

Land use change prediction in Cu Chi district, Ho Chi Minh City using an integrated Markov chain and GIS approach

Duyen T. M. Le¹, Nghia V. Nguyen², & Long B. Le^{3*}

¹Faculty of Land and Real Estate Management, Nong Lam University, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Faculty of Technology, Dong Nai Technology University, Bien Hoa City, Vietnam

³Institute of Environmental Science, Engineering and Management, Industrial University of Ho Chi minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

Research Paper

Received: January 17, 2025

Revised: April 18, 2025

Accepted: April 24, 2025

Keywords

Land-use change prediction

Land-use planning

Markov chain

Sustainable development

Urbanization

*Corresponding author

Long Ba Le

Email:

lebalong@iuh.edu.vn

ABSTRACT

This study applied the Markov chain model integrated with Geographic Information Systems (GIS) to analyze land use trends in Cu Chi district, Ho Chi Minh City, from 2010 to 2020 and to project land use changes for 2025 and 2030. Utilizing land use status maps in 2010, 2015, and 2020, the study developed a land use transition probability matrix to simulate future land use trends. The results indicated that from 2010 to 2030, agricultural land and perennial cropland will decline, while residential land and non-agricultural production land will expand significantly due to urbanization and industrialization. The model's accuracy was validated by comparing the 2020 forecast with actual data, yielding an overall model average of 9.08% for Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and 428.73 ha for root mean square error (RMSE), demonstrating high reliability. By 2030, residential land is projected to increase (+973.81 ha, +28.52%), whereas perennial cropland will decline sharply (-1,946.22 ha, -12.45%), primarily being converted into urban and industrial zones, posing challenges in balancing urban expansion, economic growth, and land resource conservation. This research provides a scientific basis to support land use planning, thereby assisting policymakers and urban planners in developing sustainable land management strategies for Cu Chi district.

Cited as: Le, D. T. M., Nguyen, N. V., & Le, L. B. (2026). Land use change prediction in Cu Chi district, Ho Chi Minh City using an integrated Markov chain and GIS approach. *The Journal of Agriculture and Development* 25(2), 83-98.

Dự báo biến động sử dụng đất tại huyện Củ Chi, Thành phố Hồ Chí Minh dựa trên chuỗi Markov tích hợp GIS

Lê Thị Mỹ Duyên¹, Nguyễn Văn Nghĩa² & Lê Bá Long^{3*}

¹Khoa Quản Lý Đất Đai và Bất Động Sản, Trường Đại Học Nông Lâm TP.HCM, TP. Hồ Chí Minh

²Khoa Công Nghệ, Trường Đại Học Công Nghệ Đồng Nai, TP. Biên Hòa, Đồng Nai

³Viện Khoa Học Công Nghệ và Quản Lý Môi Trường, Trường Đại Học Công Nghiệp TP.HCM, TP. Hồ Chí Minh

THÔNG TIN BÀI BÁO

Bài báo khoa học

Ngày nhận: 17/01/2025

Ngày chỉnh sửa: 18/04/2025

Ngày chấp nhận: 24/04/2025

Từ khóa

Chuỗi Markov

Dự báo biến động đất

Đô thị hóa

Phát triển bền vững

Quy hoạch đất đai

*Tác giả liên hệ

Lê Bá Long

Email:

lebalong@iuh.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu ứng dụng mô hình chuỗi Markov kết hợp GIS để phân tích xu thế biến động sử dụng đất tại huyện Củ Chi, TP. Hồ Chí Minh giai đoạn 2010 - 2020 và dự báo đến năm 2025, 2030. Sử dụng dữ liệu bản đồ hiện trạng các năm 2010, 2015 và 2020, nghiên cứu xây dựng ma trận xác suất chuyển đổi sử dụng đất nhằm mô phỏng xu hướng biến động tương lai. Kết quả cho thấy từ 2010 đến 2030, đất nông nghiệp và đất trồng cây lâu năm giảm, trong khi đất ở và đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp tăng đáng kể do đô thị hóa và công nghiệp hóa. Độ chính xác mô hình được kiểm định bằng cách so sánh dự báo năm 2020 với dữ liệu thực tế, với kết quả trung bình toàn bộ mô hình đạt sai số trung bình tuyệt đối (MAPE) 9,08% và sai số trung bình bình phương (RMSE) là 428,73 ha, cho thấy độ tin cậy cao. Dự báo đến năm 2030, đất ở tiếp tục tăng (+973,81 ha, +28,52%), trong khi đất trồng cây lâu năm giảm mạnh (-1.946,22 ha, -12,45%), chủ yếu chuyển đổi sang đất đô thị và công nghiệp, đặt ra thách thức trong cân bằng phát triển và bảo vệ tài nguyên đất. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học hỗ trợ quy hoạch sử dụng đất, giúp định hướng chiến lược phát triển bền vững tại huyện Củ Chi.

1. Đặt Vấn Đề

Biến động sử dụng đất là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến môi trường và phát triển bền vững, đặc biệt tại các khu vực chịu áp lực đô thị hóa mạnh mẽ (Lambin & ctv., 2001). Sự chuyển đổi từ đất nông nghiệp sang đất đô thị hoặc công nghiệp không chỉ phản ánh xu hướng kinh tế - xã hội mà còn đặt ra thách thức trong

quản lý tài nguyên đất, như suy thoái đất canh tác và gia tăng nguy cơ ngập lụt (Qasim & ctv., 2011; Biswas & ctv., 2020). Để giải quyết vấn đề này, mô hình chuỗi Markov tích hợp với Hệ thống Thông tin Địa lý (GIS) đã được chứng minh là công cụ hiệu quả trong việc phân tích và dự báo xu hướng sử dụng đất, hỗ trợ quy hoạch bền vững (Wang & ctv., 2012; Huynh & ctv., 2017; Abbas & ctv., 2023).

Huyện Củ Chi, Thành phố Hồ Chí Minh, là một khu vực ngoại thành điển hình chịu tác động của đô thị hóa nhanh chóng. Với sự phát triển của các khu công nghiệp như Tây Bắc Củ Chi và áp lực dân số từ trung tâm thành phố, đất nông nghiệp tại đây đang suy giảm, trong khi đất ở và đất sản xuất phi nông nghiệp gia tăng (Nguyen, 2011; Le & Nguyen, 2024). Việc dự báo biến động sử dụng đất không chỉ định hướng phát triển hợp lý mà còn giảm ngập lụt, bảo vệ quỹ đất nông nghiệp, và phát triển bền vững nguồn sinh kế chính của người dân địa phương (Koko & ctv., 2020; Tariq & ctv., 2022).

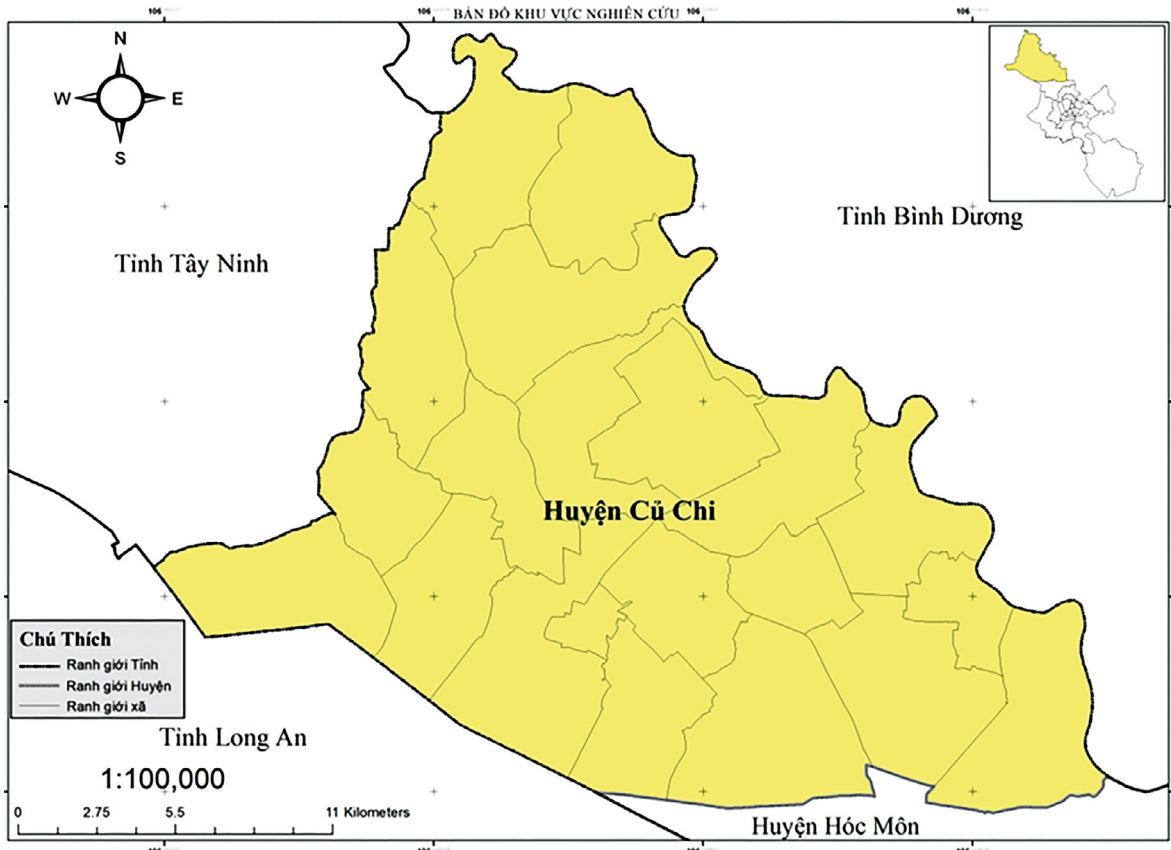
Nghiên cứu này ứng dụng mô hình Markov-GIS, tích hợp dữ liệu bản đồ từ 2010 - 2020, để phân tích và dự báo xu hướng biến động sử dụng đất tại huyện Củ Chi đến năm 2030. Mặc dù, mô hình chuỗi Markov tồn tại hạn chế khi phụ thuộc vào dữ liệu quá khứ và bỏ qua yếu tố ngoại cảnh như chính sách mới hoặc biến đổi khí hậu (Banjara & ctv., 2024). Nhưng kết quả nghiên cứu của chúng tôi đã cung cấp cơ sở khoa

học cho công tác quy hoạch đất đai, góp phần đạt được sự cân bằng giữa phát triển kinh tế và bảo tồn tài nguyên đất tại địa phương.

2. Dữ Liệu và Phương Pháp Nghiên Cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Huyện Củ Chi, thuộc Thành phố Hồ Chí Minh, có địa hình tương đối bằng phẳng, với cao độ trung bình từ 2 đến 10 mét so với mực nước biển (Hình 1). Khu vực phía Bắc có nhiều vùng trũng, thuận lợi cho sản xuất nông nghiệp nhưng dễ bị ngập lụt vào mùa mưa. Huyện nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa, với nhiệt độ trung bình năm khoảng 27°C và lượng mưa trung bình 1,800 mm/năm. Mùa mưa kéo dài từ tháng 5 đến tháng 11, đảm bảo nguồn nước dồi dào cho canh tác lúa và cây công nghiệp ngắn ngày. Ngoài ra, hệ thống sông Sài Gòn và mạng lưới kênh rạch phong phú đóng vai trò quan trọng trong sản xuất nông nghiệp và giao thông đường thủy.



Hình 1. Bản đồ ranh giới huyện Củ Chi, Thành phố Hồ Chí Minh.

Về kinh tế - xã hội, Củ Chi là huyện ngoại thành, có vị trí chiến lược kết nối với trung tâm Thành phố Hồ Chí Minh thông qua các tuyến quốc lộ và tỉnh lộ quan trọng. Đến năm 2020, dân số huyện đạt khoảng 462,047 người, với mật độ dân số thấp hơn so với các quận nội thành. Sản xuất nông nghiệp vẫn chiếm tỷ trọng lớn; tuy nhiên, sự phát triển của các khu công nghiệp như Tân Quy và Tây Bắc Củ Chi cùng với cải thiện cơ sở hạ tầng giao thông đã thúc đẩy quá trình chuyển dịch kinh tế sang công nghiệp và dịch vụ. Đô thị hóa nhanh chóng kéo theo sự chuyển đổi mạnh mẽ đất nông nghiệp sang đất phi nông nghiệp, tạo ra cơ hội phát triển nhưng cũng đặt ra thách thức lớn trong quản lý và sử dụng đất bền vững.

2.2. Dữ liệu nghiên cứu

Dữ liệu thứ cấp

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu thứ cấp để phân tích biến động sử dụng đất tại huyện Củ Chi, TP. Hồ Chí Minh giai đoạn 2010 - 2020 và dự báo đến 2025, 2030. Dữ liệu bao gồm bản đồ hiện trạng sử dụng đất các năm 2010, 2015, 2020 từ Sở Tài nguyên và Môi trường TP. Hồ Chí Minh, định dạng *.dgn (hệ VN-2000, múi chiếu 3°), được chuyển đổi sang shapefile (*.shp) để xử lý GIS. Ngoài ra, dữ liệu kinh tế - xã hội từ Cục Thống kê TP. Hồ Chí Minh và UBND huyện Củ Chi cung cấp số liệu dân số (462.047 người, 2020), lao động, cơ cấu ngành nghề, và quy

hoạch 2010 - 2030, hỗ trợ nhận diện tác động của đô thị hóa và công nghiệp hóa lên chuyển đổi đất nông nghiệp.

Dữ liệu sơ cấp

Dữ liệu sơ cấp được thu thập qua khảo sát thực địa từ tháng 7 đến tháng 12 năm 2023 tại 20 xã và 1 thị trấn ở Củ Chi, nhằm bổ sung và kiểm chứng xu hướng biến động sử dụng đất. Tổng cộng 350 hộ dân tại các khu vực trọng điểm (ví dụ, Tân Thạnh Đông, Hòa Phú) được khảo sát bằng phỏng vấn và quan sát. Phương pháp lấy mẫu áp dụng ngẫu nhiên có phân tầng, chia khu vực theo mức độ đô thị hóa và công nghiệp hóa, chọn trung bình 16 - 17 hộ/xã (0,3% tổng số hộ, ước tính 120.000), đảm bảo đại diện cho các điểm nóng biến động.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Xử lý và phân tích dữ liệu GIS

Dữ liệu bản đồ sử dụng đất được thu thập từ các cơ quan quản lý nhà nước, bao gồm bản đồ hiện trạng sử dụng đất các năm 2010, 2015 và 2020. Các bản đồ này được cung cấp ở định dạng *dgn, được xây dựng theo hệ quy chiếu VN-2000 với múi chiếu 3° (106°30'). Để đảm bảo tính nhất quán và khả năng xử lý dữ liệu, toàn bộ bản đồ đã được chuyển đổi sang định dạng shapefile (*.shp) trong phần mềm ArcMap 10.8, đồng thời giữ nguyên hệ tọa độ VN-2000 nhằm đảm bảo tính chính xác và đồng bộ hóa dữ liệu.

Bảng 1. Danh sách phân nhóm sử dụng đất và mã sử dụng đất

STT	Loại hình sử dụng đất gốc	Mã nhóm	Ghi chú
1	Đất trồng lúa (LUA), cây hàng năm khác (HNK), nuôi trồng thủy sản (NTS), nông nghiệp khác (NKH)	NNP (Đất nông nghiệp)	Bao gồm đất lúa, ngô, rau màu, thủy sản
2	Đất trồng cây lâu năm (CLN)	CLN (Đất trồng cây lâu năm)	Bao gồm cây ăn quả, cây công nghiệp.
3	Đất ở nông thôn (ONT), đô thị (ODT)	OTC (Đất ở)	Bao gồm đất ở tại xã và thị trấn.
4	Đất sản xuất, kinh doanh phi nông nghiệp (SKC, SKK)	CSK (Đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp)	Bao gồm đất khu công nghiệp, cơ sở sản xuất.
5	Đất công cộng (DMC), tôn giáo (TGO), tín ngưỡng (TNG), nghĩa trang (NTD), sông ngòi (SMN), khác (PNK)	PNN (Đất phi nông nghiệp)	Bao gồm đất cơ quan, hạ tầng, chưa sử dụng

Dữ liệu sau đó được phân loại thành năm nhóm sử dụng đất chính (Bảng 1), bao gồm: đất nông nghiệp (NNP), đất trồng cây lâu năm (CLN), đất phi nông nghiệp (PNN), đất

ở (OTC), và đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp (CSK). Việc phân loại dựa trên thực tiễn quy hoạch và quản lý đất đai tại Củ Chi, giúp đơn giản hóa phân tích mà vẫn phản ánh đầy đủ các

xu hướng chuyển đổi quan trọng. Để xác định sự thay đổi diện tích và vị trí của từng nhóm đất qua các giai đoạn 2010 - 2015 và 2015 - 2020, phương pháp chồng lớp bản đồ (overlay analysis) được thực hiện trong ArcMap 10.8. Kỹ thuật này sử dụng các phép toán không gian để tính toán diện tích chuyển đổi giữa các loại đất, tạo ra ma trận chuyển đổi làm cơ sở cho mô hình dự báo Markov.

2.3.2. Mô hình chuỗi Markov dự báo biến động sử dụng đất

Dựa trên kết quả diện tích biến động sử dụng đất qua các giai đoạn 2010 - 2015, 2015 - 2020, và 2010 - 2020 được phân tích trên ArcMap 10.8. Dữ liệu này được tích hợp với mô hình chuỗi Markov trong Excel (Microsoft Office 365) để xây dựng ma trận biến động 2015 - 2020 và dự báo diện tích cho 2025, 2030. Quá trình tích hợp gồm: (1) xuất bảng diện tích chuyển đổi (*.dbf) từ ArcGIS 10.8, (2) tính toán ma trận xác suất trong Excel, và (3) nhân ma trận diện tích với ma trận xác suất để dự báo, kết hợp phân tích không gian GIS và tính toán xác suất Markov (Sang & ctv., 2011).

Ma trận biến động diện tích sử dụng đất được thực hiện bằng công thức (1), như sau:

$$S = (S_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \dots & S_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó: S_{ij} là diện tích loại đất i chuyển thành loại đất j từ 2015 đến 2020 (ha); n là số loại hình sử dụng đất (5).

Theo Logsdon & ctv. (1996), chuỗi Markov dự báo biến động đất đai dựa trên nguyên lý xác

suất có điều kiện, giả định rằng xác suất chuyển đổi chỉ phụ thuộc vào trạng thái hiện tại và không chịu ảnh hưởng từ lịch sử xa hơn (Houet & Hubert-Moy, 2006). Giả định này bao gồm: (1) xu hướng biến động 2015 - 2020 duy trì đến 2030, và (2) không có tác động đột biến từ chính sách hoặc môi trường.

Ma trận xác suất chuyển đổi $P = (p_{ij})_{n \times n}$ được tính trên Excel theo công thức (2):

$$P = (p_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \dots & p_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó: P là ma trận xác suất biến động sử dụng đất từ thời gian 2015 sang 2020, thỏa 2 điều kiện sau: $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, 0 \leq p_{ij} \leq 1$; p_{ij} là xác suất thay đổi các kiểu sử dụng đất (chuyển từ kiểu hình sử dụng đất i sang kiểu hình sử dụng đất j), được xác định dựa trên ma trận biến động sử dụng đất:

$$p_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{j=1}^n S_{ij}}$$

Quá trình dự báo diện tích sử dụng đất trong các giai đoạn tiếp theo được thực hiện bằng cách nhân ma trận diện tích sử dụng đất tại thời điểm hiện tại với ma trận xác suất chuyển đổi sử dụng đất, theo công thức (3):

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \dots \\ S_{n-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \dots \\ S_{n-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \dots & p_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Trong đó: } \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \dots \\ S_{n-1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \dots \\ S_{n-2} \end{bmatrix}$$

là diện tích các loại đất tại thời điểm bắt đầu

2015 (đối với dự báo năm 2020), và 2020 (đối với trường hợp dự báo 2025, 2030)

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \cdots & p_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

là ma trận xác suất biến động sử dụng đất từ 2015 sang 2020.

2.3.3. Đánh giá kết quả mô hình

Đánh giá hiệu suất dự báo của mô hình Markov là bước quan trọng để xác nhận độ tin cậy trong phân tích biến động sử dụng đất. Nghiên cứu so sánh diện tích dự báo năm 2020 với dữ liệu thực tế từ bản đồ hiện trạng, sử dụng MS Excel để tính toán sai số. Hai chỉ số sai số trung bình tuyệt đối phần trăm (MAPE) và sai số trung bình bình phương (RMSE) được sử dụng để kiểm định mức độ phù hợp của mô hình Markov, công thức tính của 2 chỉ số này được biểu diễn ở công thức (4) và công thức (5), cụ thể như sau:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i^{Thực\ tế} - A_i^{Dự\ báo}}{A_i^{Thực\ tế}} \right| \times 100 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i^{Thực\ tế} - A_i^{Dự\ báo})^2} \quad (5)$$

Trong đó: $A_i^{Thực\ tế}$ là diện tích thực tế của loại đất i năm 2020 (ha); $A_i^{Dự\ báo}$ là diện tích dự báo của loại đất i năm 2020 (ha); n là số loại hình sử dụng đất (5).

Sai số trung bình tuyệt đối (MAPE) cung cấp sai lệch trung bình phần trăm, dễ diễn giải và chuẩn hóa theo giá trị thực tế, hỗ trợ so sánh giữa các nghiên cứu khác nhau (Moreno & ctv., 2013; Kim & Kim, 2016; Prayudani & ctv., 2019). Trong khi đó, RMSE đo lường độ lệch chuẩn của sai số, nhạy với các sai lệch lớn, qua đó tăng cường độ tin cậy trong việc xác định tính biến động của dự báo.

3. Kết Quả và Thảo Luận

3.1 Hiện trạng sử dụng đất các năm 2010, 2015 và 2020 của huyện Củ Chi

Dựa trên dữ liệu phân tích từ bản đồ hiện trạng sử dụng đất của huyện Củ Chi trong các năm 2010, 2015 và 2020, nhóm tác giả đã tiến hành phân loại lại các loại hình sử dụng đất thành năm nhóm chính, bao gồm: đất nông nghiệp (NNP), đất trồng cây lâu năm (CLN), đất phi nông nghiệp (PNN), đất ở (OTC) và đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp (CSK). Dữ liệu diện tích và tỷ lệ của từng nhóm được tổng hợp trong Bảng 2 và Hình 2, thể hiện rõ xu hướng biến động sử dụng đất trong giai đoạn 2010 - 2020.

Bảng 2. Hiện trạng sử dụng đất huyện Củ Chi các năm 2010, 2015 và 2020

Nhóm sử dụng đất	2010		2015		2020	
	Diện tích (ha)	%	Diện tích (ha)	%	Diện tích (ha)	%
NNP	17.203,3	39,57	16.694,79	38,40	15.640,69	35,97
CLN	15.238,43	35,05	15.298,85	35,19	15.636,92	35,97
PNN	7.118,72	16,37	6.778,96	15,59	6.904,53	15,88
OTC	1.985,51	4,57	2.838,65	6,53	3.414,73	7,85
CSK	1.931,22	4,44	1.865,93	4,29	1.880,31	4,24
Tổng	43.477,18	100	43.477,18	100	43.477,18	100

NNP: đất nông nghiệp; CLN: đất trồng cây lâu năm; PNN: đất phi nông nghiệp; OTC: đất ở; và CSK: đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp.

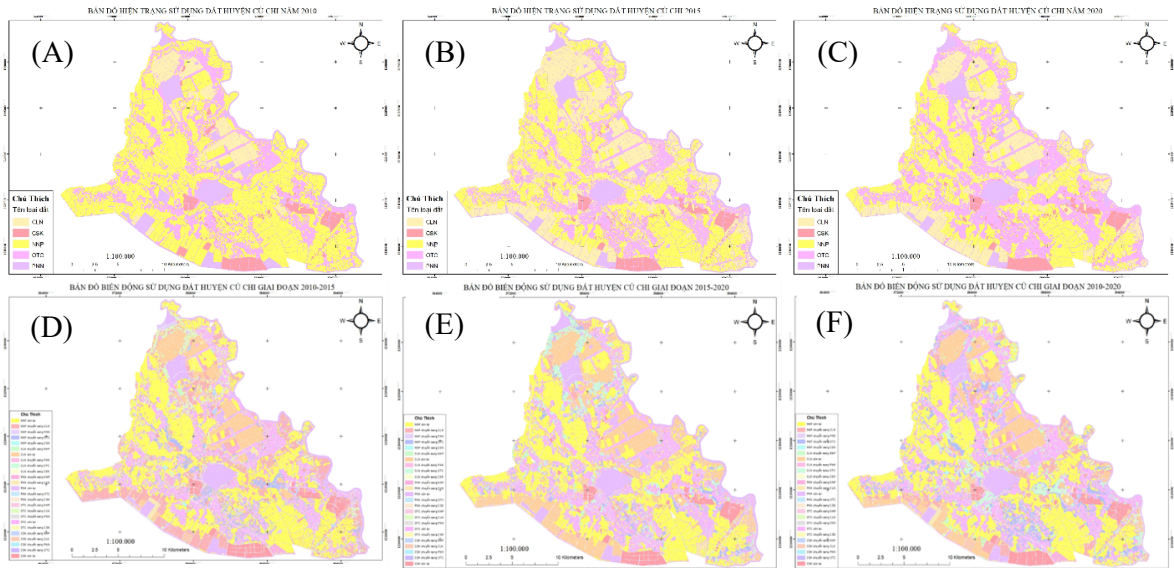
Kết quả phân tích cho thấy sự suy giảm đáng kể của NNP, từ 17.203,3 ha năm 2010 xuống còn 15.640,69 ha năm 2020, tương đương mức giảm 1.562,61 ha (9,08%). Xu hướng này chủ yếu diễn ra tại các khu vực ven đô, nơi NNP bị thu hẹp để nhường chỗ cho các dự án đô thị hóa và phát triển khu công nghiệp. Đây là hệ quả tất yếu của sự gia tăng nhu cầu sử dụng đất cho các hoạt động phi nông nghiệp, đặc biệt trong bối cảnh tốc độ đô thị hóa tại TP. Hồ Chí Minh đang diễn ra mạnh mẽ.

Trong khi đó, CLN có xu hướng duy trì ổn định, dao động nhẹ từ 15.238,43 ha năm 2010 lên 15.636,92 ha năm 2020, tương ứng mức tăng 398,49 ha (2,61%). Điều này phản ánh chính sách phát triển nông nghiệp bền vững của huyện, đặc biệt là sự khuyến khích mở rộng diện tích trồng cây ăn quả và cây công nghiệp lâu năm, vốn có giá trị kinh tế cao và ít bị ảnh hưởng bởi quá trình đô thị hóa.

Đất PNN có xu hướng giảm nhẹ, từ 7.118,72 ha năm 2010 xuống 6.904,53 ha năm 2020. Tuy nhiên, tỷ trọng của nhóm đất này gần như không

thay đổi đáng kể qua các năm, cho thấy sự ổn định trong quỹ đất dành cho cơ sở hạ tầng, công trình công cộng và đất chưa sử dụng. Điều này phản ánh một thực tế rằng, mặc dù có sự chuyển đổi mạnh mẽ giữa các nhóm đất, diện tích dành cho cơ sở hạ tầng vẫn được giữ ở mức tương đối ổn định để đáp ứng nhu cầu phát triển lâu dài.

Đáng chú ý nhất là sự gia tăng mạnh mẽ của OTC, từ 1.985,51 ha năm 2010 lên 3.414,73 ha năm 2020, tương đương mức tăng 1.429,22 ha (71,99%). Xu hướng này chủ yếu tập trung tại các xã có vị trí gần trung tâm TP. Hồ Chí Minh như Tân Thạnh Đông, Hòa Phú và Tân Phú Trung, nơi có tốc độ phát triển dân cư và các dự án đô thị mới diễn ra nhanh chóng. Quá trình này phản ánh sự mở rộng không gian đô thị của TP. Hồ Chí Minh ra các khu vực vùng ven, kéo theo sự gia tăng dân số và nhu cầu về nhà ở tại huyện Củ Chi. Sự dịch chuyển này là hệ quả trực tiếp của các chính sách quy hoạch đô thị, đầu tư hạ tầng và cải thiện kết nối giao thông, khiến huyện Củ Chi trở thành điểm đến tiềm năng cho các dự án bất động sản và khu đô thị mới.



Hình 2. (A) Bản đồ hiện trạng sử dụng đất Củ Chi năm 2010; (B) Bản đồ hiện trạng sử dụng đất huyện Củ Chi năm 2015; (C) bản đồ hiện trạng sử dụng đất huyện Củ Chi năm 2020; (D) bản đồ Biến động sử dụng đất huyện Củ Chi từ năm 2010 đến năm 2015; (E) bản đồ biến động sử dụng đất huyện Củ Chi từ năm 2015 đến năm 2020; (F) Bản đồ Biến động sử dụng đất huyện Củ Chi từ năm 2010 đến năm 2020.

Ngoài ra, diện tích CSK không có sự thay đổi đáng kể, dao động nhẹ từ 1.931,22 ha năm 2010 xuống 1.880,31 ha năm 2020. Mặc dù trong giai đoạn này, một số khu công nghiệp đã mở rộng, nhưng tổng diện tích dành cho sản xuất kinh doanh vẫn duy trì ổn định, không có sự gia tăng đột biến. Điều này cho thấy quá trình mở rộng công nghiệp tại huyện Củ Chi vẫn đang diễn ra có kiểm soát, không gây áp lực lớn lên quỹ đất chung của địa phương.

Nhìn chung, sự thay đổi trong cơ cấu sử dụng đất tại huyện Củ Chi trong giai đoạn 2010 - 2020 phản ánh rõ nét xu hướng đô thị hóa và công nghiệp hóa đang diễn ra mạnh mẽ tại khu vực ven đô TP. Hồ Chí Minh. Đất NNP tiếp tục bị thu hẹp, trong khi OTC gia tăng nhanh chóng để đáp ứng nhu cầu mở rộng dân cư. Sự biến động này là hệ quả của các chính sách quy hoạch sử

dụng đất, chiến lược phát triển hạ tầng và xu hướng kinh tế - xã hội của khu vực. Tuy nhiên, điều này cũng đặt ra những thách thức lớn trong việc quản lý quỹ đất, đòi hỏi chính quyền địa phương phải có các giải pháp quy hoạch hợp lý nhằm đảm bảo phát triển bền vững trong tương lai.

3.2. Dự báo xu thế biến động sử dụng đất tại huyện Củ Chi các năm 2025 và 2030

3.2.1. Biến động sử dụng đất giai đoạn 2015 - 2020

Để xây dựng mô hình dự báo biến động sử dụng đất trong giai đoạn tiếp theo, cần xác định rõ các xu hướng chuyển đổi trong giai đoạn gần nhất từ 2015 đến 2020. Việc phân tích ma trận biến động diện tích sử dụng đất và ma trận xác suất chuyển đổi trong khoảng thời gian này giúp

xác định các quy luật thay đổi về sử dụng đất, từ đó làm cơ sở cho việc dự báo cho các năm 2025 và 2030.

Phân tích ma trận biến động diện tích sử dụng đất giai đoạn 2015 - 2020 cho thấy tổng diện tích đất tại huyện Củ Chi giữ nguyên ở mức 43.477,18 ha, tuy nhiên có sự chuyển đổi đáng kể giữa các loại hình sử dụng đất. Đất NNP ghi nhận sự giảm sút từ 16.694,79 ha năm 2015 xuống còn 15.640,69 ha năm 2020, tương đương mức giảm 1.054,10 ha, chủ yếu chuyển đổi sang đất CLN với 1.093,07 ha, đất OTC với 368,61 ha, và một phần nhỏ sang đất PNN và đất CSK.

Đất CLN vẫn giữ diện tích lớn nhất trong cơ cấu sử dụng đất, với 14.332,84 ha được giữ

nguyên trạng, chiếm 93,65% tổng diện tích CLN năm 2015. Tuy nhiên, một phần diện tích CLN đã được chuyển đổi sang đất OTC với 570,54 ha, đất NNP với 253,67 ha và đất PNN với 117,38 ha. Trong khi đó, diện tích đất CSK cũng tăng nhẹ, từ 1.856,03 ha năm 2015 lên 1.880,32 ha năm 2020, phản ánh xu hướng mở rộng các khu công nghiệp và dịch vụ thương mại.

Đáng chú ý, đất OTC có mức tăng đáng kể, từ 2.838,65 ha lên 3.414,73 ha, tương đương mức gia tăng 576,08 ha, chủ yếu thông qua quá trình chuyển đổi từ đất cây lâu năm và đất nông nghiệp. Đất PNN cũng có sự gia tăng từ 6.788,86 ha lên 6.904,53 ha, phản ánh nhu cầu mở rộng hạ tầng giao thông, thương mại và dịch vụ.

Bảng 3. Ma trận biến động diện tích sử dụng đất giai đoạn 2015 - 2020

Nhóm sử dụng đất	CLN	CSK	NNP	OTC	PNN	2015
CLN	14,332.84	24.40	253.67	570.54	117.38	15,298.85
CSK	12.39	1,768.17	13.94	38.20	23.33	1,856.03
NNP	1,093.07	13.94	15,098.20	368.61	120.97	16,694.79
OTC	100.28	49.93	240.56	2,380.22	67.66	2,838.65
PNN	98.34	23.87	34.31	57.15	6,575.18	6,788.86
Năm 2020	15,636.92	1,880.32	15,640.69	3,414.73	6,904.53	43,477.18

NNP: đất nông nghiệp; CLN: đất trồng cây lâu năm; PNN: đất phi nông nghiệp; OTC: đất ở; và CSK: đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp.

Dựa vào ma trận xác suất chuyển đổi sử dụng đất giai đoạn 2015 - 2020 (Bảng 4), có thể thấy rằng hầu hết các loại đất có xu hướng duy trì trạng thái hiện tại với tỷ lệ cao. Đất cây lâu năm có tỷ lệ giữ lại lên đến 93,65%, đất nông nghiệp duy trì 90,03%, đất ở giữ lại 83,78%, và đất sản xuất kinh doanh có tỷ lệ ổn định ở mức 93,00%. Tuy nhiên,

đáng chú ý là 6,75% diện tích đất nông nghiệp đã được chuyển đổi sang các loại đất khác, trong đó phần lớn chuyển đổi sang đất cây lâu năm và đất ở. Đối với đất sản xuất kinh doanh, tỷ lệ duy trì là 93,00%, trong khi một phần nhỏ diện tích được bổ sung từ đất nông nghiệp và đất cây lâu năm.

Bảng 4. Ma trận xác suất chuyển đổi sử dụng đất giai đoạn 2015 - 2020

Nhóm sử dụng đất	CLN	CSK	NNP	OTC	PNN
CLN	0.9365	0.0013	0.0179	0.0367	0.0076
CSK	0.0175	0.9300	0.0179	0.0217	0.0130
NNP	0.0675	0.0009	0.9003	0.0236	0.0077
OTC	0.0431	0.0140	0.0859	0.8378	0.0192
PNN	0.0152	0.0037	0.0055	0.0092	0.9665

NNP: đất nông nghiệp; CLN: đất trồng cây lâu năm; PNN: đất phi nông nghiệp; OTC: đất ở; và CSK: đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp.

Những thông tin từ hai ma trận trên sẽ là cơ sở để tính toán dự báo sử dụng đất trong các năm 2025 và 2030. Việc nhân ma trận hiện trạng đất năm 2020 với ma trận xác suất chuyển đổi 2015 - 2020 sẽ giúp xác định diện tích dự báo cho năm 2025. Tương tự, dự báo năm 2030 sẽ được thực hiện bằng cách nhân kết quả dự báo năm 2025 với cùng ma trận xác suất chuyển đổi này. Trong mục tiếp theo, các bước tính toán chi tiết sẽ được trình bày nhằm đưa ra các kịch bản biến động sử dụng đất phù hợp với thực tế phát triển của huyện Củ Chi.

3.2.2. Đánh giá độ chính xác của mô hình dự báo

Kết quả kiểm định độ chính xác của mô hình Markov trong dự báo biến động sử dụng đất tại huyện Củ Chi được trình bày tại Bảng 5, với hai chỉ số RMSE và MAPE. Mô hình đạt độ chính xác cao ở các nhóm đất ổn định như NNP và PNN, với RMSE lần lượt là 78,49 ha và 174,69 ha, MAPE chỉ 0,50 và 2,53%. Trung bình toàn mô hình, RMSE đạt 428,73 ha và MAPE

là 9,08%, phù hợp với nghiên cứu của Tariq & ctv. (2022) về đất ít biến động, đồng thời tương đồng với Ghalehtemouri & ctv. (2022) đạt độ chính xác 96,55% tại Iran và Wu & ctv. (2019) với 97% tại Vũ Hán, chứng minh tính hiệu quả trong bối cảnh đô thị hóa cao. Tuy nhiên, MAPE cao ở đất ở (OTC, 15,79%) và đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp (CSK, 20,08%) là do các dự án quy hoạch bất ngờ (ví dụ như ở khu công nghiệp Tây Bắc, khu công nghiệp Tân Phú Trung) không được phản ánh trong dữ liệu lịch sử 2010 - 2015, cùng với áp lực đô thị hóa từ dân số 468,269 người và sự không đồng bộ trong cập nhật dữ liệu, thực trạng thực tế từ khảo sát. Kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu của Koko & ctv. (2020) tại Nigeria, ghi nhận RMSE trung bình 312 ha và MAPE 7,5% khi dự báo đất đô thị, với sai số tăng ở các khu vực quy hoạch đột biến, tương tự OTC và CSK tại Củ Chi. Mô hình khẳng định độ tin cậy trong dự báo xu hướng chung, nhưng cần xem xét các yếu tố quy hoạch bất ngờ để cải thiện dự báo tương lai.

Bảng 5. Đánh giá độ chính xác của mô hình dự báo năm 2020

Nhóm sử dụng đất	Diện tích thực tế 2020 (ha)	Dự báo 2020 (ha)	RMSE (ha)	MAEP (%)
NNP	15.640,69	15.562,20	78,49	0,50
CLN	15.636,92	14.623,84	1,013.08	6,48
PNN	6.904,53	7.079,22	174,69	2,53
OTC	3.414,73	3.953,98	539,25	15,79
CSK	1.880,32	2.257,94	377,63	20,08

NNP: đất nông nghiệp; CLN: đất trồng cây lâu năm; PNN: đất phi nông nghiệp; OTC: đất ở; và CSK: đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp.

3.2.3. Dự báo diện tích sử dụng đất đến năm 2025 và 2030

Kết quả dự báo dựa trên mô hình Markov đã kiểm định cho thấy xu hướng biến động sử dụng đất của huyện Củ Chi trong giai đoạn 2020 - 2030, phản ánh rõ nét sự thay đổi trong cơ cấu sử dụng đất dưới tác động của quá trình đô thị hóa và công nghiệp hóa. Diện tích sử dụng đất

cho các năm 2025 và 2030 được tính toán bằng cách nhân ma trận xác suất chuyển đổi giai đoạn 2015 - 2020 với diện tích sử dụng đất năm 2020, sau đó tiếp tục nhân với ma trận này để dự báo cho năm 2030. Kết quả dự báo xu thế được trình bày ở Bảng 6 cho thấy mỗi nhóm đất có mức độ biến động khác nhau, nhưng xu hướng chung là sự chuyển dịch dần từ đất nông nghiệp và đất trồng cây lâu năm sang đất OTC và đất CSK.

Bảng 6. Dự báo diện tích sử dụng đất cho năm 2025 và 2030

Nhóm sử dụng đất	Diện tích năm 2020	Dự báo		Biến động	
		2025	2030	2020 - 2025	2025 - 2030
NNP	15,640.69	15,562.20	15,511.77	-78.49	-50.43
CLN	15,636.92	14,623.84	13,690.70	-1,013.08	-933.14
PNN	6,904.53	7,079.22	7,265.29	+174.69	+186.07
OTC	3,414.73	3,953.98	4,388.54	+539.25	+434.56
CSK	1,880.32	2,257.94	2,620.88	+377.63	+362.94

NNP: đất nông nghiệp; CLN: đất trồng cây lâu năm; PNN: đất phi nông nghiệp; OTC: đất ở; và CSK: đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp.

Trong giai đoạn 2020 - 2030, đất NNP tiếp tục giảm nhẹ, từ 15 đến 640,69 ha năm 2020 xuống còn 15.562,20 ha vào năm 2025 và 15.511,77 ha vào năm 2030. Mức giảm này tương đối thấp, chỉ khoảng 0,5% trong mỗi giai đoạn 5 năm, cho thấy đất nông nghiệp vẫn đóng vai trò quan trọng trong cơ cấu sử dụng đất của huyện Củ Chi. Xu hướng này tương đồng với kết quả nghiên cứu tại các khu vực đô thị hóa khác, nơi đất nông nghiệp giảm nhưng vẫn được duy trì ở mức nhất định để đảm bảo cân bằng giữa phát triển kinh tế và sản xuất nông nghiệp.

Đất CLN ghi nhận mức suy giảm mạnh nhất, giảm từ 15.636,92 ha năm 2020 xuống còn 14.623,84 ha vào năm 2025 và 13.690,70 ha vào năm 2030, tương đương tổng mức giảm 1.946,22 ha (12,44%) trong vòng 10 năm. Đây là loại hình đất có sự chuyển đổi mạnh mẽ nhất, chủ yếu được chuyển đổi sang đất OTC và CSK nhằm đáp ứng nhu cầu đô thị hóa và phát triển công nghiệp. Sự suy giảm CLN có thể làm mất cây xanh, giảm khả năng điều hòa khí hậu và thấm nước, gia tăng ngập lụt tại các vùng trũng như Tam Tân, Thái Mỹ, đồng thời gây thoái hóa đất do áp lực đô thị hóa (Le & Nguyen, 2024).

Ngược lại, đất PNN có xu hướng tăng nhẹ, đạt 7.079,22 ha vào năm 2025 và 7.265,29 ha vào năm 2030, tương ứng với mức tăng 174,69 ha và 186,07 ha trong hai giai đoạn. Xu hướng này phản ánh nhu cầu mở rộng hệ thống hạ tầng, giao thông và các khu vực phục vụ thương mại - dịch vụ. Tương tự, đất OTC ghi nhận mức tăng trưởng đáng kể, từ 3.414,73 ha năm 2020 lên 3.953,98 ha vào năm 2025 và 4.388,54 ha vào năm 2030, tương đương mức tăng 539,25 ha (15,79%) trong giai đoạn 2020 - 2025 và 434,56 ha (11%) trong giai đoạn 2025 - 2030. Sự gia tăng

này chủ yếu diễn ra ở các khu vực ven đô, nơi có tốc độ phát triển dân cư và các dự án đô thị mới diễn ra mạnh mẽ. Đây là một xu hướng phổ biến trong quá trình mở rộng đô thị tại các thành phố lớn trên thế giới.

Bên cạnh đó, đất CSK cũng ghi nhận xu hướng mở rộng, từ 1.880,31 ha năm 2020 lên 2.257,94 ha vào năm 2025 và 2.620,88 ha vào năm 2030, tương đương mức tăng 377,63 ha (20,08%) trong giai đoạn 2020 - 2025 và 362,94 ha (16%) trong giai đoạn 2025 - 2030. Sự mở rộng này phản ánh sự phát triển mạnh mẽ của các khu công nghiệp, cơ sở sản xuất và dịch vụ thương mại trong khu vực, phù hợp với xu hướng phát triển kinh tế vùng ven đô trong nhiều nghiên cứu quốc tế.

Tổng hợp kết quả dự báo, có thể thấy rằng huyện Củ Chi đang trải qua quá trình chuyển đổi cơ cấu sử dụng đất rõ nét, với xu hướng giảm đất trồng cây lâu năm và đất nông nghiệp để nhường chỗ cho đất ở và đất sản xuất kinh doanh. Sự gia tăng của đất OTC và đất CSK là minh chứng cho tốc độ đô thị hóa và công nghiệp hóa ngày càng mạnh mẽ, trong khi đất nông nghiệp vẫn được duy trì ổn định, phản ánh chính sách cân bằng giữa phát triển kinh tế và bảo tồn quỹ đất sản xuất. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với xu hướng biến động sử dụng đất trong nhiều nghiên cứu trên thế giới, khẳng định rằng mô hình Markov có độ chính xác cao và có thể được sử dụng để tiếp tục dự báo trong các giai đoạn tiếp theo. Những xu hướng này cần được xem xét kỹ lưỡng trong quá trình quy hoạch đất đai và đề xuất các chính sách phát triển bền vững cho địa phương.

4. Kết Luận

Nghiên cứu này ứng dụng mô hình Markov kết hợp GIS để phân tích biến động sử dụng đất tại huyện Củ Chi, TP. Hồ Chí Minh trong giai đoạn 2010 - 2020 và dự báo xu hướng sử dụng đất đến năm 2025 và 2030. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự thay đổi rõ rệt trong cơ cấu sử dụng đất, phản ánh tác động mạnh mẽ của quá trình đô thị hóa, công nghiệp hóa và mở rộng hạ tầng. Trong đó, đất nông nghiệp (NNP) và đất trồng cây lâu năm (CLN) có xu hướng suy giảm, trong khi đất ở (OTC) và đất sản xuất kinh doanh phi nông nghiệp (CSK) tăng nhanh, cho thấy nhu cầu mở rộng không gian đô thị và phát triển công nghiệp ngày càng gia tăng tại địa phương. Việc kiểm định mô hình Markov thông qua so sánh kết quả dự báo năm 2020 với dữ liệu thực tế cho thấy độ tin cậy cao, độ chính xác toàn mô hình đạt MAPE trung bình 9,08% và RMSE trung bình 428,73 ha, cao ở đất nông nghiệp và phi nông nghiệp, nhưng sai số lớn ở đất ở (15,79%) và đất sản xuất kinh doanh (20,08%) do tác động mạnh từ các yếu tố quy hoạch và tốc độ đô thị hóa thực tế. Mặc dù còn tồn tại một số sai lệch, kết quả kiểm định khẳng định rằng mô hình Markov có thể được sử dụng như một công cụ đáng tin cậy để dự báo biến động sử dụng đất trong tương lai.

Dự báo đến năm 2030, đất ở tăng thêm 973,81 ha (+28,52%), trong khi đất trồng cây lâu năm giảm mạnh 1.946,22 ha (-12,45%), chủ yếu chuyển đổi sang đất đô thị và công nghiệp. Xu hướng này phản ánh quá trình đô thị hóa và công nghiệp hóa tiếp tục diễn ra mạnh mẽ, tuy nhiên, tốc độ mở rộng có xu hướng chậm lại trong giai đoạn 2025 - 2030, do quỹ đất dành cho đô thị dần bị thu hẹp. Trước thực trạng này, việc xây dựng các kịch bản quy hoạch phù hợp là cần

thiết để đảm bảo sự phát triển cân bằng và bền vững.

Nghiên cứu này không chỉ cung cấp cơ sở khoa học cho công tác quy hoạch sử dụng đất tại huyện Củ Chi mà còn khẳng định tính ứng dụng của mô hình Markov kết hợp GIS trong phân tích và dự báo biến động đất đai. Kết quả nghiên cứu có thể hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách, cơ quan quản lý đất đai và các tổ chức liên quan trong việc xây dựng chiến lược phát triển phù hợp, hướng tới mô hình quy hoạch đất đai thông minh và bền vững. Trong bối cảnh huyện Củ Chi ngày càng đóng vai trò quan trọng trong chiến lược mở rộng đô thị của TP. Hồ Chí Minh, việc thực hiện các biện pháp quản lý đất đai dựa trên dự báo khoa học là vô cùng cần thiết để đảm bảo quá trình chuyển đổi sử dụng đất diễn ra có kế hoạch, hiệu quả và phù hợp với điều kiện thực tiễn của địa phương.

Lời Cam Đoan

Các tác giả có tên trong bài báo không có bất kỳ xung đột lợi ích nào.

Lời Cảm Ơn

Các tác giả bày tỏ lòng cảm ơn đối với Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh (IUH) và Viện Khoa học Công nghệ và Quản lý Môi trường (IESEM), IUH. Xin gửi lời cảm ơn chân thành đến đội ngũ giảng viên và sinh viên tại IESEM vì sự hỗ trợ trong các chuyến khảo sát thực địa.

Tài Liệu Tham Khảo (References)

Abbas, H., Tao, W., Khan, G., Alrefaei, A. F., Iqbal, J., Albeshr, M. F., & Kulsoom, I. (2023). Multilayer

- perceptron and Markov Chain analysis based hybrid-approach for predicting land use land cover change dynamics with Sentinel-2 imagery. *Geocarto International* 38(1), 2256297. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2256297>.
- Banjara, M., Bhusal, A., Ghimire, A. B., & Kalra, A. (2024). Impact of land use and land cover change on hydrological processes in urban watersheds: Analysis and forecasting for flood risk management. *Geosciences* 14(2), 40. <https://doi.org/10.3390/geosciences14020040>.
- Biswas, M., Banerji, S., & Mitra, D. (2020). Land-use-land-cover change detection and application of Markov model: A case study of Eastern part of Kolkata. *Environment, Development and Sustainability* 22, 4341-4360. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00387-4>.
- Ghalehtemouri, K. J., Shamsoddini, A., Mousavi, M. N., Ros, F. B. C., & Khedmatzadeh, A. (2022). Predicting spatial and decadal of land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model based scenarios (2019-2049) Zarriné-Rūd River Basin in Iran. *Environmental Challenges* 6, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100399>.
- Houet, T., & Hubert-Moy, L. (2006). Modeling and projecting land-use and land-cover changes with Cellular Automaton in considering landscape trajectories. *EARSeL eProceedings* 5(1), 63-76.
- Huynh, V. C., Chau, V. T. T., & Huynh, C. H. (2017). Using Markov chain and GIS to detect and predict land use change in Nha Trang city, Khanh Hoa province. *HUAF Journal of Agricultural Science and Technology* 1(1), 37-46. <https://doi.org/10.46826/huaf-jasat.v1n1y2017.10>.
- Kim, S., & Kim, H. (2016). A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts. *International Journal of Forecasting* 32(3), 669-679. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.12.003>.
- Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Hamed, R., & Alabsi, A. A. N. (2020). Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and markov chain model (CA-Markov). *Sustainability* 12(24), 10452. <https://doi.org/10.3390/su122410452>.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., & Folke, C. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11(4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3).
- Le, B. L., & Nguyen, P. T. D. (2024). Evaluating the efficiency of agricultural production land use in Cu Chi district, Ho Chi Minh city. *Journal of Science and Technology* 68(02), 143-155. <https://doi.org/10.46242/jstiuh.v68i02.5087>.
- Logsdon, M. G., Bell, E. J., & Westerlund, F. V. (1996). Probability mapping of land use change: A GIS interface for visualizing transition probabilities. *Computers, Environment and Urban Systems* 20(6), 389-398. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(97\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(97)00004-5).
- Moreno, J. J. M., Pol, A. P., Abad, A. S., & Blasco, B. C. (2013). Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema* 25(4), 500-506. <https://doi.org/10.7334/psicothema2013.23>.
- Nguyen, K. L. (2011). *Application of Markov chain and GIS in evaluating land use dynamics*. National GIS Application Conference. Ha Noi, Vietnam: National Agriculture Publishing House.
- Prayudani, S., Hizriadi, A., Lase, Y., & Fatmi, Y. (2019). Analysis accuracy of forecasting measurement technique on random K-nearest neighbor (RKNN) using MAPE and MSE. *Journal of Physics: Conference Series* (1230, 012007).

- Qasim, M., Hubacek, K., Termansen, M., & Khan, A. (2011). Spatial and temporal dynamics of land use pattern in District Swat, Hindu Kush Himalayan region of Pakistan. *Applied Geography* 31(2), 820-828. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.08.008>.
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. *Mathematical and Computer Modelling* 54(3-4), 938-943. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.019>.
- Tariq, A., Yan, J., & Mumtaz, F. (2022). Land change modeler and CA-Markov chain analysis for land use land cover change using satellite data of Peshawar, Pakistan. *Physics and Chemistry of The Earth* 128, 103286. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103286>.
- Wang, S. Q., Zheng, X., & Zang, X. (2012). Accuracy assessments of land use change simulation based on Markov-cellular automata model. *Procedia Environmental Sciences* 13, 1238-1245. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.117>.
- Wu, H., Li, Z., Clarke, K. C., Shi, W., Fang, L., Lin, A., & Zhou, J. (2019). Examining the sensitivity of spatial scale in cellular automata Markov chain simulation of land use change. *International Journal of Geographical Information Science* 33(5), 1040-1061. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1568441>.