

DOI:10.22144/ctujos.2025.068

ĐÁNH GIÁ TÍNH DỄ BỊ TỔN THƯƠNG DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA XÂM NHẬP MẶN TRÊN CÁC MÔ HÌNH CANH TÁC NÔNG NGHIỆP TẠI TỈNH SÓC TRĂNG NĂM 2023

Nguyễn Kim Khoa^{1,3}, Nguyễn Thị Hồng Điệp^{2*}, Nguyễn Trọng Nguyễn² và Trần Thị Bích Liên²

¹Nghiên cứu sinh ngành Môi trường đất và nước, Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Trường Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Trường Đại học Cần Thơ, Việt Nam

³Trường Cao đẳng Kinh tế Kỹ thuật Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): nthdiep@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 02/01/2025

Sửa bài (Revised): 07/04/2025

Duyệt đăng (Accepted): 25/04/2025

Title: Assessment of vulnerability to saltwater intrusion impacts on agricultural farming systems in Soc Trang province in 2023

Author(s): Nguyen Kim Khoa^{1,3}, Nguyen Thi Hong Diep^{2*}, Nguyen Trong Nguyen² and Tran Thi Bich Lien²

Affiliation(s): ¹PhD Candidate in Soil and Water Environment, College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam; ²College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Vietnam; ³Can Tho College of Economics and Technology, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá tính dễ bị tổn thương do xâm nhập mặn trên các mô hình canh tác nông nghiệp tại tỉnh Sóc Trăng. Dữ liệu vệ tinh Sentinel-1A được sử dụng kết hợp với thuật toán Random Forest để phân loại hiện trạng sử dụng đất nông nghiệp. Trên cơ sở đó, 10 nông hộ được tiến hành khảo sát nhằm đánh giá mức độ tổn thương theo khung lý thuyết của IPCC. Nghiên cứu đã xác định được 10 loại hình sử dụng đất nông nghiệp tại Sóc Trăng. Kết quả đánh giá tính dễ bị tổn thương cho thấy các mô hình lúa hai vụ, lúa ba vụ và cây hàng năm có mức tổn thương cao. Trong khi đó, mô hình lúa - tôm và cây lâu năm có mức tổn thương trung bình và thấp. Kết quả nghiên cứu cung cấp thông tin khoa học về tính dễ bị tổn thương của các mô hình canh tác trước xâm nhập mặn, làm cơ sở cho việc đề xuất các biện pháp thích ứng phù hợp tại địa phương.

Từ khóa: IPCC, Sentinel-1, Sóc Trăng, tổn thương, xâm nhập mặn

ABSTRACT

The study was conducted to assess the vulnerability of agricultural production systems to saltwater intrusion in Soc Trang. Sentinel-1A satellite imagery was integrated with the Random Forest algorithm to classify land use. A survey of 10 farming households was conducted to evaluate vulnerability levels based on the IPCC framework. The classification results identified 10 agricultural land-use types. The vulnerability assessment indicated that double-cropped rice, triple-cropped rice, and annual crops are highly vulnerable. In contrast, the rice-shrimp system and perennial crops exhibit moderate and low vulnerability, respectively, due to their higher adaptive capacity for saline conditions. The findings provide essential scientific insights into the vulnerability of different farming systems to saltwater intrusion, serving as a foundation for developing targeted adaptation strategies and zoning measures to mitigate impacts at the local level.

Keywords: IPCC, Sentinel-1, saltwater intrusion, Soc Trang, vulnerability

1. GIỚI THIỆU

Biến đổi khí hậu là sự thay đổi đáng kể của khí hậu khu vực hoặc toàn cầu trong thời gian dài do các yếu tố tự nhiên hoặc hoạt động của con người tác động làm thay đổi thành phần của khí quyển (Salonen & Reiser, 2023), bao gồm những biến đổi về nhiệt độ, độ ẩm, áp suất khí quyển, lượng mưa, gió, độ mặn (McMichael., 2013). Một trong những hệ quả quan trọng của biến đổi khí hậu là sự thay đổi độ mặn của môi trường sống trên toàn cầu, kết hợp với nhiệt độ tăng cao, nhu cầu nước gia tăng và lượng mưa giảm (IPCC, 2014; Lee et al., 2022). Trong bối cảnh này, nông nghiệp ven biển đóng vai trò quan trọng đối với an ninh lương thực và kinh tế - xã hội, đặc biệt khi hàng triệu người đang sinh sống tại các vùng ven biển (Tarolli et al., 2023).

Xâm nhập mặn là quá trình nước biển di chuyển vào các tầng chứa nước ngọt trong đất liền, xảy ra do các yếu tố tự nhiên, biến đổi khí hậu và/hoặc hoạt động của con người (Ivkovic et al., 2012). Quá trình này trở nên nghiêm trọng hơn khi có sự khai thác nước ngầm quá mức, sử dụng nguồn nước mặt không hợp lý và ô nhiễm nguồn nước. Điều này ảnh hưởng tiêu cực đến sản xuất nông nghiệp ven biển, làm thay đổi độ mặn của đất, giảm khả năng cung cấp nước tưới và làm suy giảm năng suất cây trồng (Duan, 2016). Xâm nhập mặn còn bị thúc đẩy bởi mực nước biển dâng, lượng mưa giảm, triều cường và các đợt xâm thực do bão gây ra, làm gia tăng độ mặn của nước lợ và làm trầm trọng thêm tác động của hạn hán (Gatdula & Blanco, 2024).

Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) đóng vai trò quan trọng trong phát triển nông nghiệp của Việt Nam, với tổng diện tích canh tác khoảng 4 triệu ha, chiếm hơn 50% sản lượng lúa cả nước và đóng góp 90% tổng kim ngạch xuất khẩu nông sản (General Statistics Office of Vietnam, 2021). Theo Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam, trong kịch bản mực nước biển dâng 100 cm, khoảng 38,9% diện tích tại ĐBSCL sẽ bị ngập lụt. Trong đó, các tỉnh Kiên Giang, Hậu Giang, Sóc Trăng và Cà Mau có nguy cơ ngập cao nhất, dao động từ 50,7% đến 80,62% diện tích tự nhiên (MONRE, 2020). Do địa hình thấp, ĐBSCL đặc biệt dễ bị tổn thương trước xâm nhập mặn, tác động từ biến đổi dòng chảy thượng nguồn, nước biển dâng, triều cường và hạn hán (Wassmann et al., 2004; Tran & Nguyen, 2014; Pham et al., 2019).

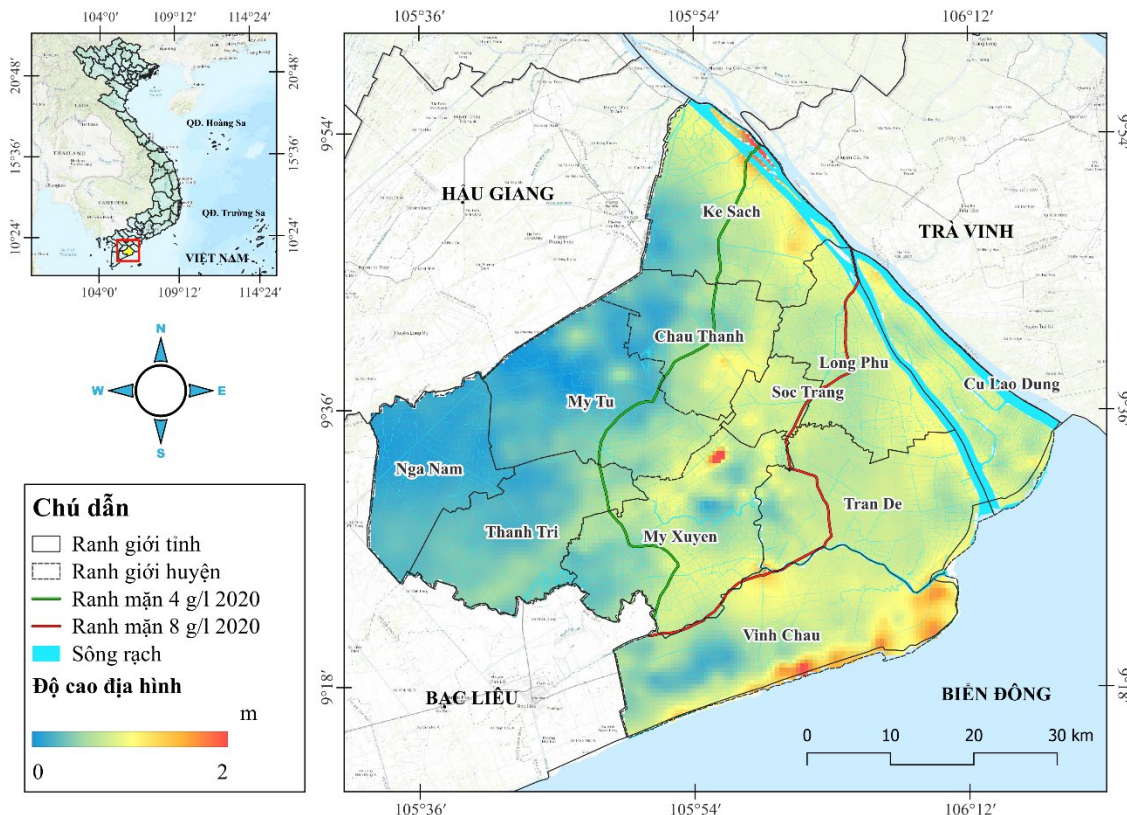
Năm 2020, Sóc Trăng và Trà Vinh đã ban bố tình trạng khẩn cấp khi hạn hán và xâm nhập mặn ảnh hưởng đến hơn 100.000 ha đất trồng lúa, với nước

mặn xâm nhập sâu từ 60 đến 70 km vào đất liền (MARD, 2020). Sự xâm nhập mặn ngày càng gia tăng đã làm suy giảm diện tích đất canh tác, đặc biệt là vùng trồng lúa và nuôi tôm, gây thiệt hại kinh tế nghiêm trọng (Sebastian et al., 2016).

Trong các nghiên cứu trước đây, việc đánh giá tác động của xâm nhập mặn đối với Đồng bằng sông Cửu Long dưới các kịch bản tác động khác nhau đã được thực hiện, chủ yếu tập trung vào các nguyên nhân và ảnh hưởng của xâm nhập mặn đối với đời sống và sản xuất (Nguyen, 2022; Thach et al., 2023). Ở các nghiên cứu, ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đối với sản xuất nông nghiệp được đặc biệt quan tâm, do tần suất, quy mô và thời gian tác động của biến đổi khí hậu (IPCC, 2001; IPCC, 2007). Việc đánh giá mức độ dễ bị tổn thương có ý nghĩa quan trọng nhằm xác định mức độ rủi ro hiện tại và tiềm tàng đối với ngành nông nghiệp ven biển (Gatdula & Blanco, 2024). Theo khung đánh giá của IPCC (2007), tính dễ bị tổn thương được xác định thông qua ba hợp phần: độ phơi nhiễm, độ nhạy và khả năng thích ứng. Các hệ thống có mức phơi nhiễm và/hoặc độ nhạy cao nhưng khả năng thích ứng thấp sẽ dễ bị tổn thương (Koh, 2011). Nghiên cứu của Hahn et al. (2009) đã đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đối với sinh kế tại Mozambique, trong khi Nguyen et al. (2024) phân tích tính dễ bị tổn thương do xâm nhập mặn tại tỉnh Trà Vinh, cho thấy khả năng ứng dụng và sự phù hợp đa dạng của khung đánh giá tổn thương được đề xuất bởi IPCC trên nhiều khu vực địa lý khác nhau.

Thông tin chi tiết về sử dụng đất trên diện rộng đóng vai trò quan trọng trong quản lý và quy hoạch tài nguyên (Oswald et al., 2020; Benhammou et al., 2022). Trong nhiều thập kỷ, dữ liệu viễn thám thụ động và chủ động đã được ứng dụng rộng rãi trong giám sát tài nguyên. Kể từ năm 2015, dữ liệu Sentinel-2 với độ phân giải cao đã được cung cấp miễn phí từ chương trình Copernicus (Chương trình Quan sát Trái đất của Liên minh Châu Âu). Tuy nhiên, ảnh quang học bị ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết, đặc biệt ở vùng nhiệt đới, gây khó khăn cho việc lập bản đồ sử dụng đất. Do đó, dữ liệu radar khẩu độ tổng hợp (SAR) ngày càng được sử dụng để khắc phục hạn chế này, cung cấp thông tin về cấu trúc, kết cấu thực vật và độ ẩm đất mà không bị ảnh hưởng bởi mây (Vo et al., 2020; Nguyen & Nguyen, 2023). Gần đây, các thuật toán học máy (ML) như support vector machine (SVM), random forest (RF), decision tree (DT) và classification and regression tree (CART) đã được áp dụng để cải thiện độ chính xác trong phân loại lớp phủ đất (Datcu et al., 2020; Hoesser et al., 2020).

Xuất phát từ thực tế trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm lập bản đồ sử dụng đất nông nghiệp tại tỉnh Sóc Trăng năm 2023 bằng dữ liệu Radar Sentinel-1, trên cơ sở đó, nghiên cứu tiến hành đánh giá tính dễ bị tổn thương do xâm nhập mặn theo khung IPCC (2007) đối với các mô hình canh tác nông nghiệp tại địa phương.



Hình 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu tỉnh Sóc Trăng

Địa hình tỉnh Sóc Trăng thấp và tương đối bằng phẳng, với độ cao tuyệt đối dao động từ 0,4 đến 1,5 m và độ dốc trung bình khoảng 45 cm/km chiều dài. Nhìn chung, địa hình có dạng lòng chảo, cao ở khu vực sông Hậu và Biển Đông, thấp dần vào sâu trong đất liền, đặc biệt là ở phía Tây và Tây Bắc (People's Council of Soc Trang Province, 2018). Với vị trí ven biển và nằm cuối nguồn sông Hậu, Sóc Trăng là khu vực dễ bị tổn thương trước tác động của xâm nhập mặn, ảnh hưởng trực tiếp đến đời sống người dân và sản xuất nông nghiệp của địa phương (Le & Nguyen, 2011; Nguyen et al., 2017a; Nguyen et al., 2019).

2.2. Dữ liệu nghiên cứu

Dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu là bộ ảnh Sentinel-1A GRD (Level-1 Ground Range

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

Sóc Trăng nằm ở phía Đông Nam ĐBSCL, với tổng diện tích khoảng 2.300 km² và dân số trung bình 1,32 triệu người (General Statistics Office of Vietnam, 2016) (Hình 1).

Detected) được thu thập trên nền tảng Google Earth Engine từ ngày 1/1/2023 đến 31/12/2023 gồm 24 cảnh ảnh với dải chụp IW, độ phân giải không gian 10 m và hệ quy chiếu WGS 84 Zone 48N (EPSG: 32648). Bộ dữ liệu thu thập trên Google Earth Engine đã được tích hợp tiền xử lý qua 05 bước: (1) áp dụng tệp quỹ đạo, (2) khử nhiễu đường viền, (3) loại bỏ nhiễu nhiệt, (4) hiệu chỉnh bức xạ, (5) hiệu chỉnh địa hình với giá trị được biểu diễn là hệ số tán xạ ngược (σ^0) tính bằng decibel (dB) (Google Earth Engine, 2024).

2.3. Phương pháp thành lập bản đồ hiện trạng sử dụng đất

2.3.1. Tiền xử lý ảnh

Bộ ảnh Sentinel-1A được lọc nhiễu thông thông qua hàm Lee Sigma (3x3) để loại bỏ các điểm nhiễu do quá trình thu thập trên mỗi ảnh (Yommy et al.,

2015) và giới hạn khu vực nghiên cứu bằng dữ liệu shapefile được nhập vào Google Earth Engine.

2.3.2. Tổ hợp kênh ảnh trung bình tháng

Bộ ảnh Sentinel-1A được tính trung bình theo tháng và trích xuất giá trị phân cực đơn (VV) và phân cực đôi (VH) để quan sát sự thay đổi giá trị tán xạ ngược (dB) theo thời gian. Bên cạnh đó, các giá trị nhỏ nhất, lớn nhất, độ lệch cũng được tính toán

để làm đầu vào cho dữ liệu phân loại. Các ảnh sau đó được ghép kênh ảnh thông qua hàm toBands() trên nền tảng Google Earth Engine. Danh sách các kênh ảnh dùng cho phân loại được mô tả ở Bảng 2, có tổng cộng 28 kênh ảnh được sử dụng làm đầu vào cho mô hình phân loại, trong đó các ảnh tháng 07/2023 không được trích xuất do không có ảnh chụp trên khu vực trong khoảng thời gian này.

Bảng 2. Các kênh ảnh sử dụng làm đầu vào cho mô hình phân loại

STT	Kênh ảnh	Mô tả	STT	Kênh ảnh	Mô tả
1	VH_1	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 1 trên phân cực VH	15	VV_4	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 4 trên phân cực VV
2	VH_2	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 2 trên phân cực VH	16	VV_5	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 5 trên phân cực VV
3	VH_3	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 3 trên phân cực VH	17	VV_6	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 6 trên phân cực VV
4	VH_4	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 4 trên phân cực VH	18	VV_8	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 8 trên phân cực VV
5	VH_5	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 5 trên phân cực VH	19	VV_9	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 9 trên phân cực VV
6	VH_6	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 6 trên phân cực VH	20	VV_10	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 10 trên phân cực VV
7	VH_8	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 8 trên phân cực VH	21	VV_11	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 11 trên phân cực VV
8	VH_9	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 9 trên phân cực VH	22	VV_12	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 12 trên phân cực VV
9	VH_10	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 10 trên phân cực VH	23	VV _{max}	Giá trị tán xạ ngược lớn nhất trong năm trên phân cực VV
10	VH_11	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 11 trên phân cực VH	24	VV _{min}	Giá trị tán xạ ngược nhỏ nhất trong năm trên phân cực VV
11	VH_12	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 12 trên phân cực VH	25	VV _{max} -VV _{min}	Biên độ dao động trong năm trên phân cực VV
12	VV_1	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 1 trên phân cực VV	26	VH _{max}	Giá trị tán xạ ngược lớn nhất trong năm trên phân cực VH
13	VV_2	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 2 trên phân cực VV	27	VH _{min}	Giá trị tán xạ ngược nhỏ nhất trong năm trên phân cực VH
14	VV_3	Giá trị tán xạ ngược trung bình tháng 3 trên phân cực VV	28	VH _{max} -VH _{min}	Biên độ dao động trong năm trên phân cực VH

2.3.3. Phân loại có giám sát

Trong nghiên cứu, thuật toán Random Forest được sử dụng để phân loại hiện trạng sử dụng đất tại khu vực nghiên cứu, đây là một phương pháp phân loại phi tham số có kiểm soát, dựa trên học máy và đã được áp dụng hiệu quả trong phân loại trên dữ liệu vệ tinh đa thời gian (Jin et al., 2018). So với các thuật toán phân loại học máy khác như CART (Classification and Regression Trees), SVM (Support Vector Machine), kNN (k-Nearest Neighbors) và MLC (Maximum Likelihood Classification), Random Forest đã đạt được kết quả

tốt trong nhiều nghiên cứu khác nhau (Abdel-Rahman et al., 2013; Praticò et al., 2021).

Random Forest là một tập hợp cây quyết định (decision trees), trong đó mỗi cây được xem xét đánh giá độc lập để xác định lớp mục tiêu của từng pixel (Dahhani et al., 2022). Các thông số được thiết lập cho thuật toán Random Forest bao gồm: (1) số lượng cây - 800, (2) số lượng biến trên mỗi lần chia - 22, (3) tỷ lệ túi - 0,9, (4) số lượng nút tối đa - null, (5) số lượng lá tối thiểu - 1 và (6) số hạt - 0 (Sun & Ongsomwang, 2023).

2.3.4. *Đánh giá độ tin cậy*

Trong nghiên cứu này, ma trận sai số được sử dụng để tính toán mức độ phù hợp giữa kết quả phân loại với dữ liệu thực địa theo 02 thông số: (1) độ chính xác toàn cục và (2) hệ số Kappa (Islami et al., 2022).

$T = \text{Số điểm khảo sát đúng với kết quả phân loại} / \text{Tổng số điểm khảo sát}$ (1)

$$K = \frac{(T-E)}{(1-E)} \quad (2)$$

Trong đó: T là độ chính xác toàn cục (%), E là độ chính xác ngẫu nhiên (%), K là hệ số Kappa.

Theo Anderson et al. (1976), độ tin cậy của kết quả phân loại lớp phủ/sử dụng đất phải lớn hơn 80%, và được đánh giá theo Bảng 3 (Congalton & Green, 1999).

Bảng 3. Khoảng giá trị đánh giá kết quả phân loại

STT	Độ chính xác	Giá trị Kappa
1	Kém	$K < 0,2$
2	Trung bình - kém	$0,2 \leq K < 0,4$
3	Trung bình	$0,4 \leq K < 0,6$
4	Tốt	$0,6 \leq K < 0,8$
5	Rất tốt	$0,8 \leq K < 1,0$

Số lượng mẫu để đánh giá độ tin cậy được tính toán theo công thức cỡ mẫu của Cochran (1977) (3). Bộ dữ liệu điểm mẫu đánh giá độ tin cậy gồm 385 điểm, được phân bố ngẫu nhiên tại khu vực nghiên cứu.

$$n = \frac{Z^2 \cdot p(1-p)}{e^2} \quad (3)$$

Trong đó: n là cỡ mẫu, Z là giá trị ngưỡng của phân phối chuẩn $z = 1,96$ ứng với độ tin cậy 95%, p là xác suất lựa chọn 5%.

2.4. *Đánh giá tính dễ bị tổn thương*

Phỏng vấn nông hộ

Nghiên cứu đã tiến hành phỏng vấn 100 nông hộ thuộc 05 mô hình canh tác nông nghiệp chịu ảnh hưởng của xâm nhập mặn nhằm thu thập thông tin về thực trạng sản xuất, khó khăn và khả năng thích ứng của các nông hộ trong điều kiện biến đổi môi trường. Việc xác định số lượng và cơ cấu mẫu được xây dựng dựa trên mục tiêu nghiên cứu, mức độ phổ biến của các mô hình canh tác trong vùng nghiên cứu và ý kiến tư vấn của cán bộ chuyên môn tại địa phương nhằm tập trung vào các khu vực bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn. Trong đó, mô hình cây lâu năm (bưởi, vú sữa, dừa) chiếm số lượng lớn nhất

với 35 hộ, tiếp theo là mô hình rau màu (dưa hấu, sả, mía) với 20 hộ. Mô hình lúa – tôm được phỏng vấn 10 hộ, trong khi lúa 2 vụ và lúa 3 vụ lần lượt chiếm 20 hộ và 15 hộ.

Để phân tích mức độ dễ bị tổn thương trên các mô hình canh tác nông nghiệp do xâm nhập mặn, nghiên cứu đã sử dụng chỉ số tổn thương được định nghĩa bởi Ủy ban liên chính phủ về biến đổi khí hậu (IPCC). Trong đó, mức độ tổn thương là chỉ số tổng hợp được đánh giá dựa trên 03 chỉ số thành phần gồm độ phơi nhiễm, độ nhạy cảm và khả năng thích ứng (IPCC, 2007). Việc định lượng các biến thành phần được thực hiện dựa trên Bảng 4, trong đó các biến đánh giá mức độ được đo lường bằng thang đo Likert 5 mức, với giá trị từ 1 đến 5.

Độ phơi nhiễm

Chỉ số phơi nhiễm (Exposure - E) trong nghiên cứu thể hiện mức độ tác động của xâm nhập mặn đến hệ thống canh tác nông nghiệp. Bộ chỉ số này bao gồm ba nhóm biến phụ: độ mặn, hiện tượng thời tiết và diện tích bị ảnh hưởng, với tổng cộng tám biến thành phần, bao gồm: độ mặn, thời gian mặn, phân cấp độ mặn, thời gian khô hạn, phân cấp khô hạn, độ sâu ngập và tổng thể diện tích đất nông nghiệp bị phơi nhiễm (Le, 2017; Nguyen & Duong, 2018; Nguyen et al., 2023; Nguyen et al., 2024b; Nguyen et al., 2024a).

Chỉ số phơi nhiễm có mối quan hệ tỷ lệ thuận với mức độ tổn thương. Khi giá trị chỉ số càng tiến gần 1,0, mức độ ảnh hưởng càng cao, cho thấy hệ thống nông nghiệp dễ bị tổn thương hơn trước tác động của xâm nhập mặn. Ngược lại, giá trị càng thấp, mức độ tổn thương càng giảm (Gallopín, 2006).

Độ nhạy cảm

Độ nhạy cảm (Sensitivity - S) phản ánh mức độ dễ bị ảnh hưởng của các yếu tố khi xảy ra xâm nhập mặn. Chỉ số này bao gồm hai nhóm biến phụ: biến xã hội và biến sinh kế. Nhóm biến xã hội gồm năm biến thành phần: (1) số lượng người dân làm nông nghiệp, (2) số thành viên thuộc nhóm yếu thế, (3) số hộ nghèo, (4) mức độ tác động của xâm nhập mặn, (5) khả năng đáp ứng nhu cầu nước tưới. Nhóm biến sinh kế gồm hai biến thành phần: (1) thu nhập từ nông hộ và (2) sản lượng từ sản xuất nông nghiệp (Le, 2017; Nguyen & Duong, 2018; Nguyen et al., 2023; Nguyen et al., 2024b; Nguyen et al., 2024a).

Chỉ số độ nhạy cảm có tương quan tỉ lệ thuận với tính tổn thương, khi chỉ số này có giá trị càng tiến về 1,0 nghĩa là mức độ bị ảnh hưởng bởi tổn thương càng cao và ngược lại (Luers, 2005).

Khả năng thích ứng

Khả năng thích ứng (Adaptive Capacity - AC) là tập hợp các yếu tố điều chỉnh trong hệ thống con người, tự nhiên, xã hội và cơ sở hạ tầng nhằm ứng phó với tác động của xâm nhập mặn trong hiện tại và tương lai. Bộ chỉ số khả năng thích ứng được xây dựng gồm bốn nhóm biến phụ: con người, tự nhiên, xã hội và cơ sở hạ tầng, với tổng cộng 16 biến thành

phần (Le, 2017; Nguyen & Duong, 2018; Nguyen et al., 2023; Nguyen et al., 2024b; Nguyen et al., 2024a).

Khả năng thích ứng có mối tương quan tỷ lệ nghịch với mức độ tổn thương. Khi giá trị chỉ số này càng tiến gần 1,0 thì khả năng thích ứng càng cao, đồng nghĩa với mức độ bị tổn thương càng thấp và ngược lại (Luers, 2005).

Bảng 4. Bộ chỉ số đánh giá tính dễ bị tổn thương

Biến chính	Biến phụ	Biến thành phần	Đơn vị
Độ phơi nhiễm (E)	Độ mặn (E1)	Độ mặn	g/l
		Thời gian mặn	tháng/năm
		Phân cấp độ mặn trong năm	Mức độ
	Hiện tượng thời tiết (E2)	Thời gian khô hạn	tháng/năm
		Phân cấp khô hạn trong năm	Mức độ
		Độ sâu ngập	cm
Độ nhạy cảm (S)	Diện tích (E3)	Diễn biến thiên tai	Mức độ
		Diện tích bị ảnh hưởng	ha
		Số lượng người dân làm nông nghiệp	Người
	Xã hội (S1)	Thành viên thuộc nhóm yếu thế	Người
		Hộ nghèo	Xếp loại
		Mức độ tác động của xâm nhập mặn	Mức độ
Khả năng thích ứng (AC)	Sinh kế (S2)	Khả năng đáp ứng nhu cầu nước tưới	%
		Thu nhập từ nông hộ	Triệu đồng
		Sản lượng từ sản xuất nông nghiệp	Tấn/năm/ha
	Con người (AC1)	Độ tuổi chủ hộ	Tuổi
		Thời gian nông hộ sinh sống tại địa phương	Năm
		Trình độ học vấn	Mức độ
Khả năng thích ứng (AC)	Tự nhiên (AC2)	Nhận thức của nông hộ về xâm nhập mặn	Mức độ
		Tổ chức ở địa phương về hoạt động sản xuất nông nghiệp	Có/không
		Mức độ chia sẻ kiến thức về xâm nhập mặn	Mức độ
	Xã hội (AC3)	Khả năng tiếp cận nguồn thông tin chính thống	Mức độ
		Diện tích canh tác chịu được tác động xâm nhập mặn	Ha
		Chính sách hỗ trợ giảm thiểu do tác động xâm nhập mặn	Có/không
	Cơ sở hạ tầng (AC4)	Số đợt tập huấn về xâm nhập mặn cho nông nghiệp hàng năm	Số lần/năm
		Nhận thức của nông hộ về tập huấn nông nghiệp	Mức độ
		Số tiền vay để phục vụ cho canh tác nông nghiệp	Triệu đồng
		Mức độ đáp ứng của tiền vay cho hoạt động canh tác	Mức độ

Chuẩn hóa số liệu

Giá trị chỉ số của các biến thành phần được tính toán dựa trên số liệu thu thập từ phiếu điều tra nông hộ và được chuẩn hóa trước khi tính toán chỉ số tổn thương (IPCC, 2007). Quá trình chuẩn hóa giúp đưa

các giá trị định lượng về cùng một thang đo, đảm bảo tính nhất quán khi so sánh giữa các biến. Giá trị chỉ số chuẩn hóa của các biến dao động trong khoảng từ 0 đến 1, được thực hiện theo công thức (4):

$$Y = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

Trong đó: Y là giá trị chuẩn hóa của bộ biến thành phần tại nông hộ i, X là giá trị thực của biến thành phần tại nông hộ i, $X_{\max}$ và $X_{\min}$ là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của biến thành phần trên tất cả nông hộ.

Tính toán và phân cấp tổn thương

Theo IPCC (2007), tính dễ bị tổn thương là một hàm toán học (5) được ước tính dựa trên 03 yếu tố độ phơi nhiễm, độ nhạy cảm và khả năng thích ứng. Trong nghiên cứu này, giá trị tổn thương được tính toán dựa trên các biến chính (cấp 1) theo công thức (6) (Swami & Parthasarathy, 2020):

$$V = f(E, S, AC) \quad (5)$$

$$V = E + S + (1 - AC) \quad (6)$$

Trong đó: V là chỉ số tổn thương, E là độ phơi nhiễm, S là độ nhạy cảm và AC là khả năng thích ứng.

Theo nghiên cứu của Nguyen et al. (2017b), mức độ tổn thương được phân thành bốn cấp: thấp, trung

binh, cao, rất cao. Các ngưỡng giá trị tương ứng với từng cấp độ tổn thương được trình bày chi tiết ở Bảng 5.

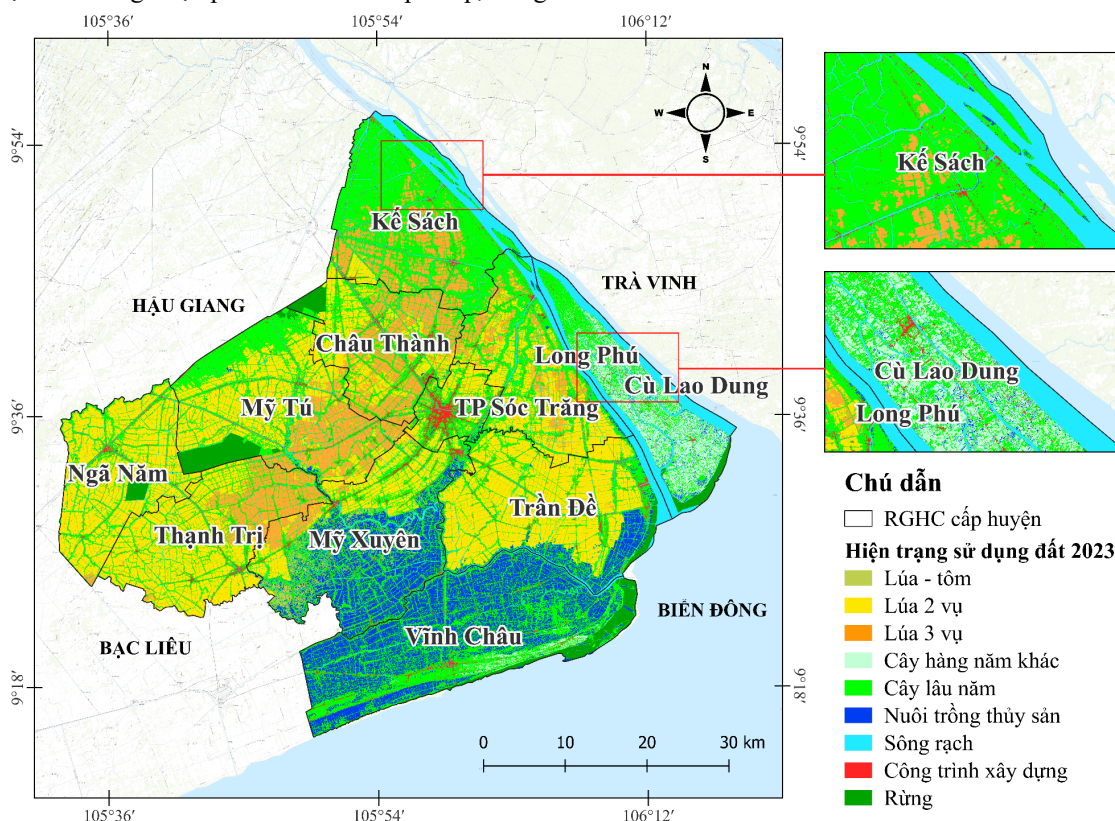
Bảng 5. Phân cấp mức độ tổn thương

STT	Mức độ tổn thương	Giá trị
1	Thấp	0 - 0,25
2	Trung bình	0,25 - 0,5
3	Cao	0,5 - 0,75
4	Rất cao	0,75 - 1,0

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiện trạng sử dụng đất nông nghiệp tỉnh Sóc Trăng năm 2023

Kết quả phân loại được đánh giá cho thấy độ tin cậy cao, với độ chính xác toàn cục đạt 93,60% và hệ số Kappa đạt 0,92, khẳng định mức độ phù hợp của kết quả phân loại so với hiện trạng thực tế. Hiện trạng sử dụng đất tỉnh Sóc Trăng năm 2023 được phân loại thành 10 hiện trạng, bao gồm: lúa - tôm, lúa 2 vụ, lúa 3 vụ, cây hàng năm khác, cây lâu năm, nuôi trồng thủy sản, sông rạch, đất công trình xây dựng và rừng (Hình 2).



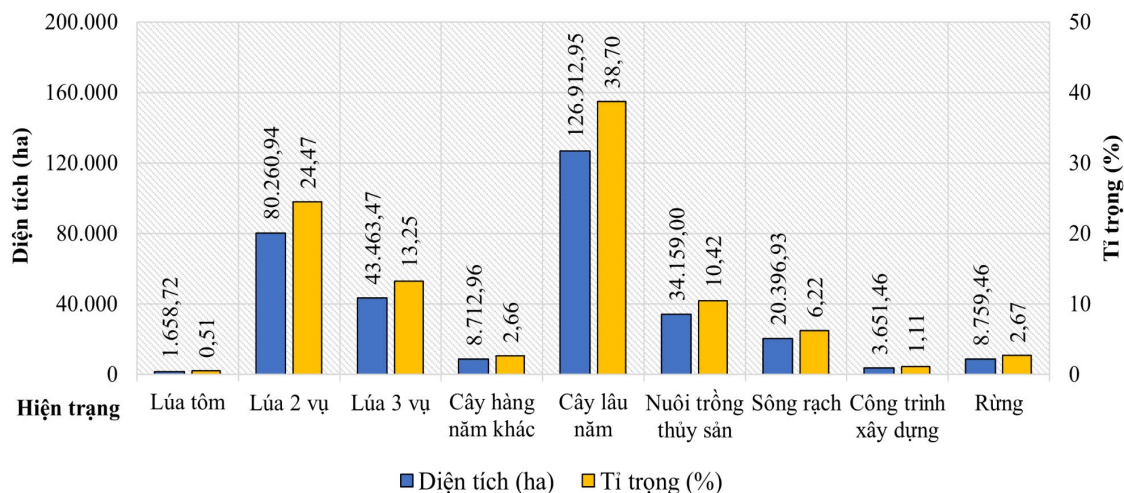
Hình 2. Bản đồ hiện trạng sử dụng đất tỉnh Sóc Trăng năm 2023

Trong hiện trạng sử dụng đất tỉnh Sóc Trăng năm 2023, cây lâu năm là loại hình canh tác chiếm diện tích lớn nhất, với 126.912,95 ha (38,70% diện tích tự nhiên) (Hình 3). Loại cây trồng này phân bố rộng khắp các huyện, thành phố nhưng tập trung nhiều nhất ở huyện Kế Sách và Cù Lao Dung. Các loại cây trồng chủ lực bao gồm sầu riêng, chôm chôm, xoài, mít, bưởi, được canh tác quanh năm (Soc Trang Provincial Statistics Office, 2023). Trong đó, diện tích cây lâu năm tập trung nhiều dọc tuyến sông Hậu, tại các xã Xuân Hòa, An Lạc Thôn, An Lạc Tây, Phong Nẫm, Nhơn Mỹ, Thới An Hội, An Mỹ, thị trấn Kế Sách và phía Bắc Cù Lao Dung.

Lúa là loại hình sử dụng đất lớn thứ hai, trong đó lúa 2 vụ có diện tích 80.260,94 ha (24,47%), phân bố chủ yếu tại huyện Trần Đề, Long Phú, thị xã Ngã Năm và một phần các huyện Mỹ Tú, Thạnh Trị, Châu Thành, Mỹ Xuyên, cùng thành phố Sóc Trăng. Lúa 3 vụ chiếm 43.463,47 ha (13,25%), tập trung

chủ yếu tại huyện Kế Sách và một phần các huyện Châu Thành, Mỹ Tú, Thạnh Trị, Mỹ Xuyên. Ngoài ra, lúa – tôm luân canh có diện tích 1.658,70 ha (0,51%), chủ yếu phân bố tại xã Gia Hòa 2 (huyện Mỹ Xuyên).

Bên cạnh đó, đất công trình xây dựng chiếm diện tích 3.631,46 ha (1,11%), tập trung tại các khu vực trung tâm thành phố, thị trấn và các xã/phường đông dân cư. Rừng (bao gồm rừng sản xuất, phòng hộ, đặc dụng) có tổng diện tích 8.759,46 ha (2,67%), chủ yếu phân bố tại các khu vực ven biển thuộc thị xã Vĩnh Châu. Cây hàng năm có diện tích 8.712,96 ha (2,66%), với các loại cây trồng phổ biến như hành tím, củ cải, dưa hấu (Quan et al., 2013). Trong khi đó, nuôi trồng thủy sản tập trung tại các huyện ven biển như Mỹ Xuyên, Cù Lao Dung, Vĩnh Châu và một phần huyện Trần Đề, với tổng diện tích 34.159,00 ha (10,42%).



Hình 3. Thống kê diện tích hiện trạng sử dụng đất tỉnh Sóc Trăng năm 2023

3.2. Kết quả tính toán các chỉ số thành phần

Dựa trên số liệu về độ phơi nhiễm (E), độ nhạy cảm (S) và khả năng thích ứng (AC) có thể thấy mức độ ảnh hưởng của xâm nhập mặn đối với các loại hình sử dụng đất có sự khác biệt rõ rệt (Bảng 6).

Cây lâu năm có độ phơi nhiễm và nhạy cảm thấp nhất ($E = 0,45$, $S = 0,30$), đồng thời có khả năng thích ứng cao nhất ($AC = 0,78$). Điều này cho thấy cây lâu năm ít bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn nhờ đặc tính sinh học cũng như điều kiện canh tác. Cây dừa có khả năng chịu mặn tốt, trong khi các loại cây có múi như sầu riêng, bưởi, xoài thường được trồng ở các khu vực xa biển (Kế Sách), nơi có nguồn nước ngọt ổn định. Mặc dù có thể chịu ảnh hưởng trong

những năm xâm nhập mặn cực đoan, nhưng thời gian nhiễm mặn ngắn cùng hệ thống đê bao bảo vệ tốt giúp hạn chế tác động tiêu cực bởi xâm nhập mặn.

Lúa 2 vụ (> 4 g/l) có độ phơi nhiễm cao nhất ($E = 0,71$) và nhạy cảm lớn ($S = 0,54$), phản ánh mức độ chịu tác động mạnh từ xâm nhập mặn. Dù có hệ thống đê bao hoàn chỉnh giúp kiểm soát một phần ảnh hưởng, nhưng nếu thời gian nhiễm mặn kéo dài, tình trạng khô hạn có thể gây thiếu hụt nguồn nước tưới, làm giảm năng suất cây trồng. Khu vực canh tác lúa 2 vụ (> 4 g/l) phân bố tại Trần Đề, Long Phú – những địa phương có vị trí gần cửa biển và sông Hậu, thường xuyên tiếp xúc với điều kiện xâm nhập mặn cao và kéo dài.

Bảng 6. Chỉ số phơi nhiễm, nhạy cảm và khả năng thích ứng trên từng hiện trạng

STT	Hiện trạng	E	S	AC
1	Cây hàng năm khác	0,68	0,41	0,48
2	Cây lâu năm	0,45	0,30	0,73
3	Lúa 2 vụ (> 4 g/l)	0,71	0,54	0,54
4	Lúa 2 vụ (< 4 g/l)	0,45	0,49	0,51
5	Lúa 3 vụ	0,43	0,41	0,38
6	Lúa - tôm	0,52	0,43	0,69

Lúa 2 vụ (< 4 g/l) có mức độ phơi nhiễm trung bình ($E = 0,45$) nhưng nhạy cảm cao ($S = 0,49$) và khả năng thích ứng thấp ($AC = 0,51$). Điều này cho thấy loại hình canh tác này vẫn chịu ảnh hưởng đáng kể từ xâm nhập mặn, nhất là trong những năm hạn mặn kéo dài. Vùng trồng lúa 2 vụ (< 4 g/l) phân bố ở các huyện vùng trũng (địa hình thấp) của tỉnh như Thạnh Trị, Mỹ Tú, Ngã Năm.

Lúa 3 vụ có mức độ phơi nhiễm và nhạy cảm trung bình ($E = 0,43$, $S = 0,41$) nhưng khả năng thích ứng thấp ($AC = 0,38$). Do canh tác ba vụ mỗi năm, mô hình này đòi hỏi nguồn nước tưới lớn, làm tăng nguy cơ tổn thương khi xâm nhập mặn và khô hạn xảy ra bất ngờ và cực đoan (Ministry of Agriculture and Rural Development, 2010).

Lúa - tôm có độ phơi nhiễm ($E = 0,52$) và nhạy cảm ($S = 0,43$) ở mức trung bình nhưng lại có khả năng thích ứng cao nhất trong nhóm cây lúa ($AC = 0,69$). Điều này phản ánh mô hình canh tác này có sự linh hoạt khi kết hợp giữa nuôi trồng thủy sản và canh tác lúa vụ Đông Xuân sớm (từ tháng 9 đến tháng 12), giúp giảm thiểu tác động tiêu cực của xâm nhập mặn vào thời gian canh tác vụ lúa.

Cây hàng năm có độ phơi nhiễm khá cao ($E = 0,68$), trong đó độ mặn là một biến thành phần quan trọng, chiếm giá trị cao do vị trí canh tác gần biển (Vĩnh Châu, Trần Đề) và bao quanh bởi biển (Cù Lao Dung). Mặc dù cây hàng năm có độ phơi nhiễm cao, nhưng mức độ nhạy cảm của chúng lại thấp ($S = 0,41$) và khả năng thích ứng với điều kiện môi trường là trung bình ($AC = 0,48$). Dù nằm gần biển, loại hình này ít chịu tác động trực tiếp của xâm nhập mặn nhờ sử dụng nguồn nước ngầm để tưới. Tuy nhiên, việc khai thác nước ngầm ngày càng gia tăng làm suy giảm nguồn nước, ảnh hưởng đến sản xuất nông nghiệp (Department of Water Resources Management, 2010).

3.3. Tính dễ bị tổn thương bởi xâm nhập mặn

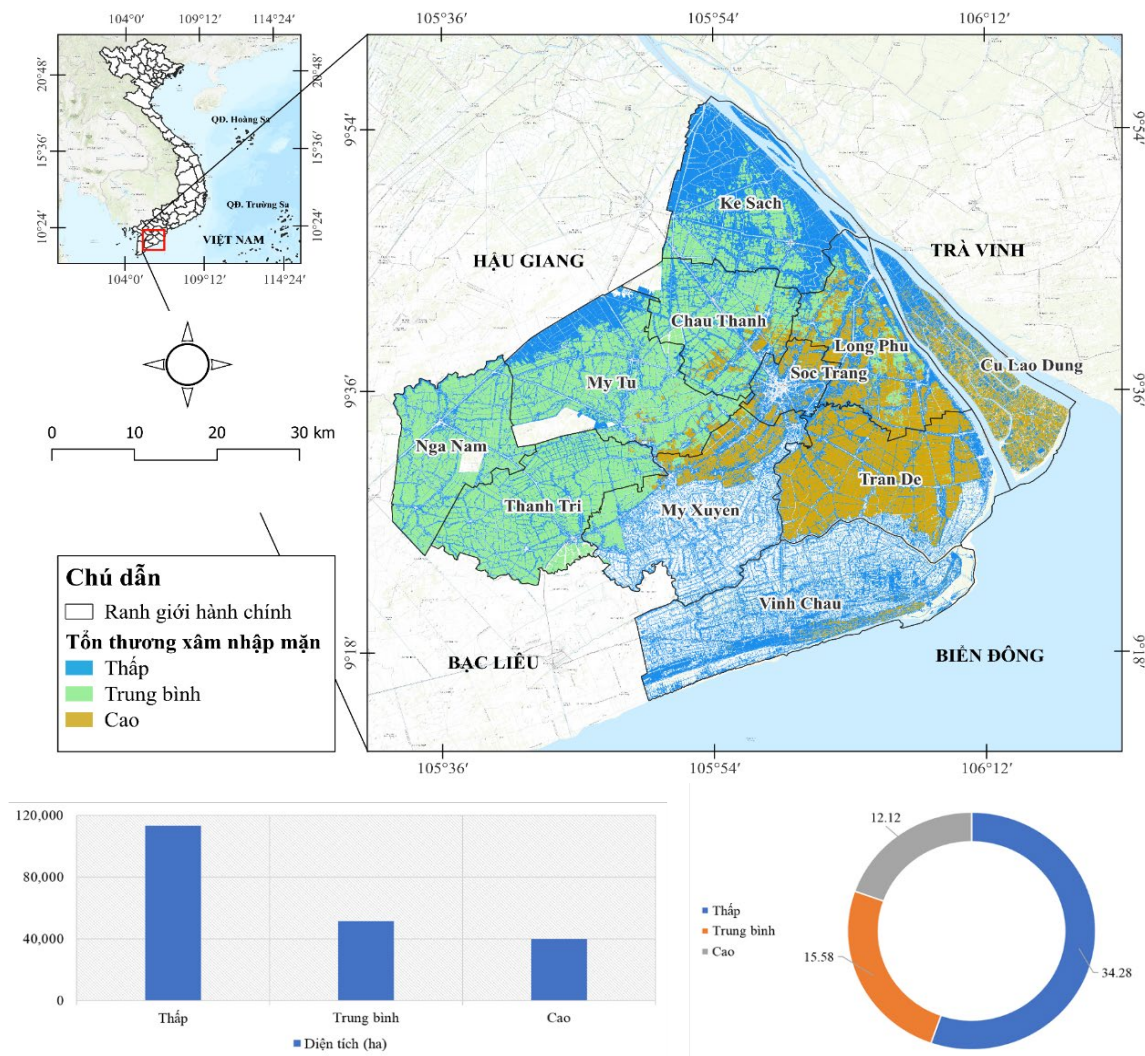
Kết quả phân vùng tổn thương nông nghiệp tỉnh Sóc Trăng có 03 cấp: thấp ($0 \leq V \leq 0,25$), trung bình ($0,25 < R \leq 0,5$), cao ($0,5 < R \leq 0,75$) (Hình 4).

Tổn thương nông nghiệp ở tỉnh Sóc Trăng có sự phân hóa rõ rệt giữa các mô hình canh tác, điều này phản ánh mức độ thích ứng khác nhau với xâm nhập mặn và các điều kiện biến đổi khí hậu cực đoan. Tổn thương nông nghiệp thấp có chiếm diện tích phân bố lớn nhất với 81.974,33 ha (34,28% tổng diện tích hiện trạng nông nghiệp). Tiếp theo, tổn thương nông nghiệp trung bình có diện tích 37.256,71 ha (15,58%). Cuối cùng, tổn thương nông nghiệp cao chiếm diện tích 28.982,76 ha (12,12%) (Hình 4).

Cụ thể, tổn thương nông nghiệp cao tập trung ở mô hình cây hàng năm. Sự suy giảm mực nước ngầm và hiện tượng nhiễm mặn kéo dài trong tương lai sẽ làm tăng nguy cơ tổn thương trong các vùng sản xuất này (Department of Water Resources Management, 2010). Tương tự, diện tích lúa hai vụ ở khu vực ranh mặn trên 4 g/l, đặc biệt tại huyện Trần Đề, cũng đối mặt với mức tổn thương cao do nguy cơ thiếu nước tưới khi xâm nhập mặn diễn ra liên tục.

Mức tổn thương trung bình được ghi nhận ở các mô hình lúa ba vụ và lúa tôm. Trong khi đó, mô hình lúa hai vụ ở khu vực ranh mặn dưới 4 g/l, chủ yếu tại Thạnh Trị, Ngã Năm và Mỹ Tú, cũng chịu mức tổn thương trung bình do ảnh hưởng từ điều kiện biến đổi khí hậu và nguồn nước tưới hạn chế. Đối với mô hình lúa tôm, mức tổn thương trung bình được ghi nhận do năng suất thấp của vụ lúa trong các năm có tình trạng xâm nhập mặn tăng cao và xảy ra sớm.

Ngược lại, mô hình cây lâu năm cho thấy mức tổn thương thấp nhất. Các loại cây lâu năm như bưởi, vú sữa và dừa có khả năng thích ứng cao với xâm nhập mặn, nhờ vào hệ thống rễ sâu và các biện pháp canh tác bền vững. Điều này giúp duy trì năng suất ổn định ngay cả trong các điều kiện thời tiết cực đoan, góp phần đảm bảo sinh kế cho người dân trong khu vực. Kết quả nghiên cứu phù hợp với các nghiên cứu trước đây về tổn thương nông nghiệp dưới tác động của xâm nhập mặn tại ĐBSCL, như nghiên cứu của Nguyen & Woodroffe (2016) và Bui et al. (2024). Theo đó, những khu vực gần cửa sông và giáp biển có mức độ dễ bị tổn thương cao hơn so với các khu vực nằm sâu trong đất liền.



Hình 4. Bản đồ phân vùng tổn thương do xâm nhập mặn tỉnh Sóc Trăng năm 2023

3.3. Định hướng giảm thiểu tác động của xâm nhập mặn

Theo People's Committee of Soc Trang Province (2021), dưới tác động của xâm nhập mặn, tỉnh Sóc Trăng đã và đang điều chỉnh định hướng phát triển nông nghiệp theo hướng thích ứng bền vững. Người dân chủ động chuyển đổi mục đích sử dụng đất, giảm diện tích trồng lúa, mở rộng nuôi trồng thủy sản và canh tác rau màu nhằm nâng cao hiệu quả kinh tế. Đồng thời, các nông hộ thay đổi lịch canh tác, sử dụng giống cây trồng chịu mặn để giảm thiểu tác động tiêu cực khi độ mặn của đất và nước tăng cao vào mùa khô. Tại nhiều khu vực, mô hình sản xuất cũng thay đổi đáng kể, từ ba vụ lúa trong năm chuyển sang một vụ lúa kết hợp một vụ

tôm/cá, giúp tối ưu hóa nguồn nước và thích ứng với điều kiện môi trường.

Theo định hướng phát triển vùng sinh thái, vùng ngọt ít chịu ảnh hưởng của xâm nhập mặn tiếp tục được xác định là khu vực sản xuất lúa, thủy sản nước ngọt và cây ăn trái. Trong khi đó, vùng mặn - lợ ven biển sẽ tập trung phát triển nuôi trồng thủy sản nước mặn, nước lợ cả trên bờ và trên biển, kết hợp khai thác hải sản bền vững. Đồng thời, việc khôi phục và bảo vệ rừng ngập mặn sẽ được đẩy mạnh nhằm duy trì đa dạng sinh học, bảo vệ bờ biển, phát triển mô hình nông - lâm kết hợp theo hướng sinh thái, hữu cơ và gắn với du lịch sinh thái. Đối với vùng chuyên tiếp ngọt - lợ, định hướng phát triển là chuyên canh và luân canh thủy sản nước lợ với lúa, rau màu phù hợp với điều kiện nguồn nước theo mùa.

Tuy nhiên, việc chuyển đổi cơ cấu nông nghiệp sang nuôi trồng thủy sản cũng gặp không ít thách thức. Trước tiên, chi phí đầu tư ao nuôi cao khiến nhiều nông hộ gặp khó khăn trong tiếp cận mô hình này. Ngoài ra, việc sử dụng nước ngầm để pha nước ao nuôi có thể làm gia tăng tình trạng xâm nhập mặn, gây sụt lún đất và suy giảm nguồn nước sạch phục vụ sinh hoạt. Cùng với sự điều chỉnh trong sản xuất, xu hướng sử dụng đất cũng có nhiều thay đổi. Diện tích đất trồng lúa dự kiến giảm do chuyển đổi sang đất phi nông nghiệp hoặc các loại cây trồng có giá trị kinh tế cao hơn. Đất trồng cây lâu năm giảm chậm do một phần được chuyển sang mô hình nông nghiệp khác hoặc sử dụng cho mục đích phi nông nghiệp. Trong khi đó, đất dành cho các loại hình nông nghiệp khác, đặc biệt là nông nghiệp công nghệ cao, có xu hướng tăng mạnh.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy hiện trạng sử dụng đất nông nghiệp ở Sóc Trăng năm 2023 bao gồm 10 loại hiện trạng, trong đó cây lâu năm chiếm diện tích lớn nhất, tiếp theo là lúa hai vụ, lúa ba vụ, và nuôi trồng thủy sản. Cây lâu năm, chủ yếu gồm dừa, cây có múi và các loại cây ăn trái khác, có mức tổn thương thấp nhất do khả năng thích ứng cao và hệ thống canh tác ổn định. Trong khi đó, lúa hai vụ, đặc biệt tại các khu vực có độ mặn trên 4 g/l như Trần Đề và Long Phú, chịu tổn thương cao do phụ thuộc nhiều vào nguồn nước tưới. Mô hình lúa ba vụ có

mức tổn thương trung bình do dễ bị ảnh hưởng trong những năm xâm nhập mặn cực đoan. Các loại cây hàng năm có mức độ tổn thương cao, chủ yếu do sử dụng nước ngầm để tưới, điều này càng nghiêm trọng trong bối cảnh nguồn tài nguyên nước ngầm ngày càng suy giảm. Ngược lại, mô hình lúa - tôm có khả năng thích ứng tốt hơn nhờ tận dụng được điều kiện nước lợ, giúp giảm tác động của xâm nhập mặn đến sản xuất nông nghiệp.

Trước tình hình này, Sóc Trăng đang có sự điều chỉnh mạnh mẽ trong định hướng phát triển nông nghiệp theo vùng sinh thái, khuyến khích các mô hình sản xuất bền vững, giảm diện tích lúa ở những khu vực có nguy cơ cao, mở rộng diện tích nuôi trồng thủy sản và cây trồng có giá trị kinh tế cao. Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi này cần được thực hiện một cách có kế hoạch, kết hợp với các giải pháp công nghệ và chính sách hỗ trợ để đảm bảo sinh kế bền vững cho người dân và bảo vệ tài nguyên môi trường.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ (MS: B2023-TCT-09), Bộ Giáo dục và Đào tạo. Nhóm tác giả xin cảm ơn Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Sóc Trăng đã cử cán bộ địa phương hỗ trợ nhóm nghiên cứu thu thập thông tin và phỏng vấn nông hộ tại các địa bàn nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Abdel-Rahman, E. M., Mutanga, O., Adam, E., & Ismail, R. (2013). Detecting Sirex noctilio grey-attacked and lightning-struck pine trees using airborne hyperspectral data, random forest and support vector machines classifiers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 88, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.013>
- Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. (1976). A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *USGS Professional Paper*. <https://doi.org/10.3133/pp964>
- Benhammou, Y., Alcaraz-Segura, D., Guirado, E., Khaldi, R., Achchab, B., Herrera, F., & Tabik, S. (2022). Sentinel2GlobalLULC: A Sentinel-2 RGB image tile dataset for global land use/cover mapping with deep learning. *Sci. Data* 2022, 9, 20. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01775-8>
- Bui, Q. D., Luu, C., Ha, H., & Nguyen, V. (2024). A holistic approach to salinity intrusion vulnerability assessment using geospatial technologies: an application for Mekong Delta of Vietnam. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 113, 104854. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104854>
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Congalton, R. G., & Green, K. (1999). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Lewis Publishers, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420048568>
- Dahhani, S., Raji, M., Hakdaoui, M., & Lhissou, R. (2022). Land cover mapping using Sentinel-1 Time-Series data and Machine-Learning classifiers in agricultural Sub-Saharan landscape. *Remote Sensing*, 15(1), 65. <https://doi.org/10.3390/rs15010065>
- Datcu, M., Schwarz, G., & Dumitru, C. O. (2020). *Deep Learning Training and Benchmarks for Earth Observation Images: Data Sets, Features, and Procedures. In Recent Trends in Artificial Neural Networks*. From Training to Prediction, Sadollah, A., Ed., InTech Open: London, UK. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90910>

- Department of Water Resources Management. (2010). Mekong Delta provinces: Struggling with over extraction of groundwater (*in Vietnamese*). <http://dwrn.gov.vn/index.php?language=vi&nv=news&op=Hoat-dong-cua-dia-phuong/Cac-tinh-DBSCL-Hut-hoi-hut-nuoc-ngam-1155>
- Duan, Y. (2016). Saltwater Intrusion and Agriculture: A Comparative Study Between the Netherlands and China. TRITALWR Degree Project 2016:20. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1060822/FULLTEXT01.pdf>
- Gallopín, G. C. (2006). Linkages between Vulnerability, Resilience, and Adaptive Capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>
- Gatdula, N., & Blanco, A. (2024). Assessment of the vulnerability of coastal agriculture to seawater intrusion using remote sensing, GIS, and Multi-Criteria Decision Analysis. *International Journal of Digital Earth*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2367733>
- General Statistics Office of Vietnam (GSO). (2016). *Statistical Yearbook of Viet Nam (in Vietnamese)*. <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2019/10/statistical-yearbook-of-vietnam-2016/>
- General Statistics Office of Vietnam (GSO). (2021). *Statistical Yearbook of Viet Nam (in Vietnamese)*. <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2022/08/statistical-yearbook-of-vietnam-2021/>
- Google Earth Engine. (2024). *Sentinel-1 algorithms*. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/sentinel1>.
- Hahn, M. B., Riederer, A. M., & Foster, S. O. (2009). The Livelihood Vulnerability Index: A pragmatic approach to assessing risks from climate variability and change—A case study in Mozambique. *Global Environmental Change*, 19(1), 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.11.002>
- Hoeser, T., & Kuenzer, C. (2020). Object Detection and Image Segmentation with Deep Learning on Earth Observation Data: A Review-Part I: Evolution and Recent Trends. *Remote Sensing*, 12(10), 1667. <https://doi.org/10.3390/rs12101667>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects, Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Islami, F. A., Tarigan, S. D., Wahjunie, E. D., & Dasanto, B. D. (2022). Accuracy assessment of land use change analysis using Google Earth in Sadar Watershed Mojokerto Regency. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 950(1), 012091. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012091>
- Ivkovic, K., S. Marshall, L. Morgan, A. Werner, H. Carey, S. Cook, B. Sundaram, et al. (2012). *National-scale Vulnerability Assessment of Seawater Intrusion: Summary Report*. <https://core.ac.uk/download/pdf/30677605.pdf>
- Jin, Y., Liu, X., Chen, Y., & Liang, X. (2018). Land-cover mapping using Random Forest classification and incorporating NDVI time-series and texture: a case study of central Shandong. *International Journal of Remote Sensing*, 39(23), 8703–8723. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1490976>
- Koh, J. (2011). Local Vulnerability Assessment of Climate Change and its Implications: The Case of Gyeonggi-Do, Korea. *Resilient Cities* 1: 411–427. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0785-6_42.
- Le, K. V., & Nguyen, C. H. (2011). Physical characteristics of soil in rainfed rice cultivation areas in Long Phu district, Soc Trang province. *Can Tho University Journal of Science*, 2011(18b), 284-294 (*in Vietnamese*).
- Le, T. N. (2017). A review of research on climate change vulnerability assessment. *Journal of Science and Technology Development*, 20(1), 5-20 (*in Vietnamese*). <https://vjol.info.vn/index.php/JSTD/article/view/33037/28117>
- Lee, C. E., Downey, K., Colby, R. S., Freire, C. A., Nichols, S., Burgess, M. N., & Judy, K. J. (2022). Recognizing Salinity Threats in the Climate Crisis. *Integrative and Comparative Biology*, 62(2), 441–460. <https://doi.org/10.1093/icb/icac069>
- Luers, A. L. (2005). The Surface of Vulnerability: An Analytical Framework for Examining Environmental Change. *Global Environmental Change*, 15(3), 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.04.003>

- MARD. (2020). *Mekong Delta takes measures to reduce saltwater intrusion (in Vietnamese)*. <https://www.mard.gov.vn/en/Pages/mekong-delta-takes-measures-to-reduce-saltwaterintrusion.aspx?item=16>.
- McMichael, A. J. (2013). Globalization, climate change, and human health. *New England Journal of Medicine*, 368(14), 1335–1343. <https://doi.org/10.1056/nejmra1109341>
- Ministry of Agriculture and Rural Development. (2010). *The harms outweigh the benefits as farmers rush to cultivate a third rice crop in Soc Trang (in Vietnamese)*. <https://www.mard.gov.vn/Pages/loi-bat-cap-hai-vi-dua-nhau-lam-lua-vu-3-o-soc-trang-2131.aspx>
- Ministry of Natural Resources and Environment of Viet Nam (MONRE). (2020). *Climate Change Scenarios (in Vietnamese)*. <http://vnmha.gov.vn/upload/files/kich-ban-bien-doi-khi-hau-phien-ban-cap-nhat-nam-2020.pdf>
- Nguyen, B. V., Van, T. P. D., Tran, H. T. T., & Nguyen, A. T. (2017a). Impact of saltwater intrusion on water resource management in agricultural production in Long Phu district, Soc Trang province. *Can Tho University Journal of Science*, 52(2017), 104-112 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.116>
- Nguyen, D. T. H., & Nguyen, N. T. (2023). Monitoring the rice cropping pattern in Soc Trang province from 2016 to 2022 using SENTINEL-1 imagery. *Land Management Conference 2023 (in Vietnamese)*.
- Nguyen, D. T. H., Huynh, N. T., & Nguyen, N. T. (2024a). Assessment of agricultural risks under the impact of salinity intrusion in Tra Vinh Province. *Journal of Soil Science*, 75, 133 - 137 (in Vietnamese).
- Nguyen, D. T. H., Nguyen, C. T., Phan, D. K., & Tran, M. L. (2019). Spatial analysis of land use patterns under the impact of saltwater intrusion in Soc Trang province. *Can Tho University Journal of Science*, 55(Environment), 1 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2019.125>
- Nguyen, D. T. H., Nguyen, N. M., Cao, P. N., Duong, H. C., Nguyen, N. T., & Phan, D. K. (2023). Analysis of agricultural land vulnerability to saltwater intrusion in Tien Giang province in 2020 using remote sensing. *Can Tho University Journal of Science*, 59(Environment and Climate Change), 185–192 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2023.120>
- Nguyen, S. H., Dao, C. D., Pham, V. K., & Phan, H. A. (2024b). Assessing vulnerability to climate change in agricultural production in Huong Hoa district, Quang Tri province. *Journal of Hydro-meteorology*, 5(761), 1–12 (in Vietnamese). [https://doi.org/10.36335/vnjhm.2024\(761\).1-12](https://doi.org/10.36335/vnjhm.2024(761).1-12)
- Nguyen, T. N. N., Truong, T. V., Nguyen, T. V., & Nguyen, L. T. (2017b). Status and vulnerability to salinization in the context of climate change in Da Nang City. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 33(2), 90-107 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4105>
- Nguyen, T. T. X., & Woodroffe, C. D. (2015). Assessing relative vulnerability to sea-level rise in the western part of the Mekong River Delta in Vietnam. *Sustainability Science*, 11(4), 645–659. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0336-2>
- Nguyen, T. V. (2022). Salinity intrusion in the Vietnamese Mekong Delta, a threat: possible causes, effects on people's life and production, and temporary solutions and adaptable strategies. *In Environmental science and engineering* (pp. 1–10). https://doi.org/10.1007/978-3-031-07500-1_1
- Nguyen, Y. T. B., & Duong, H. T. (2018). Assessing climate change vulnerability using the Livelihood Vulnerability Index: A case study of the Thai and H'mong ethnic groups in Chieng Dong commune, Yen Chau district, Son La province. *Journal of Agriculture and Rural Development*, 12(2018), 129-137 (in Vietnamese).
- Oswald, S. M., Hollosi, B., Žuvela-Aloise, M., See, L., Guggenberger, S., Hafner, W., Prokop, G., Storch, A., & Schieder, W. (2020). Using urban climate modelling and improved land use classifications to support climate change adaptation in urban environments: A case study for the city of Klagenfurt, Austria. *Urban Climate*, 31(2020), 100582. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100582>
- People's Committee of Soc Trang Province. (2021). *Soc Trang Province Master Plan for the Period 2021 - 2030, with a Vision to 2050 (in Vietnamese)*.
- People's Council of Soc Trang Province. (2018). *Natural conditions of Soc Trang Province (in Vietnamese)*. <https://dbnd.soctrang.gov.vn/Default.aspx?sname=hdnd&sid=1290&pageid=32103&catid=54684&id=266991&catname=%u0110i%u1ec1u+ki%u1ec7n+t%u1ef1+nhu%u00ean+S%u00f3c+Tr%u0103ng>
- Pham, H. V., Nguyen, G. V., Nguyen, B. A., Le, H. V. H., Pham, T. D., Hasanlou, M., & Bui, D. T. (2019). Soil salinity mapping using SAR Sentinel-1 data and advanced machine learning algorithms: a case study at Ben Tre province of the Mekong River Delta (Vietnam). *Remote*

- Sensing*, 11(2), 128.
<https://doi.org/10.3390/rs11020128>
- Praticò, S., Solano, F., Di, F. S., & Modica, G. (2021). Machine Learning classification of Mediterranean forest habitats in Google Earth Engine based on Seasonal Sentinel-2 Time-Series and input image Composition optimisation. *Remote Sensing*, 13(4), 586.
<https://doi.org/10.3390/rs13040586>
- Quan, N. M., Ha, D. V., & Nguyen, N. Q. (2013). Analysis of cost efficiency and scale efficiency of purple onion farming households in Vinh Chau district, Soc Trang province: A non-parametric approach. *Can Tho University Journal of Science*, 28(2013), 33-37 (in Vietnamese).
<https://ctujsvn.ctu.edu.vn/index.php/ctujsvn/article/view/1681>
- Salonen, A. O., & Reiser, D. (2023). Climate change. In *Encyclopedia of Sustainable Management* (565–569). Springer Nature.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-25984-5_75
- Sebastian, L., Sander, B., Simelton, E., Zheng, S., Chu, H. T., Tran, N., Buu, C., Cao, Q., & Ngo, M. D. (2016). *The drought and salinity intrusion in the Mekong River Delta of Vietnam: Assessment report*. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). <https://hdl.handle.net/10568/75633>
- Soc Trang Provincial Statistics Office. (2023). *Soc Trang Statistical Yearbook 2023 (in Vietnamese)*.
<https://storage-vnportal.vnpt.vn/sme-g1/5808/PhongTonghop/NG%20Soc%20Trang%209.2023.signed.pdf>
- Sun, J., & Ongsomwang, S. (2023). Optimal parameters of random forest for land cover classification with suitable data type and dataset on Google Earth Engine. *Frontiers in Earth Science*, 11.
<https://doi.org/10.3389/feart.2023.1188093>
- Swami, D., & Parthasarathy, D. (2020). Dynamics of exposure, sensitivity, adaptive capacity and agricultural vulnerability at district scale for Maharashtra, India. *Ecological Indicators*, 121(2021), 107206.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107206>
- Tarolli, P., Luo, J., Straffellini, E., Liou, Y., Nguyen, K., Laurenti, R., Masin, R., & D'Agostino, V. (2023). Saltwater intrusion and climate change impact on coastal agriculture. *PLOS Water*, 2(4), e0000121. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000121>
- Thach, K. S. R., Lee, J. Y., Ha, M. T., Cao, M. T., Nayga, R. M., & Yang, J. (2023). Effect of saline intrusion on rice production in the Mekong River Delta. *Heliyon*, 9(10), e20367.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20367>
- Tran, T. N. T., & Nguyen, P. T. (2014). The impact of climate change on salinity intrusion and Pangasius (Pangasianodon Hypophthalmus) farming in the Mekong Delta, Vietnam. *Aquaculture International*, 23(2), 523–534.
<https://doi.org/10.1007/s10499-014-9833-z>
- Vo, T. Q., Nguyen, T. V., & Pham, V. Q. (2020). Integration of radar and optical imagery for land use mapping in Can Tho City. *Can Tho University Journal of Science*, 56(5), 20-29 (in Vietnamese).
<https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2020.108>
- Wassmann, R., Nguyen, H. X., Chu, H. T., & To, T. P. (2004). Sea level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: water elevation in the flood season and implications for rice production. *Climatic Change*, 66(1/2), 89–107.
<https://doi.org/10.1023/b:clim.0000043144.69736.b7>
- Yommy, A. S., Liu, R., & Wu, A. S. (2015). SAR Image Despeckling Using Refined Lee Filter. *7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IEEE (2015)*.
<https://doi.org/10.1109/ihmsc.2015.236>