

ỨNG DỤNG NỀN TẢNG ĐIỆN TOÁN Đám Mây HỖ TRỢ XÂY DỰNG BẢN ĐỒ PHÂN HẠNG THÍCH ỨNG VỚI BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU CHO LOÀI XÁ XỊ Ở TÂY NGUYÊN, VIỆT NAM

Phạm Mai Phương^{1,2*}, Nguyễn Thị Thu Nga³, Nguyễn Quốc Khánh²,

Nguyễn Duy Liêm⁴, Vũ Đình Duy²

¹ Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

² Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga

³ Học viện Kỹ thuật Quân sự,

⁴ Trường Đại học Nông Lâm thành phố Hồ Chí Minh

*Email: maiphuong.vrtc@gmail.com

TÓM TẮT

Xá xị (*Cinnamomum parthenoxylon* (Jack) Meisn.), một loài thực vật gỗ quý hiếm thuộc họ Long não (Lauraceae), đang có nguy cơ tuyệt chủng tại Việt Nam do suy giảm sinh cảnh và tác động ngày càng nghiêm trọng của biến đổi khí hậu (BĐKH). Nghiên cứu này nhằm xây dựng bản đồ phân hạng mức độ phù hợp sinh thái cho loài Xá xị tại khu vực Tây Nguyên ứng dụng thuật toán MaxEnt trên nền tảng điện toán đám mây Google Earth Engine, kết hợp dữ liệu phân bố địa lý của loài và các biến khí hậu sinh thái. Sáu kịch bản khí hậu tương lai trong giai đoạn 2080 - 2100 đã được sử dụng để dự báo sự biến động không gian sống tiềm năng của loài. Kết quả cho thấy, dưới tác động của BĐKH, các vùng có mức độ phù hợp sinh thái cao hiện nay tập trung chủ yếu tại các tỉnh: Lâm Đồng và Đắk Nông, mặc dù một số vùng phù hợp cao cho loài trong tương lai dự báo có nguy cơ thu hẹp và giảm cấp độ so với hiện tại. Những kết quả này cung cấp bằng chứng khoa học quan trọng, góp phần hỗ trợ công tác quy hoạch bảo tồn, phục hồi sinh cảnh và định hướng phát triển loài Xá xị bền vững tại vùng Tây Nguyên.

Từ khoá: *Cinnamomum parthenoxylon*, machine learning, Google Earth Engine, phù hợp sinh thái, mô hình phân bố loài.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tích hợp mô hình Maximum Entropy (MaxEnt) trên nền tảng điện toán đám mây Google Earth Engine (GEE) đã đánh dấu một bước tiến quan trọng trong lĩnh vực mô hình hóa sinh thái và phân tích phân bố loài, đặc biệt trong bối cảnh đánh giá khả năng thích ứng của các loài sinh vật với tác động của biến đổi khí hậu (BĐKH) [1, 2]. MaxEnt là một thuật toán học máy mạnh mẽ, hoạt động dựa trên dữ liệu hiện diện của loài và các biến số môi trường để ước lượng phân bố tiềm năng của loài trong không gian địa lý. Mô hình này ban đầu được triển khai dưới dạng phần mềm độc lập [3], nhưng khả năng ứng dụng rộng rãi đã thúc đẩy các nhà nghiên cứu phát triển MaxEnt trên nhiều nền tảng lập trình khác nhau [4], tích hợp trong các hệ thống tổng hợp đa mô

hình [5], hoặc điều chỉnh bằng các phương pháp mô hình hóa tuyến tính nhằm nâng cao hiệu quả dự đoán [6].

Khi được triển khai trên GEE, mô hình MaxEnt có khả năng tận dụng nguồn dữ liệu vệ tinh đa dạng cùng với năng lực tính toán mạnh mẽ của điện toán đám mây, cho phép xây dựng các mô hình "ổ sinh thái" (Ecological Niche Models - ENMs) với độ chính xác cao và thời gian xử lý nhanh. Điều này đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá mức độ phù hợp về mặt sinh cảnh của các loài dưới tác động của các kịch bản khí hậu khác nhau [7]. GEE cung cấp một hệ sinh thái dữ liệu toàn diện, bao gồm các ảnh viễn thám từ Landsat, Sentinel, MODIS, cùng các tập dữ liệu về khí hậu, địa hình, thảm thực vật và các biến sinh thái khác [8]. Bên cạnh đó, các công đoạn tiền xử

lý dữ liệu như hiệu chỉnh bức xạ, loại bỏ mây và chuẩn hóa dữ liệu được thực hiện đồng bộ, góp phần giảm thiểu sai số và nâng cao độ tin cậy cho các mô hình dự đoán [9].

Loài Xá xị (*Cinnamomum parthenoxylon* (Jack) Meisn.), một loài cây gỗ quý hiếm, đang có nguy cơ tuyệt chủng trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới Việt Nam, là đối tượng đặc biệt phù hợp để áp dụng các mô hình MaxEnt trên nền tảng GEE nhờ khả năng phân tích ở quy mô không gian rộng lớn [7]. Loài này không chỉ có tầm quan trọng về mặt sinh thái trong hệ sinh thái rừng mà còn có giá trị thương mại lớn, các ứng dụng gỗ, nhựa, tinh dầu và dược phẩm [10]. Tuy nhiên, tình trạng khai thác quá mức kết hợp với áp lực từ BĐKH đang làm suy giảm nghiêm trọng nguồn gen và mật độ quần thể tự nhiên của loài, đưa Xá xị vào nhóm các loài cần được bảo tồn và phục hồi khẩn cấp [11].

Nghiên cứu này hướng tới xây dựng bản đồ phân hạng mức độ thích ứng với BĐKH cho loài Xá xị thông qua tích hợp dữ liệu địa không gian trên nền tảng điện toán đám mây GEE và các dữ liệu khí hậu tương lai từ cơ sở dữ liệu WorldClim [12]. Mô hình được thiết lập có thể tích hợp và chia sẻ dưới dạng ứng dụng trực tuyến, phục vụ hiệu quả cho công tác quy hoạch bảo tồn và quản lý tài nguyên thiên nhiên. Để đạt được mục tiêu

nghiên cứu này sẽ triển khai bốn bước chính: (1) Thu thập và xử lý dữ liệu phân bố thực tế của loài cùng các yếu tố sinh thái từ nền tảng GEE; (2) Tích hợp dữ liệu khí hậu tương lai theo các kịch bản phát thải từ WorldClim; (3) Xây dựng mô hình phân bố loài bằng các thuật toán học máy phù hợp; (4) Phân tích sự thay đổi không gian của phạm vi phân bố nhằm xác định các vùng tiềm năng cho công tác bảo tồn thích ứng trong điều kiện khí hậu đang biến đổi.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Địa điểm ghi nhận loài Xá xị

Loài Xá xị được khảo sát tại khu vực Tây Nguyên trong các chuyến khảo sát thực địa tại các tỉnh: Kon Tum, Gia Lai, Lâm Đồng và Đắk Nông trong giai đoạn từ năm 2022 đến năm 2025 đã ghi nhận được 152 điểm phân bố. Tuy nhiên, để giảm hiện tượng quá khớp mô hình, nghiên cứu đã sử dụng hàm `reduceRegion` trong GEE nhằm loại bỏ các điểm trùng lặp trong lưới 0,5 x 0,5 km². Cuối cùng, đã lọc ra 50 điểm không trùng lặp (Bảng 1), bằng cách so sánh các giá trị trung bình trong từng ô. Phương pháp này giúp giảm thiểu hiện tượng quá khớp của mô hình và cải thiện độ chính xác trong phân tích phân bố loài.

Bảng 1. Khu vực thu thập dữ liệu có loài Xá xị phân bố tại Tây Nguyên

Tỉnh	Số lượng cá thể	Sinh cảnh	Khu vực
Kon Tum	3	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh trung bình	Vườn Quốc gia Ngọc Linh
Gia Lai	10	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh trung bình	Khu Bảo tồn Thiên nhiên Kon Chư Răng
Lâm Đồng	12	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh giàu và trung bình	Khu Bảo tồn Thiên nhiên BiDoup Núi Bà và Núi Voi, Đức Trọng
Đắk Nông	25	Rừng tự nhiên lá rộng thường xanh núi đất trung bình, rừng hỗn giao tre nứa	Vườn Quốc gia Tà Đùng

Để ngăn chặn sự mất cân bằng lớp trong mô hình học máy, dữ liệu vắng mặt (giả định) được tự động tạo ra trên GEE, đại diện cho các vị trí của loài Xá xị chưa được quan sát. Trong kịch bản này,

các điểm có mặt ký hiệu “1”, các điểm vắng mặt (giả định) ký hiệu “0”. Bằng cách cân bằng dữ liệu điểm có mặt và vắng mặt (giả định), kịch bản này đảm bảo rằng mô hình MaxEnt được huấn luyện trên một mẫu đại diện cho cả hai lớp. Điều này giúp cải thiện khả năng của mô hình trong việc dự đoán sự phù hợp của môi trường sống cho loài Xà xị tại khu vực Tây Nguyên.

Các biến môi trường đầu vào

Chỉ số khác biệt chuẩn hóa thực vật (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI): Bản đồ NDVI được xây dựng từ dữ liệu vệ tinh MODIS, (MOD13A1, độ phân giải 500 m), cung cấp chỉ số NDVI đã được hiệu chỉnh và lọc mây [13], thời gian từ năm 2002 đến năm 2025.

Chỉ số địa hình, độ dốc và hướng phơi: Sử dụng DEM của NASA chứa thông tin độ cao với độ phân giải khoảng 30 m. Tính toán độ dốc bằng cách sử dụng hàm “ee.Terrain.slope()” sẽ giúp đưa về một hình ảnh mới chứa giá trị độ dốc cho mỗi pixel. Tương tự, tính toán hướng dốc bằng cách sử dụng hàm “ee.Terrain.aspect()”, hàm này sẽ trả về một hình ảnh mới chứa giá trị hướng dốc cho mỗi pixel [14].

Chỉ số thổ nhưỡng: Sử dụng dữ liệu đất của SoilGrids cung cấp các thông tin về đặc tính thổ nhưỡng toàn cầu, với độ phân giải (250 m) và được tạo ra từ dữ liệu khảo sát thực địa toàn cầu cũng như các mô hình học máy. Dữ liệu bao gồm những chỉ số về hàm lượng các thành phần trong đất (hàm lượng mùn, sét, cát), độ chặt, hàm lượng hữu cơ, độ pH và các đặc tính khác [15]. SoilGrids phân loại đất theo các nhóm đặc tính thổ nhưỡng của FAO, dữ liệu có sẵn trên GEE dưới dạng dữ liệu do cộng đồng đóng góp, có thể sử dụng trực tiếp trên nền tảng cloud.

Chỉ số sinh khí hậu: Dữ liệu sinh khí hậu như: Nhiệt độ, lượng mưa, các chỉ số mùa vụ như lượng mưa mùa, lượng mưa cao nhất của năm, nhiệt độ thấp nhất của năm... đóng vai trò thiết yếu trong phân tích sinh thái [12], đặc biệt trong việc xây

dựng mô hình hóa phân bố loài và đánh giá tác động của BĐKH. Dữ liệu sinh khí hậu của giai đoạn hiện tại được thu thập từ nguồn dữ liệu được chia sẻ có sẵn trên GEE, độ phân giải 1 km [16].

Kịch bản BĐKH: Kịch bản dự báo cho giai đoạn năm 2080 - 2100 được lựa chọn là 6 kịch bản phát thải trung bình (SSP2-4.5), sau khi được tải xuống từ WorldClim, sẽ được tải lên từ các tệp riêng vào phần kho dữ liệu cá nhân trên ứng dụng GEE, được đặt tên tương ứng với 6 kịch bản là: GISS-E2-1-G, BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL. Điểm chung của các kịch bản là đều có độ phân giải 1 km và đều là các mô hình khí hậu toàn cầu (GCMs) thuộc dự án CMIP6, đều mô phỏng các yếu tố khí hậu dựa trên các kịch bản phát thải tiêu chuẩn từ thấp đến cao tương ứng như SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5, phục vụ dự báo và đánh giá rủi ro khí hậu toàn cầu và khu vực [17].

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Thuật toán MaxEnt

Phương pháp xây dựng bản đồ phân bố sinh thái bằng thuật toán MaxEnt trên nền tảng GEE, được triển khai qua lớp “ee.Classifier.amnhMaxEnt”, đây là phiên bản MaxEnt tích hợp trong GEE, khác với phần mềm MaxEnt độc lập về môi trường vận hành nhưng về nguyên lý thuật toán thì tương tự. Để sử dụng thuật toán này, đã thực hiện các bước sau: (1) thu thập, tiền xử lý dữ liệu môi trường và dữ liệu sự có mặt loài từ các nguồn viễn thám có sẵn trên GEE; sử dụng giao diện lập trình của GEE để trích xuất các biến môi trường liên quan; sau đó áp dụng thuật toán MaxEnt để mô hình hóa phân bố tiềm năng của loài dựa trên nguyên lý tối đa hóa Entropy, nhằm dự đoán khả năng xuất hiện của loài trên không gian nghiên cứu.

Thuật toán MaxEnt được sử dụng để xây dựng mô hình phân bố loài với dữ liệu ghi nhận loài dạng có mặt và vắng mặt (giả định) [9]. Mục tiêu của MaxEnt là ước lượng phân bố xác suất tối ưu

của loài trên không gian môi trường sao cho Entropy của phân bố này được tối đa hóa, đồng thời tuân thủ các ràng buộc do dữ liệu sự có mặt và vắng mặt cùng các biến môi trường cung cấp.

Công thức tối đa hóa Entropy được biểu diễn như công thức (1):

$$\max_p H(p) = -\sum_x p(x) \log p(x) \quad (1)$$

Với các ràng buộc dựa trên dữ liệu như công thức (2):

$$\sum_x p(x) f_j(x) = \hat{E}[f_j], j = 1, \dots, m \quad (2)$$

Trong đó: x là vị trí trong không gian môi trường; $p(x)$ là xác suất phân bố loài tại vị trí x ; $f_j(x)$ là giá trị của biến môi trường thứ j tại vị trí x ; $\hat{E}[f_j]$ là giá trị trung bình quan sát được của biến f_j tại các điểm có mặt hoặc vắng mặt loài; m là số lượng biến môi trường.

Phân bố xác suất $p(x)$ được biểu diễn dưới dạng hàm mũ theo công thức (3):

$$p(x) = \frac{1}{Z} \exp\left(\sum_{j=1}^m \lambda_j f_j(x)\right) \quad (3)$$

Trong đó: λ_j là các tham số cần ước lượng; $Z = \sum_x \exp\left(\sum_{j=1}^m \lambda_j f_j(x)\right)$ là hằng số chuẩn hóa để tổng xác suất bằng 1.

Các tham số λ_j được ước lượng sao cho phân bố $p(x)$ phù hợp nhất với dữ liệu có mặt và vắng mặt, đồng thời đảm bảo Entropy của mô hình là lớn nhất.

2.2.2. Loại bỏ tương quan giữa các tham số cho mô hình

Khi sử dụng nhiều biến môi trường trong mô hình MaxEnt, việc lựa chọn biến phù hợp và giảm đa cộng tuyến là cần thiết để tránh sự phụ thuộc tuyến tính giữa các biến. Kỹ thuật phân tích tương quan giữa các biến sinh khí hậu, thổ nhưỡng, địa hình, độ dốc, hướng phơi và NDVI được cung cấp trên nền tảng GEE để loại bỏ những biến môi trường có tương quan cao ($r > 0,80$), cặp biến sẽ được lưu vào ma trận tương quan dưới dạng danh

sách (list). Cuối cùng, đã chọn ra 15 tham số cho mô hình được thể hiện ở bảng 2.

2.2.3. Xử lý và triển khai mô hình

Sau khi chuẩn bị dữ liệu điểm có mặt và vắng mặt (giả định), lấy mẫu dữ liệu ảnh tại các điểm này. Tiếp theo, khởi tạo bộ phân loại MaxEnt với tên thuộc tính lớp phân loại và danh sách các biến môi trường đã chọn. Cuối cùng, áp dụng mô hình phân loại toàn bộ ảnh đầu vào nhằm tìm ra bản đồ có mức độ phân bố thích nghi sinh thái nhất cho loài Xá xị tại khu vực Tây Nguyên.

2.2.4. Đánh giá độ chính xác của mô hình phân bố phù hợp sinh thái của loài Xá xị

Trong môi trường GEE, thuật toán MaxEnt được triển khai để xử lý các tập dữ liệu lớn, giúp đánh giá mức độ quan trọng của từng biến môi trường, tạo bản đồ phân bố tiềm năng của loài và đánh giá hiệu suất mô hình thông qua chỉ số AUC (Area Under the Curve) là diện tích dưới đường cong đánh giá phân loại nhị phân ROC (Receiver Operating Characteristic), phản ánh khả năng xếp hạng các vị trí theo khả năng phù hợp sinh thái. Nếu AUC nằm trong khoảng 0,7 - 0,9, mô hình này được đánh giá là có độ chính xác từ chấp nhận được đến tốt [18, 19].

2.2.5. Biên tập bản đồ phân hạng mức độ phù hợp sinh thái

Kết quả cuối cùng của quy trình trên sẽ cung cấp dữ liệu không gian, biểu diễn thông tin theo ma trận các ô vuông (pixel), mỗi ô mang một giá trị xác suất phân bố loài (giá trị pixel từ 0 - 1). Sau khi được trích xuất ra Google Drive và được biên tập thành bản đồ trong phần mềm QGIS 3.34.14 [20].

Dựa trên khoảng giá trị, phân chia thành 5 lớp theo ngưỡng phù hợp sinh thái: Cấp 1: 0,0 - 0,2 (thấp nhất); cấp 2: 0,2 - 0,4 (thấp); cấp 3: 0,4 - 0,6 (trung bình); cấp 4: 0,6 - 0,8 (cao); cấp 5: 0,8 - 1,0 (cao nhất) [2, 19].

Bảng 2. Các tham số trong mô hình phù hợp sinh thái loài Xá xị

Tham số	Diễn giải	Đơn vị	Độ phân giải	Khuyến nghị sử dụng
A1	Độ chua hoặc độ kiềm của đất khi đất được hòa tan trong nước cất (H ₂ O) theo tỷ lệ 1: 1		250 m	[19, 21, 22]
A2	Hàm lượng mùn trong lớp đất mặt	g/kg	250 m	
A3	Hàm lượng tổng nitơ trong mẫu đất khô ở tầng mặt	cg/kg	250 m	
A4	Độ cao địa hình	m	30 m	
A5	Hướng phơi địa hình		30 m	
A6	Nhiệt độ trung bình hàng năm	°C	1 km	[7, 23, 24]
A7	Khoảng nhiệt độ trung bình ngày đêm	°C	1 km	
A8	Đường đẳng nhiệt	%	1 km	
A9	Nhiệt độ mùa	°C	1 km	
A10	Lượng mưa hàng năm	mm	1 km	
A11	Lượng mưa của tháng khô nhất	mm	1 km	
A12	Lượng mưa của mùa	mm	1 km	
A13	Lượng mưa của quý ẩm nhất	mm	1 km	
A14	Lượng mưa của quý lạnh nhất	mm	1 km	
A15	NDVI		1 km	[25, 26]

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân vùng phù hợp sinh thái cho loài Xá xị ở giai đoạn hiện tại

Kết quả mô hình hóa phân bố loài Xá xị tại khu vực Tây Nguyên sử dụng thuật toán MaxEnt trên nền tảng điện toán đám mây GEE đã cho thấy, sự phân hóa rõ nét về mức độ phù hợp sinh thái trên phạm vi 5 tỉnh thuộc khu vực nghiên cứu (Hình 1). Mô hình đã xác định 5 lớp phân hạng về mức độ phù hợp sinh thái, phản ánh khả năng đáp ứng của môi trường đối với các điều kiện sinh trưởng và phát triển tối ưu của loài.

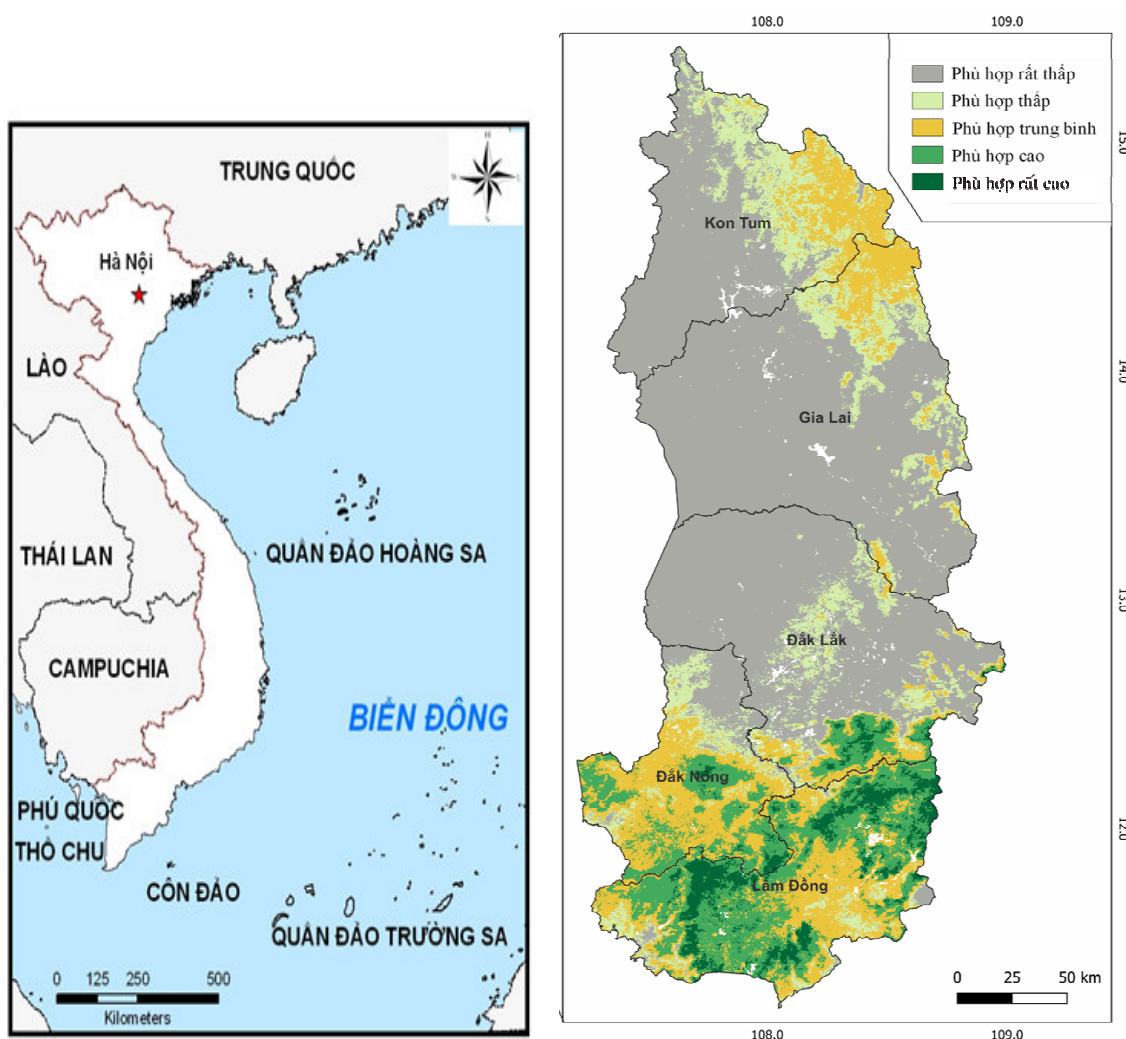
Diện tích phân bố tiềm năng được phân loại theo 5 mức độ thích nghi sinh thái: Rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao (Hình 2). Tại ba tỉnh phía Bắc Tây Nguyên là Kon Tum, Gia Lai và Đắk Lắk, diện tích có mức độ phù hợp sinh thái rất thấp chiếm ưu thế tuyệt đối, với tổng diện tích tương ứng lần lượt khoảng 593.000 ha, 1.200.000 ha và 963.000 ha. Trong khi đó, diện tích có mức độ phù hợp cao và rất cao gần như không đáng kể. Điều này cho thấy, phần lớn diện tích tự nhiên tại ba tỉnh này chưa hội tụ đầy đủ các điều kiện sinh thái cần thiết cho sự tồn tại và phát triển bền vững của loài Xá xị, ngoại trừ một số vùng có điều kiện vi khí hậu hoặc thổ nhưỡng đặc biệt.

Ngược lại, tại tỉnh Đắk Nông, mô hình cho thấy sự phân bố sinh thái có xu hướng tích cực hơn với diện tích thuộc mức phù hợp trung bình đạt khoảng 274.000 ha và mức phù hợp cao đạt khoảng 150.000 ha. Các vùng có mức độ phù hợp thấp và rất thấp chỉ chiếm một tỉ lệ nhỏ. Điều này phản ánh sự tương thích cao hơn của các điều kiện sinh thái tại tỉnh Đắk Nông đối với loài Xá xị, mở ra cơ hội đáng kể cho các chương trình trồng rừng hoặc phục hồi quần thể loài trong khu vực.

Đáng chú ý, tỉnh Lâm Đồng được xác định là khu vực có mức độ phù hợp sinh thái cao nhất cho loài Xá xị tại Tây Nguyên, với diện tích phân bố

tiềm năng ở mức cao, đạt khoảng 400.000 ha và rất cao khoảng 147.000 ha. Tỷ lệ diện tích ở mức rất thấp và thấp tại tỉnh này là không đáng kể. Những kết quả này cho thấy, Lâm Đồng và Đắk Nông là hai tỉnh có tiềm năng lớn nhất trong việc quy hoạch, phát triển và bảo tồn loài Xá xị trên cơ sở sinh thái.

Ngược lại, các khu vực còn lại của Tây Nguyên chỉ có mức độ phù hợp sinh thái hạn chế, cho thấy sự cần thiết của việc lựa chọn vị trí trồng ưu tiên kết hợp với các biện pháp kỹ thuật can thiệp (chăm sóc, cải tạo đất, che phủ...) nếu có nhu cầu phát triển loài ở quy mô nhỏ hoặc thí điểm.

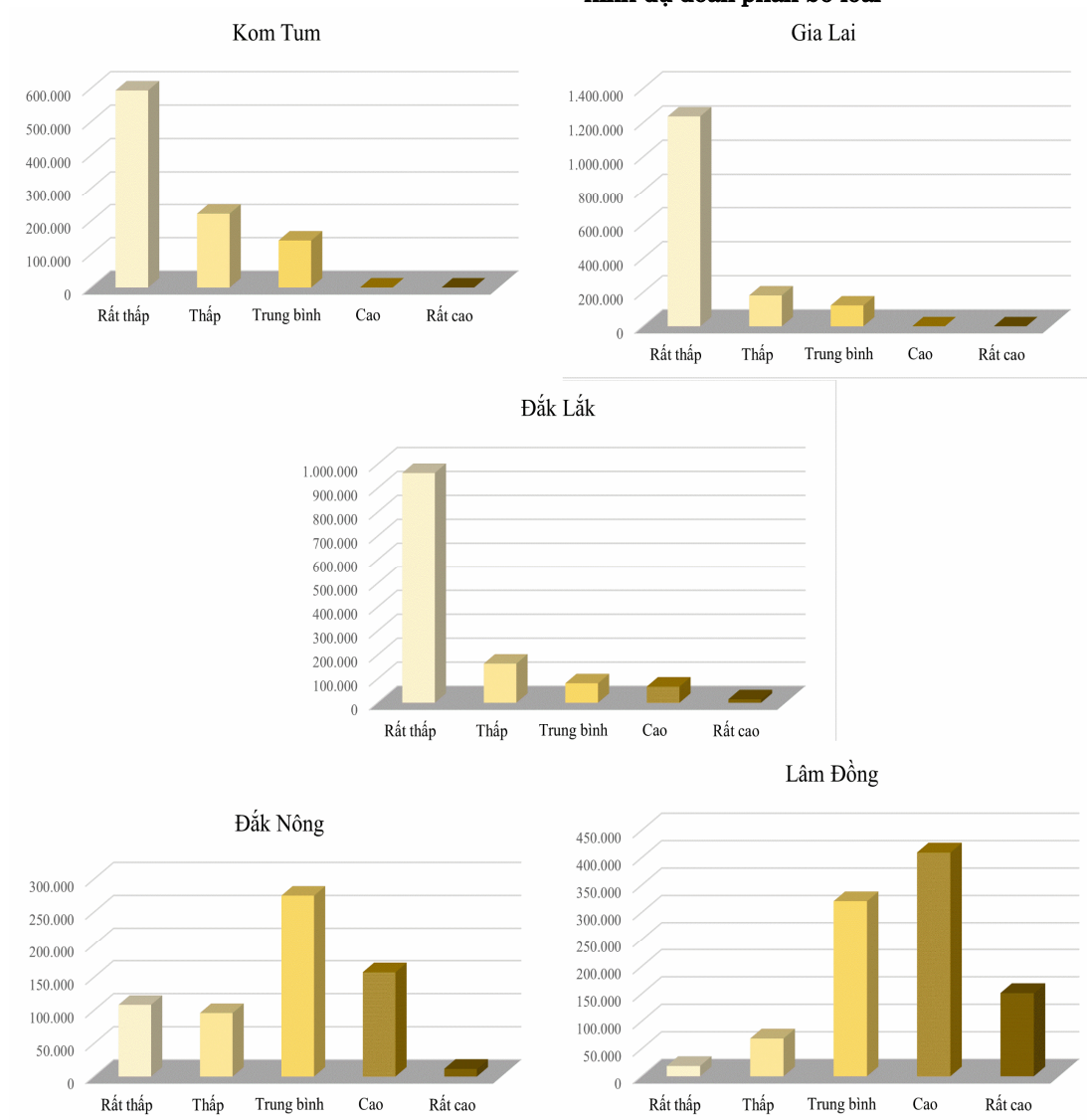


Hình 1. Bản đồ phân hạng mức độ phù hợp sinh thái cho loài Xá xị ở Tây Nguyên

Nhìn chung, bản đồ phân vùng mức độ phù hợp sinh thái (Hình 1) đóng vai trò như một công cụ quan trọng trong công tác quy hoạch vùng trồng và bảo tồn loài Xá xị, đặc biệt trong bối cảnh BĐKH và áp lực từ chuyển đổi mục đích sử dụng đất ngày càng gia tăng. Bản đồ này cung cấp căn cứ khoa học cần thiết cho việc định hướng chiến lược bảo tồn tại chỗ và phục hồi ngoài phạm vi phân bố tự nhiên, đồng thời hỗ trợ các cơ quan quản lý, nhà hoạch định chính sách và cộng đồng địa phương xác định các vùng ưu tiên cao trong công tác bảo tồn đa dạng sinh học.

Hơn nữa, kết quả nghiên cứu cũng góp phần làm sáng tỏ các yếu tố sinh thái chi phối sự phân bố hiện tại của loài Xá xị, tạo nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm mô hình hóa nguy cơ thu hẹp vùng phân bố trong tương lai dưới tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và thay đổi sử dụng đất. Đây là hướng tiếp cận quan trọng để nâng cao hiệu quả quản lý và bảo tồn không chỉ loài Xá xị, mà còn các loài có giá trị tương tự trong chi Quế và các loài bản địa khác tại khu vực Tây Nguyên.

3.2. Đánh giá độ chính xác và ổn định của mô hình dự đoán phân bố loài



Hình 2. Diện tích (ha) các vùng phù hợp sinh thái cho loài Xá xị ở Tây Nguyên

Để đánh giá độ tin cậy và độ ổn định của mô hình phân bố loài Xá xị, mô hình MaxEnt đã được lặp lại nhiều lần với các giá trị khởi tạo khác nhau cho bộ sinh số ngẫu nhiên “seed”. Việc thay đổi giá trị khởi tạo này cho phép kiểm tra tính ổn định của mô hình và khả năng tái lập kết quả, từ đó lựa chọn giá trị “seed” cho đầu ra có hiệu suất dự đoán tốt nhất hoặc ổn định nhất. Phương pháp này đồng thời đảm bảo tính ngẫu nhiên có kiểm soát, tạo điều kiện cho việc so sánh và đánh giá độ chính xác một cách nhất quán giữa các lần chạy mô hình.

Không giống như các mô hình dự đoán hiện diện - tiềm năng thông thường, đầu ra của MaxEnt trong nghiên cứu này được hiểu là mức độ phù hợp sinh thái của môi trường thay vì xác suất hiện diện thuần túy [27]. Kết quả đánh giá hiệu suất mô hình thông qua chỉ số AUC là diện tích dưới đường cong ROC cho thấy, giá trị AUC cao nhất đạt được là 0,800 khi sử dụng “seed” = 500, đây cũng là giá trị cao nhất trong số 69 lần chạy lặp lại của mô hình.

Giá trị AUC này cho thấy, mô hình có hiệu năng dự đoán khá tốt và các biến môi trường đầu vào được sử dụng có khả năng giải thích đáng kể sự biến thiên không gian trong phân bố sinh thái tiềm năng của loài Xá xị tại khu vực Tây Nguyên. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng nhận thấy rằng, để nâng cao độ chính xác của mô hình, cần tích hợp thêm các yếu tố sinh thái vi mô khác (ví dụ: thảm thực vật, đặc điểm đất,...), hoặc cải thiện độ phân giải và tính đại diện của các tập dữ liệu đầu vào. Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh BĐKH và nhu cầu dự báo phân bố loài một cách chính xác hơn nhằm phục vụ quy hoạch bảo tồn hiệu quả.

3.3. Dự báo vùng phù hợp sinh thái trong tương lai cho loài Xá xị tại Tây Nguyên

Kết quả mô phỏng vùng phù hợp sinh thái tiềm năng của loài Xá xị dưới tác động của BĐKH

được thực hiện theo kịch bản phát thải trung bình SSP2-4.5 cho giai đoạn 2080 - 2100, sử dụng 6 mô hình khí hậu toàn cầu: (1) GISS-E2-1-G, (2) BCC-CSM2-MR, (3) INM-CM5-0, (4) MPI-ESM1-2-HR, (5) MRI-ESM2-0 và (6) UKESM1-0-LL. Kết quả phân tích từ các mô hình này cho thấy, xu hướng nhất quán về sự biến đổi không gian phân bố sinh thái tiềm năng của loài trong bối cảnh khí hậu tương lai (Hình 3).

Tất cả các kịch bản đều dự báo rằng, vùng có mức độ phù hợp sinh thái cao và rất cao của loài Xá xị tiếp tục tập trung chủ yếu tại khu vực phía Nam Tây Nguyên, đặc biệt là ở 2 tỉnh Đắk Nông và Lâm Đồng. Trong đó, các khu vực phía Nam tỉnh Đắk Nông và phần lớn diện tích tỉnh Lâm Đồng vẫn duy trì diện tích tương đối lớn có mức độ phù hợp trung bình đến cao mặc dù có sự BĐKH trong tương lai. Đây được xem là các "vùng sinh thái ưu tiên" có tiềm năng cao cho bảo tồn và phát triển loài trong điều kiện BĐKH.

Tuy nhiên, đáng lưu ý là các vùng sinh thái phù hợp này có xu hướng bị suy giảm cả về diện tích lẫn mức độ phù hợp, với tỷ lệ thu hẹp lên tới 75% so với hiện tại trong một số kịch bản. Những biến đổi này phản ánh tác động tiêu cực đáng kể của BĐKH đến vùng phân bố tiềm năng của loài, đồng thời làm gia tăng nguy cơ phân mảnh sinh cảnh và mất khả năng thích nghi sinh thái trong một số khu vực.

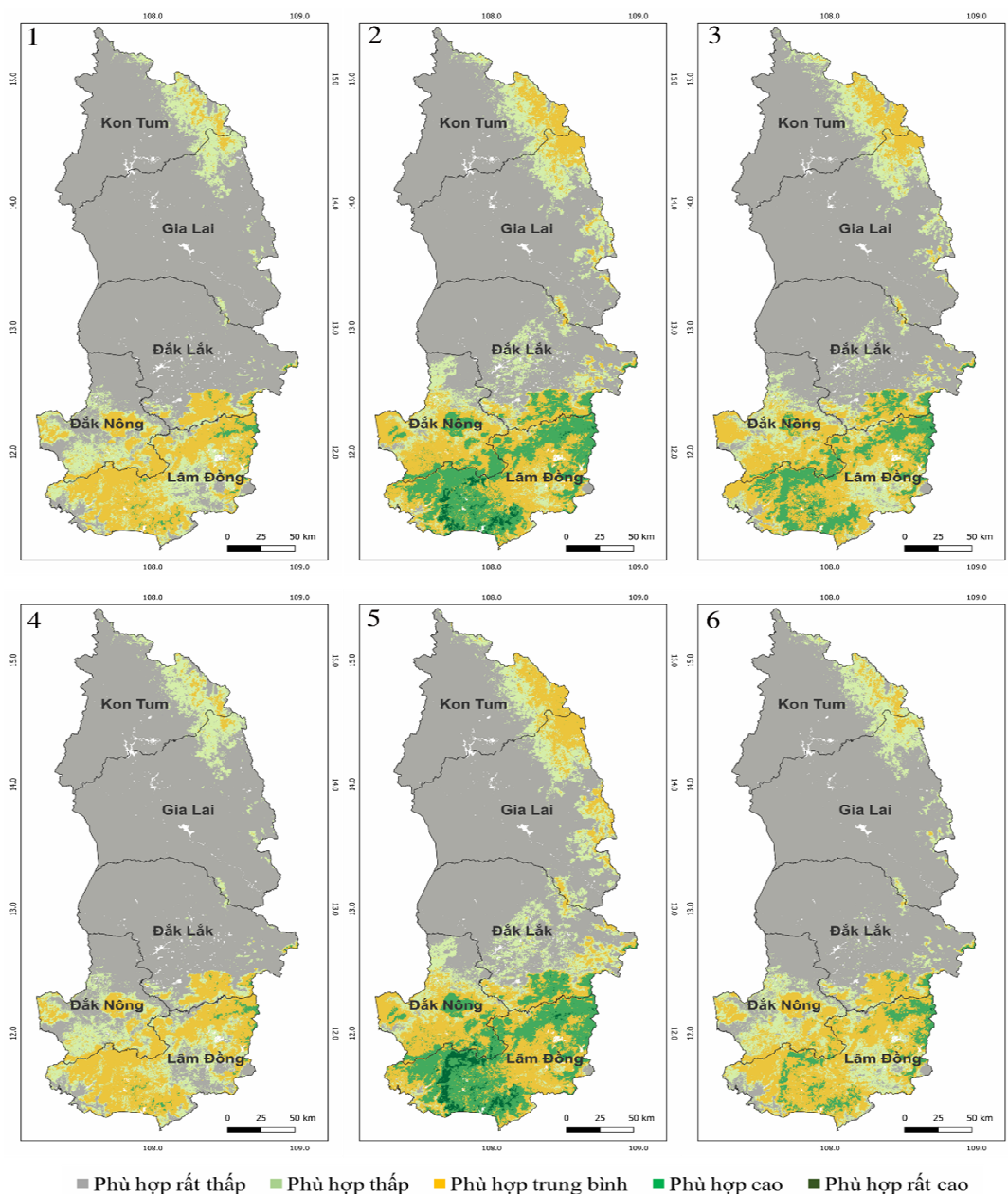
Ngược lại, các tỉnh Kon Tum, Gia Lai và phần lớn diện tích tỉnh Đắk Lắk tiếp tục được dự báo là có mức độ phù hợp rất thấp đến thấp, tương tự như hiện trạng, cho thấy ít có khả năng hỗ trợ sự phát triển bền vững của loài Xá xị trong tương lai gần.

Đáng chú ý, tổng số 3/6 kịch bản là BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0 và MRI-ESM2-0 dự báo các vùng sinh thái phù hợp cao và rất cao có tính liên tục không gian cao và ít bị phân mảnh hơn so với các kịch bản còn lại.

Mặc dù vậy, một số kịch bản (GISS-E2-1-G, BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0 và UKESM1-0-LL) dự báo rằng, các vùng có mức độ phù hợp cao nhất sẽ gần như biến mất khỏi khu vực Tây Nguyên vào cuối thế kỷ XXI. Những nhận định này là cảnh báo

nhằm nhấn mạnh về xu hướng thu hẹp sinh cảnh tiềm năng, đòi hỏi có các chiến lược bảo tồn chủ động (bảo tồn tại chỗ và chuyển vị).

3.4. Xu hướng dịch chuyển và thu hẹp sinh cảnh của loài Xá xị dưới tác động của BĐKH



Hình 3. Bản đồ dự báo mức độ phù hợp sinh thái cho loài Xá xị, giai đoạn 2080 - 2100 ở Tây Nguyên, theo 6 kịch bản BĐKH. Trên bản đồ, từ 1 - 6 tương ứng với kết quả mô hình sử dụng kịch bản BĐKH: (1) GISS-E2-1-G, (2) BCC-CSM2-MR, (3) INM-CM5-0, (4) MPI-ESM1-2-HR, (5) MRI-ESM2-0, (6) UKESM1-0-LL

Phân tích kết quả mô hình hóa phân bố sinh thái trong tương lai cho loài Xá xị cho thấy, xu hướng rõ rệt về sự dịch chuyển vùng phù hợp sinh thái theo trục vĩ độ, đặc biệt là về phía bắc Tây Nguyên. Thay vào đó, các vùng sinh cảnh phù hợp có xu hướng duy trì và tái cấu trúc chủ yếu trong phạm vi 2 tỉnh Đắk Nông và Lâm Đồng. Đây là những khu vực có đặc điểm địa hình núi cao và điều kiện khí hậu đặc thù, cho phép duy trì sinh cảnh tương đối ổn định cho loài trong bối cảnh BĐKH. So với hiện trạng, các bản đồ dự báo đều cho thấy, vùng có mức độ phù hợp sinh thái cao sẽ thu hẹp về diện tích và giảm cấp độ, đặc biệt là tại các khu vực phía Đông tỉnh Lâm Đồng. Đồng thời, diện tích thuộc các lớp phù hợp trung bình và thấp có xu hướng gia tăng. Sự suy giảm các vùng sinh cảnh tối ưu này phản ánh tác động tiêu cực của BĐKH đến phạm vi phân bố tiềm năng của loài trong tương lai gần. Những phát hiện này phù hợp với các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam, đặc biệt là các loài phụ thuộc vào điều kiện khí hậu ổn định và sinh cảnh tự nhiên, đang phải đối mặt với nguy cơ suy giảm diện tích sinh cảnh tối ưu và tăng tính dễ tổn thương trước các kịch bản khí hậu cực đoan [28]. Kết quả nghiên cứu nhấn mạnh vai trò then chốt của việc bảo vệ và phục hồi các hệ sinh thái rừng đặc trưng tại các tỉnh Đắk Nông và Lâm Đồng, nơi được xem là các “hành lang sinh thái” trọng yếu trong chiến lược bảo tồn loài Xá xị. Bên cạnh đó, sự khác biệt đáng kể về dự báo giữa các kịch bản khí hậu toàn cầu càng làm nổi bật tầm quan trọng của việc xây dựng mô hình sử dụng đa kịch bản trong nghiên cứu dự báo phân bố loài [29].

3.5. Những hạn chế trong mô hình dự đoán phân bố sinh thái của loài Xá xị

Mặc dù mô hình MaxEnt cho kết quả phân vùng phù hợp sinh thái có độ chính xác tương đối cao, vẫn tồn tại một số sai lệch không thể bỏ qua giữa kết quả mô hình và thực tế phân bố của loài Xá xị tại Tây Nguyên. Cụ thể, một số khu vực được mô hình xác định là có mức độ phù hợp cao nhưng lại không ghi nhận sự hiện diện của loài trong thực địa. Hiện tượng này có thể được lý giải bởi các yếu tố lịch sử (quá khứ khai thác quá mức hoặc tuyệt

chủng cục bộ), canh tác nông nghiệp làm thay đổi sinh cảnh, hoặc các rào cản sinh học và sinh thái cản trở sự tồn tại của quần thể. Những phát hiện này tương đồng với các nghiên cứu trước đó [30, 31], theo đó không phải mọi khu vực có điều kiện sinh thái phù hợp đều có sự hiện diện thực tế của loài, do ảnh hưởng của các yếu tố ngoài mô hình như tính kết nối cảnh quan, hạn chế về phát tán, hoặc can thiệp của con người. Do đó, để tiếp tục nghiên cứu bảo tồn loài Xá xị trong tương lai, rất cần khảo sát thực địa để cập nhật mô hình.

4. KẾT LUẬN

Kết quả mô hình hóa phân bố sinh cảnh sử dụng nền tảng điện toán đám mây đã góp phần làm sáng tỏ các vùng sinh thái tiềm năng phù hợp cho loài Xá xị tại khu vực Tây Nguyên, Việt Nam trong cả hiện tại và các kịch bản biến đổi khí hậu tương lai. Vùng phân bố phù hợp chủ yếu tập trung tại hai tỉnh Lâm Đồng và Đắk Nông, nơi thể hiện mức độ phù hợp sinh thái cao và ổn định nhất. Sáu kịch bản khí hậu tương lai được tích hợp trong mô hình cho thấy mức độ nhất quán tương đối về xu hướng thay đổi phân bố tiềm năng của loài. Tuy nhiên, mức độ tác động và độ chi tiết trong dự báo có sự khác biệt đáng kể giữa các kịch bản. Cụ thể, 3 kịch bản (BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0 và MRI-ESM2-0) phản ánh xu hướng thu hẹp hoặc suy giảm các vùng có mức độ phù hợp sinh thái cao, cho thấy ảnh hưởng ở mức trung bình của BĐKH đến sinh cảnh phù hợp sinh thái của loài. Trong khi đó, 3 kịch bản còn lại (GISS-E2-1-G, MPI-ESM1-2-HR và UKESM1-0-LL) dự báo sự biến mất gần như khá lớn của các khu vực có mức độ phù hợp cao vào cuối thế kỷ XXI (giai đoạn 2080 - 2100), đặc biệt dưới các kịch bản khí hậu cao. Những kết quả này cung cấp bằng chứng khoa học có giá trị, giúp định hướng ưu tiên không gian trong công tác bảo tồn loài Xá xị tại Tây Nguyên. Đồng thời, nghiên cứu cũng góp phần xác định các vùng sinh thái thích nghi cao trong tương lai, hỗ trợ quá trình quy hoạch bảo tồn loài dựa trên khả năng thích ứng với bối cảnh BĐKH ngày càng gia tăng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 106.06 - 2021.02. Nhóm tác giả chân thành cảm ơn Ban Quản lý Vườn Quốc gia Bidoup - Núi Bà (Lâm Đồng), Khu Bảo tồn Thiên nhiên Kon Chư Răng (Gia Lai), Vườn Quốc gia Ngọc Linh (Kon Tum), Vườn Quốc gia Tà Đùng (Đắk Nông) đã giúp đỡ chúng tôi trong quá trình khảo sát thực địa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Phillips S. J., Dudík M. & Schapire R. E. (2017). MaxEnt software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/MaxEnt/
2. Pham M. P., Vu D. D., Nguyen T. T. & Nguyen V. S. (2024). Predictive ecological niche model for *Cinnamomum parthenoxylon* (Jack) Meisn. (Lauraceae) from last glacial maximum to future in Vietnam. *Biodiversity Data Journal*, 12: e122325.
3. Phillips S. J., Anderson R. P. & Schapire R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3 - 4): 231 - 259.
4. Hijmans R. J., Phillips S., Leathwick J. & Elith J. (2023). Dismo: Species distribution modeling. R package version 1.3-3. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>.
5. Thuiller W., Georges D., Engler R. & Breiner F. (2023). Biomod2: Ensemble Platform for species distribution modeling. R package version 3.5.1. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=biomod2>.
6. Phillips S. J. & Elith J. (2022). Maxnet: Fitting 'MaxEnt' species distribution models with 'glmnet'. R package version 0.1.4. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=maxnet>.
7. Crego R. D., Stabach J. A. & Connette G. (2022). Implementation of species distribution models in Google Earth Engine. *Diversity and Distributions*, 28(5): 904 - 916.
8. Nguyen Q. K., Tong H., Nguyen L., Nguyen T. N., Ngo T. D., Quang N. H., Dinh A. T. & Pham M. P. (2024). Landscape dynamics and environmental fragility zoning in Hinh river basin: Insights for protecting natural ecosystems. *One Ecosystem*, 9: e134088.
9. Campos J. C., Garcia N., Alirio J., Arenas-Castro S., Teodoro A. C. & Sillero N. (2023). Ecological niche models using MaxEnt in Google Earth Engine: Evaluation, guidelines and recommendations. *Ecological Informatics*, 76: 102147
10. Nguyễn Tiến Bân (2003). *Danh lục các loài thực vật Việt Nam. Tập II*. Nxb Nông nghiệp, Hà Nội.
11. Phùng Văn Phê (2012). Nghiên cứu giảm hom cây Xá xị *Cinnamomum parthenoxylon* (Jack) Meisn. làm cơ sở cho công tác bảo tồn ở Vườn Quốc gia Tam Đảo, tỉnh Vĩnh Phúc. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 50(5): 643 - 643.
12. Fick S. E. & Hijmans R. J. (2017). WorldClim 2: New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12): 4302 - 4315.
13. Ghimire P., Karki S., Pandey V. P. & Pradhan A. M. S. (2025). Mapping spatio-temporal dynamics of irrigated agriculture in Nepal using MODIS NDVI and statistical data with Google Earth Engine: A step towards improved irrigation planning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 136: 104345.
14. Safanelli J. L., Poppiel R. R., Ruiz L. F. C., Bonfatti B. R., Mello F. A. D. O., Rizzo R. & Demattê J. A. (2020). Terrain analysis in Google Earth Engine: A method adapted for high-performance global-scale analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6): 400.
15. Hengl T., De Jesus J. M., MacMillan R. A., Batjes N. H., Heuvelink G. B., Ribeiro E.,... & Gonzalez M. R. (2014). SoilGrids1km-Global soil

information based on automated mapping. *PLOS ONE*, 9(8): e105992.

16. Srinet R., Nandy S., Padalia H., Ghosh S., Watham T., Patel N. R. & Chauhan P. (2020). Mapping plant functional types in Northwest Himalayan foothills of India using random forest algorithm in Google Earth Engine. *International Journal of Remote Sensing*, 41(18): 7296 - 7309.

17. Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J. & Taylor K. E. (2016). Overview of the coupled model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5): 1937 - 1958.

18. Lobo J. M., Jiménez -Valverde A. & Real R. (2008). AUC: A misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2): 145 - 151.

19. Pham M. P., Vu D. D., Nguyen K. Q., Nguyen N. T., Tong H. T., Nguyen T. T., Vu D. G., Nguyen D. L., Nguyen V. Q. & Phan A. T. (2024). Habitat suitability and conserving *Tacca chantrieri* André: A case study in Ba-Vi Natural Park, Vietnam. *Biology Bulletin*, 51(10): 3226 - 3236.

20. QGIS Geographic Information System (2023). Version 3.32. Open source Geospatial Foundation. Available from: <https://qgis.org>.

21. Miller T., Blackwood C. B. & Case A. L. (2024). Assessing the utility of SoilGrids250 for biogeographic inference of plant populations. *Ecology and Evolution*, 14(3): e10986.

22. Buri A., Cianfrani C., Pinto-Figueroa E., Yashiro E., Spangenberg J. E., Adatte T., ... & Pradervand J. N. (2017). Soil factors improve predictions of plant species distribution in a mountain environment. *Progress in Physical Geography*, 41(6): 703 - 722.

23. Beaumont L. J., Hughes L. & Poulsen M. (2005). Predicting species distributions: Use of

climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. *Ecological Modelling*, 186(2): 251 - 270.

24. Waltari E., Schroeder R., McDonald K., Anderson R. P. & Carnaval A. (2014). Bioclimatic variables derived from remote sensing: Assessment and application for species distribution modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(10): 1033 - 1042.

25. Heubes J., Retzer V., Schmidtlein S. & Beierkuhnlein C. (2011). Historical land use explains current distribution of calcareous grassland species. *Folia Geobotanica*, 46: 1 - 16.

26. Feilhauer H., He K. S. & Rocchini D. (2012). Modeling species distribution using niche-based proxies derived from composite bioclimatic variables and MODIS NDVI. *Remote Sensing*, 4(7): 2057 - 2075.

27. Biosecurity Commons (n.d.). *MaxEnt SDM explained*. Available: <https://support.biosecuritycommons.org.au/support/solutions/articles/6000262266-MaxEnt-sdm-explained>.

28. Pham T. M., Dang G. T. H., Le A. T. K. & Luu A. T. (2023). Predicting the potential geographic distribution of *Camellia sinensis* var. *shan* under multiple climate change scenarios in Van Chan district, Vietnam. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2): 1843 - 1857.

29. Song Y., Xu X., Zhang S. & Chi X. (2024). Uncertainty assessment of species distribution prediction using multiple global climate models on the Tibetan Plateau: A case study of *Gentiana yunnanensis* and *Gentiana siphonantha*. *Land*, 13(9): 1376.

30. Bagaria G., Rodà F., Clotet M., Míguez S. & Pino J. (2018). Contrasting habitat and landscape effects on the fitness of a long-lived grassland plant under forest encroachment: Do

they provide evidence for extinction debt? *Journal of Ecology*, 106(1): 278 - 288.

31. Lehtilä K., Dahlgren J. P., Garcia M. B., Leimu R., Syrjänen K. & Ehrlén J. (2026). Forest

succession and population viability of grassland plants: Long repayment of extinction debt in *Primula veris*. *Oecologia*, 181: 125 - 135.

CLOUD-BASED HABITAT SUITABILITY MAPPING FOR CLIMATE CHANGE ADAPTATION OF
Cinnamomum parthenoxylon IN CENTRAL HIGHLANDS, VIETNAM

Pham Mai Phuong^{1,2}, Nguyen Thi Thu Nga³,

Nguyen Quoc Khanh², Nguyen Duy Liem⁴, Vu Dinh Duy²

¹Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology

²Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center

³Military Technical Academy

⁴Nong Lam University

Abstract

Cinnamomum parthenoxylon (Jack) Meisn. is a tree species belonging to the genus *Cinnamomum* that is currently endangered in Vietnam. In this study, we developed a habitat suitability model and projected future climate change impacts on the distribution of species using 15 geospatial variables available on the Google Earth Engine platform. Future distribution projections were made for the period 2080 - 2100 under six medium-emission climate change scenarios (GISS-E2-1-G, BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL). The results identified ecologically suitable areas for *C. parthenoxylon* in Central Highlands region. The MaxEnt algorithm, based on presence–pseudoabsence data, was applied to model habitat suitability zoning for the species. Model performance was evaluated using the Area Under the Curve (AUC) metric. The results revealed that Dak Nong province had over 157000 ha of highly suitable habitat, while Lam Dong province had more than 151000 ha classified as very highly suitable for *C. parthenoxylon*. Climate change projections suggested that some areas currently identified as highly or very highly suitable may experience a decline in suitability in the future. The consistency observed across the six climate scenarios enhances the reliability of the projections. These findings provide a critical scientific basis to support the conservation and management of *C. parthenoxylon* in the context of increasing climate change impacts in Vietnam's Central Highlands.

Keywords: *Cinnamomum parthenoxylon*, machine learning, Google Earth Engine, ecological suitability, species distribution modeling.

Ngày nhận bài: 15/4/2025

Ngày chuyển phản biện: 12/5/2025

Ngày thông qua phản biện: 02/6/2025

Ngày duyệt đăng: 13/6/2025