Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Số chuyên đề: Công nghệ chiến lược - Động lực phát triển Đồng bằng sông Cửu Long (SDMD)
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.252

PHÂN TÍCH DIỄN BIẾN XÂM NHẬP MẶN GIAI ĐOẠN 2000-2024 TẠI ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Võ Thị Phương Linh[1], Nguyễn Hồng Minh[1], Phan Kiều Diễm[1], Huỳnh Quang Tâm[2] và Võ Quốc Thành[1,*]

[1]*Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam*
[2]*Viện Nghiên cứu Khoa học cơ bản và Ứng dụng, Đại học Duy Tân, Việt Nam*
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): quocthanh@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 12/08/2026
Sửa bài (Revised): 01/10/2026
Duyệt đăng (Accepted): 10/11/2026

***Title:** Analysis of salinity dynamics in the Vietnamese Mekong Delta from 2000 to 2024*

***Author(s):** Vo Thi Phuong Linh[1], Nguyen Hong Minh[1], Phan Kieu Diem[1], Huynh Quang Tam[2] and Vo Quoc Thanh[1,*]*

***Affiliation(s):** [1]College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam; [2]Institute of Fundamental and Applied Sciences, Duy Tan University, Viet Nam*

TÓM TẮT

Xâm nhập mặn tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) ngày càng diễn biến phức tạp, gây rủi ro đối với sản xuất nông nghiệp và sinh kế của người dân. Nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá diễn biến và sự phân hóa không gian của xâm nhập mặn, qua đó xác định các khu vực có điều kiện mặn khác nhau để định hướng sản xuất phù hợp. Trong nghiên cứu này, số liệu quan trắc độ mặn giai đoạn 2000 – 2024 đã được sử dụng, kết hợp nội suy không gian B-Spline, phân tích bách phân vị và phương pháp CS MAP để phân vùng độ mặn phục vụ sản xuất nông nghiệp. Kết quả cho thấy xâm nhập mặn ở ĐBSCL có sự phân hóa rõ rệt từ vùng thượng nguồn đến vùng ven biển có độ mặn cao. Các tỉnh nằm ở khu vực nước ngọt phù hợp với sản xuất lúa và cây ăn trái. Vùng chuyển tiếp ngọt – lợ phù hợp với các mô hình sản xuất linh hoạt. Trong khi đó, các khu vực ven biển có độ mặn cao, thích hợp để nuôi trồng luân canh hoặc nuôi trồng thủy sản.

***Từ khóa:** Kế hoạch thích ứng, nông nghiệp ĐBSCL, nội suy không gian, xâm nhập mặn*

ABSTRACT

Salinity intrusion in the Vietnamese Mekong Delta (VMD) has become increasingly complex, posing risks to agricultural production and livelihoods for the community. This study aims to assess the temporal dynamics and spatial variability of salinity intrusion, thereby identifying areas with different salinity conditions to support appropriate production planning. The study used salinity data from 2000–2024, combined with B-Spline spatial interpolation, percentile analysis, and the CS MAP approach to delineate salinity zones for agriculture. The results show a clear spatial gradient in salinity intrusion in VMD, from upstream areas to highly saline coastal zones. In particular, freshwater areas are generally suitable for rice cultivation and fruit production. Meanwhile, freshwater–brackish areas are suitable for flexible production systems that can adapt to changing salinity conditions. In contrast, coastal areas have higher salinity levels and are more suitable for rotational farming systems or aquaculture.

***Keywords:** Adaptation planning, agriculture in the VMD, spatial interpolation, saltwater intrusion*

1. GIỚI THIỆU

Biến đổi khí hậu và các hiện tượng thời tiết cực đoan đang ngày càng trở nên nghiêm trọng, ảnh hưởng lớn đến điều kiện tự nhiên và phát triển kinh tế - xã hội tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) (Eslami et al., 2019). Khu vực ĐBSCL là một trong những vùng dễ bị tổn thương nhất trên thế giới trước tác động của nước biển dâng và xâm nhập mặn (Binh et al., 2025; Nghia, 2024). Đặc biệt, hiện tượng xâm nhập mặn ngày càng trở nên phức tạp và khó lường do sự kết hợp của nhiều yếu tố, bao gồm sự thay đổi dòng chảy từ thượng nguồn, sự gia tăng khai thác nước ngọt phục vụ nông nghiệp, và tác động của các hoạt động phát triển cơ sở hạ tầng, như xây dựng đập thủy điện trên sông Mekong (Loc et al., 2021; Minh et al., 2022; Nghia, 2024; Park et al., 2022). Sự kết hợp của các yếu tố này khiến diễn biến xâm nhập mặn ngày càng khó dự báo để có những giải pháp phù hợp và kịp thời.

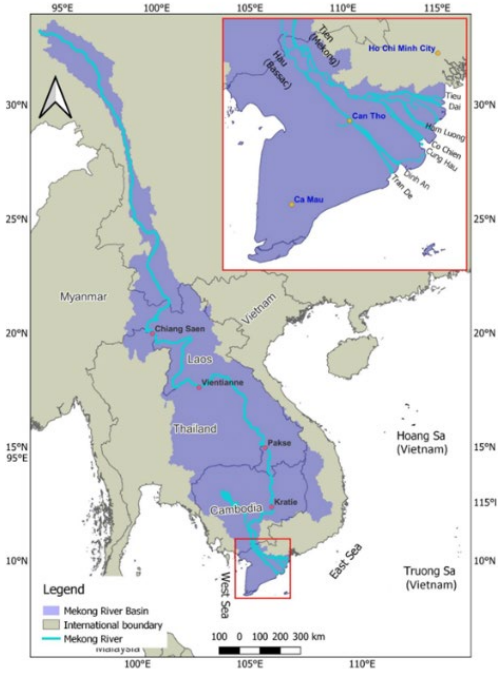
Giai đoạn 2000 - 2024, ĐBSCl có nhiều biến đổi bất thường về mặn, trong đó có những năm xảy ra hiện tượng xâm nhập mặn cực đoan như năm 2016 và 2020, gây thiệt hại nghiêm trọng đến sản xuất nông nghiệp và sinh kế của người (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2021). Năm 2016 được xem là một trong những đợt hạn hán và xâm nhập gây thiệt hại lớn nhất từng được ghi nhận; xâm nhập mặn đã làm thiệt hại tổng diện tích đất nông nghiệp là 210.000 ha ở hầu hết các tỉnh, trong khi đó 250.000 hộ gia đình (khoảng 1.300.000 người) phải đối mặt với tình trạng thiếu nước ngọt (Binh et al., 2025; Tran et al., 2021). Đến năm 2020, phạm vi xâm nhập mặn diễn ra nghiêm trọng hơn với mặn xâm nhập sâu khoảng 60 – 70 km vào nội đồng (Kaveney et al., 2023) với tổng diện tích bị ảnh hưởng bởi ranh mặn 4 g/l năm 2020 là 1.688.590 ha, lớn hơn 1.656.044 ha của năm 2016 (Nghia, 2024). Tuy nhiên, nhờ công tác dự báo sớm, điều hành nguồn nước và triển khai các biện pháp ứng phó chủ động, thiệt hại thực tế trong năm 2020 giảm đáng kể (Binh et al., 2025; Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2021; Nghia, 2024), với khoảng 58.000 ha lúa, 6.650 ha cây ăn trái, 1.241 ha rau màu và 8.715 ha diện tích nuôi trồng thủy sản bị ảnh hưởng (Binh et al., 2025; Kaveney et al., 2023). Các sự kiện mặn cực đoan cho thấy mức độ xâm nhập mặn tại ĐBSCL ngày càng phức tạp. Mức độ thiệt hại không chỉ phụ thuộc vào cường độ và phạm vi xâm nhập mặn, mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể bởi năng lực dự báo, quản lý và thích ứng của địa phương.

Việc phân tích diễn tiến mặn giúp đánh giá sự thay đổi của xâm nhập mặn theo thời gian từ 2000 đến 2024, qua đó các giải pháp thích ứng phù hợp cho khu vực ĐBSCL đã được đề xuất. Ngoài ra, việc so sánh diễn tiến mặn giữa các năm bình thường và các năm cực đoan giúp cung cấp cái nhìn toàn diện hơn về mức độ ảnh hưởng của các hiện tượng cực đoan đến xâm nhập mặn. Từ đó, những khuyến nghị có thể được đưa ra cho các nhà quản lý và hoạch định chính sách về chiến lược phát triển bền vững, giảm thiểu thiệt hại do xâm nhập mặn gây ra trong bối cảnh biến đổi khí hậu hiện nay.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

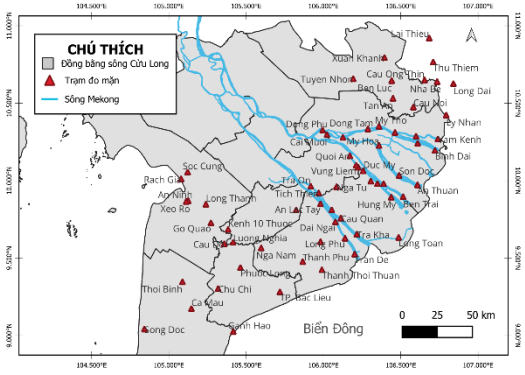
Nghiên cứu được thực hiện tại ĐBSCL, thuộc hạ lưu của lưu vực sông Mekong, nằm ở phía tây nam của Việt Nam (Hình 1). ĐBSCL nằm ở khu vực nhiệt đới gió mùa với mùa mưa từ tháng 5 – 11 và mùa khô từ tháng 12 – 4 năm sau (Mekong River Commission, 2021a). Khu vực này có diện tích khoảng 39.734 km², chiếm 12,2% tổng diện tích đất liền của Việt Nam. Đặc trưng bởi địa hình thấp và bằng phẳng với hơn 80% diện tích có cao độ dưới 1 m so với mực nước biển trung bình (Tri et al., 2019; Ngoc et al., 2026). Hệ thống thủy văn của ĐBSCL cực kỳ phức tạp và chằng chịt với mạng lưới sông ngòi, kênh rạch tự nhiên và nhân tạo có tổng chiều dài lên đến hơn 90.000 km (Wassmann et al., 2004; Kaveney et al., 2023). Do đó, ĐBSCL hiện là một trong những vùng dễ bị tổn thương trước biến đổi khí hậu.



Hình 1. Vị trí vùng nghiên cứu

2.2. Thu thập dữ liệu

Trong nghiên cứu này, số liệu quan trắc độ mặn tại 65 trạm đo mặn các tỉnh thuộc ĐBSCL từ năm 2000 - 2024 (Hình 2) đã được tổng hợp, kết hợp với các tài liệu về hiện trạng và diễn biến xâm nhập mặn do các cơ quan, ban, ngành có liên quan cung cấp. Dữ liệu quan trắc được tổng hợp theo các trạm và thời gian quan trắc; sau đó, dữ liệu được kiểm tra, chuẩn hóa và tổ chức thành cơ sở dữ liệu phục vụ phân tích thống kê và không gian.



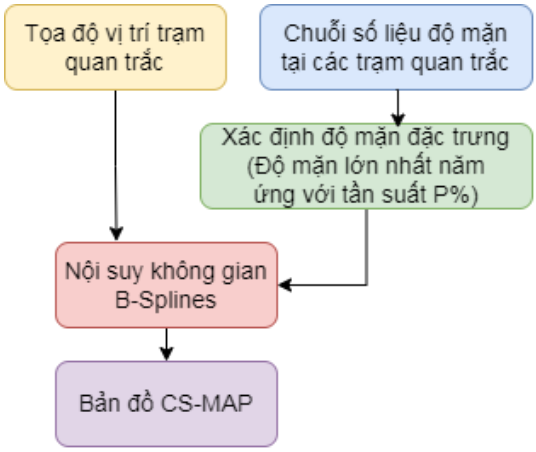
Hình 2. Bản đồ vị trí các trạm quan trắc mặn ở ĐBSCL

2.3. Phương pháp xử lý dữ liệu

Climate-Smart Mapping and Adaptation Planning (CS-MAP) là một khung tiếp cận lập bản đồ rủi ro khí hậu và xây dựng kế hoạch thích ứng dựa trên cách tiếp cận có sự tham gia của các bên liên quan, kết hợp giữa dữ liệu khoa học, thông tin không gian và tri thức địa phương. Phương pháp này được phát triển thông qua sự hợp tác giữa Cục Trồng trọt (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn Việt Nam) và Chương trình Nghiên cứu CGIAR về Biến đổi khí hậu, Nông nghiệp và An ninh lương thực (CCAFS); sau đó, phương pháp này được Viện Nghiên cứu Lúa gạo Quốc tế (IRRI) tiếp tục hoàn thiện và mở rộng áp dụng trong các chương trình thích ứng với biến đổi khí hậu tại khu vực Đông Nam Á năm 2021 (Son et al., 2018).

Quy trình CS-MAP gồm năm bước chính: (1) xác định các mối nguy khí hậu ảnh hưởng đến sản xuất nông nghiệp; (2) xác định phạm vi không gian và mức độ ảnh hưởng của từng mối nguy dựa trên dữ liệu khí tượng, thủy văn, địa hình, cơ sở hạ tầng và thông tin địa phương; (3) đề xuất các giải pháp thích ứng phù hợp; (4) tham vấn các chuyên gia, cán bộ quản lý và đại diện địa phương để kiểm tra, điều chỉnh bản đồ cùng các giải pháp đề xuất và (5) tổng hợp kết quả thành bản đồ và kế hoạch thích ứng ở cấp địa phương và vùng (Yen et al., 2019; Le et al., 2021).

Trong nghiên cứu này, CS-MAP được tham khảo làm cơ sở tiếp cận để nhận diện và phân vùng mức độ xâm nhập mặn tại ĐBSCL. Trọng tâm nghiên cứu là việc sử dụng dữ liệu độ mặn cực đại năm tại các trạm quan trắc, kết hợp phương pháp nội suy không gian để xây dựng bản đồ phân bố độ mặn và phân loại các khu vực theo ngưỡng mặn (Hình 3). Kết quả giúp nhận diện sự khác biệt về mức độ xâm nhập mặn giữa các khu vực, làm cơ sở cho việc đánh giá và quản lý xâm nhập mặn tại ĐBSCL. Trong nghiên cứu, chỉ có cách tiếp cận phân vùng không gian của CS-MAP được vận dụng, không thực hiện quy trình tham vấn các bên liên quan.



Hình 3. Quy trình xây dựng bản đồ CS-MAP từ độ mặn đặc trưng tại các trạm quan trắc bằng phương pháp nội suy không gian B-Splines

- **Phương pháp nội suy không gian**

Nội suy không gian được sử dụng để ước tính giá trị độ mặn tại những vị trí không có trạm quan trắc, từ đó xây dựng bản đồ phân bố độ mặn liên tục trên khu vực nghiên cứu (Rafi et al., 2023; Salehi et al., 2024). Trong đó, phương pháp B-Splines (Basis Splines) là một phương pháp nội suy không gian sử dụng các hàm spline từng đoạn để xây dựng bề mặt liên tục và trơn mượt từ các điểm dữ liệu rời rạc (De Boor & De Boor, 1978), được tính toán theo công thức:

$$S(x,y) = \sum_i c_i B_i(x,y)$$

Trong đó: trong đó $S(x,y)$ là giá trị nội suy tại vị trí (x,y), B_i là các hàm cơ sở B-spline và c_i là các hệ số được xác định từ dữ liệu đầu vào.

Khác với các phương pháp nội suy cục bộ như IDW, B-Splines tạo ra bề mặt bằng cách khớp các đa thức bậc thấp trên từng đoạn và đảm bảo tính liên tục tại các điểm nối. Phương pháp này có khả năng mô tả tốt các biến đổi không gian diễn ra liên tục, giảm hiện tượng dao động bất thường và tạo ra các bề mặt nội suy mượt hơn. Spline được xây dựng trên nguyên lý tối thiểu hóa độ cong của bề mặt nội suy, từ đó tạo ra các bề mặt có mức độ biến thiên tự nhiên hơn và hạn chế hiện tượng xuất hiện các ranh giới đột ngột giữa các vùng giá trị (Thanh et al., 2026). Trong nghiên cứu này, B-spline được sử dụng để nội suy độ mặn cực đại năm tại ĐBSCL, cho phép tính toán xấp xỉ bề mặt từ các điểm quan trắc. Thay vì xây dựng bề mặt chỉ với một lưới điều khiển, thuật toán bắt đầu từ lưới thô để mô phỏng xu thế biến thiên tổng thể, sau đó lần lượt tăng độ phân giải của lưới nhằm hiệu chỉnh sai khác giữa giá trị quan trắc và giá trị ước tính ở các cấp trước đó (Lee et al., 1997).

Dữ liệu độ mặn cực đại năm tại các trạm quan trắc được nội suy bằng B-Spline Interpolation của SAGA GIS được thiết lập sẵn trong môi trường QGIS phiên bản 3.34.11. Các thông số thiết lập gồm kích thước ô lưới đầu ra 100 m × 100 m, ngưỡng sai số (Error Threshold) là 0,0001 và cấp lưới tối đa là 11. Ngưỡng sai số được sử dụng làm điều kiện dừng quá trình hiệu chỉnh, trong khi cấp lưới tối đa giới hạn số lần tăng độ chi tiết của bề mặt nội suy. Kết quả là lớp raster biểu diễn sự phân bố không gian của độ mặn cực đại năm tại ĐBSCL.

Việc phân vùng độ mặn tại ĐBSCL được thực hiện nhằm phục vụ công tác quản lý tài nguyên nước và định hướng sản xuất nông nghiệp (Bảng 1).

Bảng 1. Phân vùng mặn tại ĐBSCL

Độ mặn (g/L)	Phân vùng	Ý nghĩa	Tài liệu tham khảo
<1	Nước ngọt	Dùng cho sinh hoạt và tưới tiêu nông nghiệp.	Thach et al. (2023), Tran et al. (2024)
1 – 4	Mặn nhẹ	Ngưỡng lúa bắt đầu giảm năng suất. Trong đó, 4 g/L là giới hạn của hầu hết cây trồng nông nghiệp.	(Kaveney et al., 2023; Thach et al., 2023; Tran et al., 2024)
4 – 15	Mặn trung bình	Không thể canh tác lúa thông thường. Phù hợp cho mô hình kết hợp như lúa - tôm.	(Tran et al., 2024; Trinh et al., 2018)
15 – 25	Mặn cao	Phù hợp để nuôi thủy sản nước lợ/mặn. Không thể canh tác nông nghiệp.	(Trinh et al., 2018; Thach et al., 2023)
>25	Mặn rất cao	Khu vực sát biển, cửa sông hoặc trong các đợt mặn cực đoan.	(Bui et al., 2024; Tran et al., 2024; Duc, 2025)

- **Phương pháp phân tích bách phân vị**

Phương pháp bách phân vị (percentile analysis) là một phương pháp thống kê phi tham số được sử dụng rộng rãi để mô tả phân bố dữ liệu, đánh giá các giá trị cực trị và lượng hóa mức độ xuất hiện của các hiện tượng thủy văn, khí hậu và môi trường. Trong nghiên cứu tài nguyên nước, các bách phân vị cao (P90, P95, P99) thường được sử dụng để đánh giá các điều kiện cực đoan, trong khi các bách phân vị thấp như P10 phản ánh điều kiện nền hoặc các trạng thái ít xảy ra. Phương pháp này được sử dụng phổ biến trong đánh giá hạn hán, xâm nhập mặn và rủi ro khí hậu nhờ khả năng phản ánh xác suất xuất hiện của các hiện tượng cực trị mà không yêu cầu giả định về dạng phân bố của dữ liệu (Petkewich et al., 2019). Trong nghiên cứu này, phương pháp bách phân vị được áp dụng trên chuỗi số liệu độ mặn tại các trạm quan trắc. Giá trị độ mặn ứng với bách phân vị được xác định từ hàm phân phối tích lũy của chuỗi số liệu theo công thức:

$$P_p = X_{(i)}$$

$$i = \frac{p}{100}(n+1)$$

Trong đó: P_p là độ mặn ứng với bách phân vị p (%), p là mức bách phân vị (50, 90, 95, 99,...), n là số lượng giá trị độ mặn của trạm quan trắc và $X_{(i)}$ là giá trị độ mặn tại vị trí thứ i sau khi sắp xếp chuỗi số liệu theo thứ tự tăng dần.

Dữ liệu đầu vào là chuỗi độ mặn theo thời gian tại từng trạm, kết quả đầu ra là các giá trị độ mặn tương ứng với các mức tần suất được lựa chọn (như P50, P90, P95 và P99). Các giá trị này được sử dụng để đánh giá mức độ xâm nhập mặn theo các tần suất xuất hiện khác nhau và làm dữ liệu đầu vào cho bước xây dựng bản đồ CS-MAP.

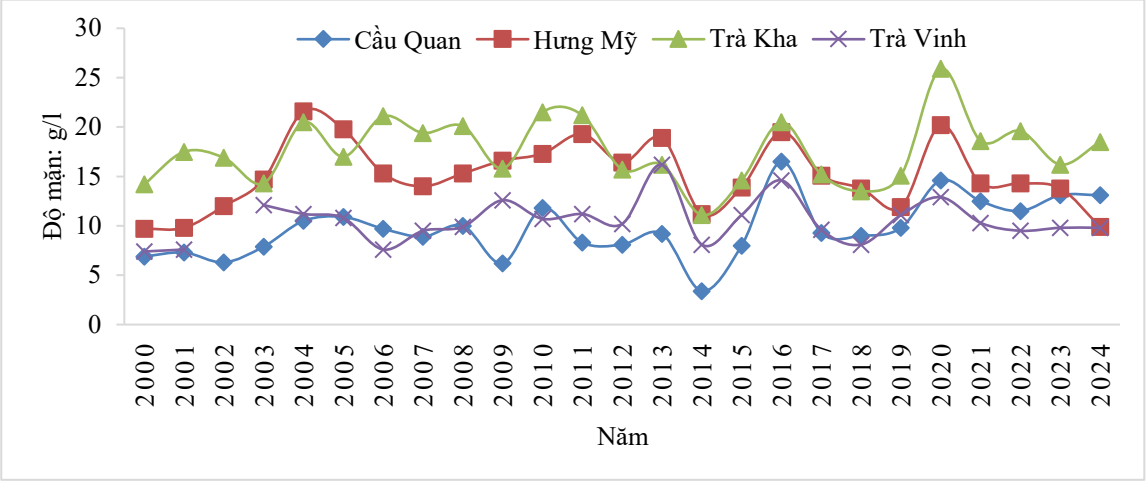
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Diễn biến xâm nhập mặn

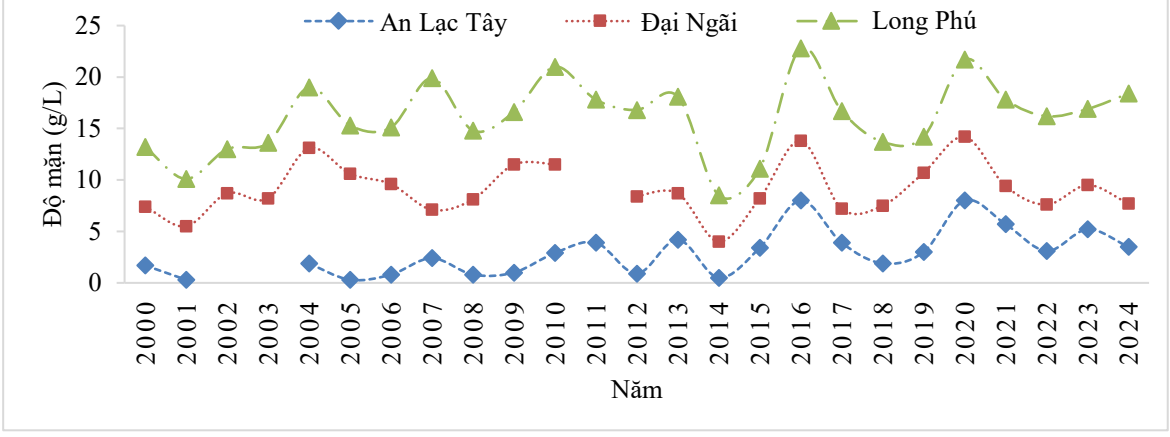
Trong giai đoạn 2000 – 2024, đỉnh mặn tại các trạm quan trắc tập trung chủ yếu vào mùa khô, phổ biến từ tháng 2 đến tháng 4. Tháng 3 có tần suất xuất hiện đỉnh mặn cao nhất, chiếm 31,9% tổng số dữ liệu ghi nhận, tiếp theo là tháng 2 (25,3%) và tháng 4 (23,4%). Tuy nhiên, thời điểm xuất hiện đỉnh mặn khác nhau giữa các khu vực. Tại Trà Vinh, đỉnh mặn thường xuất hiện vào tháng 3, trong khi tại Sóc Trăng, đỉnh mặn có xu hướng xuất hiện muộn hơn, chủ yếu vào tháng 4. Bên cạnh đó, trong những năm gần đây, một số trạm ghi nhận đỉnh mặn dịch chuyển sang sớm hơn. Tại Trà Kha (Trà Vinh) và An Lạc Tây (Sóc Trăng), giai đoạn 2000 – 2012 đỉnh mặn chủ yếu xuất hiện vào tháng 3 và tháng 4, còn giai đoạn 2013 – 2024 đỉnh mặn xuất hiện thường xuyên hơn vào tháng 2.

Kết quả này cho thấy thời gian xuất hiện cực đại của xâm nhập mặn không đồng nhất trên toàn đồng bằng, mà phụ thuộc vào vị trí không gian của trạm và điều kiện thủy văn – thủy triều tại từng khu vực. Sự tập trung của đỉnh mặn trong tháng 2 – 4 cho thấy đây là thời điểm cần tăng cường quan trắc để có các giải pháp giúp giảm thiểu rủi ro của xâm nhập mặn. Đặc biệt, cần chủ động thực hiện việc xây dựng kế hoạch ứng phó cho các trường hợp xâm nhập mặn xuất hiện sớm; đồng thời, công tác quan trắc và cảnh báo tại các khu vực này cũng cần được tăng cường. Tuy nhiên, sự khác biệt về thời gian xâm nhập mặn giữa các vùng nên các giải pháp ứng phó cần được thiết kế theo không gian và thời gian thay vì áp dụng một lịch quản lý mặn thống nhất cho toàn vùng.

Trong giai đoạn nghiên cứu, năm 2016 và 2020 là các năm xảy ra xâm nhập mặn cực đoan, với biểu hiện đồng thời về thời gian xuất hiện sớm, cường độ mặn cao và phạm vi xâm nhập sâu vào nội đồng (Hình 4 và Hình 5).

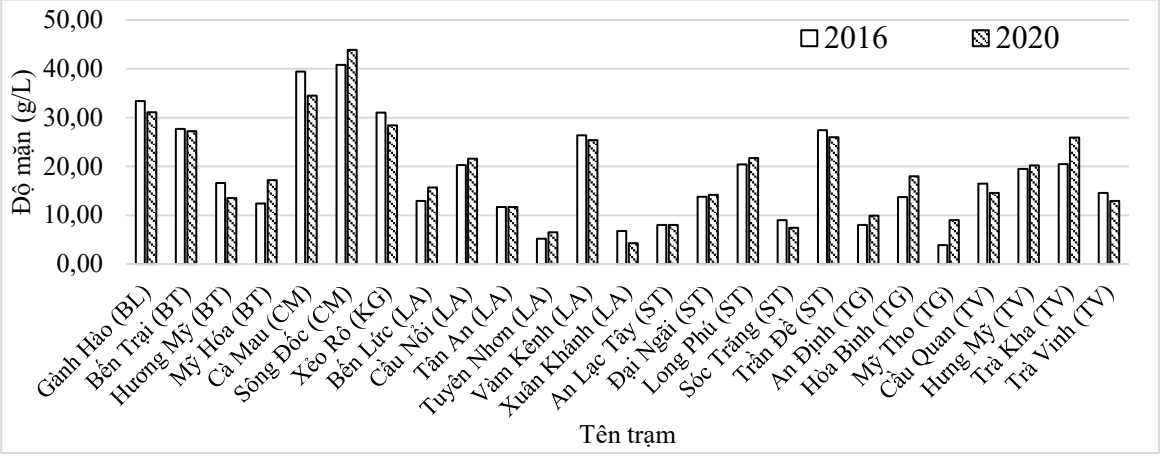


Hình 4. Độ mặn cao tại các trạm đo mặn tại Trà Vinh từ năm 2000 - 2024



Hình 5. Độ mặn cao tại các trạm đo mặn tại Sóc Trăng từ năm 2000 – 2024

Năm 2016, xâm nhập mặn bắt đầu từ đầu tháng 2 và lan sâu bất thường vào khu vực nội đồng. Tại các khu vực ven biển, so với năm 2015, độ mặn cực đại tại các trạm thuộc Sóc Trăng, Trà Vinh và Bến Tre tăng thêm khoảng 2,2 – 8,50 g/L. Một số trạm nằm sâu trong nội đồng của Sóc Trăng cũng ghi nhận độ mặn cao, với giá trị cực đại tại trạm Sóc Trăng và An Lạc Tây lần lượt đạt 9,0 và 8,0 g/L. Tại Cà Mau, Bạc Liêu và Kiên Giang, độ mặn cực đại vượt mức 25 g/L, cho thấy mức độ ảnh hưởng rất lớn tại khu vực ven biển và hạ lưu. Đáng chú ý, tại Long An, nơi thường ít chịu ảnh hưởng trực tiếp của nước mặn, các trạm Bến Lức, Cầu Nổi và Vàm Kênh vẫn ghi nhận độ mặn cực đại lần lượt đạt 12,9; 20,3 và 26,4 g/L. Đến năm 2020, một đợt mặn cực đoan nghiêm trọng hơn năm 2016 tiếp tục được ghi nhận, một số trạm quan trắc có sự gia tăng giá trị mặn cực đại. So với năm 2016, độ mặn cực đại tại Bến Lức (Long An) tăng từ 12,9 lên 15,7 g/L, tương ứng tăng 2,8 g/L; tại Trà Kha (Trà Vinh), độ mặn tăng từ 20,5 g/L năm 2016 lên 25,9 g/L năm 2020 (Hình 6).



Hình 6. Giá trị đỉnh mặn vào các năm cực đoan tại một số trạm quan trắc

Ghi chú: BL: Bạc Liêu, BT: Bến Tre, CM: Cà Mau, KG: Kiên Giang, LA: Long An, ST: Sóc Trăng, TG: Tiền Giang, TV: Trà Vinh.

Tại ĐBSCL, xâm nhập mặn là hiện tượng tự nhiên tại các khu vực ven biển ĐBSCL. Trong điều kiện bình thường, khi lượng nước từ thượng nguồn suy giảm vào mùa khô, cùng với tác động của thủy triều làm nước mặn từ biển xâm nhập vào hệ thống sông và kênh rạch nội đồng. Mức độ xâm nhập mặn có thể gia tăng đáng kể trong những năm xuất hiện đồng thời các điều kiện khí tượng – thủy văn bất lợi, đặc biệt là hạn hán kéo dài, lượng mưa thấp và suy giảm dòng chảy thượng nguồn (Park et al., 2022). Kết quả nghiên cứu trước đây của Hậu et al. (2017)

Hậu và ctv. (2017) tại tỉnh Vĩnh Long cho thấy tỉnh này nằm giữa sông Tiền và sông Hậu và thường được xem là khu vực có nguồn nước mặt tương đối dồi dào, nhưng những tháng đầu năm 2016, độ mặn tại các sông chính ở khu vực Vũng Liêm đã đạt 4 g/L. Vào tháng 2/2016, tại khu vực Nàng Âm trên sông Cổ Chiên, cách biển khoảng 54 km, độ mặn đạt 8,8 g/L (Hoạt et al., 2024). Vì vậy, tác động của xâm nhập mặn năm 2016 không chỉ là vấn đề của các tỉnh ven biển mà còn là rủi ro đối với cả những khu vực nằm sâu trong nội địa. Đặc biệt, sự xuất hiện của độ mặn cao tại Long An và Vĩnh Long cho thấy các khu vực nội địa cũng có thể trở nên dễ bị tổn thương trong điều kiện xâm nhập mặn cực đoan.

Nguyên nhân chính dẫn đến xâm nhập mặn cực đoan năm 2016 bắt nguồn từ sự kết hợp giữa thiếu hụt dòng chảy thượng nguồn và điều kiện khí hậu bất lợi. Trước hết, lũ năm 2015 được ghi nhận là mức lũ nhỏ nhất trong vòng 90 năm, với tổng lượng nước chỉ đạt khoảng 220.000.000.000 m³, tương đương một nửa so với các trận lũ lớn trong lịch sử. Do lũ quá yếu nên lượng nước chảy vào Biển Hồ (Campuchia) để dự trữ cho mùa khô giảm 33% so với trung bình. Hệ quả là lượng nước bổ sung cho hạ lưu trong giai đoạn từ tháng 11/2015 đến tháng 3/2016 bị suy giảm nghiêm trọng, khiến lưu lượng tại Tân Châu và Châu Đốc chỉ đạt 57 – 85% so với mức bình thường (Anh, 2017). Bên cạnh đó, hiện tượng El Niño trong giai đoạn 2014 – 2016 đạt cường độ mạnh nhất kể từ năm 1951, gây ra tình trạng thiếu hụt lượng mưa và nắng nóng kéo dài, qua đó làm gia tăng độ mặn tại các trạm quan trắc (Kantoush et al., 2017; Ngữ & Thăng, 2024). Sự kết hợp của các yếu tố này khiến xâm nhập mặn bắt đầu sớm hơn quy luật khoảng 1,5 tháng, từ tháng

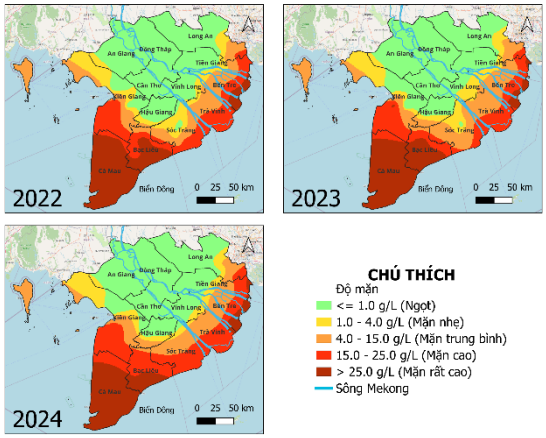
11/2015, đồng thời ranh mặn lấn sâu vào nội địa khoảng 20 – 25 km so với trung bình nhiều năm. Hậu quả là hơn 210.000 ha diện tích canh tác lúa bị ảnh hưởng và hơn 250.000 hộ dân bị thiếu nước sinh hoạt (Anh, 2017; Binh et al., 2020; Anh, 2023). Có thể thấy xâm nhập mặn năm 2016 không phải do một nguyên nhân đơn lẻ mà là kết quả của chuỗi tác động liên tiếp từ thượng nguồn đến hạ lưu. Do đó, các dự báo về lượng mưa, quy mô lũ và dòng chảy thượng nguồn cần được cảnh báo sớm để giúp phát hiện các nguy cơ xuất hiện của các mùa mặn cực đoan.

Vào đợt hạn mặn cực đoan 2019 - 2020, theo các đánh giá của Binh et al. (2025) và Mekong River Commission (2022), đợt hạn mặn này tại ĐBSCL được đánh giá là đợt thiên tai khắc nghiệt nhất trong vòng một thế kỷ qua, vượt qua cả kỷ lục của năm 2016 về cường độ vật lý và mức độ lấn sâu của ranh mặn vào nội đồng. Nguyên nhân là do lượng mưa trong mùa mưa năm 2019 thấp hơn nhiều so với trung bình nhiều năm do ảnh hưởng của hiện tượng El Niño, dẫn đến mực nước sông Mekong xuống mức thấp kỷ lục trong vòng 100 năm tính đến tháng 7/2019 (Lu & Chua, 2021; Mekong River Commission, 2021b). Việc đập Xayaburi tại Lào bắt đầu vận hành và tích nước vào tháng 10/2019 đúng thời điểm đỉnh điểm của hạn hán đã làm trầm trọng thêm tình trạng thiếu hụt dòng chảy (Lu & Chua, 2021; Park et al., 2022). Theo kết quả quan trắc, lưu lượng dòng chảy tại trạm Kratie (Campuchia) giảm mạnh, dẫn đến dòng chảy đẩy ngọt quá yếu. Kết quả là ranh mặn 4 g/L đã lấn sâu vào nội địa hơn năm 2016 khoảng 10 km, gây ảnh hưởng trực tiếp đến 10 trên 13 tỉnh thành, làm thiệt hại 58.000 ha lúa và khiến 96.000 hộ dân bị thiếu nước sinh hoạt (Binh et al., 2025; Mekong River Commission, 2022). Qua đó, xâm nhập mặn đã gia tăng cả về cường độ, phạm vi và mức độ tác động, không còn giới hạn ở khu vực ven biển mà đã lan sâu vào nội đồng, trở thành một thách thức toàn vùng trong bối cảnh biến đổi khí hậu và suy giảm dòng chảy thượng nguồn là nguyên nhân gây ra xâm nhập mặn cực đoan cho cả năm 2016 và 2020.

Nhìn chung, xâm nhập mặn tại ĐBSCL chịu tác động từ con người và sự thay đổi môi trường ngày càng cực đoan hơn. Hai giai đoạn 2015 – 2016 và 2019 – 2020 là những trường hợp điển hình cho thấy khi dòng chảy thượng nguồn suy giảm kết hợp với điều kiện khí hậu bất lợi, xâm nhập mặn có thể xuất hiện sớm hơn, kéo dài hơn, có nồng độ cao hơn và lan sâu hơn vào nội đồng. Đặc biệt, phạm vi ảnh hưởng đã tác động rõ rệt đến các khu vực nội đồng. Việc so sánh hai sự kiện cũng cho thấy năm 2020 có mức độ nghiêm trọng cao hơn nhưng do khả năng ứng phó và cảnh báo sớm nên đã có các giải pháp giúp cho thiệt hại không nghiêm trọng như năm 2016. Kết quả này cũng nhấn mạnh sự cần thiết của việc xây dựng hệ thống giám sát và cảnh báo sớm dựa trên các chỉ báo dòng chảy thượng nguồn, lượng mưa và điều kiện khí hậu nhằm chủ động điều chỉnh sản xuất nông nghiệp và bảo đảm nguồn nước sinh hoạt.

3.2. Phân bố không gian của độ mặn tại ĐBSCL trong những năm gần đây

Kết quả nội suy B-Spline cho thấy sự phân hóa rõ rệt về mức độ xâm nhập mặn giữa khu vực thượng nguồn, vùng chuyển tiếp và vùng ven biển ĐBSCL từ năm 2022 - 2024 (Hình 7). An Giang, Đồng Tháp, Vĩnh Long, Hậu Giang và Cần Thơ duy trì đặc trưng là khu vực ít chịu tác động trực tiếp của xâm nhập mặn nhờ lượng nước từ sông Mekong đổ về hàng năm, do đó ngưỡng độ mặn ≤1,0 g/L, tương ứng với nước ngọt ổn định. Điều này tạo ra lợi thế rõ rệt cho phát triển nông nghiệp, đặc biệt là các mô hình canh tác cây ăn trái và lúa nước có giá trị kinh tế cao. Không chỉ đảm bảo năng suất, vùng này còn có khả năng phát triển nông nghiệp bền vững, ít chịu rủi ro từ biến động khí hậu so với các khu vực ven biển. Nhìn chung, đây là vùng an toàn về tài nguyên nước ngọt.



Hình 7. Bản đồ phân bố độ đỉnh mặn hàng năm tại ĐBSCL trong giai đoạn 2022 – 2024 theo phương pháp B-Spline

Khu vực ven biển gồm Bến Tre, Trà Vinh, Kiên Giang và Sóc Trăng ghi nhận mức độ xâm nhập mặn tương đối cao, với độ mặn phổ biến trong khoảng 4,0 – 15,0 g/L và có xu hướng gia tăng rõ rệt trong năm 2023 so với 2022. Khu vực ven biển Đông (Bến Tre, Trà Vinh, Sóc Trăng) và biển Tây (Kiên Giang) ghi nhận sự gia tăng rõ rệt về nồng độ mặn và chiều sâu xâm nhập. Bến Tre và Sóc Trăng thường xuyên

ghi nhận những đỉnh mặn cao nhất vùng. Còn các tỉnh cực Nam như Bạc Liêu và Cà Mau ghi nhận mức độ mặn từ cao đến rất cao trên phạm vi toàn vùng.

Sự phân bố nguồn nước ngọt và thời điểm xuất hiện xâm nhập mặn là những yếu tố quan trọng chi phối sự lựa chọn và điều chỉnh mô hình canh tác của người dân tại các khu vực khác nhau. Theo các nghiên cứu, mô hình chủ đạo và phổ biến nhất là thâm canh lúa ba vụ, đặc biệt phát triển mạnh tại An Giang và Đồng Tháp nhờ hệ thống đê bao kiểm soát lũ triệt để, đóng góp phần lớn vào sản lượng lương thực xuất khẩu của cả vùng (Thanh, 2021; Tươi et al., 2023). Bên cạnh đó, mô hình vườn cây ăn trái và cây lâu năm đang có xu hướng mở rộng và thay thế dần diện tích lúa tại Vĩnh Long, Hậu Giang, Cần Thơ và các vùng đất gò của An Giang nhằm tối ưu hóa giá trị kinh tế trên cùng một đơn vị diện tích (Minh et al., 2020; Toản & Khanh, 2022). Ngoài ra, các mô hình luân canh lúa – hoa màu (như lúa - bắp tại huyện Châu Phú, An Giang) hoặc mô hình tích hợp lúa – cá cũng được người dân áp dụng linh hoạt để tận dụng nguồn nước mặt dồi dào và cải thiện thu nhập trong bối cảnh biến đổi khí hậu (Tuyến et al., 2015; Tri et al., 2019). Qua đó cho thấy, với lợi thế nguồn nước ngọt ổn định và đất phù sa màu mỡ, khu vực này đã phát triển đa dạng các mô hình sản xuất nông nghiệp đạt hiệu quả cao. Tuy nhiên, lợi thế này phụ thuộc nhiều vào khả năng duy trì dòng chảy nước ngọt từ thượng nguồn và có thể suy giảm trong các năm khô hạn hoặc xâm nhập mặn cực đoan. Mặc dù đây là vùng có mức độ rủi ro mặn rất thấp nhưng việc duy trì khả năng tiếp cận nguồn nước ngọt vẫn cần được xem là ưu tiên trong chiến lược quản lý dài hạn.

Đối với các tỉnh chuyển tiếp như Tiền Giang và Long An, điều kiện xâm nhập mặn có sự phân hóa rõ rệt theo không gian. Ở các khu vực nội đồng, độ mặn vẫn duy trì ở mức ≤1,0 g/L nên chưa gây ảnh hưởng đáng kể đến sản xuất nông nghiệp. Tuy nhiên, tại các vùng ven biển và cửa sông, xâm nhập mặn diễn ra từ nhẹ đến trung bình, thậm chí cao vào mùa khô do tác động kết hợp giữa suy giảm dòng chảy thượng nguồn và chế độ triều. Chính sự biến động này đòi hỏi các địa phương phải áp dụng các giải pháp quản lý và mô hình sản xuất linh hoạt. Kết quả nghiên cứu của Binh et al. (2025) và Minh et al. (2020) cho thấy tại các khu vực nội đồng vẫn duy trì được nguồn nước ngọt, mô hình chủ đạo là thâm canh lúa hai đến ba vụ và vườn cây ăn trái, phát triển rất mạnh tại tỉnh Tiền Giang. Tuy nhiên, tại các huyện ven biển như Gò Công (Tiền Giang) hay Cần Đước, Cần Giuộc (Long An), người dân đã phải chuyển dịch sang các mô hình thích ứng hơn. Mô hình luân canh lúa – tôm hoặc lúa – cá đang dần thay thế việc chuyên canh lúa để tận dụng nguồn nước lợ trong mùa khô (Bé và ctv., 2017). Đồng thời, người dân các khu vực này cũng áp dụng phương pháp điều chỉnh lịch thời vụ giúp chủ động không canh tác lúa vào những tháng đỉnh mặn để bảo vệ năng suất cho các vùng không bị ảnh hưởng, hoặc cắt giảm vụ để giảm áp lực nhu cầu nước ngọt đầu mùa khô (Anh, 2023; Binh et al., 2025). Nhìn chung, đây là vùng bị ảnh hưởng bởi dòng chảy thượng nguồn và thủy triều rõ rệt. Mặc dù mô hình sản xuất hiện nay có khả năng thích ứng linh hoạt nhưng cũng tiềm ẩn rủi ro cao nếu các hiện tượng cực đoan gia tăng trong tương lai.

Khu vực ven biển, mô hình lúa – tôm luân canh (nuôi tôm vào mùa mặn và trồng lúa vào mùa ngọt) là giải pháp phổ biến và hiệu quả nhất, giúp nông dân tận dụng điều kiện nước lợ trong mùa khô để gia tăng thu nhập, tiêu biểu là tại các tỉnh Kiên Giang và Sóc Trăng. Tại Kiên Giang, ngoài việc mở rộng diện tích lúa – tôm, địa phương còn phát triển mô hình trồng khóm trên đất phèn mặn và các loại cây chịu mặn khác để thay thế lúa hai vụ bấp bênh (Binh et al., 2025). Đối với Bến Tre và Trà Vinh, nơi chịu áp lực triều cường mạnh từ Biển Đông, người dân đã chuyển đổi diện tích lúa kém hiệu quả sang trồng cây ăn trái chịu hạn mặn hoặc các mô hình nuôi trồng thủy sản nước lợ/mặn trong ao (Smajgl et al., 2015). Bên cạnh đó, các tỉnh này cũng ứng dụng các giống lúa chịu mặn và thực hiện điều chỉnh lịch thời vụ. Sự kết hợp giữa các giải pháp công trình như hệ thống cống ngăn mặn và các mô hình sản xuất linh hoạt này giúp giảm thiểu rủi ro từ các năm cực đoan, đồng thời bảo đảm sinh kế bền vững cho khu vực hạ lưu

Cuối cùng, ở các tỉnh cực Nam, nguồn nước ngọt gần như không còn chiếm ưu thế, dẫn đến việc các mô hình canh tác truyền thống như lúa nước trở nên kém hiệu quả hoặc không còn phù hợp. Thay vào đó, các mô hình nông nghiệp thích ứng với nước lợ và mặn như nuôi trồng thủy sản (tôm, cua) hoặc mô hình lúa – tôm đang trở thành hướng phát triển chính của vùng. Trong đó, mô hình lúa – tôm luân canh được xem là giải pháp sinh kế linh hoạt, đặc biệt phổ biến tại vùng bán đảo Cà Mau với tổng diện tích canh tác khoảng 162.000 – 170.000 ha; mô hình này cho phép trồng lúa vào mùa mưa khi có nước ngọt và nuôi tôm vào mùa khô khi mặn lấn sâu. Đồng thời, tại các vùng ven biển, mô hình kết hợp tôm – rừng và nuôi thủy sản trong ao cũng được phát triển nhằm tận dụng hệ sinh thái rừng ngập mặn (Dũng et al., 2021; Anh, 2023). Nhìn chung, đây là khu vực

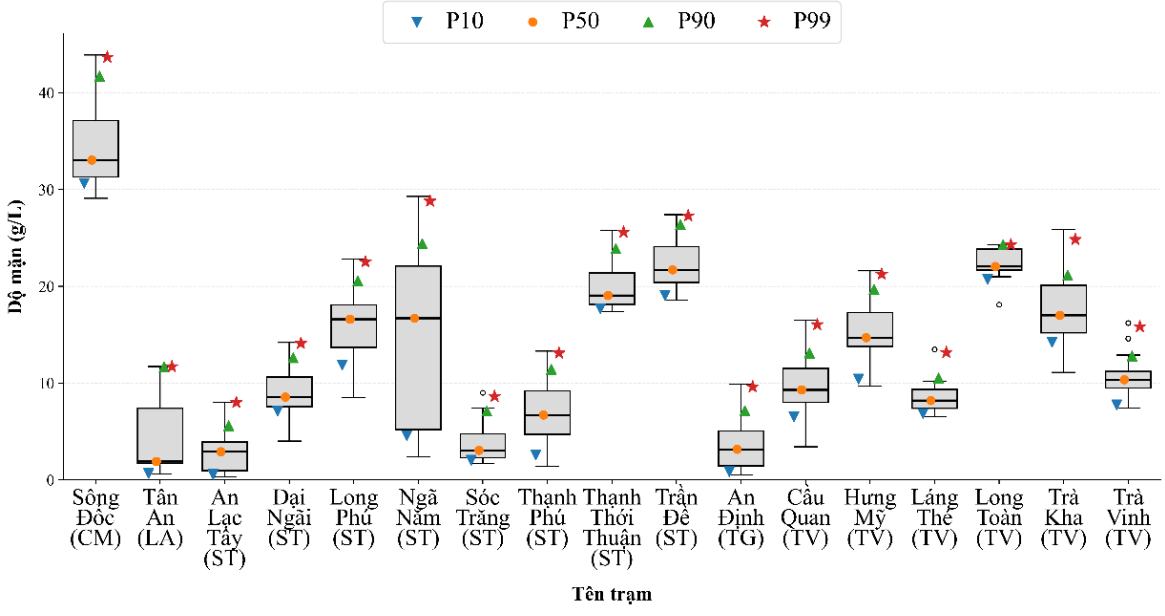
hạn chế về nước ngọt nên mô hình sản xuất chủ yếu là nông nghiệp lợ - mặn, đặc biệt là nuôi trồng thủy sản. Tuy nhiên, sự phụ thuộc lớn vào thủy sản cũng đặt ra yêu cầu cao về quản lý môi trường và tính bền vững trong dài hạn.

Qua đó, kết quả phân bố độ mặn trong những năm gần đây cho thấy sự khác biệt về điều kiện nước ngọt và xâm nhập mặn giữa các tiểu vùng có mối liên hệ rõ với sự phân hóa của hệ thống sản xuất nông nghiệp tại ĐBSCL. Điều này cho thấy việc lựa chọn cây trồng, vật nuôi và lịch sản xuất cần phù hợp với điều kiện nguồn nước của từng tiểu vùng. Đồng thời, kết quả cũng cho thấy xâm nhập mặn không chỉ là vấn đề về chất lượng nước mà còn là yếu tố định hình khả năng sử dụng đất và tổ chức sản xuất. Vì vậy, bản đồ phân bố độ mặn có giá trị trong việc xác định không gian phù hợp cho từng nhóm mô hình sản xuất, hỗ trợ phân vùng sản xuất theo điều kiện nước và làm cơ sở cho các quyết định chuyển đổi sinh kế khi điều kiện thủy văn thay đổi.

3.3. Phân tích bách phân vị

Kết quả phân tích các phân vị độ mặn cực đại năm cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mức độ và biên độ biến động độ mặn giữa các trạm quan trắc tại ĐBSCL (Hình 8). Tại mức P10, xâm nhập mặn chủ yếu xuất hiện tại các khu vực ven biển và gần cửa sông. Trạm Sông Đốc, P10 đạt 30,64 g/L và P50 đạt 33,05 g/L, cho thấy độ mặn cực đại năm duy trì ở mức cao ngay cả trong những năm bình thường. Tương tự, các trạm Trần Đề và Long Toàn có P50 lần lượt đạt 21,70 và 22,05 g/L, phản ánh mức độ ảnh hưởng mặn thường xuyên tại các khu vực cửa sông. Ngược lại, một số trạm nằm sâu hơn trong nội đồng có độ mặn trung vị tương đối thấp nhưng biến động mạnh giữa các năm. Điển hình, trạm Tân An có P50 chỉ 1,90 g/L nhưng P90 đạt 11,70 g/L; tương tự, trạm An Định có P50 là 3,15 g/L và P99 đạt 9,62 g/L. Khoảng chênh lệch lớn giữa các phân vị cho thấy độ mặn cực đại năm tại các trạm này không duy trì ổn định mà có thể tăng đáng kể trong những năm chịu ảnh hưởng mạnh của xâm nhập mặn. Điều này phản ánh tính biến động theo thời gian của xâm nhập mặn.

Bên cạnh đó, các giá trị ngoại lai phía trên xuất hiện tại một số trạm như Sóc Trăng, Láng Thé và Trà Vinh, phản ánh những năm có độ mặn cực đại vượt phạm vi biến động thông thường của chuỗi quan trắc. Chẳng hạn, Sóc Trăng ghi nhận giá trị 9,0 g/L vào năm 2016, Láng Thé đạt 13,47 g/L vào năm 2016. Sự xuất hiện đồng thời của các giá trị mặn cao trong năm 2016 cho thấy ảnh hưởng của đợt hạn hán và xâm nhập mặn nghiêm trọng tại ĐBSCL, làm gia tăng độ mặn tại nhiều khu vực so với điều kiện thông thường.



Hình 8. Biểu đồ phân bố percentile tại một số trạm

Ghi chú: CM: Cà Mau, LA: Long An, ST: Sóc Trăng, TG: Tiền Giang, TV: Trà Vinh.

Kết quả nghiên cứu tương đồng với Chung and Tinh (2026); trong đó, P50 được sử dụng để đại diện cho điều kiện mùa khô trung bình, còn P85 phản ánh các điều kiện khô hạn hơn bình thường và nguy cơ

xâm nhập mặn gia tăng. Hai kịch bản được mô phỏng bằng mô hình MIKE 11 và MIKE 21 cho thấy, dưới điều kiện P85, độ mặn vượt 4 g/L có thể xâm nhập sâu khoảng 60 – 70 km vào đất liền, trong khi dưới điều kiện P50, phạm vi xâm nhập của cùng ngưỡng thường giới hạn ở khoảng 30 – 50 km tính từ bờ biển. Kết quả nghiên cứu cũng xác định các khu vực nội địa Long An, Đồng Tháp và một phần Vĩnh Long, nơi độ mặn duy trì dưới 1 g/L trong hơn 300 ngày/năm, là vùng lõi sản xuất lúa và cây trồng; vùng có độ mặn 1 – 4 g/L trong khoảng 110 – 140 ngày/năm phù hợp với hệ thống luân canh, trong khi các khu vực ven biển như Trà Vinh và Cà Mau, nơi độ mặn vượt 4 g/L trong hơn 110 ngày/năm, được định hướng ưu tiên cho nuôi trồng thủy sản. Kết quả cũng phù hợp với nghiên cứu của Thanh et al. (2026) tại xã Châu Thành, tỉnh Bến Tre trong giai đoạn 2011–2018. Theo nghiên cứu này, dưới điều kiện P50, hơn 50% diện tích nghiên cứu không chịu ảnh hưởng đáng kể của xâm nhập mặn; tuy nhiên, ở P90, hơn 70% khu vực bị ảnh hưởng và ngưỡng 4 g/L bắt đầu xuất hiện tại một số khu vực. Đối với P99, khoảng 51% diện tích nghiên cứu chịu ảnh hưởng của độ mặn từ 4 g/L trở lên. Qua đó, có thể thấy P50 phù hợp để mô tả điều kiện nền phục vụ quy hoạch sản xuất thông thường; P90 và P99 có giá trị lớn hơn trong đánh giá rủi ro và xây dựng phương án ứng phó với các sự kiện bất lợi. Vì vậy, việc đánh giá xâm nhập mặn nên sử dụng nhiều mức bách phân vị thay vì chỉ dựa trên một trạng thái đại diện duy nhất để có những kế hoạch ứng phó kịp thời khi điều kiện mặn cực đoan xảy ra giúp giảm thiệt hại cho nông dân.

Kết quả phân tích bách phân vị cho thấy mức độ xâm nhập mặn tại ĐBSCL không chỉ khác biệt về cường độ giữa các khu vực mà còn có sự phân hóa lớn giữa điều kiện nền và các trạng thái cực đoan. Giá trị cực đại của phần lớn các trạm tập trung vào hai năm 2016 và 2020. Vì vậy, các trạm nội đồng mang nguy cơ tiềm ẩn do có thể duy trì độ mặn thấp trong nhiều năm liền, nhưng vẫn vượt ngưỡng chịu đựng của cây trồng khi gặp năm cực đoan. Do đó, các công trình ngăn mặn và kế hoạch sản xuất chỉ dựa trên điều kiện trung bình sẽ khó đáp ứng được những năm mặn cực đoan. Bên cạnh đó, mức độ thất thường của độ mặn cần được theo dõi, vì sự chênh lệch lớn giữa trạng thái nền và đỉnh cực đoan ở nhiều trạm cho thấy mặn xuất hiện theo từng đợt ngắn.

3.4. Hạn chế của nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, phương pháp CS-MAP được xây dựng dựa trên bản đồ độ mặn cực đại năm nhằm nhận diện các khu vực có nguy cơ chịu ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn cao nhất. Tuy nhiên, việc sử dụng duy nhất giá trị cực đại năm có một số hạn chế nhất định. Giá trị cực đại chỉ phản ánh mức độ nghiêm trọng nhất của hiện tượng tại một thời điểm mà chưa thể hiện được các đặc trưng động thái của xâm nhập mặn như thời gian xuất hiện, thời gian duy trì, tần suất vượt ngưỡng mặn hoặc tốc độ lan truyền theo không gian. Do đó, những khu vực có cùng giá trị mặn cực đại nhưng khác nhau về thời gian ảnh hưởng hoặc số ngày nhiễm mặn có thể được phân loại tương tự, trong khi mức độ tác động thực tế đến sản xuất nông nghiệp là khác nhau. Ngoài ra, các sự kiện cực trị đơn lẻ có thể làm gia tăng giá trị cực đại năm nhưng chưa phản ánh đầy đủ điều kiện mặn trung bình hoặc xu thế dài hạn của khu vực. Vì vậy, kết quả CS-MAP trong nghiên cứu này phù hợp cho đánh giá nguy cơ mặn theo kịch bản bất lợi nhất, nhưng chưa mô tả đầy đủ động thái xâm nhập mặn theo thời gian. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần kết hợp thêm các chỉ tiêu như số ngày vượt ngưỡng 1 g/L và 4 g/L, thời gian xuất hiện đỉnh mặn, phạm vi lan truyền theo từng tháng hoặc mùa, cũng như các chỉ số bách phân vị (P50, P90, P99) để phản ánh toàn diện hơn động lực và rủi ro xâm nhập mặn tại ĐBSCL.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, phân tích bách phân vị, nội suy không gian B-Spline và CS-MAP đã được áp dụng để đánh giá mức độ rủi ro xâm nhập mặn tại ĐBSCL. Kết quả cho thấy xâm nhập mặn có sự phân hóa mạnh theo không gian và gia tăng đáng kể trong các điều kiện cực đoan và mở rộng vào khu vực nội đồng; từ đó, giúp cấp cơ sở khoa học cho phân vùng rủi ro và hỗ trợ lựa chọn các giải pháp sản xuất, quản lý nguồn nước phù hợp với đặc điểm từng tiểu vùng. Tuy nhiên, các kết quả phân vùng phụ thuộc vào chất lượng quan trắc độ mặn, mật độ giám sát và tính nhất quán giữa các trạm khác nhau trong các tỉnh. Do đó, trong các nghiên cứu tiếp theo, ta có thể kết hợp với các mô hình động lực và các kịch bản biến đổi khí hậu để nâng cao hiệu quả mô phỏng và dự báo rủi ro xâm nhập mặn trong tương lai.

LỜI CẢM TẠ

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Cần Thơ, Mã số: CTCS2025-03-01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Anh, L. V. (2023). Giải pháp phòng chống hạn hán, thiếu nước, xâm nhập mặn vùng đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, (79), 14–23.

Anh, N. N. (2017). Historic drought and salinity intrusion in the Mekong Delta in 2016: Lessons learned and response solutions. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, *59*(1), 93–96. https://doi.org/10.31276/VJSTE.59(1).93

Bé, N. V., Trí, V. P. Đ., Hằng, T. T. L., & Ân, N. T. (2017). Ảnh hưởng của xâm nhập mặn đến công tác quản lý nguồn tài nguyên nước trong sản xuất nông nghiệp tại huyện Long Phú, tỉnh Sóc Trăng. *Tạp Chí Khoa Học Trường Đại Học Cần Thơ*, *Phần A*(52), 104–112. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.116

Binh, D. V., Duc, T. D., Duong, V. H. T., Bauer, J., Park, E., & Loc, H. H. (2025). Land use change in the Vietnamese Mekong Delta: Long-term impacts of drought and salinity intrusion using satellite and monitoring data. *iScience*, *28*(6), 112723. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112723

Binh, D. V., Kantoush, S., & Sumi, T. (2020). Changes to long-term discharge and sediment loads in the Vietnamese Mekong Delta caused by upstream dams. *Geomorphology*, *353*, 107011. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.107011

Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2021). *Báo cáo hiện trạng Môi trường quốc gia giai đoạn 2016—2020*. NXB Dân Trí.

Bui, Q. D., Luu, C., Ha, H., & Nguyen, V.-P. (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*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104854

Chung, N. T., & Tinh, N. D. (2026). Adaptive agro-ecological zoning for climate-resilient land use in the Mekong delta. *Water Practice and Technology*, *21*(2), 672–688. https://doi.org/10.2166/wpt.2026.214

De Boor, C., & De Boor, C. (1978). *A practical guide to splines* (Vol. 27). Springer, New York.

Duc, P. N. (2025). Predicting salinity levels in the Mekong Delta. *Environmental Monitoring and Assessment*. https://doi.org/10.1007/s44163-025-00336-3

Dũng, N., Chí, B. D., Bình, Đ. V., & Trường, T. T. (2021). Giải pháp vận hành thông minh hệ thống thủy lợi liên tỉnh tại vùng Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, *69*, 1–10.

Eslami, S., Hoekstra, P., Nguyen Trung, N., Ahmed Kantoush, S., Van Binh, D., Duc Dung, D., Tran Quang, T., & van der Vegt, M. (2019). Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation. *Scientific Reports*, *9*(1), 18746. https://doi.org/10.1038/s41598-019-55018-9

Hậu, N. Q., Quyên, C. T., Phong, V. T., Khoa, L. V., & Minh, V. Q. (2017). Đánh giá ảnh hưởng của xâm nhập mặn và các yếu tố kinh tế-xã hội đến sản xuất nông nghiệp huyện Vũng Liêm-tỉnh Vĩnh Long. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, *Số chuyên đề: Môi trường và Biến đổi khí hậu*(1), 64–70. https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2017.031

Hoạt, N. V., Hải, N. T., Giáp, P. V., Hưng, Đ. V., Hải, P. N., & Dung, D. T. T. (2024). Nghiên cứu dự báo chiều dài xâm nhập mặn trên nhánh sông Cổ Chiên và sông Hậu bằng phương pháp phân tích hồi quy. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, *84*.

Kantoush, S., Binh, D. V., Sumi, T., & Trung, L. V. (2017). Impact of upstream hydropower dams and climate change on hydrodynamics of Vietnamese Mekong Delta. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *73*(4), I_109-I_114.

Kaveney, B., Barrett-Lennard, E., Minh, K. C., Duy, M. D., Thi, K. P. N., Kristiansen, P., Orgill, S., Stewart-Koster, B., & Condon, J. (2023). Inland dry season saline intrusion in the Vietnamese Mekong River Delta is driving the identification and implementation of alternative crops to rice. *Agricultural Systems*, *207*, 103632. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103632

Le, T. T., Bui, T. Y., Pham, T. V., Nguyen, V. K., Tran, T. M. H., Nguyen, V. H., Bernardo, E., Celeridad, R., Bui, B. B., Nguyen, V. B., Nguyen, H. S., Chu, T. H., & Gummadi, S. (2021). *Guidebook on the Development of Climate-Smart Maps and Adaptation Plans (CS-MAP) for Rice Production in Viet Nam*. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

Lee, S., Wolberg, G., & Shin, S. Y. (1997). Scattered data interpolation with multilevel B-splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *3*, 228–244. https://doi.org/10.1109/2945.620490

Loc, H. H., Low Lixian, M., Park, E., Dung, T. D., Shrestha, S., & Yoon, Y.-J. (2021). How the saline water intrusion has reshaped the agricultural landscape of the Vietnamese Mekong Delta: a review. *Science of The Total Environment*, *794*, 148651. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148651

Lu, X., & Chua, S. (2021). River Discharge and Water Level Changes in the Mekong River: Droughts in an Era of Mega-Dams. *Hydrological Processes*, *35*. https://doi.org/10.1002/hyp.14265

Mekong River Commission. (2021a). Annual hydrology, flood and drought report 2019: Drought in the Lower Mekong Basin. *Mekong River Commission Secretariat*.

Mekong River Commission. (2021b). Status and trends of fish abundance and diversity in the Lower Mekong Basin during 2007–2018. *MRC Technical Paper* (66).

Mekong River Commission. (2022). *Mekong Low Flow and Drought Conditions in 2019–2021: Hydrological Conditions in the Lower Mekong River Basin*.

Minh, H. V., Lavane, K., Ty, T. V., Downes, N. K., Hong, T. T., & Kumar, P. (2022). Evaluation of the Impact of Drought and Saline Water Intrusion on Rice Yields in the Mekong Delta, Vietnam. *Water*, *14*(21), 3499. https://doi.org/10.3390/w14213499

Minh, H. V. T., Avtar, R., Kumar, P., Kieu, L. N., Kurasaki, M., & Ty, T. V. (2020). Impact of Rice Intensification and Urbanization on Surface Water Quality in An Giang Using a Statistical Approach. *Water*, *12*(6), 1710. https://doi.org/10.3390/w12061710

Nghia, B. P. Q. (2024). Integrated approach for drought and saline intrusion severity assessment on the coastal Mekong Delta. *Progress in Disaster Science*. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100195

Ngoc, D. T., Toan, N. V., Cong, N. P., Lien, B. T., Tam, N. T., Downes, N. K., Kumar, P., & Minh, H. V. (2026). Hydro-Meteorological Drought Dynamics in the Lower Mekong River Basin and Their Downstream Impacts on the Vietnamese Mekong Delta (1992–2021). *Resources*, *15*(1), 3. https://doi.org/10.3390/resources15010003

Ngữ, N. Đ., & Thăng, V. V. (2024). Tác động của El Niño đến hạn hán Đồng bằng sông Cửu Long trong bối cảnh nóng lên toàn cầu. *Tạp chí Khoa học Biến đổi Khí hậu*, *29*.

Park, E., Loc, H. H., Van Binh, D., & Kantoush, S. (2022). The worst 2020 saline water intrusion disaster of the past century in the Mekong Delta: Impacts, causes, and management implications. *Ambio*, *51*(3), 691–699. https://doi.org/10.1007/s13280-021-01577-z

Petkewich, M., Lackstrom, K., McCloskey, B. J., Rouen, L., & Conrads, P. A. (2019). *Coastal Salinity Index along the southeastern Atlantic coast and the Gulf of Mexico, 1983 to 2018* (Nos. 2019–1090). Open-File Report. https://doi.org/10.3133/ofr20191090

Rafi, A., Dauji, S., & Keesari, T. (2023). Evaluation of simple algorithms for spatial interpolation of salinity hazard parameter in natural waters. *J. Earth Syst. Sci.*, *132*, 162. https://doi.org/10.1007/s12040-023-02170-6

Salehi, S., Barati, R., Baghani, M., Sakhdari, S., & Maghrebi, M. (2024). Interpolation methods for spatial distribution of groundwater mapping electrical conductivity. *Scientific Reports*, *14*, 30337. https://doi.org/10.1038/s41598-024-81893-y

Smajgl, A., Toan, T. Q., Nhan, D. K., Ward, J., Trung, N. H., Trí, L. Q., Tri, V., & Vu, P. (2015). Responding to rising sea levels in the Mekong Delta. *Nature Climate Change*, *5*(2), 167–174.

Son, N., Yen, B., & Sebastian, L. (2018). *Development of Climate-Related Risk Maps and Adaptation Plans (Climate Smart MAP) for Rice Production in Vietnam's Mekong River Delta* (Work. Pap. No. 220). CCAFS.

Thach, K. S. R., Lee, J. Y., Ha, M. T., Cao, M. T., Nayga, R. M., & Yang, J. E. (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

Thanh, V. (2021). *Modeling of Hydrodynamics and Sediment Transport in the Mekong Delta*. https://doi.org/10.4233/uuid:8f42f588-17a1-4e1e-af12-dcc52e7a26b2

Thanh, V. Q., Minh, H. V. T., Linh, V. T. P., & Minh, N. A. (2026). An assessment of water management to cope with saltwater intrusion: A case study of Chau Thanh district, Ben Tre province, Viet Nam. *CTU J. Innov. Sustain. Dev.*, *18*, 71–80.

Toản, T. Q., & Khanh, P. T. (2022). Cân bằng nước và một số kiến nghị về định hướng phát triển nông nghiệp bền vững ở tỉnh An Giang. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, (740), 74–87. https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(740).74-87

Tran, D. D., Dang, M. M., Duong, B. D., Sea, W., & Vo, T. T. (2021). Livelihood vulnerability and adaptability of coastal communities to extreme drought and salinity intrusion in the Vietnamese Mekong Delta. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *57*, 102183. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102183

Tran, D. D., Thuc, P. T. B., Park, E., Hang, P. T. T., Man, D. B., & Wang, J. (2024). Extent of saltwater intrusion and freshwater exploitability in the coastal Vietnamese Mekong Delta assessed by gauging records and numerical simulations. *Journal of Hydrology*, *630*, 130655. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130655

Tri, N. H., Sansanee, C., Ni, D. V., & Kulvadee, K. (2019). Impact of saline intrusion and adaptation options on rice- and fish-farming households in the Mekong Delta of Vietnam. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, *40*(2), 427–433. https://doi.org/doi.org/10.34044/j.kjss.2019.40.2.10

Trinh, N. X., Quang, T. T., Ha, P. D., Xuan, T. L., Dinh, C. D., Thanh, T., Quang, T. T., Duc, T. D., & Thanh, H. (2018). Delimitating inland aqua-ecological zones under different climate conditions in the Mekong Delta region, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, *9*, 463–479. https://doi.org/10.2166/wcc.2018.181

Tươi, H. T. N., Quang, C. N. X., Thiện, N. Đ., Dũng, T. Đ., & Dương, V. H. T. (2023). Biến động sản lượng và năng suất lúa vùng đê bao kiểm soát lũ triệt để thượng nguồn Đồng bằng sông Cửu Long: Nghiên cứu điển hình tỉnh An Giang. *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ – Khoa học Trái đất và Môi trường*, *7*(2), 786–802. https://doi.org/10.32508/stdjsee.v7i2.749

Tuyến, N. V., Toàn, P. V., Chiếm, N. H., Tuấn, L. A., & Trí, V. P. Đ. (2015). Tính toán lượng nước trữ để tưới cho cây bắp vào mùa khô ở huyện Châu Phú, tỉnh An Giang. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, *Môi trường và Biến đổi khí hậu*, 174–182.

Wassmann, R., Hien, N. X., Hoanh, C. T., & Tuong, 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

Yen, B. T., Son, N. H., Tung, L. T., Amjath-Babu, T. S., & Sebastian, L. (2019). Development of a participatory approach for mapping climate risks and adaptive interventions (CS-MAP) in Vietnam's Mekong River Delta. *Climate Risk Management*, *24*, 59–70. https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.04.004