

Đánh giá tác động của phát triển du lịch đến mẫu dạng cảnh quan quần đảo Côn Đảo bằng phương pháp tích hợp GeoAI và độ đo không gian

Đặng Đỗ Lâm Phương¹, Nguyễn Thị Hà Thành¹, Nguyễn Thị Diễm My²,
Đặng Hữu Liệu¹, Hứa Hoàng Huế¹, Đỗ Thị Nhung¹, Phạm Văn Mạnh^{1*}

¹Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

²Khoa Khoa học Dữ liệu Địa lý, Trắc địa và Kỹ thuật Môi trường, Đại học AGH Krakow

Impact of tourism development on Con Dao Islands landscape pattern using the hybrid method of GeoAI and spatial metrics

Dang Do Lam Phuong¹, Nguyen Thi Ha Thanh¹, Nguyen Thi Diem My²,
Dang Huu Lieu¹, Hua Hoang Hue¹, Do Thi Nhung¹, Pham Van Manh^{1*}

¹University of Science, Vietnam National University, Hanoi

²Faculty of Geo-Data Science, Geodesy, and Environmental Engineering, AGH University of Krakow

*Corresponding author: manh10101984@gmail.com

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.14.7.2025.112-123>

TÓM TẮT

Phát triển không gian hành chính-kinh tế-xã hội, đặc biệt là việc mở rộng hạ tầng du lịch, là một trong các yếu tố thúc đẩy biến đổi sử dụng đất, gây ảnh hưởng trực tiếp đến môi trường sống và cấu trúc cảnh quan tự nhiên. Trong bối cảnh đó, việc giám sát kịp thời các tác động lên hệ sinh thái bằng Công nghệ trí tuệ nhân tạo không gian địa lý (GeoAI) và chỉ số định lượng phân mảnh cảnh quan (QLFI) trở nên cấp thiết để hỗ trợ nhà quản lý ra quyết định kịp thời. Kết hợp phân tích ảnh viễn thám dựa trên đối tượng địa lý, nghiên cứu đã phân loại các kiểu cảnh quan một cách có kiểm định để đánh giá mức độ phân mảnh không gian tại Côn Đảo. Kết quả phân loại đạt độ chính xác tổng thể 91,68% và hệ số Kappa 0,89 cho thấy khả năng nhận diện tốt các kiểu cảnh quan. Phân tích QLFI chỉ ra rằng phân mảnh cảnh quan ở mức cao và rất cao chiếm khoảng 9% diện tích đất nổi tại các khu vực phát triển hạ tầng du lịch, gây ảnh hưởng đến kết nối sinh thái và giá trị tâm linh bản địa. Việc xây dựng chỉ số QLFI không chỉ hỗ trợ định lượng nhanh tác động của phát triển du lịch và hoạt động nhân sinh, mà còn cung cấp công cụ thiết thực trong điều chỉnh quy hoạch sử dụng đất và bảo tồn không gian cảnh quan. Kết quả nghiên cứu đóng vai trò quan trọng trong định hướng phát triển du lịch gắn với bảo tồn tại Côn Đảo và có thể áp dụng rộng rãi cho các khu vực du lịch-bảo tồn khác.

ABSTRACT

Socio-economic and administrative development, particularly the expansion of tourism infrastructure, is one of the key drivers of land use change, directly affecting natural habitats and landscape structure. In this context, the timely monitoring of ecosystem impacts using Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) and the Quantitative Landscape Fragmentation Index (QLFI) has become essential for supporting informed decision-making by land-use managers. By integrating object-based remote sensing image analysis, the study performed a validated classification of landscape types to assess spatial fragmentation in Con Dao Island. The classification achieved an overall accuracy of 91.68% and a Kappa coefficient of 0.89, demonstrating strong performance in identifying

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 21/07/2025

Ngày phản biện: 26/08/2025

Ngày quyết định đăng: 29/09/2025

Từ khóa:

Côn Đảo, độ đo không gian, GeoAI, mẫu dạng cảnh quan, viễn thám.

Keywords:

Con Dao, GeoAI, landscape patterns, remote sensing, spatial metrics.

diverse landscape patterns. QLFI analysis revealed that areas with high and very high landscape fragmentation account for approximately 9% of the land surface, concentrated in zones of intensive tourism infrastructure development. These trends have significant implications for ecological connectivity and the integrity of local spiritual-cultural values. The development of the QLFI not only facilitates rapid quantification of tourism- and human-induced impacts but also offers a practical tool for adjusting land-use planning and conserving landscape space. The findings play a critical role in guiding integrated tourism and conservation strategies in Con Dao and present a scalable approach for application in other tourism and conservation regions.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cảnh quan và các mẫu dạng là một thể hữu cơ kết nối đa dạng các hệ sinh thái, chịu tác động từ tự nhiên và con người, đồng thời giữ vai trò sống còn với sự phát triển của các hoạt động nhân sinh trong một lãnh thổ [1]. Biến đổi mẫu dạng cảnh quan phần lớn bắt nguồn từ các hoạt động can thiệp của con người vào quá trình tổ chức không gian. Sự can thiệp này dẫn đến sự hình thành của các mô hình cảnh quan mới với cấu trúc không gian và chức năng sinh thái khác so với trạng thái cảnh quan ban đầu [2]. Tại các vùng ven biển và biển đảo, các quá trình phát triển kinh tế-xã hội, đặc biệt là việc phát triển du lịch đang diễn ra mạnh mẽ, khiến cảnh quan tự nhiên tại các khu vực này càng có nguy cơ tổn thương cao hơn. Do đó, việc theo dõi và đánh giá các biến động cấu trúc cảnh quan trở thành một yêu cầu cấp bách trong bối cảnh quản lý môi trường hiện đại. Trong đó, việc định lượng mức độ phân mảnh cảnh quan thông qua các chỉ số trắc lượng hình thái đã trở thành một công cụ thiết yếu trong đánh giá môi trường và quy hoạch phát triển không gian. Thay vì chỉ dừng lại ở cách tiếp cận mô tả trực quan, phương pháp định lượng dựa trên độ đo không gian (spatial metrics) cho phép nhận diện chính xác các xu hướng phân mảnh, mức độ rời rạc và thay đổi tính kết nối giữa các mảnh cảnh quan. Công nghệ GeoAI (trí tuệ nhân tạo không gian địa lý) kết hợp với cảm biến từ xa, nhờ khả năng truy cập mở vào các nguồn dữ liệu nền tảng có độ tin cậy cao đã trở thành một công cụ phân tích mạnh mẽ cho việc định lượng mức độ phân mảnh cảnh quan [3]. Tích hợp

công nghệ GeoAI với dữ liệu ảnh vệ tinh giúp nâng cao độ chính xác, rút ngắn thời gian xử lý dữ liệu, mở rộng khả năng phân tích không gian trên quy mô lớn, đồng thời cho phép theo dõi những biến động lớp phủ và sử dụng đất theo thời gian một cách linh hoạt, đặc biệt là ở các khu vực có khả năng tiếp cận thấp, cũng như dễ bị tổn thương do biến đổi khí hậu và các hoạt động nhân sinh cao như các khu vực biển đảo.

Quần đảo Côn Đảo thuộc tỉnh Bà Rịa-Vũng Tàu (nay là Thành phố Hồ Chí Minh) có Vườn Quốc gia Côn Đảo với giá trị đa dạng sinh học cao, là môi trường sống của nhiều loài sinh vật quý hiếm như rùa biển, bò biển, các loài chim biển đặc hữu [4]... đồng thời cũng là mảnh đất mang ý nghĩa đặc biệt về giá trị lịch sử, văn hóa, gắn liền với nhiều di tích lịch sử, cách mạng, đền, chùa, miếu có ý nghĩa tâm linh ở quy mô quốc gia. Những năm gần đây, định hướng phát triển Côn Đảo thành trung tâm du lịch sinh thái và văn hóa trọng điểm của tỉnh Bà Rịa-Vũng Tàu (nay là Thành phố Hồ Chí Minh) đã thúc đẩy mạnh mẽ quá trình phát triển hạ tầng và dịch vụ, kéo theo nhiều tác động đến cảnh quan tự nhiên, làm phân mảnh môi trường sống, suy giảm kết nối sinh thái và phá vỡ cấu trúc cảnh quan nguyên vẹn. Trong bối cảnh đó, việc sử dụng các công cụ định lượng và trực quan như các chỉ số độ đo cảnh quan là hết sức cần thiết nhằm giám sát và đánh giá mức độ tác động của phát triển hạ tầng du lịch đối với hệ sinh thái tự nhiên và không gian văn hóa-tâm linh đặc thù của Côn Đảo. Nghiên cứu này kế thừa và phát triển chỉ số định lượng phân mảnh cảnh quan (QLFI - Quantitative Landscape Fragmentation

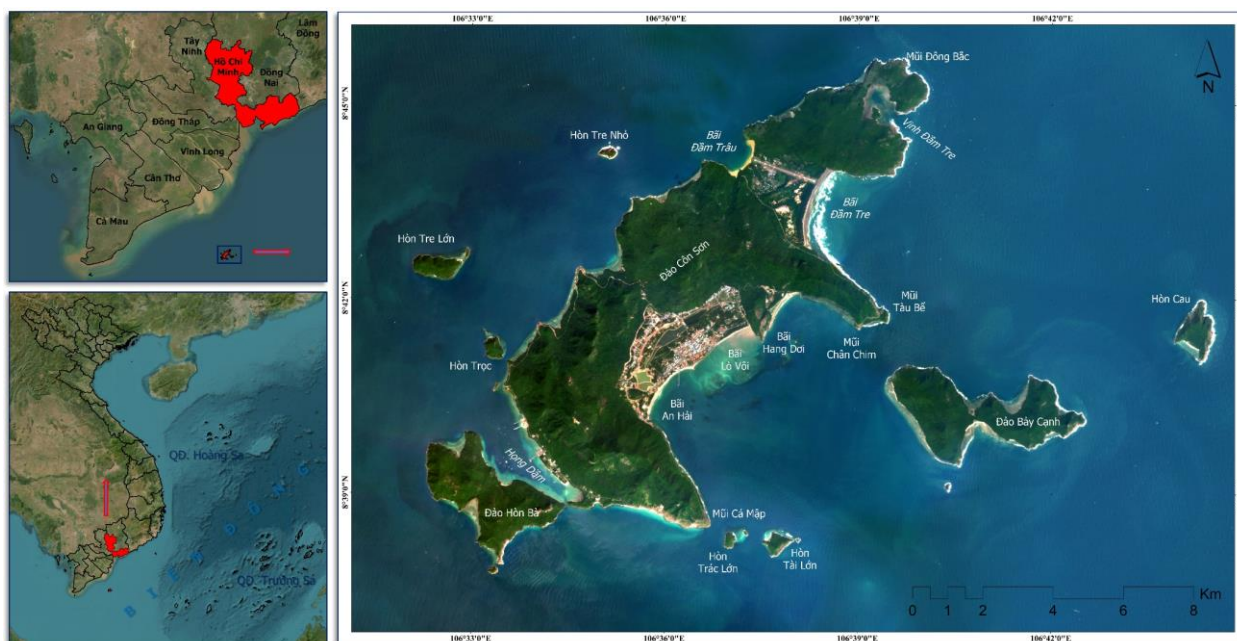
Index) nhằm đánh giá định lượng tác động của hạ tầng du lịch đến cấu trúc không gian của cảnh quan tự nhiên, dưới sự hỗ trợ của công nghệ viễn thám tích hợp với GeoAI cho trường hợp của Côn Đảo. Kết quả phân tích không chỉ phục vụ cho công tác quy hoạch không gian và bảo tồn các giá trị cốt lõi, mà còn góp phần hiện thực hóa các mục tiêu phát triển bền vững của Liên Hợp Quốc, đặc biệt là SDG 15.1 (bảo tồn và phục hồi hệ sinh thái trên cạn) và SDG 15.4 (bảo vệ các hệ sinh thái núi và khu bảo tồn có giá trị đa dạng sinh học cao).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu và hệ sinh thái Côn Đảo

Côn Đảo chính thức được công nhận là 1 trong 9 khu du lịch quốc gia của Việt Nam từ năm 2024, bao gồm 16 hòn đảo lớn nhỏ, với tổng diện tích phần đất nổi là 75,15 km² (Hình 1). Phần lớn diện tích của Côn Đảo thuộc về Vườn Quốc gia Côn Đảo, đã được Ban Thư ký Công ước Ramsar công nhận là khu Ramsar quan trọng thứ 2.203 toàn cầu, là khu Ramsar thứ 6 của Việt Nam, đồng thời đã được công

nhận là Vườn di sản ASEAN vào năm 2023 (<https://www.condaopark.com.vn>). Địa hình Côn Đảo chủ yếu là đồi núi thấp đến trung bình, với điểm cao nhất là núi Thánh Giá khoảng 577 m so với mực nước biển. Côn Đảo mang đặc điểm khí hậu á xích đạo-hải dương nóng ẩm, có mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11 và mùa khô từ tháng 12 đến tháng 4 năm sau; nhiệt độ trung bình năm trên đất liền khoảng 27°C và lượng mưa bình quân trong năm đạt 2.200 mm. Côn Đảo đại diện cho các hệ sinh thái đặc trưng của vùng biển đảo nhiệt đới với sự đa dạng về cấu trúc cảnh quan và môi trường sống [5]. Bên cạnh giá trị tự nhiên, Côn Đảo còn mang ý nghĩa lịch sử quan trọng khi từng là nơi giam giữ hàng vạn tù nhân chính trị trong suốt thời kỳ Pháp thuộc và chế độ Mỹ-Ngụy, với quần thể di tích lịch sử đặc biệt quốc gia, gồm nghĩa trang Hàng Dương, hệ thống nhà tù Côn Đảo cùng các di tích liên quan. Chính vì vậy, Côn Đảo còn là điểm nghiên cứu chìa khóa cho việc bổ sung các hàm ý chính sách cho phát triển du lịch gắn liền với công tác bảo tồn thiên nhiên.



Hình 1. Vị trí địa lý quần đảo Côn Đảo, Thành phố Hồ Chí Minh trên lãnh thổ Việt Nam

2.2. Phương pháp tiếp cận và dữ liệu sử dụng

2.2.1. Thu thập và xử lý dữ liệu

Dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu này gồm các ảnh vệ tinh PlanetScope (1630-1073,

1630-1074, 1631-1073 và 1631-1074) tổ hợp không mây tháng 4/2025, được thu thập tại <https://www.planet.com/explorer>. Việc lựa chọn ảnh vệ tinh có độ phân giải cao

PlanetScope với 4 kênh phổ (Blue, Green, Red, và Near-Infrared), góp phần nâng cao khả năng nhận dạng các cấu trúc cảnh quan nhỏ, đồng thời hỗ trợ đánh giá chi tiết mức độ phân mảnh cảnh quan. Dữ liệu sau đó được hiệu chỉnh về hệ tọa độ VN2000 múi 49N, và được chuẩn hóa về cùng độ phân giải không gian 3 m bằng thuật toán nội suy song tuyến (bilinear interpolation) nhằm đảm bảo tính nhất quán giá trị phổ phản xạ và độ chính xác cho bước thứ 2, phân loại lớp phủ và sử dụng đất (LULC). Ở bước thứ 3, các kết quả phân loại LULC được kiểm chứng thông qua khảo sát thực địa tại trong tháng 4 năm 2025. Trong quá trình khảo sát, nghiên cứu thu thập một bộ dữ liệu 750 mẫu được xác định

tọa độ bằng GPS và gắn nhãn theo từng lớp đối tượng thực tế. Dữ liệu được đưa vào quá trình huấn luyện (training), kiểm chứng (validation) và đánh giá độ chính xác của kết quả phân loại. Việc kết hợp giữa nguồn dữ liệu vệ tinh có độ phân giải cao và thông tin khảo sát thực địa cho phép nâng cao độ tin cậy trong phân tích không gian. Ngoài ra, trong quá trình thực địa (Hình 2), nghiên cứu cũng thu thập các dữ liệu bổ trợ khác (tài liệu liên quan đến tình hình phát triển kinh tế-xã hội của địa phương, quy hoạch và bảo tồn, phát triển du lịch...) góp phần bổ sung cho các kết quả phân tích ảnh viễn thám và các dữ liệu định lượng khác.



Hình 2. Một số hình ảnh thực địa được chụp vào tháng 4 năm 2025 minh họa mức độ phát triển và hiện trạng môi trường sinh thái tại Côn Đảo

2.2.2. Phân loại lớp phủ và sử dụng đất dựa trên thuật toán học máy Random Trees

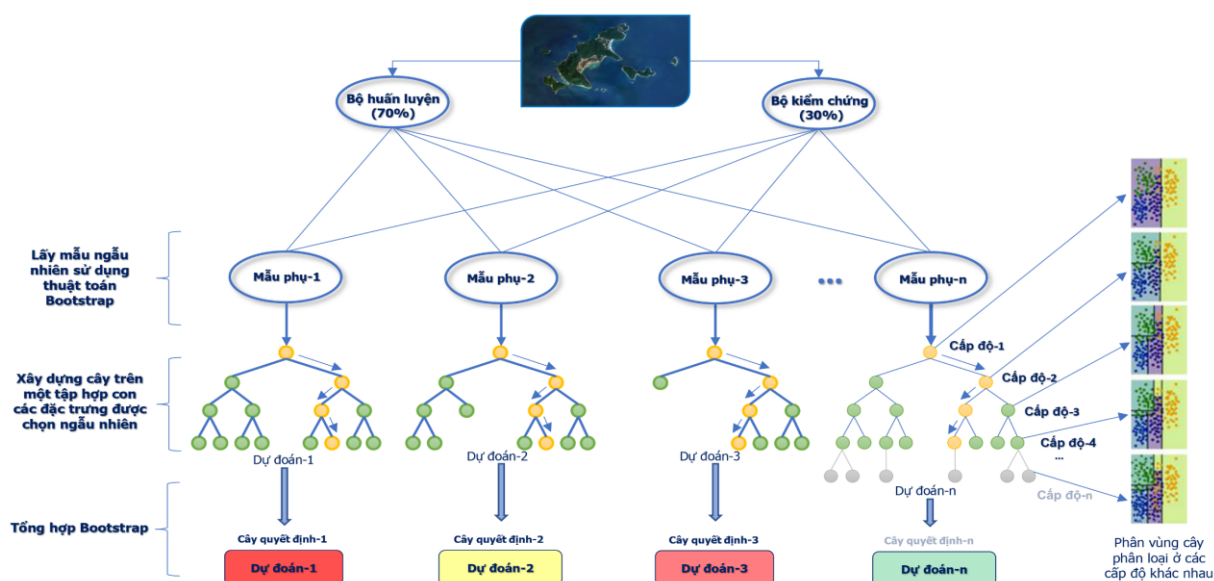
Trong nghiên cứu này, GeoAI với thuật toán Random Trees được áp dụng để phân loại lớp phủ và sử dụng đất tại Côn Đảo, với toàn bộ quy trình xử lý và phân tích thực hiện trên nền tảng phần mềm chuyên dụng Catalyst Professional (Hình 3). Việc lựa chọn thuật toán này dựa trên thách thức mà các phương pháp phân loại truyền thống chưa giải quyết được triệt để, liên quan đến việc xử lý các đối tượng có phổ phản

xạ tương đồng hoặc ranh giới không rõ ràng [6]. Phân tích ảnh dựa trên đối tượng địa lý (GEOBIA), cho phép nhóm các tập hợp điểm ảnh thành các đối tượng có ý nghĩa không gian, từ đó khai thác đồng thời thông tin phổ, hình dạng, mẫu dạng và mối quan hệ lân cận [7]. Cách tiếp cận này đặc biệt phù hợp với ảnh vệ tinh độ phân giải cao và siêu cao, đồng thời hỗ trợ tích hợp với các thuật toán học máy có giám sát, trong đó Random Trees (rừng ngẫu nhiên) được đánh giá cao nhờ hiệu suất vượt trội cả

về thời gian huấn luyện lẫn độ chính xác phân loại [8].

Quá trình phân loại LULC được thực hiện trên phần mềm Catalyst Professional Focus bao gồm các bước: (i) tiền xử lý ảnh vệ tinh, (ii) phân đoạn ảnh theo đối tượng, (iii) trích xuất đặc trưng phổ-hình thái-mẫu dạng-không gian, (iv) huấn luyện mô hình phân loại với thuật toán Random Trees, (v) phân loại tự động và hiệu chỉnh hậu phân loại, (vi) cuối cùng là đánh giá độ chính xác dựa trên hệ số Kappa và độ chính

xác tổng thể, nhằm đảm bảo độ tin cậy cần thiết cho các bước phân tích tiếp theo. Dựa trên điều kiện tự nhiên, đặc điểm cảnh quan của khu vực, cùng với việc tham khảo các kết quả từ nghiên cứu trước tại Côn Đảo và vùng phụ cận, các đối tượng sử dụng đất được chia thành mười loại chính: rừng tự nhiên (RTN), rừng ngập mặn (RNM), trảng cỏ/cây bụi (TCCB), nông nghiệp (NN), cỏ biển (CB), rạn san hô (RSH), bãi đá ven biển (BĐVB), nước mặt (NM), đất xây dựng (ĐXD) và đất khác (ĐK).



Hình 3. GeoAI với thuật toán học máy Random Trees phân loại lớp phủ và sử dụng đất

2.2.3. Xây dựng chỉ số định lượng mức độ phân mảnh cảnh quan

Các chỉ số cảnh quan (Landscape Metrics - LMs) đã chứng minh được vai trò quan trọng như công cụ phân tích định lượng, giúp mô hình hóa các thay đổi về cấu trúc không gian và nhận diện các khu vực có nguy cơ suy giảm sinh thái cảnh quan. Dựa trên tổng hợp cơ sở lý thuyết và thực tiễn từ các nghiên cứu trước đây [9, 10], các chỉ số LMs lựa chọn trong nghiên cứu này được phân thành 04 nhóm chính, phản ánh đầy đủ các khía cạnh đặc trưng của mức độ phân mảnh cảnh quan tại Côn Đảo:

Nhóm độ đo diện tích (A): gồm các chỉ số phản ánh mức độ tác động đến sinh khối, năng suất sinh học, khả năng lưu trữ chất dinh dưỡng, sự di chuyển của các loài nội sinh và sự xâm nhập của các loài ngoại lai trong từng đơn

vị diện tích như LPI (chỉ số mảnh rời rạc lớn nhất), TE (chỉ số tổng chiều dài cạnh), TECI (chỉ số tổng độ tương phản biên) và TCA (chỉ số tổng diện tích lõi). Các chỉ số trong nhóm này đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc không gian cảnh quan đến các yếu tố sinh thái. Đặc biệt, các mảnh cảnh quan tự nhiên có diện tích lớn và phân bố rời rạc tại Côn Đảo góp phần duy trì sự ổn định sinh thái, đồng thời cung cấp thông tin thiết yếu về quy mô, tổng diện tích và sự phân bố của các mảnh trong toàn bộ cấu trúc cảnh quan.

Nhóm độ đo mật độ (B): gồm các chỉ số phản ánh mức độ dày đặc và tần suất xuất hiện của các mảnh cảnh quan trên một đơn vị diện tích như DCAD (chỉ số mật độ phân đoạn lõi), ED (chỉ số mật độ cạnh), PD (chỉ số mật độ mảnh rời rạc), CWED (chỉ số mật độ cạnh có trọng số

tương phản). Các chỉ số này biểu thị mức độ ảnh hưởng của cấu trúc không gian đến tốc độ di chuyển của các loài sinh vật, dòng chảy vật chất và năng lượng trong hệ sinh thái. Sự phân bố và mật độ của các thành phần cảnh quan khác nhau tạo ra các rào cản hoặc hành lang sinh thái, từ đó ảnh hưởng đến mức độ phân tán và kết nối trong toàn bộ cảnh quan.

Nhóm độ đo hình dạng (C): gồm các chỉ số phản ánh mức độ phức tạp hình dạng và đặc điểm ranh giới của các mảnh cảnh quan như FRACAM (chỉ số chiều fractal chu vi-diện tích trung bình có trọng số), LSI (chỉ số hình dạng cảnh quan), SHDI (chỉ số đa dạng shannon). Những chỉ số này giúp đánh giá ảnh hưởng của hình thái không gian đến quá trình mở rộng, thu hẹp và di chuyển của các loài, từ đó tác động đến chất lượng môi trường sống, mức độ đa dạng sinh học và sự ổn định của hệ sinh thái.

Nhóm độ đo khả năng kết nối (D): gồm các chỉ số phản ánh tiềm năng duy trì dòng chảy sinh thái, khả năng di chuyển của các loài sinh vật, và mức độ kết nối chức năng giữa các mảnh sinh thái như DIVISION (chỉ số phân nhỏ cảnh quan), COHESION (chỉ số độ gắn kết mảnh rời rạc), SIMIAM (chỉ số tiếp cận tương đồng trung bình). Các chỉ số này được sử dụng để đánh giá mức độ liên kết không gian giữa các mẫu dạng cảnh quan.

Trong nghiên cứu này, để lượng hóa mức độ phân mảnh cảnh quan, nghiên cứu áp dụng phương pháp phân tích thứ bậc mờ (fuzzy AHP) nhằm xác định trọng số của bốn nhóm độ đo cảnh quan (A, B, C, D) cùng các tiêu chí thành phần tương ứng. Quy trình thực hiện bao gồm

ba bước chính: (i) xây dựng cấu trúc phân cấp của hệ thống tiêu chí; (ii) thiết lập ma trận so sánh từng cặp mờ giữa các tiêu chí; (iii) tích hợp ý kiến chuyên gia để tính toán các tỷ lệ nhất quán (CR - Consistency Ratio) và chỉ số nhất quán (CI - Consistency Index).

Chỉ số nhất quán (CI) được tính bằng Công thức 1. Trong đó, λ_{max} là giá trị riêng tối đa và n là số lượng hàng trong ma trận. Tỷ lệ nhất quán (CR) được xác định theo Công thức 2 dựa trên CI và chỉ số ngẫu nhiên (RI). RI là giá trị trung bình được thống kê từ các ma trận so sánh cặp ngẫu nhiên với kích thước $n = 2, 3, 4, \dots, 9$.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Giá trị CR được sử dụng để đánh giá mức độ nhất quán của các phán đoán trong ma trận so sánh. Cụ thể, nếu $CR \leq 0,1$, mô hình được coi là có độ nhất quán chấp nhận được; ngược lại, nếu $CR > 0,1$, kết quả cho thấy mức độ phán đoán chưa phù hợp, cần được hiệu chỉnh. Trong quá trình khảo sát, các chuyên gia tiến hành rà soát và hiệu chỉnh các giá trị trong ma trận so sánh từng cặp nhằm đảm bảo tính chính xác và phân tích độ nhạy của mô hình. Sau khi xác định trọng số của các tiêu chí thông qua phương pháp fuzzy AHP, một phương trình tổng quát được xây dựng để tích hợp các tiêu chí này, từ đó tính toán chỉ số định lượng phân mảnh cảnh quan (QLFI) tại Đảo, như thể hiện ở công thức (3) như sau:

$$QLFI = \{W_A \times \sum_{i=1}^4 (L_{Ai} \times W_{Ai})\} + \{W_B \times \sum_{j=1}^4 (L_{Bj} \times W_{Bj})\} + \{W_C \times \sum_{k=1}^3 (L_{Ck} \times W_{Ck})\} + \{W_D \times \sum_{h=1}^3 (L_{Dh} \times W_{Dh})\} \quad (3)$$

Trong đó:

W_A, W_B, W_C, W_D là trọng số của bốn nhóm độ đo cảnh quan chính;

$W_{Ai}, W_{Bj}, W_{Ck}, W_{Dh}$ là trọng số của các tiêu chí thành phần tương ứng trong mỗi nhóm;

$L_{Ai}, L_{Bj}, L_{Ck}, L_{Dh}$ là các chỉ số độ đo thứ cấp.

Tất cả các tiêu chí đều được phân loại thành năm mức độ dựa trên thuật toán phân loại "Natural Breaks", nhằm phản ánh ranh giới tự

nhiên trong phân bố dữ liệu. Việc phân loại được hiệu chuẩn bởi các chuyên gia có chuyên môn trong lĩnh vực sinh thái cảnh quan để đảm bảo độ chính xác và phù hợp với điều kiện thực tế. Bảng 1 trình bày các cấp độ tác động liên quan đến chỉ số phân mảnh cảnh quan [11], bao gồm năm cấp độ: (i) Rất thấp, (ii) Thấp, (iii) Trung bình, (iv) Cao, (v) Rất cao.

Bảng 1. Các chỉ số định lượng phân mảnh cảnh quan đối với Vườn Quốc gia Côn Đảo

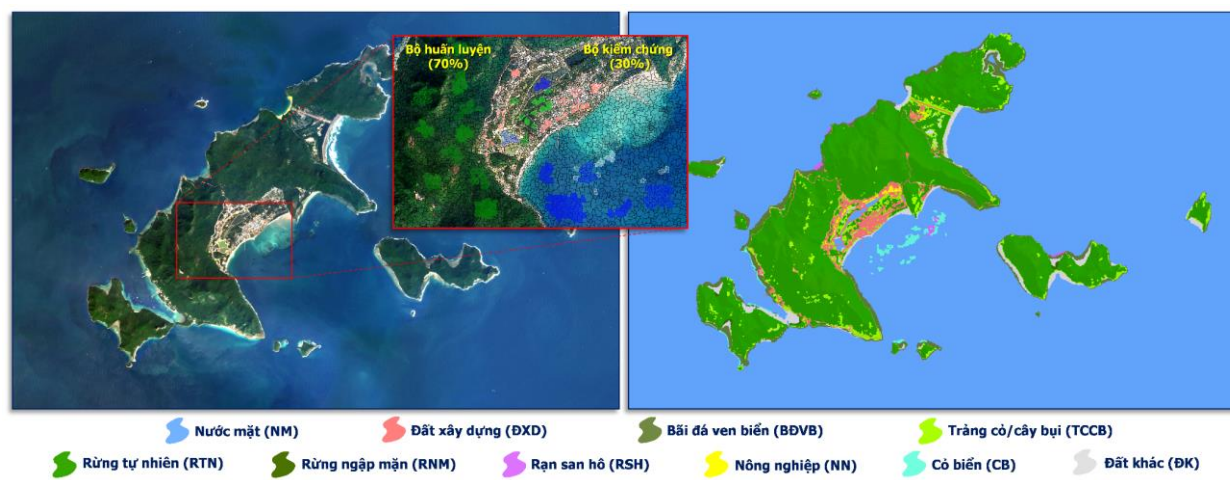
Nhóm A (Độ đo diện tích - Area metrics)					
	Rất thấp	Thấp	Trung bình	Cao	Rất cao
LPI	>90	75-90	55-75	40-55	<40
TE	<2.000	2.000-5.000	5.000-10.000	10.000-15.000	>15.000
TECI	<5	5-20	20-35	35-45	>45
TCA	>95	90-95	85-90	75-85	<75
Nhóm B (Độ đo mật độ - Density metrics)					
	Rất thấp	Thấp	Trung bình	Cao	Rất cao
DCAD	<5	5-15	15-30	30-50	>50
ED	<15	15-45	45-90	90-150	>150
PD	<5	5-15	15-30	30-50	>50
CWED	<15	15-40	40-65	65-110	>110
Nhóm C (Độ đo hình dạng - Shape metrics)					
	Rất thấp	Thấp	Trung bình	Cao	Rất cao
FRACAM	<1,02	1,02-1,06	1,06-1,10	1,1-1,15	>1,15
LSI	<1,5	1,5-2,5	2,5-4,0	4,0-5,0	>5,0
SHDI	<0,2	0,2-0,5	0,5-0,9	0,9-1,2	>1,2
Nhóm D (Độ đo kết nối - Connectivity metrics)					
	Rất thấp	Thấp	Trung bình	Cao	Rất cao
DIVISION	<0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	>0,7
COHESION	>99,7	99-99,7	98,5-99	97,5-98,5	<97,5
SIMIAM	<140	140-520	520-1.070	1.070-1.700	>1.700

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích kết quả phân loại và trọng số của các tiêu chí tại Côn Đảo

Kết quả phân loại hiện trạng lớp phủ và sử dụng đất (LULC) tại Côn Đảo được minh họa trong Hình 4. Sau quá trình tinh chỉnh và hợp nhất các phân lớp, độ chính xác tổng thể đạt 91,68% với hệ số Kappa là 0,89. Các giá trị này

phản ánh mức độ chính xác cao của quá trình phân loại, đồng thời xác nhận tính hiệu quả của phương pháp học máy dựa trên đối tượng địa lý (GEOBIA) được áp dụng. Độ chính xác thu được cũng cho thấy sự tương thích với kết quả từ các nghiên cứu trước đó sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh đa phổ [6, 7].



Hình 4. Phân đoạn ảnh PlanetScope với tập mẫu huấn luyện và kiểm chứng (bên trái) và kết quả phân loại các đối tượng LULC (bên phải)

Bảng 2 trình bày trọng số của các nhóm chỉ số độ đo được xác định thông qua phương pháp phân tích thứ bậc mờ (fuzzy AHP). Tại Cấp độ-1, nhóm A đạt trọng số cao nhất (0,337), tiếp theo là các nhóm B (0,283), C (0,238; hạng 3) và D (0,142; hạng 4). Kết quả này đáp ứng đầy đủ các điều kiện về tính nhất quán, với

$\lambda_{\max} = 4,186$, $CI = 0,062$ và $CR = 0,069$, đều thấp hơn ngưỡng cho phép 0,10. Tại Cấp độ-2, Chỉ số mật độ cạnh (ED) có ảnh hưởng lớn nhất (0,122), tiếp theo là CWED (0,110) và LSI (0,105). Ngược lại, SIMIAM (0,023) và FRACAM (0,038) có trọng số thấp nhất.

Bảng 2. Trọng số của các nhóm và tiêu chí cảnh quan ở hai cấp độ được tính bằng fuzzy AHP

Cấp độ-1			Cấp độ-2			
Nhóm độ đo	Trọng số chính	Xếp hạng	Tiêu chí	Trọng số phụ	Trọng số cuối cùng	Xếp hạng
Độ đo diện tích (A)	0,283	2	Chỉ số mảnh rời rạc lớn nhất (LPI)	0,203	0,057	8
			Chỉ số tổng chiều dài cạnh (TE)	0,341	0,097	4
			Chỉ số tổng độ tương phản biên (TECI)	0,286	0,081	6
			Chỉ số tổng diện tích lõi (TCA)	0,170	0,048	11
Độ đo mật độ (B)	0,337	1	Chỉ số mật độ phân đoạn lõi (DCAD)	0,148	0,050	10
			Chỉ số mật độ cạnh (ED)	0,362	0,122	1
			Chỉ số mật độ mảnh rời rạc (PD)	0,163	0,055	9
			Chỉ số mật độ cạnh có trọng số tương phản (CWED)	0,327	0,110	2
Độ đo hình dạng (C)	0,238	3	Chỉ số chiều fractal chu vi-diện tích trung bình có trọng số (FRACAM)	0,163	0,038	13
			Chỉ số hình dạng cảnh quan (LSI)	0,440	0,105	3
			Chỉ số đa dạng shannon (SHDI)	0,397	0,095	5
Độ đo kết nối (D)	0,142	4	Chỉ số phân nhỏ cảnh quan (DIVISION)	0,540	0,077	7
			Chỉ số độ gắn kết mảnh rời rạc (COHESION)	0,297	0,042	12
			Chỉ số tiếp cận tương đồng trung bình (SIMIAM)	0,163	0,023	14

Phân tích độ nhạy theo từng độ đo đơn lẻ cho phép so sánh trọng số do chuyên gia xác lập thông qua kỹ thuật fuzzy AHP với các trọng số đã được điều chỉnh có chủ đích. Quá trình điều chỉnh được thực hiện bằng cách thay đổi nhẹ trọng số của từng độ đo riêng lẻ, qua đó cung cấp góc nhìn tổng quan về độ ổn định của hệ thống thứ hạng. Nếu chỉ một thay đổi nhỏ trong trọng số dẫn đến biến động lớn trong thứ hạng, thì việc phân bổ trọng số ban đầu cần được đánh giá lại một cách cẩn trọng. Trong nghiên cứu này, phân tích độ nhạy được thực hiện thông qua việc điều chỉnh nhẹ trọng số của độ đo (nhóm B) tại Cấp độ-1. Trong suốt quá trình phân tích, cấu trúc xếp hạng của Cấp độ-1 được giữ nguyên, và những biến động trọng

số được phân tích trong mối liên hệ với các khu vực có mức độ phân mảnh khác nhau. Kết quả phân tích cho thấy trật tự thứ hạng của các độ đo vẫn duy trì sự ổn định, không ảnh hưởng đến kết quả tổng thể.

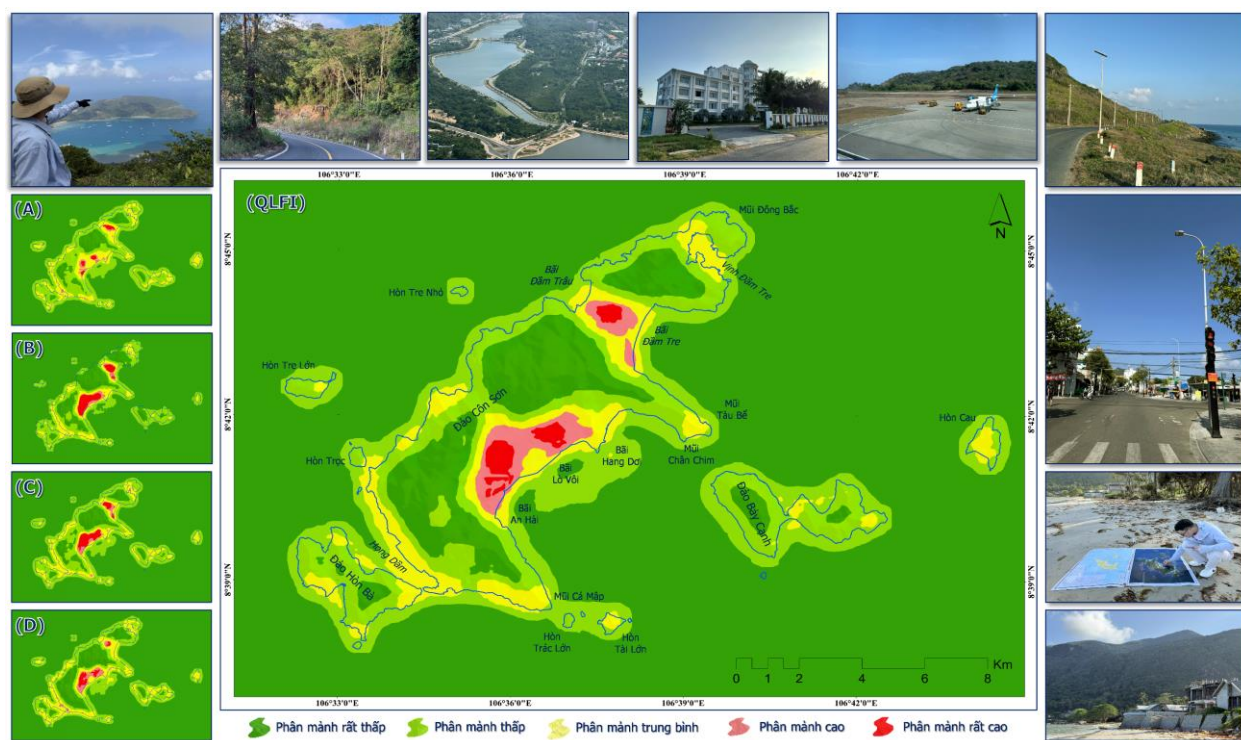
3.2. Phân tích tác động của phát triển không gian hành chính-kinh tế-xã hội đến phân mảnh cảnh quan Côn Đảo

Để đánh giá mức độ tác động của quá trình phát triển không gian hành chính, kinh tế và xã hội đến hình thái cảnh quan tự nhiên, nghiên cứu sử dụng chỉ số định lượng phân mảnh cảnh quan (QLFI). Tại Côn Đảo, mức độ phân mảnh được phân loại thành năm cấp bao gồm: Rất thấp ($1 \div 2,2$); Thấp ($2,2 \div 3,5$); Trung bình ($3,5 \div 4,5$); Cao ($4,5 \div 4,85$); và Rất cao

(4,85÷4,96). Những khu vực có mức độ phân mảnh cao và rất cao (tương ứng với màu đỏ đậm và đỏ cam) chiếm khoảng 9% diện tích đất nổi, tương đương 6,78 km². Các vùng này phân bố chủ yếu xung quanh các bãi An Hải, Lò Vôi, Hang Dơi và khu vực tiếp giáp sân bay Cỏ Ống (Hình 5). Đây là các khu vực có mật độ xây dựng cao, ranh giới cảnh quan bị chia cắt mạnh, và kết nối sinh thái suy giảm rõ rệt. Vùng phân mảnh trung bình (màu vàng) phân bố xung quanh trung tâm đảo lớn, nơi quá trình đô thị hóa đang diễn ra. Ngược lại, các khu vực có mức độ phân mảnh thấp và rất thấp (màu xanh lá và xanh đậm) chủ yếu nằm ở rừng nguyên sinh, sườn núi phía Tây và các đảo vệ tinh như Hòn Tre Lớn, Hòn Cau, Hòn Bẫy Cạnh, vốn ít chịu tác động từ hoạt động nhân sinh và vẫn duy trì tính toàn vẹn sinh thái ổn định. Sự kết hợp giữa phân tích không gian và dữ liệu thực địa xác nhận rằng những vùng có mức độ phân mảnh hay chia cắt cao đều gắn liền với hệ thống giao thông và sự xuất hiện của các trung tâm phát triển không gian hành chính, kinh tế và xã hội. Điều này cho thấy chỉ số QLFI thể hiện sự

hiệu quả trong phản ánh tác động không gian của các hoạt động phát triển hạ tầng, đồng thời khẳng định khả năng ứng dụng thực tiễn trong giám sát cảnh quan và quy hoạch phát triển không gian bền vững tại khu vực nghiên cứu.

Bên cạnh vai trò trong nhận diện các khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của quá trình phát triển, phân tích QLFI còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc hoạch định chính sách bảo tồn và sử dụng đất hợp lý. Việc xác định các "điểm nóng" phân mảnh là tiền đề quan trọng để ưu tiên xây dựng các hành lang sinh thái, vùng đệm bảo vệ và kiểm soát hoạt động phát triển mới. Ngược lại, những vùng có mức độ phân mảnh thấp cần được bảo vệ như các khu lõi trong mạng lưới sinh thái đa tầng, nhằm đảm bảo duy trì chức năng sinh thái lâu dài. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra sự cần thiết tích hợp yếu tố cảnh quan vào các quyết định quy hoạch hạ tầng tại Côn Đảo, nhằm hạn chế tối đa xung đột giữa phát triển kinh tế và bảo tồn thiên nhiên, qua đó hướng tới mô hình phát triển bền vững, hài hòa và tôn trọng các giá trị tự nhiên đặc sắc của quần đảo này.



Hình 5. Bản đồ phân bố không gian định lượng mức độ phân mảnh cảnh quan tại Côn Đảo và ảnh thực địa được chụp vào tháng 4 năm 2025

3.3. Ý nghĩa chính sách và phát triển du lịch bền vững tại Côn Đảo

Sự gia tăng nhanh chóng các hoạt động phát triển không gian hành chính, kinh tế và xã hội tại Côn Đảo, đặc biệt là xây dựng hạ tầng du lịch đang đặt ra những thách thức lớn đối với công tác bảo tồn cảnh quan và sinh thái. Các hạng mục xây dựng như khu nghỉ dưỡng, bến tàu du lịch và tuyến đường ven biển đã làm gia tăng chiều dài ranh giới nhân tạo, giảm diện tích lõi sinh thái liên mạch và phá vỡ kết nối giữa các mảnh rừng ven biển với hệ sinh thái nội đảo. Những biến động này không chỉ tác động trực tiếp đến môi trường sống của các loài sinh vật đặc hữu, mà còn đe dọa đến các giá trị văn hóa-tâm linh đặc biệt của địa phương. Trong tương lai, nếu việc mở rộng du lịch trên đảo không được kiểm soát, áp lực quá tải lên hạ tầng và nguồn nước ngọt vốn khan hiếm sẽ gia tăng, dẫn tới nguy cơ thiếu nước sinh hoạt và suy giảm chất lượng dịch vụ; xói mòn bờ biển, ô nhiễm rác thải và tiếng ồn có thể làm mất vẻ đẹp tự nhiên, khiến hệ sinh thái ven bờ và dưới biển bị tổn thương nghiêm trọng. Đồng thời, sự gia tăng các công trình du lịch ở khu vực gần các di tích lịch sử có thể làm thay đổi cảnh quan, giảm tính trang nghiêm, ảnh hưởng tới công tác bảo tồn và giá trị tưởng niệm của các công trình này. Vì vậy, việc thiết lập cơ sở khoa học nhằm kiểm soát và định hướng phát triển du lịch là yêu cầu cấp thiết. Các kết quả phân tích cho thấy các vùng ven biển, khu dân cư mở rộng và hành lang hạ tầng đang trở thành điểm nóng về phân mảnh cảnh quan. Những phát hiện này là cơ sở quan trọng để xác định vùng đệm sinh thái, điều chỉnh quy hoạch sử dụng đất và kiểm soát mật độ xây dựng tại các khu vực nhạy cảm sinh thái. Việc định lượng mức độ phân mảnh cảnh quan tại Côn Đảo góp phần nâng cao tính khách quan và cơ sở khoa học trong quá trình ra quyết định quy hoạch không gian. Đồng thời, phương pháp này giúp đảm bảo các hoạt động

phát triển du lịch không gây tổn hại đến chất lượng môi trường và giá trị cốt lõi sinh thái-văn hóa của khu vực nghiên cứu. Đặc biệt, nếu được xây dựng dựa trên cơ sở dữ liệu định lượng, chính sách phát triển du lịch bền vững tại Côn Đảo có thể trở thành hình mẫu tích hợp giữa bảo tồn thiên nhiên và phát triển bền vững cho các khu bảo tồn đảo ven biển tại Việt Nam trong tương lai.

Tóm lại, định lượng phân mảnh cảnh quan tại Côn Đảo không chỉ hỗ trợ nâng cao tính khách quan và khoa học trong quá trình ra quyết định cho các nhà bảo tồn và hoạch định chính sách, mà còn đảm bảo rằng các hoạt động du lịch không làm suy giảm chất lượng môi trường và các giá trị di sản sinh thái-văn hóa. Trong dài hạn, phương pháp này có thể phát triển thành một công cụ cảnh báo sớm và hệ thống giám sát cảnh quan theo thời gian thực, phục vụ cho công tác quản lý tài nguyên dựa trên dữ liệu. Việc áp dụng định hướng phát triển du lịch theo tiếp cận liên ngành kết hợp giữa quy hoạch không gian, bảo tồn sinh học và phát triển cộng đồng sẽ tạo điều kiện thuận lợi để hình thành các mô hình du lịch sinh thái cộng đồng vừa đảm bảo sinh kế cho người dân địa phương, vừa gìn giữ giá trị hệ sinh thái của đảo. Bên cạnh đó, những hình thức du lịch thân thiện với môi trường và các chương trình giáo dục bảo tồn đóng vai trò thiết yếu trong việc xây dựng văn hóa du lịch bền vững, tăng cường nhận thức và sự tham gia tích cực từ cộng đồng. Đáng chú ý, nghiên cứu này có thể đóng góp trực tiếp vào việc thực hiện các Mục tiêu Phát triển Bền vững (SDGs), đặc biệt là SDG 15.1 về bảo tồn và phục hồi hệ sinh thái trên cạn, và SDG 15.4 về bảo vệ các hệ sinh thái đặc thù và có giá trị đa dạng sinh học cao. Nếu được thể chế hóa thành chính sách, cách tiếp cận tại Côn Đảo có tiềm năng trở thành hình mẫu tích hợp giữa phát triển và bảo tồn, có thể chuyển giao cho các khu bảo tồn ven biển khác đang đối mặt

với áp lực tương tự. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nhu cầu cấp thiết về thích ứng thể chế, việc lựa chọn Côn Đảo làm khu vực thử nghiệm chính sách và công nghệ quản lý cảnh quan là một chiến lược phù hợp. Từ đó, Côn Đảo không chỉ giữ vai trò tiên phong trong xây dựng mô hình du lịch bền vững cấp địa phương, mà còn có thể đóng góp vào hệ thống giải pháp thích ứng quy mô quốc gia cho các vùng đảo và vùng ven biển Việt Nam.

3.4. Hướng nghiên cứu mở rộng

Ứng dụng mô hình QLFI kết hợp GeoAI cho thấy hiệu quả cao trong giám sát và quy hoạch bảo tồn cảnh quan tại các khu vực biển đảo như Côn Đảo. Trong tương lai, mô hình cần được nâng cấp theo hướng cập nhật dữ liệu thời gian thực từ ảnh vệ tinh và khảo sát thực địa, nhằm theo dõi biến động không gian liên tục trong bối cảnh biến đổi khí hậu và phát triển hạ tầng nhanh chóng. Để tăng tính ổn định, có thể tích hợp các phương pháp khác quan như học máy và tối ưu đa mục tiêu bên cạnh fuzzy AHP. Phát triển mô hình động thông qua mô phỏng các kịch bản phát triển sẽ hỗ trợ dự báo và thích ứng hiệu quả. Ngoài ra, cần lồng ghép thêm các biến số xã hội-văn hóa như sức chịu tải du lịch và giá trị di sản bên cạnh các yếu tố sinh thái để phù hợp với đặc thù đa chức năng của khu vực nghiên cứu. Cuối cùng, các nghiên cứu trong tương lai có thể tập trung vào việc xây dựng bộ chỉ số giám sát cảnh quan cấp quốc gia thông qua việc kiểm nghiệm mức độ tổng quát hóa và khả năng thích ứng của khung phân tích này ở các khu bảo tồn khác. Bộ chỉ số này sẽ là cơ sở quan trọng phục vụ quy hoạch phát triển bền vững tại các đô thị đảo.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chứng minh tính hiệu quả của việc tích hợp công nghệ GeoAI, phân tích ảnh vệ tinh độ phân giải cao và các chỉ số định lượng không gian trong đánh giá cấu trúc cảnh quan tại quần đảo Côn Đảo. Mô hình kết hợp

các nhóm độ đo cảnh quan với phương pháp Fuzzy AHP cho phép xác định tương đối toàn diện, chính xác mức độ phân mảnh và tính dễ bị tổn thương của từng khu vực. Cách tiếp cận này, do được tích hợp với các đặc điểm riêng của khu vực nên cơ bản phù hợp với đặc thù phức tạp của hệ sinh thái biển đảo, từ đó hỗ trợ thiết lập các vùng ưu tiên bảo tồn, hành lang sinh thái cần duy trì, và định hướng quy hoạch du lịch hợp lý. Mặc dù phương pháp fuzzy AHP có sự phụ thuộc vào ý kiến chuyên gia nên có khả năng mang tính chủ quan. Tuy nhiên, sự nhất quán cao và độ ổn định trong phân tích độ nhạy cho thấy mức độ tin cậy của mô hình và khả năng tái sử dụng của phương pháp trong các bối cảnh tương tự. Trong tương lai, mô hình có thể được củng cố bằng cách kết hợp thêm các kỹ thuật định lượng khác nhằm giảm thiểu tính chủ quan do sự phụ thuộc vào đánh giá chuyên gia.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi nhiệm vụ khoa học QG.24.10 của Đại học Quốc gia Hà Nội. Các tác giả xin cảm ơn Cơ quan Vũ trụ châu Âu (ESA) đã cung cấp quyền truy cập mở dữ liệu ảnh vệ tinh PlanetScope.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Asef Darvishi, Maryam Yousefi, Michael Schirrmann & Frank Ewert (2024). Exploring biodiversity patterns at the landscape scale by linking landscape energy and land use/land cover heterogeneity. *Sci Total Environ.* 916: 170163.
Doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170163
- [2]. Ziyue Guo, Liang Gao, Huidong Shi, Ting Yu, Hongtao Jiang, Chunxing Hai, Yunhu Xie & Li Zhu (2024). Spatial pattern and landscape change prediction of blowouts in sandy grassland. *Sci Rep.* 14(1): 22466.
Doi: 10.1038/s41598-024-72911-0
- [3]. Wang S., Huang X., Liu P., & Bao S. (2024). Mapping the landscape and roadmap of geospatial artificial intelligence (GeoAI) in quantitative human geography: An extensive systematic review. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation.* 128: 103734.
Doi: 10.1016/j.jag.2024.103734
- [4]. Dang KB., Nguyen THT., Nguyen HD., Truong QH.,

Vu TP., Pham HN., Duong TT., Giang VT., Nguyen DM., Bui TH., & Burkhard B. (2022). U-shaped deep-learning models for island ecosystem type classification, a case study in Con Dao Island of Vietnam. *One Ecosyst.* 7: e79160. Doi: 10.3897/oneeco.7.e79160

[5]. Bộ Xây dựng (2024). Thuyết minh DCTT Quy hoạch chung xây dựng Côn Đảo đến năm 2045. https://condao.baria-vungtau.gov.vn/portal/editor/files/PDFsam_merge.pdf.

[6]. Van-Manh Pham, Son Van Nghiem, Quang-Thanh Bui, Tam Minh Pham & Cu Van Pham (2019). Quantitative assessment of urbanization and impacts in the complex of Huế Monuments, Vietnam. *Appl Geogr.* 112: 102096. Doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.102427

[7]. Van-Manh Pham, Son Van Nghiem, Cu Van Pham, Mai Phuong Thi Luu & Quang-Thanh Bui (2021). Urbanization impact on landscape patterns in cultural heritage preservation sites: a case study of the complex of Huế Monuments, Vietnam. *Landsc Ecol.* 36(4): 1235–1260. Doi: 10.1007/s10980-020-01189-0

[8]. Zhigang Sun, Guotao Wang, Pengfei Li, Hui Wang, Min Zhang & Xiaowen Liang (2024). An improved random forest based on the classification accuracy and

correlation measurement of decision trees. *Expert Syst Appl.* 237: 121549. Doi: 10.1016/j.eswa.2023.121549

[9]. Diem-My Thi Nguyen, Thi-Nhung Do, Son Van Nghiem, Jiwnath Ghimire, Kinh-Bac Dang, Van-Trong Giang, Kim-Chi Vu & Van-Manh Pham (2024). Flood inundation assessment of UNESCO World Heritage Sites using remote sensing and spatial metrics in Hoi An City, Vietnam. *Ecol Inform.* 79: 102427. Doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.102427

[10]. Angela Lausch, Thomas Blaschke, Dagmar Haase, Felix Herzog, Ralf-Uwe Syrbe, Lutz Tischendorf & Ulrich Walz (2015). Understanding and quantifying landscape structure – A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Use Ecol Indic Models.* 295: 31–41. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.08.018

[11]. Đỗ Thị Nhung, Phạm Anh Cường, Trương Quang Hải, Giang Văn Trọng, Phạm Hạnh Nguyên, Ngô Xuân Quý & Phạm Văn Mạnh (2023). Đánh giá tác động của dự án đầu tư đến khu dự trữ sinh quyển thế giới sử dụng thuật toán học máy và độ đo cảnh quan. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ.* 56: 34–41. Doi: 10.54491/jgac.2023.56.683