

# Phân tích diễn biến đường bờ sông Cần Thơ bằng công nghệ ảnh viễn thám

Huỳnh Minh Tuấn<sup>1</sup>, Đinh Văn Duy<sup>2\*</sup>, Phạm Tấn Đạt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Học viên cao học, Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ

<sup>2</sup> Khoa Kỹ sông ngòi và bờ biển, Đại học Hải dương Quốc lập Đài Loan

## TỪ KHOẢ

DSAS  
Sông Cần Thơ  
Xói lở  
Landsat  
NDWI

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này phân tích diễn biến đường bờ sông Cần Thơ trong giai đoạn 2010 – 2025, tập trung vào hai khu vực bờ Nam và bờ Bắc. Dữ liệu đường bờ được xử lý và tính toán thông qua chỉ số tốc độ thay đổi đường bờ trung bình hàng năm (LRR), kết hợp biểu đồ và bản đồ để mô tả không gian – thời gian của quá trình bồi tụ và xói lở. Kết quả cho thấy bờ Bắc có xu thế bồi tụ chiếm ưu thế với 51% chiều dài, xói lở 5 % và 44 % ổn định, trong khi bờ Nam có 34 % bồi tụ, 9 % xói lở và 57 % ổn định. Các khu vực xói lở tập trung chủ yếu tại các đoạn sông uốn cong và hẹp, chịu tác động của dòng chảy và sóng tàu, trong khi các khu vực bồi tụ xuất hiện tại các đoạn sông thẳng hoặc mở rộng. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho công tác quy hoạch và quản lý bờ sông Cần Thơ, đồng thời gợi ý những khu vực cần ưu tiên bảo vệ và giám sát.

## KEYWORDS

DSAS  
Can Tho River  
Erosion  
Landsat  
NDWI

## ABSTRACT

This study investigates the shoreline dynamics of the Can Tho River during the period 2010–2025, focusing on both the southern and northern riverbanks. Shoreline data were analyzed using the linear regression rate (LRR) to estimate the annual rate of change, combined with charts and maps to illustrate the spatial and temporal patterns of erosion and accretion. Results indicate that the northern bank is dominated by accretion, accounting for 51% of its length, with 5% experiencing erosion and 44% remaining stable. In contrast, the southern bank shows 34% accretion, 9% erosion, and 57% stability. Erosion hotspots are mainly located at narrow and meandering sections, which are strongly influenced by river flow and ship waves, while accretion areas appear along straight or wider sections of the river. The findings provide essential scientific insights for riverbank management and planning in the Can Tho River, highlighting the critical zones that require prioritized protection and continuous monitoring.

## 1. Mở đầu

Xói lở bờ sông là một trong những thách thức lớn của Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), tác động trực tiếp đến sinh kế của người dân, cơ sở hạ tầng và hệ sinh thái ven sông. Hàng năm, khu vực này mất hàng trăm hecta đất do xói lở, gây tổn thất nghiêm trọng về kinh tế - xã hội và môi trường [1-3]. Sự biến đổi dòng chảy, giảm lượng phù sa từ các đập thủy điện và khai thác cát quá mức được xác định là các nguyên nhân chính [1, 3-5]. Điều này làm nổi bật nhu cầu cấp thiết về các giải pháp quản lý và bảo vệ bờ sông mang tính bền vững, kết hợp giữa công trình và phi công trình.

Trong nhiều thập kỷ qua, các nghiên cứu quốc tế đã nhấn mạnh mối quan hệ giữa chế độ dòng chảy, lưu lượng trầm tích và biến động hình thái bờ sông [6, 7]. Các mô hình hình thái và công cụ phân tích số được phát triển nhằm đánh giá ảnh hưởng của hồ chứa, thủy điện và hoạt động khai thác đến sự di chuyển của đường bờ và ổn định bờ sông [7]. Đặc biệt, Raldini và ctv. (2008) đã chỉ ra rằng việc điều tiết dòng chảy có thể làm thay đổi đáng kể hình thái kênh sông, ảnh hưởng đến tốc độ xói lở và bồi tụ [8].

Tại ĐBSCL, nhiều nghiên cứu đã tập trung phân tích xói lở và biến động hình thái bờ tại các dòng sông chính như sông Mekong và sông Hậu [6–8]. Việc ứng dụng viễn thám kết hợp với hệ thống phân tích đường bờ số (DSAS) và các chỉ số phổ như NDWI đã được chứng minh là hiệu quả trong việc xác định các biến đổi không gian – thời gian của bờ sông [9-11]. Tuy nhiên, các nghiên cứu liên quan đến xói lở ở những dòng sông nhỏ nhưng đóng vai trò quan trọng đối với kinh tế và giao thông, điển hình như sông Cần Thơ – con sông chảy qua trung tâm thành phố Cần Thơ, vẫn còn hạn chế. Khoảng trống này cần được nghiên cứu nhằm đưa ra các thông tin khoa học phục vụ quy hoạch và quản lý ven sông.

Trong nghiên cứu này, ảnh vệ tinh đa thời gian kết hợp với các công cụ viễn thám và DSAS được sử dụng để phân tích biến động bờ sông Cần Thơ (Hình 1). Việc áp dụng chỉ số NDWI và các phương pháp phân tích không gian giúp đánh giá xu thế xói lở – bồi tụ, từ đó cung cấp cơ sở dữ liệu phục vụ cho việc bảo vệ bờ sông và phát triển bền vững đô thị ven sông [6-11].

## 2. Phương pháp nghiên cứu

Quy trình nghiên cứu được thực hiện qua năm bước chính (

\*Liên hệ tác giả: dveduy@ctu.edu.vn

Nhận ngày 29/07/2025, sửa xong ngày 04/08/2025, chấp nhận đăng ngày 05/08/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.1068>

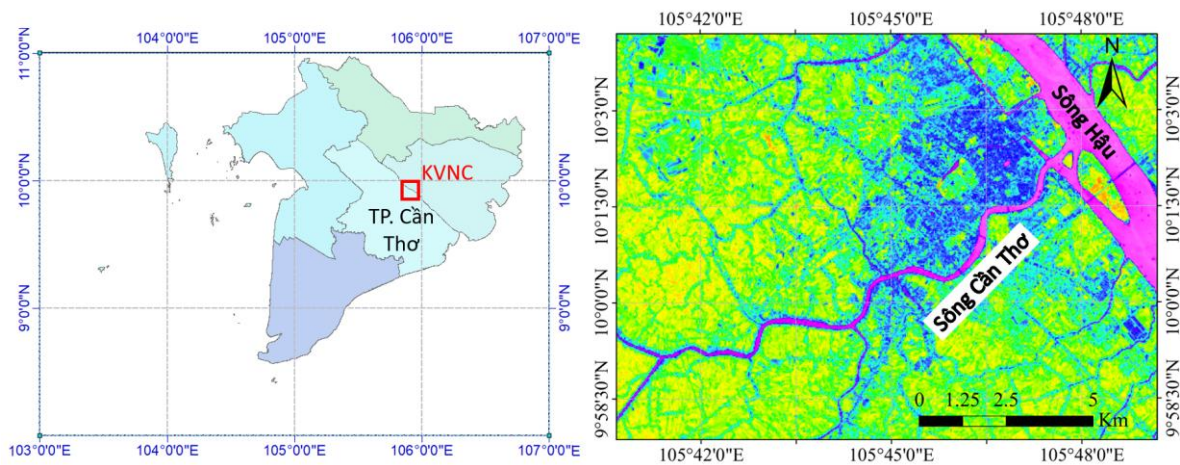
Hình 2). Trước hết, ảnh viễn thám đa thời gian được thu thập nhằm phục vụ phân tích biến động bờ sông. Tiếp theo, các ảnh này được phân loại để tách riêng khu vực nước và đất, từ đó hỗ trợ việc nhận diện đường bờ. Ở bước thứ tư, đường bờ được chiết xuất từ kết quả phân loại ảnh. Sau đó, sự thay đổi vị trí đường bờ qua các giai đoạn được tính toán để xác định mức độ dịch chuyển. Cuối cùng, các kết quả được tổng hợp để thống kê chiều dài xói lở, ổn định và bồi tụ, làm cơ sở cho đánh giá và phân tích biến động hình thái bờ sông.

2.1. Thông tin ảnh viễn thám

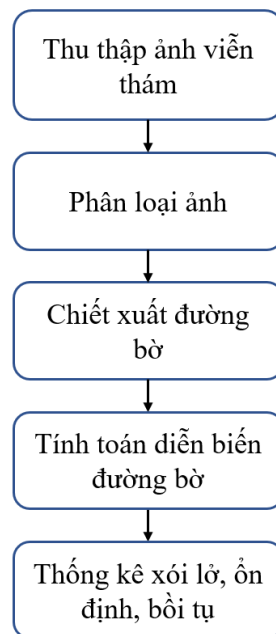
Dữ liệu ảnh Landsat từ năm 2000 đến 2025 được thu thập từ trang web <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Sau đó, đường bờ cho từng

năm được chiết xuất bằng cách áp dụng chỉ số NDWI (Normalized Difference Water Index) và phân tích xói lở hoặc bồi tụ trong khu vực nghiên cứu được thực hiện bằng công cụ DSAS (Digital Shoreline Analysis System).

Nghiên cứu này sử dụng ảnh vệ tinh Landsat 5, 8 và 9, được tải miễn phí từ trang web của Cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ (USGS). Các ảnh được chọn phải đảm bảo yêu cầu về độ rõ nét và mức độ mây che phủ. Ban đầu, ảnh với mức độ mây dưới 10 % được ưu tiên sử dụng. Tuy nhiên, do hạn chế về nguồn ảnh, một số ảnh với tỷ lệ mây lên đến 30 % cũng được sử dụng, miễn là mây không ảnh hưởng đến khu vực nghiên cứu. Thông tin ảnh Landsat sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày trong Bảng 1.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu.



Hình 2. Sơ đồ nghiên cứu.

**Bảng 1.** Thông tin ảnh Landsat sử dụng trong nghiên cứu.

Thời gian	Vệ tinh	Cảm biến	Độ phân giải (m × m/pixel)	Hệ tọa độ
09/12/2009	Landsat 5	TM	30	UTM
18/05/2010	Landsat 5	TM	30	UTM
24/01/2015	Landsat 8	OLI/TIRS	30	UTM
16/05/2015	Landsat 8	OLI/TIRS	30	UTM
23/02/2020	Landsat 8	OLI/TIRS	30	UTM
28/02/2025	Landsat 9	OLI/TIRS	30	UTM

**2.2. Xử lý và phân loại ảnh**

Trong nghiên cứu này, khi tiến hành xử lý dữ liệu Landsat, chỉ số chuẩn hóa nước (NDWI) được sử dụng để phân loại ngẫu nhiên nhằm phân tách hoàn toàn giữa vùng nước và vùng bờ. Những hình ảnh được phân loại dùng để trích xuất các đường bờ biển dưới dạng ảnh vector. Chỉ số NDWI sử dụng kênh quang phổ cận hồng ngoại (NIR) và kênh xanh lục (GREEN) với các giá trị nhận được luôn nằm trong khoảng -1 đến +1. Khi chỉ số mang giá trị từ 0 trở lên, pixel sẽ được xem xét phân loại là vùng nước:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (1)$$

Trong đó:

Ảnh Landsat 5, kênh 2 (B02) là kênh xanh lục (GREEN) và kênh 4 (B04) là kênh cận hồng ngoại (NIR). Ảnh Landsat 8 có kênh hồng ngoại gần và kênh xanh lục được quy định lần lượt là kênh 5 (B05) và kênh 3 (B03).

Chỉ số NDWI được tính toán, phân loại tự động bằng công cụ Raster Calculator (Map Algebra) sẵn có trên phần mềm ArcMap. Những phân lớp sau khi hiệu chỉnh nhiều lần trên dạng ảnh số raster (mỗi pixel tương ứng với một loại đối tượng, một tập hợp các đối tượng có cùng thuộc tính sẽ tạo nên một phân lớp) được chiết xuất bằng cách chuyển đổi thành các tập dữ liệu vector (mỗi lớp phân loại được mô tả bằng một hay nhiều đa giác khác nhau). Sau đó, tiến hành hiệu chỉnh thủ công bằng phương pháp giải đoán trực quan nhằm so sánh và chỉnh sửa kết quả được phân tích bằng thuật toán với hình ảnh thực tế (

Hình 3).

Vận tốc thay đổi đường bờ là chỉ số quan trọng trong nghiên cứu bờ biển, do sự thay đổi vị trí đường bờ theo thời gian. Thay đổi này có thể là dài hạn (long-term) hoặc ngắn hạn (short-term). Một phương pháp phổ biến để tính toán vận tốc thay đổi đường bờ là hồi quy tuyến tính (LRR). Phương pháp này sử dụng tất cả các dữ liệu về vị trí đường bờ để xác định độ dốc của đường thẳng hồi quy, từ đó tính được vận tốc thay đổi đường bờ:

$$y = a \times t + b \quad (2)$$

Trong đó:

- y là vị trí đường bờ (m);
- a: là hệ số góc của đường thẳng hồi quy và là tốc độ thay đổi vị trí đường bờ (m/năm);
- t: là thời gian (năm);

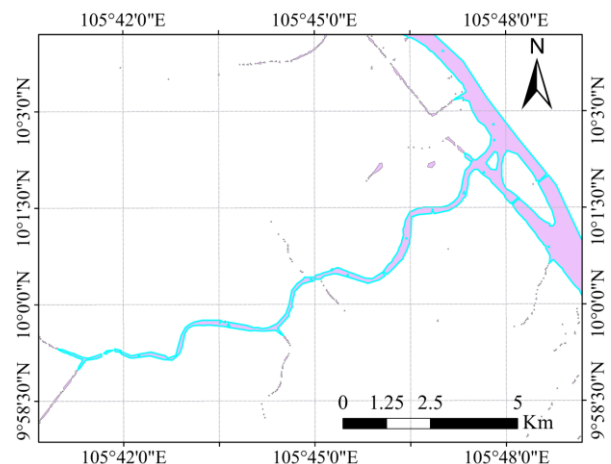
- b: là giao điểm giữa đường thẳng hồi quy và trục tung.
- Kết hợp với công thức tính khoảng cách giữa 2 đường bờ:

$$EPR = \frac{d}{t} \quad (3)$$

Trong đó:

- d: khoảng cách biến động là khoảng cách giữa 2 đường bờ nước (m);
- t: tổng thời gian theo biến động là khoảng thời gian giữa thời điểm có đường bờ cũ và mới nhất.

Giá trị của EPR, LRR có thể âm hoặc dương, trong đó giá trị dương biểu thị chuyển động ra xa bờ (ra ngoài sông - bồi tụ) và giá trị âm thể hiện sự di chuyển về phía đất liền (sạt lở).



**Hình 3.** Chiết xuất đường bờ.

**3. Kết quả**

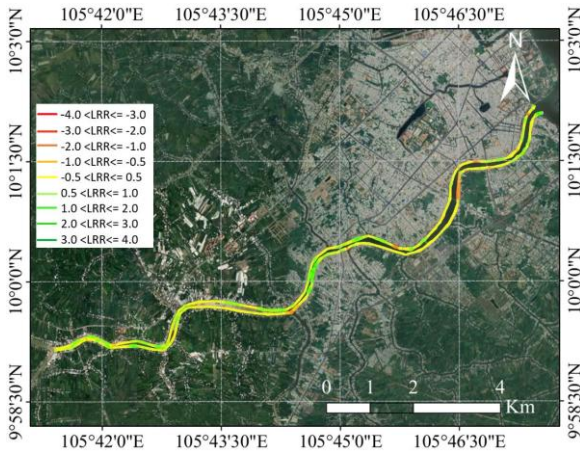
**3.1. Kết quả phân tích ảnh sông Cần Thơ**

Diễn biến đường bờ sông Cần Thơ được thể hiện trên Hình 4, trong đó các đoạn bờ được phân loại dựa trên giá trị tốc độ thay đổi đường bờ trung bình hàng năm (LRR). Màu đỏ đại diện cho các khu vực xói lở mạnh với giá trị LRR từ -4,0 đến -3,0 m/năm, trong khi các màu vàng và xanh lá thể hiện những khu vực xói nhẹ hoặc bồi tụ.

Kết quả cho thấy các đoạn bờ xói lở mạnh chủ yếu tập trung tại những khúc sông uốn cong, nơi hình thái dòng chảy phức tạp và chịu tác động mạnh của dòng chảy chính. Một số khu vực xói lở cũng liên quan đến mật độ tàu thuyền qua lại cao, tạo ra sóng tàu và xáo trộn bờ.

Ngược lại, các đoạn bồi tụ với giá trị LRR từ 2,0 đến 4,0 m/năm thường xuất hiện tại các đoạn sông mở rộng, dòng chảy yếu và có bãi bồi hình thành. Ngoài ra, phần lớn các đoạn bờ còn lại ở trạng thái tương đối ổn định hoặc chỉ thay đổi nhẹ với giá trị LRR dao động từ -0,5 đến 0,5 m/năm.

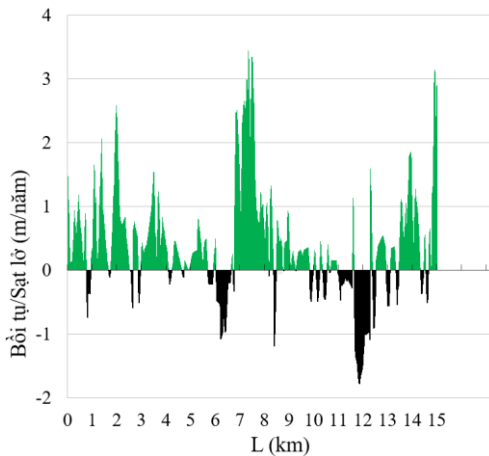
Bản đồ kết quả phản ánh rõ sự phân hóa giữa các khu vực xói lở và bồi tụ dọc theo sông Cần Thơ, cung cấp thông tin quan trọng để đánh giá mức độ rủi ro và hỗ trợ đề xuất các giải pháp quản lý bờ sông hiệu quả.



Hình 4. Kết quả phân tích diễn biến đường bờ sông Cần Thơ.

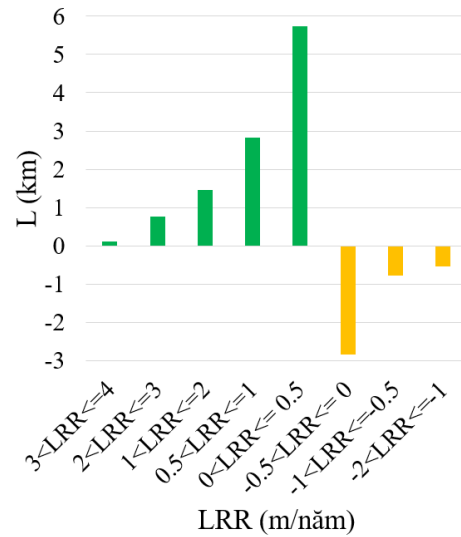
### 3.2. Biến động đường bờ phía Nam sông Cần Thơ

Hình 5 thể hiện diễn biến tốc độ thay đổi đường bờ tại khu vực phía Nam sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025. Kết quả cho thấy khu vực bờ Nam chủ yếu diễn ra hiện tượng bồi tụ, với nhiều đoạn có tốc độ bồi tụ vượt quá 2 m/năm, đặc biệt tập trung tại các vị trí từ km 0 – 3, km 7 – 9 và gần km 15. Ngược lại, xói lở xảy ra chủ yếu ở các đoạn sông hẹp và uốn cong, đặc biệt rõ rệt tại khu vực từ km 5 – 7 và km 10 – 12, với tốc độ xói có nơi đạt hơn 1 m/năm.



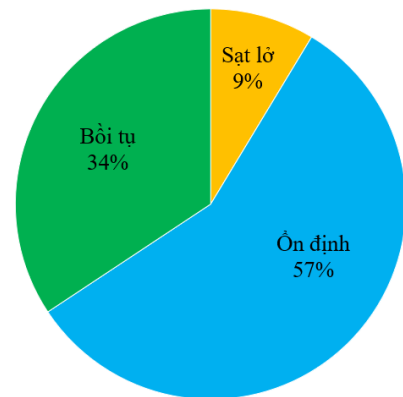
Hình 5. Diễn biến tốc độ thay đổi đường bờ phía Nam sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025.

Hình 6 thống kê tổng chiều dài các mức độ xói bồi (LRR) của bờ Nam trong giai đoạn nghiên cứu. Bồi tụ chiếm ưu thế với chiều dài các đoạn bờ có tốc độ bồi từ 0,5 đến 2 m/năm lớn hơn đáng kể so với tổng chiều dài các đoạn xói lở. Tuy nhiên, vẫn tồn tại các đoạn xói lở nhẹ đến trung bình (-0,5 đến -2 m/năm), phản ánh sự phân hóa mạnh mẽ về động lực dòng chảy và điều kiện hình thái.



Hình 6. Biểu đồ thống kê tổng chiều dài của từng mức độ xói/bồi (LRR) tại đường bờ phía Nam sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025.

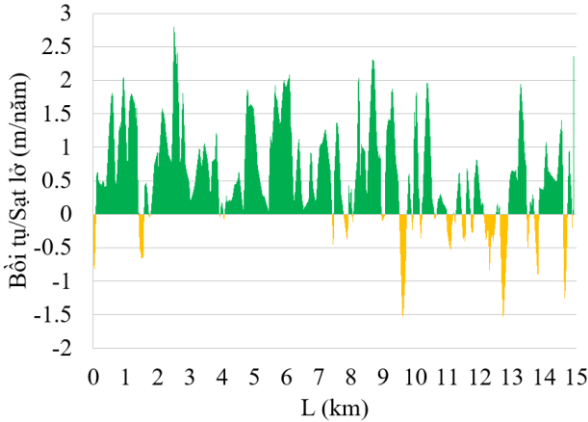
Hình 7 cho thấy tỷ lệ diện tích bồi tụ chiếm 34%, trong khi xói lở chiếm khoảng 9% và phần lớn còn lại (57%) ở trạng thái ổn định. Điều này chứng tỏ bờ Nam sông Cần Thơ trong giai đoạn 2010 – 2025 nhìn chung có xu thế bồi tụ nhiều hơn xói lở, tuy nhiên các đoạn xói tập trung ở những vị trí trọng yếu vẫn cần được theo dõi và có biện pháp quản lý phù hợp.



Hình 7. Tỷ lệ bồi tụ và xói lở tại đường bờ phía Nam sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025.

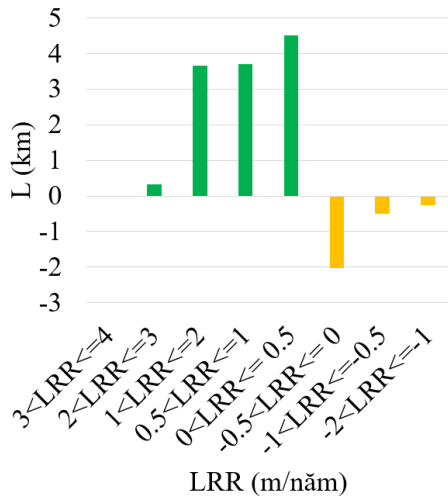
### 3.3. Biến động đường bờ phía Bắc sông Cần Thơ

Hình 8 thể hiện diễn biến tốc độ thay đổi đường bờ tại khu vực phía Bắc sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025. Kết quả cho thấy khu vực bờ Bắc cũng có xu thế bồi tụ chiếm ưu thế, đặc biệt tại các đoạn từ km 0 – 3, km 5 – 8 và km 12 – 14, với tốc độ bồi có nơi vượt quá 2 m/năm. Xói lở chủ yếu xuất hiện ở một số đoạn sông hẹp hoặc có dòng chảy mạnh, đáng chú ý nhất là khu vực từ km 9 – 11, với tốc độ xói lở khoảng -1 đến -1,5 m/năm.



Hình 8. Diễn biến tốc độ thay đổi đường bờ phía Bắc sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025.

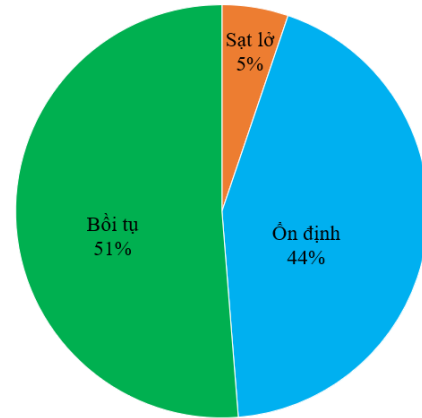
Hình 9 thống kê tổng chiều dài của từng mức độ xói bồi (LRR) dọc theo bờ Bắc. Bồi tụ nổi bật trong các mức 0,5 đến 2 m/năm, chiếm tổng chiều dài lớn nhất, trong khi các đoạn xói lở chủ yếu ở mức nhẹ (-0,5 đến -1 m/năm) và chiếm tỷ trọng nhỏ. Dữ liệu này tương quan chặt chẽ với Hình 8, phản ánh rõ những đoạn sông có tốc độ thay đổi cao.



Hình 9. Biểu đồ thống kê tổng chiều dài của từng mức độ xói/bồi (LRR) tại đường bờ phía Bắc sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025.

Hình 10 cho thấy tỷ lệ tổng hợp giữa ba trạng thái bờ, với 51 %

chiều dài bờ Bắc trong giai đoạn nghiên cứu có xu thế bồi tụ, 5 % bị xói lở và 44 % còn lại ổn định. Điều này cho thấy bờ Bắc có xu hướng bồi mạnh hơn bờ Nam, mặc dù vẫn có một số khu vực xói lở cục bộ cần được quản lý và gia cố.



Hình 10. Tỷ lệ bồi tụ và xói lở tại đường bờ phía Bắc sông Cần Thơ giai đoạn 2010 – 2025.

### 4. Thảo luận

Kết quả phân tích diễn biến đường bờ sông Cần Thơ trong giai đoạn 2010 – 2025 cho thấy cả hai bờ đều có xu thế bồi tụ chiếm ưu thế, tuy nhiên mức độ bồi và xói có sự phân hóa rõ rệt giữa từng khu vực. Bờ Nam ghi nhận 34 % chiều dài bờ có xu thế bồi tụ, 9 % xói lở và 57 % ổn định. Trong khi đó, bờ Bắc có tới 51 % chiều dài bồi tụ, 5 % xói lở và 44 % ổn định. Điều này cho thấy bờ Bắc nhìn chung có xu thế bồi mạnh hơn bờ Nam, đồng thời mức độ xói lở cũng thấp hơn.

Các khu vực bồi tụ chủ yếu tập trung tại những đoạn sông thẳng hoặc mở rộng, nơi dòng chảy yếu, đặc biệt tại các khoảng km 0 – 3, km 7 – 9 và km 12 – 15 của bờ Nam, và các đoạn km 0 – 3, km 5 – 8 và km 12 – 14 của bờ Bắc. Ngược lại, xói lở thường xảy ra tại những đoạn sông uốn cong hoặc có dòng chảy xiết, chẳng hạn như khu vực km 5 – 7 và km 10 – 12 trên bờ Nam, hay từ km 9 – 11 trên bờ Bắc. Sự khác biệt này cho thấy hình thái dòng chảy và đặc điểm thủy lực là yếu tố quyết định chính đến xu thế xói bồi của từng đoạn bờ.

So sánh giữa các biểu đồ, Hình 5 và Hình 8 cung cấp thông tin vị trí và mức độ xói bồi cụ thể dọc tuyến, trong khi Hình 6 và Hình 9 lượng hóa chiều dài từng mức độ xói bồi, và Hình 7 và Hình 10 cho thấy tỷ trọng phần trăm các trạng thái bờ. Sự kết hợp giữa các biểu đồ này giúp đưa ra cái nhìn toàn diện, không chỉ về từng khu vực cụ thể mà còn về xu thế tổng thể của toàn bộ hệ thống bờ sông Cần Thơ.

Một yếu tố đáng chú ý là tác động của tàu thuyền và các công trình chỉnh trị ven sông. Tại những khu vực có mật độ tàu thuyền cao, hiện tượng sóng tàu gây xói chân bờ thường được ghi nhận. Ngoài ra, một số khu vực bồi tụ có thể bị ảnh hưởng bởi việc bồi lắng do giảm năng lượng dòng chảy sau khi qua các công trình ven sông. Những yếu tố này cần được xem xét trong các nghiên cứu và giải pháp quản lý bờ sông dài hạn.



## 5. Kết luận

Nghiên cứu đã chỉ ra rằng diễn biến bờ sông Cần Thơ trong giai đoạn 2010 – 2025 chủ yếu có xu thế bồi tụ, với bờ Bắc thể hiện xu thế bồi mạnh và ổn định hơn so với bờ Nam. Các khu vực xói lở tuy chiếm tỷ lệ nhỏ nhưng tập trung tại những vị trí trọng yếu và có nguy cơ cao đối với hạ tầng và dân cư ven sông.

Ba nhóm kết quả chính bao gồm: (1) Bản đồ và biểu đồ tốc độ thay đổi vị trí bờ sông đã chỉ rõ vị trí và mức độ bồi/xói cụ thể trên từng đoạn bờ, (2) Thống kê tổng chiều dài các mức độ LRR cho phép định lượng chính xác tỷ lệ bồi, xói và ổn định, và (3) Phân tích tỷ lệ phần trăm bồi/xói phản ánh xu thế tổng thể của toàn tuyến sông.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho công tác quy hoạch và quản lý bờ sông Cần Thơ. Trong tương lai, việc kết hợp thêm dữ liệu thủy động lực, tác động của tàu thuyền, cũng như các hoạt động khai thác cát và công trình chỉnh trị sẽ giúp nâng cao độ chính xác và tính ứng dụng của nghiên cứu.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Cần Thơ, Mã số: CTCS2024-06-04.

## Tài liệu tham khảo

- [1]. Kondolf, G.M., Z.K. Rubin, and J. Minear, *Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation*. Water Resources Research, 2014. **50**(6): p. 5158-5169.
- [2]. Wohl, E., *An integrative conceptualization of floodplain storage*. Reviews of Geophysics, 2021. **59**(2): p. e2020RG000724.
- [3]. Tri, V.P.D., et al., *Progress toward resilient and sustainable water management in the Vietnamese Mekong Delta*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2023. **10**(6): p. e1670.
- [4]. Yoshida, Y., et al., *Impacts of mainstream hydropower dams on fisheries and agriculture in lower Mekong Basin*. Sustainability, 2020. **12**(6): p. 2408.
- [5]. Anthony, E.J., et al., *Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities*. Scientific reports, 2015. **5**(1): p. 14745.
- [6]. Bishop, A.W., *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes*. Geotechnique, 1955. **5**(1): p. 7-17.
- [7]. Shields Jr, F.D., A. Simon, and L.J. Steffen, *Reservoir effects on downstream river channel migration*. Environmental Conservation, 2000. **27**(1): p. 54-66.
- [8]. Rinaldi, M., et al., *Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend*. Water Resources Research, 2008. **44**(9).
- [9]. Baig, M.R.I., et al., *Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS)*. Annals of GIS, 2020. **26**(4): p. 361-376.
- [10]. Himmelstoss, E.A., et al., *Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.1 user guide*. 2021, US Geological Survey.
- [11]. McFeeters, S.K., *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. International journal of remote sensing, 1996. **17**(7): p. 1425-1432.