằng (2020), "Đặc điểm thổ nhưỡng Tây Nguyên và mối liên hệ với loại hình rừng", *Tạp chí Khoa học Đất*, 39 (4), 15-22.
6. Nguyễn Thị Thanh Hương (2016), "Áp dụng phương pháp k-Nearest Neighbors để ước lượng giá trị lâm phần lá rộng thường xanh dựa vào ảnh vệ tinh đa phổ Spot 5", *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, (43), 59-67.
7. Bảo Huy (2012), *Mô hình sinh trắc và công nghệ viễn thám - GIS để xác định lượng CO₂ hấp thụ của rừng lá rộng thường xanh vùng Tây Nguyên*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
8. Nguyễn Viết Lương, Trần Văn Thụy, Phan Thị Kim Thanh (2023), "Xây dựng mô hình và thành lập bản đồ sinh khối rừng đặc dụng vùng Tây Bắc Việt Nam sử dụng đa nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh-Trường hợp nghiên cứu tại Khu bảo tồn thiên nhiên Xuân Nha, tỉnh Sơn La", *Tạp chí Môi trường*, 12, 5.
9. Đặng Văn Luyến, và nnk (2018), "Đặc điểm địa hình và ảnh hưởng đến sự phân hóa tự nhiên tỉnh Gia Lai", *Tạp chí Khoa học Đại học Sư phạm Hà Nội*.
10. Phạm Văn Mạnh (2021), *Nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình đô thị hóa tới bảo tồn Di sản văn hóa thế giới - Quần thể di tích Cố đô Huế bằng*

công nghệ viễn thám và GIS, Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

11. Lê Cảnh Nam, Bùi Thế Hoàng, Trương Quang Cường, Bảo Huy "Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến bề rộng vòng năm thông 5 lá (*Pinus dalatensis ferré*) ở Tây Nguyên".
12. Trần Tuấn Ngọc (2013), *Nghiên cứu ứng dụng ảnh vệ tinh RADAR trong xác định sinh khối rừng tỉnh Hòa Bình*, Đại học Khoa học Tự nhiên (VNU-HUS), Hà Nội.
13. Hoàng Kim Ngũ, Phùng Ngọc Lan (1988), *Giáo trình Sinh thái rừng - Trường Đại học Lâm nghiệp Việt Nam*,
14. Đoàn Ngọc Nguyên Phong, Nguyễn Quang Việt, Nguyễn Phước Gia Huy, Lê Duy Đạt (2020) "Đánh giá tính tổn thương của hệ sinh thái rừng ở khu vực Tây Nguyên dưới ảnh hưởng của tự nhiên và nhân sinh", *CSDL Khoa học Công nghệ Đại học Huế*, <https://csdlkhoahoc.hueuni.edu.vn>, truy cập ngày 07/07/2023.
15. Quốc hội (2017), "Luật số 16/2017/QH14 của Quốc hội: Luật Lâm nghiệp", 3-6.
16. Phạm Đoàn Phú Quốc, Nguyễn Công Tài Anh, Trần Thị Phụng, Phan Quốc Bảo, Nguyễn Thị Ngọc Quyên (2023), "Tích hợp tư liệu viễn thám và GIS trong theo dõi biến động sử dụng đất tại huyện Ea Súp, tỉnh Đắk Lắk", *Tạp chí Khoa học Tây Nguyên*, 17 (58).
17. Hà Quý Quỳnh (2020), "Sử dụng máy bay không người lái (UAV) chụp ảnh phục vụ nghiên cứu cấu trúc các hệ sinh thái núi khu vực Tây Nguyên".
18. Vũ Đức Quỳnh (2013), "Kết quả nghiên cứu sinh khối rừng khộp tại Tây Nguyên", *Tạp chí khoa học lâm nghiệp*, (3).
19. Nguyễn Hữu Tâm, Nguyễn Văn Lợi, Hoàng Huy Tuấn (2025), "Xây dựng phương trình ước tính trữ lượng carbon rừng tự nhiên bằng ảnh vệ tinh Sentinel-2: nghiên cứu trường hợp ở thành phố Đà Nẵng", *Hue University Journal of Science: Agriculture and Rural Development*, 134 (3A), 101–118-101–118.
20. Nguyễn Ngọc Thạch, Đinh Thị Bảo Hoa, Nguyễn Thị Hồng, Nguyễn Vũ Hoa, Dư Vũ Việt Quân (2017), *Viễn thám-GIS Nghiên cứu lớp phủ, sử dụng đất*, NXB Đại học Quốc gia Hà Nội.
21. Nguyễn Văn Thành (2018), "Địa hình Tây Nguyên và đặc điểm phân bố của các loại rừng", *Tạp chí Khoa học Đại học Lâm nghiệp*, 18 (3), 27-36.

22. Giang Thị Phương Thảo, Phạm Thị Thu Hương, Phạm Việt Hòa, Nguyễn Bình An (2023), "Đánh giá độ chính xác trong phân loại lớp phủ dựa trên thuật toán học máy và dữ liệu viễn thám thông qua Google earth engine: áp dụng tại tỉnh Đắk Lắk", *Tạp chí khoa học Tài nguyên và Môi trường*, (46), 55-65.
23. AW Tordoff (2002), *Sách hướng dẫn các Vùng Chim quan trọng ở Việt Nam: Các khu vực bảo tồn trọng yếu*, Chương trình BirdLife Quốc tế tại Đông Dương.
24. Huỳnh Thị Kiều Trinh, Bùi Hiến Đức, Nguyễn Hải Hòa (2017), "Xác định carbon lưu giữ của rừng lồ ô (*Bambusa procure* A. chev et A. cam) Ở khu vực Tây Nguyên", *Tạp chí Khoa học lâm nghiệp*, (1).
25. Thái Văn Trùng (1998), *Thổ nhưỡng Việt Nam*, Nhà xuất bản Nông nghiệp.
26. Ngô Văn Tú (2015), *Nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh SPOT-5 trong phân loại các trạng thái rừng tỉnh Bắc Kạn*.
27. Trần Anh Tuấn (2019), *Ứng dụng viễn thám và hệ thống tin địa lý trong nghiên cứu cấu trúc và diễn thế hệ sinh thái rừng khộp tỉnh Đắk Lắk*, Đại học Khoa học Tự nhiên (VNU - HUS), Hà Nội.
28. UBND tỉnh Gia Lai (2021), *Báo cáo kết quả nhiệm vụ xây dựng hồ sơ khu dự trữ sinh quyển thế giới cao nguyên Kon Hà Nừng*, 10-15.
29. Nguyễn Khanh Vân, và nnk (2010), *Khí hậu và tài nguyên khí hậu Việt Nam*, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ,
30. Viện Địa lý (2018), *Hướng dẫn sử dụng ảnh chụp máy bay trong bản đồ rừng cấp tỉnh*, Hà Nội,
31. Viện Điều tra và Quy hoạch rừng (2018), *Báo cáo dự án “Ứng dụng LiDAR và ảnh CIR hàng không cho lập bản đồ hiện trạng rừng Pù Mát”*, Hà Nội.

Tiếng Anh

32. Akane Abbasi, Xiaolu Tang, Nancy Harris, Elizabeth Goldman, Javier Gamarra, Martin Herold, Hyun Seok Kim, Weixue Luo, Carlos Silva, N. M. Tchebakova, Ankita Mitra, Yelena Finegold, Mohammad Jahanshahi, Cesar Alvarez-Mendoza, Tae Kyung Kim, Daun Ryu, Jingjing Liang (2023), "Spatial database of planted forests in East Asia", *Scientific Data*, 10.

33. Bhim Adhikari (2009), "Reduced emissions from deforestation and degradation: Some issues and considerations", *Journal of Forest and livelihood*, 8 (1), 14-24.
34. Huete A.R. et al. (2002), *MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document*, NASA, USA,
35. Saatchi S.S. et al. (2009), "Mapping tropical forest biomass with L-band SAR: PALSAR performance and biomass saturation", *Geophys. Res. Lett*, 36, L23403.
36. Ilyas Aydin, Umut Gunes Sefercik (2025), "Multispectral UAV-based LULC mapping performance improvement by integrating precise NDSM data and machine learning algorithms", *Earth Science Informatics*, 18 (2), 326.
37. Martin Baatz (2000), "Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation", *Angewandte geographische informationsverarbeitung*, 12-23.
38. Yunkun Bai, Guangmin Sun, Yu Li, Peifeng Ma, Gang Li, Yuanzhi Zhang (2021), "Comprehensively analyzing optical and polarimetric SAR features for land-use/land-cover classification and urban vegetation extraction in highly-dense urban area", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103, 102496.
39. Ho Dinh Bao, Nguyen Thi Thanh Huong (2025), "Estimating forest above ground biomass in Dak Lak Province, Vietnam", *Asian Journal of Forestry*, 9 (1).
40. Tran Quang Bao, Nguyen Van Thi, Doanh Le Sy (2022), "The method of forest change detection using Sentinel-2 optical satellite imagery and Sentinel-1 radar imagery: A case study in Dak Nong Province, Vietnam", *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 23 (9).
41. Niels H Batjes (2014), "Total carbon and nitrogen in the soils of the world", *European journal of soil science*, 65 (1), 10-21.
42. Ibitoyé Biah, Akomian Fortuné Azihou, Sabin Guendehou, Brice Sinsin (2024), "Land use/land cover change and carbon footprint in tropical ecosystems in Benin, West Africa", *Trees, Forests and People*, 15, 100488.
43. Valery Bondur, Tumen Chimitdorzhiev, Irina Kirbizhekova, Aleksey Dmitriev (2022), "Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series", *Forests*, 13, 814.

44. Leo Breiman (2001), "Random forests", *Machine learning*, 45, 5-32.
45. Eduardo Buendia, Kiyoto Tanabe, Andrej Kranjc, Baasansuren Jamsranjav, Maya Fukuda, Sekai Ngarize, Akira Osako, Yurii Pyrozhenko, Pavel Shermanau, Sandro Federici (2019), *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*,
46. Gemma Cassells (2013), *Can remote sensing be used to support sustainable forestry in Malawi?*, The University of Edinburgh GeoSciences PhD thesis and dissertation collection.
47. ESA CCI (2017), "European Space Agency Climate Change Initiative Landcover", *ESA CCI: Paris, France*.
48. Ubonwan Chaiyo, Savitri Garivait, Kobsak Wanthongchai (2011), "Carbon storage in above-ground biomass of tropical deciduous forest in Ratchaburi Province, Thailand", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58, 636-641.
49. IPCC-Intergovernmental panel on climate Change (2006), "Guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme", *Japan: IGES*, 2-3.
50. Jérôme Chave, Maxime Réjou-Méchain, Alberto Búrquez, Emmanuel Chidumayo, Matthew S Colgan, Welington BC Delitti, Alvaro Duque, Tron Eid, Philip M Fearnside, Rosa C Goodman (2014), "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees", *Global change biology*, 20 (10), 3177-3190.
51. Joshua Cheboiwo, David Langat, Meshack Muga, Jonah Kiprop (2019), *Economic Analysis of Forest Landscape Restoration Options in Kenya*
52. R. G. Congalton, K. Green (1999), "Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices", Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.,
53. Anna Dosiou, Ioannis Athinelis, Efstratios Katris, Maria Vassalou, Alexandros Kyrkos, Pavlos Krassakis, Issaak Parcharidis (2024), "Employing Copernicus Land Service and Sentinel-2 satellite mission data to assess the spatial dynamics and distribution of the extreme forest fires of 2023 in Greece", *Fire*, 7 (1), 20.
54. RO Dubayah, J Armston, SP Healey, Z Yang, PL Patterson, S Saarela, G Stahl, L Duncanson, JR Kellner (2022), "GEDI L4B gridded aboveground biomass density, version 2", *ORNL DAAC*.

55. Dennis C Duro, Steven E Franklin, Monique G Dubé (2012), "A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of agricultural landscapes using SPOT-5 HRG imagery", *Remote sensing of environment*, 118, 259-272.
56. (2004), *User Guide 4, Definiens Imaging GmbH*, Munich.
57. Dekker Ehlers, Chao Wang, John Coulston, Yulong Zhang, Tamlin Pavelsky, Elizabeth Frankenberg, Curtis Woodcock, Conghe Song (2022), "Mapping Forest Aboveground Biomass Using Multisource Remotely Sensed Data", *Remote Sensing*, 14, 1115.
58. FAO (2020), Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report,
59. Quanlong Feng, Jiantao Liu, Jianhua Gong (2015), "UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis", *Remote sensing*, 7 (1), 1074-1094.
60. Mario Fernández Tizón, Tamara Emmenegger, Jörg Perner, Steffen Hahn (2020), "Arthropod biomass increase in spring correlates with NDVI in grassland habitat", *Die Naturwissenschaften*, 107, 42.
61. A Field (2009), "Discovering statistics using SPSS. London (UK): Sage Publications Ltd", (12), 32-36.
62. Giles M Foody, Paul J Curran (1994), "Estimation of tropical forest extent and regenerative stage using remotely sensed data", *Journal of Biogeography*, 223-244.
63. Linghan Gao, Guoqi Chai, Xiaoli Zhang (2022), "Above-Ground Biomass Estimation of Plantation with Different Tree Species Using Airborne LiDAR and Hyperspectral Data", *Remote Sensing*, 14 (11), 2568.
64. Robin Genuer, Jean-Michel Poggi (2020), "Random forests", *Random Forests with R*, 33-55.
65. Donald Grebner, Pete Bettinger, Jacek Siry, Kevin Boston (2022), "Forest policies and external pressures", 365-386.
66. Tongfang Guo, Wu Shuirong, Xufeng Zhang, Chao Zhang, Jinrong Yang, Shun Cheng (2023), "Measurement and Influencing Factors of Willingness to Accept Payment for Ecosystem Service Provision: A Case Study of a Leading Forest Farm in China", *Forests*, 14, 2417.
67. Alireza Hamedianfar, Cheikh Mohamedou, Annika Kangas, Jari Vauhkonen (2022), "Deep learning for forest inventory and planning: a

- critical review on the remote sensing approaches so far and prospects for further applications", *Forestry*, 95 (4), 451-465.
68. Agata Hoscilo, Aneta Lewandowska (2019), "Mapping Forest Type and Tree Species on a Regional Scale Using Multi-Temporal Sentinel-2 Data", *Remote Sensing*, 11, 929.
 69. Cuong Nguyen Huu, Cuong Nguyen Van, Tien Nguyen Ngoc My (2022), "Modeling land-use changes using logistic regression in Western Highlands of Vietnam: A case study of Lam Dong province", *Agriculture And Natural Resources*, 56 (5), 935–944-935–944.
 70. Bao Huy, Karin Kralicek, Krishna P Poudel, Vu Tan Phuong, Phung Van Khoa, Nguyen Dinh Hung, Hailemariam Temesgen (2016), "Allometric equations for estimating tree aboveground biomass in evergreen broadleaf forests of Viet Nam", *Forest Ecology and Management*, 382, 193-205.
 71. Markus Immitzer, Clement Atzberger, Tatjana Koukal (2012), "Tree Species Classification with Random Forest Using Very High Spatial Resolution 8-Band WorldView-2 Satellite Data", *Remote Sensing*, vol. 4, issue 9, pp. 2661-2693, 4, 2661-2693.
 72. R.L. Jalbuena, R.V. Peralta, A.M. Tamondong (2015), "Object-based image analysis for mangroves extraction using LIDAR datasets and orthophoto", *Asian Association on Remote Sensing*.
 73. Louisa JM Jansen, Antonio Di Gregorio (2003), "Land-use data collection using the “land cover classification system”: results from a case study in Kenya", *Land use policy*, 20 (2), 131-148.
 74. John R Jensen (2009), *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*, Pearson Education India,
 75. John R Jensen, Dave C Cowen (1999), "Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes", *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 65, 611-622.
 76. S. Karakış, Aycan Marangoz, G. Buyuksalih (2006), *Analysis of segmentation parameters in ecognition software using high resolution quickbird ms imagery*,
 77. T. Kavzoglu, M. Yildiz (2014), "Parameter-Based Performance Analysis of Object-Based Image Analysis Using Aerial and Quikbird-2 Images", *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II, ISS. 7, Gottingen, 31-37.

78. Taskin Kavzoglu, Furkan Bilucan (2023), "Effects of auxiliary and ancillary data on LULC classification in a heterogeneous environment using optimized random forest algorithm", *Earth Science Informatics*, 16 (1), 415-435.
79. Rajath Kumar, KS Aneesh, KV Ajay, KV Murali, M Kundariati (2026), "Comparative Evaluation of Machine Learning Algorithms for LULC Classification Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery", *Application of Machine Learning in Earth Sciences: A Practical Approach*, 585-596.
80. Sandeep Kumar, Parminder Kaur, Chou-Yi Hsu, Mohammed Ahmed Mustafa, Jyoti Rani, Jasmeen Kaur, Sandeep Kaushal (2025), "Advances in surface modification of biomass and its nanostructuring for enhanced environmental remediation applications", *Materials Advances*, 6 (23), 8774-8815.
81. Shashi Kumar (2025), "Advancing Forest Structure Retrieval through Multi-Frequency PolInSAR and TomoSAR: Leveraging ESA's P-Band Biomass and NASA-ISRO NISAR Missions", *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 341-349.
82. John S Latham, Changchui He, Luca Alinovi, Antonio DiGregorio, Zdenek Kalensky (2002), "FAO methodologies for land cover classification and mapping", *Linking people, place, and policy: a GIScience approach*, 283-316.
83. D. Li, C. Wang, Y. Hu, S. Liu (2012), "General review on remote sensing-based biomass estimation", *Wuhan Daxue Xuebao (Xinxi Kexue Ban)/Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37, 631-635.
84. Xiaofan Li, Lanying Wang, Haiyan Guan, Ke Chen, Yufu Zang, Yongtao Yu (2024), "Urban tree species classification using UAV-based multispectral images and LiDAR point clouds", *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 8 (1), 5.
85. Zhanmang Liao, Binbin He, Xingwen Quan, Albert van Dijk, Shi Qiu, Changming Yin (2019), "Biomass estimation in dense tropical forest using multiple information from single-baseline P-band PolInSAR data", *Remote Sensing of Environment*, 221, 489-507.
86. Zhanmang Liao, Xia Liu, Albert van Dijk, Chao Yue, Binbin He (2022), "Continuous woody vegetation biomass estimation based on temporal

- modeling of Landsat data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 110, 102811.
87. Andy Liaw, Matthew Wiener (2002), "Classification and regression by randomForest", *R news*, 2 (3), 18-22.
 88. Thomas Lillesand, Ralph W Kiefer, Jonathan Chipman (2015), *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley & Sons,
 89. Stefanie Linser, Bernhard Wolfslehner, Kit Prins, Helga Pölzl, Markus Lier (2020), "Forest Policy and Governance", 200-215.
 90. Catherine Ellen Lovelock, Christopher Evans, Nathan Barros, J Alm, M Garneau, A Harby, D Paré, H Lerche, BS Sherman, C Zhang (2019), "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 7: Wetlands".
 91. Dengsheng Lu, Paul Mausel, Eduardo Brondizio, Emilio Moran (2004), "Change detection techniques", *International journal of remote sensing*, 25 (12), 2365-2401.
 92. Dengsheng Lu (2006), "The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation", *International journal of remote sensing*, 27 (7), 1297-1328.
 93. Thi Luong (2014), "Forest resources and forestry in Vietnam", *Journal of Vietnamese Environment*, 6, 171-177.
 94. Genesha Mada, Agena Anjulo, Abren Gelaw (2023), "Physical and Economic Valuation for Nontimber Forest Products (NTFPs) of Surra Government Plantation in the Upper Hare-Baso Rivers Catchment, Southwestern Ethiopia", *International Journal of Ecology*, 2023, 6192340.
 95. Sahel Mahdavi, Bahram Salehi, Cecilia Moloney, Weimin Huang, Brian Brisco (2018), "Speckle filtering of synthetic aperture radar images using filters with object-size-adapted windows", *International journal of digital earth*, 11 (7), 703-729.
 96. Ramita Manandhar, Inakwu OA Odeh, Tiho Ancev (2009), "Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement", *Remote Sensing*, 1 (3), 330-344.
 97. Robert McGrath (2010), "Kappa Coefficient",

98. Mariana Melnykovych, Ihor Soloviy (2014), "Contribution of forestry to the well-being of mountain forest dependent communities in the Ukrainian Carpathians".
99. Audrey Mercier, Julie Betbeder, Florent Rumiano, Jacques Baudry, Valéry Gond, Lilian Blanc, Clément Bourgoïn, Guillaume Cornu, Carlos Ciudad, Miguel Marchamalo, Pocard-Chapuis René, Laurence Hubert-Moy (2019), "Evaluation of Sentinel-1 and 2 Time Series for Land Cover Classification of Forest-Agriculture Mosaics in Temperate and Tropical Landscapes", *Remote Sensing*, 11.
100. Euan C Mitchell (2021), "Accuracy of GEDI Lidar Ground Elevation Estimates and an Assessment of the Potential of Machine Learning to Improve Ground and Biomass Estimates".
101. Gretchen Moisen, Kelly McConville, Todd Schroeder, Sean Healey, Mark Finco, Tracey Frescino (2020), "Estimating Land Use and Land Cover Change in North Central Georgia: Can Remote Sensing Observations Augment Traditional Forest Inventory Data?", *Forests*, 11, 856.
102. Seid Muhe, Mekuria Argaw (2022), "Estimation of above-ground biomass in tropical afro-montane forest using Sentinel-2 derived indices", *Environmental Systems Research*, 11 (1), 5.
103. Gert-Jan Nabuurs, Rachid Mrabet, Assem Abu Hatab, Mercedes Bustamante, Harry Clark, Petr Havlík, J House, Cheikh Mbow, Karachepone N Ninan, Alexander Popp (2023), "Agriculture, forestry and other land uses (chapter 7)", *IPCC 2022: climate change 2022: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 747-860.
104. R. F. Nelson, Kurz, W. A., & Swetnam, T. L. (2009), "Estimating biomass and carbon stock in the boreal forest of North America", *Forest Ecology and Management*, 257 (1), 168-183.
105. Andisani Netsianda, Paidamwoyo Mhangara (2025), "Aboveground biomass estimation in a grassland ecosystem using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning algorithms", *Environmental Monitoring and Assessment*, 197 (2), 138.
106. Thi Tan Huong Ngo, Thi Phuong Mai Nguyen, Thi Huong Duong, Thi Hue Ly (2021), "Forest - Related Culture and Contribution to Sustainable

- Development in the Northern Mountain Region in Vietnam", *Forest and Society*, 5 (1), 32-47.
107. Tran Huynh Ngoc (2011), "Phase II Forest biomass assessment in Vietnam using ALOS/PALSAR".
 108. Hoi Nguyen Dang, Dung Ngo Trung (2022), "Evaluation of land cover changes and secondary ecological succession of typical agroforestry landscapes in Phu Yen Province", *Forest and Society*, 6 (1), 1-19.
 109. Hoang Khanh Linh Nguyen, Bich Ngoc Nguyen (2017), "Mapping biomass and carbon stock of forest by remote sensing and GIS technology at Bach Ma National Park, Thua Thien Hue province", *Journal of Vietnamese Environment*, 8 (2), 80-87.
 110. Huong Thi Thanh Nguyen, Trung Minh Doan, Erkki Tomppo, Ronald E McRoberts (2020), "Land Use/land cover mapping using multitemporal Sentinel-2 imagery and four classification methods-A case study from Dak Nong, Vietnam", *Remote Sensing*, 12 (9), 1367.
 111. Bernard R Parresol (1999), "Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons", *Forest science*, 45 (4), 573-593.
 112. Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe (2003), "Good practice guidance for land use, land-use change and forestry".
 113. Eileen Perry, Kathryn Sheffield, Doug Crawford, Stephen Akpa, Alex Clancy, Robert Clark (2022), "Spatial and Temporal Biomass and Growth for Grain Crops Using NDVI Time Series", *Remote Sensing*, 14 (13), 3071.
 114. Veerle Plakman, Thomas A. J. Janssen, Nienke Brouwer, Sander Veraverbeke (2020), "Mapping Species at an Individual-Tree Scale in a Temperate Forest, Using Sentinel-2 Images, Airborne Laser Scanning Data, and Random Forest Classification", *Remote Sensing*, 12, 3710.
 115. J. Rouse, R. Haas, J. Schell, D. Deering (1974), "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS", *NASA Special Publication*, 1.
 116. Abdullah Al Saim, Mohamed H Aly (2025), "Machine learning and multisensor data fusion for forest above ground biomass estimation in Arkansas", *Earth Systems and Environment*, 1-18.
 117. Mirko Saponaro, Eufemia Tarantino (2022), "LULC Classification Performance of Supervised and Unsupervised Algorithms on UAV-

- Orthomosaics", *International Conference on Computational Science and Its Applications*, 311-326, Springer.
118. Vishwambhar Sati (2023), "Forest ecosystem services and their valuation in Mizoram, the eastern extension of the Himalaya", 4, 44-49.
 119. Paul Schroeder, Sandra Brown, Jiangming Mo, Richard Birdsey, Chris Cieszewski (1997), "Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data", *Forest science*, 43 (3), 424-434.
 120. Zhenfeng Shao, Linjing Zhang (2016), "Estimating forest aboveground biomass by combining optical and SAR data: a case study in Genhe, Inner Mongolia, China", *Sensors*, 16 (6), 834.
 121. Hossein Sheykhi, Ali Darvishsefat, Parviz Fatehi, Manizheh Rajab Pourrahmati, Vahid Etemad (2021), "Investigation on the capability of Landsat-8 and Sentinel-2 data for mapping forest type in the Kojur watershed of Hyrcanian forests".
 122. Hojat Shirmard, Ehsan Farahbakhsh, Elnaz Heidari, Amin Beiranvand Pour, Biswajeet Pradhan, Dietmar Müller, Rohitash Chandra (2022), "A comparative study of convolutional neural networks and conventional machine learning models for lithological mapping using remote sensing data", *Remote Sensing*, 14 (4), 819.
 123. Esmaeil Soleimanirad (2023), *Urban land use / land cover classification based on artificial intelligence using remote sensing images*.
 124. Camile Sothe, Cláudia Almeida, Veraldo Liesenberg, Marcos Schimalski (2017), "Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Sucessional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil", *Remote Sensing*, 9, 838.
 125. Anjitha A Sulabha, Smitha V Asok, C Sudhakar Reddy, K Soumya (2025), "Aboveground Biomass Estimation in Tropical Forests: Insights from SAR Data-A Systematic Review", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 53 (3), 653-679.
 126. James Surowiecki (2005), *The wisdom of crowds*, Anchor,
 127. United States Geological Survey (2019), *USGS National Aerial Photography Program (NAPP) Data Specifications.*, United States,
 128. Nguyen Ngoc Thach, Dang Bao-Toan Ngo, Pham Xuan-Canh, Nguyen Hong-Thi, Bui Hang Thi, Hoang Nhat-Duc, Tien Bui Dieu (2018), "Spatial pattern assessment of tropical forest fire danger at Thuan Chau

- area (Vietnam) using GIS-based advanced machine learning algorithms: A comparative study", *Ecological informatics*, 46, 74-85.
129. Nisham Thapa, Lana L Narine, Alan E Wilson (2025), "Forest Aboveground Biomass Estimation Using Airborne LiDAR: A Systematic Review and Meta-Analysis", *Journal of Forestry*, 1-24.
 130. Pham Thu Thuy, Ngo Ha Chau, Dao Thi Linh Chi, Hoang Tuan Long, Micah R. Fisher (2020), "The politics of numbers and additionality governing the national Payment for Forest Environmental Services scheme in Vietnam: A case study from Son La province", *Forest and Society*, 4 (2), 379-404.
 131. Duy X Tran, Thuong V Tran, Diane Pearson, Soe W Myint, John Lowry, Tuan T Nguyen (2022), "Spatiotemporal analysis of forest cover change and associated environmental challenges: a case study in the Central Highlands of Vietnam", *Geocarto International*, 37 (25), 9277-9297.
 132. Van Thinh Truong, Sota Hirayama, Duong Cao Phan, Thanh Tung Hoang, Takeo Tadono, Kenlo Nishida Nasahara (2024), "JAXA's new high-resolution land use land cover map for Vietnam using a time-feature convolutional neural network", *Scientific Reports*, 14 (1), 3926.
 133. Xuan Quang Truong, Nguyen Hien Duong Dang, Thi Hang Do, Nhat Duong Tran, Thi Thu Nga Do, Van Anh Tran, Vasil Yordanov, Maria Antonia Brovelli, Thanh Dong Khuc (2022), "Random forest analysis of land use and land cover change using sentinel-2 data in van yen, yen bai province, vietnam", *International Conference on Geo-Spatial Technologies and Earth Resources*, 429-445, Springer.
 134. Compton Tucker (1979), "Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation", *Remote Sensing of Environment*, 8.
 135. UNFCCC (2013), *Guidance for the Preparation of Forest Reference Emission Levels (FRELs) – Revised 2013*, United Nations Framework Convention on Climate Change 12.
 136. Juan Velasco Muñoz, José A. Aznar-Sánchez (2016), "The economic valuation of ecosystem services in the agroecosystems in Spain: Conceptual framework and methodology", *Pecunia*, 22, 75-93.
 137. Jonathan Verschuuren (2022), "Agriculture, forestry and other land use (AFOLU)", *Research handbook on climate change mitigation law*, 433-456.

138. Fabien H Wagner, Ricardo Dalagnol, Celso HL Silva-Junior, Griffin Carter, Alison L Ritz, Mayumi CM Hirye, Jean PHB Ometto, Sassan Saatchi (2023), "Mapping tropical forest cover and deforestation with Planet NICFI satellite images and deep learning in Mato Grosso State (Brazil) from 2015 to 2021", *Remote Sensing*, 15 (2), 521.
139. Junye Wang, Michael Bretz, M Ali Akber Dewan, Mojtaba Aghajani Delavar (2022), "Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects", *Science of the Total Environment*, 822, 153559.
140. Aloysius Wehr, Uwe Lohr (1999), "Airborne laser scanning-an introduction and overview", *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54 (2-3), 68-82.
141. Xiaofang Wei (2010), "Biomass Estimation: A Remote Sensing Approach", *Geography Compass*, 4, 1635-1647.
142. Chaofan Wu, Huanhuan Shen, Ke Wang, Aihua Shen, Jinsong Deng, Muye Gan (2016), "Landsat Imagery-Based Above Ground Biomass Estimation and Change Investigation Related to Human Activities", *Sustainability*, 8, 159.
143. White J.C. Wulder M.A., Loveland T.R., Woodcock C.E. (2018), "Integration of optical and radar data for biomass estimation: A review.", *Environ. Remote Sensing*, 217, 484–498.
144. Michael A Wulder, David Seemann (2003), "Forest inventory height update through the integration of lidar data with segmented Landsat imagery", *Canadian journal of remote sensing*, 29 (5), 536-543.
145. Siran Xia, Zhigao Yang, Gui Zhang, Xin Wu (2023), "Forest Cover Change Monitoring Using Sub-Pixel Mapping with Edge-Matching Correction", *Forests*, 14, 1776.
146. Boxiang Yang, Yali Zhang, Xupeng Mao, Yingying Lv, Fang Shi, Mingshi Li (2022), "Mapping Spatiotemporal Changes in Forest Type and Aboveground Biomass from Landsat Long-Term Time-Series Analysis—A Case Study from Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui Province of Eastern China", *Remote Sensing*, 14 (12), 2786.
147. Yifan Yu, Sassan Saatchi (2016), "Sensitivity of L-band SAR backscatter to aboveground biomass of global forests", *Remote sensing*, 8 (6), 522.

148. Ding Yuan (1999), "Survey of multispectral methods for land-cover change analysis", *Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and application*.
149. Linjing Zhang, Yaru Wang, Xinran Yin, Jing Chen (2025), "A spectral-spatial-temporal deep learning model for large area aboveground biomass mapping of semiarid forest using Sentinel-1 and 2 time series", *International Journal of Digital Earth*, 18 (2), 2562055.
150. Yuzhen Zhang, Yiming Zou, Yiwen Wang (2025), "Remote Sensing of Forest Above-Ground Biomass Dynamics: A Review", *Forests*, 16 (5), 821.
151. Xiaolin Zhu, Desheng Liu (2014), "Accurate mapping of forest types using dense seasonal Landsat time-series", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96, 1–11.
152. Jamshid Ali, Wang Haoran, Kaleem Mehmood, Wakeel Hussain, Farhan Iftikhar, Fahad Shahzad, Khadim Hussain, Yin Qun, Jia Zhongkui (2025), "Remote sensing and integration of machine learning algorithms for above-ground biomass estimation in *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantations: a case study using Sentinel-2 and Landsat-9 data in northern China", *Frontiers in Environmental Science*, Volume 13 - 2025.
153. Mai Trong Thinh, Nguyen Hai Hoa (2017), "Using multi-time remote sensing images in assessing changes in mangrove area in Quang Yen town, Quang Ninh province", *Journal of Science and Technology* 3.

PHỤ LỤC

PHỤ LỤC 1: HÌNH ẢNH KHẢO SÁT THỰC ĐỊA

PHỤ LỤC 2: THỐNG KÊ DỮ LIỆU TÍNH SINH KHỐI THEO CÁC Ô TIÊU
CHUẨN TRONG HỆ THỐNG Ô SƠ CẤP VÀ CHÙM Ô SỬ DỤNG TRONG
LUẬN ÁN

PHỤ LỤC 1: HÌNH ẢNH KHẢO SÁT THỰC ĐỊA



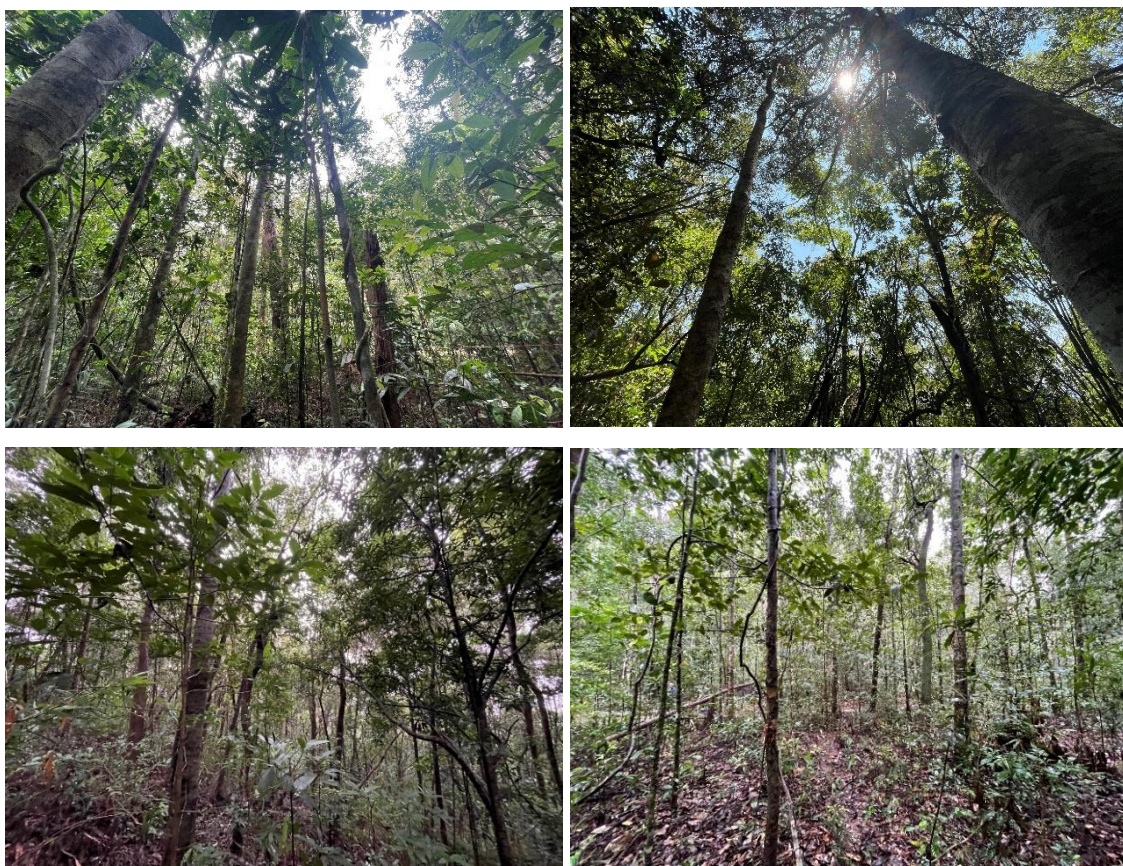
Hình 1. Điều tra trữ lượng rừng tự nhiên tại Kon Hà Nừng

Người chụp: Nguyễn Hữu Việt Hiệu, Đinh Bá Duy (tháng 3/2023)



Hình 2. Điều tra trữ lượng rừng trồng tại Kon Hà Nừng

Người chụp: Nguyễn Hữu Việt Hiệu (tháng 8/2022)



*Hình 3. Một số hình ảnh thực tế trạng thái rừng tự nhiên Kon Hà Nừng
Người chụp: Nguyễn Hữu Việt Hiệu (tháng 8/2022; 3/2023)*



Hình 4. Hình ảnh trong ô tiêu chuẩn đo đếm rừng tự nhiên - Người chụp: Nguyễn Hữu Việt Hiệu (tháng 8/2022)



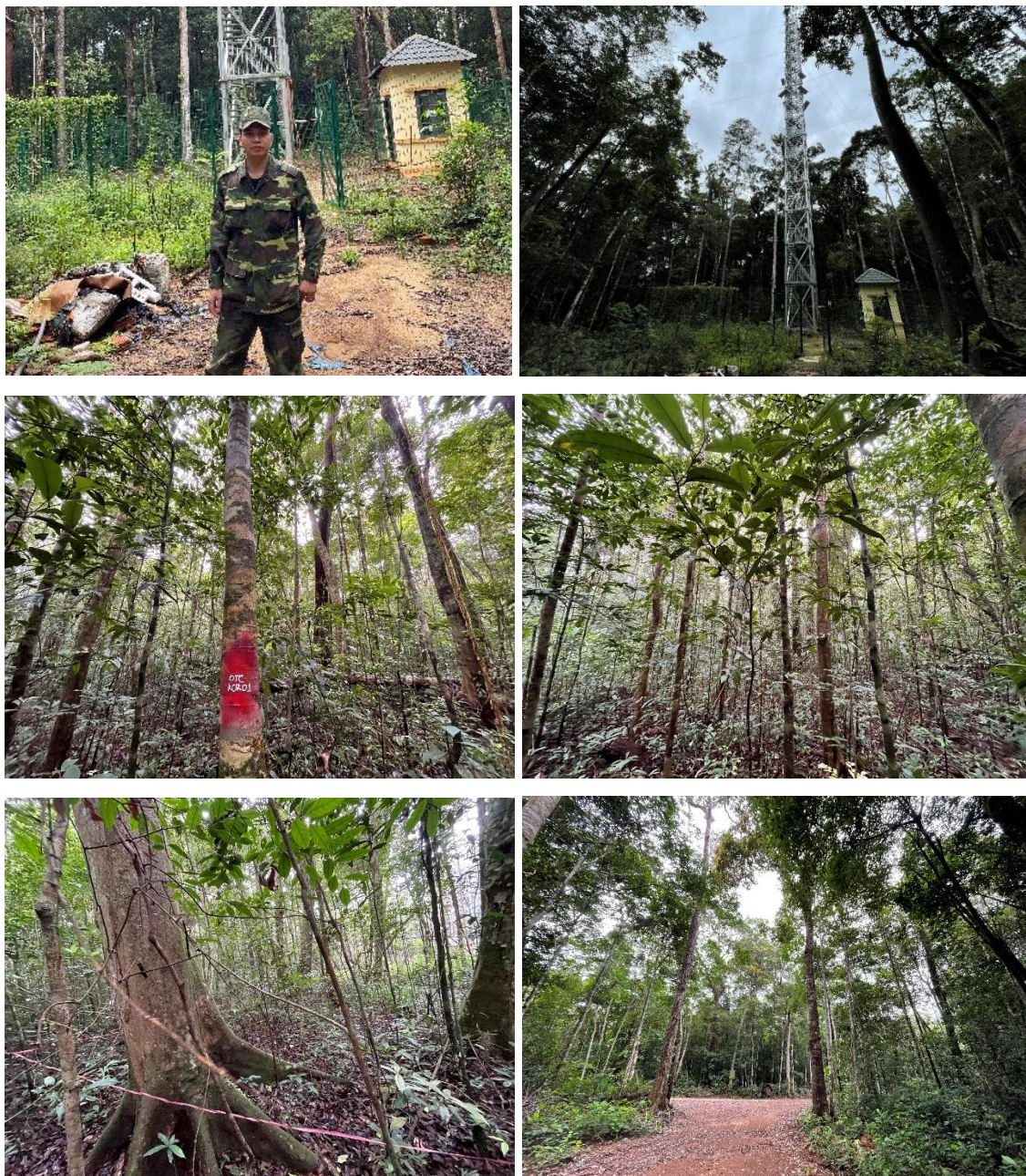
Hình 5. Sử dụng UAV và RTK thu thập dữ liệu và kiểm chứng mẫu chìa khóa ảnh tại thực địa

Người chụp: Nguyễn Hữu Việt Hiệu, Đinh Bá Duy (tháng 8/2022)



Hình 6. Một số hình ảnh tại VQG Kon Ka Kinh và KBT Kon Chư Răng

Người chụp: Nguyễn Hữu Việt Hiệu (tháng 8/2022; 3/2023)



Hình 7. Điều tra tại điểm đặt trạm FLUX - Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga

Người chụp: Nguyễn Hữu Việt Hiệu (tháng 3/2023)

PHỤ LỤC 2: THỐNG KÊ DỮ LIỆU TÍNH SINH KHỐI THEO CÁC Ô TIÊU CHUẨN TRONG HỆ THỐNG Ô SƠ CẤP VÀ CHÙM Ô SỬ DỤNG TRONG LUẬN ÁN

Phụ lục 2.1. Số liệu tính sinh khối các ô tiêu chuẩn áp dụng cho năm 2022

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB (Kg)
1	Đắk Đoa	Hà Đông	TXB	55	16,9	18,7	8.527,19
2	Đắk Đoa	Hà Đông	TXB	82	16,3	13,7	9.013,79
3	Đắk Đoa	Hà Đông	TXB	92	15,1	17,6	10.835,10
4	Đắk Đoa	Hà Đông	TXB	85	15,4	18,4	10.820,17
5	Đắk Đoa	Hà Đông	TXB	79	16,6	18,1	11.490,04
6	Kbang	Đắk Rong	TXB	115	12,6	10,9	6.234,21
7	Kbang	Đắk Rong	TXB	96	14,9	11,6	7.645,13
8	Kbang	Đắk Rong	TXB	83	15,3	10,6	6.437,09
9	Kbang	Đắk Rong	TXB	84	15	13,7	7.839,44
10	Kbang	Đắk Rong	NN				0,00
11	Kbang	Đắk Smar	TXG	99	17,7	19,9	17.756,12
12	Kbang	Đắk Smar	TXG	107	16,7	16,4	14.442,18
13	Kbang	Đắk Smar	TXG	88	16,3	14,9	10.411,06
14	Kbang	Đắk Smar	TXG	92	17,9	21,3	17.908,63
15	Kbang	Đắk Smar	TXG	81	19,7	19,4	17.539,56
16	Kbang	Kon Pne	TXG	81	18,6	18,4	14.952,43
17	Kbang	Kon Pne	TXB	70	17	14,6	8.837,67
18	Kbang	Kon Pne	TXB	111	13,4	14	8.454,82
19	Kbang	Kon Pne	TXB	93	15,3	16	10.338,61
20	Kbang	Kon Pne	TXG	72	20,9	16	14.792,83
21	Kbang	Krong	TXN	72	12,5	13	4.482,15
22	Kbang	Krong	TXN	89	11,9	12,4	4.825,29
23	Kbang	Krong	TXN	56	14,3	15	5.149,94
24	Kbang	Krong	TXN	79	12,1	12,7	4.519,56
25	Kbang	Krong	TXN	72	12,9	16,1	5.751,86
26	Kbang	Krong	TXB	51	17,4	8,6	4.248,14
27	Kbang	Krong	TXB	83	14,3	8,9	4.838,49
28	Kbang	Krong	TXB	71	15,5	16,4	8.274,58
29	Kbang	Krong	TXB	68	15,9	13,7	7.117,88
30	Kbang	Krong	TXB	60	14,9	15,3	6.087,62
31	Kbang	Krong	TXB	66	15,8	10,6	5.453,45
32	Kbang	Krong	MN				0,00
33	Kbang	Krong	TXB	89	14,7	15,6	8.943,81

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB (Kg)
34	Kbang	Krong	TXB	83	14,4	18	9.080,63
35	Kbang	Krong	TXB	87	14,5	17	9.176,54
36	Kbang	Son Lang	TXG	115	17,9	22,1	23.123,72
37	Kbang	Son Lang	TXG	128	16,6	13,4	14.305,15
38	Kbang	Son Lang	TXG	117	16,2	20,4	18.016,62
39	Kbang	Son Lang	TXG	107	17,1	18	16.418,68
40	Kbang	Son Lang	TXG	155	15,7	16,4	18.525,99
41	Kbang	Son Lang	TXB	59	18,3	13,1	7.833,28
42	Kbang	Son Lang	TXB	69	16,8	15	8.714,56
43	Kbang	Son Lang	TXB	52	19,4	18,7	10.578,00
44	Kbang	Son Lang	TXB	41	20,1	16,1	7.843,11
45	Kbang	Son Lang	TXB	87	17,3	16,6	12.722,36
46	Kbang	Son Lang	TXB	88	15,7	15	9.726,71
47	Kbang	Son Lang	TXG	105	16,8	14	12.484,08
48	Kbang	Son Lang	TXG	82	17,5	12,6	9.635,96
49	Kbang	Son Lang	TXG	94	16,4	16,6	12.373,49
50	Kbang	Son Lang	TXG	92	15,1	14,9	9.362,77
51	Mang Yang	A Yun	TXB	101	14,2	16,6	10.012,28
52	Mang Yang	A Yun	TXB	104	15,8	15,9	12.249,60
53	Mang Yang	A Yun	TXB	111	14,9	14	10.419,38
54	Mang Yang	A Yun	TXN	97	12	21	8.489,31
55	Mang Yang	A Yun	TXN	73	13,4	17,1	6.626,37
56	Kbang	Đăk Smar	TXP	24	13,9544	10,3958	6.326,64
57	Kbang	Đăk Smar	TXN	48	14,4513	6,48333	8.545,33
58	Kbang	Đăk Smar	TXN	32	12,2512	8,275	5.236,60
59	Kbang	Đăk Smar	TXN	36	13,259	8,075	6.711,97
60	Kbang	Kon Pne	TXN	29	12,6334	7,4069	4.522,37
61	Kbang	Kon Pne	TXN	31	11,2842	6,19677	3.258,14
62	Kbang	Kon Pne	TXP	30	11,534	7,50333	3.966,30
63	Kbang	Kon Pne	TXN	34	13,4386	9,32353	7.488,03
64	Kbang	Kon Pne	TXP	27	12,1798	8,81852	4.648,05
65	Kbang	Krong	TXP	28	13,3906	8,51786	5.606,70
66	Kbang	Krong	TXP	29	12,0492	7,25172	4.038,81
67	Kbang	Krong	TXN	37	11,4727	7,95405	5.124,82
68	Kbang	Krong	TXN	27	13,1423	9,07407	5.544,42
69	Kbang	Krong	TXN	35	11,4067	8,16	4.914,63
70	Kbang	Krong	TXP	33	12,7919	8,33939	5.919,90
71	Kbang	Krong	TXB	36	12,0497	6,67778	4.626,41
72	Kbang	Krong	TXN	36	10,0469	9,15556	4.414,75

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB (Kg)
73	Kbang	Krong	TXN	35	11,6488	6,48571	4.092,15
74	Kbang	Krong	TXN	28	9,81574	7,26786	2.619,14
75	Kbang	Krong	TXN	28	11,6811	7,75714	3.919,83
76	Kbang	Krong	TXDN	37	10,4054	6,24324	3.343,84
77	Kbang	Krong	TXDP	30	8,17516	4,76667	1.301,02
78	Kbang	Đăk Rong	TXDN	45	11,5301	8,08889	6.397,98
79	Kbang	Đăk Rong	TXDN	30	10,224	8,98333	3.736,71
80	Kbang	Đăk Rong	TXDN	40	10,7516	7,01282	4.316,38
81	Kbang	Đăk Rong	TXDP	22	11,284	8,84091	3.270,75
82	Kbang	Đăk Smar	TXDN	40	13,9037	9,875	9.957,50
83	Kbang	Đăk Smar	TXDP	24	10,7033	8,89583	3.237,94
84	Kbang	Đăk Smar	TXDP	25	10,5809	8,84	3.277,77
85	Kbang	Đăk Smar	TXDP	28	10,1638	9,03571	3.467,24
86	Kbang	Đăk Smar	TXDN	25	13,2586	8,34	4.810,03
87	Kbang	Kon Pne	TXDN	32	10,0269	7,06563	3.035,50
88	Kbang	Kon Pne	TXDP	41	10,1973	8,3439	4.727,56
89	Kbang	Kon Pne	TXDP	9	8,7615	6,9	641,07
90	Kbang	Kon Pne	TXDP	19	12,8981	7,31579	3.048,26
91	Kbang	Kon Pne	TXDP	28	13,609	9,94643	6.731,96
92	Kbang	Krong	TXDN	30	12,1104	6,66333	3.885,11
93	Kbang	Krong	TXDP	12	7,03291	5,45833	442,79
94	Kbang	Krong	TXDN	26	9,61171	7,10769	2.284,13
95	Kbang	Krong	TXDP	23	7,47577	5,84783	1.022,64
96	Kbang	Krong	TXDP	29	12,0492	7,25172	4.038,81
97	Kbang	Krong	TXDP	37	11,4727	7,95405	5.124,82
98	Kbang	Đăk Rong	TXDP	27	13,1423	9,07407	5.544,42
99	Kbang	Đăk Rong	TXDN	35	11,4067	8,16	4.914,63
100	Kbang	Đăk Smar	TXDN	33	12,7919	8,33939	5.919,90
101	Kbang	Đăk Smar	TXDP	36	12,0497	6,67778	4.626,41
102	Kbang	Đăk Smar	TXP	36	10,0469	9,15556	4.414,75
103	Kbang	Đăk Smar	TXP	35	11,6488	6,48571	4.092,15
104	Kbang	Đăk Smar	TXP	28	9,81574	7,26786	2.619,14
105	Kbang	Kon Pne	TXP	28	11,6811	7,75714	3.919,83
106	Kbang	Kon Pne	TXP	37	10,4054	6,24324	3.343,84
107	Kbang	Kon Pne	TXP	30	8,17516	4,76667	1.301,02
108	Kbang	Kon Pne	TXP	45	11,5301	8,08889	6.397,98
109	Kbang	Kon Pne	TXP	30	10,224	8,98333	3.736,71
110	Kbang	Krong	TXP	40	10,7516	7,01282	4.316,38
111	Kbang	Krong	TXP	22	11,284	8,84091	3.270,75

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB (Kg)
112	Kbang	Krong	TXP	40	13,9037	9,875	9.957,50
113	Kbang	Krong	TXP	89	11,9	12,4	4.825,29
114	Kbang	Kon Pne	TXP	56	14,3	15	5.149,94
115	Kbang	Kon Pne	TXP	79	12,1	12,7	4.519,56
116	Kbang	Kon Pne	TXP	72	12,9	16,1	5.751,86
117	Kbang	Krong	TXB	51	17,4	8,6	4.248,14
118	Kbang	Krong	TXB	83	14,3	8,9	4.838,49
119	Kbang	Krong	TXB	71	15,5	16,4	8.274,58
120	Kbang	Krong	TXN	68	15,9	13,7	7.117,88

Phụ lục 2.2. Số liệu tính sinh khối các ô tiêu chuẩn áp dụng cho năm 2000

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB (Kg)
1	K Bang	Đắk Roong	TXG	75	15,76	19,33	10.433,81
2	K Bang	Đắk Roong	TXB	71	18,10	15,50	10.687,40
3	K Bang	Kon Pne	TXN	22	24,20	17,33	6.470,32
4	K Bang	Đắk Roong	TXG	41	24,40	25,00	16.907,71
5	K Bang	Sơn Lang	TXG	60	19,50	14,00	9.567,69
6	K Bang	Kon Pne	TXN	25	20,20	16,00	4.803,07
7	K Bang	Đắk Rong	TXP	26	18,10	13,00	3.355,48
8	K Bang	K Rong	TXB	14	27,80	13,33	4.301,68
9	Mang Yang	Đắk Jơ Ta	TXG	32	23,90	18,30	9.631,96
10	K Bang	Krong	TXP	29	25,10	15,33	8.232,25
11	K Bang	Đắk Rong	TXG	31	26,40	21,30	12.967,90
12	KBang	Đắk Roong	TXG	41	20,60	13,67	7.133,99
13	K Bang	Đắk Rong	TXG	34	22,90	18,00	9.272,38
14	K Bang	Sơn Lang	TXG	37	13,10	10,30	2.061,19
15	K Bang	Sơn Lang	TXG	42	24,30	19,67	13.915,99
16	K Bang	Đak Roong	TXG	44	18,30	24,67	10.180,39
17	K Bang	Sơn Lang	TXB	40	22,20	20,00	11.255,66
18	Đắk Đoa	Hà Đông	TXB	43	18,23	14,30	6.117,41
19	K Bang	KRoong	TXG	32	18,24	18,67	5.757,30
20	Mang Yang	Đắk Jơ Ta	TXG	42	20,34	20,00	9.948,03
21	K Bang	KRoong	TXN	41	18,30	16,33	6.601,54
22	K Bang	Xã Đông	TXB	40	16,40	15,00	4.817,78
23	Kbang	Krong	TXN	64	13,91	10,30	4.153,33
24	Kbang	Krong	TXN	47	13,24	10,51	2.825,70
25	Kbang	Krong	TXP	73	11,76	11,64	3.850,84
26	Kbang	Krong	TXN	48	12,43	12,40	2.995,55

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB (Kg)
27	Kbang	Krong	TXN	47	12,64	11,32	2.773,58
28	Kbang	Krong	TXN	27	13,00	11,15	1.659,79
29	Kbang	Krong	TXN	56	12,68	11,70	3.432,19
30	Kbang	Krong	TXN	55	13,65	13,67	4.538,05
31	Kbang	Son Lang	TXP	66	13,30	11,06	4.205,24
32	Kbang	Son Lang	TXN	76	13,53	10,72	4.862,31
33	Kbang	Son Lang	TXP	76	14,89	12,86	6.989,79
34	Kbang	Son Lang	TXP	99	13,14	11,49	6.403,46
35	Kbang	Son Lang	TXP	51	11,62	11,88	2.679,38
36	Kbang	Son Lang	TXN	72	15,38	12,33	6.779,04
37	Kbang	Son Lang	TXN	49	15,28	12,49	4.610,55
38	Kbang	Son Lang	TXN	73	14,15	11,92	5.648,21
39	Kbang	Son Lang	TXP	16	20,75	11,69	2.564,49
40	Kbang	Son Lang	TXG	110	13,56	12,60	8.269,84
41	Kbang	Son Lang	TXG	78	11,57	14,36	4.883,13
42	Kbang	Son Lang	TXN	79	11,26	13,11	4.294,73
43	Kbang	Son Lang	TXP	118	12,51	13,81	8.296,64
44	Kbang	Son Lang	TXB	79	13,91	14,84	7.323,92
45	Kbang	Son Lang	TXG	74	15,30	14,36	7.998,90
46	Mang Yang	A Yun	TXP	86	13,45	13,74	6.931,09
47	Mang Yang	A Yun	TXG	94	13,42	13,40	7.359,76
48	Mang Yang	A Yun	TXG	125	12,89	13,50	9.106,71
49	Mang Yang	A Yun	TXG	93	13,10	14,01	7.248,13
50	Mang Yang	A Yun	TXG	78	12,60	16,65	6.672,82
51	Kbang	Đăk Smar	TXG	72	13,77	13,42	5.931,52
52	Kbang	Đăk Smar	TXP	72	13,04	12,28	4.891,35
53	Kbang	Đăk Smar	TXN	50	15,64	11,66	4.605,58
54	Kbang	Đăk Smar	TXP	47	14,58	12,64	4.083,65
55	Kbang	Kon Pne	TXN	96	12,60	11,06	5.504,63
56	Kbang	Kon Pne	TXP	107	13,13	12,58	7.536,33
57	Kbang	Kon Pne	TXP	107	13,96	12,64	8.531,53
58	Kbang	Kon Pne	TXB	110	13,45	11,65	7.537,06
59	Kbang	Kon Pne	TXB	66	12,04	11,32	3.544,68
60	Kbang	Krong	TXB	116	10,29	10,70	4.338,01
61	Kbang	Krong	TXG	32	13,02	11,94	2.108,46
62	Kbang	Krong	TXG	55	12,35	13,20	3.605,60
63	Kbang	Krong	TXN	45	11,13	9,27	3.738,00
64	Kbang	Krong	TXDP	33	10,59	9,46	2.543,13
65	Kbang	Krong	TXDP	51	9,41	10,48	3.465,76

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB (Kg)
66	Kbang	Krong	TXDP	34	9,94	11,16	2.696,00
67	Kbang	Krong	TXDP	33	10,11	10,19	2.496,22
68	Kbang	Krong	TXDN	19	10,40	10,03	1.493,82
69	Kbang	Krong	TXDP	39	10,14	10,53	3.088,97
70	Kbang	Krong	TXDN	39	10,92	12,31	4.084,25
71	Kbang	Krong	TXDP	46	10,64	9,95	3.784,71
72	Kbang	Krong	TXDP	53	10,83	9,65	4.376,08
73	K Bang	K Rong	TXDP	53	11,91	11,57	6.290,81
74	Mang Yang	Đăk Jơ Ta	TXDP	69	10,52	10,35	5.763,12
75	K Bang	Krong	TXDN	36	9,30	10,69	2.411,44
76	K Bang	Đăk Rong	TXDN	50	12,30	11,10	6.101,14
77	KBang	Đăk Roong	TXDP	34	12,22	11,24	4.149,49
78	K Bang	Đăk Rong	TXP	51	11,32	10,73	5.083,39
79	K Bang	Son Lang	TXP	11	16,60	10,52	2.308,04
80	K Bang	Son Lang	TXP	77	10,85	11,34	7.442,86
81	K Bang	Đak Roong	TXP	55	9,25	12,92	4.394,82
82	K Bang	Son Lang	TXP	55	9,01	11,80	3.865,25

Phụ lục 2.3. Số liệu tính sinh khối các ô tiêu chuẩn áp dụng cho năm 2010

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB
1	Kbang	Krong	TXB	69	18,00	13,90	9.339,17
2	Kbang	Krong	TXB	75	18,60	12,80	10.075,66
3	Mang Yang	Hà Ra	TXP	54	11,70	9,40	2.223,26
4	Mang Yang	Hà Ra	TXP	52	9,90	7,60	1.280,25
5	Mang Yang	Hà Ra	TXN	67	13,30	14,40	5.154,27
6	Đăk Pơ	Hà Tam	TXP	86	12,70	13,60	5.746,17
7	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	64	14,50	9,50	4.058,51
8	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	378	4,70	10,00	2.727,70
9	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	272	3,50	8,70	972,91
10	Đăk Đoa	Hà Đông	TXB	59	19,90	16,20	11.126,51
11	Kbang	Đăk Rong	TXB	81	17,10	15,90	11.147,77
12	Kbang	Son Lang	TXB	63	18,60	17,10	10.905,61
13	Kbang	Son Lang	TXG	112	15,40	17,00	13.300,29
14	Kbang	Son Lang	TXG	119	15,80	16,30	14.325,05
15	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXN	55	10,40	13,50	2.463,85
16	Mang Yang	Hà Ra	TXN	72	12,80	14,80	5.261,26
17	Mang Yang	Hà Ra	TXN	69	13,60	15,70	5.982,95
18	Đăk Đoa	Hà Đông	TXP	106	10,20	16,10	5.334,07
19	Kbang	Đăk Rong	TXP	112	11,10	13,40	5.666,69
20	Kbang	Krong	TXP	77	13,40	13,70	5.754,86

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB
21	Kbang	Son Lang	TXG	49	12,24	8,24	3.945,66
22	Kbang	Son Lang	TXB	36	11,65	8,41	2.684,42
23	Kbang	Son Lang	TXB	56	10,35	9,32	3.658,30
24	Mang Yang	A Yun	TXB	37	10,94	9,92	2.845,78
25	Mang Yang	A Yun	TXN	36	11,12	9,06	2.634,90
26	Mang Yang	A Yun	TXN	21	11,44	8,92	1.576,81
27	Mang Yang	A Yun	TXP	43	11,15	9,36	3.260,58
28	Mang Yang	A Yun	TXN	42	12,01	10,94	4.311,15
29	Kbang	Đăk Smar	TXN	51	11,70	8,85	3.994,97
30	Kbang	Đăk Smar	TXN	59	11,91	8,58	4.619,19
31	Kbang	Đăk Smar	TXN	59	13,10	10,28	6.640,30
32	Kbang	Đăk Smar	TXN	76	11,57	9,20	6.083,29
33	Kbang	Kon Pne	TXP	39	10,23	9,51	2.545,41
34	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXN	55	13,53	9,87	6.440,09
35	Mang Yang	Hà Ra	TXP	38	13,45	9,99	4.380,02
36	Mang Yang	Hà Ra	TXP	56	12,45	9,53	5.365,80
37	Mang Yang	Hà Ra	TXP	12	18,26	9,35	2.436,26
38	Đăk Pơ	Hà Tam	TXN	85	11,93	10,08	7.856,35
39	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXN	60	10,18	11,49	4.638,97
40	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXN	61	9,91	10,49	4.079,99
41	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	91	11,01	11,05	7.881,81
42	Đăk Đoa	Hà Đông	TXB	61	12,24	11,87	6.957,72
43	Kbang	Đăk Rong	TXN	57	13,46	11,49	7.598,96
44	Kbang	Son Lang	TXN	66	11,84	11,00	6.584,54
45	Kbang	Son Lang	TXG	72	11,81	10,72	6.991,77
46	Mang Yang	Hà Ra	TXG	96	11,35	10,80	8.651,37
47	Mang Yang	Hà Ra	TXG	72	11,53	11,21	6.885,72
48	Đăk Pơ	Hà Tam	TXG	60	11,09	13,32	6.339,18
49	Kbang	Krong	TXG	55	12,12	10,73	5.634,95
50	Kbang	Krong	TXN	55	11,48	9,82	4.646,78
51	Kbang	Đăk Rong	TXN	39	13,76	9,33	4.375,30
52	Mang Yang	Hà Ra	TXN	36	12,83	10,11	3.879,47
53	Đăk Đoa	Hà Đông	TXB	74	11,08	8,85	5.229,40
54	Kbang	Đăk Rong	TXB	82	11,55	10,06	7.159,52
55	Kbang	Son Lang	TXP	82	12,28	10,11	8.104,95
56	Kbang	Son Lang	TXP	85	11,84	9,32	7.160,20
57	Kbang	Son Lang	TXP	51	10,60	9,05	3.367,44
58	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	89	9,06	8,56	4.121,11
59	Mang Yang	Hà Ra	TXB	25	11,46	9,55	2.003,04
60	Mang Yang	Hà Ra	TXP	42	10,87	10,56	3.425,32
61	Mang Yang	Hà Ra	TXP	49	11,55	9,47	3.987,20
62	Đăk Pơ	Hà Tam	TXN	36	10,99	9,67	2.712,68
63	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	56	9,76	10,71	3.696,81

STT		Địa danh	Loại rừng	N	D	H	AGB
64	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	37	10,31	11,40	2.875,73
65	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXP	36	10,49	10,41	2.662,63
66	Đắk Đoa	Hà Đông	TXP	21	10,79	10,26	1.593,40
67	Kbang	Đăk Rong	TXN	43	10,52	10,76	3.294,90
68	Kbang	Son Lang	TXP	42	11,33	12,58	4.356,53
69	Kbang	Son Lang	TXP	51	11,04	10,18	4.037,03
70	Mang Yang	Hà Ra	TXP	59	11,23	9,87	4.667,82
71	Mang Yang	Hà Ra	TXP	59	12,35	11,83	6.710,20
72	Đắk Pơ	Hà Tam	TXB	76	10,91	10,58	6.147,32
73	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXB	39	9,65	10,93	2.572,20
74	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXB	55	12,77	11,35	6.507,88
75	Mang Yang	Đak Jơ Ta	TXG	38	12,68	11,49	4.426,12
76	Đắk Đoa	Hà Đông	TXG	56	11,74	10,96	5.422,28
77	Kbang	Đăk Rong	TXN	12	17,22	10,75	2.461,91
78	Kbang	Son Lang	TXDP	85	11,25	11,59	7.939,05
79	Kbang	Son Lang	TXDP	60	9,60	13,21	4.687,81
80	Kbang	Son Lang	TXDP	61	9,34	12,06	4.122,94