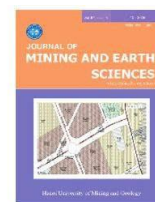




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Climate change risk zonation for agricultural production in Thu Duc City



Liem Duy Nguyen*, Khoi Minh Nguyen Pham

Nong Lam University, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14th May 2026

Revised 16th Aug. 2026

Accepted 3rd Sept. 2026

Keywords:

Agricultural land,
Climate change,
GIS,
Risk zonation,
Thu Duc City.

ABSTRACT

This study was conducted to comprehensively assess hazards, exposure, and vulnerability, thereby delineating climate change-driven risks to agricultural land in Thu Duc City. The methodological framework integrates the established assessment guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) with Geographic Information Systems (GIS) to ensure spatial precision. The requisite input data encompasses meteorological, hydrological, and topographical parameters, supplemented by primary data from household surveys regarding current production status and adaptive capacity. Specifically, hazard and exposure maps were meticulously simulated based on the annual frequency of extreme heat events, heavy precipitation, drought spells, and tidal inundation. Concurrently, vulnerability maps were constructed by synthesizing diverse socio-economic criteria, including farming experience, income diversification, levels of institutional support, and future land-use orientations. Through the application of advanced spatial overlay techniques, the research established a robust set of integrated risk maps for the baseline period (1995-2014) and future projections (2041-2060) under four Shared Socio-economic Pathways (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5). The analytical findings reveal a distinct spatial differentiation of risk levels across geographical sectors and climate scenarios. Under the high-emission scenario (SSP5-8.5), extreme heat and tidal flooding were identified as the most critical factors threatening agricultural stability. Conversely, risk levels were found to be significantly mitigated under the low-emission scenario (SSP1-1.9). In conclusion, this research provides a fundamental spatial database and scientific evidence to assist local authorities in formulating effective climate adaptation strategies and steering the development of sustainable urban agriculture in the face of future environmental uncertainties.

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: nguyenduyliem@hcmuaf.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(5).11



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>



Phân vùng rủi ro sản xuất nông nghiệp do biến đổi khí hậu trên địa bàn Thành phố Thủ Đức

Nguyễn Duy Liêm*, Phạm Nguyễn Minh Khôi

Trường Đại học Nông Lâm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 14/5/2026

Sửa xong 16/8/2026

Chấp nhận đăng 3/9/2026

Từ khóa:

Biến đổi khí hậu,
Đất nông nghiệp,
GIS,
Phân vùng rủi ro,
Thành phố Thủ Đức.

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm đánh giá hiểm họa, phơi nhiễm và tính dễ bị tổn thương, qua đó phân vùng rủi ro do tác động của biến đổi khí hậu đối với quỹ đất nông nghiệp tại Thành phố Thủ Đức sử dụng phương pháp tích hợp khung đánh giá của Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (IPCC) với Hệ thống thông tin địa lý (GIS). Dữ liệu đầu vào được thu thập bao gồm khí tượng, thủy văn, địa hình và khảo sát nông hộ về hiện trạng sản xuất cùng năng lực thích ứng. Tiếp theo, bản đồ hiểm họa và phơi nhiễm được mô phỏng dựa trên số ngày xảy ra nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều. Trong khi đó, bản đồ tính dễ bị tổn thương được xây dựng dựa trên các tiêu chí về kinh nghiệm canh tác, sự đa dạng thu nhập, mức độ hỗ trợ từ tổ chức và định hướng sử dụng đất trong tương lai. Bằng kỹ thuật chồng xếp ba lớp bản đồ hiểm họa, phơi nhiễm và tính dễ bị tổn thương theo phép nhân, nghiên cứu đã thiết lập bộ bản đồ rủi ro tổng hợp cho giai đoạn cơ sở (1995-2014) và dự báo tương lai (2041-2060) theo bốn kịch bản kinh tế - xã hội (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0 và SSP5-8.5). Kết quả cho thấy sự phân hóa rủi ro rõ rệt giữa các khu vực địa lý và các kịch bản. Dưới kịch bản phát thải cao (SSP5-8.5), nắng nóng và ngập triều là hai yếu tố gây tác động nghiêm trọng nhất; ngược lại, mức độ rủi ro được giảm thiểu đáng kể ở kịch bản phát thải thấp (SSP1-1.9). Nhìn chung, nghiên cứu cung cấp bộ cơ sở dữ liệu không gian cốt lõi, hỗ trợ chính quyền địa phương hoạch định chiến lược thích ứng và phát triển nông nghiệp đô thị bền vững.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Biến đổi khí hậu (BĐKH) được đặc trưng bởi sự nóng lên toàn cầu và nước biển dâng đang đe

dọa nghiêm trọng năng suất nông nghiệp và an ninh lương thực (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Rủi ro khí hậu là kết quả từ sự tương tác giữa các hiểm họa cực đoan, mức độ phơi nhiễm và tính dễ bị tổn thương của hệ thống kinh tế - sinh thái (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Việc nghiên cứu đánh giá tác động của BĐKH là nền tảng cấp thiết để xây dựng chiến lược thích ứng và phát triển bền vững.

*Tác giả liên hệ

E - mail: nguyenduyliem@hcmuaf.edu.vn

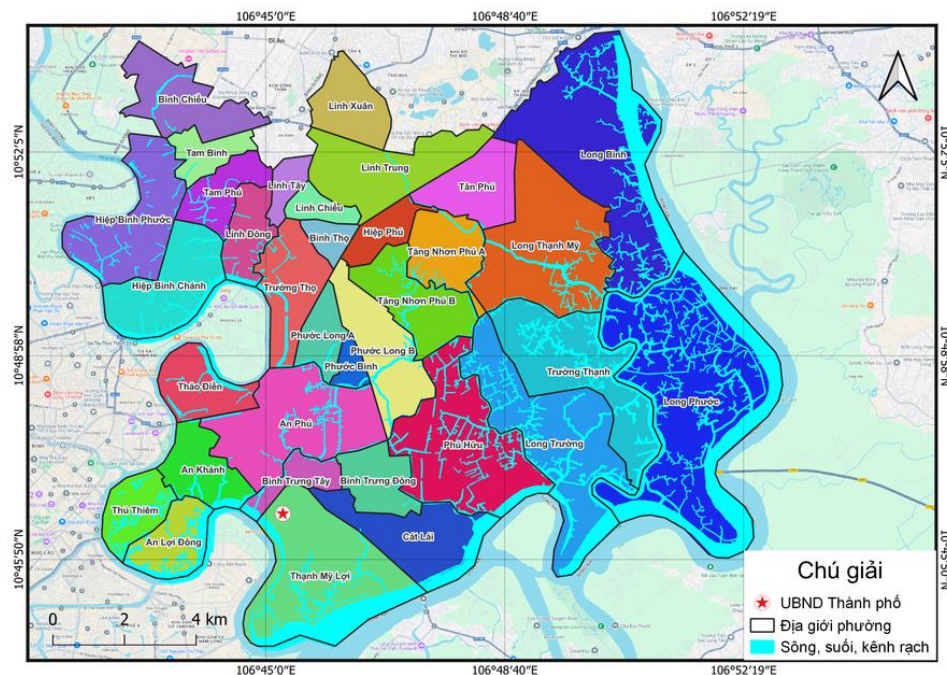
DOI: 10.46326/JMES.2026.67(5).11

Thành phố Thủ Đức có diện tích 211 km², nằm ở phía Đông Bắc TP. Hồ Chí Minh (Hình 1). Dù đang trong quá trình đô thị hóa mạnh mẽ, địa phương vẫn duy trì 4.291,2 ha đất sản xuất nông nghiệp tại 17/34 phường (Nam, 2023; Ủy ban Nhân dân TP. Hồ Chí Minh, 2022). Với 794 hộ sản xuất và 1.518 lao động (Chí, 2024), khu vực này tập trung phát triển các mô hình nông nghiệp đô thị và du lịch sinh thái ven sông (hoa, cây kiểng, rau sạch) nhằm nâng cao giá trị kinh tế (Trần, 2024). Tuy nhiên, BĐKH đang đặt ra nhiều thách thức nghiêm trọng cho khu vực này. Cụ thể, nhiệt độ trung bình đã tăng 0,03°C–0,1°C/năm trong giai đoạn 1978–2015 (Ủy ban Nhân dân TP. Hồ Chí Minh, 2022). Đồng thời, biến động lượng mưa và mực nước biển dâng làm gia tăng nguy cơ ngập lụt, đặc biệt tại các vùng đất ven sông Sài Gòn và sông Đồng Nai. Những tác động kép này đe dọa trực tiếp đến năng suất cây trồng và sinh kế của người dân. Do đó, việc nghiên cứu tác động của BĐKH đối với nông nghiệp đô thị tại Thủ Đức là cơ sở quan trọng để đề xuất các giải pháp thích ứng, hướng tới phát triển bền vững.

Khung đánh giá của Ủy ban Liên chính phủ về BĐKH (IPCC) phân tích rủi ro khí hậu thông qua sự tương tác của ba yếu tố cốt lõi: hiểm họa, phơi nhiễm và tính dễ bị tổn thương, dựa trên các kịch

bản phát thải tiên tiến (Representative Concentration Pathways - RCP và Shared Socioeconomic Pathways - SSP). Việc tích hợp khung lý thuyết này với Hệ thống thông tin địa lý (GIS) và viễn thám cho phép mô phỏng không gian và dự báo chi tiết các kịch bản rủi ro tương lai. Trong lĩnh vực nông nghiệp, phương pháp này giúp định lượng chính xác các tác động tiêu cực như suy giảm năng suất, thiếu hụt nguồn nước và mất đất canh tác do thiên tai (O'Neill và nnk., 2022). Từ đó, cung cấp cơ sở khoa học để hoạch định chiến lược thích ứng, phát triển nông nghiệp đô thị bền vững và đảm bảo an ninh lương thực.

Đánh giá tính dễ bị tổn thương và rủi ro nông nghiệp trước BĐKH đã được triển khai rộng rãi thông qua nhiều cách tiếp cận. Trên thế giới, các nghiên cứu thường tập trung xây dựng bộ chỉ số tổng hợp và ứng dụng phương pháp thống kê dựa trên các khung lý thuyết của IPCC để phân tích rủi ro đa mục tiêu (Das và nnk., 2020; David và nnk., 2021; Jamshidi và nnk., 2019; Parker và nnk., 2019). Tại Việt Nam, sự kết hợp giữa GIS và tiến trình phân tích thứ bậc (AHP) hoặc các chỉ số đặc thù (chỉ số tổn thương hộ gia đình, chỉ số dễ bị tổn thương) được ứng dụng nhằm phân vùng rủi ro thiên tai và đánh giá mức độ tổn thương của hệ thống nông nghiệp (Nguyen và nnk., 2019; Phạm



Hình 1. Bản đồ hành chính Thành phố Thủ Đức.

và nnk., 2020; UNDP và FAO, 2021; Vũ và nnk., 2019). Mặc dù vậy, các nghiên cứu trên còn những khoảng trống nhất định. Nổi bật là sự thiếu hụt dữ liệu kinh tế - xã hội có độ phân giải cao, dẫn đến các mô hình GIS chưa phản ánh chính xác biến động ở cấp địa phương. Bên cạnh đó, phương pháp đánh giá thiếu sự đồng nhất, chủ yếu tập trung vào dự báo ngắn hạn và chưa tích hợp toàn diện các yếu tố thể chế, xã hội cũng như phân tích chi phí - lợi ích trong các kịch bản rủi ro.

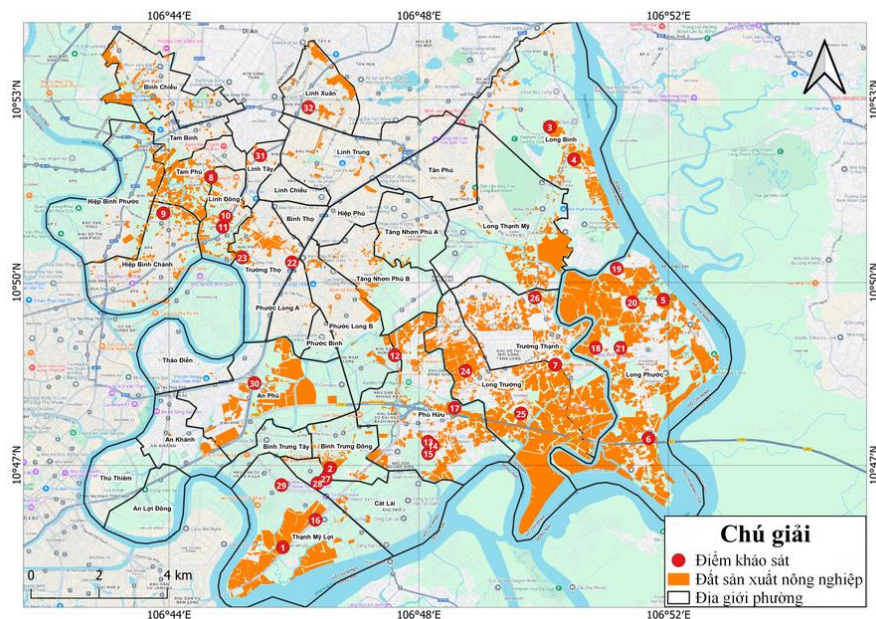
Nghiên cứu này nhằm phân vùng rủi ro sản xuất nông nghiệp tại Thành phố Thủ Đức trước tác động của BĐKH, cung cấp cơ sở khoa học cho việc nhận diện các thách thức hiện tại và tương lai, từ đó hỗ trợ quy hoạch và phát triển nông nghiệp bền vững. Các mục tiêu cụ thể bao gồm: 1) Đánh giá mức độ hiểm họa nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều do BĐKH; 2) Đánh giá mức độ phơi nhiễm của đất sản xuất nông nghiệp trước các hiểm họa khí hậu trên; 3) Đánh giá mức độ dễ bị tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp dưới tác động của các hiểm họa khí hậu trên; 4) Phân vùng rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do các hiểm họa khí hậu trên. Tính mới của nghiên cứu thể hiện ở việc tích hợp khung đánh giá IPCC trên nền kịch bản của Dự án So sánh Mô hình Ghép nối Pha 6 (CMIP6) kết hợp dữ liệu điều tra nông hộ vi mô, cung cấp bức tranh toàn diện về rủi ro không gian

đa hiểm họa cho nông nghiệp đô thị tại Thành phố Thủ Đức.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu thứ cấp từ nhiều nguồn. Theo đó, bản đồ hành chính, mô hình số độ cao (DEM) ở độ phân giải 100 m của Thành phố Thủ Đức thu thập từ Sở Tài nguyên và Môi trường TP. Hồ Chí Minh. Bản đồ đất sản xuất nông nghiệp năm 2022 tại Thành phố Thủ Đức thu thập từ Chi cục Thủy lợi TP. Hồ Chí Minh. Bản đồ khí tượng gồm nhiệt độ không khí lớn nhất, lượng mưa với tần suất hàng ngày ở độ phân giải $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ thu thập từ Vietnam Gridded Observation Dataset (1980-2014) và kịch bản BĐKH SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 của mô hình EC-Earth3-Veg (2015-2099) (Tran và nnk., 2023). Số liệu mực nước cao nhất hàng ngày tại trạm Nhà Bè theo kịch bản cơ sở (1995-2014) thu thập từ Đài Khí tượng Thủy văn Nam Bộ. Số liệu mực nước cao nhất hàng ngày tại trạm Nhà Bè theo các kịch bản BĐKH SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 (2041-2060) được ước tính bằng số liệu mực nước cao nhất hàng ngày tại trạm Nhà Bè theo kịch bản cơ sở (1995-2014) cộng với số liệu gia tăng mực nước trung bình hàng thập kỉ giai đoạn



Hình 2. Bản đồ khảo sát nông hộ.

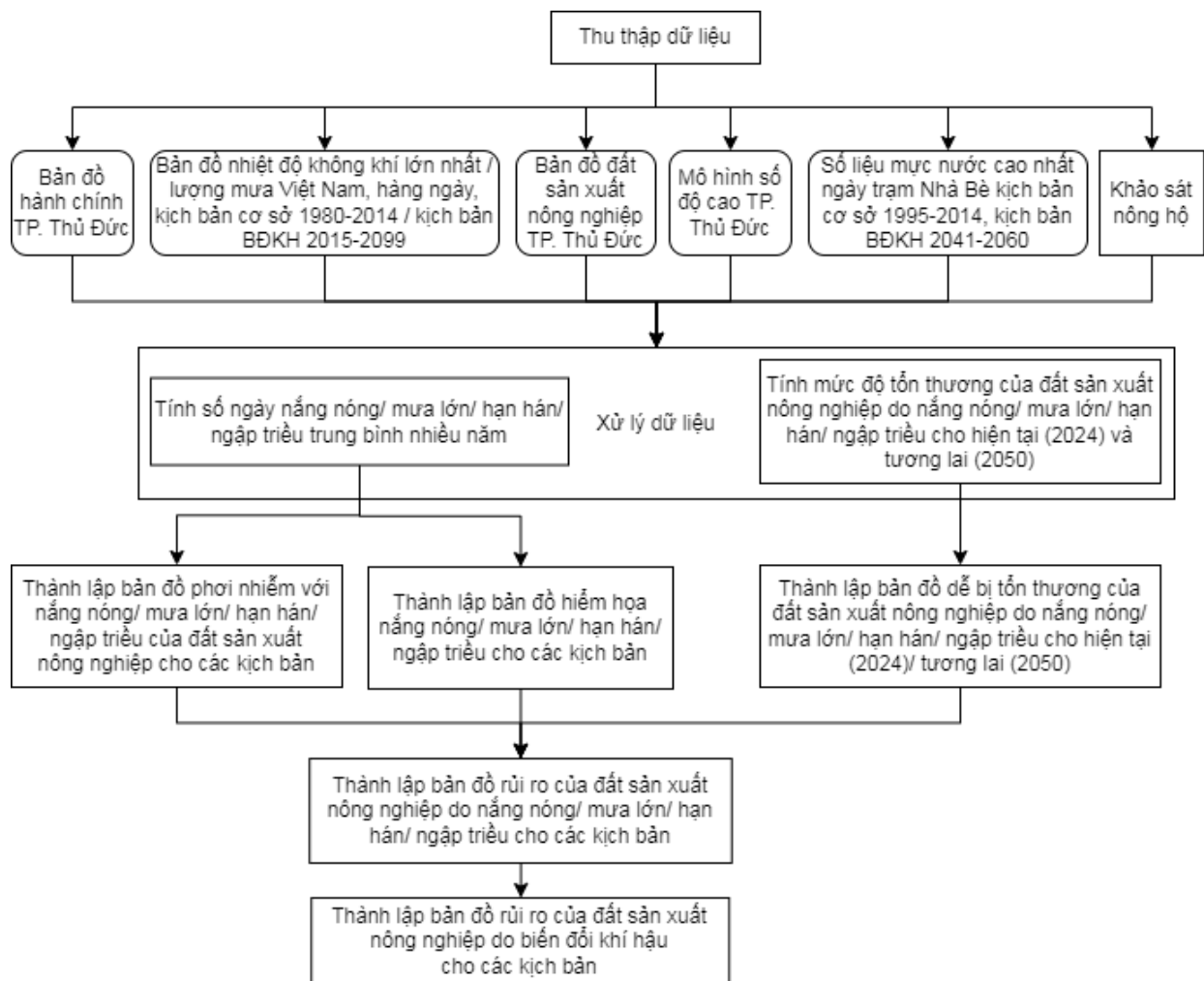
2040-2060 tại trạm Vũng Tàu (Garner và nnk., 2021). Các dữ liệu này là đầu vào để tính toán mức độ hiểm họa và phơi nhiễm của các yếu tố khí hậu qua các giai đoạn cơ sở và tương lai của các SSP.

Ngoài ra, nghiên cứu tiến hành thu thập dữ liệu sơ cấp qua khảo sát hộ nông dân tại 32 điểm thuộc 16 phường sản xuất nông nghiệp của Thành phố Thủ Đức từ ngày 7 đến 13/01/2025 (Hình 2). Do không gian đất nông nghiệp bị thu hẹp và phân mảnh, phương pháp lấy mẫu phân tầng không gian đã được áp dụng để lựa chọn 32 điểm khảo sát này, bảo đảm tính đại diện và khả năng bao phủ toàn bộ các khu vực sản xuất chính hiện hữu. Bảng câu hỏi khảo sát tập trung vào thông tin nông hộ, hiện trạng sản xuất, mức độ tổn thương do các hiện tượng khí hậu cực đoan, cùng định hướng thích ứng đến năm 2050. Phần đầu thu thập thông tin cá nhân như họ tên, độ tuổi, giới tính, số năm kinh nghiệm sản xuất và tỷ lệ thu nhập từ nông

nghiệp. Tiếp theo, khảo sát diện tích đất sản xuất theo loại cây trồng, sự tham gia vào tổ chức sản xuất và các hỗ trợ từ chính quyền hoặc tổ chức. Phần đánh giá tác động khí hậu xem xét ảnh hưởng của nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều đến sản xuất, cũng như các biện pháp ứng phó hiện tại. Cuối cùng, bảng hỏi tìm hiểu kế hoạch thích ứng dài hạn đến năm 2050, bao gồm các biện pháp bảo vệ trước diễn biến khí hậu ngày càng cực đoan, khả năng điều chỉnh mô hình sản xuất và định hướng sử dụng đất trong tương lai. Dữ liệu này là đầu vào để tính toán mức độ dễ bị tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp do các yếu tố khí hậu giai đoạn hiện tại (2024) và tương lai (2050).

2.2. Phương pháp

Quy trình phân vùng rủi ro sản xuất nông nghiệp do BĐKH như Hình 3. Bước 1 là thu thập



Hình 3. Tiến trình phân vùng rủi ro sản xuất nông nghiệp do BĐKH.

dữ liệu đầu vào. Bước 2 là xử lý dữ liệu bao gồm tính số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều trung bình nhiều năm cho các kịch bản; và tính mức độ tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều cho hiện tại (2024) và tương lai (2050). Bước 3 là thành lập bản đồ hiểm họa nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều cho các kịch bản từ kết quả tính số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều trung bình nhiều năm. Bên cạnh đó, thành lập bản đồ dễ bị tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều cho hiện tại (2024) và tương lai (2050) từ kết quả tính mức độ tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều. Bước 4 là thành lập bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều cho các kịch bản bằng cách chồng lớp 3 bản đồ hiểm họa, phơi nhiễm, dễ bị tổn thương tương ứng. Bước 5 là thành lập bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do BĐKH cho các kịch bản bằng cách chồng lớp 3 bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều.

2.3. Thành lập bản đồ hiểm họa

BĐKH gây ra nhiều hiểm họa như nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều cho sản xuất nông nghiệp tại Thành phố Thủ Đức. Nắng nóng với nhiệt độ cao kéo dài có thể làm giảm năng suất cây trồng. Mưa lớn với lượng mưa vượt ngưỡng có thể gây ngập úng, phá hoại mùa màng và cơ sở hạ tầng nông nghiệp. Hạn hán do thiếu hụt mưa kéo dài, dẫn đến đất bị khô hạn, làm suy giảm sản lượng nông nghiệp. Ngập triều gây ngập lụt cục bộ, đặc biệt ở vùng thấp trũng, làm mất đất canh tác và ảnh hưởng đến sinh kế của người dân.

Quy trình thành lập bản đồ hiểm họa bao gồm 6 bước. Bước 1 là từ bản đồ nhiệt độ không khí lớn nhất, lượng mưa của Việt Nam hằng ngày theo kịch bản cơ sở 1980-2014 và BĐKH 2015-2099, lọc dữ liệu trong giai đoạn cơ sở 1995 - 2014 và BĐKH 2041 - 2060 (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0, và SSP5-8.5).

Bước 2 là xác định ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán. Ngày nắng nóng là ngày có nhiệt độ không khí lớn nhất $\geq 35^{\circ}\text{C}$ (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2021). Ngày mưa lớn là ngày có lượng mưa ≥ 50 mm (Severe Weather Information Centre, 2024). Ngày hạn hán là ngày có chỉ số SPI-

6 tháng ≤ -1 (McKee và nnk., 1993). Đồng thời, xác định ngày ngập triều là ngày mà mực nước cao nhất tại trạm Nhà Bè lớn hơn độ cao DEM.

Bước 3 là tính số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều trung bình nhiều năm cho các kịch bản.

Bước 4 là tăng độ phân giải không gian của số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán lên 100 m và cắt theo vùng nghiên cứu bằng bản đồ hành chính của Thành phố Thủ Đức.

Bước 5 là chuẩn hóa số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều trung bình nhiều năm cho các kịch bản. Phương pháp chuẩn hóa Min-Max được sử dụng để chuyển đổi giá trị số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều trung bình nhiều năm về thang đo từ 0 đến 1 theo công thức sau: $X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$. Trong đó, X là giá trị cần chuẩn hóa, $X_{\min}$ là giá trị nhỏ nhất trong tất cả kịch bản, $X_{\max}$ là giá trị lớn nhất trong tất cả kịch bản, X' là giá trị đã được chuẩn hóa.

Bước 6 là thành lập bản đồ hiểm họa nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều cho các kịch bản.

2.4. Thành lập bản đồ phơi nhiễm

Xác định mức độ phơi nhiễm cho phép đánh giá mức độ tiếp xúc của đất sản xuất nông nghiệp với các hiểm họa, từ đó giúp phân tích ảnh hưởng của các hiểm họa đối với năng suất nông nghiệp và sinh kế của người nông dân.

Quy trình thành lập bản đồ phơi nhiễm bao gồm 3 bước. Bước 1 là tăng độ phân giải không gian của số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán (đã tính ở phần hiểm họa) lên 100 m và cắt theo vùng nghiên cứu bằng bản đồ đất sản xuất nông nghiệp của Thành phố Thủ Đức. Đồng thời, cắt số ngày ngập triều (đã tính ở phần hiểm họa) theo vùng nghiên cứu bằng bản đồ đất sản xuất nông nghiệp của Thành phố Thủ Đức.

Bước 2 là chuẩn hóa số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều trung bình nhiều năm cho các kịch bản. Phương pháp chuẩn hóa Min-Max được sử dụng để chuyển đổi giá trị số ngày nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều trung bình nhiều năm về thang đo từ 0 đến 1 theo công thức sau: $X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$. Trong đó, X là giá trị cần chuẩn hóa, $X_{\min}$ là giá trị nhỏ nhất trong tất cả kịch bản, $X_{\max}$ là giá trị lớn nhất trong tất cả kịch bản, X' là giá trị đã được chuẩn hóa.

Bước 3 là thành lập bản đồ phơi nhiễm với nắng nóng, mưa lớn, hạn hán và ngập triều của đất sản xuất nông nghiệp cho các kịch bản.

2.5. Thành lập bản đồ dễ bị tổn thương

Quy trình thành lập bản đồ dễ bị tổn thương bao gồm 6 bước. Bước 1: Dữ liệu khảo sát nông hộ tại Thành phố Thủ Đức được chia thành 4 nhóm: a) Ảnh hưởng của các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) đối với sản xuất nông nghiệp và các biện pháp giảm thiểu ở hiện tại; b) Kinh nghiệm sản xuất, tỷ lệ thu nhập từ nông nghiệp, sự tham gia vào tổ chức sản xuất và các hỗ trợ từ chính quyền hoặc tổ chức trong sản xuất nông nghiệp; c) Khả năng thay đổi mô hình sản xuất và định hướng sử dụng đất trong tương lai; d) Biện pháp giảm thiểu ảnh hưởng của các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) trong tương lai.

Bước 2: Chuẩn hóa dữ liệu khảo sát nông hộ theo thang từ 0 đến 1 phản ánh ứng với mức độ tổn thương do các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) từ thấp nhất đến cao nhất. Phương pháp chuẩn hóa Min-Max ngược được áp dụng cho 9 câu hỏi về hỗ trợ từ chính quyền địa phương, biện pháp giảm thiểu tác động của nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều trong hiện tại (2024), biện pháp giảm thiểu nắng nóng, hạn hán, ngập triều trong tương lai (2050), thay đổi mô hình sản xuất trong tương lai (2050) theo công thức sau: $X' = (X_{\max} - X) / (X_{\max} - X_{\min})$. Trong đó, X là số hỗ trợ/ biện pháp/ mô hình đã chọn, $X_{\max}$ là số hỗ trợ/ biện pháp/ mô hình nhiều nhất, $X_{\min}$ là số hỗ trợ/ biện pháp/ mô hình ít nhất, X' là mức độ tổn thương do các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều).

Bước 3: Tính mức độ tổn thương do các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) cho hiện tại và tương lai tại các điểm khảo sát. Theo đó, nghiên cứu giả định bốn chỉ tiêu bao gồm: (i) kinh nghiệm sản xuất, (ii) tỷ lệ thu nhập từ nông nghiệp, (iii) sự tham gia vào tổ chức sản xuất, và (iv) hỗ trợ từ chính quyền hoặc tổ chức trong sản xuất nông nghiệp - là không thay đổi giữa hai kịch bản. Đối với hiện tại, lấy giá trị trung bình của các mức độ tổn thương liên quan đến ảnh hưởng của các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) đối với sản xuất nông nghiệp và các biện pháp giảm thiểu ở hiện tại; kinh nghiệm sản xuất, tỷ lệ thu nhập từ nông nghiệp, sự

tham gia vào tổ chức sản xuất và các hỗ trợ từ chính quyền hoặc tổ chức trong sản xuất nông nghiệp. Đối với tương lai, lấy giá trị trung bình của các mức độ tổn thương liên quan đến kinh nghiệm sản xuất, tỷ lệ thu nhập từ nông nghiệp, sự tham gia vào tổ chức sản xuất và các hỗ trợ từ chính quyền hoặc tổ chức trong sản xuất nông nghiệp; thay đổi mô hình sản xuất và định hướng sử dụng đất trong tương lai; biện pháp giảm thiểu ảnh hưởng của các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) trong tương lai.

Bước 4: Nội suy mức độ tổn thương do các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) cho hiện tại và tương lai tại các điểm khảo sát theo phạm vi đất sản xuất nông nghiệp. Phương pháp nội suy được áp dụng là Nghịch đảo khoảng cách có trọng số (IDW), một kỹ thuật phổ biến giúp chuyển đổi dữ liệu rời rạc thành bề mặt liên tục, phản ánh mức độ tổn thương trên toàn bộ khu vực nghiên cứu. IDW dựa trên nguyên tắc rằng các điểm dữ liệu gần vị trí cần nội suy có ảnh hưởng lớn hơn so với các điểm cách xa. Cụ thể, giá trị của một vị trí chưa được khảo sát được tính toán dựa trên giá trị của các điểm lân cận, với trọng số được xác định theo công thức tỷ lệ nghịch với khoảng cách.

Bước 5: Chuẩn hóa mức độ tổn thương do các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) cho hiện tại và tương lai. Phương pháp chuẩn hóa Min-Max được sử dụng để chuyển đổi giá trị tổn thương do các hiểm họa khí hậu về thang đo từ 0 đến 1 theo công thức sau: $X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$. Trong đó, X là giá trị cần chuẩn hóa, $X_{\min}$ là giá trị nhỏ nhất trong tất cả kịch bản, $X_{\max}$ là giá trị lớn nhất trong tất cả kịch bản, X' là giá trị đã được chuẩn hóa.

Bước 6: Thành lập bản đồ dễ bị tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp do các hiểm họa khí hậu (nắng nóng, mưa lớn, hạn hán, ngập triều) cho giai đoạn hiện tại (2024) và tương lai (2050).

2.6. Thành lập bản đồ rủi ro

Bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do từng hiểm họa khí hậu trong giai đoạn hiện tại (2024) được xây dựng dựa trên sự tổng hợp của ba bản đồ thành phần là hiểm họa, phơi nhiễm và dễ bị tổn thương như công thức 1 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Phép nhân tương tác được áp dụng theo Khung IPCC nhằm bảo đảm nguyên tắc rủi ro chỉ

xuất hiện khi có sự hiện diện đồng thời của hiểm họa, đối tượng phơi nhiễm và tính dễ bị tổn thương.

$$R_{HT} = H_{HT} \times E_{HT} \times V_{HT} \quad (1)$$

Trong đó: R_{HT} là bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do hiểm họa khí hậu trong giai đoạn hiện tại (2024), H_{HT} là bản đồ hiểm họa khí hậu trong giai đoạn hiện tại (2024), E_{HT} là bản đồ phơi nhiễm của đất sản xuất nông nghiệp với hiểm họa khí hậu trong giai đoạn hiện tại (2024), V_{HT} là bản đồ dễ bị tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp do hiểm họa khí hậu trong giai đoạn hiện tại (2024).

Tương tự, bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do từng hiểm họa khí hậu trong giai đoạn 2041-2060 được tính toán cho từng kịch bản SSP theo công thức 2.

$$R_{TL,SSPi} = H_{TL,SSPi} \times E_{TL,SSPi} \times V_{TL} \quad (2)$$

Trong đó: $R_{TL,SSPi}$ là bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do hiểm họa khí hậu trong giai đoạn 2041-2060 theo kịch bản SSP thứ i (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0 và SSP5-8.5); $H_{TL,SSPi}$ là bản đồ hiểm họa khí hậu trong giai đoạn 2041-2060 theo kịch bản SSP thứ i ; $E_{TL,SSPi}$ là bản đồ phơi nhiễm của đất sản xuất nông nghiệp với hiểm họa khí hậu trong giai đoạn 2041-2060 theo kịch bản SSP thứ i ; V_{TL} là bản đồ dễ bị tổn thương của đất sản xuất nông nghiệp do hiểm họa khí hậu trong tương lai (2050).

Cuối cùng, bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do BĐKH được tính bằng giá trị trung bình của các bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do từng hiểm họa khí hậu theo công thức 3.

$$R_{BDKH,t} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 R_{i,t} \quad (3)$$

Trong đó: $R_{BDKH,t}$ là bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do BĐKH cho kịch bản t ; $R_{i,t}$ là bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do hiểm họa khí hậu thứ i (nắng nóng, hạn hán, mưa lớn, ngập triều) cho kịch bản t ; t là kịch bản (hiện tại, 2041-2060 SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0 và SSP5-8.5). Việc áp dụng trọng số bằng nhau cho 4 loại hiểm họa dựa trên cơ sở khoa học và thực tiễn. Trước hết, theo định hướng từ Khung đánh giá IPCC, các hiểm họa tự nhiên không có thứ tự ưu tiên mặc định nếu chưa xác định được hàm thiệt hại kinh tế định lượng riêng cho từng loại cây trồng tại địa phương. Bên cạnh đó, kết quả khảo

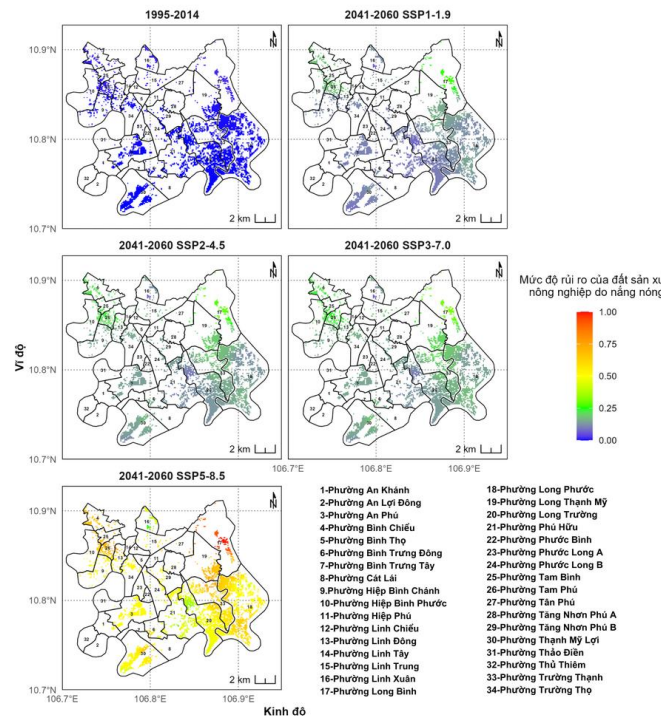
sát nông hộ cho thấy các mô hình nông nghiệp đô thị đặc thù (hoa, cây kiểng, rau sạch) chịu tác động đồng thời và đa chiều từ cả 4 hiểm họa: nắng nóng gây héo hoa và giảm thụ phấn; mưa lớn kết hợp ngập triều gây ngập úng thối rễ; trong khi hạn hán làm suy giảm nguồn nước tưới. Cuối cùng, việc gán trọng số bằng nhau giúp đảm bảo tính khách quan, loại bỏ tối đa thiên kiến chủ quan của chuyên gia khi áp dụng các phương pháp định lượng như AHP.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Bản đồ rủi ro

3.1.1. Rủi ro do nắng nóng

Rủi ro do nắng nóng đối với đất sản xuất nông nghiệp có sự thay đổi rõ rệt theo thời gian và giữa các kịch bản (Hình 4, Hình 5). Trong giai đoạn 1995–2014, các khu vực chịu rủi ro chủ yếu nằm ở một số địa phương nhất định, phản ánh tác động của các đợt nắng nóng trong quá khứ. Tuy nhiên, với các kịch bản phát thải khác nhau của giai đoạn 2041–2060, mức độ và phạm vi rủi ro có sự biến đổi phức tạp.



Hình 4. Bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng.

Trong giai đoạn 1995-2014, mức độ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng ở mức rất thấp trên toàn bộ khu vực, với trung vị bằng 0 và giá trị dao động từ 0 đến 0,02. Điều này cho thấy nắng nóng chưa phải là một hiểm họa đáng kể đối với sản xuất nông nghiệp trong hiện tại và quá khứ.

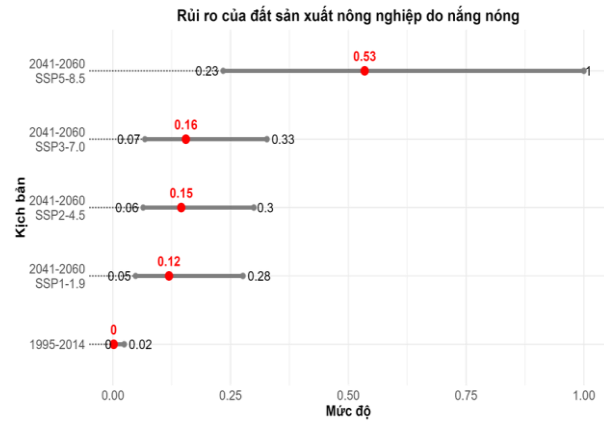
Tuy nhiên, trong giai đoạn BĐKH 2041-2060, mức độ rủi ro gia tăng đáng kể theo các kịch bản phát thải. Dưới kịch bản SSP1-1.9, mức độ rủi ro vẫn chủ yếu ở mức rất thấp đến thấp, với trung vị 0,12 và giá trị dao động từ 0,05 đến 0,28. Một số khu vực có mức rủi ro cao hơn như Long Bình, Tam Bình và Bình Chiểu nhưng phần lớn diện tích vẫn duy trì ở mức rất thấp. Dưới kịch bản SSP2-4.5, rủi ro tăng lên với trung vị đạt 0,15 và giá trị dao động từ 0,06 đến 0,3. Nhìn chung, mức độ rủi ro vẫn thuộc ngưỡng rất thấp đến thấp, nhưng phạm vi ảnh hưởng mở rộng hơn, đặc biệt tại khu vực phía Đông Nam và Nam.

Khi phát thải tăng cao hơn theo kịch bản SSP3-7.0, mức độ rủi ro tiếp tục gia tăng với trung vị 0,16, dao động từ 0,07 đến 0,33. Ở giai đoạn này, rủi ro vẫn nằm chủ yếu trong mức rất thấp đến thấp, tuy nhiên, một số khu vực bắt đầu có xu hướng tăng lên, phản ánh sự gia tăng rõ rệt của hiểm họa nắng nóng đối với nông nghiệp. Đáng lo ngại nhất là kịch bản SSP5-8.5, khi mức độ rủi ro tăng mạnh với trung vị đạt 0,53 và dao động từ 0,23 đến 1. Trong trường hợp này, phần lớn khu vực có mức rủi ro thấp đến cao, với nhiều khu vực bước vào ngưỡng rủi ro cao đến rất cao. Đặc biệt, một số phường như Long Phước, Long Bình, Trường Thạnh và Phú Hữu có mức độ rủi ro cực kỳ nghiêm trọng, tiệm cận giá trị tối đa.

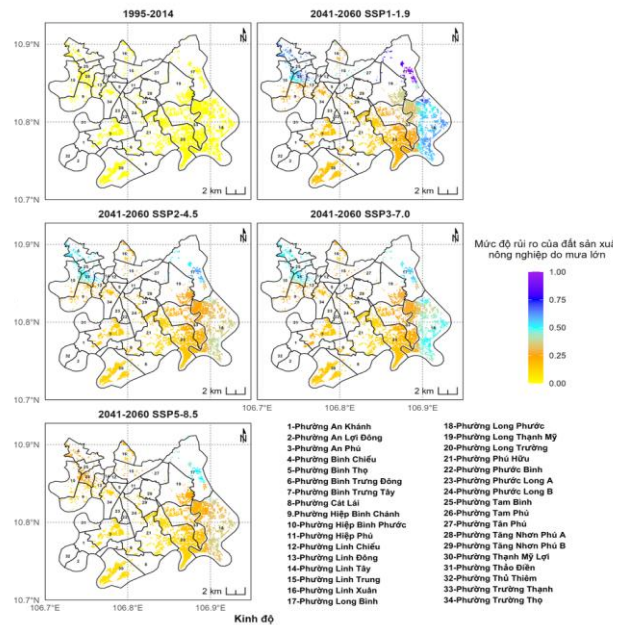
3.1.2. Rủi ro do mưa lớn

Rủi ro do mưa lớn đối với đất sản xuất nông nghiệp cũng có sự gia tăng đáng kể theo thời gian (Hình 6, Hình 7). Trong giai đoạn 1995–2014, mức độ rủi ro chủ yếu ở mức thấp và phân bố không đồng đều. Tuy nhiên, dưới các kịch bản phát thải khác nhau của giai đoạn 2041–2060, phạm vi ảnh hưởng mở rộng hơn, với nhiều khu vực bước vào ngưỡng rủi ro cao hơn, cho thấy nguy cơ gia tăng ngập úng và suy giảm đất nông nghiệp.

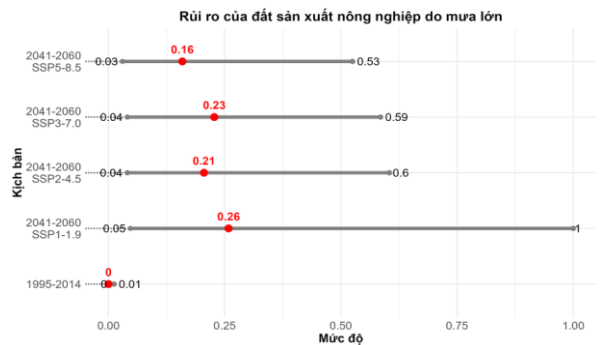
Trong giai đoạn 1995–2014, rủi ro do mưa lớn đối với đất sản xuất nông nghiệp hầu như không đáng kể, với mức tối đa chỉ đạt 0,01 và trung vị bằng 0. Điều này cho thấy các trận mưa



Hình 5. Biểu đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do nắng nóng.



Hình 6. Bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do mưa lớn.



Hình 7. Biểu đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do mưa lớn.

lớn trong quá khứ chưa ảnh hưởng lớn đến sản xuất nông nghiệp trong khu vực. Tuy nhiên, đến giai đoạn 2041–2060, rủi ro này có xu hướng gia tăng mạnh mẽ dưới tác động của BĐKH, với sự khác biệt đáng kể giữa các kịch bản phát thải.

Dưới kịch bản SSP1-1.9, mức rủi ro tăng cao, dao động từ rất thấp đến rất cao, với giá trị trung vị đạt 0,26 và mức rủi ro tối đa đạt lên đến 1. Điều này cho thấy ngay cả trong kịch bản phát thải thấp, một số khu vực vẫn đối diện với nguy cơ thiệt hại nghiêm trọng do mưa lớn. Nó phản ánh đặc tính biến động gia tăng của các trận mưa cực đoan cục bộ trong mô hình CMIP6 EC-Earth3-Veg dưới sự tác động của hiệu ứng Clausius-Clapeyron. Các khu vực chịu ảnh hưởng mạnh nhất chủ yếu tập trung ở phía Đông Nam và một phần phía Nam của khu vực nghiên cứu, nơi có địa hình thấp và dễ bị ngập úng.

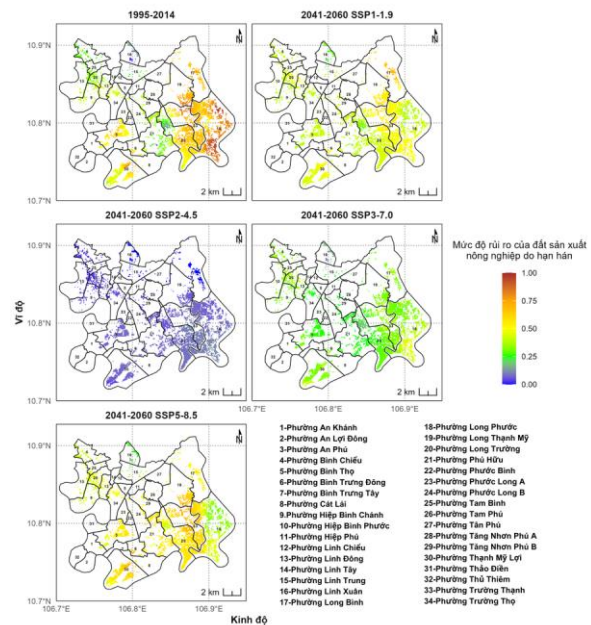
Ở kịch bản SSP2-4.5 và SSP3-7.0, mức rủi ro tối đa lần lượt đạt 0,6 và 0,59, với trung vị lần lượt là 0,21 và 0,23, cho thấy phạm vi ảnh hưởng đã mở rộng đáng kể so với quá khứ. Các khu vực có nguy cơ cao vẫn chủ yếu nằm ở phía Đông Nam, nhưng cũng bắt đầu xuất hiện ở một số khu vực phía Tây và Tây Nam. Trong khi đó, kịch bản SSP5-8.5 có mức rủi ro tối đa thấp hơn, với trung vị 0,16. Tuy nhiên, sự phân bố rủi ro ở kịch bản này khá phức tạp, với nguy cơ cao tập trung rõ hơn ở các khu vực ven sông và vùng thấp trũng.

3.1.3. Rủi ro do hạn hán

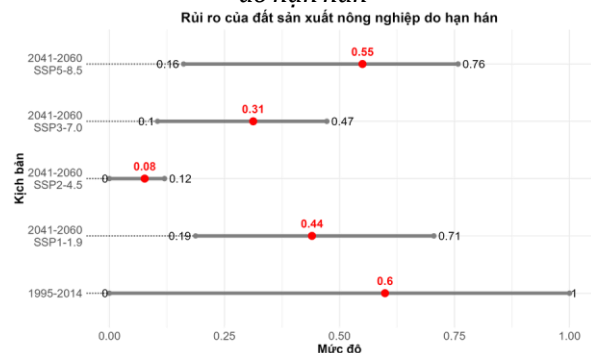
Rủi ro do hạn hán đối với đất sản xuất nông nghiệp có sự thay đổi đáng kể theo thời gian và giữa các kịch bản (Hình 8, Hình 9). Trong giai đoạn cơ sở 1995–2014, mức rủi ro hạn hán tương đối cao, với giá trị trung vị đạt 0,6 và dao động từ 0 đến 1, cho thấy phần lớn khu vực nghiên cứu đã chịu ảnh hưởng đáng kể của hạn hán. Đặc biệt, một số khu vực có mức rủi ro rất cao hầu như gần đạt giá trị tối đa, tập trung chủ yếu ở phía Đông Nam và một số vùng trung tâm. Điều này phản ánh sự xuất hiện của các đợt hạn hán nghiêm trọng trong quá khứ, ảnh hưởng trực tiếp đến sản xuất nông nghiệp.

Bước sang giai đoạn BĐKH 2041–2060, các kịch bản phát thải cho thấy sự thay đổi rõ rệt về mức độ và phạm vi ảnh hưởng của rủi ro hạn hán. Kịch bản SSP1-1.9 có mức rủi ro đa phần ở mức thấp, với trung vị 0,44, cho thấy tác động đã giảm so với giai đoạn trước, nhưng vẫn còn đáng kể tại

một số khu vực phía Đông và Đông Nam. Bước sang kịch bản SSP2-4.5 có mức rủi ro rất thấp chỉ dao động từ 0 đến 0,12 và có mức trung vị là 0,08, điều này cho thấy hạn hán không còn là yếu tố đáng lo ngại trong điều kiện phát thải trung bình. Rủi ro hạn hán suy giảm ở SSP2-4.5 là do sự phân bố lại lượng mưa mùa khô mang tính bù trừ trong mô hình dự báo. Ngược lại, kịch bản SSP3-7.0 và SSP5-8.5 cho thấy mức rủi ro có xu hướng gia tăng. SSP3-7.0 có trung vị 0,31, tập trung rủi ro chủ yếu ở các khu vực phía Tây Nam và trung tâm. Trong khi đó, SSP5-8.5 có mức rủi ro cao hơn, với trung vị đạt 0,55 và giá trị tối đa lên tới 0,76, phản ánh nguy cơ hạn hán nghiêm trọng ở nhiều khu vực, đặc biệt là phía Nam và phía Đông Bắc.



Hình 8. Bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do hạn hán



Hình 9. Biểu đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do hạn hán

3.1.4. Rủi ro do ngập triều

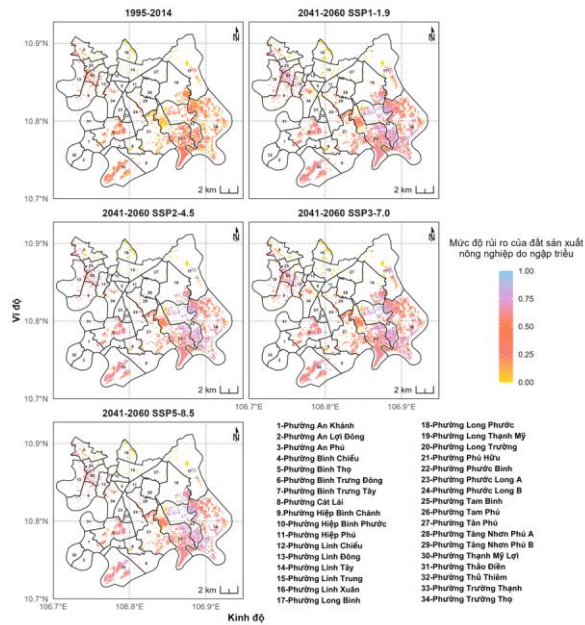
Rủi ro do ngập triều đối với đất sản xuất nông nghiệp có xu hướng gia tăng đáng kể trong tương lai, đặc biệt dưới các kịch bản phát thải cao (Hình 10, Hình 11). Trong giai đoạn 1995–2014, rủi ro ngập triều có mức trung vị là 0,27, phần lớn ở mức thấp, với một số khu vực có mức rủi ro cao tập trung tại các vùng trũng thấp, ven sông hoặc gần khu vực cửa sông. Giá trị tối đa đạt 0,65 cho thấy một số khu vực đã chịu ảnh hưởng đáng kể của ngập triều, có khả năng ảnh hưởng đến sản xuất nông nghiệp.

Dự báo cho giai đoạn 2041–2060, tất cả các kịch bản đều cho thấy mức rủi ro ngập triều gia tăng mạnh và đa phần đều nằm ở mức cao, với trung vị dao động từ 0,59 đến 0,61. Trong đó, các

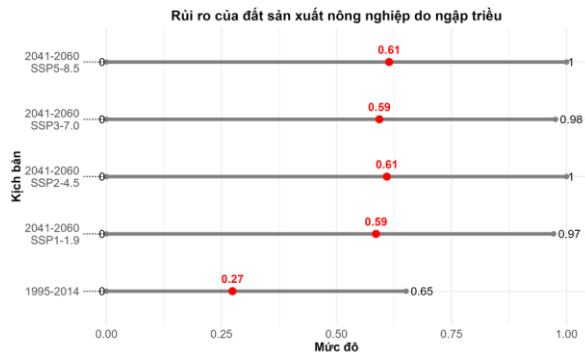
kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5 có mức rủi ro cao nhất, với giá trị tối đa đạt 1, đồng nghĩa với một số khu vực có nguy cơ ngập triều nghiêm trọng. Các khu vực có mức rủi ro cao và rất cao chủ yếu tập trung ở phía Nam và Đông Nam của khu vực nghiên cứu, nơi có địa hình thấp và chịu ảnh hưởng trực tiếp của triều cường. So với giai đoạn trước, sự gia tăng này có thể liên quan đến tác động của nước biển dâng, kết hợp với BĐKH làm gia tăng tần suất của các đợt triều cường.

3.1.5. Rủi ro do biến đổi khí hậu

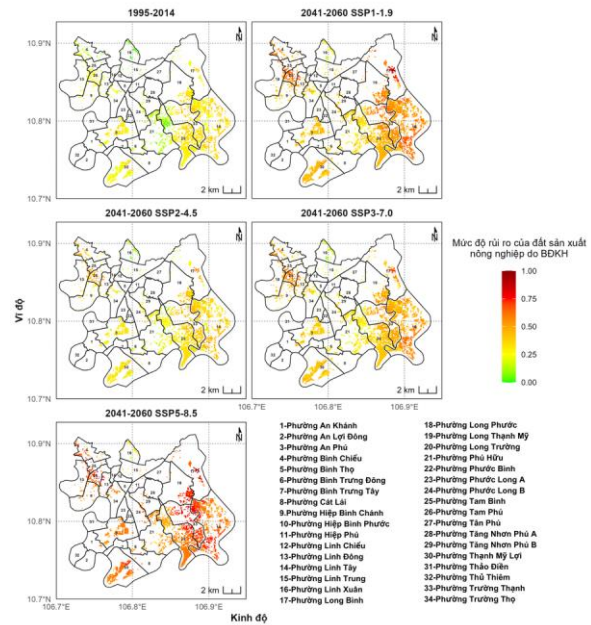
Rủi ro do BĐKH đối với đất sản xuất nông nghiệp có xu hướng gia tăng đáng kể trong tương lai, với mức độ khác nhau giữa các kịch bản SSP (Hình 12, Hình 13).



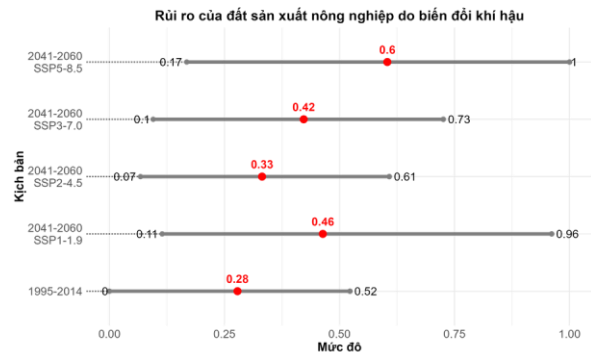
Hình 10. Bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do ngập triều.



Hình 11. Biểu đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do ngập triều.



Hình 12. Bản đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do BĐKH.



Hình 13. Biểu đồ rủi ro của đất sản xuất nông nghiệp do BĐKH.

Trong giai đoạn cơ sở 1995-2014, rủi ro dao động từ 0 đến 0,52, với trung vị 0,28. Phần lớn khu vực có mức rủi ro thấp, tập trung chủ yếu ở các phường phía Tây và một phần phía Bắc. Tuy nhiên, một số vùng phía Đông và Đông Nam vẫn ghi nhận giá trị rủi ro nằm ở mức cao (tiệm cận 0,52), phản ánh tác động cục bộ của các hiện tượng khí hậu cực đoan. Nhìn chung, trong giai đoạn này, BĐKH chưa gây ra những ảnh hưởng quá nghiêm trọng trên diện rộng, song vẫn có những điểm nóng cần được theo dõi.

Dự báo cho giai đoạn tương lai 2041-2060 theo kịch bản phát thải thấp, rủi ro tăng lên với trung vị 0,46, dao động từ 0,11 đến 0,96. Điều này cho thấy, dù phát thải đã được kiểm soát ở mức thấp, một số khu vực vẫn có nguy cơ chịu tác động mạnh mẽ hơn so với giai đoạn trước. Các vùng phía Đông Nam và ven sông, đặc biệt là nơi có địa hình thấp, thường xuyên chịu ảnh hưởng của ngập triều hoặc mưa lớn, có xu hướng ghi nhận mức rủi ro cao đến rất cao (tiệm cận 0,96). Trong khi đó, một số khu vực phía Tây hoặc nằm xa sông lớn vẫn duy trì rủi ro thấp.

Với mức phát thải trung bình SSP2-4.5, rủi ro có trung vị 0,33, dao động từ 0,07 đến 0,61. Đây là kịch bản có giá trị trung vị thấp nhất trong các kịch bản tương lai, phản ánh một số yếu tố khí hậu có thể được cải thiện hoặc bù trừ lẫn nhau. Tuy vậy, các vùng trũng thấp và ven sông vẫn ghi nhận giá trị rủi ro từ thấp đến cao (trên 0,5), đặc biệt ở các phường phía Nam và Đông Nam. So với kịch bản SSP1-1.9, phạm vi xuất hiện mức rủi ro cao nhỏ hơn, nhưng vẫn tiềm ẩn nguy cơ nếu thiếu các biện pháp quản lý và thích ứng kịp thời.

Dưới kịch bản phát thải cao SSP3-7.0, rủi ro có trung vị 0,42, dao động từ 0,1 đến 0,73. Sự gia tăng phát thải dẫn đến nguy cơ cao hơn cho một số hiện tượng khí hậu như nắng nóng kéo dài, mưa lớn bất thường hoặc hạn hán khắc nghiệt, khiến nhiều khu vực bước vào ngưỡng rủi ro cao. Các phường ven sông, đặc biệt là phía Đông, Đông

Nam, vẫn là điểm nóng, trong khi một số vùng phía Tây có xu hướng gia tăng rủi ro hạn hán. Mặc dù mức tối đa là 0,73 không cao bằng SSP1-1.9, nhưng sự phân bố rủi ro rộng hơn cho thấy ảnh hưởng tổng thể có thể lan rộng ra nhiều khu vực hơn.

Kịch bản phát thải rất cao SSP5-8.5 cho thấy mức rủi ro trung vị đạt 0,6, dao động từ 0,17 đến 1. Đây là kịch bản có trung vị cao nhất, phản ánh các hiện tượng khí hậu cực đoan có thể xảy ra với tần suất dày hơn, tác động nghiêm trọng đến sản xuất nông nghiệp. Nhiều khu vực ven sông và phía Đông Nam ghi nhận mức rủi ro tiệm cận 1, đồng nghĩa với khả năng xảy ra tổn thất lớn nếu không có biện pháp bảo vệ và thích ứng hiệu quả. Đồng thời, các vùng trung tâm và phía Tây cũng ghi nhận sự gia tăng rủi ro, mặc dù không cao bằng khu vực ven sông, nhưng vẫn đủ để ảnh hưởng đến năng suất và sinh kế nông dân.

Dựa trên Bảng 1, có thể nhận thấy xu hướng chuyển dịch đáng kể từ mức rủi ro rất thấp/thấp sang mức cao/rất cao khi so sánh giai đoạn 1995-2014 với các kịch bản 2041-2060. Trong giai đoạn cơ sở, phần lớn diện tích (984 ha) nằm ở mức rủi ro rất thấp, chỉ có 1.738 ha ở mức thấp, và 1 ha ở mức cao, không có khu vực nào ở mức rất cao. Tuy nhiên, ở các kịch bản tương lai, diện tích ở mức rủi ro rất thấp giảm đi rõ rệt, trong khi diện tích ở mức rủi ro cao và rất cao gia tăng.

Đáng chú ý, kịch bản SSP2-4.5 mặc dù có diện tích ở mức rủi ro cao (140 ha), song hoàn toàn không có vùng rủi ro rất cao. Đây là kịch bản có tổng diện tích an toàn hơn so với nhiều kịch bản khác, thể hiện triển vọng khả quan nếu kiểm soát phát thải ở mức trung bình. Ngược lại, kịch bản SSP5-8.5 có 2.122 ha ở mức rủi ro cao và tới 232 ha ở mức rất cao, cho thấy nguy cơ nghiêm trọng nhất đối với sản xuất nông nghiệp nếu phát thải khí nhà kính không được kiểm soát hiệu quả.

Các số liệu này phản ánh xu hướng rủi ro tăng mạnh dưới tác động của BĐKH, đồng thời nhấn

Bảng 1. Diện tích đất sản xuất nông nghiệp chịu rủi ro theo các kịch bản.

TT	Kịch bản	Rủi ro rất thấp (ha)	Rủi ro thấp (ha)	Rủi ro cao (ha)	Rủi ro rất cao (ha)
1	1995-2014	984	1.738	1	0
2	2041-2060 SSP1-1.9	130	1.825	728	40
3	2041-2060 SSP2-4.5	450	2.133	140	0
4	2041-2060 SSP3-7.0	280	2.151	292	0
5	2041-2060 SSP5-8.5	7	362	2.122	232

mạnh tầm quan trọng của việc giảm phát thải và áp dụng các biện pháp thích ứng phù hợp. Các khu vực nằm trong ngưỡng rủi ro cao và rất cao cần được ưu tiên đầu tư về hạ tầng, quy hoạch sản xuất, cũng như nghiên cứu triển khai các mô hình canh tác bền vững để giảm thiểu thiệt hại trong tương lai.

3.2. Thảo luận

Phát hiện quan trọng của nghiên cứu chỉ ra rằng rủi ro khí hậu đối với nông nghiệp tại TP. Thủ Đức mang tính phân hóa không gian sâu sắc. Tính dễ bị tổn thương không chỉ phụ thuộc vào cường độ hiểm họa (đặc biệt là sự cộng hưởng giữa nắng nóng và ngập triều trong kịch bản phát thải cao SSP5-8.5), mà còn bị chi phối mạnh bởi điều kiện địa hình và năng lực hạ tầng. Sự tập trung rủi ro cao tại các vùng ven sông (Long Phước, Long Bình, Trường Thạnh) do địa hình thấp trũng ven sông Đồng Nai kết hợp với triều cường và nắng nóng cho thấy hệ thống canh tác truyền thống và hạ tầng thủy lợi hiện hữu đang tiệm cận giới hạn thích ứng.

Độ tin cậy của mô hình đánh giá được khẳng định khi kết quả phân vùng không gian hoàn toàn tương đồng với hiện trạng ngập úng và thiếu nước được ghi nhận qua khảo sát thực địa. Đáng chú ý, sự khác biệt phi tuyến giữa các kịch bản SSP2-4.5 và SSP1-1.9 phản ánh tính chất phức tạp của các hệ thống khí hậu nhiệt đới ven biển, nơi biến động mưa cực đoan ngắn hạn có thể gia tăng ngay cả trong các kịch bản ấm lên toàn cầu ở mức thấp.

Khi so sánh với các công bố trước đây trong cùng khu vực, kết quả của nghiên cứu thể hiện sự tương đồng với Vũ và nnk. (2019), Hoa và nnk. (2025) khi cùng chỉ ra rằng các vùng thấp trũng ven sông và chịu áp lực đô thị hóa cao tại TP. Hồ Chí Minh là những địa bàn chịu rủi ro và tổn thương lớn nhất do biến đổi khí hậu. Tuy nhiên, giá trị khoa học và tính mới của nghiên cứu này nằm ở việc chuyển đổi các tiếp cận từ khung chỉ số tổn thương truyền thống (IPCC, 2007 hay chỉ số Climate Change Vulnerability Index) sang khung đánh giá rủi ro đa hiểm họa tiên tiến theo IPCC AR6. Đồng thời, việc tích hợp dữ liệu kịch bản phát thải thế hệ mới CMIP6 (sử dụng mô hình EC-Earth3-Veg giai đoạn 2041-2060) thay vì các kịch bản cũ cho phép cập nhật bản đồ phân vùng rủi ro khí hậu với độ phân giải không gian chi tiết đến từng phường, mảnh đất nông nghiệp tại TP. Thủ

Đức. Điều này không chỉ củng cố độ chính xác của các dự báo định lượng mà còn cung cấp một quy trình phương pháp luận chuẩn hóa (tích hợp GIS - CMIP6) có giá trị tham chiếu cao cho các đánh giá rủi ro nông nghiệp đô thị tại Việt Nam và quốc tế.

Từ góc độ thực tiễn, bản đồ phân vùng rủi ro hỗ trợ chính quyền địa phương tối ưu hóa việc phân bổ nguồn lực, đặc biệt trong quy hoạch hệ thống đê bao và hạ tầng tưới tiêu. Đối với cấp độ nông hộ, các đánh giá này là cơ sở định hướng để chuyển đổi cơ cấu cây trồng và áp dụng các mô hình nông nghiệp thông minh với khí hậu, qua đó bảo vệ sinh kế trước sự gia tăng của các cực trị thời tiết. Ngoài ra, khung phương pháp luận được thiết lập có thể chuyển giao, áp dụng cho các vùng nông nghiệp đô thị có điều kiện sinh thái - thủy văn tương đồng.

Mặc dù vậy, nghiên cứu vẫn tồn tại một số giới hạn nhất định. Thứ nhất, việc sử dụng bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2022 có thể chưa phản ánh kịp tốc độ mất đất nông nghiệp do quá trình đô thị hóa nhanh chóng tại khu vực, dẫn đến nguy cơ sai lệch về quy mô diện tích phơi nhiễm thực tế. Thứ hai, mô hình hiện tại chủ yếu lượng hóa các biến số tự nhiên, chưa tích hợp đầy đủ các yếu tố động lực học kinh tế - xã hội (như chính sách chuyển đổi nghề hay năng lực thích ứng tự phát của cộng đồng). Thứ ba, mặc dù các điểm khảo sát đã bao quát hầu hết các vùng sản xuất nông nghiệp tại địa bàn nghiên cứu, quy mô mẫu (N = 32) còn hạn chế. Bên cạnh đó, việc sử dụng kịch bản từ một mô hình khí hậu đơn lẻ (EC-Earth3-Veg) cùng phương pháp nội suy IDW khi chưa qua kiểm định chéo có thể gia tăng độ bất định không gian cho bản đồ tính dễ bị tổn thương.

Để khắc phục các hạn chế này, các nghiên cứu tiếp theo cần khai thác chuỗi dữ liệu viễn thám đa thời gian nhằm cập nhật lớp phủ thực vật, kết hợp tích hợp mô hình biến động sử dụng đất động với chuỗi dữ liệu khí tượng thủy văn nhằm dự báo rủi ro khí hậu theo độ phân giải thời gian chi tiết hơn (ngày, tháng, mùa). Ngoài ra, áp dụng các kỹ thuật kiểm định chéo với các chỉ số thống kê sai số để đánh giá và hiệu chỉnh độ chính xác của phương pháp nội suy. Cuối cùng, sử dụng tập hợp đa mô hình khí hậu (Multi-model Ensemble) thuộc CMIP6 nhằm giải quyết độ bất định giữa các mô hình, kết hợp phân tích độ nhạy Monte Carlo để định lượng sự lan truyền sai số qua các bước tích hợp dữ liệu.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã lượng hóa và phân vùng thành công mức độ rủi ro khí hậu đối với sản xuất nông nghiệp tại TP. Thủ Đức thông qua việc tích hợp khung đánh giá của IPCC và công nghệ GIS. Kết quả trọng tâm khẳng định rủi ro mang tính phân hóa không gian rõ rệt; trong đó, các khu vực ven sông (Long Phước, Long Bình, Trường Thạnh) đối mặt với rủi ro cao nhất do sự cộng hưởng của hiểm họa ngập triều và nắng nóng, đặc biệt trầm trọng dưới kịch bản phát thải cao (SSP5-8.5). Đóng góp chính của bài báo là thiết lập bộ bản đồ rủi ro không gian tổng hợp, cung cấp công cụ hỗ trợ quyết định trực quan giúp chính quyền địa phương tối ưu hóa quy hoạch sử dụng đất, ưu tiên đầu tư hạ tầng thủy lợi và định hướng canh tác bền vững.

Hạn chế chính của nghiên cứu nằm ở cỡ mẫu khảo sát còn khiêm tốn ($N = 32$) và phương pháp nội suy IDW chưa được kiểm định chéo. Để nâng cao độ chính xác trong các nghiên cứu tiếp theo, cần mở rộng cỡ mẫu khảo sát nông hộ, áp dụng các phương pháp nội suy nâng cao (như Co-Kriging hoặc Regression Kriging), đồng thời kết hợp với các mô hình khí hậu chi tiết hóa. Ngoài ra, để đáp ứng bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng, cần tích hợp chuỗi dữ liệu viễn thám đa thời gian nhằm cập nhật liên tục các biến động của quỹ đất nông nghiệp, qua đó nâng cao toàn diện độ chính xác của các kịch bản đánh giá rủi ro. Đồng thời, tích hợp mô hình biến động sử dụng đất động với chuỗi dữ liệu khí tượng thủy văn cho phép dự báo rủi ro thiên tai theo độ phân giải thời gian chi tiết (ngày, tháng, mùa).

Đóng góp của các tác giả

Nguyễn Duy Liêm - xây dựng ý tưởng nghiên cứu, lựa chọn phương pháp nghiên cứu, phân tích và đánh giá kết quả, viết bản thảo bài báo, chỉnh sửa bài báo; Phạm Nguyễn Minh Khôi - Điều tra, khảo sát; xử lý số liệu, phân tích, trực quan hóa số liệu, phân tích và đánh giá kết quả.

Tài liệu tham khảo

- Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2021). *Kịch bản biến đổi khí hậu*. NXB Tài nguyên Môi trường và Bản đồ Việt Nam.
- Chí, L. (2024). *Lãnh đạo TP Thủ Đức gấp gờ, đối thoại với cán bộ, hội viên nông dân*. <https://hcmcpv.org.vn/tin-tuc/lanh-dao-tp->

[thu-duc-gap-go-doi-thoai-voi-can-bo-hoi-vien-nong-dan-1491929180](https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100110)

- Das, S., Ghosh, A., Hazra, S., Ghosh, T., Safra de Campos, R., & Samanta, S. (2020). Linking IPCC AR4 & AR5 frameworks for assessing vulnerability and risk to climate change in the Indian Bengal Delta. *Progress in Disaster Science*, 7, 100110. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100110>
- David, O. G., Jesús, A. C. T., Alejandro, O. S., & Heidy, V. C. B. (2021). Agricultural Drought Risk Assessment: A Spatial Analysis of Hazard, Exposure, and Vulnerability in Zacatecas, Mexico. *Water*, 13(10), 1431. <https://doi.org/10.3390/w13101431>
- Garner, G. G., Hermans, T., Kopp, R. E., Slangen, A. B. A., Edwards, T. L., Levermann, A., Nowicki, S., Palmer, M. D., Smith, C., Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., ... Pearson, B. (2021). *IPCC AR6 sea-level rise projections (Version 20210809)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914709>
- Hoa, T. M. N., Bao, P. N., Anh, T. H., Tung, V. N., & Viet, T. T. (2025). Assessment of climate change vulnerability on urban agriculture: A Case study for crop sector in Ho Chi Minh City, Vietnam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1540, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1540/1/012013>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution to Working Group I to the fourth assessment report of Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, & H. Miller (eds.)). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A.

- Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jamshidi, O., Asadi, A., Kalantari, K., Azadi, H., & Scheffran, J. (2019). Vulnerability to climate change of smallholder farmers in the Hamadan province, Iran. *Climate Risk Management*, 23, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2018.06.002>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*.
- Nam, B. (2023). *Nông dân Thủ Đức linh hoạt chuyển dịch cơ cấu nông nghiệp đô thị*. <https://danviet.vn/giai-phap-khuyen-khich-chuyen-dich-co-cau-nong-nghiep-do-thi-20231003222543433.htm>
- Nguyen, K. A., Liou, Y. A., & Terry, J. P. (2019). Vulnerability of Vietnam to typhoons: A spatial assessment based on hazards, exposure and adaptive capacity. *Science of The Total Environment*, 682, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.069>
- O'Neill, B., Aalst, M. van, Ibrahim, Z. Z., Ford, L. B., Bhadwal, S., Buhaug, H., Diaz, D., Frieler, K., Garschagen, M., Magnan, A., Midgley, G., Mirzabaev, A., Thomas, A., & Warren, R. (2022). Key Risks across Sectors and Regions. In H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 2411–2538). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.025>
- Parker, L., Bourgoin, C., Martinez, A. V., & Läderach, P. (2019). Vulnerability of the agricultural sector to climate change: The development of a pan-tropical Climate Risk Vulnerability Assessment to inform sub-national decision making. *PLOS ONE*, 14(3), e0213641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213641>
- Pham, T. T. N., Nong, D., Archana, R. S., & Matthias, G. (2020). Vulnerability assessment of households to flash floods and landslides in the poor upland regions of Vietnam. *Climate Risk Management*, 28, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100215>
- Severe Weather Information Centre. (2024). *Severe Weather Observations*. <https://severeweather.wmo.int/observation.html>
- Tran, A. Q., Ngo, D. T., Espagne, E., & Trinh, T. L. (2023). A 10-km CMIP6 downscaled dataset of temperature and precipitation for historical and future Vietnam climate. *Scientific Data*, 10(1), 257. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02159-2>
- Trần, C. L. (2024). *Thành phố thông minh này sẽ làm nông nghiệp đô thị trong không gian hẹp ra sao khi đất nông nghiệp cạn kiệt?* <https://danviet.vn/tpthu-duc-lam-nong-nghiep-do-thi-ra-sao-khi-dat-nong-nghiep-can-dan-20240725110838537.htm>
- UNDP, & FAO. (2021). *Vulnerability and risk assessments of agriculture sectors in Viet Nam*.
- Ủy ban Nhân dân TP. Hồ Chí Minh. (2022). *Thuyết minh quy hoạch chung TP. Thủ Đức thuộc thành phố Hồ Chí Minh đến năm 2040*.
- Vũ, T. L., Võ, H. L., Hồ, M. D., & Nguyễn, K. L. (2019). Phân vùng tổn thương do biến đổi khí hậu đến các huyện ngoại thành của Thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp Chí Nông Nghiệp và Phát Triển*, 18(5), 98–107. <https://doi.org/10.52997/jad.12.05.2019>