

Chung tay
quản lý và
khai thác cát
bền vững.



Supported by:



Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation,
Nuclear Safety and Consumer Protection

based on a decision of
the German Bundestag



INTERNATIONAL
CLIMATE
INITIATIVE

Deltares



**IHE
DELFT**

NGÂN HÀNG CÁT CHO ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Báo cáo cuối cùng



Deltares (Hà Lan)

Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường (Việt Nam)

Tư vấn phụ

Viện đào tạo về Nước IHE-Delft (Hà Lan)

Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ

Công ty Cổ phần Định vị Thiên Nam

Ngân hàng Cát cho Đồng bằng sông Cửu Long
Báo cáo cuối cùng

| | |
|------------|---|
| Khách hàng | WWF-Vietnam |
| Liên hệ | |
| Tham chiếu | Ông Hà Huy Anh |
| Từ khóa | Đồng bằng sông Cửu Long, Ngân hàng cát, Khai thác cát, Delft3D-FM |

| Thông tin tài liệu | |
|--------------------|-----------------------|
| Phiên bản | 1.0 |
| Ngày | 30-08-2023 |
| Mã dự án | 11206927-000 |
| Mã số văn bản | 11206927-000-ZKS-0009 |
| Số trang | 137 |
| Loại | |
| Tình trạng | Bản cuối cùng |

| Người thực hiện | Đơn vị | Kiểm tra | Phê duyệt |
|------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|
| Sepehr Eslami | Deltares | Kees Sloff (Deltares) | Bart Grasmeijer (Deltares) |
| Đinh Phương Trang | Deltares | | |
| Mick van der Wegen | IHE-Delft, Deltares | | |
| Floortje Roelvink | Deltares | | |
| Roeland Nieboer | Deltares | | |
| Antonio Moreno Rodenas | Deltares | | |
| Ruben White | Deltares | | |
| Võ Quốc Thành | IHE-Delft | | |
| Dano Roelvink | IHE-Delft, Deltares | | |
| Johan Reyns | IHE-Delft, Deltares | | |
| Trần Ngọc Anh | CEFD | | |
| Phạm Thị Tuyết Mỹ | CEFD | | |
| Hoàng Thái Bình | CEFD | | |
| Trần Vinh Quang | CEFD | | |
| Phạm Duy Huy Bình | CEFD | | |
| Lý Tuấn Minh | CEFD | | |

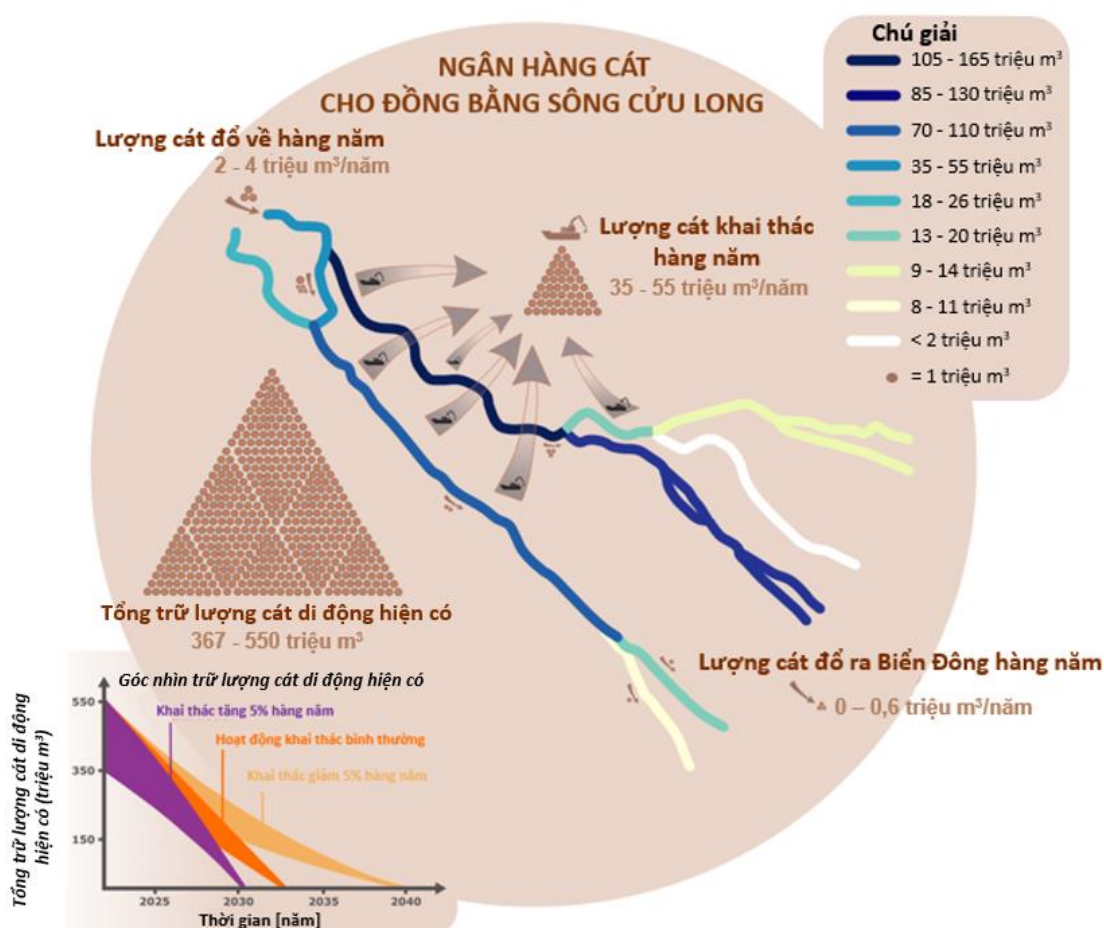
*Việc sử dụng bảng này chỉ cho phép kiểm tra trình tự thực hiện đúng dẫn bởi Deltares.
Bất kỳ sử dụng nội bộ khách hàng và phân phối ra bên ngoài đều không được phép.*

| Phiên bản tài liệu | Người thực hiện | Kiểm tra | Phê duyệt |
|--------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| 1.0 | Sepehr Eslami | Kees Sloff (Deltares) | Bart Grasmeijer (Deltares) |
| | | | |

Tóm tắt

Trong bối cảnh dự án của Quỹ Sáng kiến Khí hậu Quốc tế (IKI), nghiên cứu hiện tại nhằm mục đích đưa ra tính toán Ngân hàng Cát đầu tiên ở Đồng bằng sông Cửu Long Việt Nam (ĐBSCL). ĐBSCL đang đô thị hóa nhanh chóng, là một trong những đồng bằng nằm ở vị trí thấp nhất trên toàn thế giới, đang chịu áp lực từ các yếu tố khí hậu và nhân tạo khác nhau, do đó, đồng bằng dễ bị tổn thương trước các tác động môi trường khác nhau. Xâm nhập mặn, sụt lún đất, lũ lụt, xói lở bờ biển, suy giảm chất lượng nước và suy giảm đa dạng sinh học là một trong những quá trình đe dọa an ninh lương thực của Việt Nam và sự phát triển chiến lược của vùng đồng bằng. Những phát hiện khoa học gần đây chứng minh rằng xói mòn lòng sông, bờ sông và bờ biển, khuếch đại thủy triều và xâm nhập mặn chủ yếu là do sự thiếu hụt trầm tích do con người gây ra ở vùng đồng bằng. Thiếu hụt trầm tích có thể được phân thành hai loại: A) Thiếu trầm tích mịn do phát triển thủy điện ở thượng nguồn lưu vực sông Mekong và B) suy giảm trầm tích thô do khai thác cát trong (và ngoài) ĐBSCL.

Nghiên cứu này, ước tính lượng cát khai thác trong gần một thập kỷ, cho thấy việc khai thác cát ở mức 35-55 triệu m^3 /năm là một trong những nguyên nhân chính gây ra vết rạch lòng sông và sự mất ổn định hình thái của ĐBSCL. Tổng lượng cát đổ về ĐBSCL (2-4 triệu m^3 /năm) thấp hơn nhiều so với tốc độ khai thác cát hiện nay. Mặc dù lượng cát rời khỏi đồng bằng đổ ra Biển Đông còn hạn chế (0-0,6 triệu m^3 /năm), nhưng với nhu cầu cát dự kiến trong những thập kỷ tới, trữ lượng cát di động hiện có (367-550 triệu m^3) không thể tồn tại lâu hơn một thập kỷ (xem Hình 1).

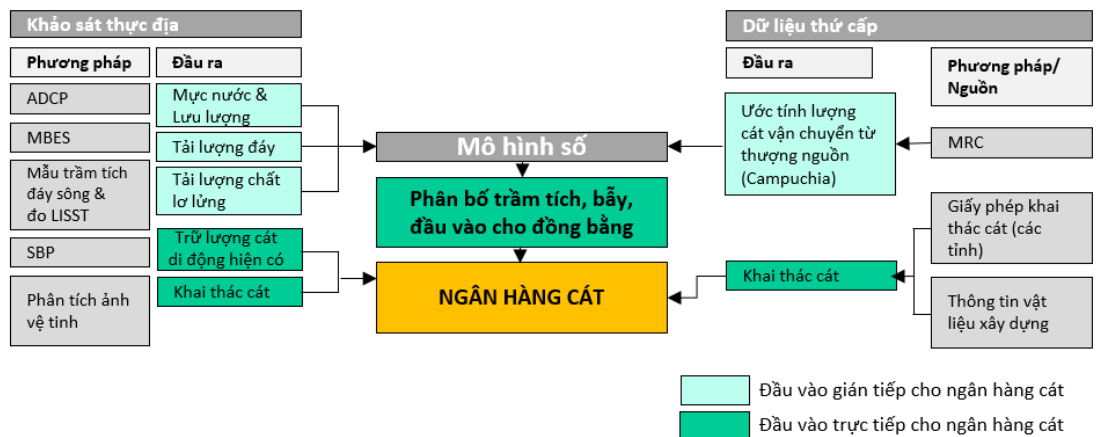


Hình 1: Ngân hàng cát của vùng ĐBSCL với ước tính về lượng cát sẵn có cho tới giữa thế kỷ.

Kết quả của nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng đối với việc quản lý tài nguyên của ĐBSCL. Hình 1 cho thấy các ước tính trên và dưới về sự suy giảm trữ lượng cát di động hiện có theo ba kịch bản khai thác khác nhau: a) tăng 5% tốc độ khai thác hiện tại, b) hoạt động khai thác như bình thường và c) giảm 5% tốc độ khai thác hiện tại. Theo kế hoạch giảm thiểu sự phụ thuộc vào cát sông có kiểm soát, với trữ lượng cát di động hiện có có thể kéo dài đến năm 2040. Tuy nhiên, dự án này không nghiên cứu các tác động về hình thái và môi trường của việc khai thác toàn bộ lượng cát hiện có. Mặc dù điều này có thể dẫn đến tình trạng mất ổn định bờ sông (xói mòn bờ) cũng như xói mòn bờ biển, dựa trên các dự báo về độ mặn hiện có, việc mất đi nửa tỷ m³ trầm tích từ hệ thống sông ĐBSCL có thể làm tăng thêm 10-15% số diện tích bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn trong ĐBSCL. Lưu ý rằng ngân hàng cát hiện tại chỉ là dự báo nhanh vào năm 2022. Ví dụ, nguồn cung cấp cát từ thượng nguồn có thể giảm do hoạt động khai thác ở Campuchia. Ngoài ra, xói lở do khai thác cát ở thượng nguồn cũng di chuyển xuống hạ nguồn. Do đó, nên xem xét tính chất xuyên biên giới của việc quản lý trầm tích (bao gồm cát) ngoài ĐBSCL trong các hoạt động hợp tác đa phương. Các kết quả có thể đóng vai trò là cơ sở quan trọng cho việc quản lý bền vững các nguồn tài nguyên thiên nhiên của sông Mekong và để giảm tính dễ bị tổn thương của ĐBSCL đối với biến đổi khí hậu và tác động của con người.

Cách tiếp cận

Phương pháp nghiên cứu kết hợp việc thu thập số liệu từ một chiến dịch thực địa trên toàn vùng đồng bằng bao gồm dữ liệu thủy động lực học, khảo sát địa chấn tầng nông trên 550 km hệ thống sông ở đồng bằng, khảo sát đo sâu hồi âm đa tia chi tiết để theo dõi sự dịch chuyển của cát và lấy mẫu trầm tích lơ lửng và trầm tích đáy (Gói công việc WP1). Dự án đã thu thập thêm dữ liệu hiện có từ Ủy hội sông Mekong và chính quyền cấp tỉnh. Hơn nữa, một mô hình số hiện đại (WP2) đã cung cấp một công cụ mạnh mẽ để tích hợp các yếu tố khác nhau của ngân hàng cát. Điều này và một loạt các cuộc tham vấn với các bên liên quan của ĐBSCL ở cấp quốc gia và cấp tỉnh đã dẫn đến báo cáo hiện tại đánh dấu sự hoàn thành của dự án ngân hàng cát cát cho ĐBSCL. Hình 2 cung cấp góc nhìn tổng quan về các hoạt động đã đóng góp như thế nào vào việc xác định ngân hàng cát toàn đồng bằng.



Hình 2: Tổng quan các hoạt động đóng góp vào xây dựng ngân hàng cát cho Đồng bằng sông Cửu Long

Trọng tâm của sự phát triển, tính toán ngân hàng cát là mô hình số Delft3D-Flexible Mesh, trong đó động lực học trầm tích của ĐBSCL được mô phỏng (phân phối trầm tích và nước, đầu vào trầm tích cho đồng bằng, mẫu trầm tích). Các khảo sát thực địa như đo lưu lượng, khảo sát đo sâu hồi âm đa tia, lấy mẫu trầm tích lòng sông và trầm tích lơ lửng được đưa vào mô hình số để hiệu chỉnh và kiểm định định tính và/hoặc định lượng mô hình và để cung cấp thêm thông tin cho đánh giá của chuyên gia nhằm tích hợp kiến thức đã phát triển. Ngoài mô hình số, các quan trắc đo đạc thực địa và dữ liệu thứ cấp về khai thác cát, trữ lượng cát di động và đầu vào cát ở thượng nguồn (Campuchia) là đầu vào cần thiết cho tính toán.

Trữ lượng cát di động hiện có (WP1)

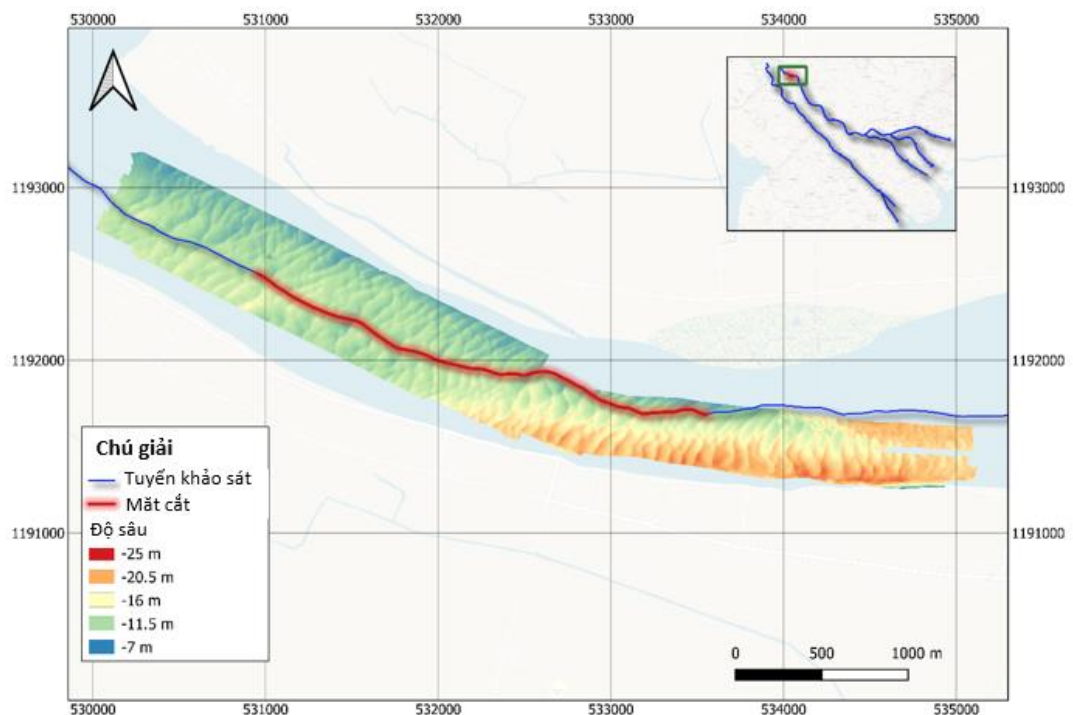
Trữ lượng cát di động hiện có dọc theo sông Mekong được xác định dựa trên đợt khảo sát đo đạc địa chấn tầng nông với chiều dài 550 km. Dữ liệu thu thập được xử lý bằng cách sử dụng dữ liệu lỗ khoan địa chất, lấy mẫu bề mặt và dữ liệu đo độ sâu đã thu thập (Xem Hình 1 để biết kết quả, và Hình 3 để biết phạm vi). Thượng nguồn sông Tiền và Cỏ Chiên có trữ lượng cát di động cao nhất, tiếp theo là sông Hậu. Trữ lượng cát di động thấp hơn đáng kể ở hạ nguồn sông Mekong và sông Hàm Luông. Tổng trữ lượng cát di động hiện có của ĐBSCL ước tính khoảng 367-550 triệu m³. Ước tính này chủ yếu dựa trên lớp cát di động. Có thể có thêm các nguồn cát bị chôn vùi không được phát hiện trong nghiên cứu này, nhưng điều này không có nghĩa là các nguồn cát này có thể dễ dàng tiếp cận để khai thác.

Ước tính vận chuyển tải lượng đáy cho các cuộc khảo sát mùa khô và mùa mưa (WP1)

Các ước tính vận chuyển tải lượng đáy được lấy từ phân tích theo dõi đụn cát (xem Hình 3). Tải lượng đáy trong mùa mưa cao gấp 10 đến 60 lần so với mùa khô. Tải lượng đáy cao nhất được quan trắc tại Tân Châu, với tải lượng đáy khoảng 2000×10^{-5} m³/s trong mùa mưa. Tại Long Xuyên và Cao Lãnh, tải lượng đáy với độ lớn 1000×10^{-5} m³/s và 1200×10^{-5} m³/s đã được quan trắc.

Ước tính khai thác cát trên toàn vùng đồng bằng sử dụng hình ảnh vệ tinh (WP1)

Tỷ lệ khai thác cát được ước tính bằng 1) phát hiện tàu khai thác bằng ảnh vệ tinh (Sentinel-2), 2) chuyển đổi số lượng tàu thành ước tính khối lượng cát khai thác dựa trên tỷ lệ sản xuất và 3) hiệu chỉnh độ che phủ của mây. Từ năm 2017 đến năm 2022, khối lượng khai thác cát hàng năm ước tính dao động trong khoảng từ 35 đến 55 triệu m³/năm. Lưu ý rằng độ phân giải hiện tại của hình ảnh vệ tinh đặt ra những hạn chế về độ chính xác của ước tính và cần phải xem xét kỹ lưỡng hơn.



Hình 3: Tổng quan về khảo sát địa chấn tầng nông ở ĐBSCL để ước tính trữ lượng cát di động hiện có (hình trên cùng bên phải) và một ví dụ về khảo sát đo độ sâu hồi âm đa tia chi tiết (hình chính) thể hiện các đụn cát, trong trường hợp này, tại gần Tân Châu (sông Tiền), sát biên giới Campuchia.

Kết quả mô hình số Delft3D-Flexible Mesh (WP2)

Mô hình 2D Delft3D-FM mô tả sông Mekong từ Kratie bao gồm hồ Ton Le Sap ở Campuchia, đồng bằng ngập lũ ở Campuchia và Việt Nam, 9 nhánh sông chảy qua ĐBSCL và trải dài 70 km trên thềm lục địa ngoài khơi. Đã thực hiện hiệu chỉnh thành công mô hình thủy động lực bằng biến thiên độ nhám so với dữ liệu đo được về mực nước (16 trạm) và lưu lượng (5 trạm) cho giai đoạn 2021-2022. Dữ liệu khan hiếm từ tài liệu tại các địa điểm ở Campuchia cho thấy vận chuyển cát lơ lửng có cường độ lớn hơn tải lượng cát đáy, trong khi vận chuyển hạt mịn (phù sa/bùn) có cường độ lớn hơn vận chuyển cát lơ lửng. Trong nghiên cứu hiện tại, việc kiểm định vận chuyển cát được thực hiện dựa trên các ước tính tải lượng đáy duy nhất, có nguồn gốc từ đo sâu đa tia hồi âm có cùng độ lớn với tải lượng đáy được mô hình hóa.

Kết quả mô hình cho thấy tổng khối lượng vận chuyển cát vào năm 2022 hầu như không vượt quá 7 triệu tấn/năm (thường nhỏ hơn nhiều) và vẫn nhỏ hơn nhiều so với khối lượng khai thác cát ước tính hàng năm là ~50 triệu tấn/năm tại ĐBSCL. Dự đoán khối lượng vận chuyển cát vẫn không chắc chắn tùy thuộc vào dữ liệu đầu vào mô hình khan hiếm. Tuy nhiên, các phân tích độ nhạy cho thấy khối lượng vận chuyển cát hàng năm vẫn ở mức thấp trong phạm vi ước tính tốt nhất đối với một loạt các tham số đầu vào của mô hình. Các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến vận chuyển cát bao gồm sự hiện diện của bùn và sự sẵn có của cát trong đáy sông (thành phần đáy). Ước tính lượng cát vận chuyển ra biển tại các cửa sông thuộc các nhánh khác nhau được mô hình hóa cho thấy lượng cát cung cấp cho khu vực cửa sông vẫn nhỏ hơn nhiều so với lượng cát cung cấp vào ĐBSCL. Những ước tính này ở cửa sông có khả năng cải thiện với mô hình 3D tính đến động lực nước ngọt-mặn, nhưng vì độ mặn chủ yếu là một hiện tượng mùa khô, chúng tôi cho rằng điều này có tầm quan trọng nhỏ hơn so với các yếu tố khác.

Mục lục

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Tóm tắt | 4 |
| | Danh mục từ viết tắt | 11 |
| | Danh mục hình ảnh | 12 |
| | Danh mục bảng | 19 |
| 1 | Giới thiệu | 21 |
| 1.1 | Bối cảnh | 21 |
| 1.2 | Mục tiêu nghiên cứu | 22 |
| 1.3 | Cách tiếp cận tổng thể | 22 |
| 1.4 | Mục tiêu của báo cáo | 23 |
| 1.5 | Cấu trúc của báo cáo | 23 |
| 1.6 | Tổng hợp các tài liệu hiện có | 24 |
| 2 | Khảo sát thực địa và thu thập dữ liệu (WP1) | 26 |
| 2.1 | Địa điểm và phương pháp khảo sát | 26 |
| 2.1.1 | Trạm quan trắc chính | 28 |
| 2.1.2 | Theo dõi di chuyển của đụn cát bằng phương pháp đo sâu hồi âm đa tia (MBES) | 28 |
| 2.1.3 | Đo đặc địa chấn tầng nông (SBP) | 28 |
| 2.2 | Kết quả khảo sát | 29 |
| 2.2.1 | Mức nước | 29 |
| 2.2.1.1 | Quan trắc thường xuyên | 29 |
| 2.2.1.2 | Khảo sát mùa khô | 30 |
| 2.2.1.3 | Mùa mưa | 32 |
| 2.2.2 | Lưu lượng | 34 |
| 2.2.2.1 | Quan trắc thường xuyên | 34 |
| 2.2.2.2 | Mùa khô | 35 |
| 2.2.2.3 | Mùa mưa | 38 |
| 2.2.3 | Nồng độ trầm tích lơ lửng | 40 |
| 2.2.3.1 | Quan trắc thường xuyên | 40 |
| 2.2.3.2 | Mùa khô | 41 |
| 2.2.3.3 | Mùa mưa | 44 |
| 2.2.4 | Mẫu trầm tích đáy sông | 46 |
| 2.2.4.1 | Mùa khô | 46 |
| 2.2.4.2 | Mùa mưa | 46 |
| 2.2.5 | Thu thập dữ liệu địa chấn tầng nông (SBP) | 47 |
| 2.2.6 | Tóm tắt khảo sát đo sâu hồi âm đa tia (MBES) | 48 |
| 2.2.6.1 | Mùa khô | 49 |
| 2.2.6.2 | Mùa mưa | 49 |
| 2.3 | Thu thập dữ liệu thứ cấp | 50 |
| 3 | Phân tích dữ liệu (WP1) | 52 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1 | Vận chuyển tải lượng đáy | 52 |
| 3.1.1 | Giới thiệu | 52 |
| 3.1.2 | Cách tiếp cận | 52 |
| 3.1.3 | Mô tả đặc điểm sóng cát bằng phương pháp kiểm tra trực quan | 55 |
| 3.1.3.1 | Mùa khô | 55 |
| 3.1.3.2 | Mùa mưa | 56 |
| 3.1.4 | Vận chuyển tải lượng đáy từ phân tích tương quan hai chiều (2D) | 58 |
| 3.1.4.1 | Mùa khô | 58 |
| 3.1.4.2 | Mùa mưa | 61 |
| 3.1.5 | Vận chuyển tải lượng đáy so sánh với các nghiên cứu khác | 69 |
| 3.2 | Trữ lượng cát di động hiện có | 70 |
| 3.2.1 | Cách tiếp cận chính bằng đo đạc địa chấn tầng nông | 70 |
| 3.2.2 | Dữ liệu địa chấn tầng nông | 70 |
| 3.2.3 | Các lỗ khoan địa chất và lấy mẫu trầm tích đáy sông | 70 |
| 3.2.4 | Dữ liệu đo sâu hồi âm đa tia | 73 |
| 3.2.5 | Phương pháp giải đoán | 74 |
| 3.2.6 | Phương pháp tính trữ lượng cát di động hiện có | 75 |
| 3.2.7 | Kết quả | 75 |
| 3.2.8 | Tổng trữ lượng cát di động hiện có | 77 |
| 3.2.9 | Thảo luận | 78 |
| 3.3 | Ước tính khai thác cát | 78 |
| 3.3.1 | Bối cảnh | 78 |
| 3.3.2 | Phương pháp nghiên cứu | 81 |
| 3.3.3 | Kết quả | 84 |
| 3.3.4 | Thảo luận | 87 |
| 4 | Mô hình vận chuyển cát (WP2) | 88 |
| 4.1 | Giới thiệu | 88 |
| 4.1.1 | Mô tả khu vực và động lực dòng chảy | 88 |
| 4.1.2 | Mô hình thủy động lực | 89 |
| 4.1.3 | Quan trắc dựa trên đặc điểm trầm tích | 90 |
| 4.2 | Thiết lập mô hình | 93 |
| 4.2.1 | Yêu cầu về mô hình | 93 |
| 4.2.2 | Mô tả về mô hình | 93 |
| 4.2.3 | Thiết lập mô hình thủy động lực | 94 |
| 4.2.4 | Tạo lưới và cải thiện lưới tính toán | 94 |
| 4.2.5 | Dữ liệu độ sâu | 96 |
| 4.2.6 | Điều kiện biên | 97 |
| 4.2.7 | Điều kiện ban đầu | 97 |
| 4.2.8 | Thiết lập mô hình vận chuyển trầm tích | 97 |
| 4.3 | Kiểm định mô hình thủy động lực học | 99 |
| 4.4 | Mô phỏng kịch bản vận chuyển trầm tích | 103 |
| 4.5 | Hiệu chỉnh vận chuyển cát | 103 |
| 4.5.1 | Tải lượng đáy | 103 |
| 4.5.2 | Tải lượng lơ lửng | 106 |
| 4.6 | So sánh với mô hình vận chuyển trầm tích mịn | 111 |
| 4.7 | Thảo luận về mô hình vận chuyển cát | 112 |
| 5 | Tham vấn các bên liên quan | 114 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.1 | Tham vấn | 114 |
| 5.2 | Hội thảo | 115 |
| 5.2.1 | Hội thảo khởi động | 115 |
| 5.2.2 | Hội thảo báo cáo tiến độ lần 1 | 116 |
| 5.2.3 | Hội thảo báo cáo tiến độ lần 2 (Hội thảo kiểm định) | 117 |
| 5.3 | Tập huấn | 118 |
| 5.3.1 | Tập huấn quan trắc | 118 |
| 5.3.2 | Tập huấn mô hình | 119 |
| 6 | Ngân hàng cát toàn khu vực đồng bằng sông Cửu Long (WP2) | 123 |
| 7 | Tài liệu tham khảo | 125 |
| A | Phụ lục A | 129 |
| A.1 | Kết quả lấy mẫu đáy sông trong mùa khô | 130 |
| A.2 | Kết quả lấy mẫu đáy sông trong mùa mưa | 133 |
| B | Phụ lục B | 136 |

Danh mục từ viết tắt

| Từ viết tắt | Mô tả |
|------------------------|--|
| ADCP | Acoustic Doppler Current Profilers |
| CEFD | Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường |
| Đài KTTV Nam Bộ | Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ |
| Sở NN&PTNT | Sở Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn |
| Sở TN&MT | Sở Tài nguyên và Môi trường |
| IKI | Quỹ Sáng kiến Khí hậu Quốc tế |
| LISST | Laser In-Situ Scattering and Transmissometry |
| Bộ NN&PTNT | Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn |
| MBES | Đo sâu hồi âm đa tia |
| Bộ XD | Bộ Xây dựng |
| Bộ TN&MT | Bộ Tài nguyên và Môi trường |
| Bộ KH&ĐT | Bộ Kế hoạch và Đầu tư |
| MRC | Ủy hội sông MeKong |
| NSE | Hệ số hiệu quả Nash-Sutcliffe |
| RGSPan | Kế hoạch Duy trì và Ổn định Hình thái sông (dự án song song) |
| SBP | Đo đạc địa chấn tầng nông |
| SSC | Nồng độ trầm tích lơ lửng |
| ĐBSCL | Đồng bằng sông Cửu Long |
| VNDDMA | Cục Quản lý Đê điều và Phòng, chống thiên tai |
| WL | Mực nước |
| WP | Gói công việc |

Danh mục hình ảnh

| | |
|---|----|
| Hình 1: Ngân hàng cát của vùng ĐBSCL với ước tính về lượng cát sẵn có cho tới giữa thế kỷ. | 4 |
| Hình 2: Tổng quan các hoạt động đóng góp vào xây dựng ngân hàng cát cho Đồng bằng sông Cửu Long | 5 |
| Hình 3: Tổng quan về khảo sát địa chấn tầng nông ở ĐBSCL để ước tính trữ lượng cá di động hiện có (hình trên cùng bên phải) và một ví dụ về khảo sát đo sâu hồi âm đa tia chi tiết (hình chính) thể hiện các đụn cát, trong trường hợp này, tại gần Tân Châu (sông Tiền), sát biên giới Campuchia. | 6 |
| Hình 1-1: Tổng quan về sông Mekong và diện tích lưu vực trên sáu quốc gia, chảy qua ĐBSCL của Việt Nam theo đường đứt nét màu đỏ (từ Eslami, 2022). | 21 |
| Hình 1-2: <i>Mặt cắt ngang tưởng tượng của ĐBSCL thông qua hệ thống cửa sông, tỷ lệ các xu thế quan trắc được (màu đỏ) và các tác nhân chính do con người tạo ra (màu đen) cùng với biến đổi khí hậu (màu tím).</i> | 22 |
| Hình 1-3: Kế hoạch thực hiện dự án dựa trên sự thay đổi theo mùa của lưu lượng sông Mekong. | 23 |
| Hình 1-4: Khai thác cát và sà lan chở cát ở tỉnh An Giang (a) và Tiền Giang (b) (Ảnh: Huỳnh Bửu Đẩu/báo Tuổi Trẻ) | 24 |
| Hình 2-1: Tổng quan về các vị trí khảo sát. Các quan trắc thủy động lực học và trầm tích được thu thập tại 05 trạm Cat-1 (WL, lưu lượng, SSC, mẫu trầm tích đáy) và 04 trạm Cat-2 (WL, lưu lượng, SSC, mẫu trầm tích đáy). Trạm số 1 đến số 4 là đo sâu hồi âm đa tia vào mùa khô, trong khi vào mùa mưa khảo sát đo sâu hồi âm đa tia được thực hiện tại tất cả 12 trạm. | 26 |
| Hình 2-2: Tổng quan địa điểm lấy mẫu trầm tích | 29 |
| Hình 2-3: Dữ liệu mực nước trung bình ngày quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền | 30 |
| Hình 2-4: Dữ liệu mực nước trung bình ngày quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền | 30 |
| Hình 2-5: Quan trắc mực nước mùa khô trên sông Tiền (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng). | 31 |
| Hình 2-6: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Tiền ngày 31/3. | 31 |
| Hình 2-7: Quan trắc mực nước mùa khô trên sông Hậu (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng). | 31 |
| Hình 2-8: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Hậu ngày 31/3. | 32 |
| Hình 2-9: Quan trắc mực nước mùa mưa trên sông Tiền (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng). | 33 |
| Hình 2-10: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Tiền ngày 24/9. | 33 |
| Hình 2-11: Quan trắc mực nước mùa mưa trên sông Hậu (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng). | 33 |
| Hình 2-12: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Hậu ngày 24/9. | 33 |
| Hình 2-13: Số liệu lưu lượng trung bình ngày đo đặc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền. | 34 |

| | |
|--|----|
| Hình 2-14: Số liệu lưu lượng trung bình ngày đo đặc thường xuyên tại các trạm trên sông Hậu. | 34 |
| Hình 2-15: Số liệu lưu lượng và mực nước mùa khô tại các trạm trên sông Tiền đo đặc vào ban ngày: (a) Tân Châu, (b) Chợ Lách, (c) Vàm Nao, (d) Mỹ Tho, (e) Mỹ Thuận, (f) Bình Đại. | 37 |
| Hình 2-16: Số liệu mực nước và lưu lượng mùa khô tại các trạm trên sông Hậu đo đặc vào ban ngày: (a) Châu Đốc, (b) Cần Thơ, (c) Đại Ngãi. | 38 |
| Hình 2-17: Số liệu mực nước và lưu lượng mùa mưa tại các trạm trên sông Tiền đo đặc vào ban ngày: (a) Mỹ Tho, (b) Mỹ Thuận, (c) Bình Đại, (d) Chợ Lách. | 39 |
| Hình 2-18: Số liệu mực nước và lưu lượng mùa mưa tại các trạm trên sông Hậu đo đặc vào ban ngày: (a) Cần Thơ, (b) Đại Ngãi. | 40 |
| Hình 2-19: Số liệu SSC trung bình ngày từ quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền. | 41 |
| Hình 2-20: Số liệu SSC trung bình ngày từ quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Hậu. | 41 |
| Hình 2-21: Số liệu SSC mùa khô tại các trạm trên sông Tiền với hai kỹ thuật đo khác nhau. | 43 |
| Hình 2-22: Số liệu SSC mùa khô tại các trạm trên sông Hậu với hai kỹ thuật đo khác nhau. | 43 |
| Hình 2-23: Số liệu SSC mùa mưa tại các trạm trên sông Tiền với hai kỹ thuật đo khác nhau | 45 |
| Hình 2-24: Số liệu SSC mùa khô tại các trạm trên sông Hậu với hai kỹ thuật đo khác nhau. | 46 |
| Hình 2-25: Tổng hợp kết quả lấy mẫu trầm tích đáy sông mùa khô. | 46 |
| Hình 2-26: Tổng hợp kết quả lấy mẫu trầm tích đáy sông mùa mưa. | 47 |
| Hình 2-27: Kết quả lấy mẫu đáy sông từ đợt khảo sát SBP | 48 |
| Hình 2-28: Ví dụ mặt cắt địa chấn tầng nông phía thượng nguồn (trên: Châu Đốc, dưới: Mỹ Tho) | 48 |
| Hình 2-29: Ví dụ về đụn cát gần Cần Thơ và di chuyển giữa 2 đợt đo đặc MBES | 49 |
| <i>Hình 2-30: Ví dụ về đụn cát gần Tân Châu và di chuyển giữa 2 đợt đo đặc MBES.</i> | 50 |
| Hình 3-1: Sơ đồ về cách thức tính toán vận chuyển tải lượng đáy từ kết quả khảo sát đo sâu hồi âm đa tia. | 53 |
| Hình 3-2: Một ví dụ về phân tích tương quan chéo, mô tả sóng cát (địa hình mô tả bằng màu), đường đồng mức của các sóng cát trong khảo sát lần thứ nhất (đường màu đen) và lần thứ hai (đường màu xanh) cũng như khoảng cách và hướng di chuyển quan trắc được cho một điểm mặt cắt (đường màu đỏ). Các điểm ví dụ được trích xuất từ phân tích tương quan chéo 2 chiều cho Cần Thơ. | 53 |
| Hình 3-3: Độ dốc trường sóng cát, thể hiện độ dốc của trường sóng cát Cần Thơ trong đợt khảo sát mùa khô. | 54 |
| Hình 3-4: Tổng quan về dữ liệu MBES thu được trong đợt khảo sát mùa khô. Các đa giác biểu thị dữ liệu MBES chồng chéo trong các phép đo liên tiếp để theo dõi đụn cát. Các mặt cắt được vẽ theo hướng di chuyển chủ yếu của sóng cát để xác thực việc theo dõi đụn cát tự động. | 55 |

- Hình 3-5: Trắc diện độ cao đáy cho các mặt cắt đi qua trường sóng cát trong đợt khảo sát mùa khô. Khoảng cách được xác định theo hướng hạ nguồn. 56
- Hình 3-6: Tổng quan về dữ liệu MBES thu được trong quá trình khảo sát mùa mưa tại các trạm có thể theo dõi đụn cát. Các mặt cắt được vẽ theo hướng di chuyển chủ yếu của sóng cát để xác định việc theo dõi đụn cát tự động. 57
- Hình 3-7: Trắc diện độ cao đáy cho các mặt cắt đi qua trường sóng cát trong đợt khảo sát mùa khô (xem Hình 3-6). Khoảng cách được xác định theo hướng hạ nguồn. 58
- Hình 3-8: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho Tân Châu trong mùa khô. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 59
- Hình 3-9: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Châu Đốc**, vùng 1, trong mùa khô. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 60
- Hình 3-10: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Châu Đốc**, vùng 2, trong mùa khô. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 60
- Hình 3-11: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Cần Thơ** trong mùa khô. Bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 61
- Hình 3-12: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Tân Châu** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 63
- Hình 3-13: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Châu Đốc** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 63
- Hình 3-14: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Cần Thơ** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 64
- Hình 3-15: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Vàm Nao** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 65
- Hình 3-16: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Chợ Lách 2** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 66
- Hình 3-17: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Long Xuyên** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 67
- Hình 3-18: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho **Cao Lãnh** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy. 67

- Hình 3-19: Ước tính chiều rộng hiệu quả của sông (mũi tên) để ước tính tổng tải lượng đáy, hiển thị các mặt cắt ngang (đường màu đỏ) và vùng đục cát (hình vuông nét đứt) được quan sát trong kết quả MBES, cho năm trạm có mặt cắt ngang. 68
- Hình 3-20: Tổng quan về tất cả phạm vi đo đạc của SBP (đường màu tím) và các vị trí mẫu lấy. Các con số là số thứ tự mẫu. Hình dạng biểu tượng đại diện cho các lớp trầm tích khác nhau và màu sắc biểu thị các lớp dựa trên kích thước hạt (D50). 71
- Hình 3-21: Các lỗ khoan trên sông nhằm hỗ trợ việc giải đoán địa chấn có sẵn ở ba tỉnh (Các điểm màu đỏ trên bản đồ), hầu hết nằm ở vùng hạ nguồn đồng bằng. 72
- Hình 3-22: Một địa điểm gần Tân Châu được ghi lại cả dữ liệu MBES và SBP. Từ dữ liệu đo độ sâu, chúng ta có thể thấy phạm vi của sóng cát trong khi dữ liệu dưới đáy có thể ghi lại hình ảnh đáy của lớp di động và độ dày của sóng cát. 72
- Hình 3-23: Ba ví dụ về chiều rộng của mặt cắt có cát so với mặt cắt ngang sông. 73
- Hình 3-24: Đáy sông gần Tân Châu được đo đạc bằng địa chấn tầng nông. Các đục cát có thể nhìn thấy rõ ràng, đáy và độ dày của lớp cát di động được lập bản đồ. Bên dưới đáy của lớp di động có các cấu trúc trầm tích có thể nhìn thấy được mà không thể xác định được lớp trầm tích nào nếu không có bất kỳ sự xác nhận nền đất bổ sung nào (ví dụ: các lỗ khoan). 74
- Hình 3-25: Ví dụ về SBP có hai lỗ khoan (SH25 và SH27) và một lấy mẫu trầm tích đáy (biểu thị cát mịn) giúp phân tích lớp cát trên cùng ngay cả khi không có gợn sóng cát rõ ràng hoặc đục cát hiện diện. 74
- Hình 3-26: Độ dày của lớp cát trên cùng (di động) dọc theo mỗi mét của sông Mekong. Tại các đoạn sông không thể hiện độ dày trên bản đồ, không quan sát thấy lớp cát.* 76
- Hình 3-27: Ước tính thấp/cận dưới của trữ lượng di động cát dọc theo các đoạn dài 3 km. Chúng được tính toán với Phương trình 3-1, sử dụng độ dày của cát và giả sử phạm vi ngang của lớp cát kéo dài 50% chiều rộng sông.* 77
- Hình 3-28: Ước tính cao/cận trên của trữ lượng cát di động dọc theo các đoạn dài 3 km. Chúng được tính toán với Phương trình 3-1, sử dụng độ dày của cát và giả sử phạm vi ngang của lớp cát trải dài bằng 75% chiều rộng sông.* 77
- Hình 3-29: A: Hình ảnh PlanetScope về khu vực quan tâm, B: Phóng to A, C: Định nghĩa về kích thước tàu, D: Kích thước tàu từ nghiên cứu của Hackney và cộng sự, (2021) 80
- Hình 3-30: Sơ đồ hình học và kích thước sà lan khai thác hoạt động từ hình ảnh có độ phân giải cao (Google earth basemap, Airbus, 2023) 82
- Hình 3-31: Các đốm màu được phát hiện là các tàu tiềm năng (các đốm màu nâu) và lọc sà lan có cần cầu (các đốm màu cam) cho một đoạn sông Mekong trong năm 2021. 83
- Hình 3-32: Sơ đồ khai thác của tàu khai thác 10 m³ dựa trên thời gian khai thác một gầu và độ sâu khai thác (Hiệp hội nạo vét trung ương, 2023). 83
- Hình 3-33: Tỷ lệ mây che phủ tại khu vực gần Vĩnh Long (2017-2022), đối với (trên) loạt ảnh Sentinel 2 đầy đủ và (dưới) điều kiện không có mây đã được lọc. 84
- Hình 3-34: Sà lan được lọc với các tàu (đốm màu) được phát hiện trong khoảng thời gian từ ngày 01 tháng 01 năm 2022 đến ngày 31 tháng 12 năm 2022 đối với một đoạn sông Mekong. 85

| | |
|--|-----|
| Hình 3-35: Số lượng sà lan hoạt động có cần cầu được phát hiện từ ngày 01/01/2017 đến ngày 01/01/2023 tại Đồng bằng sông Cửu Long của Việt Nam (tổng hợp hàng ngày của tất cả các ô). | 85 |
| Hình 3-36: Sà lan có cần cầu hoạt động được phân loại thủ công so với tàu vận tải neo đôi (thể hiện các đặc điểm hình học giống nhau trong hình ảnh S2), khu vực ví dụ. | 86 |
| Hình 3-37: Khối lượng cát khai thác hàng năm được ước tính trong nghiên cứu này từ năm 2017 đến ngày 01/01/2023 ở biểu đồ thanh màu đen (tối thiểu) và màu xám (tối đa) so với những ước tính được xác định bởi các nghiên cứu khác trước đây. | 87 |
| Hình 4-1: Biến thiên theo thời gian của lưu lượng nước hàng ngày tại Kratie (dữ liệu từ Darby và cộng sự, 2016). | 88 |
| Hình 4-2: Đỉnh và lưu lượng lũ hàng năm tại Kratie từ năm 1961 đến năm 2022. Các hộp màu xanh lá cây và màu đen biểu thị các năm hạn hán hoặc lũ lụt đáng kể (trung bình \pm SD) và cực đoan (trung bình \pm 2 SD) (SD đề cập đến độ lệch chuẩn). | 89 |
| Hình 4-3: Tại Kratie, tỷ lệ phần trăm khối lượng của các thành phần trầm tích trong tải lượng lơ lửng 2019 và SSC tại 4 vị trí thủy trực (bảng trên) và tải lượng đáy (bảng giữa, lưu ý rằng có tới 10 mẫu được trình bày mỗi ngày); tại Prek Kdam, phần trăm khối lượng của các thành phần trầm tích trong tải lượng lơ lửng 2019 và SSC tại 4 vị trí thủy trực. | 91 |
| Hình 4-4: Tỷ lệ phần trăm khối lượng trầm tích trong trầm tích lơ lửng 2018 và 2019 (hàng 1 và 2), nồng độ trầm tích lơ lửng (hàng 3) và dòng chảy sông (hàng 4) cho Châu Đốc (ảnh bên trái) và Tân Châu (ảnh bên phải). | 92 |
| Hình 4-5: Phân bố thành phần trầm tích đáy trên ĐBSCL dựa trên các mẫu trầm tích đáy sông. | 93 |
| Hình 4-6: Lưới tính toán bao gồm các phần tử 1D và các ô 2D. | 95 |
| Hình 4-7: Lưới tính, địa hình sông và địa hình thềm của ĐBSCL | 96 |
| Hình 4-8: Độ sâu được thu thập ở đồng bằng sông Cửu Long | 97 |
| Hình 4-9: Hiệu chỉnh hệ số nhám. | 99 |
| Hình 4-10: Hiệu suất của mô hình đối với mực nước tại các trạm ở Campuchia trong giai đoạn từ 2021-2022. | 101 |
| Hình 4-11: Hiệu suất của mô hình đối với mực nước tại các trạm ở Việt Nam trong giai đoạn từ 2021-2022. | 101 |
| Hình 4-12: Hiệu suất của mô hình đối với lưu lượng tại các trạm ở Campuchia. | 102 |
| Hình 4-13: Hiệu suất của mô hình đối với lưu lượng tại các trạm ở Việt Nam. | 102 |
| Hình 4-14: Vận chuyển tải lượng đáy mùa khô tại Tân Châu (ảnh trên), Châu Đốc (ảnh giữa) và Cần Thơ (ảnh dưới). Kết quả mô hình được thể hiện bằng các đường màu đỏ ($D=100\mu\text{m}$, runfsD100), các đường màu xanh lam ($D=200\mu\text{m}$, runfs) và các đường màu vàng ($D=300\mu\text{m}$, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình \pm độ lệch chuẩn bao gồm độ không chắc chắn về chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 18 ngày dựa trên phân tích MBES. | 104 |

| | |
|---|-----|
| Hình 4-15: Vận chuyển tải lượng tại mùa mưa, từ trên xuống, Tân Châu, Châu Đốc, Cần Thơ, Vàm Nao, Chợ Lách, Long Xuyên, Cao Lãnh. Kết quả mô hình được thể hiện bằng các đường màu đỏ (D=100µm, runfsD100), các đường màu xanh lam (D=200µm, runfs) và các đường màu vàng (D=300µm, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình +/- độ lệch chuẩn bao gồm độ không chắc chắn về chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 12 ngày dựa trên phân tích MBES. | 105 |
| Hình 4-16: Vận chuyển tải lượng đáy tích lũy mùa khô qua các mặt cắt Tân Châu (bảng trên), Châu Đốc (bảng giữa) và Cần Thơ (bảng dưới). Kết quả mô hình được thể hiện bằng các đường màu đỏ (D=100µm, runfsD100), các đường màu xanh lam (D=200µm, runfs) và các đường màu vàng (D=300µm, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình +/- độ lệch chuẩn bao gồm độ không chắc chắn về chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 18 ngày dựa trên phân tích MBES và ngoại suy trên mặt cắt ngang. | 105 |
| Hình 4-17: Tải lượng đáy tích lũy mùa mưa vận chuyển qua các mặt cắt (từ trên xuống) Tân Châu, Châu Đốc, Cần Thơ, Vàm Nao, Chợ Lách, Long Xuyên, Cao Lãnh. Kết quả mô hình được đưa ra trong các đường màu đỏ (D=100µm, runfsD100), các đường màu xanh lam (D=200µm, runfs) và các đường màu vàng (D=300µm, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình +/- độ lệch chuẩn bao gồm cả độ không chắc chắn của chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 12 ngày dựa trên phân tích MBES và ngoại suy trên mặt cắt ngang. | 106 |
| Hình 4-18: So sánh SSC được mô phỏng (cát và bùn, runfsm) và quan trắc (thực đo) | 107 |
| Hình 4-19: Các nhánh sông ĐBSCL (đường có màu), biên giới tỉnh đường trắng. | 107 |
| Hình 4-20: Phân bố dòng chảy tích lũy trên các nhánh sông ĐBSCL trong năm 2022 | 108 |
| Figure 4-21: Runfs cumulative sand transport over year 2022 for various stations spread over the ĐBSCL that have MBES data. | 108 |
| Hình 4-22: Vận chuyển tải lượng đáy tích lũy (cột bên trái) và tải lượng lơ lửng tích lũy năm 2022 (cột bên phải), vận chuyển cát cho runfs (hàng trên) và runfssdb (hàng dưới) | 109 |
| Hình 4-23: Vận chuyển cát tích lũy dọc theo nhánh Cổ Chiên và Bassac năm 2022. Đường nét liền thể hiện runfs, đường mảnh thể hiện runfsD100 và đường dày runfsD300. | 110 |
| Hình 4-24: Vận chuyển bùn tích lũy năm 2022 cho runfsm | 111 |
| Hình 4-25: Vận chuyển cát tổng tích lũy năm 2022 (tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng) cho runfsm | 111 |
| Hình 4-26: Vận chuyển cát tích lũy vào năm 2022 dọc theo hai nhánh chính của sông Mekong cho các lần chạy mô hình khác nhau, trong đó runfsm có thể được coi là phù hợp nhất. | 113 |
| Hình 5-1: Hội thảo khởi động tại Cần Thơ | 116 |
| Hình 5-2: Đại diện của liên doanh tư vấn trả lời các câu hỏi của đại biểu tại Hội thảo báo cáo tiền độ lần 1 | 117 |
| Hình 5-3: Đại diện của liên doanh tư vấn gói Ngân hàng Cát trả lời các câu hỏi của đại biểu tại hội thảo báo cáo tiền độ lần 2. | 118 |
| Hình 5-4: Trình diễn/thử nghiệm thiết bị EdgeTech 6205s (đo sâu hồi âm đa tia - MBES) | 119 |

| | |
|--|-----|
| Hình 5-5: Tập huấn mô hình tại Cần Thơ | 122 |
| Hình 5-6: Tập huấn sử dụng mô hình ngân hàng cát. | 122 |
| Hình 6-1: Tổng quan sự đóng góp của các hoạt động khác nhau thiết lập ngân hàng cát ĐBSCL. | 123 |
| Hình 6-2: Ước tính các hợp phần khác nhau của ngân hàng cát. | 124 |
| Hình 6-3: Triển vọng vào giữa thế kỷ với các ước tính trên và dưới về lượng cát đến, rời khỏi, khai thác và trữ lượng cát di động hiện có. | 124 |

Danh mục bảng

| | |
|--|----|
| Bảng 2-1: Tổng quan các hoạt động khảo sát tại hiện trường | 27 |
| Bảng 2-2: Mức nước quan trắc tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong đợt khảo sát mùa khô. | 30 |
| Bảng 2-3: Mức nước quan trắc tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong đợt khảo sát mùa mưa. | 32 |
| Bảng 2-4: Quan trắc lưu lượng tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong đợt khảo sát mùa khô. | 35 |
| Bảng 2-5: Quan trắc lưu lượng tại 4 trạm Cat-2 và 2 trạm Cat-1 trong đợt khảo sát mùa mưa. | 38 |
| Bảng 2-6: Nồng độ trầm tích lơ lửng (LISST) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa khô. | 41 |
| Bảng 2-7: Nồng độ trầm tích lơ lửng (bình lấy mẫu) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa khô. | 42 |
| Bảng 2-8: Nồng độ trầm tích lơ lửng (LISST) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa mưa. | 44 |
| Bảng 2-9: Nồng độ trầm tích lơ lửng (bình lấy mẫu) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa mưa. | 44 |
| Bảng 2-10: Tổng quan kết quả đo MBES trong mùa khô | 49 |
| Bảng 2-11: Tổng quan kết quả đo MBES trong mùa mưa | 50 |
| Bảng 3-1: Tổng quan ước tính tải lượng đáy cho ĐBSCL. Lưu ý rằng tổng tải lượng đáy (Jordan và cộng sự, 2019) được chuyển đổi thành $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ và tải lượng đáy trên một đơn vị chiều rộng sông (Stephens và cộng sự, 2017) thành $10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, theo các đơn vị trong các phần sau. | 55 |
| Bảng 3-2: Tổng quan về khu vực đo đạc gần đúng phù hợp cho phân tích theo dõi đụn cát, bước sóng, chiều cao và khoảng cách di chuyển của cát trong giai đoạn khảo sát mùa khô dựa trên kiểm tra trực quan các phép đo sâu hồi âm đa tia . | 56 |
| <i>Bảng 3-3: Tổng quan về khu vực đo đạc gần đúng phù hợp cho phân tích theo dõi đụn cát, bước sóng, chiều cao và khoảng cách di chuyển của cát gần đúng trong giai đoạn khảo sát mùa mưa dựa trên kiểm tra trực quan các phép đo sâu hồi âm đa tia. Các đặc điểm sóng cát ở Mỹ Thuận được đề cập trong ngoặc vì sóng cát này chỉ được quan trắc cho một cuộc khảo sát duy nhất. Vì lý do này, chúng tôi không thể theo dõi sự di chuyển của đụn cát. Đối với Bình Đại và Đại Ngãi, đặc điểm sóng cát được đề cập trong ngoặc vì chúng có chiều cao và chiều dài quá nhỏ để phân tích theo dõi đụn cát. Đối với Chợ Lách 1, không quan trắc được mối tương quan giữa các phép đo giai đoạn 1 và 2 do khoảng cách di chuyển và sự thay đổi hình dạng sóng cát quá lớn.</i> | 57 |
| Bảng 3-4: Tóm tắt kết quả mùa khô tương quan 2D và phân tích Fourier; đặc điểm trường sóng cát, hướng và tốc độ di chuyển và tải lượng đáy cho Cần Thơ, Tân Châu và Châu Đốc. Cả kết quả trung bình và độ lệch chuẩn (Std) đều được đưa ra. | 59 |
| Bảng 3-5: Tóm tắt kết quả mùa mưa từ tương quan 2D và phân tích Fourier; đặc điểm trường sóng cát, hướng và tốc độ di chuyển và tải lượng đáy cho Tân Châu, Châu Đốc và Cần Thơ. Cả kết quả trung bình và độ lệch chuẩn (Std) đều được đưa ra. | 61 |

| | |
|--|-----|
| Hình 3-6: Tóm tắt kết quả mùa mưa từ tương quan 2D và phân tích Fourier; đặc điểm trường sóng cát, hướng và tốc độ di chuyển và tải lượng đáy cho Vàm Nao, Chợ Lách, Long Xuyên và Cao Lãnh. Cả kết quả trung bình và độ lệch chuẩn (Std) đều được đưa ra. | 62 |
| Bảng 3-7: Ước tính tổng vận chuyển tải lượng đáy ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$) trong mùa khô dựa trên ước tính tải lượng đáy trên một đơn vị chiều rộng sông và ước tính chiều rộng hiệu quả của sông. | 69 |
| Bảng 3-8: Ước tính tổng vận chuyển tải lượng đáy ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$) trong mùa mưa dựa trên ước tính tải lượng đáy trên một đơn vị chiều rộng sông và ước tính chiều rộng hiệu quả của sông. | 69 |
| Bảng 3-9: Ước tính cao/cận trên và ước tính thấp/cận dưới về tổng trữ lượng cát di động hiện có cho sông Mekong | 78 |
| Bảng 3-10: Tổng quan về bộ dữ liệu ảnh vệ tinh. | 79 |
| Bảng 3-11: Tổng quan về sự khác biệt giữa phương pháp được áp dụng trong nghiên cứu này, Hackney và cộng sự (2021) và Gruel và cộng sự (2022). | 84 |
| Bảng 4-1: Phân loại trầm tích (theo thang Wentworth) | 90 |
| Bảng 4-2: Mô tả dữ liệu được sử dụng để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình. | 98 |
| Bảng 4-3: Vị trí các trạm. | 100 |
| Bảng 4-4: Định nghĩa của các kịch bản mô phỏng khác nhau (run-names). | 103 |
| Bảng 4-5: Tải lượng trầm tích qua các mặt cắt ngang, *biểu thị mặt cắt tại cửa sông. | 112 |
| Bảng 5-1: Danh sách các cuộc họp tham vấn | 114 |
| Bảng 5-2: Số liệu thống kê khảo sát học viên trước khóa tập huấn sử dụng mô hình. | 120 |
| Bảng 5-3: Số liệu thống kê khảo sát học viên sau khóa tập huấn sử dụng mô hình. | 121 |
| Bảng 5-4: Đánh giá chất lượng khóa tập huấn. | 121 |

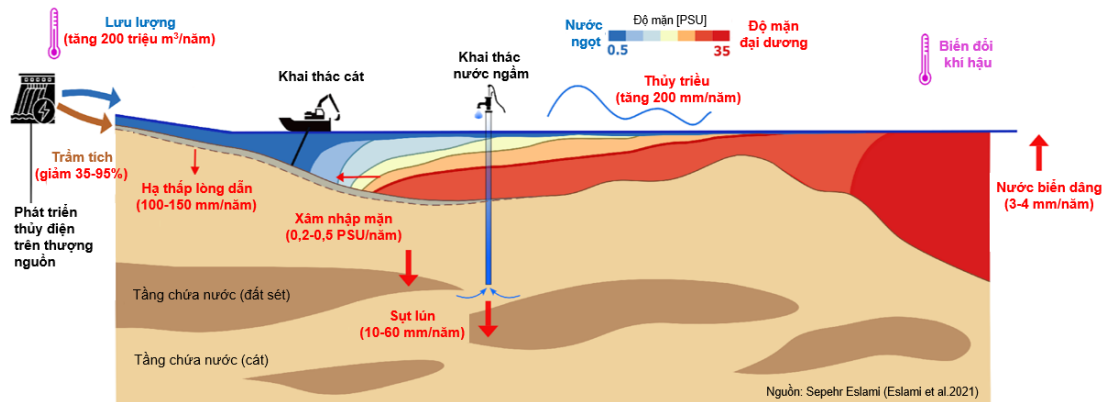
1 Giới thiệu

1.1 Bối cảnh

Đồng bằng sông Cửu Long Việt Nam (sau đây gọi là ĐBSCL, xem Hình 1-1) rất quan trọng đối với sinh kế, việc làm và an ninh lương thực của hơn 17 triệu người ở Việt Nam và hơn thế nữa. Với việc sản xuất 50% lương thực và 40% sản lượng thủy sản chính của quốc gia, ĐBSCL chiếm 18% GDP của Việt Nam. ĐBSCL đang trong giai đoạn đô thị hóa nhanh chóng, với bối cảnh là một trong những đồng bằng nằm ở vị trí thấp nhất trên toàn thế giới, đang chịu áp lực từ các yếu tố khí hậu và nhân tạo khác nhau, do đó, dễ bị tổn thương trước các tác động môi trường khác nhau. Xâm nhập mặn, sụt lún đất, lũ lụt, xói lở bờ biển, suy giảm chất lượng nước và suy giảm đa dạng sinh học nằm trong số các Đồng bằng sông Cửu Long Việt Nam (sau đây gọi là ĐBSCL), quá trình đe dọa an ninh lương thực của Việt Nam và sự phát triển chiến lược của vùng đồng bằng (xem Hình 1-2). Những phát hiện khoa học gần đây chứng minh rằng xói mòn lòng sông, bờ sông và bờ biển, sự khuếch đại thủy triều và xâm nhập mặn chủ yếu là do nạn đói trầm tích do con người gây ra ở vùng đồng bằng (Bravard và cộng sự, 2013; Brunier và cộng sự, 2014; Anthony và cộng sự, 2015; Eslami và cộng sự, 2019b). Ví dụ, Eslami và cộng sự, 2019b, 2021a, 2021b) cho thấy xâm nhập mặn ở ĐBSCL chỉ bị ảnh hưởng nhẹ bởi biến đổi khí hậu, nhưng chủ yếu là xói lở lòng sông do thiếu trầm tích. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu và các mối đe dọa ngày càng tăng của mực nước biển dâng tương đối (Eslami và cộng sự, 2021a; Minderhoud và cộng sự, 2020), bảo tồn mực nước lòng sông của ĐBSCL trở thành một ưu tiên hiện hữu như một chiến lược giảm thiểu biến đổi khí hậu.



Hình 1-1: Tổng quan về sông Mekong và diện tích lưu vực trên sáu quốc gia, chảy qua ĐBSCL của Việt Nam theo đường đứt nét màu đỏ (từ Eslami, 2022).



Hình 1-2: Mặt cắt ngang tường tượng của ĐBSCL thông qua hệ thống cửa sông, tỷ lệ các xu thế quan trắc được (màu đỏ) và các tác nhân chính do con người tạo ra (màu đen) cùng với biến đổi khí hậu (màu tím).

Thiếu hụt trầm tích có thể được phân thành hai loại: A) Thiếu trầm tích mịn do phát triển thủy điện ở thượng nguồn lưu vực sông Mekong và B) suy giảm trầm tích thô do khai thác cát trong (và ngoài) ĐBSCL. Khi xem xét sự phát triển thủy điện ở các nhánh sông Mekong, lượng trầm tích tích tụ của các đập được dự đoán sẽ làm giảm lượng cung cấp phù sa từ 36% (trung bình) đến 95% (trường hợp xấu nhất) (Mạnh và cộng sự, 2015), và một nghiên cứu gần đây đã đo đạc được mức giảm 75% lượng trầm tích lơ lửng cung cấp cho ĐBSCL (Thi Ha và cộng sự, 2018). Ước tính khai thác cát trong ĐBSCL đã tăng theo thời gian từ 10-12 triệu tấn/năm (Bravard và cộng sự, 2013; Brunier và cộng sự, 2014) dựa trên những thay đổi về hình thái và khảo sát những người khai thác, lên 25-30 triệu tấn/năm (Jordan và cộng sự 2019) dựa trên các quan trắc tại địa phương về việc khai thác cát và phép ngoại suy của nó, và 40-50 triệu tấn/năm (Eslami và cộng sự 2019b) dựa trên các giấy phép khai thác cát được cấp. Trong khi tải lượng đáy ($0,18 \pm 0,07$ triệu tấn/năm) là một phần nhỏ (1%) trong tổng tải lượng phù sa hàng năm của hạ nguồn sông Mekong (Koehnken, 2014; Hackney và cộng sự, 2020), ngay cả khi xem xét cát lơ lửng (6 ± 2 triệu tấn/năm), tổng lượng cát chảy vào ĐBSCL ($6,18 \pm 2,01$ triệu tấn/năm) thấp hơn nhiều so với tốc độ khai thác cát hiện tại (50 triệu tấn/năm). Với nhu cầu cát dự kiến là 1 tỷ m³ cho đến năm 2040 (SIWRP, 2015) và tình trạng xói lở liên tục do thiếu trầm tích ở thượng nguồn, việc khai thác có hệ thống ngân hàng cát ĐBSCL là một bước quan trọng hướng tới quản lý bền vững tài nguyên thiên nhiên của vùng đồng bằng.

1.2 Mục tiêu nghiên cứu

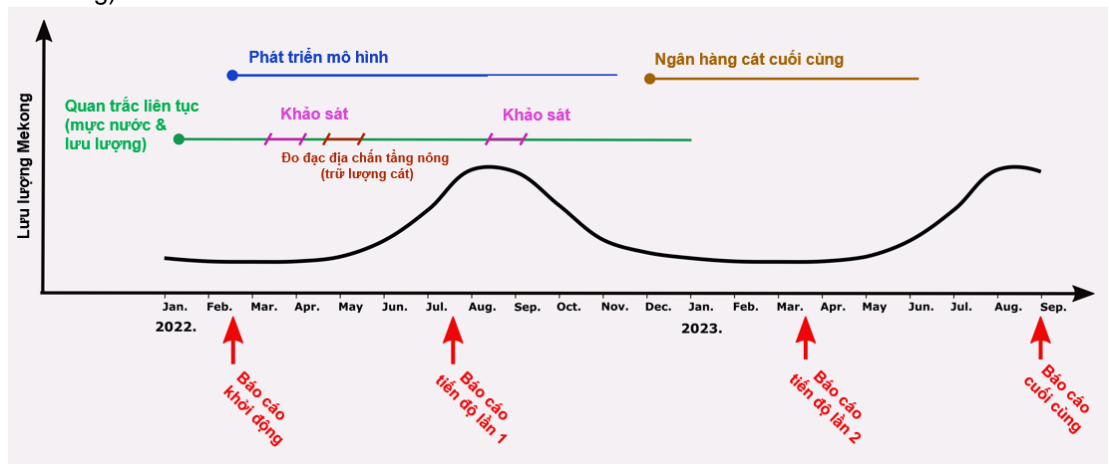
Trong bối cảnh dự án của Quỹ Sáng kiến Khí hậu Quốc tế (IKI), nghiên cứu này nhằm mục đích đưa ra một ước tính tương đối chính xác về ngân hàng cát ĐBSCL. Phương pháp nghiên cứu kết hợp dữ liệu đo đạc mới và sẵn có (Gói công việc WP1), mô hình số hiện đại (WP2) và tham vấn các bên liên quan ở cấp quốc gia và cấp tỉnh ĐBSCL (WP1 và WP2). Các phân tích sẽ bao gồm ước tính lượng trầm tích đổ vào đồng bằng từ Campuchia, ước tính cập nhật về khai thác cát trong vùng đồng bằng, sự phân bố trầm tích trong hệ thống cửa sông (ở các nhánh chính) và ước tính trữ lượng cát di động hiện có ở vùng đồng bằng. Các kết quả từ dự án này sẽ là cơ sở cho việc quản lý bền vững và giảm thiểu tính dễ bị tổn thương của ĐBSCL do biến đổi khí hậu và ảnh hưởng của con người.

1.3 Cách tiếp cận tổng thể

Để tính toán ngân hàng cát, cần xác định bốn yếu tố; 1) lượng cát đổ vào hạ nguồn ĐBSCL, 2) lượng cát rời khỏi đồng bằng, 3) lượng cát khai thác ở đồng bằng và 4) trữ lượng cát di động hiện có tại ĐBSCL. Trong nghiên cứu hiện tại, ngân hàng cát sẽ được tính toán khi kết hợp các tài liệu sẵn có, các khảo sát đo đạc mới và sẵn có (WP1) và mô hình số (WP2) đồng thời đảm bảo trao đổi chặt chẽ và liên tục với các bên liên quan tại địa phương. Cụ thể hơn, ngân hàng cát sẽ được tính dựa trên việc khảo sát nguồn cung cấp cát cho ĐBSCL, ước tính

về khối lượng khai thác cát thực tế bằng cách phân tích hình ảnh vệ tinh, cùng với việc xác định trữ lượng cát di động hiện có của ĐBSCL thông qua đo đạc địa chấn tầng nông (WP1) và đánh giá sự trao đổi trầm tích với biển (sử dụng mô hình và dữ liệu). Các mô hình số hiện tại sẽ được hiệu chỉnh và kiểm định bằng dữ liệu thứ cấp và dữ liệu khảo sát mới (WP2). Hình 1-3 trình bày tiến độ thực hiện của dự án và các hoạt động khác nhau được thực hiện trong suốt năm 2022 và 2023. Những kết quả tính toán này sẽ được kết hợp và sử dụng để thiết lập ngân hàng cát hiện tại và tương lai (2030-2050), với sự hợp tác chặt chẽ với khách hàng và các bên liên quan chính. Ngoài các phép đo hiện có, chúng đã đo đạc bổ sung các thông số sau trong ĐBSCL tại một vài địa điểm (xem thêm Chương 2):

- Mức nước (WL)
- Lưu lượng
- Nồng độ trầm tích lơ lửng (SSC)
- Vận chuyển tải lượng đáy bằng cách theo dõi di chuyển đụn cát; Khảo sát đo sâu hồi âm đa tia (MBES).
- Trữ lượng cát di động hiện có bằng khảo sát đo đạc địa chấn tầng nông (SBP).
- Phân tích thành phần mẫu trầm tích đáy sông (đường cong phân tích kích thước hạt qua sàng).



Hình 1-3: Kế hoạch thực hiện dự án dựa trên sự thay đổi theo mùa của lưu lượng sông Mekong.

1.4 Mục tiêu của báo cáo

Theo thỏa thuận dự án số FY22-VN-MDL-0029, tài liệu hiện tại là báo cáo cuối cùng để trình bày kết quả cuối cùng của dự án kéo dài 18 tháng “Dịch vụ tư vấn xây dựng ngân hàng cát cho khu vực ĐBSCL Việt Nam” cho WWF-Việt Nam, Cục Quản lý đề điều và Phòng, chống thiên tai – Bộ NNPTNT, WWF-Đức và các bên liên quan khác. Dự án hiện tại là một phần của dự án lớn hơn “Giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu và phòng chống thiên tai thông qua sự tham gia của khối công tư trong khai thác cát bền vững ở ĐBSCL”.

1.5 Cấu trúc của báo cáo

Dự án “Dịch vụ tư vấn phát triển quỹ cát toàn châu thổ cho khu vực ĐBSCL Việt Nam” hiện tại được chia thành hai gói công việc:

- Gói công việc 1: Khảo sát thực địa
- Gói công việc 2: Thiết lập mô hình số và tính toán ngân hàng cát

Chương 1 phát triển về nền tảng và giới thiệu; Chương 2 tóm tắt tất cả các đo đạc thực địa được thực hiện liên tục trong năm 2022 hoặc trong hai đợt khảo sát thực địa trong mùa khô và mùa mưa; Chương 3 trình bày kết quả của công việc mô hình hóa; Chương 4 tập hợp các hoạt động tham vấn và tham gia của các bên liên quan; Chương 5 bao gồm các kết luận và kết quả cuối cùng của ngân hàng cát.

1.6 Tổng hợp các tài liệu hiện có

Trầm tích ở ĐBSCL có thể được phân biệt: mịn (phù sa và bùn) chủ yếu được vận chuyển dưới dạng tải lượng lơ lửng và thô (cát) được vận chuyển dưới dạng tải lượng đáy hoặc tải lượng lơ lửng. Với tình trạng thiếu trầm tích là nhân tố chính dẫn đến các xu hướng phá hủy khác nhau ở đồng bằng (ví dụ: khuếch đại thủy triều, xói mòn, xâm nhập mặn, mất độ cao), hầu hết các công việc được thực hiện trước đây đều tập trung vào trầm tích lơ lửng (~99%), hơn 95% trong số đó là trầm tích mịn. Các ước tính trước đây về vận chuyển trầm tích của sông Mekong ước tính khoảng 160 triệu tấn/năm (Milliman và Fransworth, 2011), dự kiến sẽ giảm 36% (trung bình) đến 95% (trường hợp xấu nhất) (Mạnh và cộng sự, 2015; Darby và cộng sự, 2016; Thành và cộng sự 2017; Thi Ha và cộng sự, 2018; Dunn và cộng sự, 2019).



Hình 1-4: Khai thác cát và sà lan chở cát ở tỉnh An Giang (a) và Tiền Giang (b) (Ảnh: Huỳnh Bửu Đầu/báo Tuổi Trẻ)

Trong khi vận chuyển trầm tích thô (cát), chủ yếu ở dạng tải lượng đáy, chỉ chiếm ~1% tổng lượng vận chuyển trầm tích (Koehnken, 2014; Hackney và cộng sự, 2020), tuy nhiên, khối lượng khai thác cát khổng lồ trong vùng đồng bằng (Bravard và cộng sự, 2013; Brunier và cộng sự, 2014; Jordan và cộng sự 2019; Eslami và cộng sự 2019b), ước tính ~50 triệu tấn/năm, làm cho mức độ liên quan của cát và sự vận chuyển của nó ngang bằng với trầm tích

mịn. Những lượng này chịu trách nhiệm cho một phần lớn sự xói mòn lòng sông và bờ sông quan trắc được trong vùng đồng bằng. Do tác động của tình trạng thiếu hụt cát di chuyển rất chậm về phía hạ nguồn, ngoài một số tác động từ hoạt động khai thác cát của Campuchia, đây là một vấn đề nội địa với các giải pháp tiềm năng trong nước. Hơn nữa, do cát di chuyển rất chậm trong hệ thống sông ngòi, nên việc bổ sung trữ lượng cát di động được khai thác nằm ngoài bất kỳ quan điểm chính sách hoặc lịch trình quản lý nào. Do đó, nghiên cứu hiện tại sẽ đóng một vai trò quan trọng trong việc cung cấp một cái nhìn tổng thể về ngân hàng cát trong ĐBSCL như là đầu vào cho việc phát triển chính sách chiến lược.

Trong khi có rất nhiều thông tin rải rác góp phần vào sự hiểu biết về ngân hàng cát ĐBSCL, nhưng vẫn chưa có tài liệu rõ ràng về điều đó cho vùng đồng bằng. Gugliotta và cộng sự, (2017) đã thực hiện một cuộc khảo sát rộng rãi về lấy mẫu vật liệu đáy trên toàn bộ phần sông/cửa sông của ĐBSCL và cho thấy sự phân bố rõ ràng của cát và bùn trên đồng bằng. Các chiến dịch khảo sát khác nhau (ví dụ: Allison và cộng sự, 2017; Jordan và cộng sự, 2019) đã chỉ ra các đụn cát và sự di chuyển của chúng cũng như dấu vết của khai thác cát. Là những người tiên phong trong việc nêu vấn đề khai thác cát dọc sông Mekong, Bravard và cộng sự, (2013) và Brunier và cộng sự, (2014) ước tính gần 10-12 triệu tấn cát khai thác mỗi năm dựa trên khảo sát về công ty khai thác cát và những thay đổi hình thái trong hệ thống sông của ĐBSCL. Jordan và cộng sự, (2019) đã thực hiện một cuộc khảo sát đo sâu hồi âm đa tia xấp xỉ 20km dọc theo sông Tiền, ngay phía bắc Mỹ Thuận, và phát hiện gần 8 triệu m³ cát khai thác mỗi năm trong khu vực nghiên cứu. Điều này, nếu được ngoại suy cho toàn bộ đồng bằng, sẽ chuyển thành xấp xỉ 25-30 triệu tấn/năm. Eslami và cộng sự, (2019b) đã công bố các giấy phép khai thác cát đã cấp trên toàn bộ đồng bằng tổng cộng xấp xỉ 40-50 triệu tấn/năm của hoạt động khai thác cát hợp pháp.

Với những hạn chế trong việc quan trắc thực địa và khả năng khai thác cát bất hợp pháp, con số có thể còn cao hơn 50 triệu tấn/năm. Đồng thời, lượng cát đến đồng bằng dưới dạng tải lượng đáy ước tính chỉ khoảng $0,18 \pm 0,07$ triệu tấn/năm, chiếm ~1% tổng lượng trầm tích sông cung cấp cho đồng bằng và thêm 6 ± 2 triệu tấn/năm ở dạng cát lơ lửng (Koehnken, 2014; Hackney và cộng sự, 2020). Stephens và cộng sự, (2017) đã thực hiện khảo sát đo sâu hồi âm đa tia dọc theo các kênh nhánh thuộc hạ nguồn sông Hậu (hạ nguồn Cần Thơ) và đo vận chuyển cát lơ lửng (90%) và tải lượng di đáy (10%). Sau đó, bằng cách áp dụng một mô hình số ước tính $6,5 \pm 1,6$ triệu tấn/năm vận chuyển ra đại dương, chủ yếu diễn ra trong mùa mưa. Hiện tại không có ước tính trữ lượng cát di động hiện có trong vùng đồng bằng.

Các ước tính hiện có ở trên, với những hạn chế của chúng, ngụ ý rằng hầu hết cát đến và cát đi, trong hệ thống tự nhiên đều cân bằng, hoặc ít nhất là theo cùng một thứ tự về độ lớn. Tuy nhiên, có một khoản thâm hụt lớn do khai thác cát từ sông gây ra những hậu quả nghiêm trọng đối với sự ổn định của lòng/bờ sông cũng như độ mặn và động lực thủy triều. Với nhu cầu cát dự kiến là 1 tỷ m³ cho đến năm 2040 (SIWRP, 2015), tình trạng xói lở liên tục do trầm tích bị giữ lại ở thượng nguồn và hiểu biết hạn chế về trữ lượng cát di động hiện có, việc khai thác có hệ thống ngân hàng cát ĐBSCL là một bước quan trọng hướng tới quản lý bền vững tài nguyên thiên nhiên của đồng bằng.

2 Khảo sát thực địa và thu thập dữ liệu (WP1)

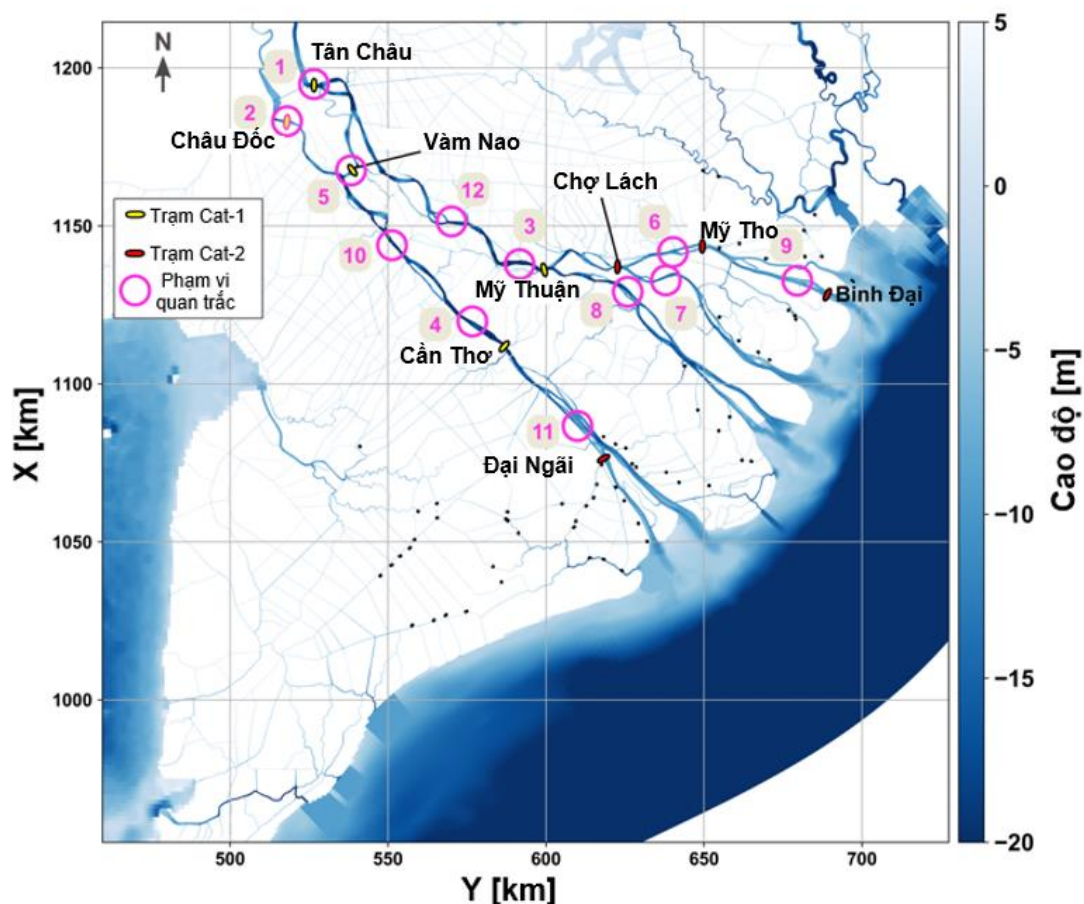
2.1 Địa điểm và phương pháp khảo sát

Khảo sát thực địa tại ĐBSCL của Việt Nam để tính toán ngân hàng cát được thực hiện trong 3 đợt khảo sát khác nhau:

- **Đợt khảo sát mùa khô:** từ 30/03/2022 đến 23/04/2022.
- **Đợt khảo sát mùa mưa:** từ 23/09/2022 đến 17/10/2022.
- **Đo đạc thường xuyên:** 365 ngày trong năm 2022 (01/01 đến 31/12).

Trong cả hai đợt khảo sát mùa khô và mùa mưa, các dữ liệu sau đã được thu thập:

1. Mức nước (WL).
2. Lưu lượng.
3. Nồng độ trầm tích lơ lửng (SSC).
4. Vận chuyển tải lượng đáy bằng cách theo dõi di chuyển đụn cát; Khảo sát đo sâu hồi âm đa tia (MBES).
5. Trữ lượng cát di động hiện có bằng khảo sát đo đạc địa chấn tầng nông (SBP).
6. Phân tích thành phần mẫu trầm tích đáy sông (đường cong phân tích kích thước hạt qua sàng).



Hình 2-1: Tổng quan về các vị trí khảo sát. Các quan trắc thủy động lực học và trầm tích được thu thập tại 05 trạm Cat-1 (WL, lưu lượng, SSC, mẫu trầm tích đáy) và 04 trạm Cat-2 (WL, lưu lượng, SSC, mẫu trầm tích đáy). Trạm số 1 đến số 4 là đo sâu hồi âm đa tia vào mùa khô, trong khi vào mùa mưa khảo sát đo sâu hồi âm đa tia được thực hiện tại tất cả 12 trạm.

Hình 2-1 thể hiện tổng quan về các địa điểm khảo sát và Hình 2-1 cung cấp thông tin chi tiết về tất cả các hoạt động khảo sát. Các địa điểm khảo sát ban đầu được xác định bằng cách sử dụng các trạm quan trắc thủy văn hiện có của Đài KTTV Nam Bộ. Các trạm đo đạc hiện có được phân loại là Cat.1: trạm đo tiêu chuẩn của Đài KTTV Nam Bộ với các yếu tố đo đạc

thường xuyên gồm mực nước, lưu lượng và SSC và Cat.2 yêu cầu huy động thêm cho việc đo lưu lượng nước.

Bảng 2-1: Tổng quan các hoạt động khảo sát tại hiện trường

| | Thời gian | Vị trí | Thiết bị |
|-------------------------------|--|---|--|
| Lưu lượng thường xuyên | 365 ngày (2022) | 5 trạm Cat-1: Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, Cần Thơ, Mỹ Thuận | Lưu tốc kế (thủ công) ADCP (bán tự động) Đường cong đánh giá (gián tiếp) |
| Mực nước thường xuyên | 365 ngày (2022) | 5 trạm Cat-1: Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, Cần Thơ, Mỹ Thuận 4 trạm Cat-2: Bình Đại, Đại Ngãi, Chợ Lách, Mỹ Tho | Cọc thủy chí (thủ công) Tự ghi (tự động) |
| SSC thường xuyên | 365 ngày (2022) | 5 trạm Cat-1: Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, Cần Thơ, Mỹ Thuận | Mẫu + giấy lọc (thủ công) |
| Lưu lượng (ADCP) | Mùa khô: 10 lần đo / ngày trong 6 ngày (30/03 đến 04/04/2022) | 5 trạm Cat-1: Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, Cần Thơ, Mỹ Thuận 4 trạm Cat-2: Bình Đại, Đại Ngãi, Chợ Lách, Mỹ Tho | ADCP (bán tự động) |
| | Mùa mưa: 4 lần đo / ngày trong 7 ngày (23 đến 29/09/2022) | 4 trạm Cat-2: Bình Đại, Đại Ngãi, Chợ Lách, Mỹ Tho 2 trạm Cat-1: Cần Thơ, Mỹ Thuận | |
| | Mùa mưa: 1 lần đo / ngày trong 3 ngày (7, 10, 13/10/2022) | 3 trạm Cat-1: Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao | |
| SSC | Mùa khô: 7 lần đo / ngày trong 2 ngày (31/03 và 04/04/2022) | 5 trạm Cat-1: Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, Cần Thơ, Mỹ Thuận 4 trạm Cat-2: Bình Đại, Đại Ngãi, Chợ Lách, Mỹ Tho | Mẫu + giấy lọc (thủ công) LISST (tự động) |
| | Mùa mưa: 4 lần đo ngày trong 3 ngày (23, 26, 29/09/2022) | | |
| Mẫu trầm tích đáy sông | Mùa khô: 21 mẫu/trạm (30/03 đến 04/04/2022) | 5 trạm Cat-1: Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, Cần Thơ, Mỹ Thuận 4 trạm Cat-2: Bình Đại, Đại Ngãi, Chợ Lách, Mỹ Tho | Phân tích mẫu + phòng thí nghiệm (thủ công) |
| | Mùa mưa: 21 mẫu/trạm (23/09 to 13/10/2022) | | |
| SBP | Mùa khô: 15 ngày (30/03 đến 13/04/2022) | ~550 km dọc sông Tiền và sông Hậu 35 mặt cắt ngang 43 mẫu trầm tích đáy sông | Innomar SES-2000 compact |
| MBES | Mùa khô: 15 ngày cho cả hai đợt đo Đợt 1: 7 ngày (30/03 đến 05/04/2022) Đợt 2: 8 ngày (15/04 đến 22/04/2022) Mùa mưa: 25 ngày cho cả 2 đợt đo (từ 23/09 đến 16/10/2022) | Mùa khô - 4 địa điểm: Tân Châu, Châu Đốc, Mỹ Thuận, Cần Thơ Mùa mưa – 12 địa điểm: Tân Châu, Châu Đốc, Mỹ Thuận, Cần Thơ, Long Xuyên, Cao Lãnh, Vàm Nao, Chợ Lách 1, Chợ Lách 2, Bình Đại, Mỹ Tho, Đại Ngãi. | Edgetech 6205s + hệ thống sonar quét sườn |

2.1.1 Trạm quan trắc chính

Trong phạm vi các trạm do Đài KTTV Nam Bộ vận hành, dự án này đã sử dụng hai loại trạm quan trắc nhằm mục đích quan trắc thủy động lực học (mức nước và lưu lượng) và nồng độ trầm tích lơ lửng (SSC):

- **Trạm Cat-1:** Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, Cần Thơ, Mỹ Thuận
- **Trạm Cat-2:** Bình Đại, Đại Ngãi, Chợ Lách, Mỹ Tho

Bản tóm tắt các khảo sát thực địa (tần suất, thời gian, v.v.) được cung cấp trong Bảng 2-1. Các hoạt động khảo sát quan trắc thủy động lực và SSC đều được thực hiện theo các Thông tư, Quyết định và Tiêu chuẩn Quốc gia được liệt kê dưới đây:

- Thông tư số 30/2018/TT-BTNMT của Bộ TN&MT về Quy chuẩn kỹ thuật về quan trắc và cung cấp thông tin, dữ liệu cho các đài khí tượng thủy văn chuyên dụng
- Mức nước: Tiêu chuẩn Quốc gia về Quan trắc Khí tượng Thủy văn ISO 12636-02:2019.
- Lưu lượng: Tiêu chuẩn Quốc gia về Quan trắc Khí tượng Thủy văn ISO 12636-09:2020.
- Nồng độ trầm tích lơ lửng: Tiêu chuẩn Quốc gia về Quan trắc Khí tượng Thủy văn ISO 12636-11:2021.
- Quyết định số 1660/QĐ-TTg ngày 26/10/2020 của Thủ tướng Chính phủ về việc ban hành danh mục bí mật nhà nước trong lĩnh vực tài nguyên và môi trường.

2.1.2 Theo dõi di chuyển của đụn cát bằng phương pháp đo sâu hồi âm đa tia (MBES)

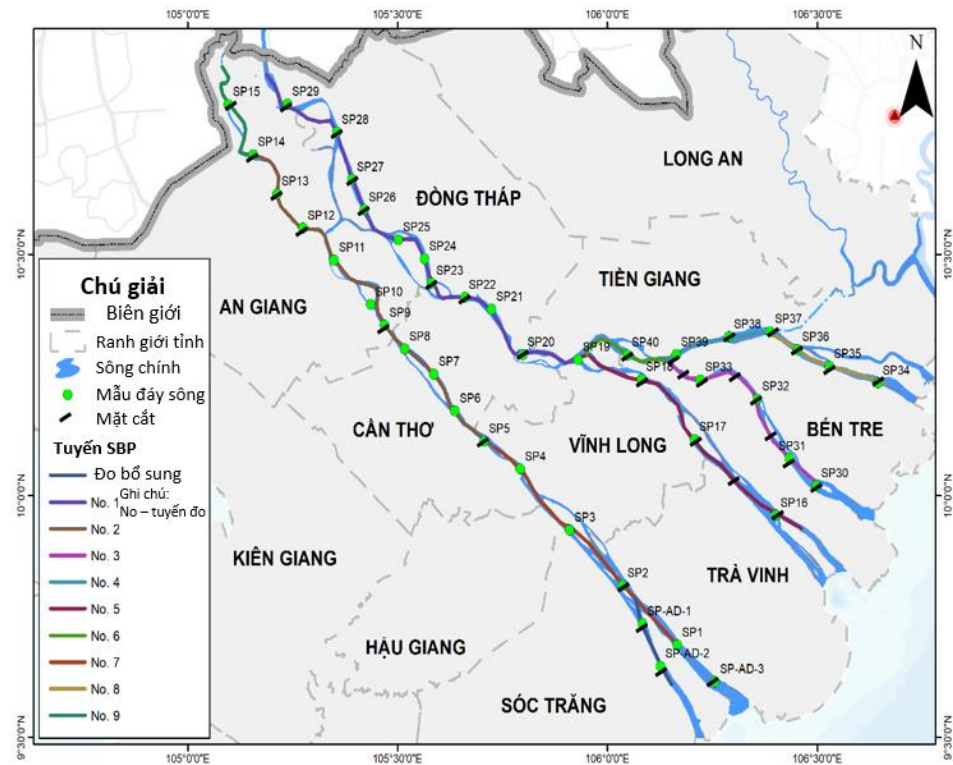
Theo dõi đụn cát đã được sử dụng như phương pháp đo đặc vận chuyển cát. Phương pháp này đã được thử nghiệm trong mùa khô đối với bốn vị trí khảo sát (các vị trí từ 1 đến 4 trong Hình 2-1), trong thời gian đó, ngoại trừ tại Mỹ Thuận (trạm số 3), ba vị trí khác đã xác định và khảo sát các đụn cát. Các dạng lòng sông như gợn sóng và đụn cát phát triển do sự chuyển động của các hạt cát dưới lòng sông. Trong mùa lũ, dữ liệu MBES được thu thập cho 12 địa điểm (các địa điểm từ 1 đến 12 trong Hình 2-1). Vị trí khảo sát chính xác cho bốn trạm Cat-1 (trạm 1 - 4) được chọn dựa trên kết quả đợt khảo sát mùa khô và đây là những trạm quan trọng bởi vị trí trạm gần biên giới Campuchia, trước khi dòng chính (sông Tiền và sông Hậu) phân lưu. Đối với các trạm khác, chúng tôi đã tham khảo kết quả đo địa chấn tầng nông và các mẫu trầm tích đáy sông được thu thập trong đợt khảo sát, phối hợp chặt chẽ với các bên liên quan để dự đoán khu vực có nhiều đụn cát nhất và phù hợp để theo dõi đụn cát. Các tuyến khảo sát ban đầu đã được vạch ra để tối ưu hóa quy trình thăm dò đụn cát. Các địa điểm được chọn nằm gần các trạm thủy văn, thuận lợi cho công tác hậu cần và cung cấp số liệu đo mức nước chính xác để sử dụng cho việc hiệu chỉnh tham chiếu. Ở đây chúng tôi tóm tắt lý do cơ bản cho việc lựa chọn vị trí/trạm:

- Trạm 1, 2, 3, 4 gần các trạm thủy văn Tân Châu, Châu Đốc, Cần Thơ, Mỹ Thuận (Trạm cấp 1). Các trạm này rất cần thiết để ước tính vận chuyển trầm tích trong các nhánh sông chính.
- Trạm 5 tại Vàm Nao cung cấp thông tin chi tiết về việc vận chuyển cát từ sông Tiền sang sông Hậu.
- Trạm 6, 7 và 8 đại diện cho vận chuyển cát trong các nhánh sông khác nhau.
- Trạm 9 biểu thị sự trao đổi cát với biển.
- Trạm 11, ngay thượng nguồn của ngã ba cửa sông, là đại diện cho vận chuyển cát ở hạ nguồn sông Hậu (xem thêm Stephens và cộng sự, 2017), nơi chúng tôi cho rằng sẽ có ít cát hơn trong hệ thống (Allison và cộng sự, 2017).
- Trạm 10 và 12 nằm gần trạm thủy văn Cao Lãnh và Long Xuyên, nằm giữa Trạm 1, 2, 3 và 4. Những kết quả này cung cấp thêm thông tin chi tiết về mô hình vận chuyển cát trên dòng chính.

2.1.3 Đo đặc địa chấn tầng nông (SBP)

Tiến hành đo đặc địa chấn tầng nông nhằm mục đích thu thập thông tin về tầng địa chất nông. Bằng cách phát các sóng âm thanh tần số thấp xuyên qua lòng sông, thiết bị đo đặc địa chấn

tầng nông có thể ghi lại các đặc tính của đất ở các lớp sâu tới 10-20m dưới lòng sông. Bằng cách chạy tàu dọc theo sông, chúng tôi đã thu thập thông tin này trong khoảng 550 km, cung cấp ước tính về trữ lượng cát di động hiện có ở ĐBSCL (Xem Hình 2-2). 35 mặt cắt ngang đã được thực hiện để ước tính sự phân bố trầm tích dọc theo chiều rộng của sông. 45 mẫu trầm tích đáy sông đã được thu thập để giúp diễn giải kết quả đo đạc.



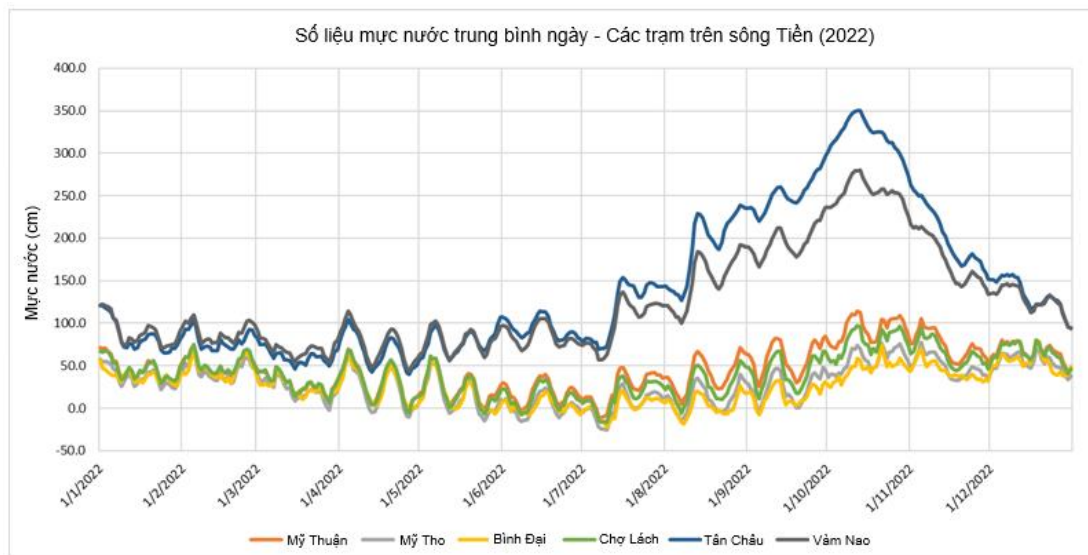
Hình 2-2: Tổng quan địa điểm lấy mẫu trầm tích

2.2 Kết quả khảo sát

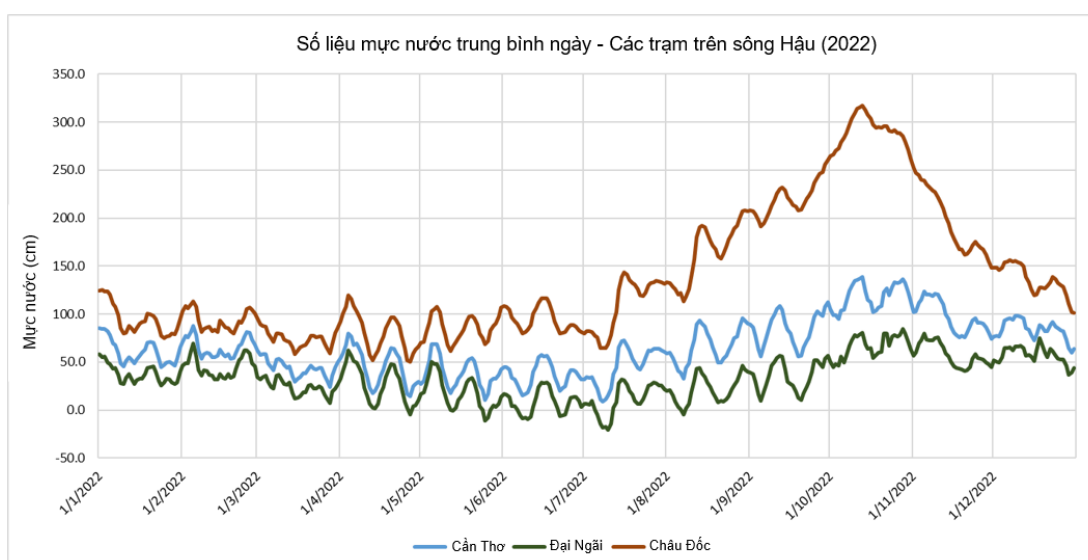
2.2.1 Mục nước

2.2.1.1 Quan trắc thường xuyên

Dữ liệu mực nước theo giờ trong 365 ngày của năm 2022 được lấy từ khảo sát quan trắc thường xuyên của Đài KTTV Nam Bộ. Với mục đích trực quan hóa, dữ liệu trung bình hàng ngày được trình bày trong Hình 2-3 và Hình 2-4. Trong mùa khô, lưu lượng dòng chảy thấp nên thủy triều xâm nhập vào hệ thống sông lớn hơn nhiều (Eslami và cộng sự, 2019a), trong khi vào mùa mưa lưu lượng cao làm tiêu tán năng lượng thủy triều rất nhiều. Từ tháng 1 đến tháng 7, tất cả các trạm đều chịu ảnh hưởng của thủy triều và điều này thể hiện rõ ở tính chất bán nhật triều của thủy triều. Do mùa lũ chiếm ưu thế từ tháng 8 đến giữa tháng 11 nên ảnh hưởng thủy triều ở các trạm hạ nguồn bị hạn chế hơn và chúng tôi không quan trắc được nhiều đặc điểm bán nhật triều của thủy triều ở các trạm thượng nguồn Tân Châu, Châu Đốc và Vàm Nao. Mực nước trung bình ở các trạm thượng nguồn này được điều chỉnh nhiều hơn theo mực nước sông, trong khi mực nước trung bình ở các trạm cửa sông hạ nguồn được điều chỉnh nhiều hơn theo mực nước biển.



Hình 2-3: Dữ liệu mực nước trung bình ngày quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền



Hình 2-4: Dữ liệu mực nước trung bình ngày quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền

2.2.1.2 Khảo sát mùa khô

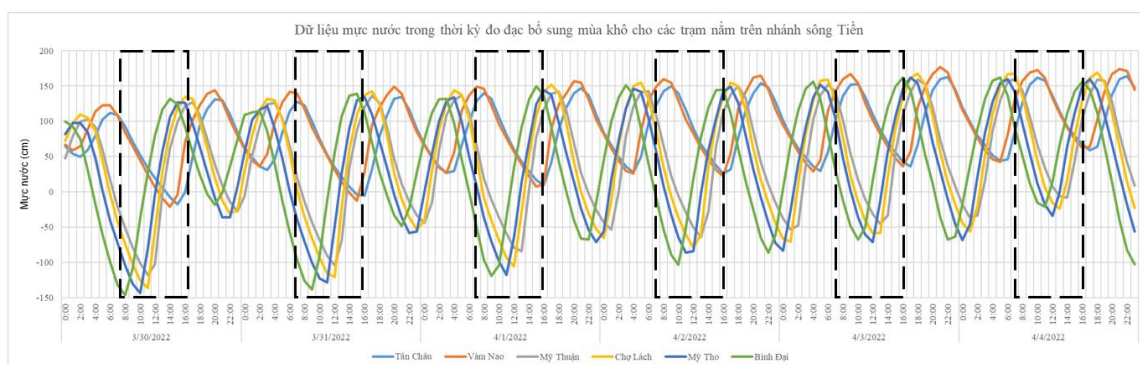
Sông Tiền: Mực nước trong mùa khô chịu ảnh hưởng chủ yếu của chế độ bán nhật triều và nước biển dâng ở Biển Đông. Thời gian truyền thủy triều từ trạm Bình Đại (Cửa Đại) đến trạm Tân Châu khoảng 6 - 7 giờ (xem thêm Eslami và cộng sự, 2019a). Mực nước thấp nhất tại các trạm hạ nguồn dao động từ -150 đến -20 cm [mực nước biển trung bình] và từ -10 đến 50 cm tại các trạm thượng nguồn. Trong khi đó mực nước cao nhất thường là ~150 cm ở tất cả các trạm.

Sông Hậu: Mực nước trong mùa khô chịu ảnh hưởng hoàn toàn của chế độ bán nhật triều và nước biển dâng ở Biển Đông. Thời gian truyền thủy triều từ trạm Đại Ngãi đến trạm Châu Đốc khoảng 5 - 6 giờ (xem thêm Eslami và cộng sự, 2019a). Mực nước thấp nhất tại các trạm hạ nguồn (Cần Thơ, Đại Ngãi) dao động từ -140 đến 10 cm [mực nước biển trung bình], và từ 0 đến 20 cm tại trạm thượng nguồn (Châu Đốc). Trong khi đó mực nước cao nhất thường là ~150 đến 170 cm cho tất cả các trạm.

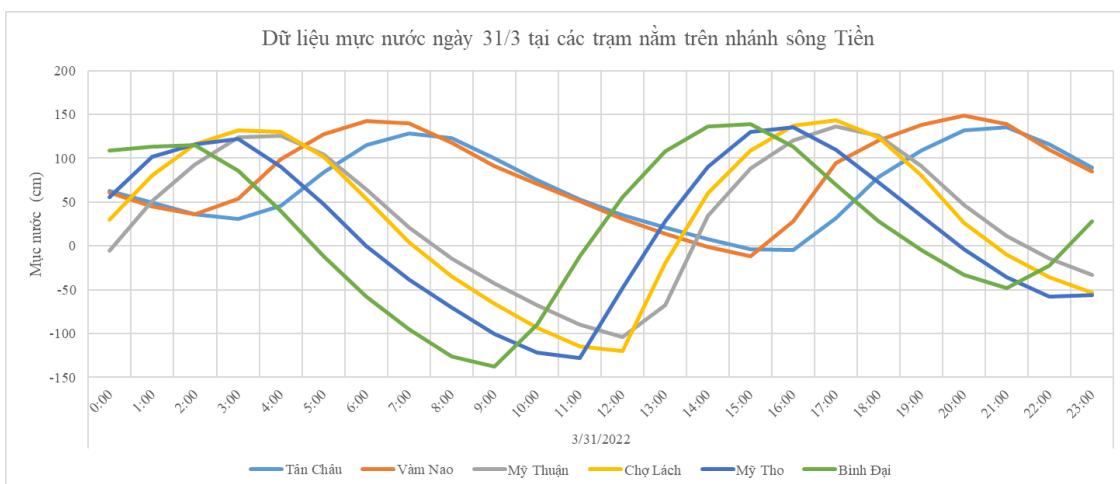
Bảng 2-2: Mực nước quan trắc tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong đợt khảo sát mùa khô.

| Trạm | Trung bình | Trung vị | Cao nhất | | Thấp nhất | |
|----------|------------|----------|--------------|------------------|--------------|------------------|
| | | | Giá trị (cm) | Thời gian | Giá trị (cm) | Thời gian |
| Tân Châu | 84,1 | 82,5 | 164,0 | 04/04/2022 22:00 | -17,0 | 30/03/2022 15:00 |

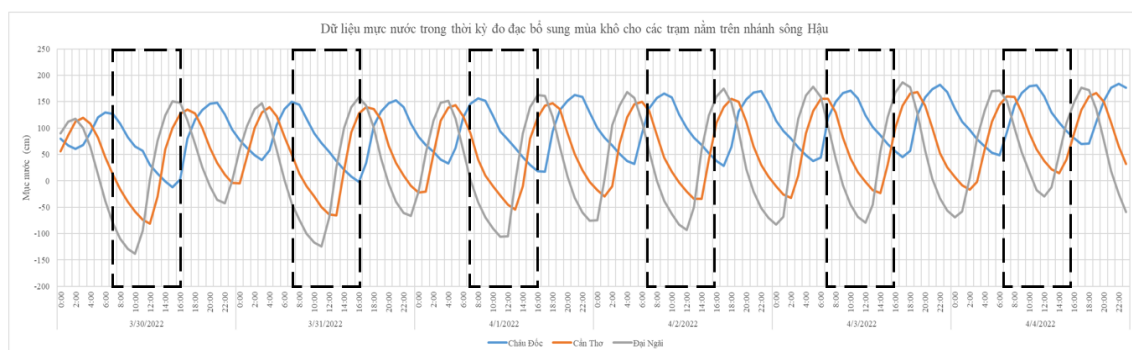
| Trạm | Trung bình | Trung vị | Cao nhất | | Thấp nhất | |
|----------|------------|----------|--------------|------------------|--------------|------------------|
| | | | Giá trị (cm) | Thời gian | Giá trị (cm) | Thời gian |
| Vàm Nao | 93,4 | 95,5 | 177,0 | 03/04/2022 21:00 | -21,0 | 30/03/2022 14:00 |
| Mỹ Thuận | 45,4 | 49,5 | 160,0 | 04/04/2022 07:00 | -117,0 | 30/03/2022 11:00 |
| Chợ Lách | 44,8 | 52,0 | 169,0 | 04/04/2022 18:00 | -136,0 | 30/03/2022 11:00 |
| Mỹ Tho | 35,5 | 48,0 | 162,0 | 03/04/2022 17:00 | -143,0 | 30/03/2022 10:00 |
| Bình Đại | 35,6 | 40,0 | 162,0 | 03/04/2022 16:00 | -146,0 | 30/03/2022 08:00 |
| Châu Đốc | 97,6 | 95,0 | 184,0 | 04/04/2022 22:00 | -12,0 | 30/03/2022 15:00 |
| Cần Thơ | 59,3 | 60,0 | 168,0 | 03/04/2022 19:00 | -81,0 | 30/03/2022 12:00 |
| Đại Ngãi | 39,2 | 46,0 | 187,0 | 03/04/2022 17:00 | -138,0 | 30/03/2022 10:00 |



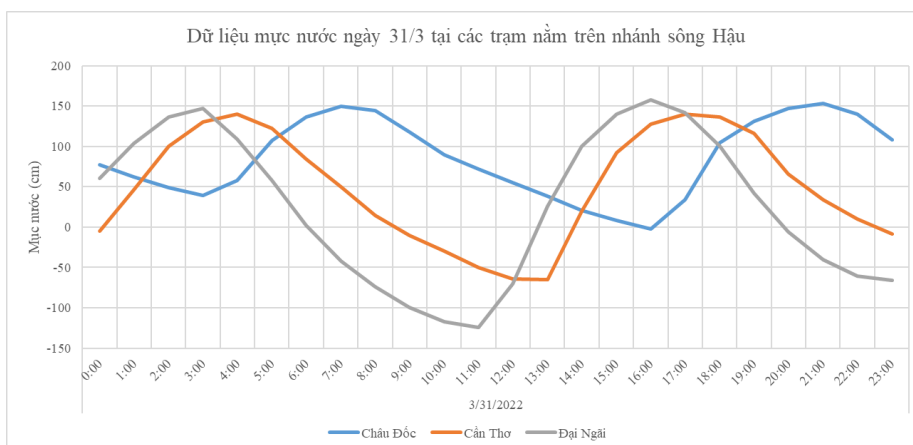
Hình 2-5: Quan trắc mực nước mùa khô trên sông Tiền (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng).



Hình 2-6: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Tiền ngày 31/3.



Hình 2-7: Quan trắc mực nước mùa khô trên sông Hậu (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng).



Hình 2-8: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Hậu ngày 31/3.

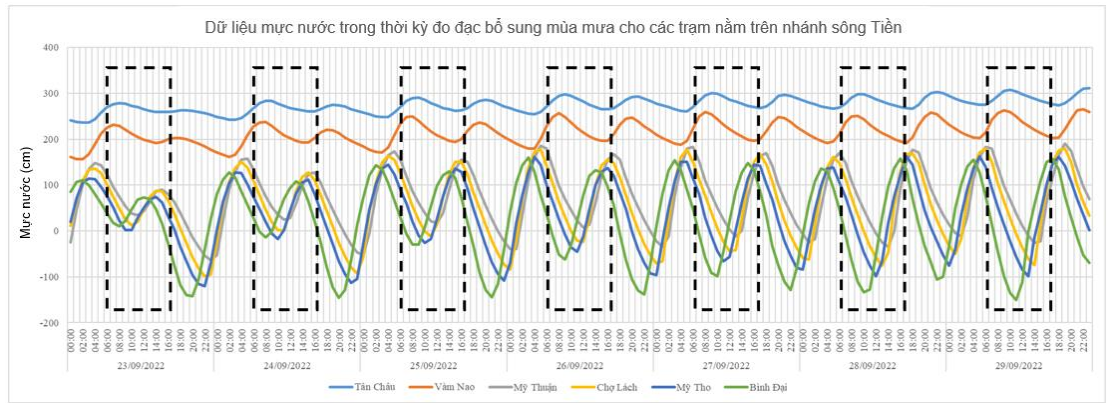
2.2.1.3 Mùa mưa

Sông Tiền: Mực nước trong mùa mưa chịu ảnh hưởng của chế độ bán nhật triều Biển Đông và dòng lũ từ thượng nguồn. Mực nước ở các trạm hạ nguồn được quyết định nhiều hơn bởi mực nước biển trong khi mực nước thượng nguồn được điều chỉnh nhiều hơn theo mực nước sông và xung lũ. Thời gian truyền thủy triều từ trạm Bình Đại (cửa Đại) đến trạm Tân Châu khoảng 7 giờ. Mực nước thấp nhất tại các trạm hạ nguồn dao động từ -150 đến -50 cm và từ 170 đến 230 cm tại các trạm thượng nguồn. Trong khi đó mực nước cao nhất khoảng 120 đến 150 cm ở các trạm hạ nguồn và khoảng 250 đến 300 cm ở các trạm thượng nguồn.

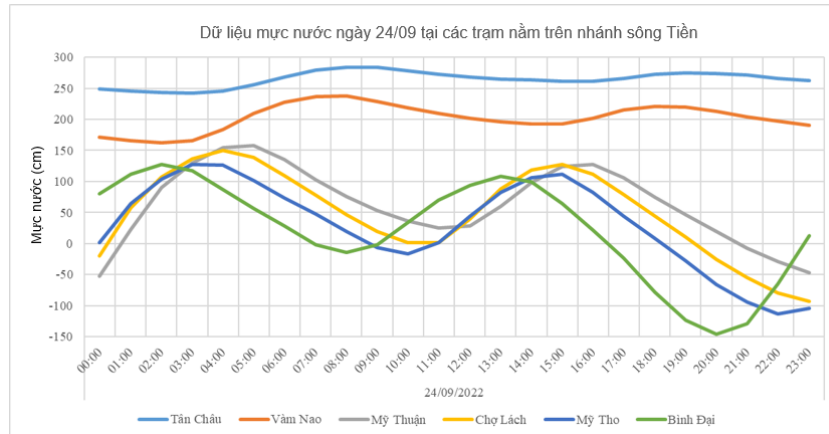
Sông Hậu: Mực nước trong mùa mưa chịu ảnh hưởng của chế độ bán nhật triều Biển Đông và dòng lũ từ thượng nguồn. Mực nước ở các trạm hạ nguồn được quyết định nhiều hơn bởi mực nước biển trong khi mực nước thượng nguồn được điều chỉnh nhiều hơn theo mực nước sông và xung lũ. Thời gian truyền thủy triều từ trạm Đại Ngãi đến trạm Châu Đốc khoảng 6 giờ. Mực nước thấp nhất tại các trạm hạ nguồn dao động từ -100 cm (Đại Ngãi) đến 20 cm (Cần Thơ), và từ 200 đến 240 cm tại Châu Đốc. Trong khi đó mực nước cao nhất khoảng 140 cm (Đại Ngãi), 170 cm (Cần Thơ) và khoảng 250 đến 270 cm tại Tân Châu.

Bảng 2-3: Mực nước quan trắc tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong đợt khảo sát mùa mưa.

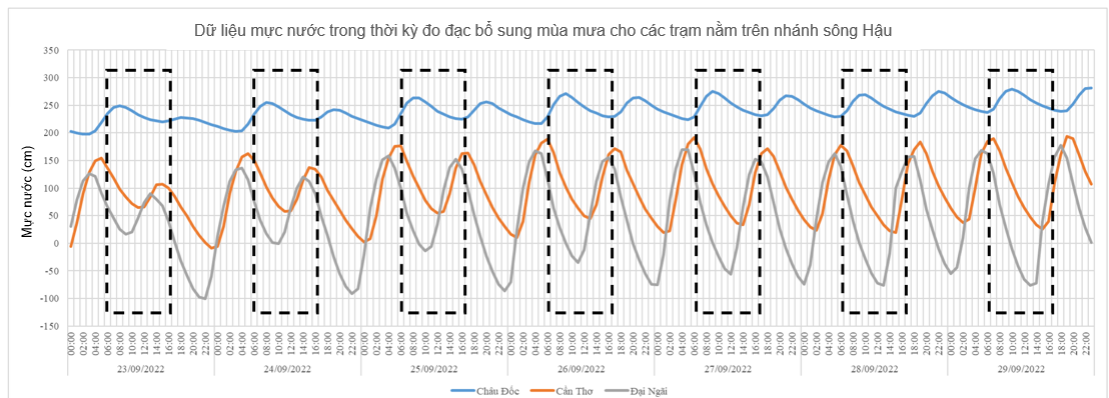
| Trạm | Trung bình | Trung vị | Cao nhất | | Thấp nhất | |
|----------|------------|----------|--------------|------------------|--------------|------------------|
| | | | Giá trị (cm) | Thời gian | Giá trị (cm) | Thời gian |
| Tân Châu | 274,83 | 274,5 | 311 | 29/09/2022 23:00 | 237 | 23/09/2022 02:00 |
| Vàm Nao | 214,24 | 212 | 266 | 29/09/2022 22:00 | 157 | 23/09/2022 01:00 |
| Mỹ Thuận | 71,67 | 71,5 | 191 | 29/09/2022 19:00 | -63 | 23/09/2022 23:00 |
| Chợ Lách | 240,20 | 239 | 281 | 29/09/2022 23:00 | 198 | 23/09/2022 02:00 |
| Mỹ Tho | 95,83 | 90 | 194 | 29/09/2022 19:00 | -9 | 23/09/2022 23:00 |
| Bình Đại | 55,45 | 60 | 180 | 29/09/2022 06:00 | -99 | 23/09/2022 22:00 |
| Châu Đốc | 36,01 | 44 | 163 | 28/09/2022 17:00 | -120 | 23/09/2022 22:00 |
| Cần Thơ | 22,79 | 32 | 160 | 26/09/2022 03:00 | -151 | 29/09/2022 11:00 |
| Đại Ngãi | 45,55 | 45 | 178 | 29/09/2022 18:00 | -100 | 23/09/2022 22:00 |



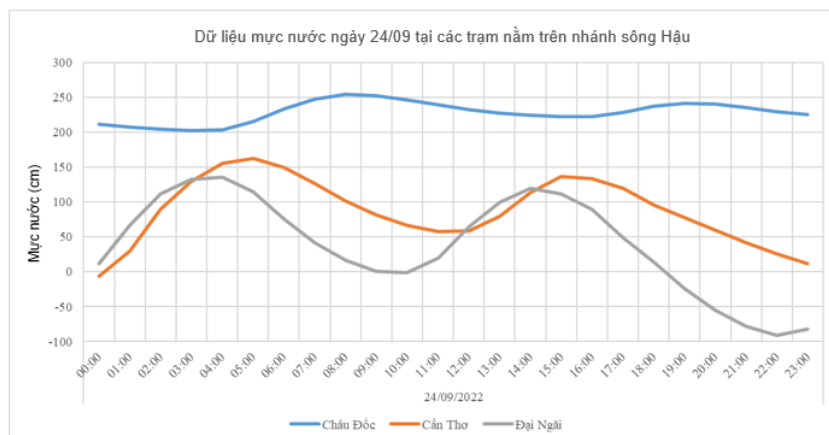
Hình 2-9: Quan trắc mực nước mùa mưa trên sông Tiền (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng).



Hình 2-10: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Tiền ngày 24/9.



Hình 2-11: Quan trắc mực nước mùa mưa trên sông Hậu (vùng đen nét đứt: giai đoạn đo lưu lượng).

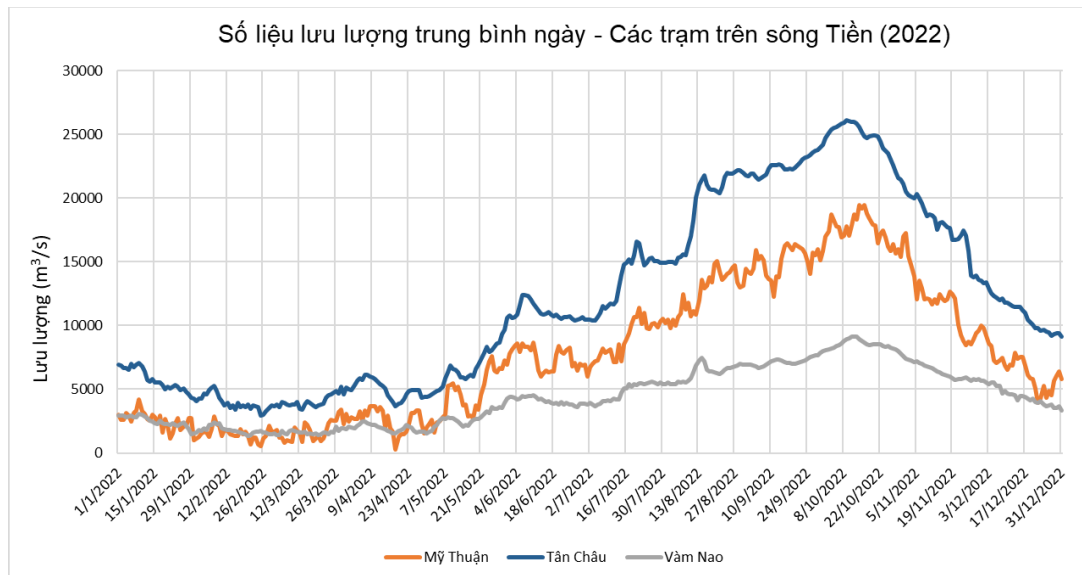


Hình 2-12: Ảnh phóng to quan trắc mực nước sông Hậu ngày 24/9.

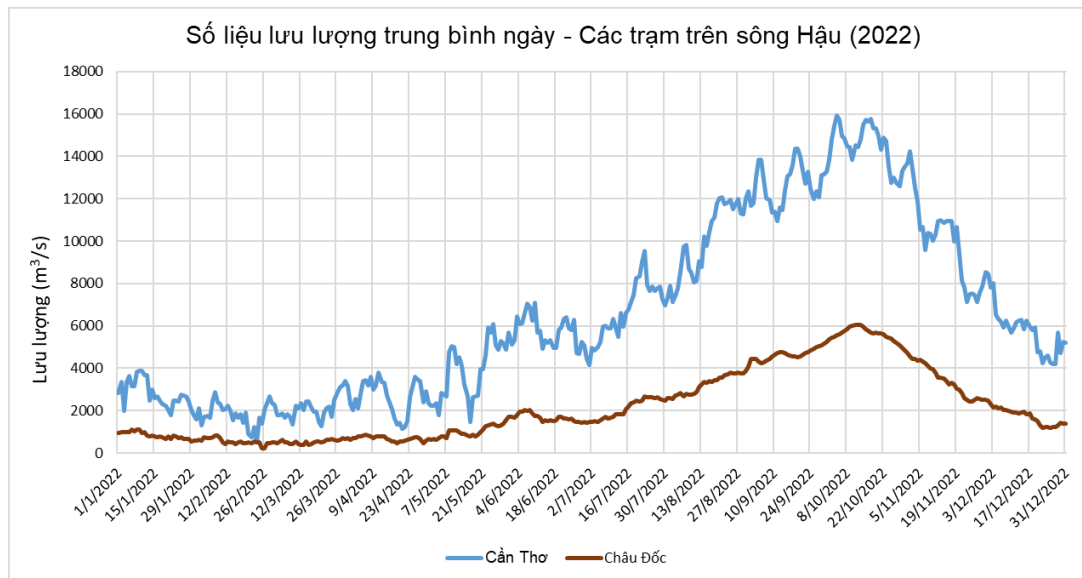
2.2.2 Lưu lượng

2.2.2.1 Quan trắc thường xuyên

Dữ liệu lưu lượng theo giờ trong 365 ngày của năm 2022 được lấy từ khảo sát quan trắc thường xuyên của Đài KTTV Nam Bộ. Với mục đích trực quan hóa, dữ liệu trung bình hàng ngày được trình bày trong Hình 2-13 và Hình 2-14. Giá trị lưu lượng khá nhỏ vào mùa khô nhưng tăng dần về mùa mưa. Dữ liệu lưu lượng phù hợp với dữ liệu mực nước, đạt đỉnh vào khoảng giữa tháng 10 tại tất cả các trạm. Lưu ý rằng ở các trạm hạ nguồn (Cần Thơ và Mỹ Thuận), tín hiệu thủy triều được quan trắc suốt cả năm (tức là sông thủy triều), nhưng gần biên giới Campuchia tín hiệu thủy triều trong số liệu lưu lượng yếu đi đáng kể vào mùa mưa (xem thêm Eslami và cộng sự, 2019a).



Hình 2-13: Số liệu lưu lượng trung bình ngày đo đặc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền.



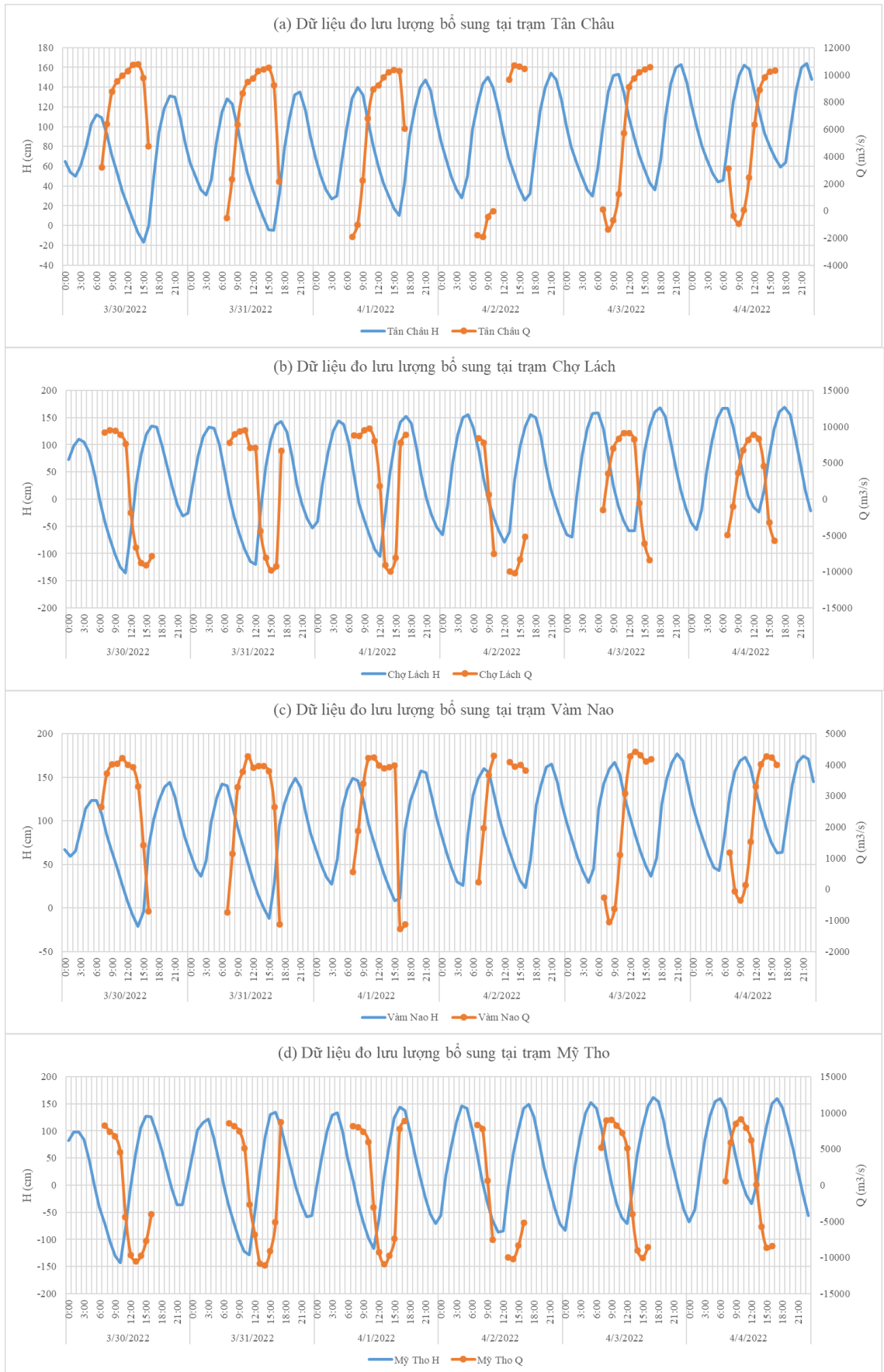
Hình 2-14: Số liệu lưu lượng trung bình ngày đo đặc thường xuyên tại các trạm trên sông Hậu.

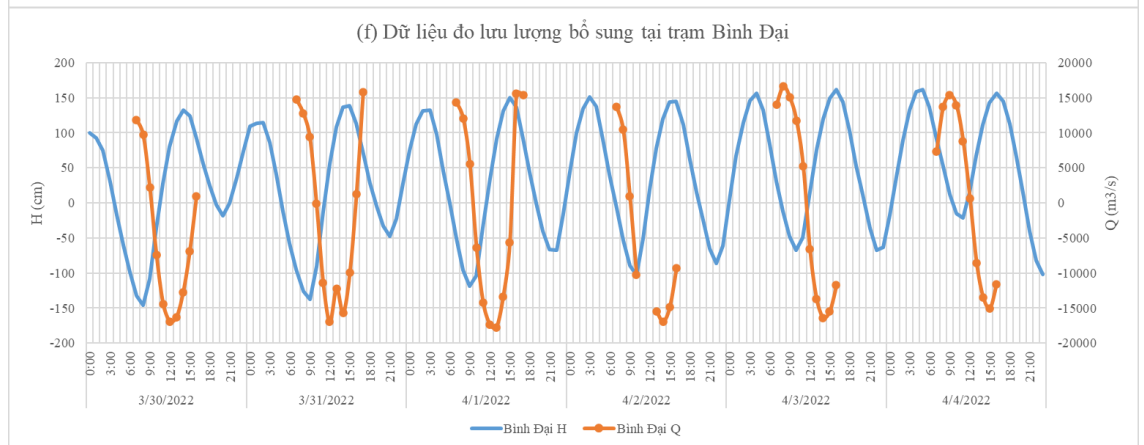
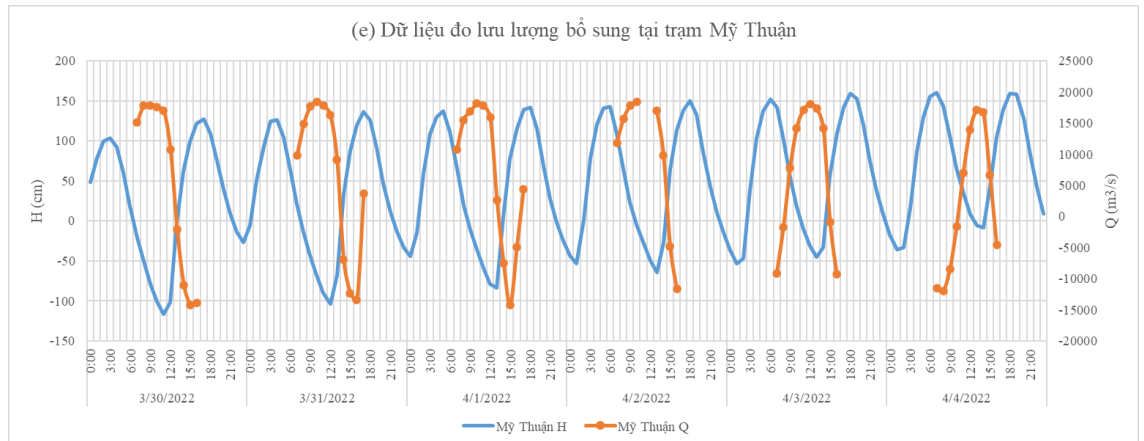
2.2.2.2 Mùa khô

Tại các trạm thượng nguồn, lưu lượng thường đạt cực đại vào khoảng giữa trưa, hướng về hạ nguồn (giá trị dương), trong giai đoạn thủy triều thấp. Trong khi đó, tại các trạm hạ nguồn lưu lượng có 2 đỉnh, một đỉnh vào buổi sáng khi triều thấp với hướng dòng chảy hạ nguồn và một vào buổi chiều khi triều cao ở hướng thượng nguồn (có giá trị âm). Bảng 2-4 dưới đây tóm tắt các hoạt động quan trắc và Hình 2-15 và Hình 2-16 thể hiện các giá trị quan trắc ở cả hai trạm sông Tiền và sông Hậu.

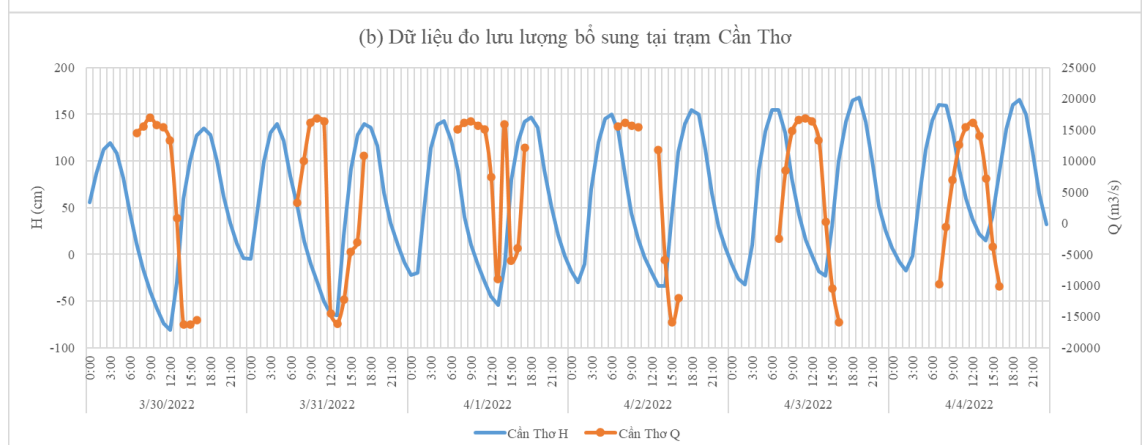
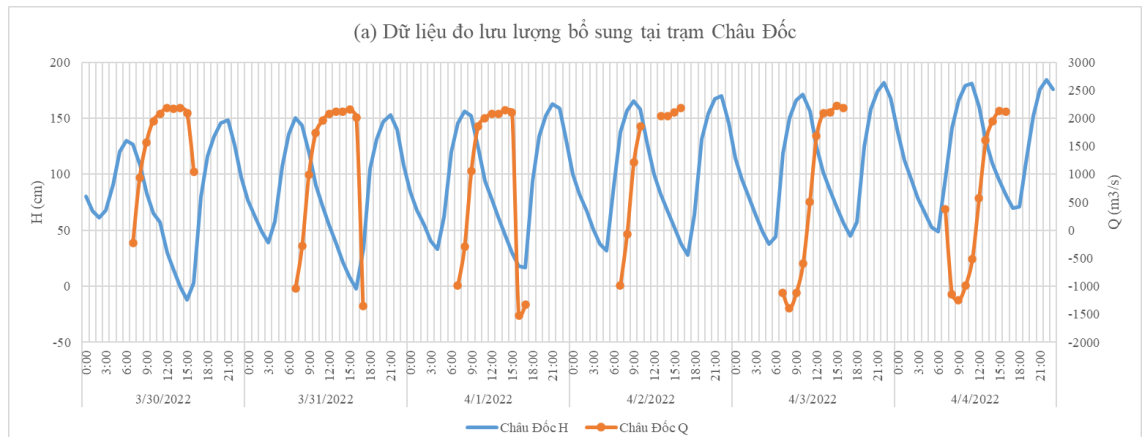
Bảng 2-4: Quan trắc lưu lượng tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong đợt khảo sát mùa khô.

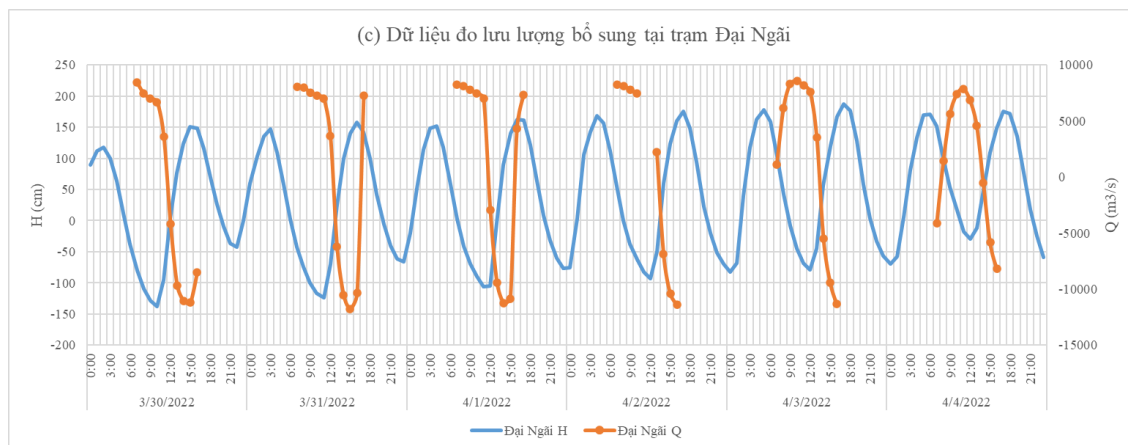
| Trạm | Trung bình | Trung vị | Lớn nhất (+) | | Lớn nhất (-) | |
|----------|------------|----------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| | | | Giá trị (m ³ /s) | Thời gian | Giá trị (m ³ /s) | Thời gian |
| Cần Thơ | 4972 | 11328,8 | 16965,4 | 30/03/2022 09:00 | - | - |
| Mỹ Thuận | 5761,3 | 9813,7 | 18459,1 | 31/03/2022 10:00 | - | - |
| Mỹ Tho | -315,5 | 88 | 9076 | 04/04/2022 10:00 | -11094,8 | 31/03/2022 14:00 |
| Bình Đại | -1678,1 | -6028,4 | 16591,4 | 03/04/2022 08:00 | -17731,7 | 01/04/2022 14:00 |
| Đại Ngãi | 752,3 | 4327,6 | 8582,2 | 03/04/2022 10:00 | -11782,8 | 31/03/2022 15:00 |
| Chợ Lách | 1851,3 | 6693,2 | 9746,4 | 01/04/2022 11:00 | -10183 | 02/04/2022 14:00 |
| Tân Châu | 6252 | 8905,7 | 10764,4 | 30/03/2022 14:00 | - | - |
| Châu Đốc | 990,4 | 1791,7 | 2222,4 | 03/04/2022 15:00 | - | - |
| Vàm Nao | 2598,4 | 3786 | 4421,4 | 03/04/2022 13:00 | - | - |





Hình 2-15: Số liệu lưu lượng và mực nước mùa khô tại các trạm trên sông Tiền đo đặc vào ban ngày: (a) Tân Châu, (b) Chợ Lách, (c) Vàm Nao, (d) Mỹ Tho, (e) Mỹ Thuận, (f) Bình Đại.





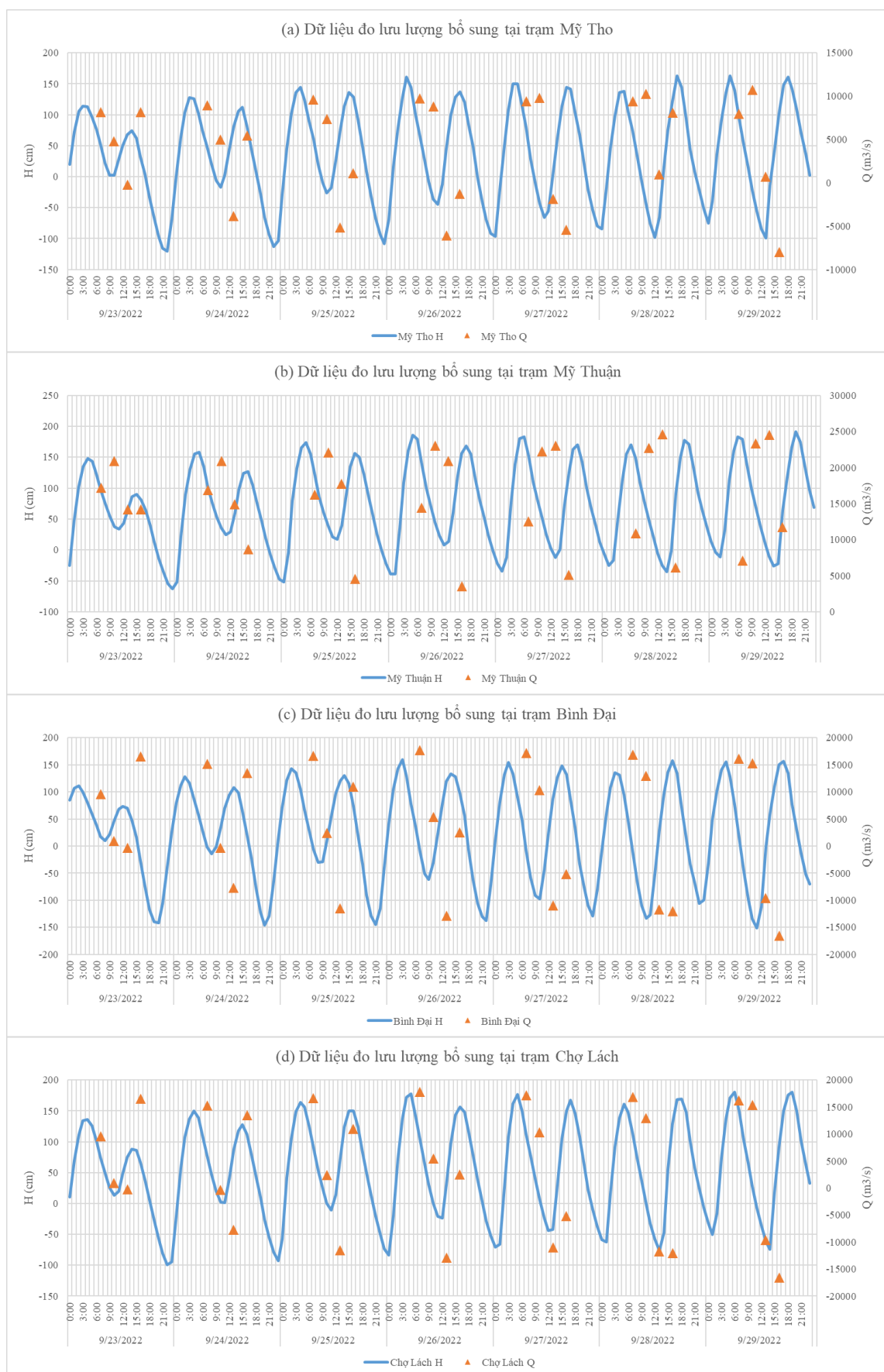
Hình 2-16: Số liệu mực nước và lưu lượng mùa khô tại các trạm trên sông Hậu đo đặc vào ban ngày: (a) Châu Đốc, (b) Cần Thơ, (c) Đại Ngãi.

2.2.2.3 Mùa mưa

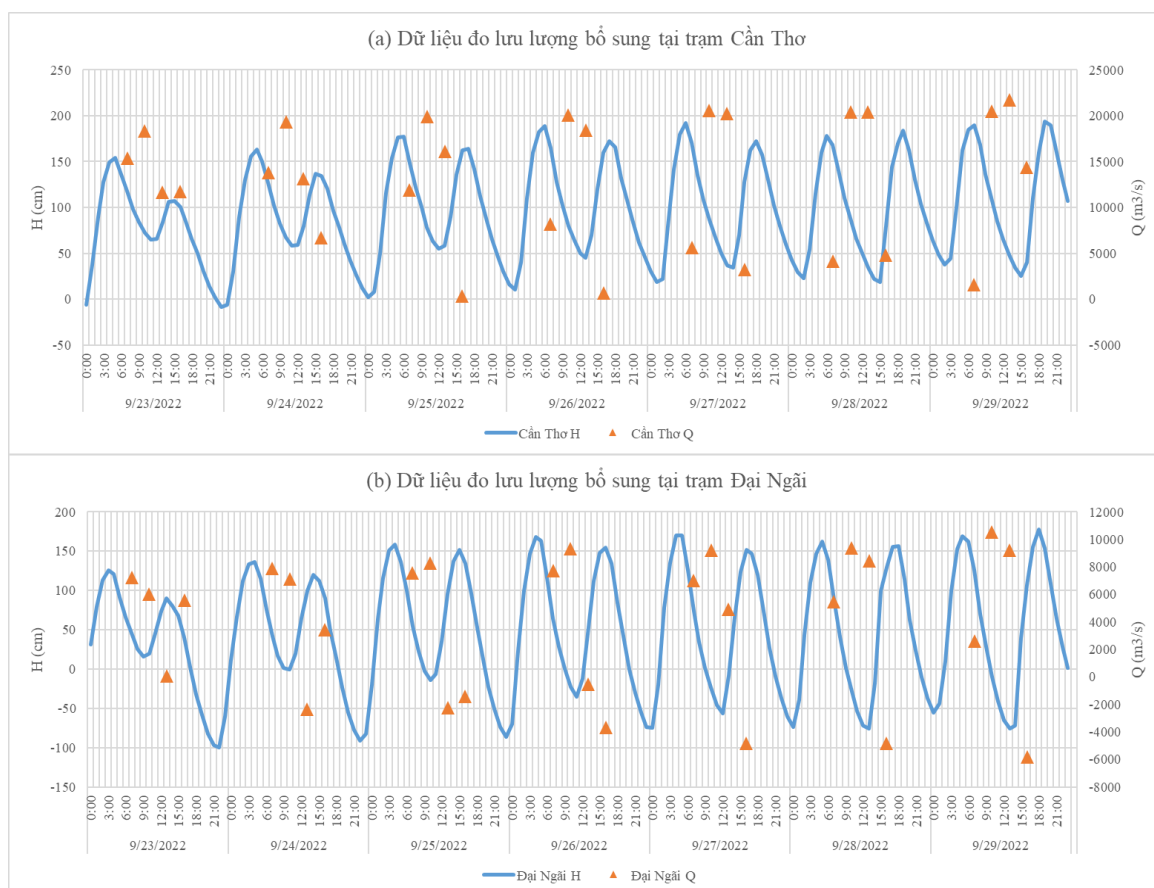
Từ số liệu lưu lượng cho thấy xu hướng lũ ngày càng gia tăng từ ngày 26/9. Trước ngày này, lưu lượng có xu hướng đạt cực đại vào khoảng 10 giờ sáng, sau đó giảm mạnh cho đến khi đạt giá trị thấp nhất vào khoảng 4 giờ chiều. Tuy nhiên, bắt đầu từ ngày 26, lưu lượng đạt cực đại từ 10 giờ sáng và đạt giá trị cực đại vào lúc 1 giờ chiều. Tín hiệu thủy triều mạnh hơn rõ ràng ở các trạm hạ nguồn (như Bình Đại và Đại Ngãi) dẫn đến lưu lượng thủy triều âm (thượng nguồn), trong khi ở Mỹ Thuận và Cần Thơ, lưu lượng hoàn toàn dương (hạ nguồn) mặc dù trước đó đạt gần bằng 0 trước khi mực nước cao. Bảng 2-5 dưới đây tóm tắt các quan trắc và Hình 2-17 và Hình 2-18 thể hiện các giá trị quan trắc ở cả hai trạm sông Tiền và sông Hậu.

Bảng 2-5: Quan trắc lưu lượng tại 4 trạm Cat-2 và 2 trạm Cat-1 trong đợt khảo mùa mưa.

| Trạm | Trung bình | Trung vị | Lớn nhất (+) | | Lớn nhất (-) | |
|----------|------------|----------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| | | | Giá trị (m³/s) | Thời gian | Giá trị (m³/s) | Thời gian |
| Cần Thơ | 12972,73 | 14104,76 | 21693 | 29/09/2022 13:00 | - | - |
| Mỹ Thuận | 15869,89 | 16574,00 | 24630 | 28/09/2022 13:00 | - | - |
| Mỹ Tho | 6299,9 | 7691,14 | 10706 | 29/09/2022 10:00 | -8018 | 29/09/2022 16:00 |
| Bình Đại | 10684,5 | 11598,13 | 17766 | 26/09/2022 07:00 | -16557 | 29/09/2022 16:00 |
| Đại Ngãi | 5810,9 | 5899,88 | 10542 | 29/09/2022 10:00 | -5806 | 29/09/2022 16:00 |
| Chợ Lách | 7600,4 | 8777,16 | 12795 | 28/09/2022 10:00 | -3229 | 28/09/2022 16:00 |



Hình 2-17: Số liệu mực nước và lưu lượng mùa mưa tại các trạm trên sông Tiền đo đặc vào ban ngày: (a) Mỹ Tho, (b) Mỹ Thuận, (c) Bình Đại, (d) Chợ Lách.



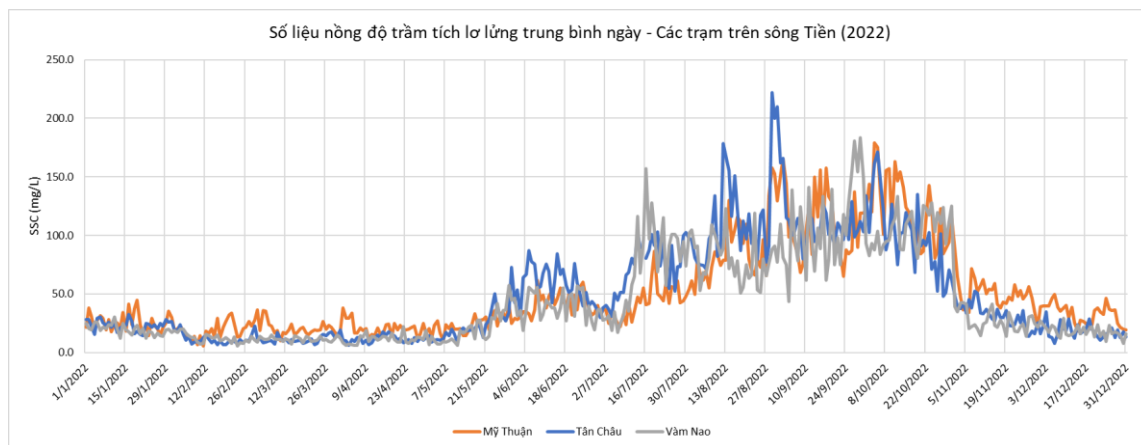
Hình 2-18: Số liệu mực nước và lưu lượng mùa mưa tại các trạm trên sông Hậu đo đạc vào ban ngày: (a) Cần Thơ, (b) Đại Ngãi.

2.2.3 Nồng độ trầm tích lơ lửng

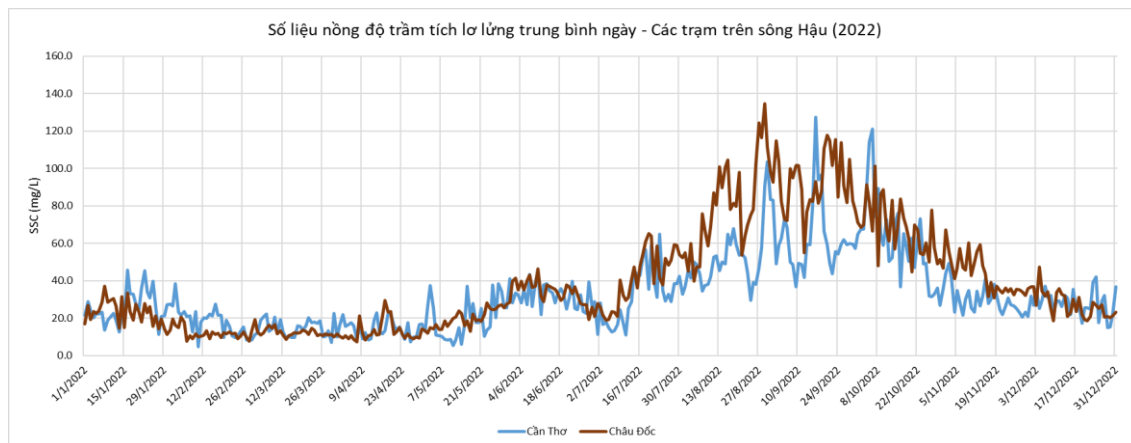
Để đo nồng độ trầm tích lơ lửng (SSC) trong các đợt khảo sát, hai phương pháp LISST và mẫu nước (bình lấy mẫu nước) đã được sử dụng. Thông thường, dữ liệu LISST không thể được sử dụng trực tiếp vì cần hiệu chỉnh với các mẫu nước. Mục đích là tìm ra mối tương quan tốt giữa LISST và các mẫu nước để lấy công thức tuyến tính cho quá trình quy đổi kết quả từ LISST sang SSC. Các mối tương quan quan trắc được trong trường hợp của chúng tôi là không thỏa đáng vì có thể xảy ra trong quá trình vận hành hiện trường. Điều này thậm chí còn xảy ra nhiều hơn ở một hệ thống sông có nhiều biến động như sông Mekong. Vì vậy, ở đây chúng tôi chủ yếu dựa vào các phép đo mẫu nước là nguồn quan trắc đáng tin cậy nhất.

2.2.3.1 Quan trắc thường xuyên

Mẫu trầm tích lơ lửng (SSC) được thu thập 2 lần/ngày vào mùa khô và 3-4 lần/ngày vào mùa mưa. Với mục đích trực quan hóa, dữ liệu trung bình hàng ngày đã được trình bày (xem Hình 2-19 và Hình 2-20). Số liệu SSC có mối tương quan chặt chẽ với số liệu lưu lượng, với giá trị khá nhỏ vào mùa khô bắt đầu từ giữa tháng 7 dao động mạnh hơn và đôi khi tăng lên giá trị rất cao. Đây một phần là hàm số của vận tốc dòng chảy cục bộ (mùa khô) và lượng cung cấp ở thượng nguồn (vào mùa mưa). Hầu hết trầm tích mịn và lơ lửng đều đến đồng bằng trong đợt lũ. Trong khi SSC mùa khô ở cả sông Tiền và sông Hậu có mức dao động ~15-30 mg/L, các đỉnh SSC ở sông Tiền cao hơn một chút so với sông Hậu. Tuy nhiên, sự khác biệt không đáng kể.



Hình 2-19: Số liệu SSC trung bình ngày từ quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Tiền.



Hình 2-20: Số liệu SSC trung bình ngày từ quan trắc thường xuyên tại các trạm trên sông Hậu.

2.2.3.2 Mùa khô

Mặc dù thiết bị LISST và bình lấy mẫu nước cung cấp dữ liệu khác nhau, nhưng xu hướng chung của cả hai thiết bị là tương tự nhau, với các trạm thượng nguồn có 1 đỉnh dữ liệu vào buổi chiều và các trạm hạ nguồn hầu hết có 2 đỉnh (trừ Cần Thơ và Mỹ Thuận, chỉ có 1 đỉnh dữ liệu vào khoảng buổi sáng đến buổi trưa). Dữ liệu tại Tân Châu, Bình Đại và Đại Ngãi nổi bật với giá trị cao hơn vì nhiều lý do khác nhau. Các trạm hạ nguồn chịu ảnh hưởng của bùn cửa sông, đặc biệt vào mùa khô và các trạm thượng nguồn chịu ảnh hưởng nhiều hơn từ nguồn cung cấp từ thượng nguồn.

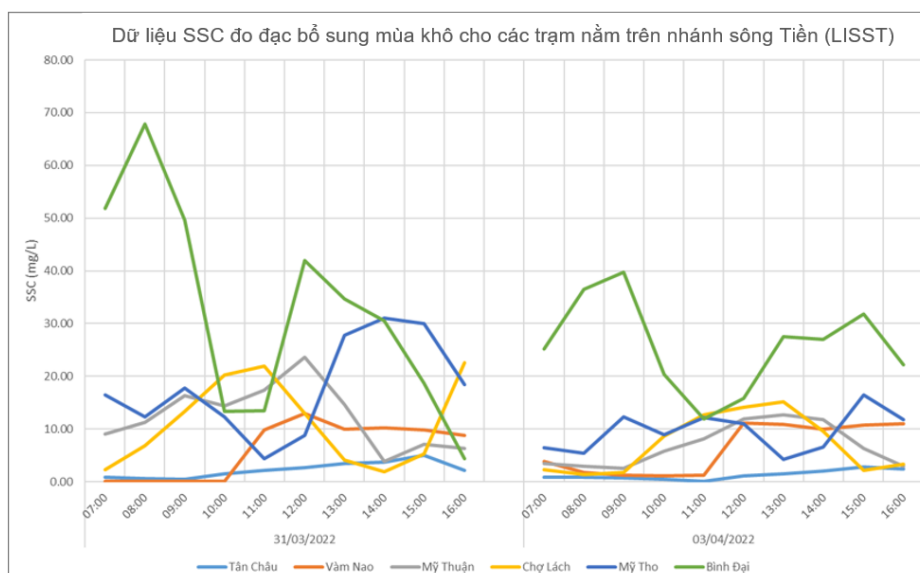
Bảng 2-6: Nồng độ trầm tích lơ lửng (LISST) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa khô.

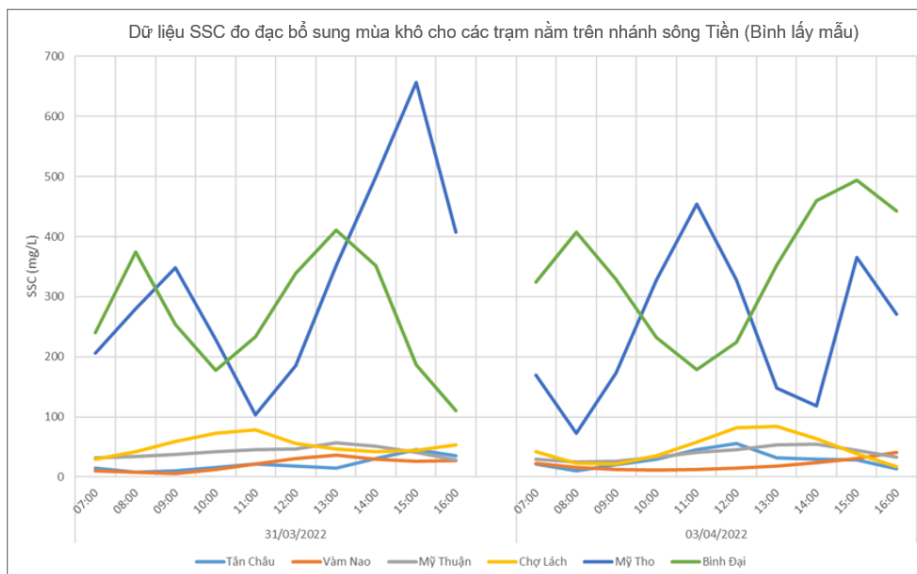
| Trạm | Trung bình | Trung vị | Lớn nhất | | Nhỏ nhất | |
|----------|------------|----------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| | | | Giá trị (mg/L) | Thời gian | Giá trị (mg/L) | Thời gian |
| Cần Thơ | 7,8 | 7,4 | 19,5 | 31/03/2022 08:00 | 1,6 | 31/03/2022 12:00 |
| Mỹ Thuận | 9,6 | 8,6 | 23,6 | 31/03/2022 12:00 | 2,6 | 03/04/2022 09:00 |
| Mỹ Tho | 13,7 | 12,2 | 31,1 | 31/03/2022 14:00 | 4,2 | 03/04/2022 13:00 |
| Bình Đại | 29,2 | 27,3 | 67,8 | 31/03/2022 08:00 | 4,3 | 31/03/2022 16:00 |
| Đại Ngãi | 71,8 | 66,2 | 179,6 | 31/03/2022 16:00 | 5,9 | 03/04/2022 07:00 |
| Chợ Lách | 9,1 | 7,7 | 22,5 | 31/03/2022 16:00 | 1,4 | 03/04/2022 08:00 |

| Trạm | Trung bình | Trung vị | Lớn nhất | | Nhỏ nhất | |
|----------|------------|----------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | | | Giá trị (mg/L) | Thời gian | Giá trị (mg/L) | Thời gian |
| Tân Châu | 1,8 | 1,5 | 5,0 | 31/03/2022 15:00 | 0 | 03/04/2022 11:00 |
| Châu Đốc | 2,3 | 2,3 | 3,1 | 31/03/2022 14:00 | 1,1 | 03/04/2022 11:00 |
| Vàm Nao | 6,2 | 9,3 | 12,9 | 31/03/2022 12:00 | 0,1 | 31/03/2022 07:00 |

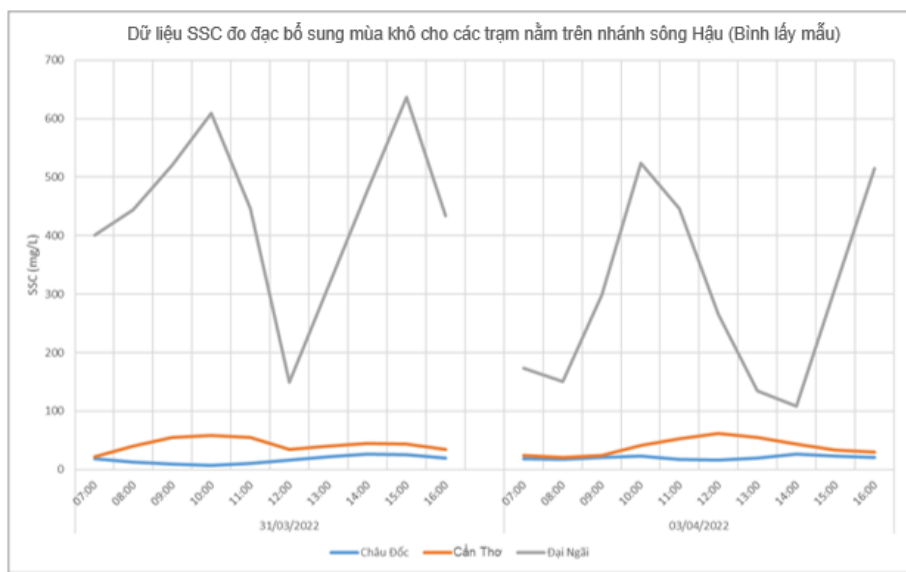
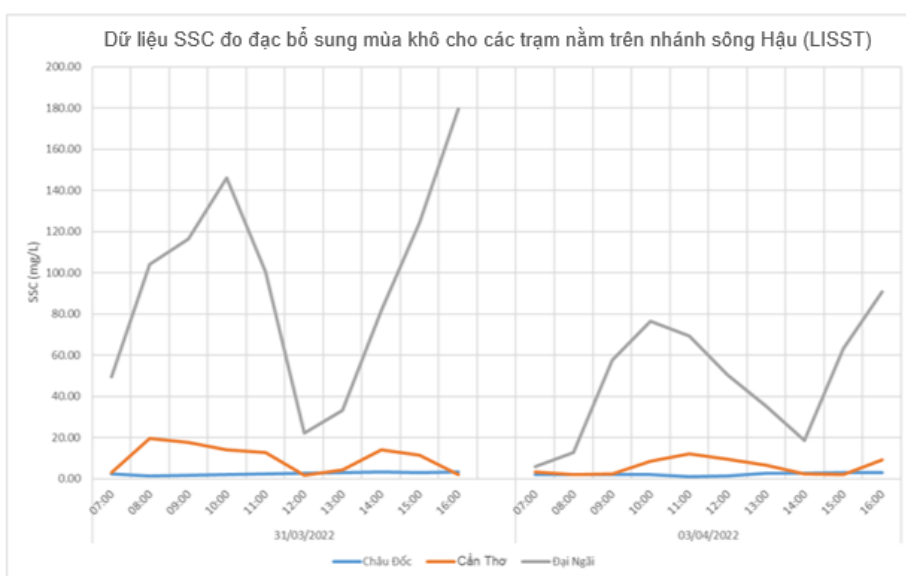
Bảng 2-7: Nồng độ trầm tích lơ lửng (bình lấy mẫu) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa khô.

| Trạm | Trung bình | Trung vị | Lớn nhất | | Nhỏ nhất | |
|----------|------------|----------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | | | Giá trị (mg/L) | Thời gian | Giá trị (mg/L) | Thời gian |
| Cần Thơ | 40,7 | 40,5 | 62,0 | 03/04/2022 12:00 | 21,0 | 03/04/2022 08:00 |
| Mỹ Thuận | 40,0 | 41,0 | 57,0 | 31/03/2022 13:00 | 25,0 | 03/04/2022 08:00 |
| Mỹ Tho | 284,9 | 275,5 | 657,0 | 31/03/2022 15:00 | 73,0 | 03/04/2022 08:00 |
| Bình Đại | 306,2 | 326,5 | 494,0 | 03/04/2022 15:00 | 110,0 | 31/03/2022 16:00 |
| Đại Ngãi | 367,9 | 417,5 | 637,0 | 31/03/2022 15:00 | 108,0 | 03/04/2022 14:00 |
| Chợ Lách | 49,4 | 45,5 | 84,0 | 03/04/2022 13:00 | 17,0 | 03/04/2022 16:00 |
| Tân Châu | 25,1 | 21,0 | 56,0 | 03/04/2022 12:00 | 8,0 | 31/03/2022 08:00 |
| Châu Đốc | 18,6 | 19,5 | 27,0 | 31/03/2022 14:00 | 7,0 | 31/03/2022 10:00 |
| Vàm Nao | 20,6 | 19,5 | 41,0 | 03/04/2022 16:00 | 6,0 | 31/03/2022 09:00 |





Hình 2-21: Số liệu SSC mùa khô tại các trạm trên sông Tiền với hai kỹ thuật đo khác nhau.



Hình 2-22: Số liệu SSC mùa khô tại các trạm trên sông Hậu với hai kỹ thuật đo khác nhau.

2.2.3.3 Mùa mưa

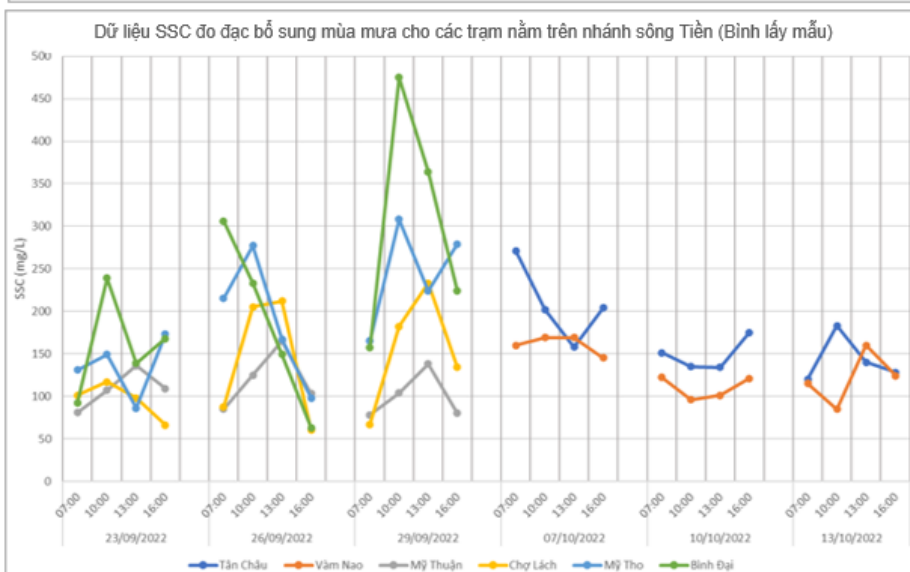
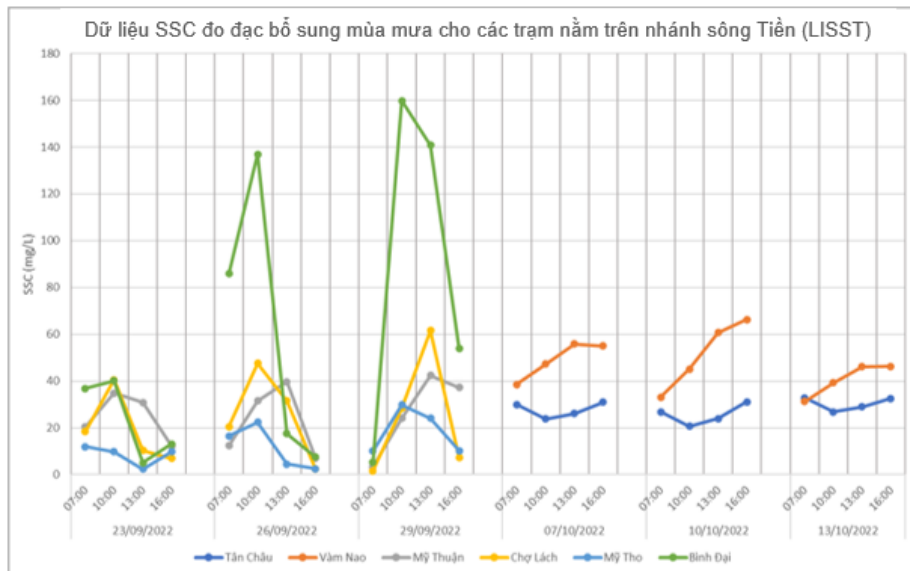
Để đo SSC trong các đợt khảo sát, hai phương pháp LISST và mẫu nước (bình lấy mẫu nước) đã được sử dụng. Dữ liệu LISST không thể được sử dụng trực tiếp vì cần hiệu chỉnh với các mẫu nước. Vì vậy, cách tiếp cận chung là chúng tôi hướng đến việc đo lường mối tương quan tốt giữa LISST và mẫu nước để có thể lấy công thức tuyến tính cho tín hiệu LISST được quy đổi kết quả sang SSC. Các mối tương quan quan trắc được trong trường hợp của chúng tôi là không thỏa đáng vì có thể xảy ra trong quá trình vận hành hiện trường. Vì vậy, trong báo cáo này chúng tôi chủ yếu dựa vào các phép đo mẫu nước là nguồn đo lường đáng tin cậy nhất. Các đường cong SSC quan trắc được (xem Hình 2-23 và Hình 2-24) có xu hướng tương tự như đường cong lưu lượng, như trước khi xảy ra lũ lụt, đạt cực đại vào khoảng 10 giờ sáng và sau đó giảm dần. Đặc biệt sau ngày 26/9, giá trị SSC cao hơn đáng kể ở các trạm có triều lớn hơn như Bình Đại và Đại Ngãi. Vận tốc thủy triều và hàm lượng bùn đáy sông, cùng với trầm tích sông được cung cấp trong xung lũ có lẽ là nguyên nhân chính dẫn đến nồng độ trầm tích cao hơn.

Bảng 2-8: Nồng độ trầm tích lơ lửng (LISST) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa mưa.

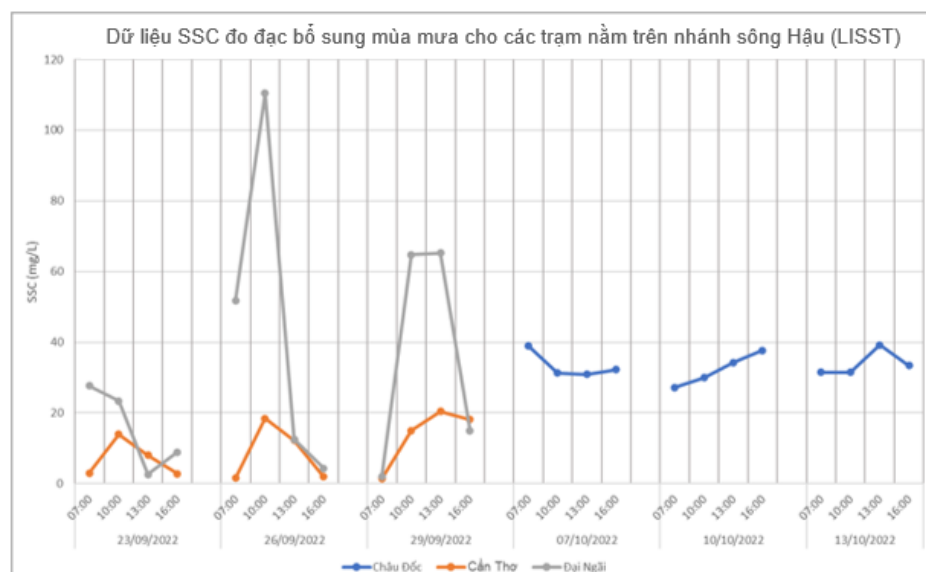
| Trạm | Số lượng quan trắc | Trung bình | Trung vị | Lớn nhất | | Nhỏ nhất | |
|----------|--------------------|------------|----------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| | | | | Giá trị (mg/) | Thời gian | Giá trị (mg/) | Thời gian |
| Cần Thơ | 12 | 9,71 | 10,10 | 20,38 | 29/09/2022 13:00 | 1,35 | 29/09/2022 07:00 |
| Mỹ Thuận | 12 | 24,66 | 27,47 | 42,36 | 29/09/2022 13:00 | 3,37 | 29/09/2022 07:00 |
| Mỹ Tho | 12 | 12,83 | 10,14 | 29,77 | 29/09/2022 10:00 | 2,35 | 23/09/2022 13:00 |
| Bình Đại | 12 | 58,56 | 38,44 | 159,83 | 29/09/2022 10:00 | 5,12 | 23/09/2022 13:00 |
| Đại Ngãi | 12 | 32,37 | 19,19 | 110,45 | 26/09/2022 10:00 | 1,96 | 29/09/2022 07:00 |
| Chợ Lách | 12 | 23,08 | 19,50 | 61,61 | 29/09/2022 13:00 | 1,60 | 29/09/2022 07:00 |
| Tân Châu | 12 | 27,87 | 27,88 | 32,85 | 13/10/2022 07:00 | 20,68 | 10/10/2022 10:00 |
| Châu Đốc | 12 | 33,16 | 31,86 | 39,16 | 13/10/2022 13:00 | 27,22 | 10/10/2022 07:00 |
| Vàm Nao | 12 | 47,05 | 46,22 | 66,23 | 10/10/2022 16:00 | 31,24 | 13/10/2022 07:00 |

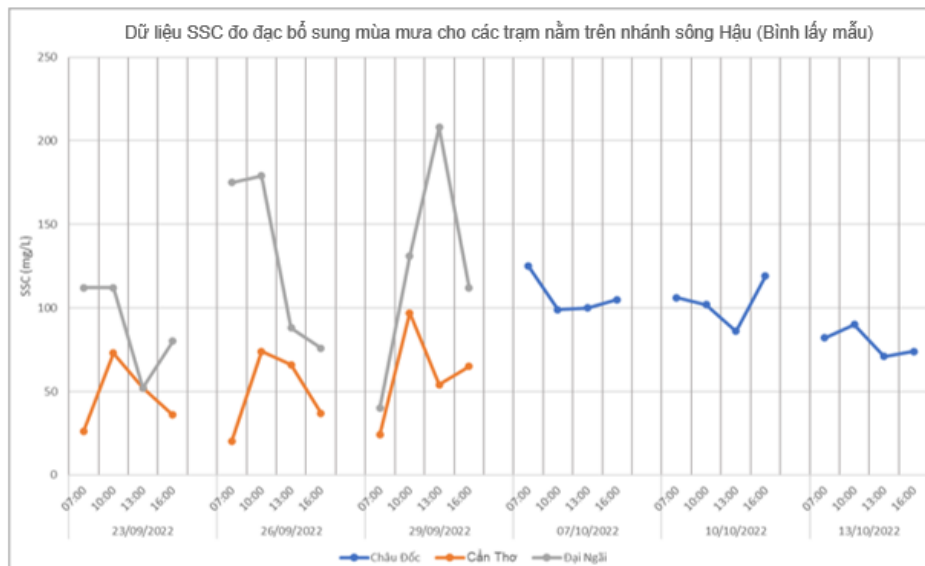
Bảng 2-9: Nồng độ trầm tích lơ lửng (bình lấy mẫu) tại 4 trạm Cat-2 và 5 trạm Cat-1 trong mùa mưa.

| Trạm | Số lượng quan trắc | Trung bình | Trung vị | Lớn nhất | | Nhỏ nhất | |
|----------|--------------------|------------|----------|---------------|-----------------|---------------|------------------|
| | | | | Giá trị (mg/) | Thời gian | Giá trị (mg/) | Thời gian |
| Cần Thơ | 12 | 52,00 | 53 | 97 | 29/9/2022 10:00 | 20 | 26/9/2022 7:00 |
| Mỹ Thuận | 12 | 109,25 | 105,5 | 165 | 26/9/2022 13:00 | 78 | 29/9/2022 7:00 |
| Mỹ Tho | 12 | 189,33 | 170 | 308 | 29/9/2022 10:00 | 86 | 23/9/2022 13:00 |
| Bình Đại | 12 | 217,42 | 196 | 475 | 29/9/2022 10:00 | 63 | 26/9/2022 16:00 |
| Đại Ngãi | 12 | 113,75 | 112 | 208 | 29/9/2022 13:00 | 40 | 29/9/2022 7:00 |
| Chợ Lách | 12 | 130,17 | 109 | 233 | 29/9/2022 13:00 | 60 | 26/9/2022 16:00 |
| Tân Châu | 12 | 166,75 | 154,5 | 271 | 7/10/2022 7:00 | 120 | 13/10/2022 7:00 |
| Châu Đốc | 12 | 96,58 | 99,5 | 125 | 7/10/2022 7:00 | 71 | 13/10/2022 13:00 |
| Vàm Nao | 12 | 130,58 | 123 | 169 | 7/10/2022 10:00 | 85 | 13/10/2022 10:00 |



Hình 2-23: Số liệu SSC mùa mưa tại các trạm trên sông Tiền với hai kỹ thuật đo khác nhau



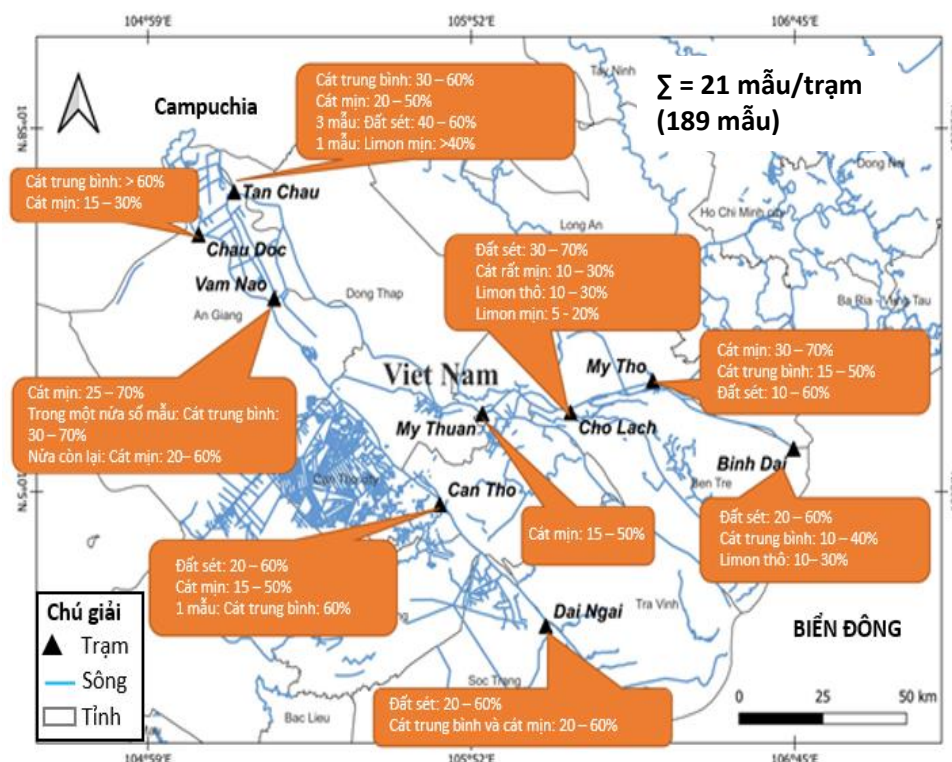


Hình 2-24: Số liệu SSC mùa khô tại các trạm trên sông Hậu với hai kỹ thuật đo khác nhau.

2.2.4 Mẫu trầm tích đáy sông

2.2.4.1 Mùa khô

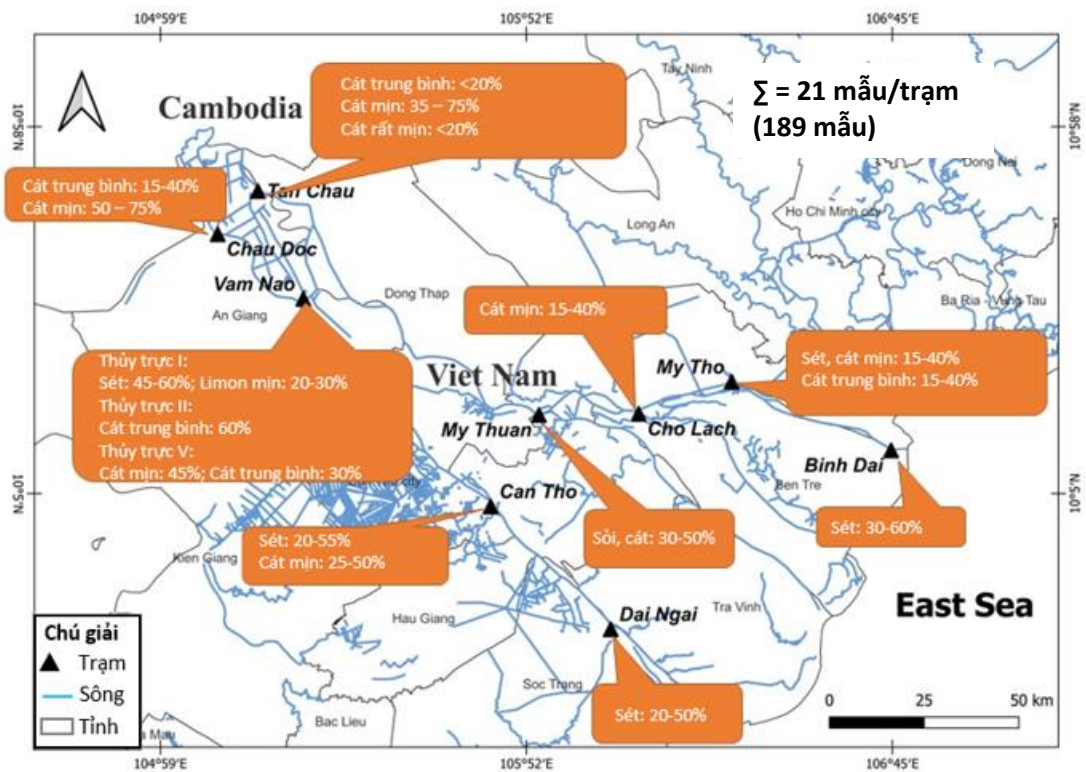
Mẫu trầm tích đáy sông khác nhau giữa các trạm, với các trạm thượng nguồn có thành phần hạt lớn hơn, cát mịn và trung bình. Càng về phía Biển Đông, các mẫu tại các trạm đều có thành phần sét chiếm ưu thế rõ rệt (xem thêm Phụ lục A-1 để biết thêm chi tiết).



Hình 2-25: Tổng hợp kết quả lấy mẫu trầm tích đáy sông mùa khô.

2.2.4.2 Mùa mưa

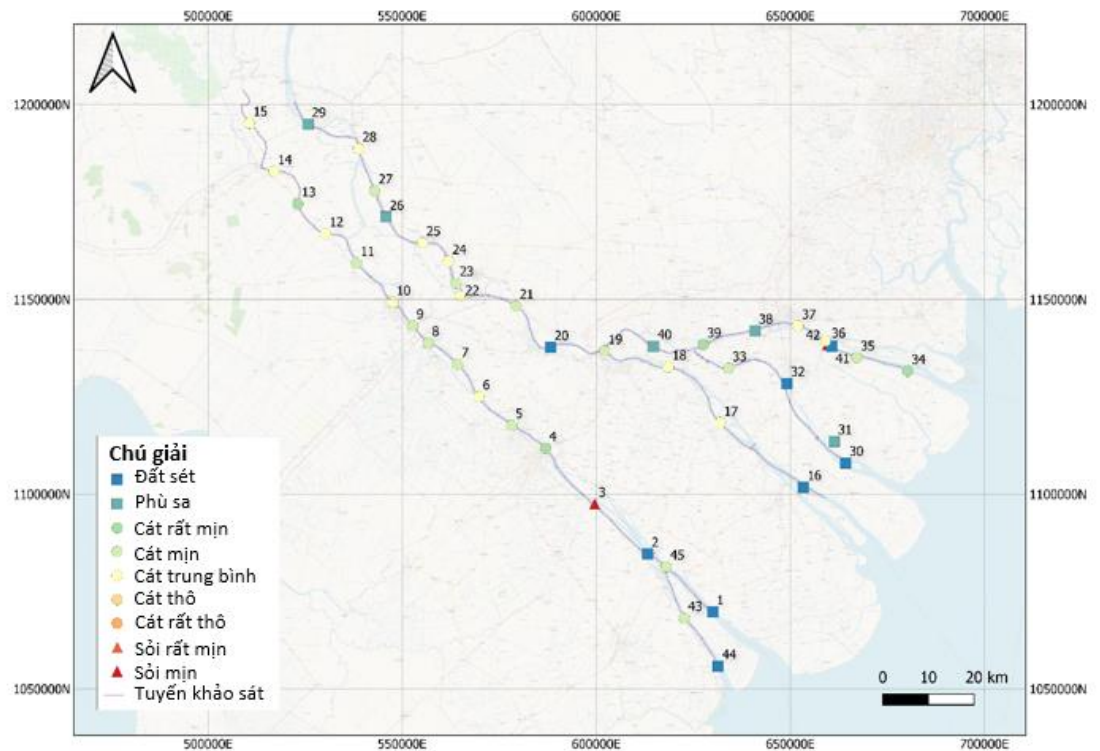
Ở các trạm thượng nguồn và trung lưu mẫu chứa chủ yếu là cát mịn (0,25 – 0,125mm). Ở các trạm hạ nguồn, thành phần mẫu chứa nhiều Sét hơn (<0,002mm). Tại trạm Vàm Nao có đất sét ở thủy trực số I (xem thêm Phụ lục A-2 để biết thêm chi tiết).



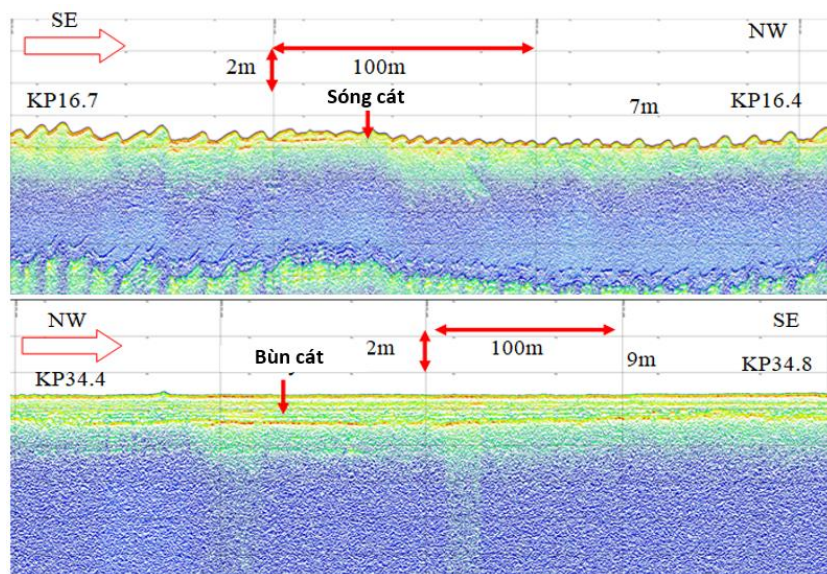
Hình 2-26: Tổng hợp kết quả lấy mẫu trầm tích đáy sông mùa mưa.

2.2.5 Thu thập dữ liệu địa chấn tầng nông (SBP)

Nhìn chung, xấp xỉ 550 km dữ liệu đo đạc địa chấn tầng nông (SBP) đã được thu thập dọc theo tất cả các nhánh sông chính của ĐBSCL từ biên giới Campuchia đến cửa sông gần biển. Dữ liệu thu thập được có chất lượng tốt, không bị mất mát, gián đoạn hay hỏng hóc. Ngoài ra, chúng tôi đã thu thập 44 mẫu lòng sông cho thấy sự phân bố trầm tích lớn hơn ở thượng nguồn và mịn hơn ở hạ nguồn. Càng về phía hạ nguồn các luồng trầm tích hạt mịn chuyển dần sang chủ yếu là bùn, phù sa và cát bùn. Hình 2-27 cho thấy tổng quan về các mẫu trầm tích được thu thập cùng với chiến dịch SBP và Hình 2-28 cung cấp các ví dụ về tín hiệu địa chấn được thu thập, nơi có thể phân biệt các khu vực cát và bùn do sóng cát so với các khu vực lòng sông có bùn bằng phẳng.



Hình 2-27: Kết quả lấy mẫu đáy sông từ đợt khảo sát SBP



Hình 2-28: Ví dụ mặt cắt địa chấn tầng nông phía thượng nguồn (trên: Châu Đốc, dưới: Mỹ Tho)

2.2.6 Tóm tắt khảo sát đo sâu hồi âm đa tia (MBES)

Khảo sát MBES nhằm phục vụ ước tính vận chuyển tải lượng đáy tại các địa điểm khác nhau trên khắp vùng đồng bằng. Phương pháp này dựa vào việc theo dõi từng đụn cát trong một khu vực đụn cát trong hai đợt khảo sát MBES liên tiếp (cách nhau khoảng 12-15 ngày) trong chu kỳ thủy triều vào triều cao và triều thấp để tính toán được vận chuyển tải lượng đáy. Sự di chuyển của đụn cát chủ yếu được thúc đẩy bởi sự vận chuyển tải lượng đáy và do đó tốc độ di chuyển của đụn cát có thể được chuyển thành tỷ lệ vận chuyển tải lượng đáy. Khi chiều dài đụn cát nhỏ hơn 15-20m (phụ thuộc rất nhiều vào dữ liệu thực tế), việc xác định các đụn cát riêng lẻ trong hai đợt khảo sát khác nhau trở nên rất khó hoặc không thể tin cậy được vì các đụn cát nhỏ hoặc gợn sóng cát có xu hướng bị biến dạng vượt quá khả năng tính toán. Do đó, khi đề cập đến các đụn cát nhỏ trong báo cáo này, chúng tôi đề cập đến các khu vực có chiều dài sóng cát trên đáy sông quá ngắn để có thể sử dụng để theo dõi đụn cát và ước

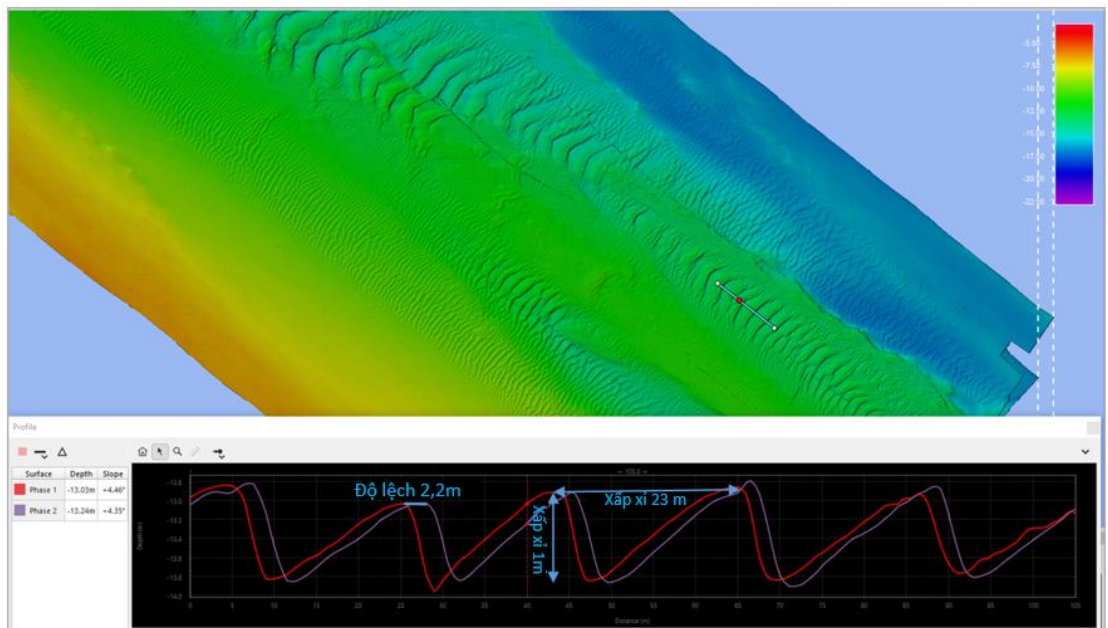
tính vận chuyển tải lượng đáy. Khi chúng ta đề cập đến gợn sóng cát, chúng ta đề cập đến sóng cát quá nhỏ để ước tính bước sóng của chúng. Các phần sau đây tóm tắt chất lượng số liệu thu thập được trong quá trình khảo sát MBES trong mùa mưa và mùa khô.

2.2.6.1 Mùa khô

Trong mùa khô, khảo sát MBES được thực hiện tại 4 địa điểm: Mỹ Thuận, Cần Thơ, Tân Châu, Châu Đốc. Các đụn cát có chiều dài đáng kể (khoảng 15-20m hoặc dài hơn) được tìm thấy ở Cần Thơ, Tân Châu và Châu Đốc trong khi ở Mỹ Thuận, kích thước đụn cát quá nhỏ và không phù hợp để ước tính tải lượng đáy. Bảng 2-10 tóm tắt các đụn cát được quan trắc và Hình 2-29 cho thấy ví dụ về các đụn cát được khảo sát ở thượng nguồn thành phố Cần Thơ dọc theo sông Hậu.

Bảng 2-10: Tổng quan kết quả đo MBES trong mùa khô

| Vị trí | Chiều cao đụn cát | Chiều dài đụn cát | Ghi chú |
|----------|-------------------|-------------------|-------------|
| Mỹ Thuận | - | 3 – 7 m | Đụn cát nhỏ |
| Cần Thơ | 1,0 - 1,2 m | 23 - 31 m | |
| Tân Châu | 1,0 - 3,5 m | 50 - 100 m | |
| Châu Đốc | 0,6 -1,2 m | 14 - 30 m | |



Hình 2-29: Ví dụ về đụn cát gần Cần Thơ và di chuyển giữa 2 đợt đo đạc MBES

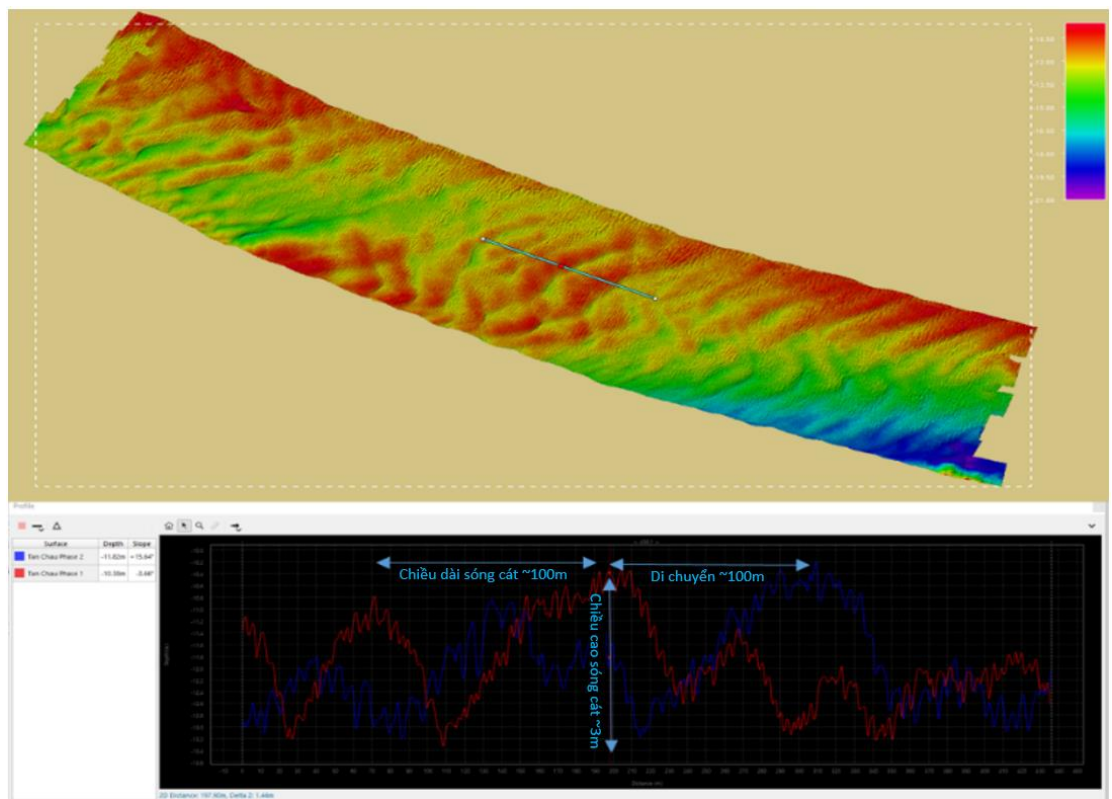
2.2.6.2 Mùa mưa

Trong mùa mưa, khảo sát MBES được thực hiện tại 12 địa điểm. Các đụn cát được tìm thấy ở 7 địa điểm trong số đó. Ở những địa điểm khác, sóng cát quá nhỏ (ví dụ: gợn sóng cát) không phù hợp để ước tính sự vận chuyển cát hoặc chúng tôi chỉ quan sát thấy lòng sông toàn bùn mà không có đụn cát.

Bảng 2-11 tóm tắt các đụn cát được khảo sát và Hình 2-30 cho thấy ví dụ về các đụn cát được khảo sát gần Tân Châu dọc theo sông Tiền.

Bảng 2-11: Tổng quan kết quả đo MBES trong mùa mưa

| Vị trí | Chiều cao đụn cát | Chiều dài đụn cát | Ghi chú |
|------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Đại Ngãi | 0,1 - 0,5 m | 4 - 10 m | Đụn cát nhỏ |
| Long Xuyên | 1,0 - 2,5 m | 30 - 70 m | |
| Cần Thơ | 0,5 - 1,5 m | 10 - 70 m | |
| Vàm Nao | 0,3 - 2 m | 25 - 80 m | |
| Châu Đốc | 0,3 - 2 m | 10 - 50 m | |
| Tân Châu | 1,0 - 2,3 m | 50 - 100 m | |
| Cao Lãnh | 1,0 - 3,6 m | 15 - 22 m | |
| Mỹ Thuận | 0,1 - 0,5 m | - | Gợn sóng cát |
| Chợ Lách 2 | 0,3 - 1,0 m | 40 - 50 m | |
| Chợ Lách 1 | 0,1 - 0,5 m | - | Gợn sóng cát |
| Bình Đại | 0,1 - 0,5 m | - | Gợn sóng cát |
| Mỹ Tho | 0,1 - 0,5 m | - | Gợn sóng cát |



Hình 2-30: Ví dụ về đụn cát gần Tân Châu và di chuyển giữa 2 đợt đo đạc MBES.

2.3 Thu thập dữ liệu thứ cấp

Ngoài các quan trắc tại thực địa, chúng tôi cũng thu thập dữ liệu thứ cấp từ nhiều nguồn khác nhau để a) hiệu chỉnh và kiểm định mô hình số, b) cải thiện giải đoán kết quả định đo đạc địa chấn tầng nông và c) để hiểu rõ hơn về khối lượng khai thác cát. Phần này tóm tắt những dữ liệu khi chúng được sử dụng để giải đoán dữ liệu tiếp theo.

Dữ liệu nước và trầm tích từ MRC

Dữ liệu thu được từ Ủy hội sông Mekong (MRC) bao gồm:

- Tại Tân Châu và Châu Đốc
 - Mặt cắt ngang sông được khảo sát năm 2018 (Vasilopoulos và cộng sự, 2021a).
 - Mức nước và lưu lượng theo giờ từ tháng 4 đến tháng 12 năm 2019.
 - Nồng độ trầm tích lơ lửng (SSC) theo ngày từ tháng 4 đến tháng 12 năm 2019.
 - Phân tích kích thước hạt trên các mẫu trầm tích hai tháng một lần.
- Tại Kratie, Chaktomuk, Prek Dam:
 - Đo mức nước hàng ngày.
 - Đo lưu lượng từ 3 đến 4 tháng.
 - Đo SSC ba đến bốn tháng trong khoảng thời gian từ tháng 6 đến tháng 12.
 - Phân tích kích thước hạt hai tháng một lần của các mẫu trầm tích lơ lửng (Kratie và Prek).
 - Phân tích kích thước hạt hai tháng một lần của các mẫu trầm tích đáy (Kratie).

Dữ liệu lỗ khoan địa chất

Tổng cộng có 193 dữ liệu lỗ khoan được thu thập từ Sở TN&MT của ba tỉnh Hậu Giang, Trà Vinh và Vĩnh Long. Các tỉnh khác không thể chia sẻ dữ liệu này nếu không có công văn của Bộ. Dữ liệu được sử dụng để giải đoán SBP (xem thêm chương 3). Các tỉnh khác không thể chia sẻ dữ liệu này nếu không có công văn chính thức từ Bộ.

3 Phân tích dữ liệu (WP1)

3.1 Vận chuyển tải lượng đáy

3.1.1 Giới thiệu

Bằng cách theo dõi các dạng đáy di chuyển trong các cuộc khảo sát đo độ sâu liên tiếp, có thể xác định được một đại diện cho việc vận chuyển trầm tích đáy. Dạng đáy là các đặc điểm địa hình tại mặt phân cách của dòng chảy chuyển động và vật chất di động, với kích thước từ cỡ sóng cỡ cm đến sóng cát có chiều dài trên 1 km (Ashley, 1990). Những đặc điểm này phát triển chủ yếu trên các lớp cát do chuyển động của các hạt cát và do đó phù hợp để đánh giá sự vận chuyển của cát hơn là phù sa và đất sét. Kích thước và hình dạng của các dạng đáy phụ thuộc vào độ sâu của nước, cường độ và hướng dòng chảy cũng như kích thước hạt (Ashley, 1990). Khi chúng di chuyển, các dạng đáy di chuyển một lượng lớn trầm tích như là tác nhân vận chuyển vật liệu đáy (Bernard và Stéphane, 2011). Sự hình thành đụn cát thường liên quan đến sự vận chuyển “tải lượng đáy”, tức là chuyển động của các hạt bằng cách lăn và nhảy gần đáy và phản ứng trực tiếp với các biến đổi không gian của ứng suất cắt đáy. Về mặt hình thức, sự nhiễu loạn (tăng đột ngột của vật chất) do đụn cát tạo ra cũng sẽ khiến vật liệu nền được vận chuyển tạm thời ở trạng thái 'lơ lửng'. Nhưng ở quy mô chiều dài của đụn cát, vẫn có thể coi việc vận chuyển cát tổng thể là “tải lượng đáy”, vì các hạt cát lơ lửng lắng xuống nhanh chóng trên quy mô chiều dài này. Một phương pháp phổ biến và đáng tin cậy để tìm ra sự vận chuyển tải lượng đáy từ những thay đổi về cao độ của đáy sông là áp dụng phương trình Exner hai chiều (Simons và cộng sự, 1965) cho chuỗi thời gian của biên dạng độ cao của đáy sông thu được bằng máy đo sâu hồi âm (Leary và Buscombe, 2020). Phương pháp này giả định mặt cắt đáy ở trạng thái cân bằng với các điều kiện dòng chảy hiện hành. Giả định này không phải lúc nào cũng đúng đối với các con sông tự nhiên vốn có sự biến đổi về trầm tích và điều kiện lưu lượng trong suốt thời gian quan trắc dấu vết đụn cát. Tuy nhiên, phương pháp theo dõi đụn cát là một trong những kỹ thuật dự đoán tải lượng đáy chính xác nhất (Leary và Buscombe, 2020).

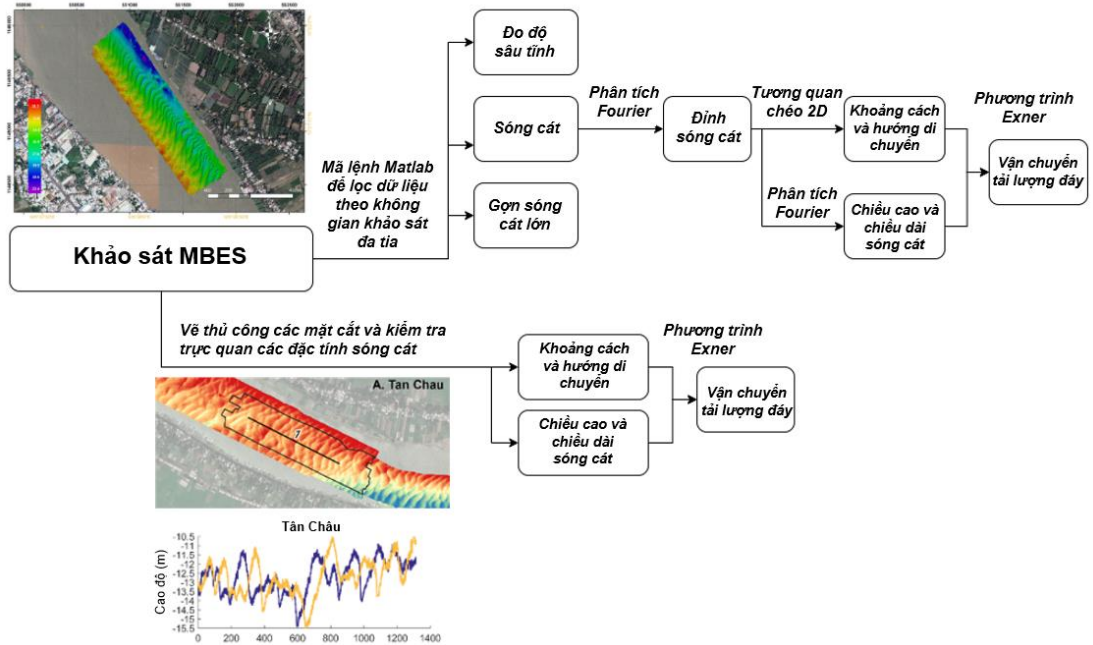
3.1.2 Cách tiếp cận

Các quá trình động lực đáy sông được phân tích theo ba bước. Đầu tiên, các khu vực nghiên cứu được xác định từ kết quả khảo sát đo sâu hồi âm đa tia và được kiểm tra trực quan để nắm được các đặc điểm chính của dạng đáy. Các mặt cắt qua các khu vực sóng cát được vẽ tay cung cấp thông tin về khoảng cách và hướng di chuyển, đồng thời dùng để kiểm tra việc phát hiện hiện và phân tích tự động các đặc điểm của sóng cát. Sơ đồ của phương pháp này được mô tả trong Hình 3-1.

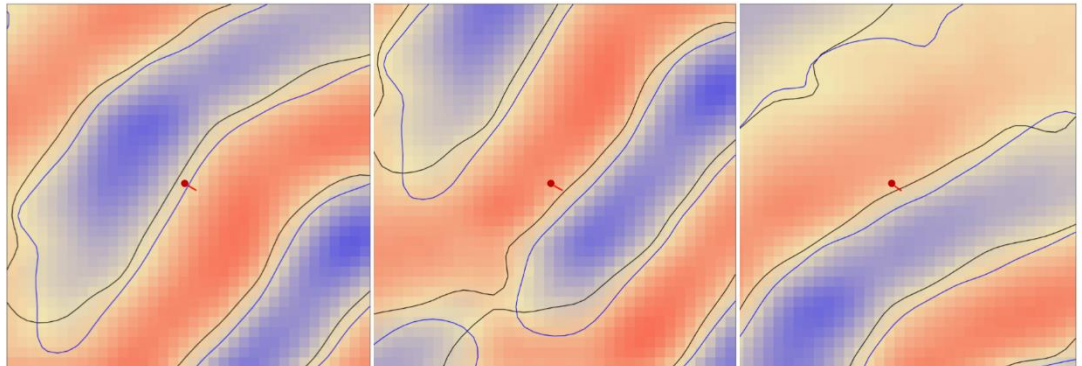
Đối với mỗi trạm khảo sát, dữ liệu MBES được kiểm tra để xác định các khu vực có **đụn cát chồng lẫn nhau**. Sau đó, **một bộ lọc thô theo không gian** được áp dụng trong đo độ sâu để hiển thị các dạng đáy sông di động. Bước lọc thiết yếu này bao gồm một quy trình lặp thay đổi kích thước và định hướng của bộ lọc để trích xuất các dạng đáy sông được quan tâm dao động quanh giá trị trung bình bằng 0. Quá trình lọc tạo ra các bản đồ địa hình tĩnh (đáy không di động), trường sóng cát (các đụn cát có khoảng cách xấp xỉ 10 – 50m) và có thể là trường gợn sóng cát lớn (khoảng cách quy mô mét) dựa trên khảo sát đo sâu hồi âm đa tia.

Các đỉnh sóng cát (các vị trí mặt cắt) cần được làm rõ để xác định các đặc trưng của sóng cát, tốc độ và hướng biến động. Đầu tiên, lưới sóng cát được xoay sao cho hướng của sóng cát thẳng hàng với các cột của lưới. Các điểm mặt cắt được trích xuất bởi phép biến đổi Fourier tại các cột của lưới sóng cát. Các đỉnh và đáy sóng cát được tự động phát hiện và lọc để loại bỏ các điểm bất thường. Điểm đỉnh sóng được sử dụng làm điểm mặt cắt. Nếu cần thiết, các điểm mặt cắt có thể được thêm hoặc xóa thủ công. Lưu ý rằng, phương pháp biến đổi Fourier này một lưới xoay yêu cầu hướng di chuyển được xác định trước. Hướng di chuyển được xác định trước này chỉ được sử dụng để xác định các điểm mặt cắt ban đầu. Phương pháp tương quan 2 chiều cho phép biến đổi tự do các đỉnh sóng theo nhiều hướng.

Khoảng cách và hướng di chuyển của sóng cát được xác định bằng phân tích tương quan chéo hai chiều. Phân tích tương quan chéo 2 chiều (2D) là một kỹ thuật toán học được sử dụng để nghiên cứu những thay đổi trong tín hiệu đo được. Trong trường hợp này, kỹ thuật được sử dụng để xác định mức độ tương đồng giữa các trường sóng cát tại các thời điểm khác nhau (xem Hình 3-2). Kết quả phân tích là khoảng cách và hướng di chuyển, từ đó có thể suy ra tốc độ di chuyển bằng cách đưa vào thời gian đo đạc. Khoảng cách di chuyển thu được từ phân tích tương quan 2 chiều (2D) được so sánh với khoảng cách di chuyển được xác định trực quan (xem Bảng 3-3) để kiểm định.

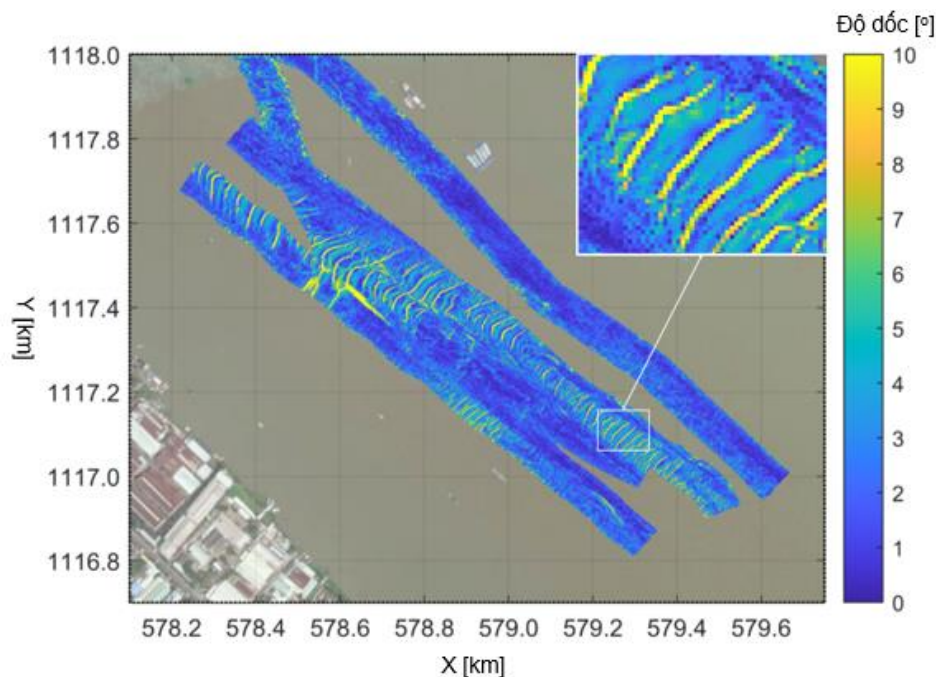


Hình 3-1: Sơ đồ về cách thức tính toán vận chuyển tải lượng đáy từ kết quả khảo sát đo sâu hồi âm đa tia.



Hình 3-2: Một ví dụ về phân tích tương quan chéo, mô tả sóng cát (địa hình mô tả bằng màu), đường đồng mức của các sóng cát trong khảo sát lần thứ nhất (đường màu đen) và lần thứ hai (đường màu xanh) cũng như khoảng cách và hướng di chuyển quan trắc được cho một điểm mặt cắt (đường màu đỏ). Các điểm ví dụ được trích xuất từ phân tích tương quan chéo 2 chiều cho Cần Thơ.

Chỉ thị đại diện thứ hai của hướng dịch chuyển sóng cát, và do đó hướng vận chuyển bùn cát ròng là sự bất đối xứng dạng đáy sông (Barnard và cộng sự, 2013). Đối với từng vị trí mặt cắt và cho từng bộ dữ liệu địa hình, hướng di chuyển được xác định từ sự bất đối xứng của dạng đáy bằng cách phân tích độ dốc của sóng cát. Đối với mỗi điểm mặt cắt, độ dốc của sóng cát (xem Hình 3-3) trong bán kính ~100m được sắp xếp theo thứ tự tăng dần. Hướng mặt cắt sau đó được xác định là hướng dốc chính cho độ dốc lớn nhất 8%.



Hình 3-3: Độ dốc trường sóng cát, thể hiện độ dốc của trường sóng cát Cần Thơ trong đợt khảo sát mùa khô.

Các đặc điểm sóng cát được trích xuất cho từng điểm mặt cắt. Các hướng di chuyển thu được từ kết quả phân tích tương quan chéo 2 chiều được sử dụng để vẽ các đường mặt cắt mới qua các điểm mặt cắt ban đầu. Các vị trí đỉnh và rãnh cát được xác định bằng cách sử dụng phép biến đổi Fourier. Để phân tích các đặc điểm của sóng cát, đỉnh đầu tiên điểm mặt cắt ban đầu theo hướng di chuyển được chọn. Độ dài sóng cát khi đó được định nghĩa là khoảng cách giữa hai rãnh cát liền kề. Độ cao sóng cát được định nghĩa là hiệu số giữa độ sâu trung bình của rãnh cát so với độ cao đỉnh sóng cát.

Vận chuyển bùn cát đáy có thể được ước tính từ tốc độ di chuyển tính toán và đặc điểm sóng cát, sử dụng phương trình Exner. Phương trình Exner cho vận chuyển tải lượng bùn cát đáy q_b (m^2/s) giả định các đụn cát hình tam giác và yêu cầu chiều cao đụn cát trung bình H_D và tốc độ vận chuyển trung bình (tốc độ di chuyển) V_c làm đầu vào:

$$q_b = (1 - p)V_c \frac{H_D}{2} - q_0$$

trong đó p là độ xấp xỉ của cát và q_0 là hằng số tích phân (đặt bằng 0, xem Leary và Buscombe, 2020).

Tải lượng bùn cát đáy ước tính thu được theo phương trình trên được tính trên đơn vị mét chiều rộng sông ($m^3/s/m$). Để so sánh các ước tính này với các vận chuyển tải lượng bùn cát đáy được mô phỏng trong Delft3D-FM, chúng được chuyển đổi thành **tổng vận chuyển tải lượng bùn cát đáy (m^3/s)** cho một mặt cắt ngang sông nhất định bằng cách nhân với chiều rộng hiệu dụng của sông (một phần của dòng sông mang phần lớn dòng chảy và do đó mang bùn cát). Chiều rộng hiệu quả được xác định bằng cách kiểm tra các mặt cắt sông đo được để xác định tiết diện dòng chảy. Giới hạn dưới của chiều rộng hiệu quả là chiều rộng của trường sóng cát và giới hạn trên là toàn bộ chiều rộng của dòng sông.

Các tính toán tải lượng bùn cát đáy được so sánh với **ước tính vận chuyển bùn cát đáy từ các tài liệu / nghiên cứu sẵn có cho mục đích kiểm định**. Các dữ liệu về tải lượng bùn cát đáy tại ĐBSCL không nhiều. Hầu hết các ước tính tải lượng bùn cát đáy gần đây được nghiên cứu bởi Jordan và cộng sự (2019) và Stephens và cộng sự (2017) (xem Bảng 3-1).

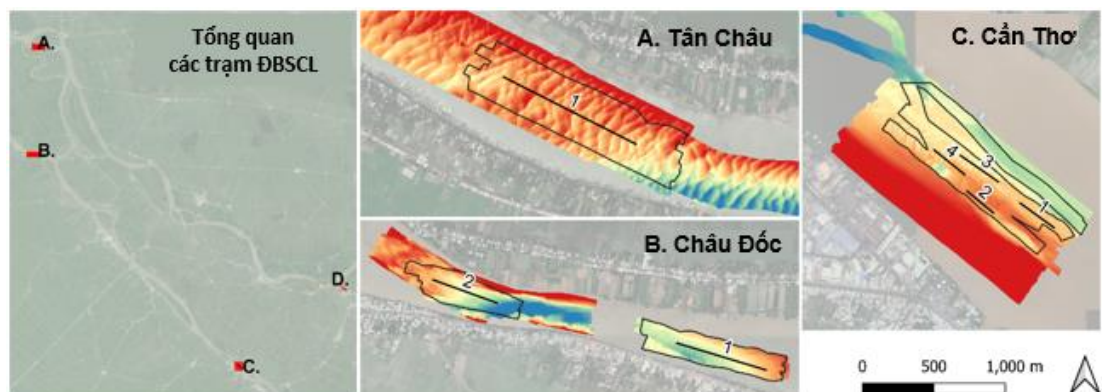
Bảng 3-1: Tổng quan ước tính tải lượng đáy cho ĐBSCL. Lưu ý rằng tổng tải lượng đáy (Jordan và cộng sự, 2019) được chuyển đổi thành $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ và tải lượng đáy trên một đơn vị chiều rộng sông (Stephens và cộng sự, 2017) thành $10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, theo các đơn vị trong các phần sau.

| | Phương pháp | Mùa | Thời gian | Vị trí | Vận chuyển tải lượng đáy | Vận chuyển tải lượng đáy được chuyển đổi |
|------------------------------|---|---------|-------------------|----------|--|--|
| Jordan và ccs, 2019 | Ước tính vận chuyển tải lượng đáy (Nittrouer và cộng sự, 2008) dựa vào khảo sát hồi âm đa tia | Mùa khô | 3/5 - 18/5/2018 | Mỹ Thuận | 0.42 kg/s | $21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| | | Mùa mưa | 2/10 - 10/10/2018 | Mỹ Thuận | 2.81 kg/s | $141 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Stephens và ccs, 2017 | Ước tính vận chuyển tải lượng đáy (Nittrouer và cộng sự, 2008) dựa vào khảo sát hồi âm đa tia | Mùa mưa | 22/9 - 4/10/2014 | Cần Thơ | 0.023 kg/s/m | $1150 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ |
| | | | | Đại Ngãi | 0.028 kg/s/m trong điều kiện dòng chảy hạ nguồn 0.072 kg/s/m trong điều kiện dòng chảy thượng nguồn | $1400 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ $3600 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ |
| | | | | Cầu Quan | 0.19 kg/s/m | $9000 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ |

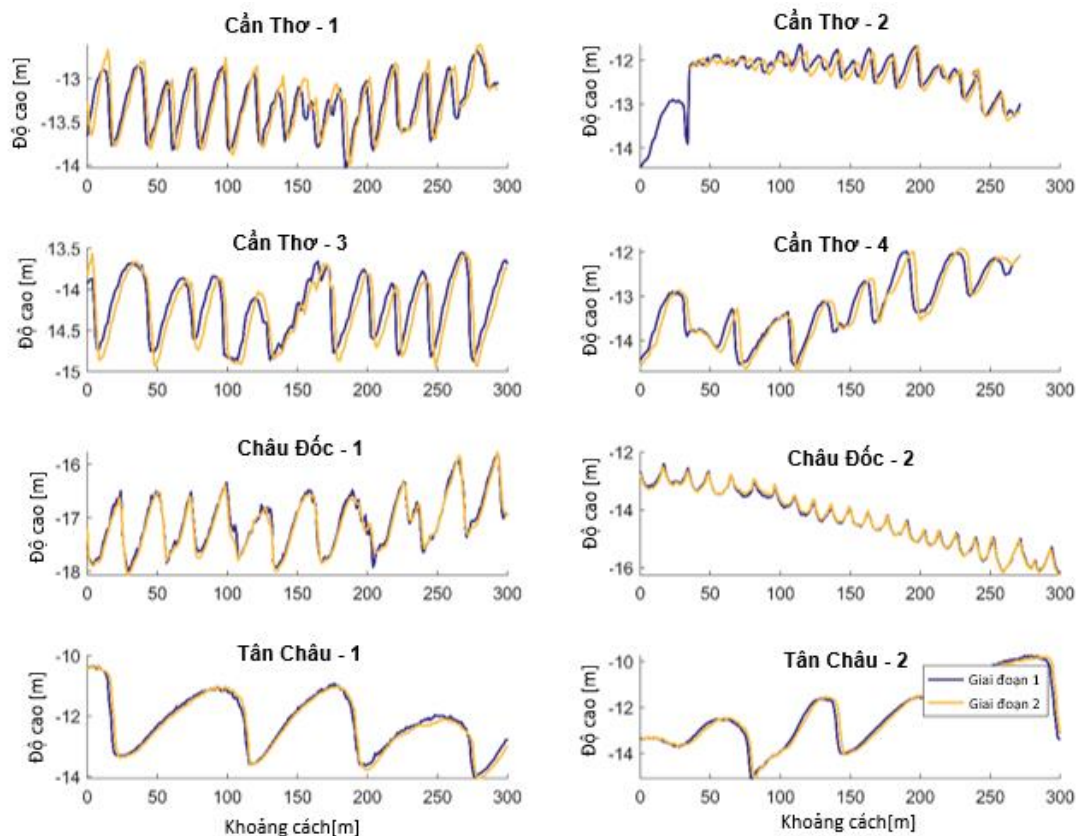
3.1.3 Mô tả đặc điểm sóng cát bằng phương pháp kiểm tra trực quan

3.1.3.1 Mùa khô

Trong mùa khô, số liệu MBES được thu thập tại 4 trạm quan trắc; Cần Thơ, Tân Châu, Châu Đốc, Mỹ Thuận. Hình 3-4 mô tả tổng quan về dữ liệu quan trắc và phác thảo các trường sóng cát. Các mặt cắt cao độ đáy cho các mặt cắt ngang qua trường sóng cát được vẽ trong Hình 3-5, đưa ra dấu hiệu đầu tiên về đặc điểm sóng cát. Tại Cần Thơ, Tân Châu, Châu Đốc có sóng cát rõ ràng. Sóng cát dài nhất và cao nhất được tìm thấy ở Tân Châu, với khoảng cách di chuyển lớn. Tại Châu Đốc, chỉ quan trắc thấy sự di chuyển cận biên trong khoảng thời gian 18 ngày giữa hai lần đo liên tiếp. Lưu ý rằng do có sai sót trong khảo sát nên không thể tính toán được tải lượng đáy tại trạm Mỹ Thuận. Bảng 3-2 liệt kê các kết quả chính từ việc kiểm tra trực quan các kết quả MBES và tính toán bằng tay để kiểm tra kết quả tương quan 2D. Trong tính toán thủ công, bằng cách vẽ các mặt cắt ngang qua các đụn cát theo cách thủ công (ví dụ: Hình 3-4), chúng ta có thể có được dấu hiệu sớm về đặc điểm sóng cát và khoảng cách di chuyển. Điều này giúp chúng tôi xác minh việc nhận dạng sóng cát tự động và tránh sai sót khi tính toán đặc tính sóng cát.



Hình 3-4: Tổng quan về dữ liệu MBES thu được trong đợt khảo sát mùa khô. Các đa giác biểu thị dữ liệu MBES chồng chéo trong các phép đo liên tiếp để theo dõi đụn cát. Các mặt cắt được vẽ theo hướng di chuyển chủ yếu của sóng cát để xác thực việc theo dõi đụn cát tự động.



Hình 3-5: Trắc diện độ cao đáy cho các mặt cắt đi qua trường sóng cát trong đợt khảo sát mùa khô. Khoảng cách được xác định theo hướng hạ nguồn.

Bảng 3-2: Tổng quan về khu vực đo đạc gần đúng phù hợp cho phân tích theo đổi đụn cát, bước sóng, chiều cao và khoảng cách di chuyển của cát trong giai đoạn khảo sát mùa khô dựa trên **kiểm tra trực quan các phép đo sâu hồi âm đa tia**.

| Trạm | Diện tích [km ²] | Chiều dài sóng cát [m] | Chiều cao sóng cát [m] | Khoảng cách di chuyển [m] | Tốc độ di chuyển [10 ⁻⁸ m/s] | Ước lượng tải lượng đáy [10 ⁻⁸ m ³ /s/m] |
|------------|------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---|--|
| Tân Châu | 0,6 | 50-100 | 1-3 | 2-6 | 125-400 | 50-300 |
| Châu Đốc 1 | 0,2 | 15-30 | 0,5-1,5 | 1 | 70 | 10-35 |
| Châu Đốc 2 | 0,2 | 15-20 | 0,5-1 | 0 | 0 | 0 |
| Cồn Thore | 0,5 | 15 - 40 | 0,5-1,5 | 2-4 | 125-250 | 20-100 |

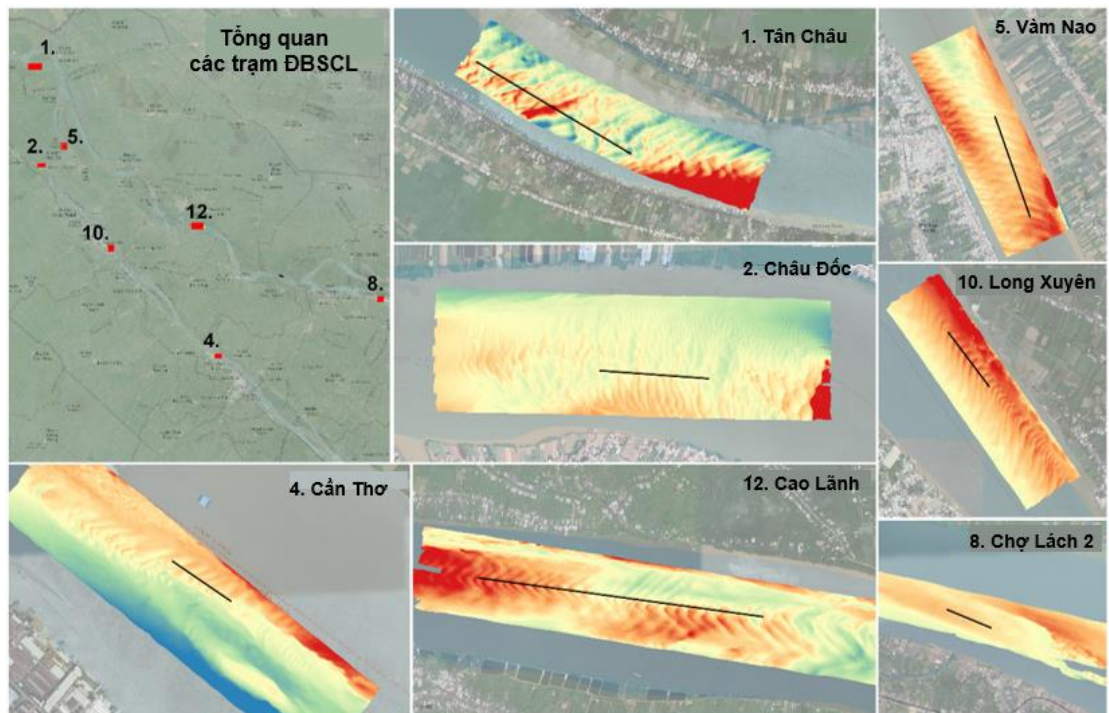
3.1.3.2 Mùa mưa

Trong mùa mưa, dữ liệu MBES được thu thập tại 12 trạm quan trắc, như được liệt kê trong Bảng 3-3. Tại 7 trạm, quan trắc được sóng cát với chiều dài sóng cát trên 20 m có thể theo dõi để ước tính tải lượng đáy.

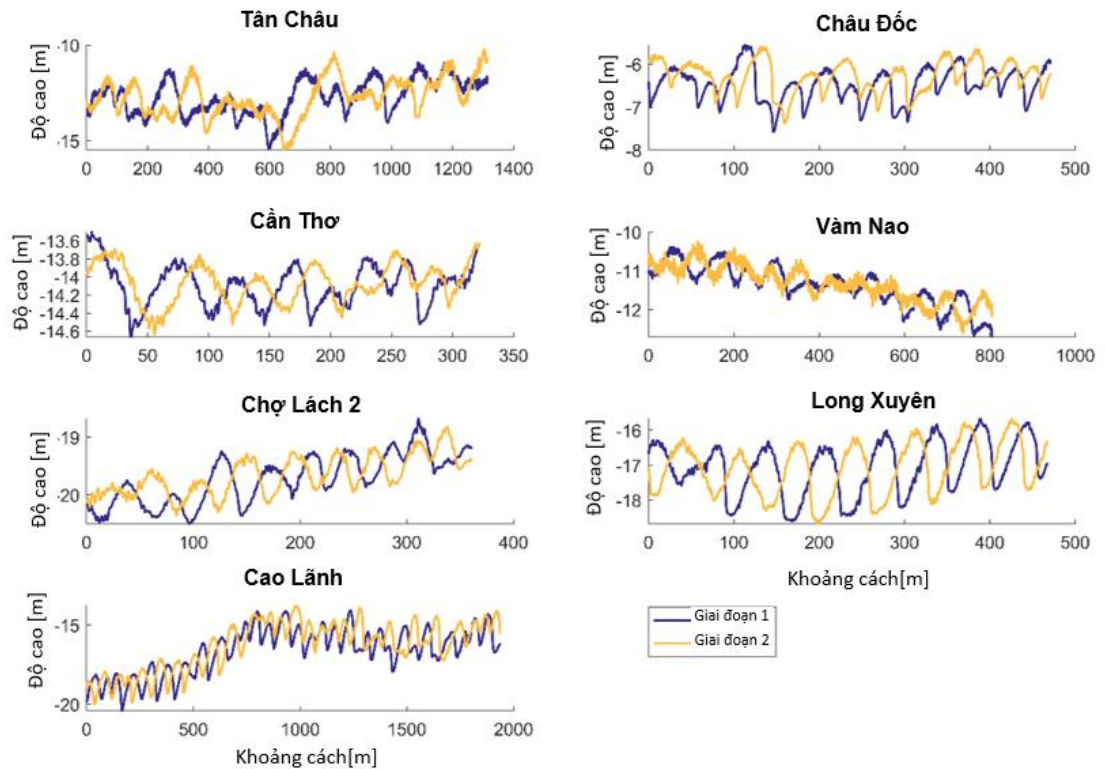
Hình 3-6 mô tả tổng quan về dữ liệu quan trắc và phác thảo các trường sóng cát. Hình 3-7 đưa ra góc nhìn tổng quan về mặt cắt độ cao đáy cho 7 trạm, những vị trí chúng tôi có thể xác định đụn cát. Bảng 3-3 liệt kê các kết quả đo đạc chính từ kiểm tra trực quan kết quả MBES và tính toán bằng tay để kiểm tra kết quả tương quan 2D (xem Bảng 3-5 và Bảng 3-6).

Bảng 3-3: Tổng quan về khu vực đo đạc gần đúng phù hợp cho phân tích theo dõi đụn cát, bước sóng, chiều cao và khoảng cách di chuyển của cát gần đúng trong giai đoạn khảo sát mùa mưa dựa trên **kiểm tra trực quan các phép đo sâu hồi âm đa tia**. Các đặc điểm sóng cát ở Mỹ Thuận được đề cập trong ngoặc vì sóng cát này chỉ được quan trắc cho một cuộc khảo sát duy nhất. Vì lý do này, chúng tôi không thể theo dõi sự di chuyển của đụn cát. Đối với Bình Đại và Đại Ngãi, đặc điểm sóng cát được đề cập trong ngoặc vì chúng có chiều cao và chiều dài quá nhỏ để phân tích theo dõi đụn cát. Đối với Chợ Lách 1, không quan trắc được mối tương quan giữa các phép đo giai đoạn 1 và 2 do khoảng cách di chuyển và sự thay đổi hình dạng sóng cát quá lớn.

| Trạm | Diện tích [km ²] | Chiều dài sóng cát [m] | Chiều cao sóng cát [m] | Khoảng cách di chuyển [m] | Tốc độ di chuyển [10 ⁻⁸ m/s] | Ước lượng tải lượng đáy [10 ⁻⁸ m ³ /s/m] |
|-----------------|------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---|--|
| 1 – Tân Châu | 1,1 | 80-120 | 1-2 | 50-100 | 5000-10000 | 2000-5000 |
| 2 – Châu Đốc | 1,0 | 20-50 | 0,5-1,5 | 15-20 | 1500-2000 | 250-1000 |
| 3 – Mỹ Thuận | | [150-300] | [1-1,5] | [40] | | |
| 4 – Cần Thơ | 0,8 | 10-70 | 0,5-1 | 15-30 | 1500-3000 | 250-1000 |
| 5 – Vàm Nao | 0,9 | 60-100 | 0,5-1,5 | 40 - 60 | 4000-6000 | 1000-2000 |
| 6 – Mỹ Tho | | - | - | - | | |
| 7 – Chợ Lách 1 | | 15-20 | 0,5-1 | - | | |
| 8 – Chợ Lách 2 | 1,1 | 20-60 | 0,5-1 | 20-30 | 2000-3000 | 500-1000 |
| 9 – Bình Đại | [0,2-0,6] | [5-10] | - | - | | |
| 10 – Long Xuyên | 0,7 | 30-80 | 1-2,5 | 30-40 | 3000-4000 | 1000-2000 |
| 11 – Đại Ngãi | [0,1-0,5] | [4-10] | - | - | | |
| 12 – Cao Lãnh | 1,8 | 50-200 | 1,5-4 | 40-60 | 4000-6000 | 3000-8000 |



Hình 3-6: Tổng quan về dữ liệu MBES thu được trong quá trình khảo sát mùa mưa tại các trạm có thể theo dõi đụn cát. Các mặt cắt được vẽ theo hướng di chuyển chủ yếu của sóng cát để xác định việc theo dõi đụn cát tự động.



Hình 3-7: Trắc diện độ cao đáy cho các mặt cắt đi qua trường sóng cát trong đợt khảo sát mùa khô (xem Hình 3-6). Khoảng cách được xác định theo hướng hạ nguồn.

3.1.4 Vận chuyển tải lượng đáy từ phân tích tương quan hai chiều (2D)

3.1.4.1 Mùa khô

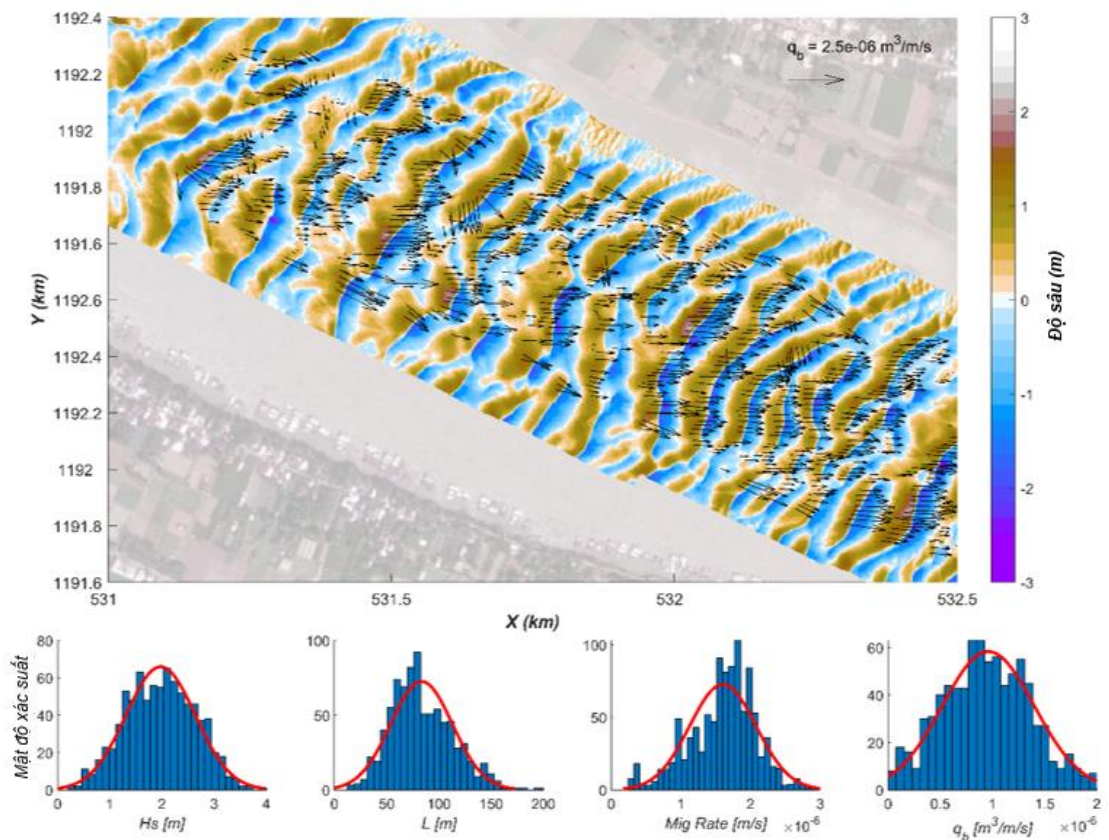
Kết quả từ phân tích tương quan 2D về các khảo sát đo sâu hồi âm đa tia liên tiếp trong mùa khô được tóm tắt trong Bảng 3-4 và được hiển thị trong Hình 3-8 đến Hình 3-11. Kết quả tương quan 2D phù hợp tốt với kết quả kiểm tra trực quan và các mặt cắt được vẽ thủ công (Bảng 3-2), mang lại độ tin cậy cao về độ chính xác của kết quả.

Chiều cao và chiều dài sóng cát lớn nhất ở Tân Châu, với chiều cao sóng cát trung bình là 2 m và chiều dài sóng cát là 83 m, trái ngược với chiều cao sóng cát trung bình 0,5-0,7 m và chiều dài sóng cát 19-27 m ở Cần Thơ và Châu Đốc (xem Bảng 3-4). Khoảng cách di chuyển trung bình ở Cần Thơ (2,7 m) và Tân Châu (2,5 m) dài hơn nhiều so với Châu Đốc. Tại Châu Đốc, sóng cát ở khu vực hạ nguồn (số 1) di chuyển 1,1 m về phía hạ nguồn, trong khi sóng cát ở khu vực thượng nguồn (số 2) ở khúc sông cong thậm chí còn di chuyển hướng một đoạn về phía thượng nguồn (0,2 m). Các đặc điểm sóng cát và khoảng cách di chuyển thu được bằng phân tích tương quan 2D và Fourier tương đối phù hợp với các đo đạc trực quan được tóm tắt trong Bảng 3-3.

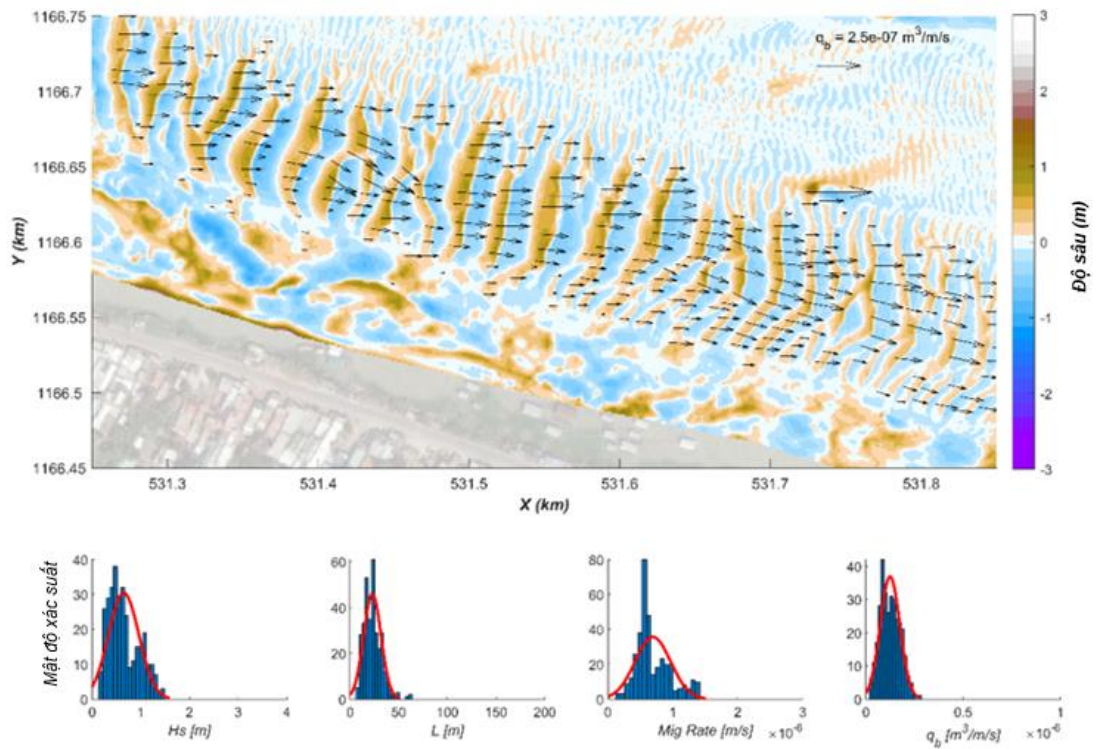
Tải lượng đáy là một hàm số của tốc độ di chuyển, chiều cao và chiều dài sóng cát. Do cả ba thành phần này đều cao nhất ở Tân Châu nên tải lượng đáy trung bình tại Tân Châu lên tới $100 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m/s}$, so với $37 \cdot 10^{-8}$, $14 \cdot 10^{-8}$, and $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m/s}$ tương ứng cho Cần Thơ, Châu Đốc 1 và Châu Đốc 2 (xem Bảng 3-4).

Bảng 3-4: Tóm tắt kết quả mùa khô tương quan 2D và phân tích Fourier; đặc điểm trường sóng cát, hướng và tốc độ di chuyển và tải lượng đáy cho Cần Thơ, Tân Châu và Châu Đốc. Cả kết quả trung bình và độ lệch chuẩn (Std) đều được đưa ra.

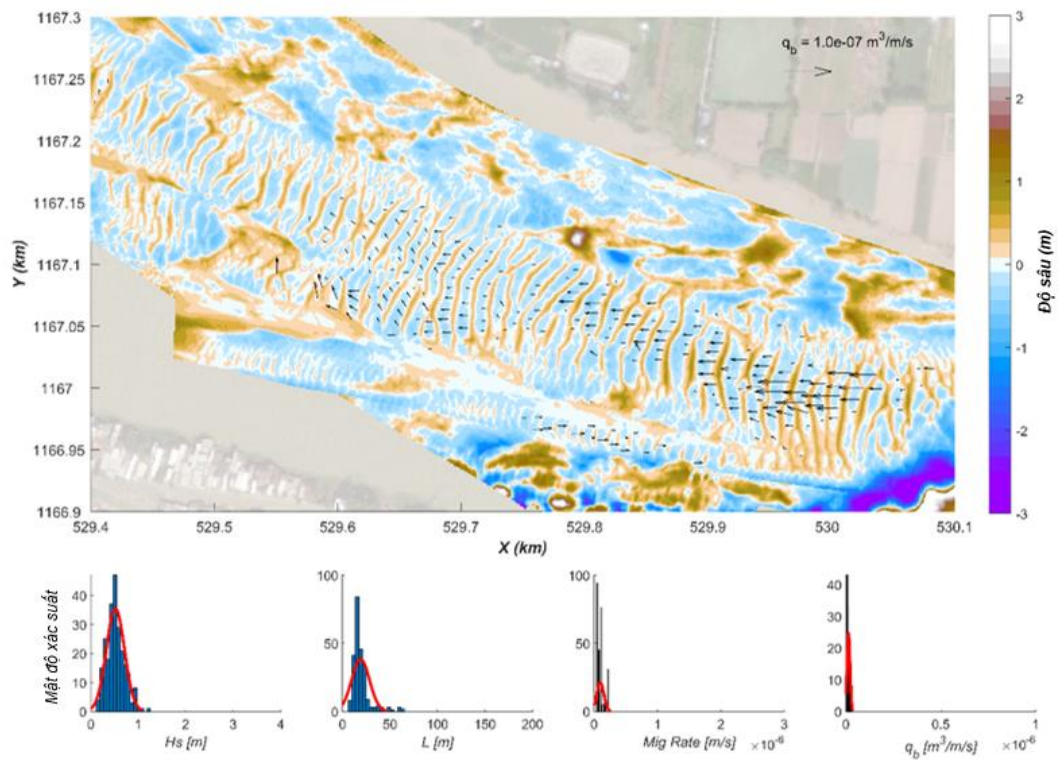
| | Trạm | | | | | | | |
|--|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
| | Tân Châu | | Châu Đốc 1 | | Châu Đốc 2 | | Cần Thơ | |
| | Trung bình | Std | Trung bình | Std | Trung bình | Std | Trung bình | Std |
| Chiều cao sóng cát [m] | 2,0 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,7 | 0,3 |
| Chiều dài sóng cát [m] | 83 | 30 | 23 | 9 | 19 | 9 | 27 | 13 |
| Hướng di chuyển [°] | 95 | 4 | 94 | 4 | 270 | 0 | 125 | 16 |
| Khoảng cách di chuyển [m] | 2,5 | 0,7 | 1,1 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 2,7 | 0,8 |
| Tốc độ di chuyển [10^{-8} m/s] | 160 | 48 | 69 | 27 | 10 | 6 | 174 | 48 |
| Tải lượng đáy [10^{-8} m ³ /m/s] | 101 | 46 | 14 | 5 | 1 | 1 | 37 | 17 |



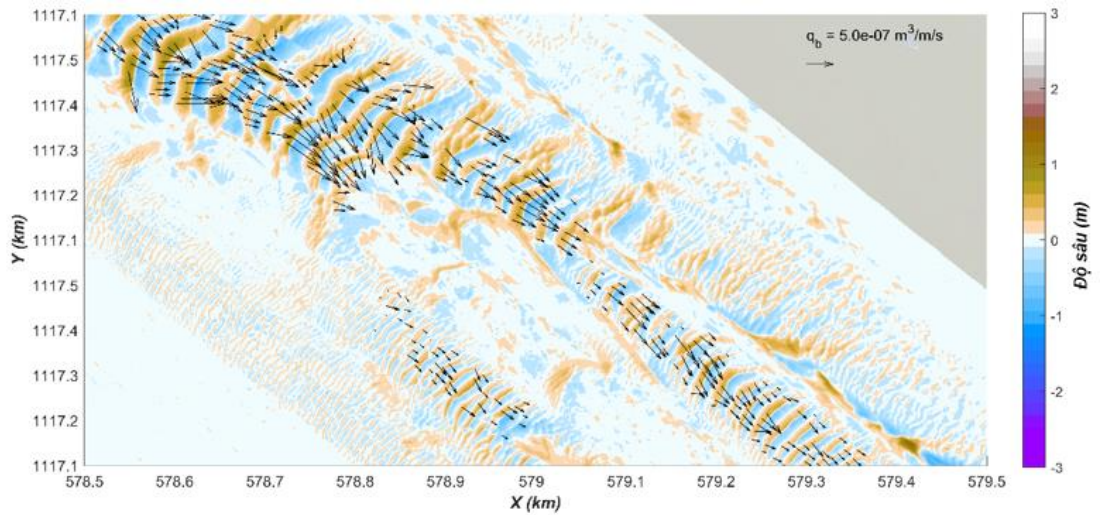
Hình 3-8: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho Tân Châu trong mùa khô. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.



Hình 3-9: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Châu Đốc**, vùng 1, trong mùa khô. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.



Hình 3-10: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Châu Đốc**, vùng 2, trong mùa khô. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.



Hình 3-11: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Cần Thơ** trong mùa khô. Bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.

3.1.4.2 Mùa mưa

Kết quả từ phân tích tương quan 2D tại các đợt khảo sát đo sâu hồi âm đa tia liên tiếp trong mùa mưa được tóm tắt trong Bảng 3-5 và Bảng 3-6 và được trình bày trong Hình 3-12 đến Hình 3-18. Kết quả phân tích tương quan 2D phù hợp với kết quả kiểm tra trực quan và các mặt cắt được vẽ thủ công (Bảng 3-2), mang lại độ tin cậy cao về độ chính xác của kết quả. Kết quả mùa mưa được trình bày dưới đây.

Bảng 3-5: Tóm tắt kết quả mùa mưa từ tương quan 2D và phân tích Fourier; đặc điểm trường sóng cát, hướng và tốc độ di chuyển và tải lượng đáy cho Tân Châu, Châu Đốc và Cần Thơ. Cả kết quả trung bình và độ lệch chuẩn (Std) đều được đưa ra.

| | Trạm | | | | | |
|--|------------|------|------------|-----|------------|-----|
| | Tân Châu | | Châu Đốc | | Cần Thơ | |
| | Trung bình | Std | Trung bình | Std | Trung bình | Std |
| Chiều cao sóng cát [m] | 1,7 | 0,4 | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 0,3 |
| Chiều dài sóng cát [m] | 110 | 31 | 42 | 18 | 49 | 22 |
| Hướng di chuyển [°] | 58 | 1 | 90 | 1 | 84 | 45 |
| Khoảng cách di chuyển [m] | 66 | 17 | 19 | 3 | 16 | 3 |
| Tốc độ di chuyển [10^{-8} m/s] | 6400 | 1700 | 1800 | 300 | 1500 | 300 |
| Tải lượng đáy [10^{-8} m³/m/s] | 3300 | 1200 | 400 | 200 | 300 | 100 |

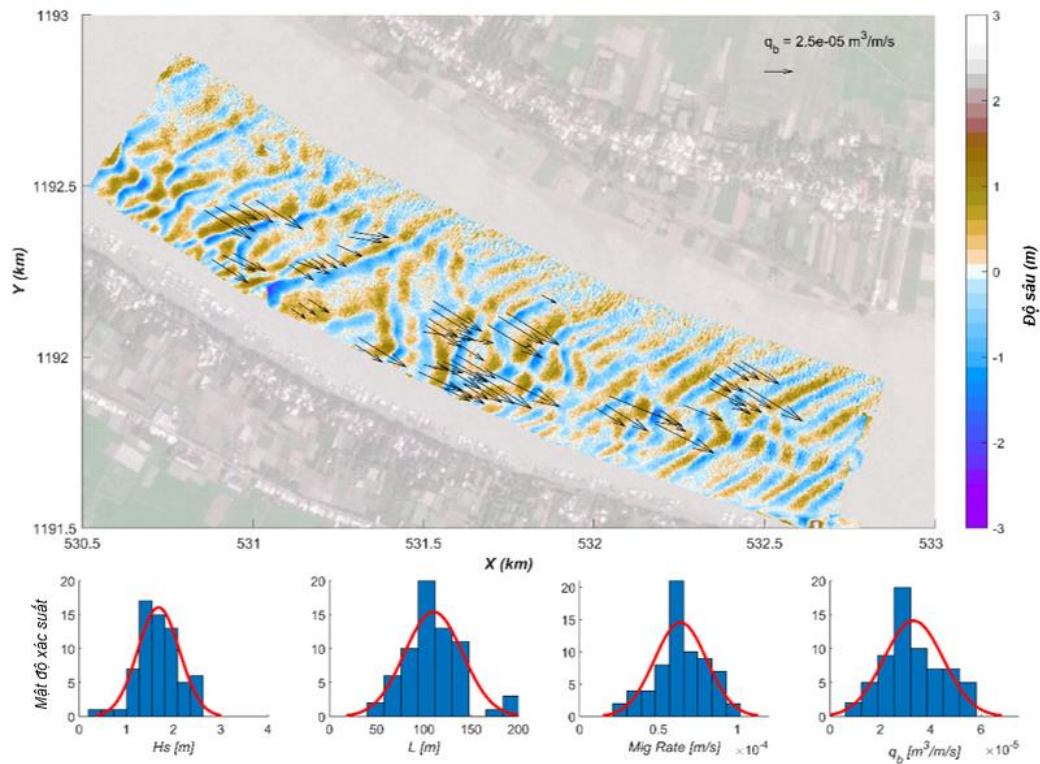
Hình 3-6: Tóm tắt kết quả mùa mưa từ tương quan 2D và phân tích Fourier; đặc điểm trường sóng cát, hướng và tốc độ di chuyển và tải lượng đáy cho Vàm Nao, Chợ Lách, Long Xuyên và Cao Lãnh. Cả kết quả trung bình và độ lệch chuẩn (Std) đều được đưa ra.

| | Trạm | | | | | | | |
|---|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
| | Vàm Nao | | Chợ Lách | | Long Xuyên | | Cao Lãnh | |
| | Trung bình | Std | Trung bình | Std | Trung bình | Std | Trung bình | Std |
| Chiều cao sóng cát [m] | 0,4 | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 1,6 | 0,4 | 1,3 | 0,4 |
| Chiều dài sóng cát [m] | 82 | 43 | 58 | 25 | 62 | 30 | 103 | 58 |
| Hướng di chuyển [°] | 16 | 9 | 61 | 7 | 128 | 3 | 83 | 9 |
| Khoảng cách di chuyển [m] | 53 | 5 | 20 | 2 | 34 | 4 | 42 | 8 |
| Tốc độ di chuyển [10^{-8} m/s] | 5100 | 500 | 2000 | 200 | 3300 | 300 | 4000 | 800 |
| Tải lượng đáy [10^{-8} m³/m/s] | 500 | 300 | 300 | 100 | 1700 | 500 | 1700 | 600 |

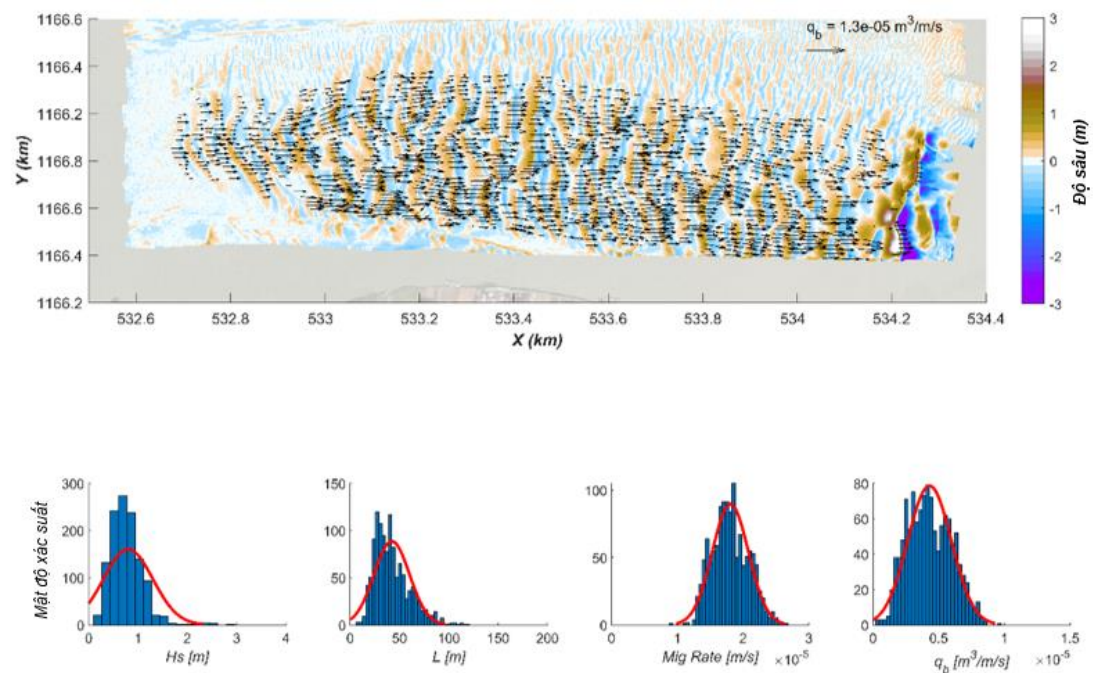
Trạm 1: Tân Châu

Các loại hình vận chuyển trong mùa mưa tại Tân Châu được đặc trưng bởi hoạt động hình thái mạnh mẽ, với khoảng cách di chuyển và sự biến đổi hình dạng sóng cát lớn trong khoảng thời gian 12 ngày khảo sát. Khoảng cách di chuyển vào khoảng 2 – 4 m trong mùa khô đã tăng lên tới 100 m trong mùa mưa. Chồng lên sóng cát xuất hiện những gợn sóng tương đối lớn (cao 0,25 m).

Do sự thay đổi đáng kể về hình thái sóng cát và khoảng cách di chuyển lớn, phân tích tương quan 2D được thực hiện với các ràng buộc bổ sung. Đầu tiên, chỉ những sóng cát có hình dạng nhất quán trong thời gian khảo sát mới được đưa vào phân tích. Bước lọc này đã loại bỏ hơn 75% các mặt cắt ngang sóng cát. Ngoài ra, tính toán tương quan 2D bị hạn chế bao gồm một phép dịch chuyển tịnh tiến theo hướng xuôi dòng ($100\text{-}120^\circ$ so với hướng bắc). Kết quả (xem Hình 3-12) phù hợp với Bảng 3-3. Chiều cao sóng cát nhìn chung nằm trong khoảng 1-2 m và chiều dài sóng cát từ 50-150 m. Chiều cao sóng cát trong mùa mưa thấp hơn trong mùa khô, trong khi chiều dài sóng cát thì tương đương nhau. Tốc độ di chuyển xấp xỉ $6400 \cdot 10^{-8}$ m/s (so với $160 \cdot 10^{-8}$ m/s vào mùa khô), dẫn đến vận chuyển tải lượng đáy khoảng $3300 \cdot 10^{-8}$ m³/s/m (so với $100 \cdot 10^{-8}$ m³/s/m trong mùa khô).



Hình 3-12: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Tân Châu** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.



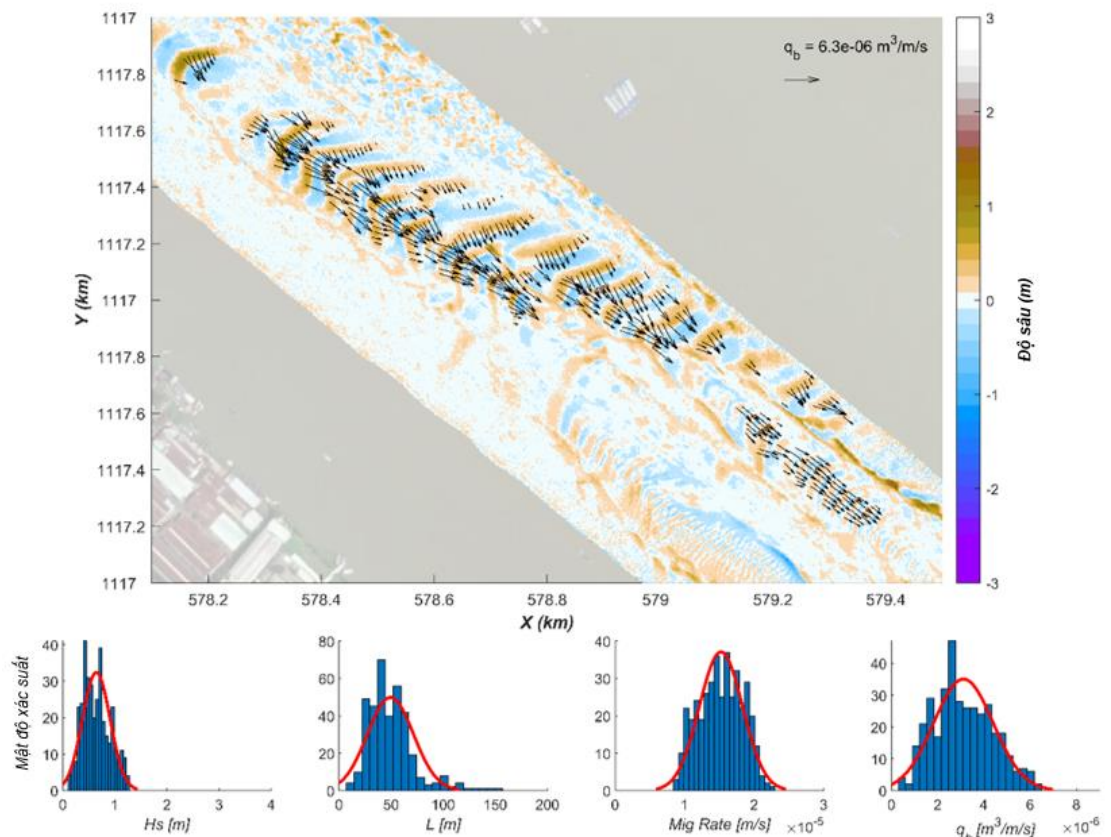
Hình 3-13: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Châu Đốc** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.

Trạm 2: Châu Đốc

Tại Châu Đốc, khoảng cách di chuyển thấp hơn tại Tân Châu và hình dạng sóng cát khá nhất quán cho toàn bộ thời gian khảo sát, cho phép mô tả chính xác quá trình vận chuyển tải lượng đáy trong mùa mưa. Kiểm tra trực quan các kết quả MBES (Bảng 3-3) cho thấy chiều dài sóng cát từ 20-50 m và độ cao 0,5-1,5 m, với những gợn sóng cát rất nhỏ (5-10 cm). Khoảng cách di chuyển là 15 đến 20 m trong 12 ngày, so với khoảng 1 m trong 18 ngày vào mùa khô. Phân tích tương quan 2D cho Châu Đốc cho thấy tốc độ di chuyển xấp xỉ $1800 \cdot 10^{-8}$ m/s ($70 \cdot 10^{-8}$ m/s trong mùa khô) và ước tính tải lượng đáy khoảng $200-600 \cdot 10^{-8}$ m³/s/m (xem Hình 3-13). Phần lớn sóng cát có chiều cao 0,5-1 m (tương tự mùa khô) và chiều dài 30-50 m (dài hơn một chút so với mùa khô). Tải lượng đáy tại Châu Đốc thấp hơn đáng kể so với Tân Châu, nhưng tương đương với tải lượng đáy tại Cần Thơ và Chợ Lách 2.

Trạm 3: Mỹ Thuận

Trong đợt khảo sát đầu tiên của mùa mưa, chủ yếu quan trắc các gợn sóng lớn có bước sóng 10 m tại Mỹ Thuận. Vì lý do này, giai đoạn 2 của đợt khảo sát tập trung vào khu vực thượng nguồn của giai đoạn 1. Tại đây, sóng cát có bước sóng 200-300 m được đo đạc bên ngoài khu vực được đo trong giai đoạn 1. Không có sóng cát phù hợp để phân tích tương quan 2D.



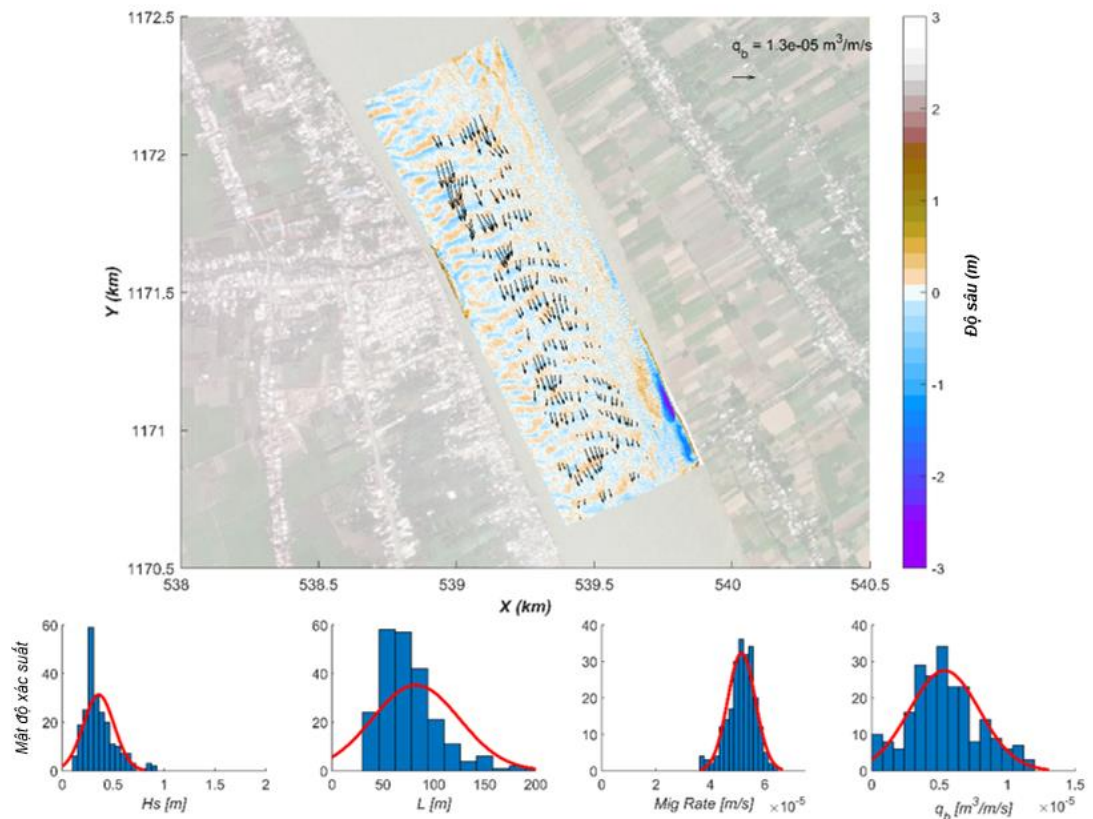
Hình 3-14: Bảng trên: Trường sóng cát và vectơ vận chuyển tải lượng đáy cho Cần Thơ trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.

Trạm 4: Cần Thơ

Những khu vực sóng cát rõ ràng đã được quan trắc gần trạm Cần Thơ. Biên độ sóng cát trong mùa mưa nhỏ hơn trong mùa khô, ngược lại bước sóng cát lại tăng lên. Ngoài ra, bước sóng cát ổn định hơn trên toàn bộ chiều rộng sông vào mùa mưa. Trong mùa khô, sóng cát dài hơn phân chia thành các sóng cát nhỏ hơn, điều này không quan trắc được trong mùa mưa. Khoảng cách di chuyển khoảng 15 – 30 m trong 12 ngày, so với 2-4 m trong khoảng thời gian 18 ngày vào mùa khô. Kết quả tương quan 2D (Hình 3-14) cho thấy sóng cát có chiều cao 0,25-1 m, chiều dài 25 – 75 m, tốc độ di chuyển $1500-2000 \cdot 10^{-8}$ m/s và tải lượng đáy $200-400 \cdot 10^{-8}$ m³/s/m.

Trạm 5: Vàm Nao

Tại Vàm Nao đã khảo sát được trường sóng cát có động lực cao. Trong thời gian khảo sát 12 ngày, khoảng cách di chuyển lớn đã được quan trắc cũng như những thay đổi đáng kể về hình thái sóng cát. Sóng cát trong giai đoạn 2 có biên độ nhỏ hơn nhưng tạo ra những gợn sóng lớn hơn. Khoảng cách di chuyển có cùng độ lớn với bước sóng cát, vì lý do đó, phân tích tương quan 2D chỉ giới hạn trong việc dịch chuyển theo hướng xuôi dòng về hạ nguồn. Tốc độ di chuyển từ phân tích tương quan 2D phù hợp tốt với các quan trắc trực quan; từ 4500 đến $6000 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, với ước tính tải lượng đáy là $300-800 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s/m}$. Tải lượng đáy tại Vàm Nao cao hơn tại Châu Đốc và Cần Thơ, tương đương Long Xuyên nhưng nhỏ hơn Tân Châu và Cao Lãnh.



Hình 3-15: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Vàm Nao** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.

Trạm 6: Mỹ Tho

Tại Mỹ Tho, không tìm thấy thấy sóng cát trong cả giai đoạn 1 và giai đoạn 2.

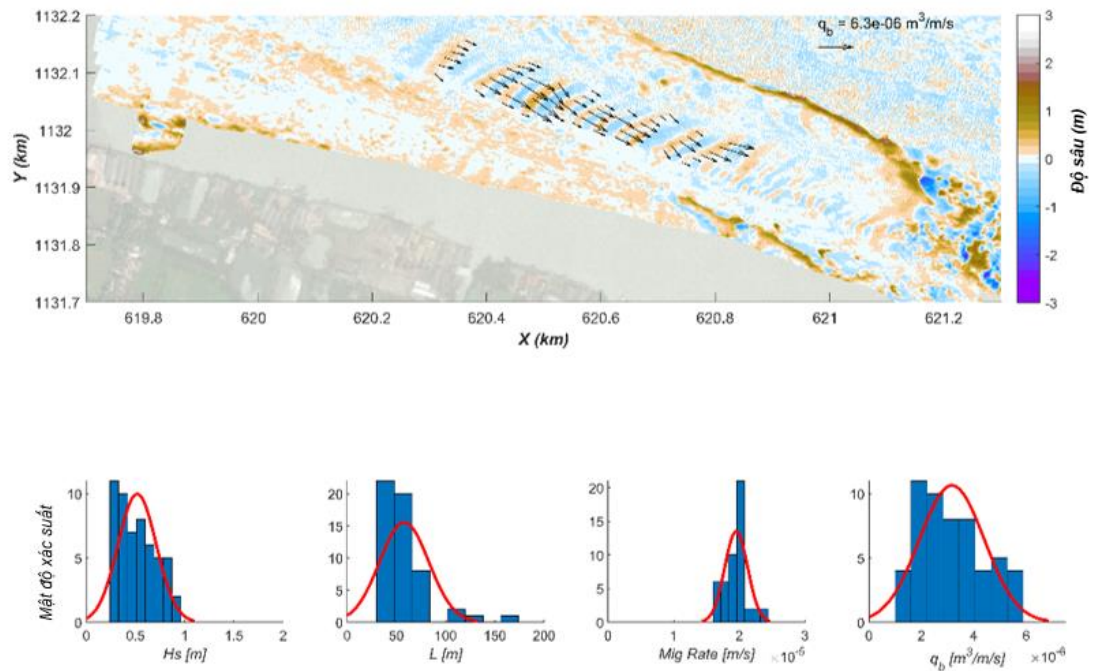
Trạm 7: Chợ Lách 1 (Hàm Luông)

Sóng cát tại trạm Chợ Lách 1, thuộc nhánh Hàm Luông tương đối ngắn và có hoạt động hình thái cao. Trong khoảng thời gian 12 ngày, hình dạng sóng cát đã thay đổi đáng kể, có khả năng đi kèm với khoảng cách di chuyển lớn. Ngoài ra, ảnh hưởng của thủy triều lớn hơn ở gần cửa, do đó pha thủy triều có thể ảnh hưởng đến hình dạng của các sóng cát có quy mô nhỏ hơn. Vì lý do này, không thể tìm thấy mối tương quan rõ ràng trong các đợt đo đạc sóng cát liên tiếp.

Trạm 8: Chợ Lách 2 (Cổ Chiên)

Trường sóng cát nhỏ được đo đạc tại Chợ Lách. Hình dạng sóng cát không đều theo không gian trên thực địa nhưng tương đối ổn định theo thời gian (xem Hình 3-7), cho phép phân tích tương quan 2D chính xác mặc dù khoảng cách di chuyển lớn so với bước sóng cát. Độ cao sóng cát tại Chợ Lách 2 là xấp xỉ 0,5 m, chiều dài sóng cát 58 m, tốc độ di chuyển khoảng $2000 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, vận chuyển tải lượng đáy khoảng $300 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s/m}$ (Hình 3-16). Những kết quả

này phù hợp với kết quả thu được từ kiểm tra trực quan các phép đo sâu hồi âm đa tia (Bảng 3-3).



Hình 3-16: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Chợ Lách 2** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy

Trạm 9: Bình Đại

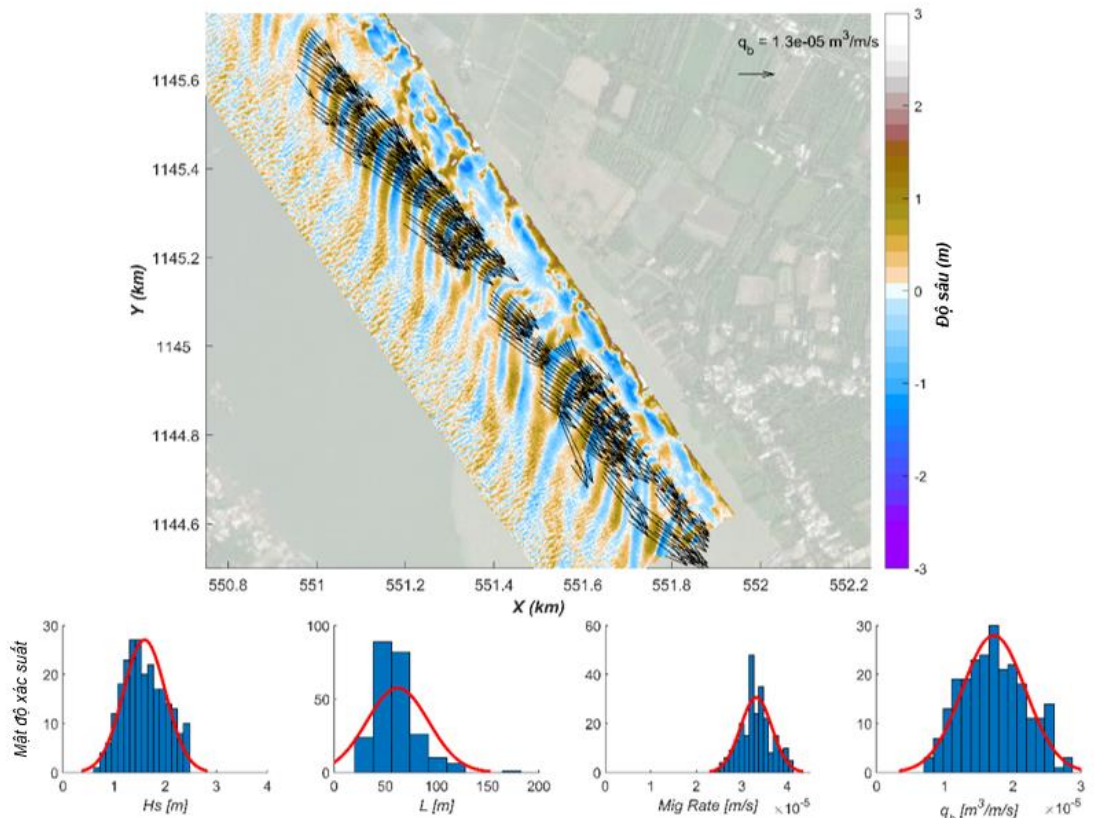
Tại Bình Đại, không tìm thấy thấy sóng cát trong cả giai đoạn 1 và giai đoạn 2.

Trạm 10: Long Xuyên

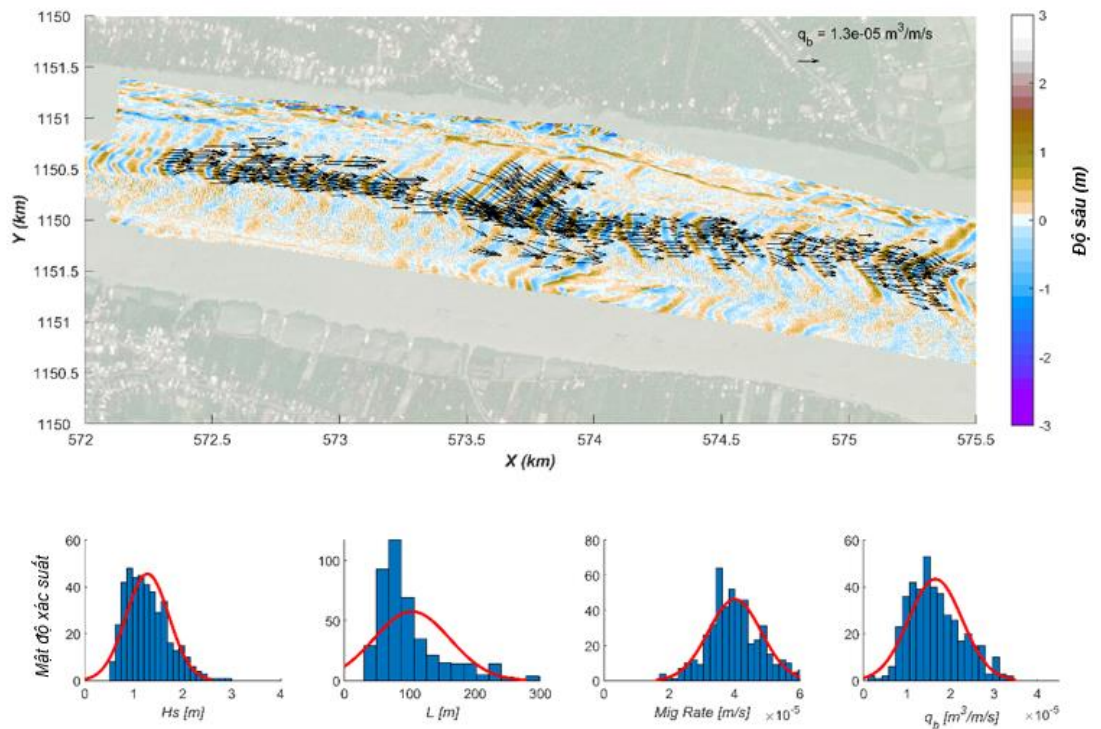
Tại Long Xuyên tìm thấy thấy trường sóng cát lớn, khoảng cách di chuyển đáng kể nhưng hình thái sóng cát ít thay đổi. Điều này làm cho sự di chuyển của sóng cát có thể được theo dõi rõ ràng. Vận chuyển tải lượng đáy tại Long Xuyên xấp xỉ $1700 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, thấp hơn một chút so với ước tính từ kiểm tra trực quan (Bảng 3-3). So với các trạm khác: tải lượng đáy tương đối lớn. Tại Tân Châu và Cao Lãnh, tải lượng đáy ước tính cao hơn. Độ cao sóng cát là 1-2 m và bước sóng cát 40-80 m.

Trạm 11: Đại Ngãi

Tại Đại Ngãi, chỉ tìm thấy sóng cát có bước sóng 10 m, quá nhỏ để phân tích theo dõi đụn cát do khoảng cách di chuyển lớn hơn nhiều so với bước sóng.



Hình 3-17: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Long Xuyên** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.



Hình 3-18: Bảng trên: Trường sóng cát và vector vận chuyển tải lượng đáy cho **Cao Lãnh** trong mùa mưa. Các bảng dưới: Phân phối chiều cao sóng cát, bước sóng cát, tốc độ di chuyển và vận chuyển tải lượng đáy.

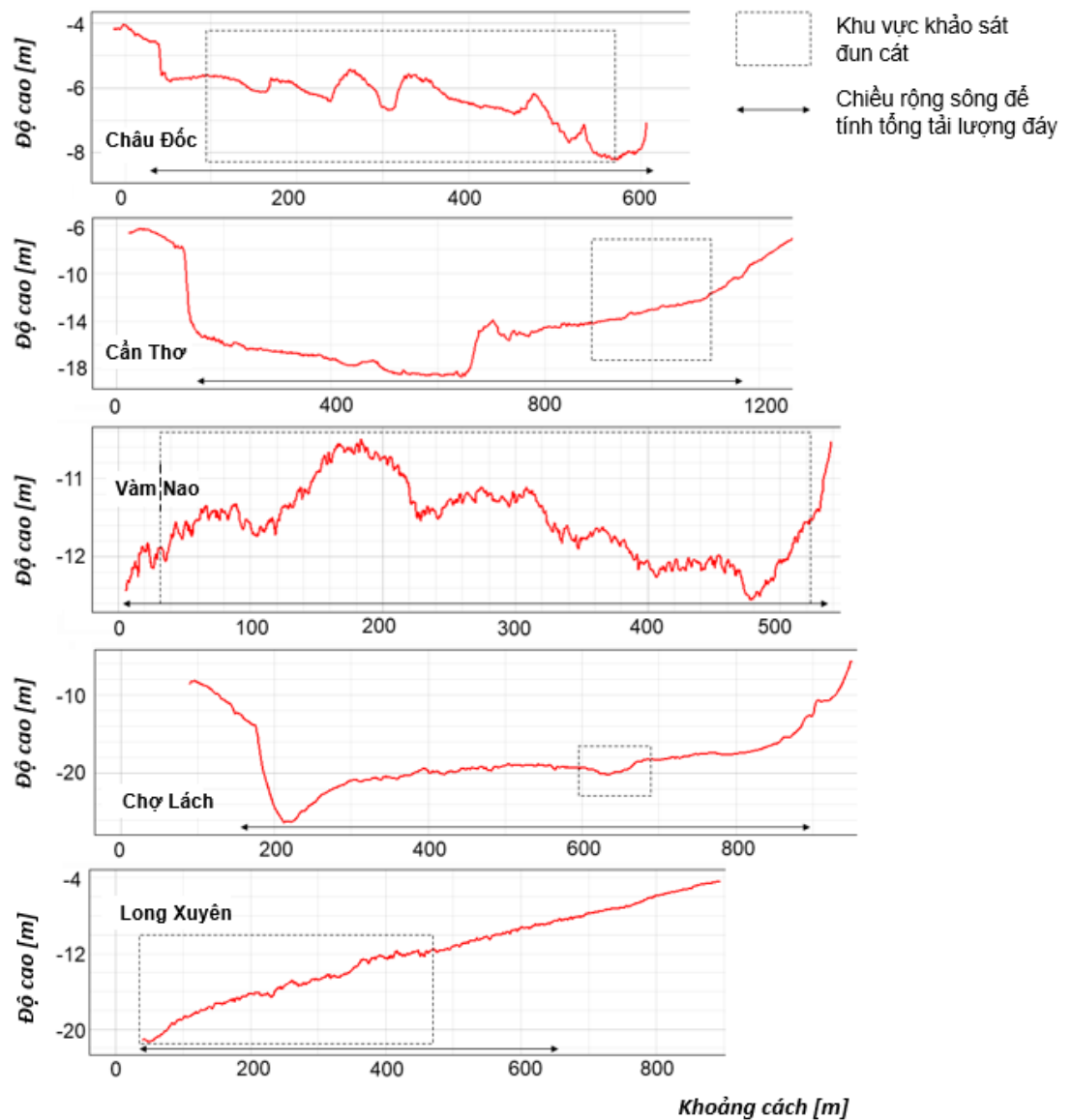
Trạm 12: Cao Lãnh

Trường sóng cát tại Cao Lãnh tương đối lớn, phân định rõ các sóng cát có bước sóng lớn (đến 200 m) và độ cao (đến 2,5 m). Sóng cát tại Cao Lãnh có thể được theo dõi chính xác theo thời gian. Kết quả tương quan 2D cho thấy hầu hết sóng cát di chuyển với tốc độ $3000-5000 \times 10^{-8}$

m/s, tương ứng với tải lượng đáy là $1000-2500 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Tải lượng đáy thấp hơn ước tính từ kiểm tra trực quan do chiều cao sóng cát trung bình được ước tính quá cao.

Chuyển đổi tải lượng đáy trên một đơn vị mét sang ước tính tải lượng đáy theo chiều rộng sông.

Ước tính tải lượng đáy thu được từ việc theo dõi đụn cát được đưa ra trên một đơn vị chiều rộng sông. Chúng được ngoại suy thành tổng ước tính tải lượng đáy bằng cách giả định sự phân bố tải lượng đáy trên toàn chiều rộng sông, được gọi là chiều rộng hiệu dụng của sông. Chiều rộng hiệu dụng không nhất thiết phải bằng chiều rộng đầy đủ. Ví dụ, khi các phần của đáy bao gồm đất sét hoặc than bùn chống xói mòn mà không có khả năng vận chuyển cát và dạng đáy đầy đủ, hoặc các khu vực có tốc độ dòng chảy hạn chế như giữa các kè mỏ hàn.



Hình 3-19: Ước tính chiều rộng hiệu quả của sông (mũi tên) để ước tính tổng tải lượng đáy, hiển thị các mặt cắt ngang (đường màu đỏ) và vùng đụn cát (hình vuông nét đứt) được quan sát trong kết quả MBES, cho năm trạm có mặt cắt ngang.

Để ước tính chính xác nhất về chiều rộng hiệu quả, chúng tôi đã kiểm tra các mặt cắt ngang sông đã được khảo sát cho các trạm sau: Châu Đốc, Cần Thơ, Vàm Nao, Chợ Lách và Long Xuyên. Đối với các trạm này, các mặt cắt ngang đã được nghiên cứu để xác định khu vực dòng chảy của sông (xem Hình 3-19). Chiều rộng hiệu quả của sông được sử dụng để tính toán tổng lượng vận chuyển được biểu thị bằng các mũi tên trong Hình 3-19. Đối với Tân Châu và Cao Lãnh, không có mặt cắt ngang và hình dạng đáy trải dài (gần như) toàn bộ chiều rộng của khảo sát đa tia (MBES). Các khảo sát MBES đã bao phủ khoảng một nửa (Cao Lãnh) đến

hai phần ba (Tân Châu) chiều rộng sông. Ba phần tư chiều rộng sông được coi là ước tính tốt nhất cho chiều rộng hiệu quả cho hai trạm này. Ước tính cận dưới về chiều rộng sông hiệu quả được lấy bằng chiều rộng của trường sóng cát quan trắc, trong khi ước tính cận trên là toàn bộ chiều rộng của sông. Các giá trị hiệu quả của lòng sông, cũng như ước tính tổng tải lượng đáy tương ứng được biểu thị trong Bảng 3-7 (mùa khô) và Bảng 3-8 (mùa mưa).

Bảng 3-7: Ước tính tổng vận chuyển tải lượng đáy (10^{-8} m³/s) trong mùa khô dựa trên ước tính tải lượng đáy trên một đơn vị chiều rộng sông và ước tính chiều rộng hiệu quả của sông.

| Trạm | Tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /s/m] | Chiều rộng sông hiệu quả: <i>(Ước tính tốt nhất [cận dưới, cận trên])</i> (m) | Ước tính tốt nhất tổng tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /s] | Giới hạn dưới tổng tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /s] | Giới hạn trên tổng tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /s] |
|----------------|---|---|--|--|--|
| 1 – Tân Châu | 101 [46] | 600 [500, 750] | 61,000 [28,000] | 51,000 [23,000] | 76,000 [35,000] |
| 2 – Châu Đốc 1 | 14 [05] | 250 [150, 350] | 4,000 [1,000] | 2,000 [1,000] | 5,000 [2,000] |
| 4 – Cần Thơ | 37 [17] | 1000 [350, 1500] | 37,000 [17,000] | 13,000 [6000] | 56,000 [26,000] |

Bảng 3-8: Ước tính tổng vận chuyển tải lượng đáy (10^{-8} m³/s) trong mùa mưa dựa trên ước tính tải lượng đáy trên một đơn vị chiều rộng sông và ước tính chiều rộng hiệu quả của sông.

| Trạm | Tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /s/m] | Chiều rộng sông hiệu quả: <i>(Ước tính tốt nhất [cận dưới, cận trên])</i> (m) | Ước tính tốt nhất tổng tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /S] | Giới hạn dưới tổng tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /S] | Giới hạn trên tổng tải lượng đáy: <i>Trung bình [Std]</i> [10^{-8} m ³ /S] |
|-----------------|---|---|--|--|--|
| 1 – Tân Châu | 3300 [1200] | 600 [500, 750] | 1,980,000 [720,000] | 1,650,000 [600,000] | 2,475,000 [900,000] |
| 2 – Châu Đốc | 400 [200] | 550 [450, 650] | 220,000 [110,000] | 180,000 [90,000] | 260,000 [130,000] |
| 4 – Cần Thơ | 300 [100] | 1000 [350, 1500] | 300,000 [100,000] | 105,000 [35,000] | 450,000 [150,000] |
| 5 – Vàm Nao | 500 [300] | 500 [450, 600] | 250,000 [150,000] | 225,000 [135,000] | 300,000 [180,000] |
| 8 – Chợ Lách 2 | 300 [100] | 750 [100,900] | 225,000 [75,000] | 30,000 [10,000] | 270,000 [90,000] |
| 10 – Long Xuyên | 1700 [500] | 600 [350, 900] | 1,020,000 [300,000] | 595,000 [175,000] | 1,530,000 [450,000] |
| 12 – Cao Lãnh | 1700 [600] | 700 [450, 900] | 1,190,000 [420,000] | 765,000 [270,000] | 1,530,000 [540,000] |

3.1.5 Vận chuyển tải lượng đáy so sánh với các nghiên cứu khác

Ước tính tải lượng đáy từ nghiên cứu này được so sánh với ước tính từ các tài liệu (xem Bảng 3-1). Tại Cần Thơ, Stephens và cộng sự (2017) đã quan trắc được tải lượng đáy khoảng 1150×10^{-8} m³/s/m trong mùa mưa, so với ước tính của chúng tôi là 300×10^{-8} m³/s/m, đưa ra các ước tính có cùng độ lớn. Lưu lượng tức thời cực đại cao hơn đáng kể trong cuộc khảo sát năm 2014 của Stephens và cộng sự (2017) (30.000 m³/s) so với nghiên cứu này (22.000 m³/s), điều này có thể giải thích rằng tổng vận chuyển tải lượng đáy của chúng tôi thấp hơn. Các địa điểm khảo sát khác được mô tả trong tài liệu không khớp với địa điểm khảo sát của nghiên cứu này.

3.2 Trữ lượng cát di động hiện có

Phần này mở rộng về cách tiếp cận và kết quả đo đạc thực địa để lần đầu tiên định lượng được trữ lượng cát di động hiện có của toàn vùng Đồng bằng sông Cửu Long của Việt Nam.

3.2.1 Cách tiếp cận chính bằng đo đạc địa chấn tầng nông

Mục tiêu của việc phân tích dữ liệu đo đạc địa chấn tầng đáy (xem mục 2.4, đo đạc hiện trường) là xác định sự hiện diện của cát và lập bản đồ độ dày của các lớp cát để ước tính được trữ lượng cát di động hiện có trong một khu vực nhất định.

3.2.2 Dữ liệu địa chấn tầng nông

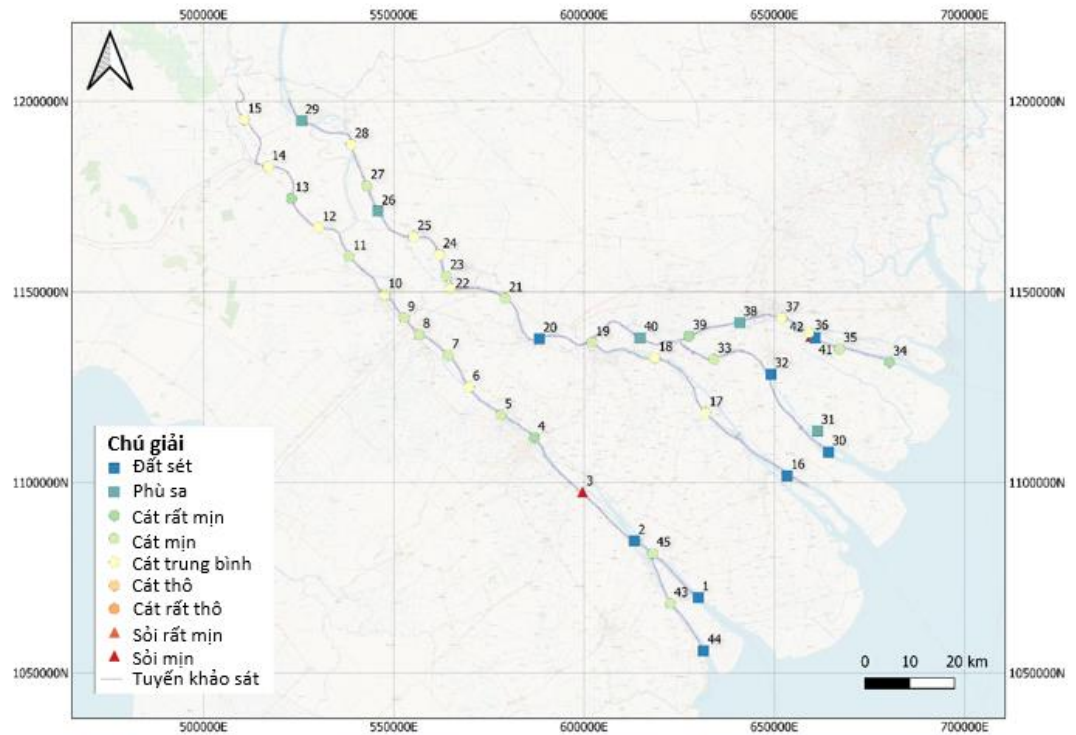
Đối với đợt khảo sát, hệ thống “Innomar SES-2000 compact” đã được sử dụng. Hệ thống này tạo ra dữ liệu có độ phân giải dọc rất cao trong khi vẫn thâm nhập tương đối sâu vào lớp đất bên dưới lòng sông. Công việc khảo sát bao gồm tổng cộng 550 km đường đo đạc địa chấn tầng nông. Để có mô tả chi tiết hơn về SBP như một kỹ thuật, chúng tôi tham khảo báo cáo khởi động đã gửi trước đó.

Sau khi hoàn thành khảo sát, dữ liệu thu được đã được xử lý sau khảo sát. Mục tiêu của công việc này là cải thiện khả năng giải đoán dữ liệu địa chấn tầng nông để xác định các cấu trúc trầm tích khác nhau. Để định vị dữ liệu, các vị trí của Hệ thống Vệ tinh Định vị Toàn cầu (GNSS) đã được tính toán và thêm vào siêu dữ liệu của địa chấn tầng nông. Lực đẩy của tàu trong quá trình khảo sát đã được bù đắp bằng cảm biến chuyển động trên tàu. Dữ liệu được xuất ở định dạng dữ liệu dạng sóng đầy đủ theo tiêu chuẩn ngành. Quá trình xử lý sau khảo sát bao gồm lọc băng thông để loại bỏ nhiễu không mong muốn khỏi dữ liệu. Phục hồi biên độ đã được áp dụng để có thể hiển thị các tầng sâu hơn. Việc phát hiện đáy sông tự động đã được thực hiện để thu được thông tin về độ sâu dọc theo các tuyến khảo sát.

Từ dữ liệu địa chấn tầng nông, các giao diện giữa các vật liệu khác nhau có thể được ánh xạ liên tục dọc theo toàn bộ mặt cắt đo đạc, nhưng điều này không nhất thiết cung cấp thông tin trực tiếp về các loại trầm tích khác nhau. Các loại trầm tích có thể được giải thích một phần từ các cấu trúc địa chất được xác định trong dữ liệu địa chấn tầng nông, nhưng điều này phải được bổ sung thông tin lỗ khoan và thông tin ở bề mặt lòng sông bằng cách sử dụng các mẫu trầm tích đáy sông và dữ liệu đo sâu hồi âm đa tia như được mô tả trong phần các phần tiếp theo.

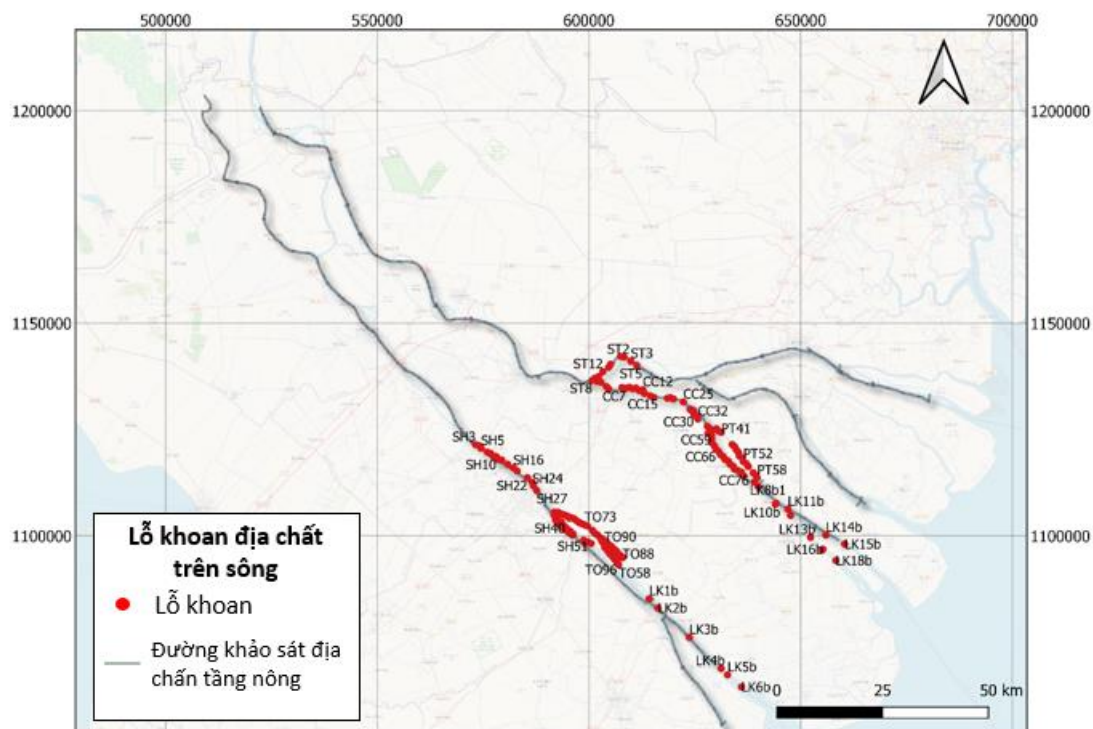
3.2.3 Các lỗ khoan địa chất và lấy mẫu trầm tích đáy sông

Có tổng cộng 195 lỗ khoan trên sông có sẵn để hỗ trợ việc giải đoán và được hiển thị trong Hình 3-21. Một lỗ khoan cung cấp thông tin về loại trầm tích ở các độ sâu khác nhau tại một địa điểm. Mục 3.2.5 phác thảo cách sử dụng các lỗ khoan trong việc giải đoán. Nhiều dữ liệu lỗ khoan hơn có thể cho phép phân tích sâu hơn các lớp sâu hơn, có khả năng tiết lộ các lớp cát bị chôn vùi. Ở những nơi không có lỗ khoan thì điều này là không thể. Vì vậy, các kết quả được trình bày cung cấp một ước tính thận trọng về trữ lượng cát di động hiện có.

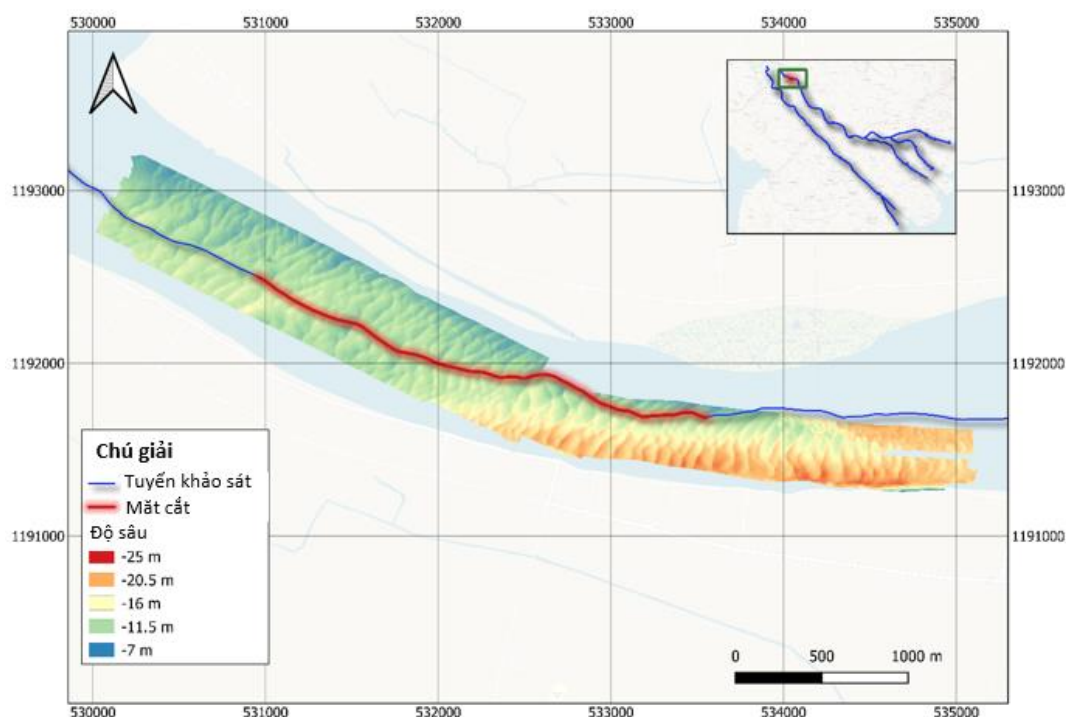


Hình 3-20: Tổng quan về tất cả phạm vi đo đạc của SBP (đường màu tím) và các vị trí mẫu lấy. Các con số là số thứ tự mẫu. Hình dạng biểu tượng đại diện cho các lớp trầm tích khác nhau và màu sắc biểu thị các lớp dựa trên kích thước hạt (D50).

Ngoài dữ liệu lỗ khoan có sẵn (Hình 3-21) ở ba tỉnh (Hậu Giang, Trà Vinh, Vĩnh Long), trong quá trình khảo sát SBP, chúng tôi đã thu thập được 45 mẫu trầm tích đáy sông (khoảng 10 km một mẫu). Các vị trí lấy mẫu đã được chọn để xác định nhiều loại trầm tích khác nhau từ cát đến bùn, nhằm có khả năng liên hệ giữa dữ liệu địa chấn tầng nông với các loại trầm tích khác nhau. Ngược lại với các lỗ khoan, các mẫu trầm tích đáy sông chỉ cung cấp thông tin về các loại trầm tích dưới lòng sông. Ở những khu vực không có dữ liệu lỗ khoan, chúng tôi đã xác minh sự hiện diện của cát bằng cách xác định sóng cát hoặc dạng đáy gợn sóng cát lớn có thể nhìn thấy trong dữ liệu địa chấn tầng nông (ví dụ: xem Hình 3-22). Ở quy mô của nghiên cứu này, có thể giả định rằng các đoạn không có đụn cát bao gồm chất nền cứng hoặc hàm lượng bùn lớn, ví dụ như các lớp đất sét và than bùn, không có lượng vận chuyển cát hợp lý; nếu không, những khu vực này cũng có thể hiển thị các dạng đáy kiểu lưới liềm biệt lập).



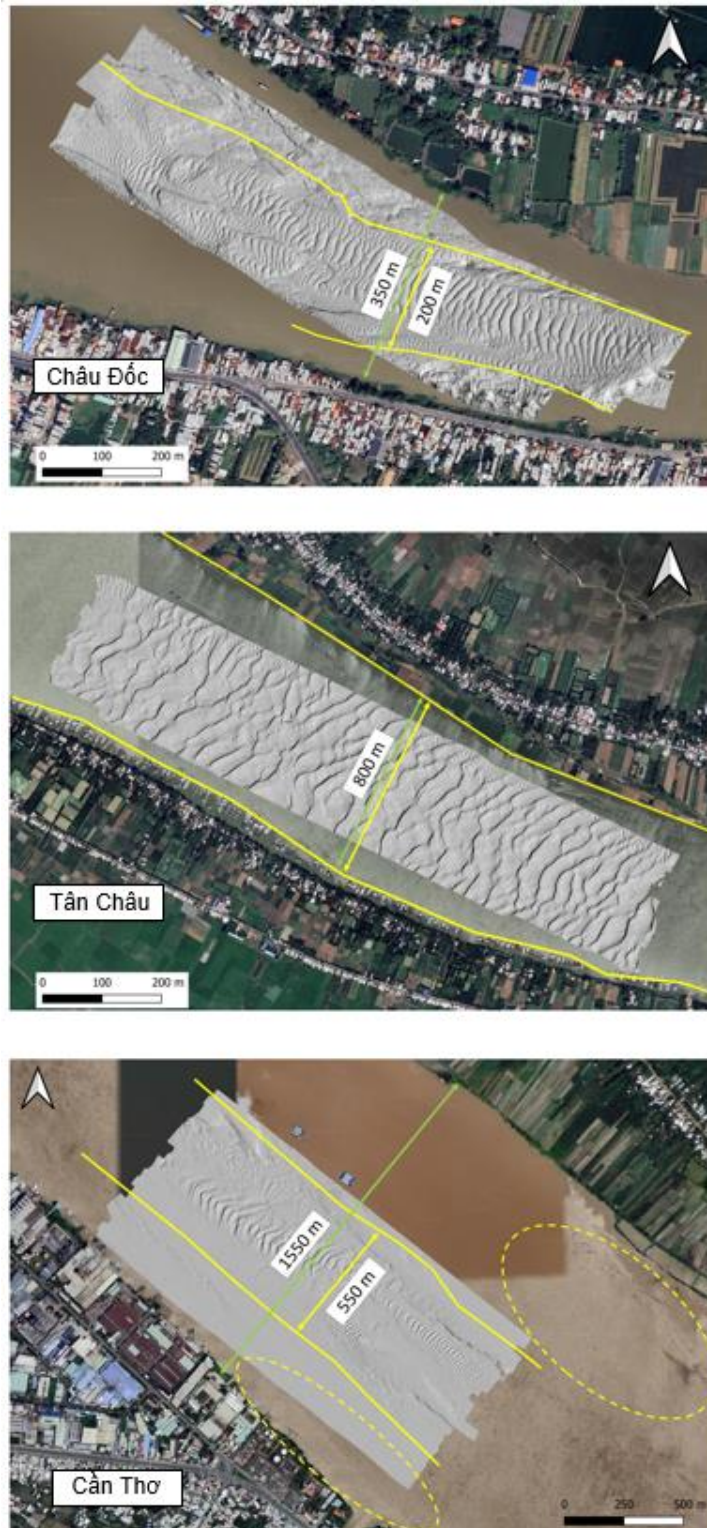
Hình 3-21: Các lỗ khoan trên sông nhằm hỗ trợ việc giải đoán địa chấn có sẵn ở ba tỉnh (Các điểm màu đỏ trên bản đồ), hầu hết nằm ở vùng hạ nguồn đồng bằng.



Hình 3-22: Một địa điểm gần Tân Châu được ghi lại cả dữ liệu MBES và SBP. Từ dữ liệu đo độ sâu, chúng ta có thể thấy phạm vi của sóng cát trong khi dữ liệu dưới đáy có thể ghi lại hình ảnh đáy của lớp di động và độ dày của sóng cát.

3.2.4 Dữ liệu đo sâu hồi âm đa tia

Trong trường hợp độ dày của lớp cát trên cùng được lập bản đồ dựa trên dữ liệu địa chấn tầng nông, các lỗ khoan và mẫu trầm tích đáy sông, thì phạm vi bên cạnh của lớp vẫn cần được ước tính. Các mặt cắt ngang của thiết bị đo đặc địa chấn tầng nông không hữu ích trong việc đưa ra ước tính này vì các đường này chạy vuông góc với dạng đáy và trong hầu hết các trường hợp, tín hiệu tại điểm giao cắt rất khó giải đoán do không có dạng đáy nên việc xác định lớp cát trên các mặt cắt ngang là rất khó khăn. Tuy nhiên, từ dữ liệu khảo sát MBES bao phủ toàn bộ chiều rộng sông, chúng tôi có thể ước tính chính xác về độ bao phủ ngang của cát trên mặt cắt ngang.



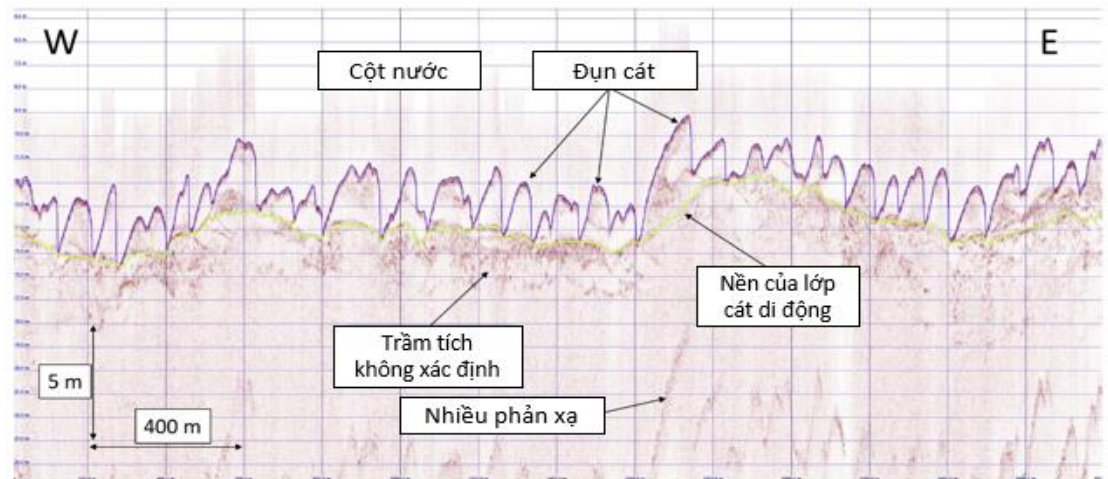
Hình 3-23: Ba ví dụ về chiều rộng của mặt cắt có cát so với mặt cắt ngang sông.

Hình 3-23 cho thấy các ví dụ về phạm vi cạnh bên của dạng đáy ở ba đoạn nhiều cát so với chiều rộng của sông, được thể hiện bằng sự hiện diện mạnh mẽ của đụn cát. Ở Tân Châu phạm vi này chiếm hơn 90% chiều rộng sông, ở Châu Đốc ~75% và ở Cần Thơ ~35%. Nhìn vào tất cả các mặt cắt quan trắc được, tỷ lệ 50-75% có vẻ là ước tính hợp lý về độ che phủ cát theo chiều rộng sông tại các vị trí đã xác định được các lớp cát.

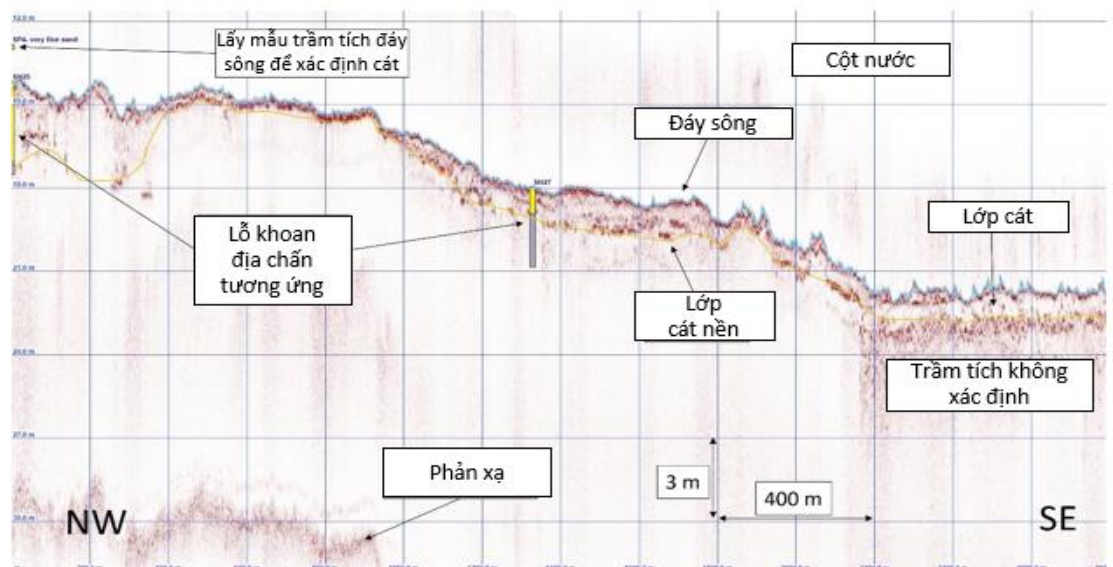
3.2.5 Phương pháp giải đoán

Sau khi xử lý dữ liệu thô của dữ liệu địa chấn tầng nông để cải thiện tín hiệu, bước tiếp theo là thực hiện quá trình diễn giải chính. Bao gồm các bước sau:

- Tải dữ liệu địa chấn tầng nông vào phần mềm giải đoán địa chấn 'IXSea'.
- Tự động phát hiện đáy sông (ví dụ: đường màu xanh lam trong Hình 3-24).
- Tải các lỗ khoan và mẫu trầm tích đáy sông để hiển thị ở phần địa chất tầng nông (ví dụ: xem Hình 3-25).
- Thực hiện giải đoán thủ công nền của lớp cát trên cùng dựa trên sự tiếp tục phản xạ ở đáy lớp đó, được xác định bằng thông tin loại trầm tích trong các lỗ khoan và mẫu trầm tích đáy sông.
- Kiểm tra chéo phần giải đoán với mặt cắt ngang nếu có.



Hình 3-24: Đáy sông gần Tân Châu được đo đạc bằng địa chấn tầng nông. Các đụn cát có thể nhìn thấy rõ ràng, đáy và độ dày của lớp cát di động được lập bản đồ. Bên dưới đáy của lớp di động có các cấu trúc trầm tích có thể nhìn thấy được mà không thể xác định được lớp trầm tích nào nếu không có bất kỳ sự xác nhận nền đất bổ sung nào (ví dụ: các lỗ khoan).



Hình 3-25: Ví dụ về SBP có hai lỗ khoan (SH25 và SH27) và một lấy mẫu trầm tích đáy (biểu thị cát mịn) giúp phân thảo lớp cát trên cùng ngay cả khi không có gợn sóng cát rõ ràng hoặc đụn cát hiện diện.

Cách giải đoán này cung cấp độ dày trầm tích dọc theo các đường đo đặc địa chấn tầng nông. Khi kết hợp điều này với các ước tính về phạm vi bên cạnh của trầm tích như đã mô tả ở phần trước, trữ lượng cát di động hiện có có thể được tính toán.

3.2.6 Phương pháp tính trữ lượng cát di động hiện có

Bằng cách nhân phạm vi bên với độ dày của lớp cát, chúng ta có thể ước tính lượng cát ở mỗi đoạn dọc sông. Đối với phạm vi bên, chúng tôi sử dụng các ước tính thấp và cao tương ứng là 50% và 75% như được thảo luận trong mục 3.2.4 và đối với độ dày, kết quả của phương pháp diễn giải như được mô tả trong mục 3.2.5.

Phương trình 3-1 dưới đây cho thấy cách tính toán khối lượng cát sử dụng độ dày lớp và chiều rộng sông từ bờ này sang bờ bên kia:

$$V = A * W \quad \text{with} \quad A = \int_0^L D_{base_sand}(x)dx - \int_0^L D_{river_bed}(x)dx \quad (\text{Phương trình 3-1})$$

Trong đó:

V: khối lượng cát trong phần phân tích [m3]

W: phạm vi bên cạnh ước tính của lớp cát (chiều rộng), được lấy bằng 75% tổng chiều rộng sông [m]

A: diện tích mặt cắt ngang của đụn cát hoặc gợn sóng lớn dọc theo một mặt cắt [m2]

L: chiều dài đường khảo sát địa tầng nông [m]

X: khoảng cách dọc theo đường khảo sát địa chấn tầng nông [m]

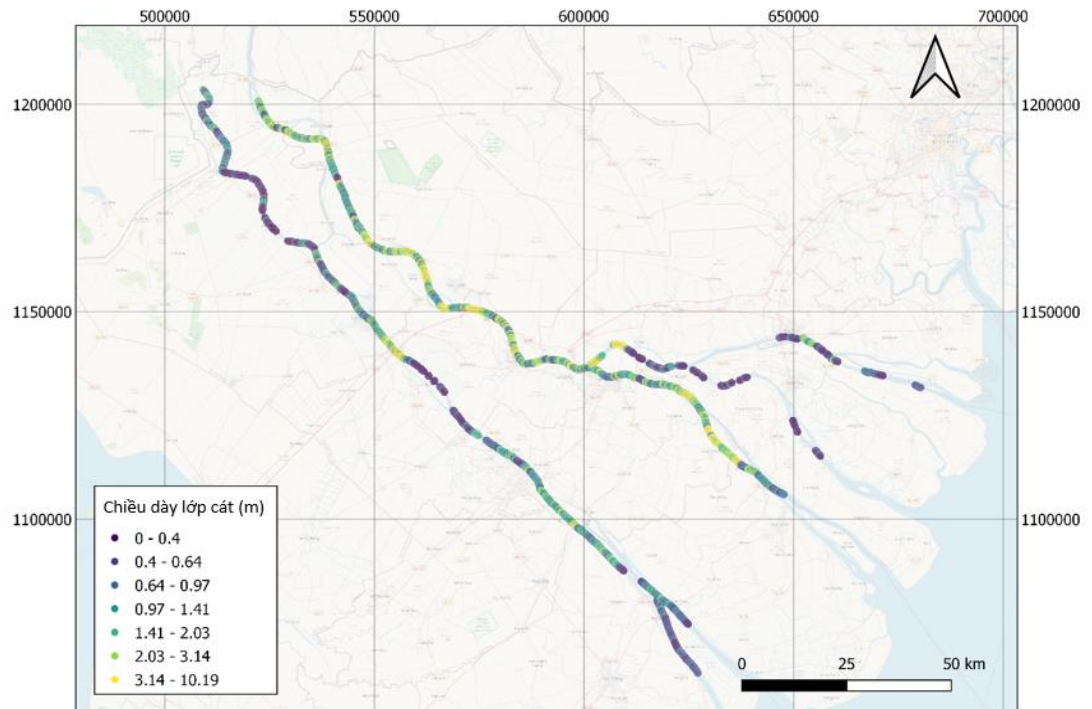
D: độ sâu bên dưới thiết bị cảm biến đo đặc địa tầng nông, đến đáy lớp cát và đáy sông tương ứng [m]

Ở đây chúng tôi cũng đưa ra một ví dụ về giải đoán tín hiệu so với các dữ liệu khảo sát có sẵn khác. Hình 3-22 thể hiện đường khảo sát của đợt khảo sát địa chấn tầng nông trong phạm vi độ sâu đo được (trong trường hợp này là gần Tân Châu). Thiết bị đo đặc địa chấn tầng nông chỉ chụp ảnh những gì nằm dọc dưới cảm biến (Hình 3-24). Phép đo độ sâu cho biết mức độ đại diện của một đường cắt đơn lẻ để mô tả đặc tính của toàn bộ chiều rộng của sông. Trong ví dụ này, phần lớn bề mặt đo độ sâu bị chi phối bởi các cồn cát cao 1-3 m (Hình 3-22), điều này cũng được thấy rõ trong SBP của Hình 3-24. Nền của “lớp cát di động” cũng nhìn thấy rõ ràng và lập bản đồ để xác định độ dày của lớp cát di động (đường màu vàng). Lưu ý rằng lớp cát di động là lớp cát hoạt động trên cùng từ lòng sông đến độ sâu khi thạch học thay đổi, dễ bị ảnh hưởng nhiều nhất bởi cả hoạt động khai thác, hoặc thay đổi hình thái và chuyển động. Những dữ liệu này sau đó được sử dụng để ước tính trữ lượng cát di động dọc theo đoạn đường và cuối cùng là trên toàn bộ vùng đồng bằng.

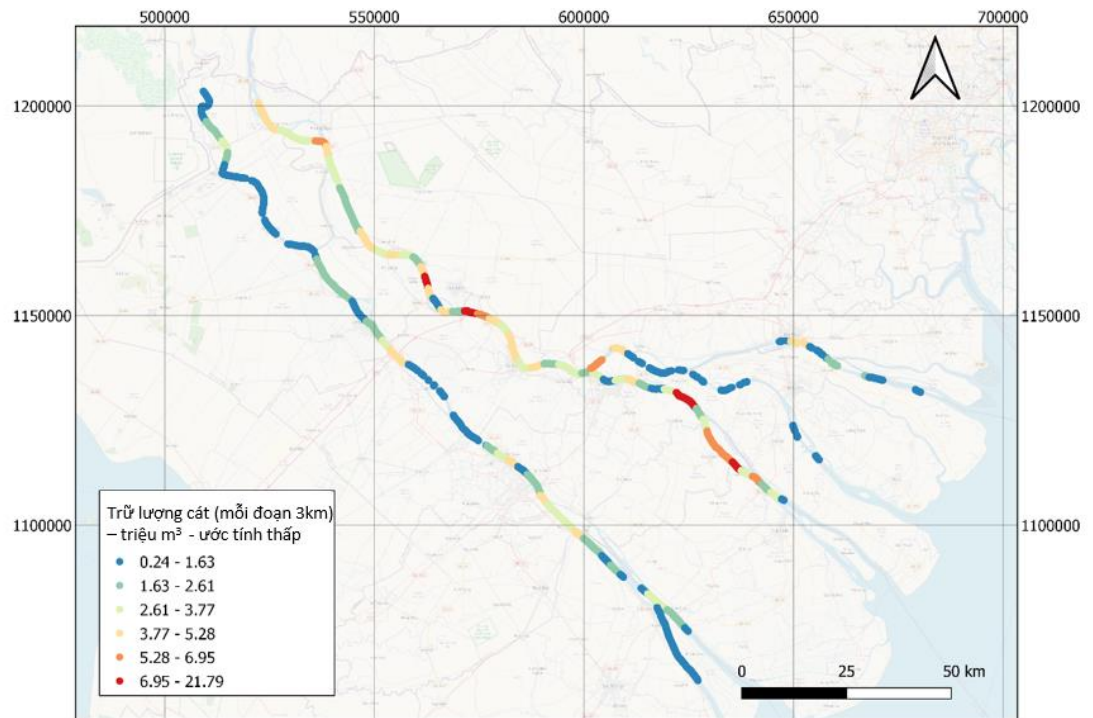
3.2.7 Kết quả

Các mẫu trầm tích được thu thập cho thấy xu hướng vật chất mịn hơn ở hạ nguồn như đã được mô tả trước đây bởi Gugliotta và cộng sự (2017). Hàm lượng cát trong các mẫu thu thập hầu hết được phân loại là cát mịn đến trung bình. Tuy nhiên, một số mẫu bao gồm phù sa hoặc đất sét, thậm chí ở các đoạn thượng nguồn. Hình 3-20 đưa ra cái nhìn tổng quan về các mẫu trầm tích và các lớp trầm tích được xác định của chúng. Hình 3-20 cũng hiển thị các tuyến được khảo sát của đợt khảo sát địa chấn tầng nông. Ban đầu, sự hiện diện của cát chỉ được xác nhận bằng sự hiện diện của dạng đáy (gợn sóng cát và cồn cát) và các mẫu trầm tích đáy sông trong Hình 3-20. Cuối cùng, các lỗ khoan trên sông (dữ liệu thứ cấp) như mô tả trong Hình 3-21 đã được cung cấp để xác định sự hiện diện cục bộ và độ dày của lớp cát trên cùng ngay cả khi không có dạng đáy rõ ràng. Điều này dẫn đến ước tính tốt hơn về trữ lượng cát di động ở những khu vực đó. Hình 3-25 cho thấy một ví dụ về cách các lỗ khoan (và lấy mẫu trầm tích đáy sông) được chiếu lên dữ liệu địa chấn tầng nông để kiểm định việc giải đoán.

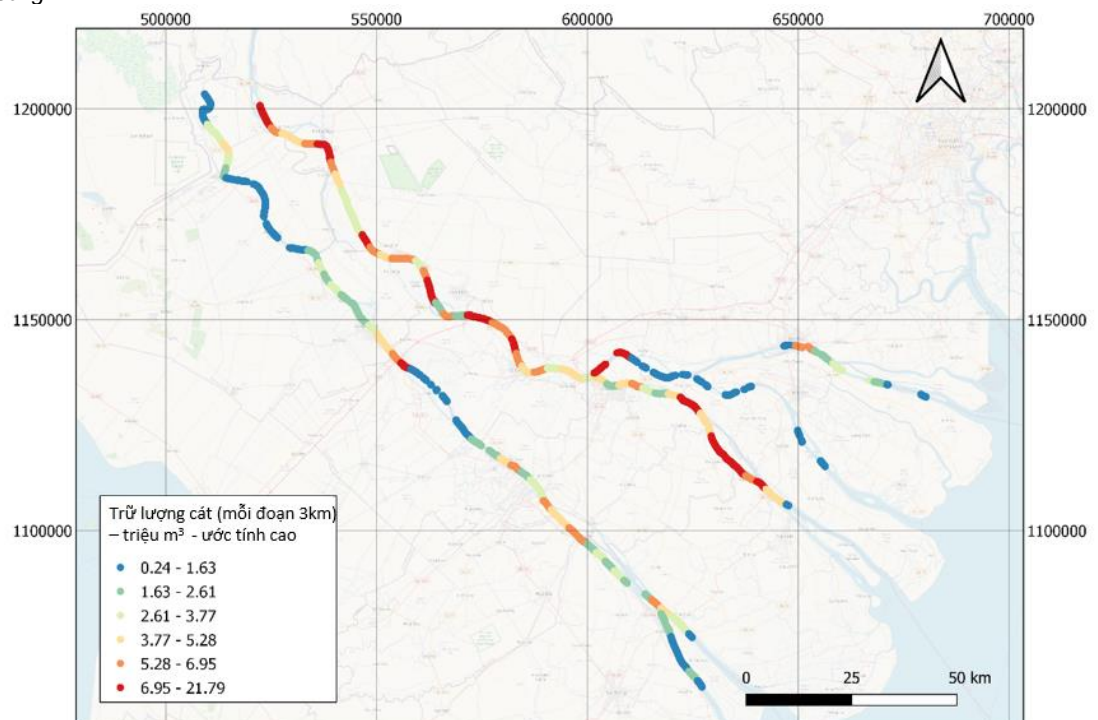
Thiết bị đo đặc địa chấn tầng nông chỉ chụp ảnh theo chiều dọc bên dưới cảm biến. Vì vậy, dọc theo các đường khảo sát, độ dày (m) của lớp cát có thể được lập bản đồ bằng cách lấy độ sâu của đáy sông trừ đi độ sâu đến đáy lớp cát. Điều này mang lại cách giải thích 'thô' như được trình bày trong Hình 3-25, trong đó thông tin từ các lỗ khoan trên sông và các mẫu trầm tích đáy sông được kết hợp. Sử dụng phương trình 3-1, trữ lượng cát di động sau đó được tính toán trên một mét sông. Các kết quả được tổng hợp trên các đoạn dài 3 km để đưa ra cái nhìn tổng quan tối ưu về sự phân bố cát dọc sông. Điều này dẫn đến hình ảnh ước tính thấp hơn (Hình 3-27) và ước tính cao hơn (Hình 3-28) về trữ lượng cát di động, trong đó phạm vi bên cạnh của lớp cát kéo dài 50% và 75% chiều rộng sông được sử dụng tương ứng. Ở những đoạn sông không có trữ lượng cát di động được thể hiện trên bản đồ, không quan sát được lớp cát trong quá trình giải đoán. Từ các dữ liệu có thể nhận thấy thượng nguồn sông Tiền và sông Cổ Chiên có trữ lượng cát di động cao nhất, tiếp theo là sông Hậu. Trữ lượng cát di động thấp hơn đáng kể ở hạ nguồn sông Mekong và sông Hàm Luông.



Hình 3-26: Độ dày của lớp cát trên cùng (di động) dọc theo mỗi mét của sông Mekong. Tại các đoạn sông không thể hiện độ dày trên bản đồ, không quan sát thấy lớp cát.



Hình 3-27: Ước tính thấp/cận dưới của trữ lượng di động cát dọc theo các đoạn dài 3 km. Chúng được tính toán với Phương trình 3-1, sử dụng độ dày của cát và giả sử phạm vi ngang của lớp cát kéo dài 50% chiều rộng sông.



Hình 3-28: Ước tính cao/cận trên của trữ lượng cát di động dọc theo các đoạn dài 3 km. Chúng được tính toán với Phương trình 3-1, sử dụng độ dày của cát và giả sử phạm vi ngang của lớp cát trải dài bằng 75% chiều rộng sông.

3.2.8 Tổng trữ lượng cát di động hiện có

Trong các bản đồ được trình bày ở phần trước (Hình 3-27 và Hình 3-28), ước tính trữ lượng cát di động cao/cận trên và thấp/cận dưới, tính tổng trên các đoạn sông dài 3 km, đã được trình bày để cung cấp góc tổng quan về sự phân bố cát dọc sông Mekong. Tương tự, bằng cách tính tổng chiều dài của sông sẽ tính được tổng trữ lượng cát di động trên sông Mekong. Bảng 3-9 đưa ra ước tính tổng trữ lượng cát di động hiện có. Đối với ước tính thấp hơn, người

ta giả định rằng, khi cát được giải đoán dữ liệu địa chấn tầng đáy, cát hiện diện dọc theo 50% chiều rộng của sông. Đối với ước tính trên, 75% chiều rộng của sông đã được áp dụng. Các ước tính trữ lượng cát di động hiện có dựa trên cách giải đoán thận trọng dữ liệu địa chấn tầng đáy. Những ước tính này có thể được cải thiện bằng cách đưa vào nhiều dữ liệu hơn (nếu có) về lỗ khoan trên sông trong tương lai. Ở những nơi không có hoặc có ít dữ liệu về lỗ khoan thì các ước tính sẽ được xác định kém tin cậy hơn. Điều này có nghĩa là có thể bên dưới lớp cát di động có nhiều cát hơn. Các cấu trúc trầm tích bị chôn vùi tại địa phương cho thấy khả năng có sự hiện diện của cát ở các lớp sâu hơn, nhưng điều này không thể được xác minh trong phạm vi nghiên cứu này.

Bảng 3-9: Ước tính cao/cận trên và ước tính thấp/cận dưới về tổng trữ lượng cát di động hiện có cho sông Mekong

| Mô tả | Tổng trữ lượng cát di động hiện có (triệu m ³) |
|------------------------|--|
| Ước tính thấp/cận dưới | 367,7 |
| Ước tính cao/cận trên | 551,5 |

3.2.9 Thảo luận

Đây là ước tính đầu tiên về trữ lượng cát di động hiện có ở quy mô đồng bằng sông Cửu Long. Trong các cuộc họp có sự tham gia của các bên liên quan, đã có những ý kiến khác nhau về trữ lượng cát di động hiện có. Một số người coi đây là một sự đánh giá quá cao. Tuy nhiên, chúng tôi tin rằng ước tính này có lẽ hơi thận trọng vì nó chủ yếu tập trung vào lớp cát di động, do đó có thể bỏ qua các lớp cát thấp hơn, đặc biệt là ở vùng thượng nguồn đồng bằng, nơi không có dữ liệu lỗ khoan. Hơn nữa, cát bị chôn vùi trong bùn không dễ dàng xuất hiện trong dữ liệu này và chỉ có thể được xác định sau khi thực hiện việc kiểm tra đối chiếu chính xác. Việc so sánh với các ước tính hiện tại ở cấp tỉnh là rất khó khăn ở giai đoạn này. Bất kỳ sự so sánh nào cũng cần giải quyết các câu hỏi như phạm vi khảo sát là gì? Hoặc dữ liệu được giải đoán như thế nào? Hay là cho toàn tỉnh hay chỉ cho các mỏ hiện có? So sánh này cuối cùng phải dựa vào việc các chuyên gia thảo luận chi tiết về các phân tích để đưa ra so sánh công bằng.

3.3 Ước tính khai thác cát

Trong phần này, một phương pháp tiên tiến nhất được giới thiệu và áp dụng để ước tính khối lượng cát đã khai thác cho ĐBSCL dựa trên dữ liệu viễn thám. Đầu tiên, thông tin cơ bản cung cấp một cái nhìn tổng quan ngắn gọn về dữ liệu và tài liệu sẵn có liên quan đến chủ đề này (Mục 3.3.1). Sau đó, phương pháp tiên tiến được áp dụng trong nghiên cứu này được mô tả (Mục 3.3.2) và các kết quả thu được bằng phương pháp này được trình bày (Mục 3.3.3). Cuối cùng, phần thảo luận liệt kê những hạn chế của phương pháp hiện tại và đưa ra những phát triển tiềm năng hơn nữa (Mục 3.3.4).

3.3.1 Bối cảnh

Phần này cung cấp góc nhìn tổng quan ngắn gọn về các bộ dữ liệu ảnh vệ tinh hiện có và tài liệu hiện có về các phương pháp tiên tiến nhất để ước tính khối lượng cát đã khai thác cho Đồng bằng sông Cửu Long.

Bộ dữ liệu hình ảnh vệ tinh có sẵn

Đối với nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào một số bộ dữ liệu hình ảnh vệ tinh có độ phân giải trung bình, độ bao phủ không gian và thời gian cao sẵn có. Tổng quan về các bộ dữ liệu ảnh vệ tinh này được trình bày trong Bảng 3-10. Phần tổng quan này cũng cho biết các bộ dữ liệu đã được áp dụng trong nghiên cứu nào.

Bảng 3-10: Tổng quan về bộ dữ liệu ảnh vệ tinh.

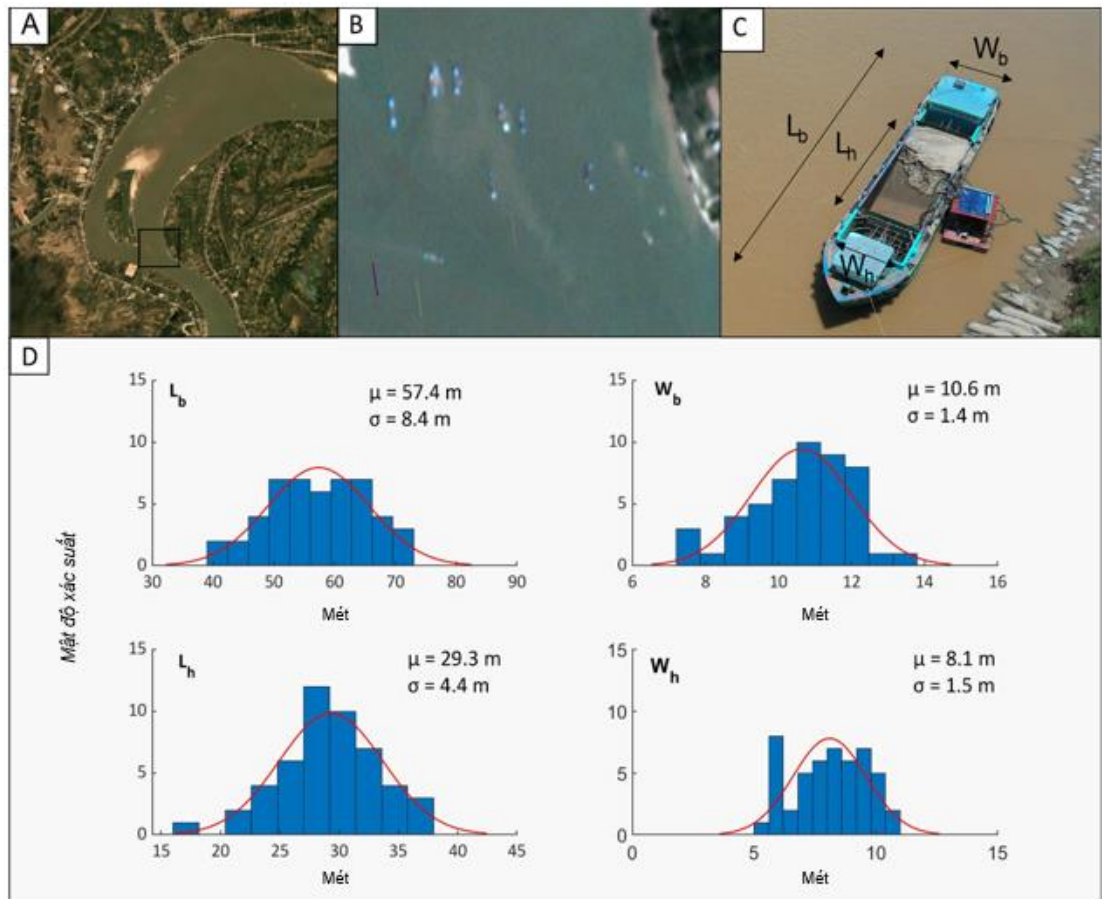
| Dữ liệu | Loại | Độ phân giải và phạm vi không gian | Tần suất và khoảng thời gian | Tính khả dụng | Ứng dụng trong nghiên cứu |
|-------------|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Sentinel-1 | SAR | 10 m (Phạm vi toàn cầu) | 12 ngày (2014 – 2022) | Miễn phí | (Gruel, và cộng sự, 2022) |
| Sentinel-2 | Quang học | 10 m (Phạm vi toàn cầu) | 5 ngày (2015 – Hiện tại) | Miễn phí | Trong nghiên cứu này |
| Landsat-1 | Quang học | 60 m (Phạm vi toàn cầu) | 18 ngày (1972 – 1978) | Miễn phí | - |
| Landsat-2 | Quang học | 60 m (Phạm vi toàn cầu) | 18 ngày (1975 – 1982) | Miễn phí | - |
| Landsat-3 | Quang học | 60 m (Phạm vi toàn cầu) | 18 ngày (1978 – 1983) | Miễn phí | - |
| Landsat-4 | Quang học | 30 m (Phạm vi toàn cầu) | 16 ngày (1982 – 1993) | Miễn phí | - |
| Landsat-5 | Quang học | 30 m (Phạm vi toàn cầu) | 16 ngày (1984 – 2013) | Miễn phí | - |
| Landsat-7 | Quang học | 30 m (Phạm vi toàn cầu) | 16 ngày (1999 – 2022*) | Miễn phí | - |
| Landsat-8 | Quang học | 30 m (Phạm vi toàn cầu) | 16 ngày (2013 – Hiện tại) | Miễn phí | (Gruel, và cộng sự, 2022) |
| Landsat-9 | Quang học | 30 m (Phạm vi toàn cầu) | 8 ngày (2021 – Hiện tại) | Miễn phí | - |
| ICEYE | SAR | 0.5 m – 3 m (Local extent) | Hàng ngày (2018 – Hiện tại **) | Theo yêu cầu | - |
| PlanetScope | Quang học | 3 m – 5 m (Phạm vi toàn cầu) | Hàng ngày (2016 – Hiện tại) | Theo yêu cầu | (Hackney, và cộng sự, 2021) |

* Lỗi bộ hiệu chỉnh dòng quét (Scan Line corrector - SLC) xảy ra vào năm 2003.
 ** Toàn bộ khoảng thời gian không được lưu

Các bộ dữ liệu vệ tinh có thể được phân thành hai loại: ảnh quang học (đa phổ) và ảnh Radar khẩu độ tổng hợp (SAR). Phát hiện quang học (đa phổ), dựa trên hệ số phản xạ của bức xạ mặt trời, có thể được sử dụng để cung cấp hình ảnh vào ban ngày và khi bầu trời quang đãng. Ngoài ra, có thể sử dụng tính năng phát hiện SAR để thu được hình ảnh không phụ thuộc vào thời gian trong ngày và điều kiện thời tiết. Do đó, SAR có thể được sử dụng vào ban đêm và mùa gió mùa. Hơn nữa, các tàu nhỏ hơn có thể được phát hiện so với phát hiện quang học. Tuy nhiên, do thông tin phổ hạn chế, việc phân loại tàu khó hơn, sự hiện diện của nhiễu lốm đốm có thể dẫn đến nhiều kết quả sai và sự lan rộng của tán xạ ngược dẫn đến độ không chắc chắn lớn hơn trên diện tích của tàu.

Các phương pháp ước tính trữ lượng cát khai thác ở ĐBSCL được áp dụng trong tài liệu.

Hackney và cộng sự (2021) và Gruel và cộng sự (2022) đã áp dụng các phương pháp viễn thám để ước tính khối lượng cát khai thác ở ĐBSCL Việt Nam. Các phương pháp này chủ yếu khác nhau ở cách tiếp cận để chuyển đổi số lượng tàu sang ước tính khối lượng cát được khai thác.



Hình 3-29: A: Hình ảnh PlanetScope về khu vực quan tâm, B: Phóng to A, C: Định nghĩa về kích thước tàu, D: Kích thước tàu từ nghiên cứu của Hackney và cộng sự, (2021)

Phương pháp đầu tiên dựa trên kích thước tàu, theo Hackney và các cộng sự (2021) như được trình bày trong Hình 3-29. Các điểm màu trích xuất từ hình ảnh vệ tinh đã được lọc để có chiều rộng từ 6 đến 15 m và chiều dài từ 30 đến 80 m. Vì tất cả các tàu đều có hình dạng thuôn dài nên hệ số hình dạng có chiều cao lớn hơn 3,5 lần chiều rộng đã được sử dụng để lọc các tàu và tất cả các điểm màu gần bờ sông dưới 100 m đều bị loại bỏ. Điều này đảm bảo tất cả các tàu không hoạt động được lọc đi, ngay cả khi chúng vuông góc với bờ. Vì cát được chứa trong các hầm chứa của tàu nên tỷ lệ phần trăm diện tích chứa cát của tàu được tính là 39%, bằng cách chia diện tích hầm trung bình cho diện tích tàu trung bình dựa trên các kích thước được liệt kê trong Hình 3-29. Để chuyển đổi diện tích thành thể tích, chiều cao tàu trung bình là 7 m đã được sử dụng. Mỗi tàu được giả định là đầy cát một lần mỗi ngày. Ngoài ra, số lượng tàu trong một ngày cụ thể được giả định là không đổi cho đến khi có hình ảnh vệ tinh tiếp theo (Hackney và các cộng sự., 2021). Phương pháp này không tính đến các nhóm thuyền (tức là các thuyền được neo hoặc buộc gần nhau) vì chúng được lọc đi vì kích thước của các nhóm thuyền vượt quá kích thước được sử dụng trong điều kiện lọc.

Phương pháp thứ hai phân loại tàu thành 3 nhóm dựa trên kích thước trong bài báo của Gruel và các cộng sự (2022):

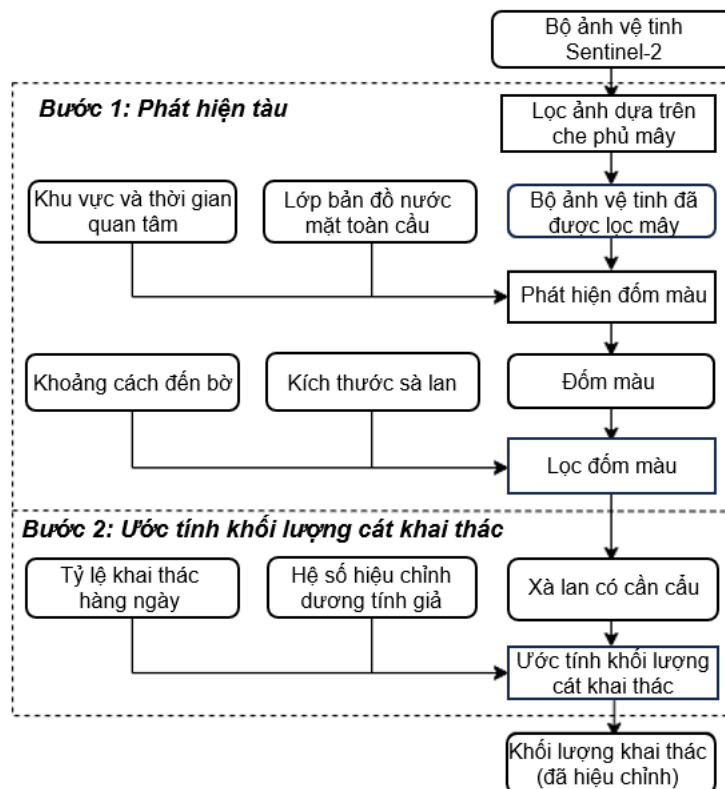
- Sà lan có cần cẩu: Chiều dài: 30-44 m; Diện tích: 352-548 m²
- Sà lan vận tải: Chiều dài: 44-50 m; Diện tích: 505-611 m²
- Tàu màu xanh: Chiều dài: 39-55 m; Diện tích: 288-464 m²

Sau khi lọc các tàu theo nhiều nhóm, Gruel và cộng sự (2022) tính toán ước tính khối lượng cát khai thác với giả định sà lan có cần cẩu chiếm một phần ba tổng diện tích. Sử dụng các kỹ thuật xử lý hậu kỳ do Gruel và cộng sự đề xuất (2022) và Hackney và cộng sự (2021) có nhiều thách thức vì nhiều lý do. Đầu tiên, mối tương quan giữa số lượng tàu được phát hiện và hoạt động khai thác cát có thể không ngoại suy tốt sang các khu vực khác do các hoạt động không đồng nhất ở các địa điểm khác nhau và hiện tại chúng tôi không có đủ thông tin để xác minh giả thuyết này. Thứ hai, hình ảnh quang học có độ phân giải cao đa thời gian không có sẵn ở

phạm vi không gian và độ phân giải thời gian cần thiết cho toàn bộ ĐBSCL trong những năm quan tâm. Tuy nhiên, được thúc đẩy bởi hai phương pháp nghiên cứu này, chúng tôi đã làm theo một phương pháp thay thế dựa trên việc phân tích lại hình ảnh Sentinel-2 và phát hiện các sà lan đang hoạt động có cần cẩu. Trong phần sau, chúng tôi mô tả các giả định và phát hiện liên quan đến ước tính viễn thám về các hoạt động khai thác cát trong ĐBSCL.

3.3.2 Phương pháp nghiên cứu

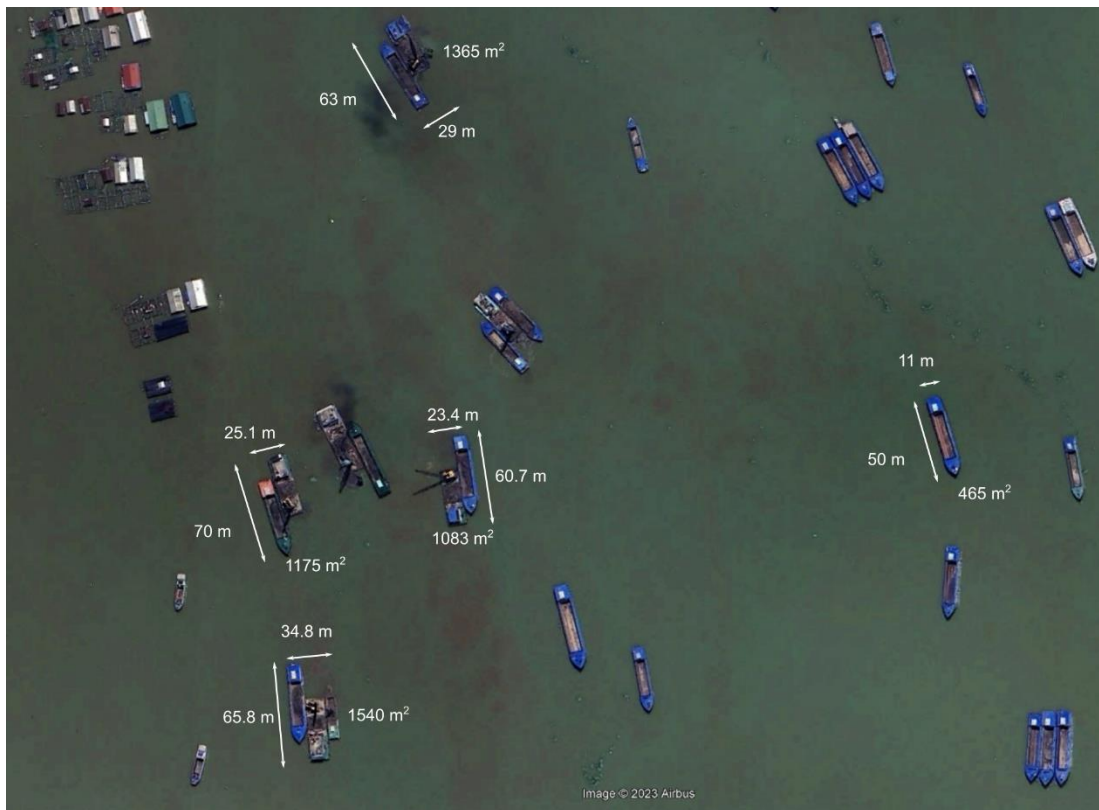
Phương pháp được áp dụng trong nghiên cứu bao gồm ba bước: 1) phát hiện sà lan đang hoạt động có cần cẩu dựa trên hình ảnh vệ tinh và 2) chuyển đổi số lượng tàu khai thác thành ước tính khối lượng cát khai thác. Các bước này đã được triển khai trong khuôn khổ Google Earth Engine. Google Earth Engine tích hợp khả năng phân tích ở quy mô hành tinh với một bộ sưu tập lớn các bộ dữ liệu không gian địa lý và hình ảnh vệ tinh (Gorelick và cộng sự, 2017). Khu vực quan tâm (ĐBSCL) được chia thành các ô bao phủ các con sông chính và các nhánh sông của ĐBSCL. Trong phân tích này, khối lượng cát khai thác hàng năm được ước tính trong khoảng thời gian từ ngày 01/01/2017 đến ngày 01/01/2023. Hình 3-29 khái niệm hóa các bước thực hiện để ước tính khai thác cát dựa trên ảnh vệ tinh Sentinel-2.



Hình 3-29: Phương pháp ước tính khối lượng khai thác cát.

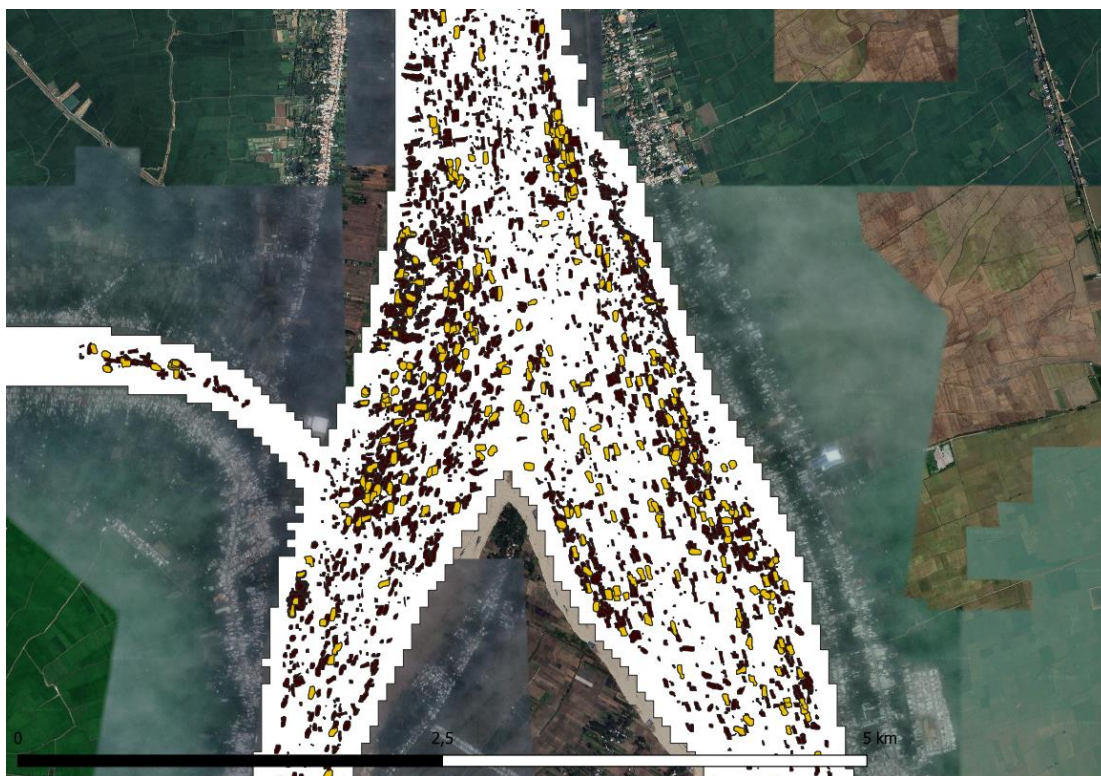
Phát hiện tàu: Bộ dữ liệu hình ảnh quang học Sentinel-2 (quang học) đã được chọn dựa trên tính khả dụng của nó. Lý tưởng nhất là bộ dữ liệu PlanetScope sẽ được sử dụng trong nghiên cứu này, như đã được thực hiện bởi (Hackney và cộng sự, 2021) với độ phân giải không gian và thời gian cao hơn. Tuy nhiên, bộ dữ liệu này là tài nguyên riêng tư, chỉ có sẵn sau khi mua, điều này được coi là không khả thi đối với dự án ở quy mô yêu cầu. Để phát hiện các tàu từ hình ảnh Sentinel-2 (quang học), trước tiên, vị trí của dòng sông được xác định bằng cách sử dụng lớp bản đồ nước bề mặt toàn cầu của JRC (Pekel, Cottam, Gorelick, 2017). Chỉ số sự khác biệt chuẩn hóa nước (NDWI) được tính toán trong khu vực sông và thuật toán ngưỡng thích ứng được sử dụng để phân chia nền nước khỏi các thành phần không phải nước trong sông (tương tự như Donchyts và cộng sự, 2016). Những đốm màu chưa được lọc này chứa các tàu, các mảnh đất và các kết quả phát hiện sai khác (các phần tử đám mây/các yếu tố bóng đổ vượt qua bộ lọc ngưỡng).

Chúng tôi tập trung vào việc phát hiện các sà lan đang hoạt động có cần cầu để ước tính sự hiện diện của các hoạt động khai thác cát. Khi kiểm tra các sản phẩm vệ tinh có độ phân giải cao, chúng tôi có thể thấy rằng hầu hết thời gian các sà lan hoạt động có cần cầu đều có tàu liên quan đến việc bốc dỡ hàng. Điều này dẫn đến các đốm màu lớn hơn một tàu riêng lẻ với kích thước dài 50-80 m, chiều rộng 20-40 m và diện tích khu vực xuất hiện khoảng 1000-1600 m² (xem Hình 3-30).



Hình 3-30: Sơ đồ hình học và kích thước sà lan khai thác hoạt động từ hình ảnh có độ phân giải cao (Google earth basemap, Airbus, 2023)

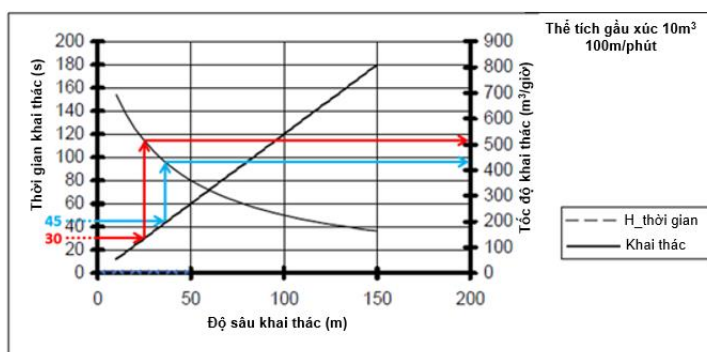
Bằng cách sử dụng những xem xét về mặt hình học này, chúng tôi đã lọc các yếu tố tuân thủ các kích thước và nằm cách bờ hơn 100 m. Theo cách tiếp cận của Hackney và cộng sự (2021), số lượng sà lan hoạt động có cần cầu trong một ngày cụ thể được giả định là không đổi cho đến khi có được hình ảnh vệ tinh tiếp theo. Hình 3-31 cho thấy các sà lan được lọc với các đốm màu hoạt động của cần cầu (màu cam) từ các đốm màu được phát hiện hàng năm ở một đoạn sông Mekong vào năm 2021 dựa trên các tiêu chí lọc được mô tả trước đó.



Hình 3-31: Các chấm màu được phát hiện là các tàu tiềm năng (các chấm màu nâu) và lọc sà lan có cần cẩu (các chấm màu cam) cho một đoạn sông Mekong trong năm 2021.

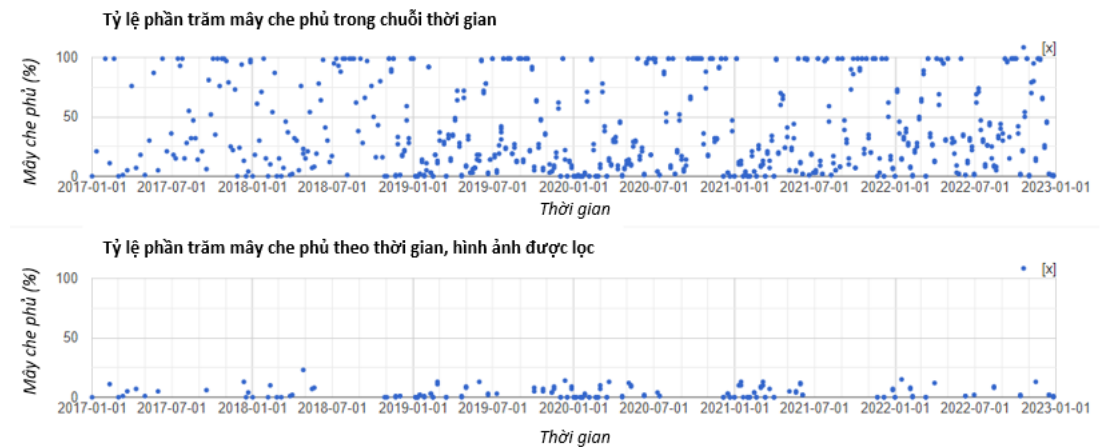
Ước tính khối lượng khai thác cát: Sau khi phân loại các tàu khai thác, việc ước tính khối lượng khai thác cát được thực hiện bằng cách giả định số ngày hoạt động (tàu khai thác được coi là hoạt động ở vị trí được phát hiện cho đến khi có hình ảnh tiếp theo). Sau đó, bằng cách ấn định tốc độ khai thác (tỷ lệ khai thác) cho một tàu duy nhất (xem đoạn tiếp theo), tốc độ khai thác cho tổng số tàu mỗi ngày được ước tính. Lưu ý rằng trong ước tính của chúng tôi, chúng tôi giả định sản lượng bằng 0 trong dịp nghỉ Tết Nguyên đán ở Việt Nam.

Ước tính tỷ lệ khai thác: Để ước tính tỷ lệ khai thác cho các tàu khai thác (sà lan có cần cẩu) điển hình đang hoạt động tại ĐBSCL, chúng tôi đã sử dụng biểu đồ sản xuất của Hiệp hội Nạo vét Trung ương (2023). Biểu đồ này kết hợp thể tích gầu khai thác (thường thể tích gầu sẽ là 2,5-3 m³ tại ĐBSCL) và thời gian khai thác một gầu (30-45 giây dựa trên quan sát) để đưa ra ước tính khối lượng khai thác theo giờ. Lưu ý rằng biểu đồ dựa trên thể tích lấy 10 m³. Điều này có nghĩa là ước tính theo giờ cần được điều chỉnh tuyến tính cho kích thước gầu nhỏ hơn là 2,5-3 m³ tại ĐBSCL. Điều này dẫn đến phạm vi khai thác từ 967 đến 1530 m³/ngày. Các giả định về thời gian cẩu (khai thác 1 gầu) và thể tích gầu được dựa trên thông tin thứ cấp từ chính quyền tỉnh và quan sát thực địa.



Hình 3-32: Sơ đồ khai thác của tàu khai thác 10 m³ dựa trên thời gian khai thác một gầu và độ sâu khai thác (Hiệp hội nạo vét trung ương, 2023).

Hiệu chỉnh độ che phủ của đám mây: Quy trình lọc đám mây (được mô tả trong Donchyts và cộng sự 2022) đã được áp dụng để lọc hình ảnh Sentinel-2. Phương pháp này lọc hình ảnh có đám mây dựa trên số liệu thống kê cục bộ về độ che phủ của đám mây và sự phân bố độ sáng theo thời gian trong ảnh. Điều này đảm bảo rằng các hình ảnh được xếp cạnh nhau hầu như không có mây. Các tàu được phát hiện trong những hình ảnh này và theo Hackney và cộng sự (2021), số lượng tàu khai thác cát hoạt động hàng ngày được giả định là không đổi cho đến khi có hình ảnh mới.



Hình 3-33: Tỷ lệ mây che phủ tại khu vực gần Vĩnh Long (2017-2022), đối với (trên) loạt ảnh Sentinel 2 đầy đủ và (dưới) điều kiện không có mây đã được lọc.

Cuối cùng, Bảng 3-11 cung cấp cái nhìn tổng quan về sự khác biệt giữa phương pháp được áp dụng trong nghiên cứu này so với Hackney và cộng sự (2021) và Gruel và cộng sự (2022).

Bảng 3-11: Tổng quan về sự khác biệt giữa phương pháp được áp dụng trong nghiên cứu này, Hackney và cộng sự (2021) và Gruel và cộng sự (2022).

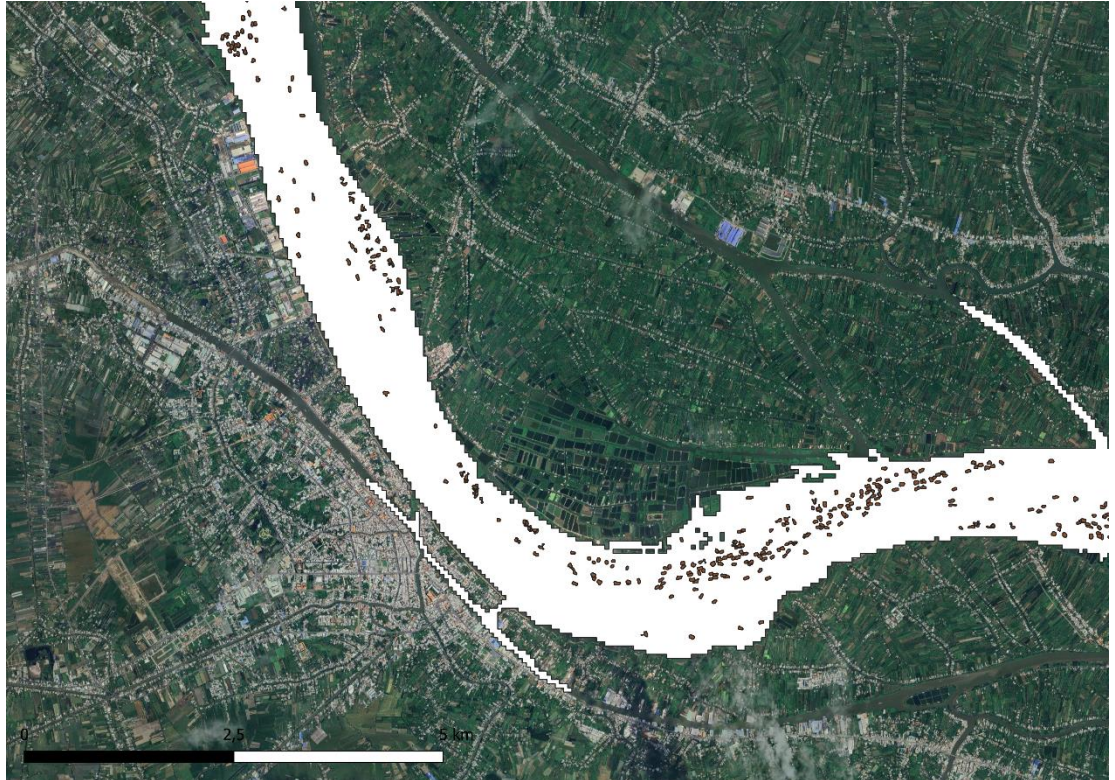
| Các bước của phương pháp | Nghiên cứu này | Hackney và cộng sự (2021) | Gruel và cộng sự (2022) |
|---|--|---|---|
| Phát hiện tàu dựa trên ảnh vệ tinh | Phát hiện dựa trên ảnh Sentinel-2 (Quang học) và kích thước của sà lan có cần cầu. | Phát hiện dựa trên ảnh PlanetScope (Quang học) và kích thước của tàu khai thác cát. | Phát hiện dựa trên ảnh Sentinel-1 (SAR) và Landsat-8 (Quang học) và kích thước của 3 loại sà lan. |
| Chuyển đổi số lượng tàu sang ước tính khối lượng cát khai thác | Chuyển đổi dựa trên tốc độ khai thác của sà lan có cần cầu. | Chuyển đổi dựa trên khối lượng (sức chở) của tàu khai thác cát. | Chuyển đổi dựa trên khối lượng sà lan vận chuyển và thuyền màu xanh. |

3.3.3 Kết quả

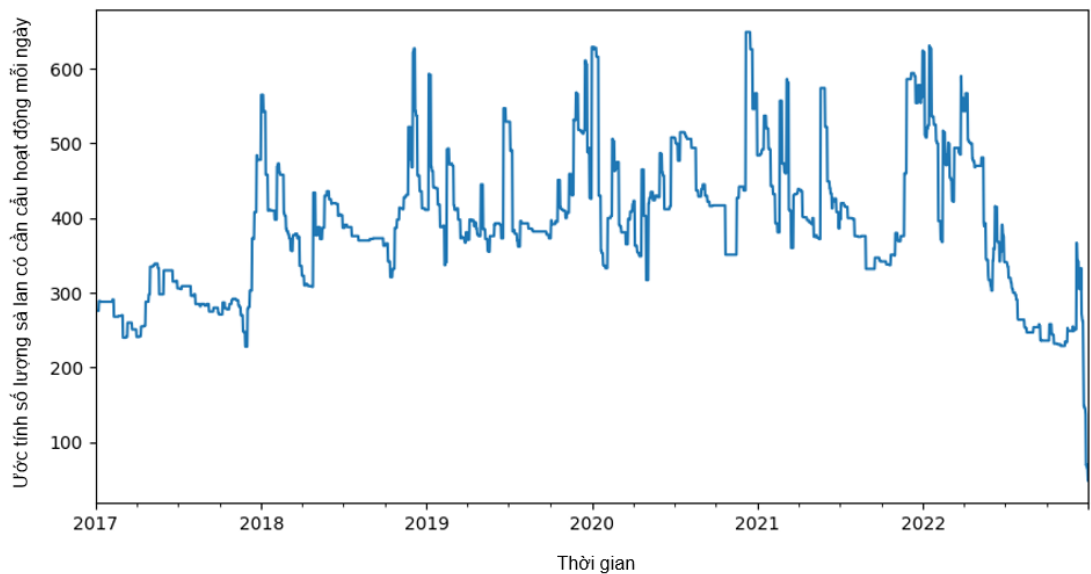
Phần này trình bày các kết quả thu được bằng cách sử dụng phương pháp được mô tả trong phần trước. Khối lượng khai thác cát hàng năm từ ngày 01/01/2017 đến ngày 01/01/2023. Hình 3-34 cho thấy các đốm màu được lọc (dưới dạng đa giác tối) vào năm 2022 cho một đoạn sông Mekong. Hình này thể hiện sự phân bố địa phương của các sà lan có khả năng hoạt động trong cả năm.

Hình 3-35 cho thấy số lượng sà lan hoạt động có cần cầu hàng năm (tức là sau khi lọc) được phát hiện trong khoảng thời gian từ ngày 01/01/2017 đến ngày 01/01/2023 tại ĐBSCL. Số lượng tàu được phát hiện giảm hàng năm từ tháng 4 đến tháng 9, đạt mức tối thiểu vào khoảng tháng 9. Mức giảm hàng năm này rất có thể liên quan đến việc tăng độ che phủ của mây hoặc giảm hoạt động do lưu lượng nước sông dâng cao, do đó khả năng khai thác kém hơn. Bản

đồ nhiệt của sà lan có cần cầu được phát hiện, để xem độ phân giải không gian của tàu được trình bày trong Phụ lục-B.



Hình 3-34: Sà lan được lọc với các tàu (đốm màu) được phát hiện trong khoảng thời gian từ ngày 01 tháng 01 năm 2022 đến ngày 31 tháng 12 năm 2022 đối với một đoạn sông Mekong.



Hình 3-35: Số lượng sà lan hoạt động có cần cầu được phát hiện từ ngày 01/01/2017 đến ngày 01/01/2023 tại Đồng bằng sông Cửu Long của Việt Nam (tổng hợp hàng ngày của tất cả các ô).

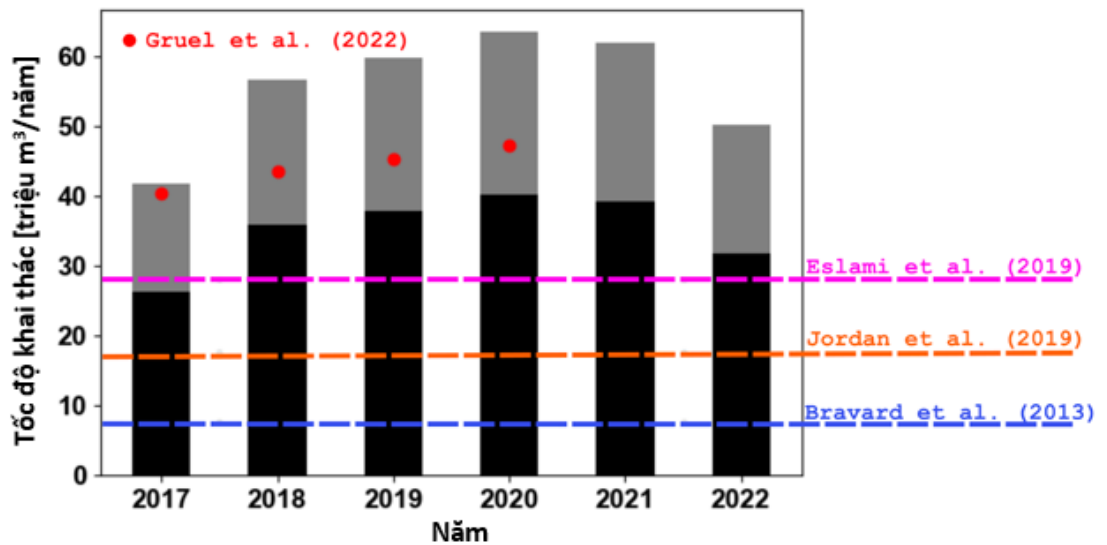


Hình 3-36: Sà lan có cần cầu hoạt động được phân loại thủ công so với tàu vận tải neo đôi (thể hiện các đặc điểm hình học giống nhau trong hình ảnh S2), khu vực ví dụ.

Ngoài ra, việc phát hiện các tàu khai thác đang hoạt động còn phụ thuộc vào khía cạnh hình học. Do độ phân giải hạn chế của hình ảnh Sentinel-2 (10 m), rất khó để phân biệt giữa sà lan và cần cầu có gắn tàu chở hàng và nhiều tàu neo đậu cùng nhau. Do đó, các tàu hoạt động được lọc có khả năng chứa kết quả dương tính giả (kết quả sai) mà không thể xác định chắc chắn chỉ từ hình ảnh Sentinel-2. Dựa trên các tàu được quan sát, được ghi lại trong chiến dịch SBP trên 550 km, chúng tôi ước tính hệ số hiệu chỉnh là 26%. Bằng cách so sánh thủ công các hình ảnh vệ tinh vào đầu tháng 4 năm 2022 với các tàu được quan sát, chúng tôi đã xác định được nhiều nguồn dương tính giả khác nhau, chẳng hạn như trang trại nuôi cá, khu vực có mật độ tàu thuyền cao và bóng của các đám mây trong ảnh (ví dụ: xem ví dụ trong Hình 3-36). Do đó, hệ số hiệu chỉnh của các tàu khai thác hoạt động hàng ngày là 0,26 đã được áp dụng để giảm thiểu số lượng phân loại sai.

Ước tính khối lượng cát khai thác

Hình 3-37 thể hiện khối lượng cát khai thác hàng năm ước tính từ năm 2017 đến năm 2022 tại ĐBSCL. Do sự không chắc chắn và hạn chế trong dữ liệu và phân tích có sẵn, chúng tôi đưa ra tốc độ khai thác hàng năm dựa trên tốc độ khai thác tiềm năng của sà lan khai thác (967 đến 1500 m³/ngày). Con số này từ năm 2017 đến năm 2022 nằm trong cùng phạm vi khối lượng ước tính của Gruel và cộng sự (2022). Khối lượng cát được xác định trong nghiên cứu này dường như phù hợp với khối lượng được xác định bởi Gruel. Khối lượng hàng năm dường như thay đổi theo thời gian. Tuy nhiên, do tính không chắc chắn nên không thể phân biệt xu hướng dựa trên những kết quả này.



Hình 3-37: Khối lượng cát khai thác hàng năm được ước tính trong nghiên cứu này từ năm 2017 đến ngày 01/01/2023 ở biểu đồ thanh màu đen (tối thiểu) và màu xám (tối đa) so với những ước tính được xác định bởi các nghiên cứu khác trước đây.

3.3.4 Thảo luận

Khối lượng khai thác cát hàng năm ước tính từ năm 2017 đến năm 2021 nằm trong khoảng 35 đến 55 triệu m^3 /năm, phù hợp với phát hiện của Gruel và cộng sự (2022) ước tính sản lượng khai thác vào khoảng 40-45 triệu m^3 /năm. Con số này vượt quá Eslami và cộng sự, (2019b) là 28 triệu m^3 /năm dựa trên giấy phép khai thác cát. Việc ước tính khối lượng khai thác cát từ ảnh vệ tinh KHÔNG phải là không có hạn chế. Độ phân giải không gian thấp (10 m) của hình ảnh vệ tinh truy cập mở Sentinel-2 gây khó khăn cho việc phát hiện các tàu thuyền có chiều dài theo thứ tự vài pixel (ví dụ: 30 đến 44 m) và khó phân biệt giữa các loại tàu. Ví dụ, điều này gây khó khăn cho việc phát hiện các tàu thuyền nhỏ khai thác bằng máy bơm. Đây là một nguồn sai sót trong việc phát hiện tàu chắt chắn sẽ ảnh hưởng đến ước tính này. Hơn nữa, trong phạm vi nghiên cứu này, chúng ta cần dựa vào các phương pháp lọc đơn giản hóa để phân loại tàu. Các phương pháp tiên tiến hơn, có xem xét các chỉ số quang phổ hoặc thuật toán nhận dạng mẫu đã được đào tạo (phát hiện đối tượng dựa trên học sâu) có thể nâng cao khả năng phân loại tàu, mặc dù có thể cho rằng độ phân giải tương đối thấp của Sentinel-2 vẫn sẽ đặt ra thách thức đáng kể đối với các thuật toán phân loại được giám sát.

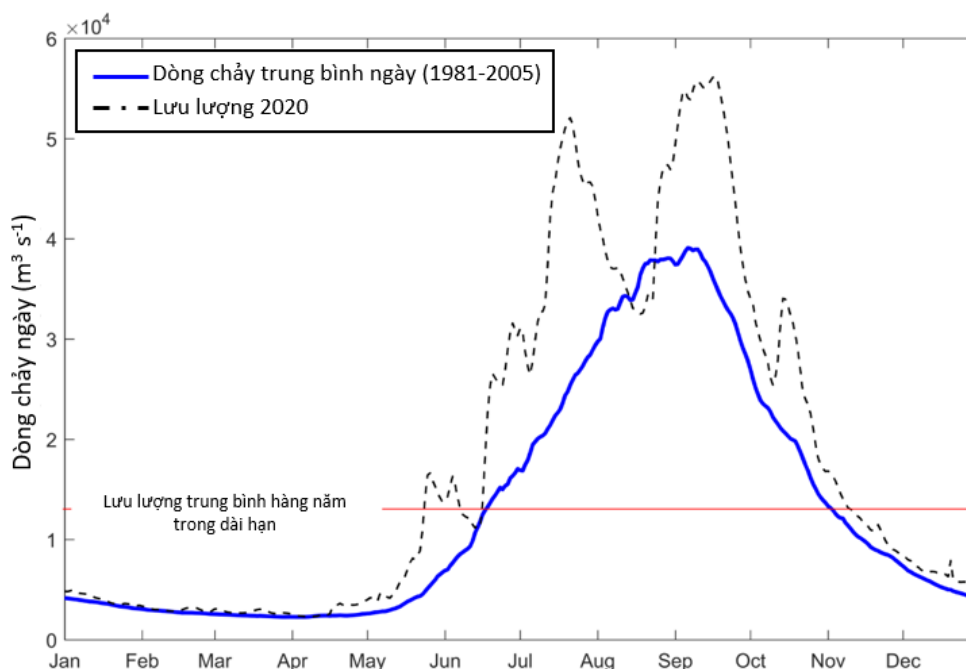
Để tiếp nối bước tiến đầu tiên này, việc cải thiện ước tính về hoạt động khai thác cát có thể sẽ yêu cầu các nguồn dữ liệu có độ phân giải cao hơn (ví dụ: ICEYE, Planet, Pleiades hoặc Maxar), mặc dù việc mua lại các sản phẩm này ở quy mô yêu cầu (toàn bộ ĐBSCL cho khung thời gian nhiều năm) vẫn là một thách thức cả về tính đầy đủ của hồ sơ lịch sử và chi phí mua hình ảnh. Mặt khác, sẽ rất thú vị khi khám phá các hình ảnh SAR (ví dụ: ICEYE / Sentinel-1) để phát hiện các tàu, như đề xuất của Gruel và cộng sự (2022). Ưu điểm của việc sử dụng SAR là có thể sử dụng vào ban đêm và mùa mưa (có mây hoặc âm u). Tuy nhiên, độ phân giải Sentinel-1 (10 m, độ phân xạ SAR) không đủ để phân biệt giữa các loại tàu, trong khi ICEYE có thể làm được điều đó do có độ phân giải cao hơn (0,5 – 3 m), tuy nhiên điều này vẫn còn phải được khám phá trong các nghiên cứu tiếp theo.

4 Mô hình vận chuyển cát (WP2)

4.1 Giới thiệu

4.1.1 Mô tả khu vực và động lực dòng chảy

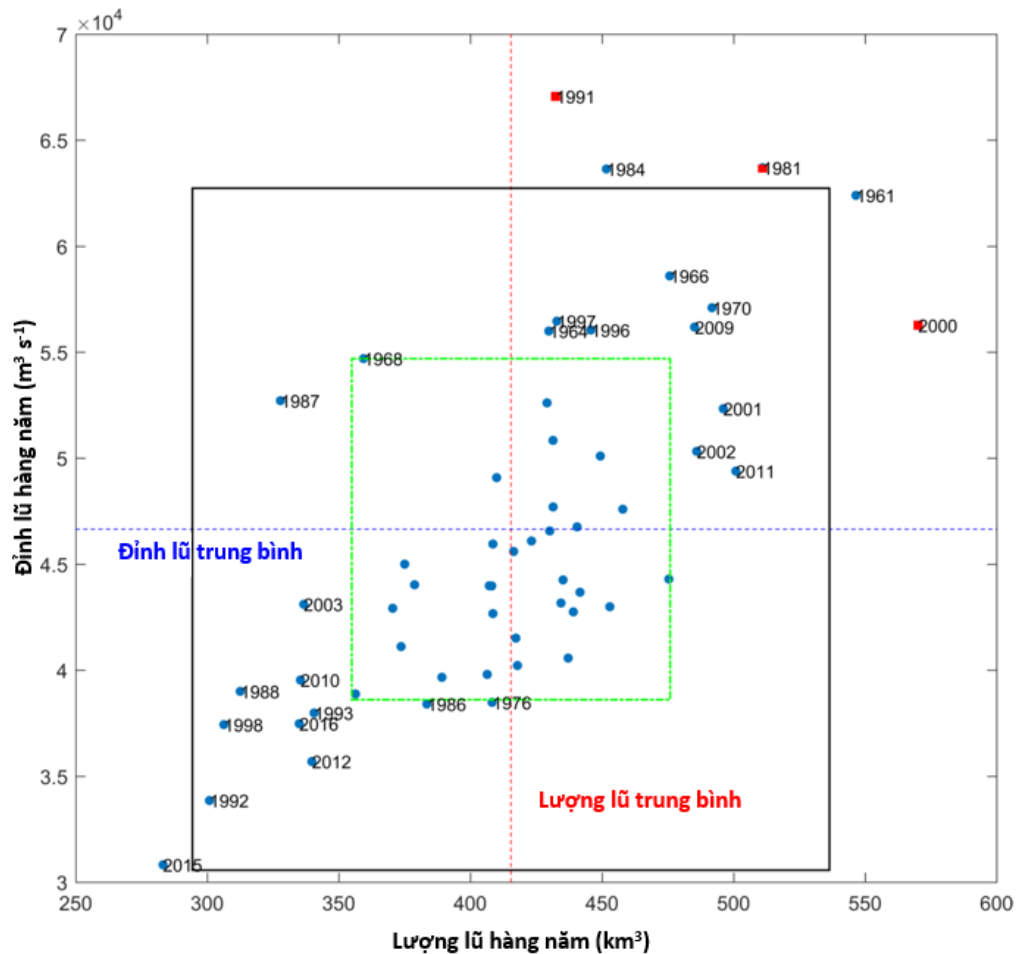
Đồng bằng sông Cửu Long của Việt Nam rất quan trọng đối với sinh kế và an ninh lương thực của người dân địa phương. Khu vực này có khoảng 17 triệu dân (Văn và cộng sự, 2012). Trong đó, ĐBSCL được coi là “vựa lúa” của Đông Nam Á. ĐBSCL có diện tích 39.700 km² và 60% trong số đó được dành cho nông nghiệp (Văn và cộng sự, 2012). Nguồn cung cấp nước dồi dào và đất đai màu mỡ của vùng đồng bằng (tương tự như các vùng đồng bằng khác trên toàn thế giới) cung cấp lương thực cho nông nghiệp trên quy mô lớn. Sông Mekong cung cấp 340-450 km³ nước hàng năm (Eslami và cộng sự, 2021a) và cung cấp 40-80 triệu tấn trầm tích cho đồng bằng của nó (MRC, 2005; Koehnken, 2014; Thành và cộng sự, 2020). Các nghiên cứu gần đây (Kummu và Varis, 2007; Mạnh và cộng sự, 2014; Lu và cộng sự, 2014; Darby và cộng sự, 2016) đã chỉ ra rằng trầm tích sông ngòi ở đồng bằng đã giảm đáng kể trong hai thập kỷ qua. Điều này phần lớn liên quan đến sự phát triển của các đập thủy điện dòng chính ở thượng nguồn và tác động của nó đến việc cung cấp trầm tích mịn (bùn và đất sét) cho đồng bằng. Các con đập không chỉ giữ lại trầm tích mà còn tác động đến chế độ thủy văn của sông Mekong. (Lauri và cộng sự, 2012) đã chỉ ra rằng các hồ chứa này có thể làm tăng dòng chảy ở Kratie lên 25-160% trong mùa dòng chảy kiệt và giảm 24% dòng chảy trong mùa dòng chảy cao. Lũ lụt hàng năm là nguồn cung cấp nước ngọt chính cho ĐBSCL, trong khi trầm tích được cung cấp đóng vai trò là nguồn phân bón tự nhiên và có giá trị cho sản xuất nông nghiệp (Chapman và Darby, 2016). Tuy nhiên, do biến đổi khí hậu và sự can thiệp đáng kể của con người, ĐBSCL phải đối mặt với những thách thức liên quan đến nguồn cung cấp nước ngọt và trầm tích sông ngòi, do đó là sinh kế tổng thể của vùng. Chương này đề cập đến sự di chuyển của cát (như một phần trầm tích) đến đồng bằng, phân bố trong đồng bằng và rời khỏi đồng bằng như một phần trong ngân sách cát toàn diện của ĐBSCL.



Hình 4-1: Biến thiên theo thời gian của lưu lượng nước hàng ngày tại Kratie (dữ liệu từ Darby và cộng sự, 2016).

Đồng bằng sông Cửu Long có thể được phân chia về mặt không gian thành các phần bên trong và bên ngoài. Phần bên trong bị chi phối bởi các quá trình sông ngòi, trong khi phần bên ngoài bị chi phối bởi các quá trình biển, bao gồm thủy triều, sóng và nước dâng (Ta và cộng sự, 2002; Eslami và cộng sự, 2019a). ĐBSCL được đặc trưng tính thời vụ theo gió mùa. Hình 4-1 cho thấy lưu lượng nước thay đổi từ 1700 đến 40 000 m³ s⁻¹ giữa mùa dòng chảy kiệt và

mùa dòng chảy cao (Frappart và cộng sự, 2006; Le và cộng sự, 2007; MRC, 2009; Wolanski và cộng sự, 1996). Trong mùa dòng chảy cao, lưu lượng dòng chảy cao và mực nước sông cao làm lũ lụt các vùng đồng bằng ngập lũ của Campuchia và Việt Nam, mang theo một lượng lớn trầm tích và mảnh vụn. Trong mùa dòng chảy kiệt, động lực thủy triều chiếm ưu thế ở đồng bằng, các kênh cửa sông bị ảnh hưởng bởi lượng bùn lớn hơn và độ mặn xâm nhập vào các cửa sông tới ~50 km (Eslami và cộng sự, 2019a, 2021a). Hình 4-1 và Hình 4-2 thể hiện sự biến đổi lưu lượng hàng năm và biến động lưu lượng qua các năm tại Kratie, Campuchia.



Hình 4-2: Đỉnh và lưu lượng lũ hàng năm tại Kratie từ năm 1961 đến năm 2022. Các hộp màu xanh lá cây và màu đen biểu thị các năm hạn hán hoặc lũ lụt đáng kể (trung bình \pm SD) và cực đoan (trung bình \pm 2 SD) (SD đề cập đến độ lệch chuẩn).

4.1.2 Mô hình thủy động lực

Một số nghiên cứu mô hình đã được thực hiện nhằm tìm hiểu thủy động lực học và vận chuyển trầm tích ở Đồng bằng sông Cửu Long. Để lập mô hình ở quy mô toàn vùng đồng bằng, Wassmann và cộng sự (2004) đã thực hiện nghiên cứu đánh giá tác động của nước biển dâng đến sản xuất lúa gạo bằng mô hình số 1D (VRSAP). Kết quả cho thấy tình trạng ngập lụt ở ĐBSCL sẽ dịch chuyển đáng kể vào đất liền do mực nước biển dâng theo dự báo. Có thể kết luận rằng thủy triều đóng vai trò quan trọng trong việc thoát lũ ở ĐBSCL. Một mô hình ngập lụt tương tự đã được tìm thấy bởi (Văn và cộng sự, 2012). Họ cũng áp dụng mô hình thủy động lực 1D (ISIS) được MRC (Ủy ban sông Mekong) sử dụng để nghiên cứu sự thay đổi đặc điểm lũ lụt trong quá trình phát triển ở thượng nguồn và mực nước biển dâng. Kết quả là lũ lụt do thủy triều sẽ mạnh hơn khi mực nước biển dâng và có thể dẫn đến những thay đổi trong quá trình tích tụ trầm tích gần các cửa sông. (Eslami và cộng sự, 2019a) đã nghiên cứu vai trò của động lực thủy triều đối với sự phân chia dòng chảy ở các kênh cửa sông và định lượng tầm quan trọng của các kênh thứ cấp đối với động lực thủy triều của đồng bằng. Nghiên cứu đó kết luận rằng mặc dù mạng lưới các kênh sơ cấp và thứ cấp đóng góp không quá 1-2% tổng thể tích nước cửa sông (lãng phí thủy triều), nhưng nó có ảnh hưởng gần 10% đến biên độ thủy triều, tức là nếu không có chúng thì rất khó nắm bắt được động lực thủy triều theo chiều dọc

(mức nước) và chiều ngang (lưu lượng). (Mạnh và cộng sự, 2014) đã ước tính sự phân bố trầm tích không gian ở Đồng bằng sông Cửu Long bằng cách sử dụng mô hình MIKE11 để mô phỏng các con sông (1D) và vùng ngập lũ (gần 2D). Nghiên cứu chỉ ra rằng hơn một nửa (53%) trầm tích được vận chuyển đến các khu vực ven biển của ĐBSCL (qua Cần Thơ và Mỹ Thuận). Xing và cộng sự (2017) đã nghiên cứu động lực cát của nhánh Sông Hậu và những thay đổi hình thái. Mô hình của họ cho thấy tỷ lệ giữa vận tốc hướng biển và hướng đất liền sẽ tăng lên và hình thái học sẽ bị ảnh hưởng lớn trong bối cảnh mực nước biển dâng tương đối và sụt lún đồng bằng châu thổ. (Thành, 2021) đã có thể tính toán quỹ trầm tích của Đồng bằng sông Cửu Long Việt Nam dựa trên trầm tích kết dính mịn bằng mô hình Delft3D FM ở chế độ 2DH được xác thực dựa trên mực nước đo được, lưu lượng dòng chảy và nồng độ trầm tích lơ lửng. Trầm tích mịn bao phủ phần lớn trầm tích do sông Mekong cung cấp hàng năm. Dự án hiện tại áp dụng mô hình của (Thành, 2021) và bổ sung thêm việc vận chuyển các phần cát thô hơn.

4.1.3 Quan trắc dựa trên đặc điểm trầm tích

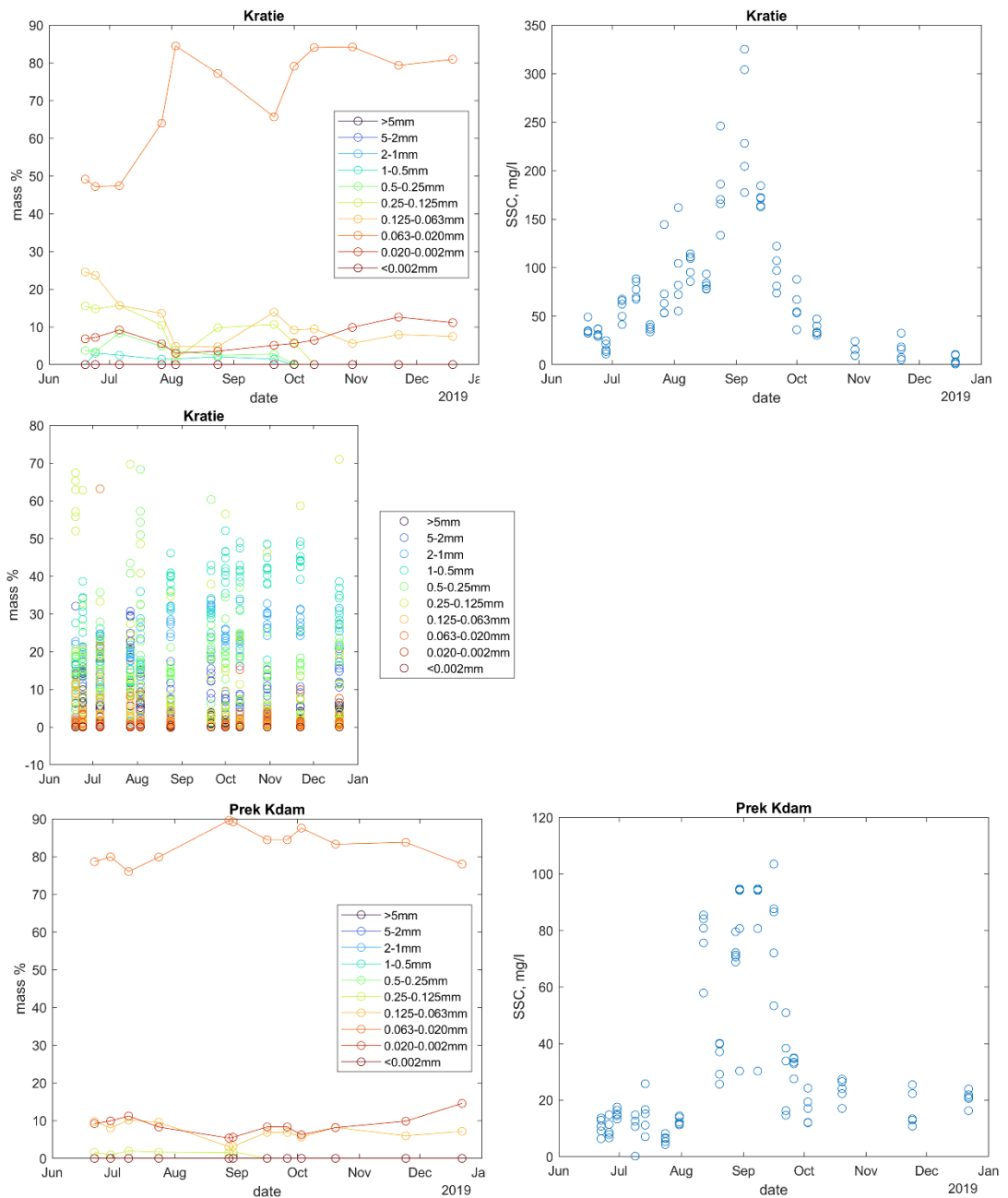
Hình 4-3 và Hình 4-4 trình bày các phép đo đặc hiếm hoi về phân bố kích thước trầm tích trong trầm tích lơ lửng và tải lượng đáy dọc theo sông Mekong cho năm 2018 và 2019 tại Kratie, Prek Kdam, Châu Đốc và Tân Châu (MRCs, sự trao đổi cá nhân). Để phân loại trầm tích, thang Wentworth được sử dụng, xem Bảng 4-1. Điều này cho thấy rằng:

- Tải lượng đáy tại Kratie (2019) bao gồm chủ yếu là cát trung bình đến mịn.
- Tải lượng lơ lửng tại Kratie và Prek Kdam (2019) chủ yếu là phù sa thô (~80%) với lượng cát mịn hạn chế (~10%).
- Tải lượng lơ lửng tại Tân Châu và Châu Đốc (2018-2019) chủ yếu là phù sa mịn/thô (~90%) trong khi SSC của cát mịn cao hơn một chút (lên đến 10%) trong năm 2018.

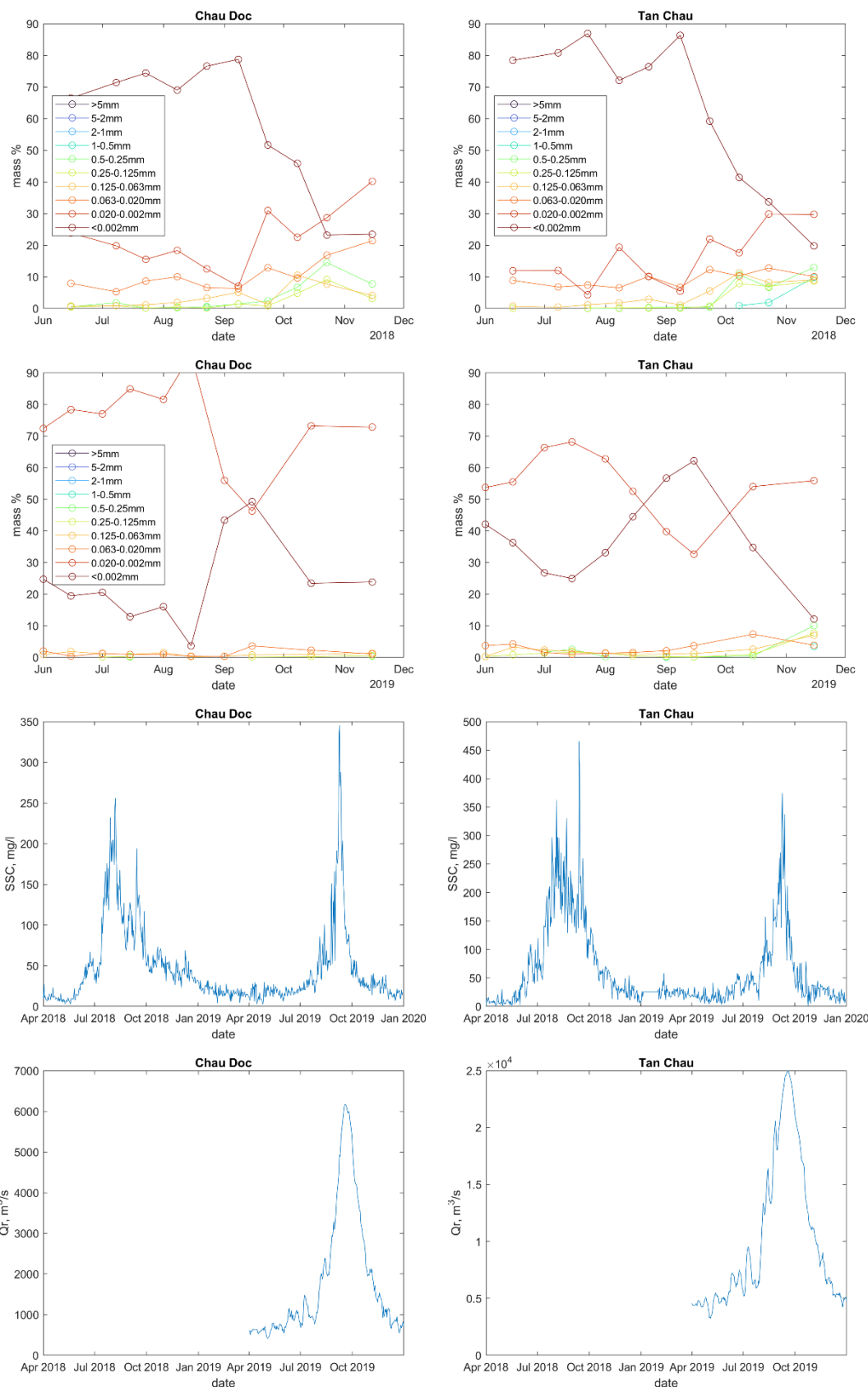
Nghiên cứu hiện tại tập trung vào vận chuyển cát. Những dữ liệu này cho thấy vận chuyển cát vẫn còn nhỏ so với vận chuyển hạt mịn (bùn và đất sét), và cát mịn chi phối cả tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng.

Bảng 4-1: Phân loại trầm tích (theo thang Wentworth)

| | | |
|----------------|-----------------|---------------|
| Sỏi | Đá cuội | >5mm |
| | Đá cuội mịn | 5-2mm |
| Cát | Rất thô | 2-1mm |
| | Thô | 1-0.5mm |
| | Trung bình | 0.5-0.25mm |
| | Mịn | 0.25-0.125mm |
| | Rất mịn | 0.125-0.063mm |
| Phù sa | Thô/ trung bình | 0.063-0.020mm |
| | Mịn/ rất mịn | 0.020-0.002mm |
| Đất sét | | <0.002mm |

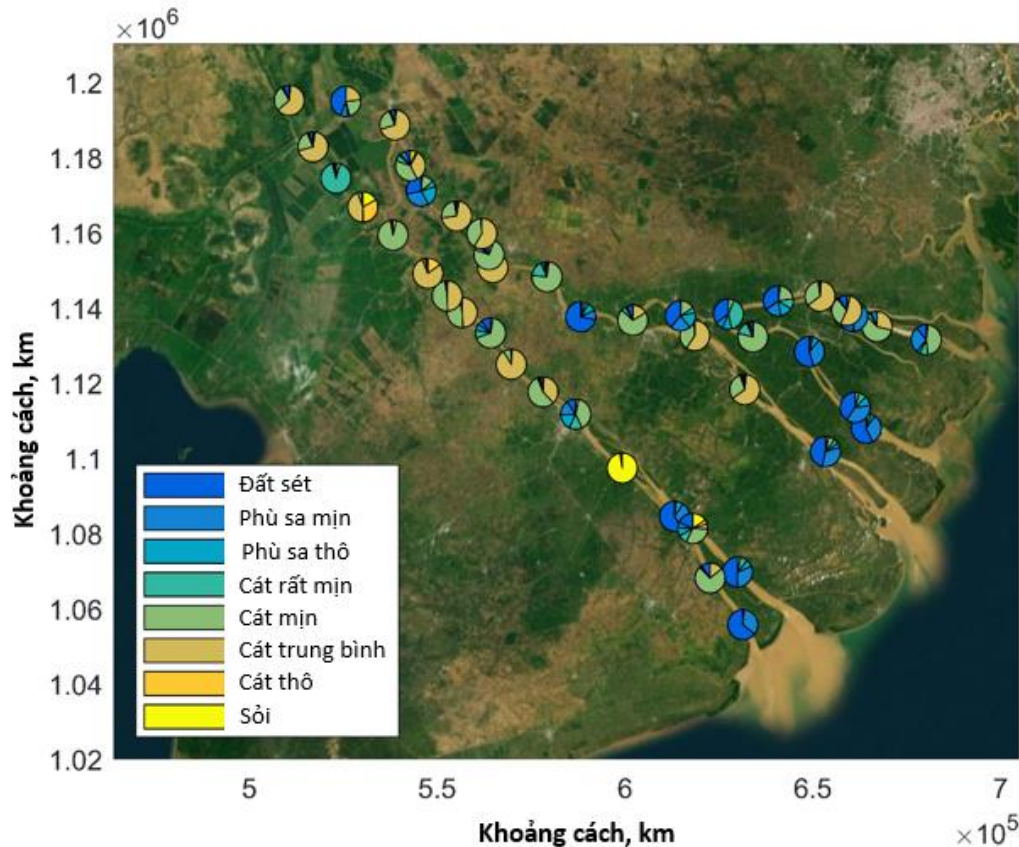


Hình 4-3: Tại Kratie, tỷ lệ phần trăm khối lượng của các thành phần trầm tích trong tải lượng lơ lửng 2019 và SSC tại 4 vị trí thủy trực (bảng trên) và tải lượng đáy (bảng giữa, lưu ý rằng có tới 10 mẫu được trình bày mỗi ngày); tại Prek Kdam, phần trăm khối lượng của các thành phần trầm tích trong tải lượng lơ lửng 2019 và SSC tại 4 vị trí thủy trực.



Hình 4-4: Tỷ lệ phần trăm khối lượng trầm tích trong trầm tích lơ lửng 2018 và 2019 (hàng 1 và 2), nồng độ trầm tích lơ lửng (hàng 3) và dòng chảy sông (hàng 4) cho Châu Đốc (ảnh bên trái) và Tân Châu (ảnh bên phải).

Các mẫu trầm tích trên bề mặt đáy được lấy trong dự án bằng cách sử dụng cuốc lấy mẫu (Hình 4-5) tương tự với các khảo sát của Gugliotta và cộng sự (2017) với vật liệu đáy cát trên khắp ĐBSCL và trầm tích mịn hơn, bùn hơn ở khu vực cửa sông. Phần lớn của hầu hết các mẫu trầm tích đáy bao gồm cát mịn (125-250 μm) đến trung bình (250-500 μm). Các mẫu trầm tích đáy cung cấp dấu hiệu đầu tiên về sự hiện diện và phân bố của các lớp trầm tích trên đồng bằng. Tuy nhiên, việc áp dụng phân bố lớp trầm tích trong mô hình nên được thực hiện cẩn thận, vì các mẫu chỉ liên quan đến các phép đo tại điểm. Thành phần mẫu đáy lòng sông có thể thay đổi đáng kể theo mặt cắt ngang sông cũng như theo thời gian.



Hình 4-5: Phân bố thành phần trầm tích đáy trên ĐBSCL dựa trên các mẫu trầm tích đáy sông.

4.2 Thiết lập mô hình

4.2.1 Yêu cầu về mô hình

Việc đánh giá động lực học cát trong ĐBSCL yêu cầu phần mềm lập mô hình có khả năng dự đoán dòng chảy và vận chuyển cát ở độ phân giải không gian cao (~ 100m) trên toàn ĐBSCL, tính toán địa hình và độ sâu của các nhánh sông rộng và mạng lưới kênh thoát nước/tưới tiêu. Ngoài ra, mô hình sẽ cần đủ linh hoạt để mô tả các điều kiện bắt buộc theo cả dòng chảy sông và chuyển động thủy triều thay đổi theo mùa cũng như độ phân giải thời gian đủ chi tiết để bao gồm các biến đổi thời gian dự kiến trong quá trình dòng chảy (~ phút). Cuối cùng, mô hình cần có khả năng tính toán trữ lượng cát di động và độ nhám thay đổi theo không gian.

4.2.2 Mô tả về mô hình

Đối với gói công việc, bộ Delft3D- Flexible Mesh (DFM) được sử dụng để mô hình hóa thủy động lực và vận chuyển cát ở Đồng bằng sông Cửu Long. Khung mô hình được sử dụng để tích hợp các thành phần khác nhau của hoạt động vận chuyển cát từ thượng nguồn và đổ ra biển và phân phối theo các kênh khác nhau nhằm hỗ trợ diễn giải ngân sách cát cuối cùng. DFM thực hiện tính toán trên cả lưới đường cong và lưới phi cấu trúc cũng như sự kết hợp của lưới 1D và 2D. Điều này làm cho phần mềm đặc biệt phù hợp với các khu vực có hình dạng phức tạp như Đồng bằng sông Cửu Long bao gồm chiều rộng sông thay đổi, vùng đồng bằng ngập lũ, mạng lưới kênh chính, phụ và các công trình thủy lợi.

Thủy động lực học và vận chuyển trầm tích được mô hình hóa bằng mô-đun vận chuyển dòng chảy và trầm tích kết hợp với mô hình Delft3D- Flexible Mesh do Deltares phát triển (Deltares, 2020a). DFM là sự kế thừa của Delft3D4 và được sử dụng rộng rãi trong mô hình thủy động lực của biển, sông và vùng đồng bằng ngập lũ. DFM đã được cải thiện rất nhiều bằng cách sử dụng các mạng phi cấu trúc và mô hình hóa đa chiều đồng thời, bao gồm các miền 1D, 2D và 3D. Nghiên cứu hiện tại áp dụng DFM 2D để giải các phương trình nước nông hai chiều dựa trên phương pháp số thể tích hữu hạn (Kernkamp và cộng sự, 2011). Mô-đun thủy động lực mô tả mực nước và vận tốc tại mỗi ô lưới và mọi thời điểm. Dựa trên các trường vận tốc và mực nước thay đổi theo thời gian, mô-đun trầm tích tạo ra trường vận chuyển cát thay đổi theo thời gian.

Điều này chỉ ra rằng động lực dòng chảy và vận chuyển cát được giải quyết ở độ phân giải thời gian cao (~ phút) trên lưới có độ phân giải cao về mặt không gian (~ 100m) mô tả các nhánh sông và mạng lưới kênh trong ĐBSCL. Achete và cộng sự, (2016); Martyr-koller và cộng sự, (2017); Thành và cộng sự, (2020); Eslami và cộng sự, (2019a), (2021a) cung cấp các ví dụ về ứng dụng 1D, 2D và 3D thành công của DFM trong môi trường cửa sông trên khắp thế giới.

4.2.3 Thiết lập mô hình thủy động lực

Mô hình thủy động lực quy mô lớn của Đồng bằng sông Cửu Long, cơ sở của nghiên cứu này, đã được hiệu chỉnh tốt dựa trên dữ liệu thủy động lực học (mực nước và lưu lượng) trong các trận lũ lớn năm 2000 và 2001 (Thành và cộng sự, 2020). Nghiên cứu hiện tại dựa trên sự phát triển mô hình này với trọng tâm là hiệu chỉnh và kiểm định thủy động lực học (2021/2022) và kiểm định năm 2022 về sự vận chuyển trầm tích không dính (cát) dựa trên các bộ dữ liệu gần đây thu được trong khuôn khổ dự án này. Sự khác biệt giữa mô hình của Thành và cộng sự, (2020) và nghiên cứu hiện tại là độ sâu, do đó, trường độ nhám, điều kiện biên, công thức vận chuyển trầm tích và tính chất trầm tích. Những điều chỉnh này sẽ được trình bày chi tiết trong các nội dung tiếp theo.

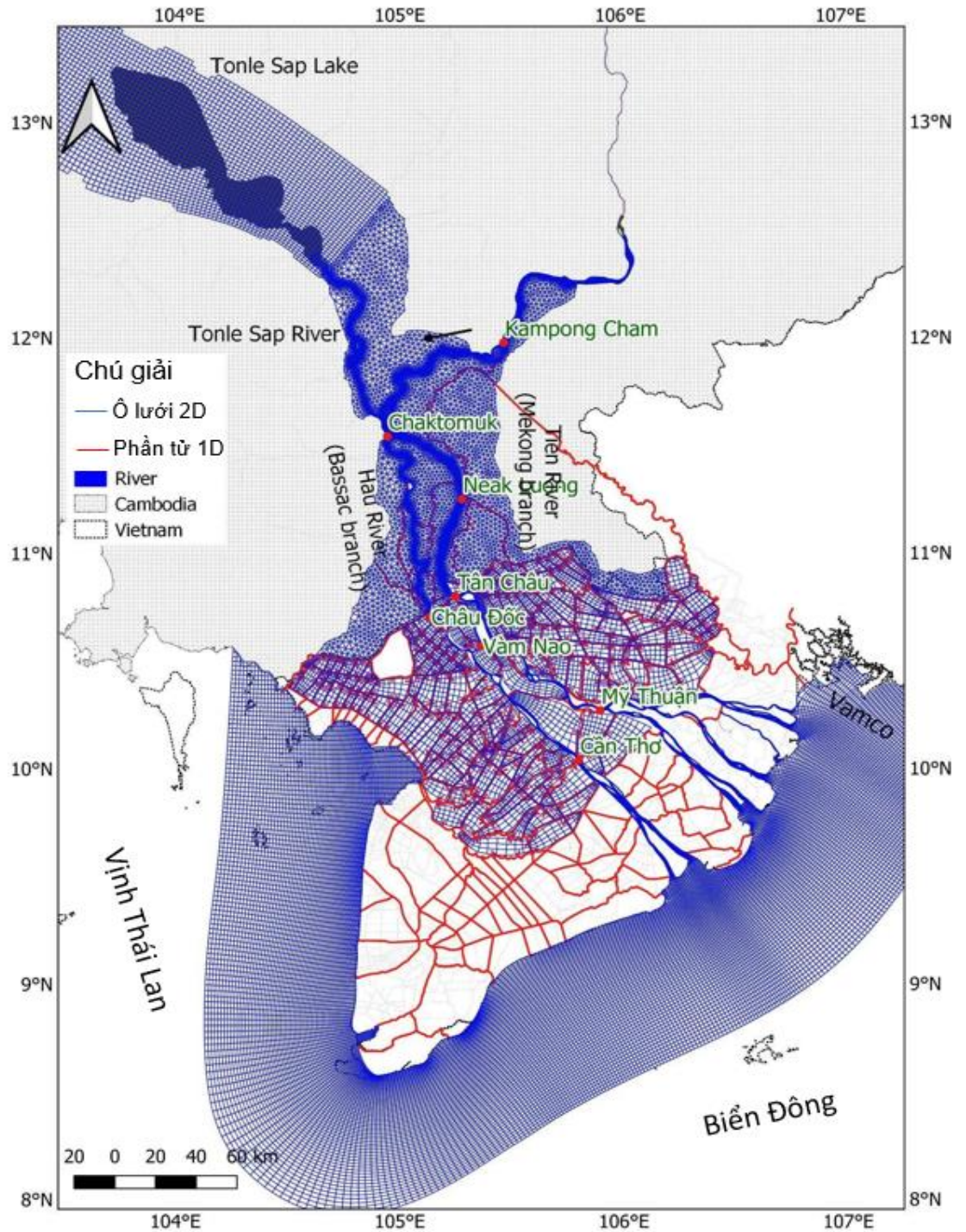
Mô hình bị ảnh hưởng bởi dòng chảy của sông tại Kratie và các thành phần thủy triều ở ranh giới hướng ra biển. Mô hình là mô hình 2D, không bao gồm sóng gió hay gió mà bao gồm vận chuyển cát và bùn. Mô hình 2D cũng không bao gồm độ biến thiên độ mặn sẽ tạo ra dòng chảy trọng lực 3D gần các cửa sông. Lưu ý rằng sóng do gió biển không liên quan đến vận chuyển cát trong ĐBSCL và ảnh hưởng của gió đến vận chuyển cát hàng năm là không đáng kể vì nó chỉ tác động một phần đến mực nước và độ sâu nước trong ĐBSCL (thỉnh thoảng và ở mức 15-20 cm), xem Eslami và cộng sự, (2021a)).

4.2.4 Tạo lưới và cải thiện lưới tính toán

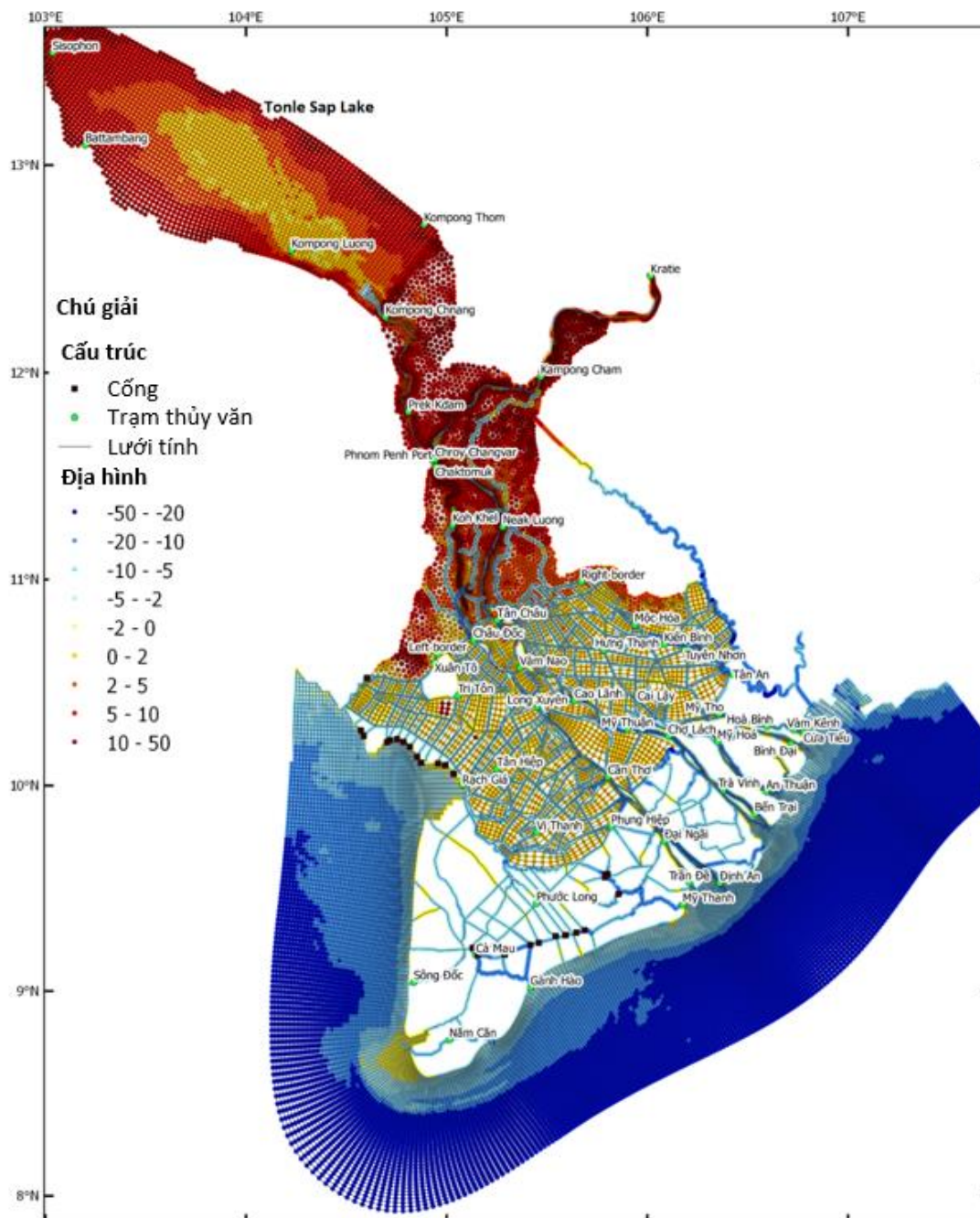
Mô hình phi cấu trúc áp dụng cách tiếp cận mô hình hóa đa quy mô. Cụ thể, nó bao gồm sự kết hợp của các phần 1-D (kênh) và 2-D (các nhánh chính của sông Mekong, vùng đồng bằng ngập lũ và thềm) (Hình 4-6). Cách tiếp cận này cho thấy hiệu quả trong trường hợp hình học phức tạp như toàn bộ Đồng bằng sông Cửu Long. Để nắm bắt được động lực học của các nhánh và cửa sông chính của đồng bằng, các kênh chính được thể hiện đủ chi tiết theo chiều ngang để giải quyết các mô hình dòng chảy qua các kênh và bãi cạn cũng như tại các điểm phân nhánh và hợp lưu chính. Cấu trúc kênh 1D và bãi bồi là rất cần thiết để có thể nắm bắt được sự lan truyền và giảm chấn của sóng thủy triều và sóng lũ sông qua vùng đồng bằng. Về thềm lục địa, mô hình mở rộng đến khoảng 80 km tính từ bờ biển của vùng đồng bằng để chứa toàn bộ dòng sông và bao gồm sự tương tác giữa cửa sông và biển tại khu vực ven bờ (Hình 4-7).

Mạng lưới bao gồm hệ thống sông Mekong từ Kratie đến Biển Đông và một phần thềm lục địa của nó. Dòng chính của sông Mekong, vùng đồng bằng ngập nước và vùng đồng bằng ngập lũ được thể hiện bằng các ô 2-D, trong khi các kênh cấp 1 và kênh cấp 2 được mô hình hóa dưới dạng mạng lưới 1-D. Các ô 2-D là sự kết hợp của đường cong (trong các kênh chính) và các ô lưới hình tam giác. Việc tạo lưới được giới thiệu và khuyến nghị bởi Kernkamp và cộng sự, (2011) và Bomers và cộng sự, (2019). Kích thước lưới/phần tử thay đổi từ khoảng 0,1 km ở sông đến 2 km trên thềm đồng bằng. Chiều dài của lưới thay đổi tùy thuộc vào hình dạng

sông. Độ dài đồng đều của các phân đoạn 1-D là 400 m trong khi các ô 2D có độ phân giải khác nhau tùy thuộc vào quy mô không gian của các quá trình hình thái và thủy động lực chiếm ưu thế cục bộ. Cụ thể, kích thước ô 2D của dòng chính sông Mekong nói chung là khoảng 0,7 km và giảm xuống còn khoảng 0,2 km tại các điểm phân nhánh và hợp lưu sông. Các ô 2D thô hơn cho vùng đồng bằng ngập nước và vùng biển, có kích thước tăng lên khoảng 2 km. Lưới tính toán có tổng cộng chứa 73.504 ô (Thành, 2021). Chất lượng lưới rất quan trọng để mô phỏng chính xác; do đó, lưới đã được làm trực giao, mịn và đủ độ dày đặc.



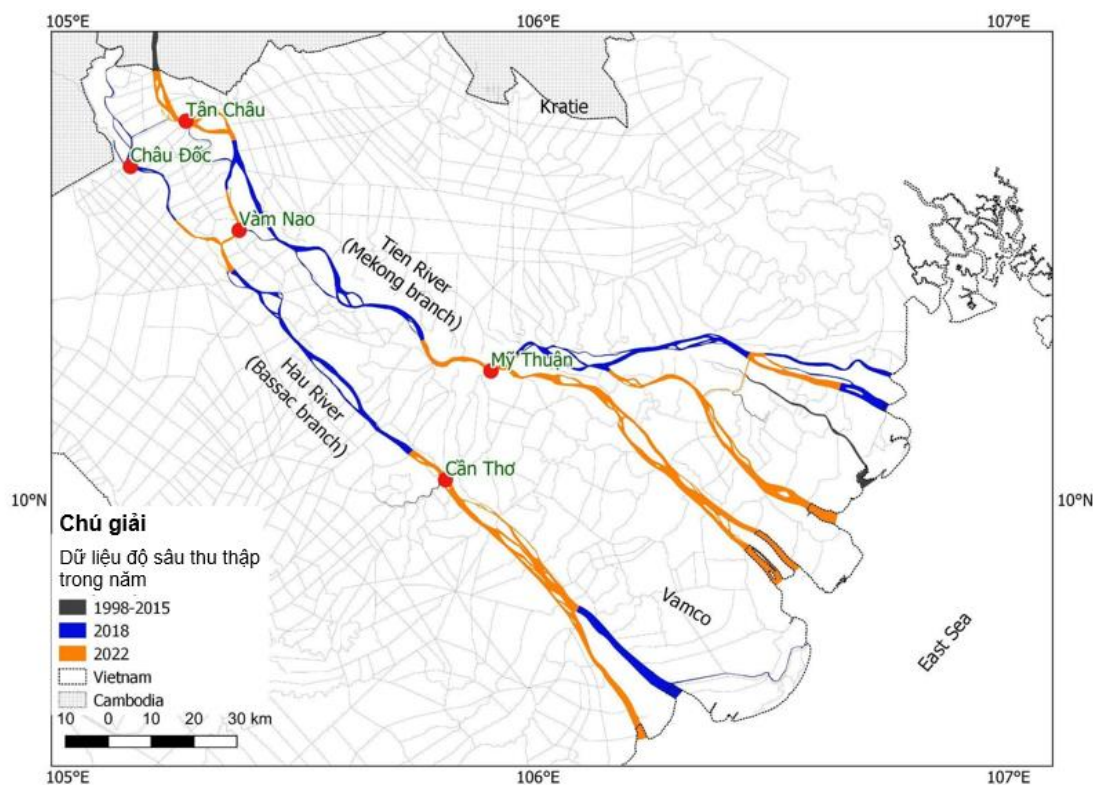
Hình 4-6: Lưới tính toán bao gồm các phân tử 1D và các ô 2D.



Hình 4-7: Lưới tính, địa hình sông và địa hình thềm của ĐBSCL

4.2.5 Dữ liệu độ sâu

Độ sâu chi tiết của Đồng bằng sông Cửu Long rất thưa thớt và hạn chế về phạm vi. Do đó, phép đo độ sâu được tổng hợp từ nhiều nguồn và khoảng thời gian khác nhau. Nghiên cứu hiện tại sử dụng phép đo độ sâu năm 2018 của Vasilopoulos và cộng sự, (2021b) các kênh sông/cửa sông chính, được nội suy và kết hợp trong Eslami và cộng sự, (2021a). Ngoài ra, một số khu vực sông Mekong ở Việt Nam đã được cập nhật dữ liệu đo độ sâu do WWF đo đạc vào năm 2022 (Hình 4-8). Mạng lưới kênh sơ cấp và thứ cấp được trích từ mô hình 1D-ISIS của MRC (1998, cập nhật năm 2015, theo Thành, 2020). Độ sâu của các cửa sông đã được cập nhật theo Eslami và cộng sự, (2021a). Đối với những nơi xa hơn, phép đo độ sâu được lấy từ ETOPO có độ phân giải ~ 1 km. Địa hình vùng ngập được lấy từ mô hình độ cao kỹ thuật số, với độ phân giải 250 m do MRC cung cấp.



Hình 4-8: Độ sâu được thu thập ở đồng bằng sông Cửu Long

4.2.6 Điều kiện biên

Biên mở được xác định là lưu lượng nước (tại Kratie) và mực nước (biển). Lưu lượng nước được sử dụng cho biên thượng nguồn tại Kratie và được thu thập từ Ủy ban sông Mekong. Tiếp theo biên ngoài biển được xác định bằng các thành phần thủy triều thiên văn và được trích xuất từ mô hình thủy triều toàn cầu (TPXO 8.2; Egbert và Erofeeva, 2002). Hơn nữa, để cho phép vận chuyển dọc bờ, biên ngang bờ phía bắc được xác định là ranh giới Neumann được điều khiển bởi độ dốc mực nước dọc bờ (Tú và cộng sự, 2019).

4.2.7 Điều kiện ban đầu

Chế độ thủy động lực ĐBSCL chịu ảnh hưởng mạnh mẽ của lũ lụt hàng năm. Hơn nữa, hồ Tonle Sap đóng vai trò thiết yếu trong việc điều hòa dòng chảy của sông Mekong vào ĐBSCL. Mực nước hồ Tonle Sap thay đổi rất nhiều tùy theo mùa, đó là lý do tại sao các thông số về điều kiện thích hợp làm giảm chu kỳ lặp của mô hình. Chúng tôi giả định rằng trận lũ trước đó đã lấp đầy hồ Tonle Sap, do đó mô hình sẽ ngừng tính toán trong trận lũ năm 2020. Để giảm thiểu tác động, việc mô phỏng nên bắt đầu vào mùa dòng chảy kiệt khi mực nước xuống thấp. Chúng tôi đã sử dụng mực nước vào cuối tháng 4 năm 2021 làm điều kiện ban đầu cho mô phỏng từ tháng 5 năm 2021. Mô phỏng được xác định cho khoảng thời gian từ tháng 5 năm 2021 đến tháng 10 năm 2022. Khoảng thời gian này được chọn vì nó kéo dài hơn một năm để nắm bắt chế độ thủy văn hàng năm.

4.2.8 Thiết lập mô hình vận chuyển trầm tích

Theo cách tiếp cận của chúng tôi, chúng tôi đã áp dụng các công thức vận chuyển trầm tích của Van Rijn (1993) để phân biệt giữa công cụ dự báo tải lượng đáy và công cụ dự báo tải lượng lơ lửng (xem thêm hướng dẫn sử dụng Delft3D FM (<https://oss.deltares.nl/web/delft3dfm/manuals>)). Điều này có nghĩa rằng tại mỗi bước thời gian và đối với mỗi ô lưới, vận chuyển tải lượng lơ lửng cân bằng và tải lượng đáy đều được tính toán dựa trên vận tốc cục bộ. Vận chuyển tải lượng đáy sau đó được xác định bằng vận chuyển tải lượng đáy cân bằng. Vận chuyển tải lượng lơ lửng (thường có tính khuếch tán cao hơn vận chuyển tải lượng đáy) được mô phỏng bằng cách sử dụng bộ giải vận chuyển khuếch tán. Nồng độ trầm tích trong một ô lưới phụ thuộc vào sự vận chuyển và khuếch tán từ các ô lưới

lân cận cũng như các dòng xói mòn và lắng đọng cục bộ (trao đổi đáy) dựa trên mối quan hệ giữa nồng độ trầm tích thực tế trong ô lưới và nồng độ trầm tích cân bằng của nó. Áp dụng phương pháp này với các thiết lập mặc định và đã được kiểm định chỉ yêu cầu độ nhám của đáy và đường kính cát làm thông số đầu vào.

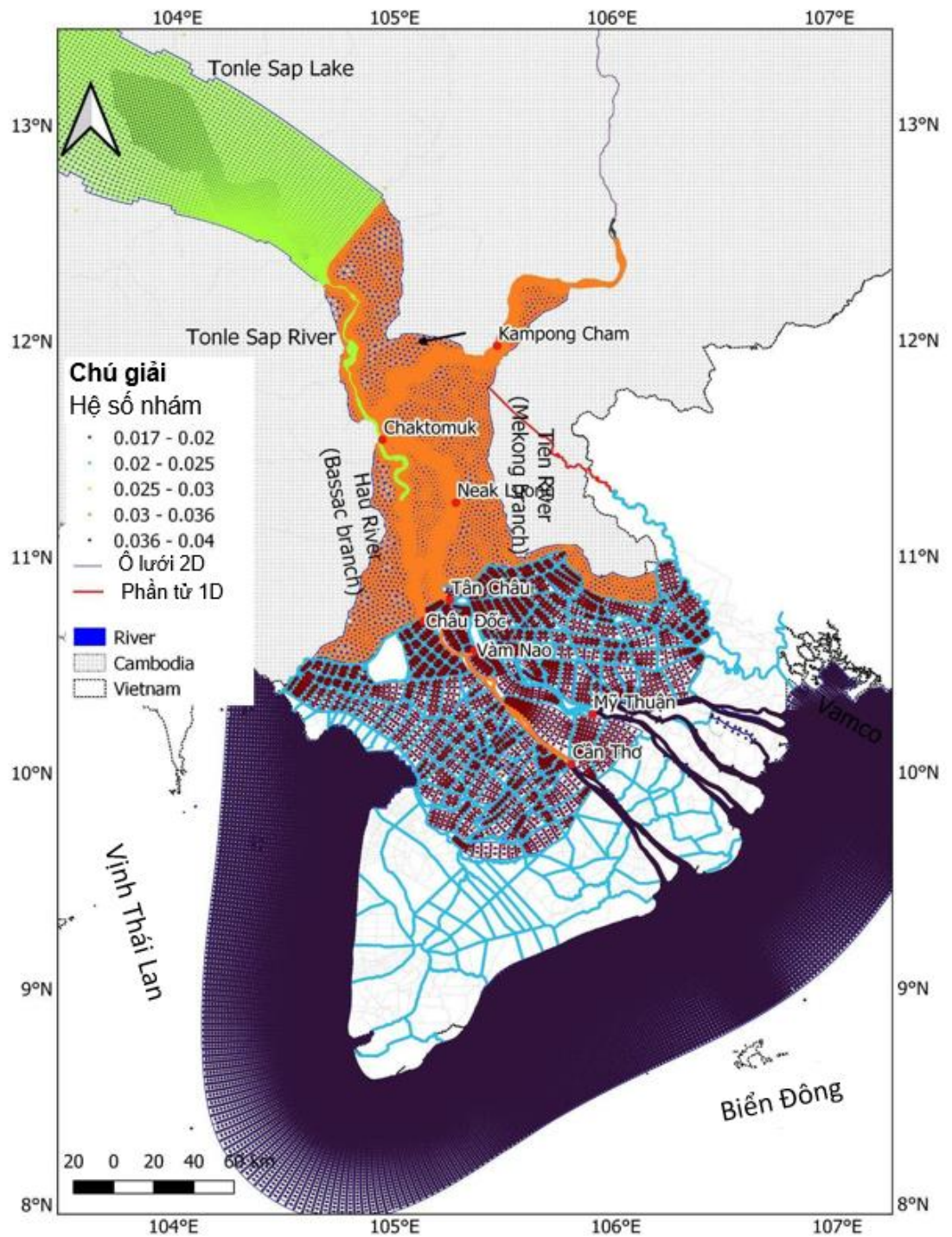
Sự phân tách thực tế giữa tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng trong mô hình của Van Rijn một phần mang tính lý thuyết và do đó không nhất thiết phải bằng việc tách ‘tải lượng đáy’ khỏi việc theo đụn cát và khỏi các mẫu nồng độ. Mô hình được áp dụng trong nghiên cứu hiện tại được mô phỏng mà không cập nhật đáy, có nghĩa là nó không cho phép thay đổi mức độ đáy, nhưng nó cho phép thay đổi trữ lượng và thành phần trầm tích (sau khi bao gồm các tỷ lệ của bùn).

Theo dữ liệu SSC được quan trắc vào năm 2018/2019 tại Kratie, mô hình đã được thiết lập với nồng độ cát 0,01 mg/l tại ranh giới Kratie, trong đó khoảng 90% ở trạng thái lơ lửng và 10% là tải lượng đáy. Điều này giả định rằng cát chiếm khoảng 10% SSC tại Kratie. Vào năm 2022, tại biên thượng nguồn Kratie có tải lượng hàng năm là 5 triệu tấn (tải lượng lơ lửng) và 0,1 triệu tấn (tải lượng đáy). Điều này phù hợp với những quan trắc ở vùng hạ nguồn sông Mekong ở Campuchia của Hackney và cộng sự 2020 đã phát hiện tải lượng đáy $0,18 \pm 0,07$ triệu tấn/năm và tải lượng cát lơ lửng 6 ± 2 triệu tấn/năm trong giai đoạn 2013-2014. Một phép đo tại điểm năm 2011 về vận chuyển tải lượng đáy tại Kratie ước tính tải lượng đáy khoảng 1,5% tải lượng lơ lửng so với kết quả mô hình trong nghiên cứu hiện tại (Koehnken, 2012a & b & 2014; Kondolf và cộng sự, 2014).

Bảng 4-2: Mô tả dữ liệu được sử dụng để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình.

| Dữ liệu | Nguồn | Sử dụng |
|--|-----------------------|--|
| Mức nước tại Kratie | MRC | Điều kiện biên |
| Mức nước tại 16 trạm trong vùng đồng bằng sông Cửu Long (5-Campuchia và 11-Việt Nam) | MRC và dự án hiện tại | Dữ liệu hiệu chỉnh/kiểm định |
| Lưu lượng tại 10 trạm trong vùng đồng bằng sông Cửu Long (5-Campuchia và 5-Việt Nam) | MRC và dự án hiện tại | Dữ liệu hiệu chỉnh/kiểm định |
| Dữ liệu trầm tích đáy | Dự án hiện tại | Điều kiện thành phần đáy ban đầu |
| Số liệu trầm tích lơ lửng tại 9 trạm ĐBSCL | Dự án hiện tại | Kiểm định mô hình vận chuyển trầm tích bùn |
| Theo dõi đụn cát tại 7 trạm ĐBSCL | Dự án hiện tại | Kiểm định/hiệu chỉnh mô hình vận chuyển tải lượng cát |
| Dữ liệu quá khứ thành phần trầm tích và trầm tích lơ lửng tại 4 trạm dọc sông Mekong | MRC | Đánh giá và kiểm định/hiệu chỉnh vận chuyển thành phần trầm tích |

Kết quả mô hình cho thấy tổng lượng vận chuyển cát chiếm khoảng 5% tổng lượng vận chuyển trầm tích, so sánh với mức 7% được báo cáo bởi Hackney và cộng sự 2020. Ngoài ra, việc chạy mô hình sơ bộ cho thấy rằng việc tăng nồng độ này đến nồng độ cát cân bằng tại Kratie không ảnh hưởng đến việc vận chuyển cát tích lũy ở các mặt cắt ngang xa hơn về phía hạ nguồn Kratie. Điều này cho thấy rằng việc vận chuyển cát chỉ đơn thuần là một chức năng của vận tốc cục bộ và các quá trình lắng đọng và lắng đọng cục bộ. Điều này trái ngược với các phần trầm tích mịn hơn có thể được vận chuyển ở trạng thái lơ lửng trên những khoảng cách xa hơn nhiều. Tại biên phía biển, chúng tôi áp dụng nồng độ cân bằng, tức là nồng độ cát cân bằng thay đổi theo thời gian phụ thuộc vào vận tốc tại biên. Do vận tốc ở biên ngoài biển thường duy trì ở mức thấp do độ sâu lớn nên vận chuyển cát qua biên cũng ở mức thấp.



Hình 4-9: Hiệu chỉnh hệ số nhám.

4.3 Kiểm định mô hình thủy động lực học

Tại đây, chúng tôi trình bày việc kiểm định mô hình dựa trên dữ liệu mực nước và lưu lượng năm 2022 bằng phép đo độ sâu năm 2018, trong đó các phần của đáy mô hình được thay thế bằng các phép đo độ sâu được thực hiện vào năm 2022, sau khi kiểm soát chất lượng cẩn thận. Trong nghiên cứu này, độ nhám ban đầu được trích xuất từ (Thành và cộng sự, 2020; Eslami và cộng sự, 2021a). Mô hình thủy động lực đã được hiệu chỉnh lại bằng cách điều chỉnh các hệ số độ nhám thay đổi theo không gian theo phương pháp lặp, từ đó xác định được độ nhám như trong Hình 4-9. 16 trạm ở Campuchia và Việt Nam được sử dụng để đánh giá hiệu suất của mô hình trong việc mô phỏng mực nước và lưu lượng. Việc hiệu chỉnh mô hình được hoàn thiện khi các chỉ số ở tất cả các trạm đều lớn hơn mức đạt yêu cầu.

Hệ số hiệu quả Nash-Sutcliffe (Nash và Sutcliffe, 1970) được sử dụng để đánh giá hiệu suất của mô hình so với dữ liệu quan trắc được (NSE). NSE là một chỉ số thống kê được chuẩn hóa sử dụng phép so sánh giữa phương sai dư và phương sai dữ liệu quan trắc và nó có dạng Phương trình 3-1 bên dưới.

$$NSE = - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (\text{Phương trình 3-2})$$

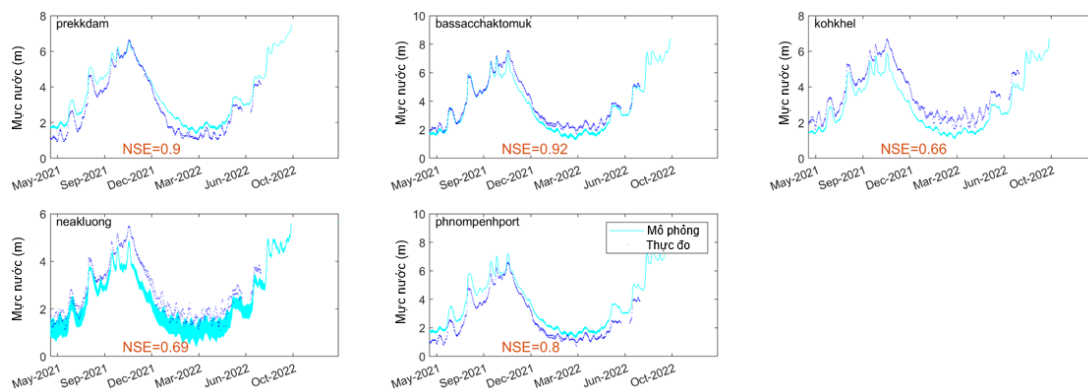
Trong đó \bar{Q}_0 là giá trị trung bình của lưu lượng nước quan trắc, Q_m^t là lưu lượng nước mô phỏng và Q_0^t là lưu lượng quan trắc được ở thời điểm t.

Hình 4-7 và Hình 4-8 cho thấy hiệu suất mô hình đối với mực nước tại các trạm ở Campuchia và Việt Nam tương ứng tại tổng số 16 trạm. Theo cách phân loại của Moriasi và cộng sự (2007), tất cả các trạm đều có giá trị NSE cao hơn mức cho phép là 0,5. Các trạm ĐBSCL Cần Thơ và Mỹ Thuận hoạt động kém nhất về mực nước, nhưng vẫn đạt yêu cầu với giá trị NSE cao hơn 0,5.

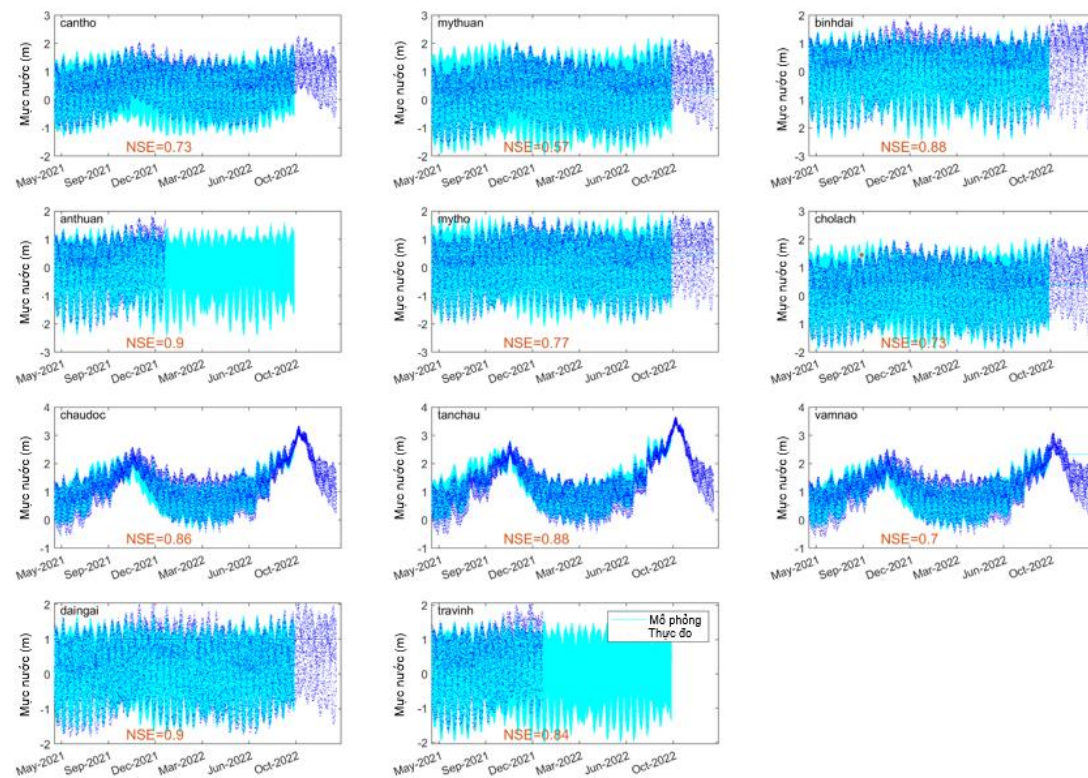
Bảng 4-3: Vị trí các trạm.

| Trạm | Tên trong mô hình (số liệu) | Vĩ độ (độ N) | Kinh độ (độ E) |
|------------------------------|-----------------------------|--------------|----------------|
| Các trạm tại Cambodia | | | |
| Kratie | kratie | 12.46703 | 106.01557 |
| Prek Kdam | prekkdam | 11.81217 | 104.80931 |
| OSP MRC | bassacchaktomuk | 11.54654 | 104.94454 |
| Koh Khel | kohkhel | 11.26781 | 105.02946 |
| Neak Luong | neakluong | 11.26435 | 105.28054 |
| Phnom Penh Port | phnompenhport | 11.57828 | 104.92795 |
| Chroy Changvar | chroychangvar | 11.58193 | 104.94366 |
| Kaoh Norea | mk_chaktomuk | 11.55151 | 104.95692 |
| Các trạm tại Việt Nam | | | |
| Cần Thơ | cantho | 10.04219 | 105.8033 |
| Mỹ Thuận | mythuan | 10.27305 | 105.90002 |
| Bình Đại | binhdai | 106.71812 | 106.71812 |
| An Thuận | anthuan | 9.86067 | 106.54004 |
| Mỹ Tho | mytho | 10.34789 | 106.36095 |
| Chợ Lách | cholach | 10.28262 | 106.12698 |
| Châu Đốc | chaudoc | 10.70702 | 105.13378 |
| Tân Châu | tanchau | 10.80329 | 105.2518 |
| Vàm Nao | vamnao | 11.98164 | 105.46922 |
| Đại Ngãi | daingai | 9.73009 | 106.08505 |
| Trà Vinh | travinh | 9.98546 | 106.36851 |

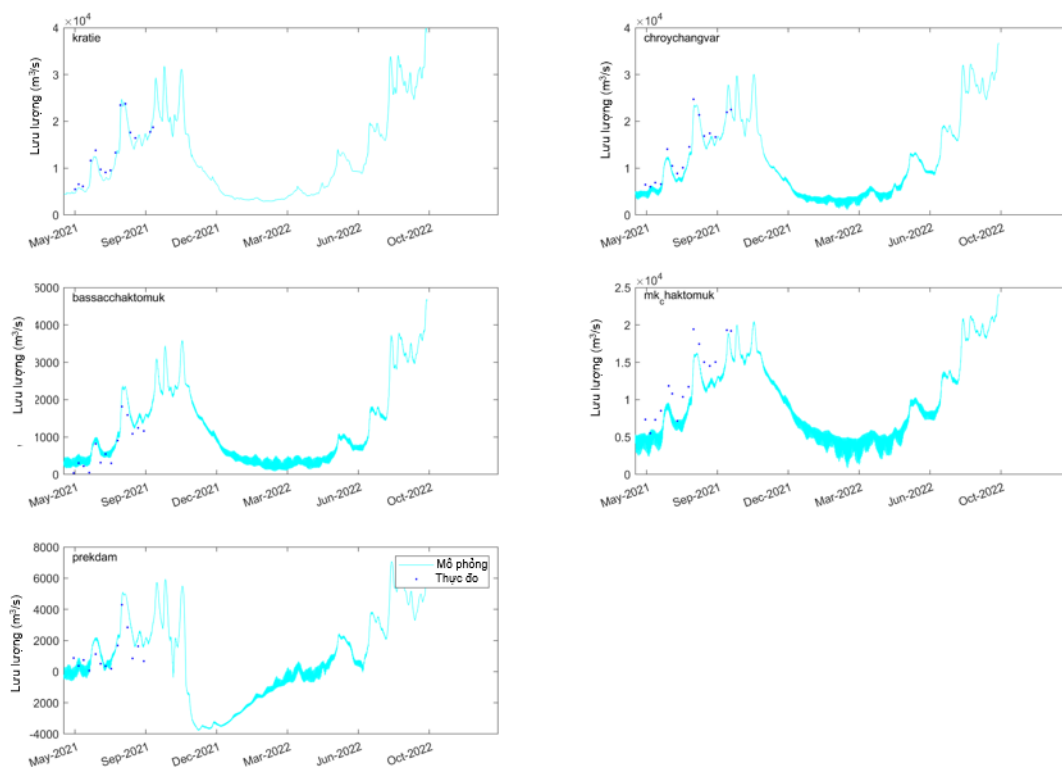
Việc hiệu chỉnh lưu lượng nước được thực hiện tại 5 trạm ở Campuchia tại 5 trạm tại ĐBSCL (Hình 4-10 & Hình 4-11). NSE nhỏ nhất ở Châu Đốc với giá trị 0,53. Điều này là do đánh giá quá cao lưu lượng thủy triều mặc dù chúng tôi nhận thấy rằng phép đo độ sâu cập nhật năm 2022 đã cải thiện được kết quả mô hình hóa.



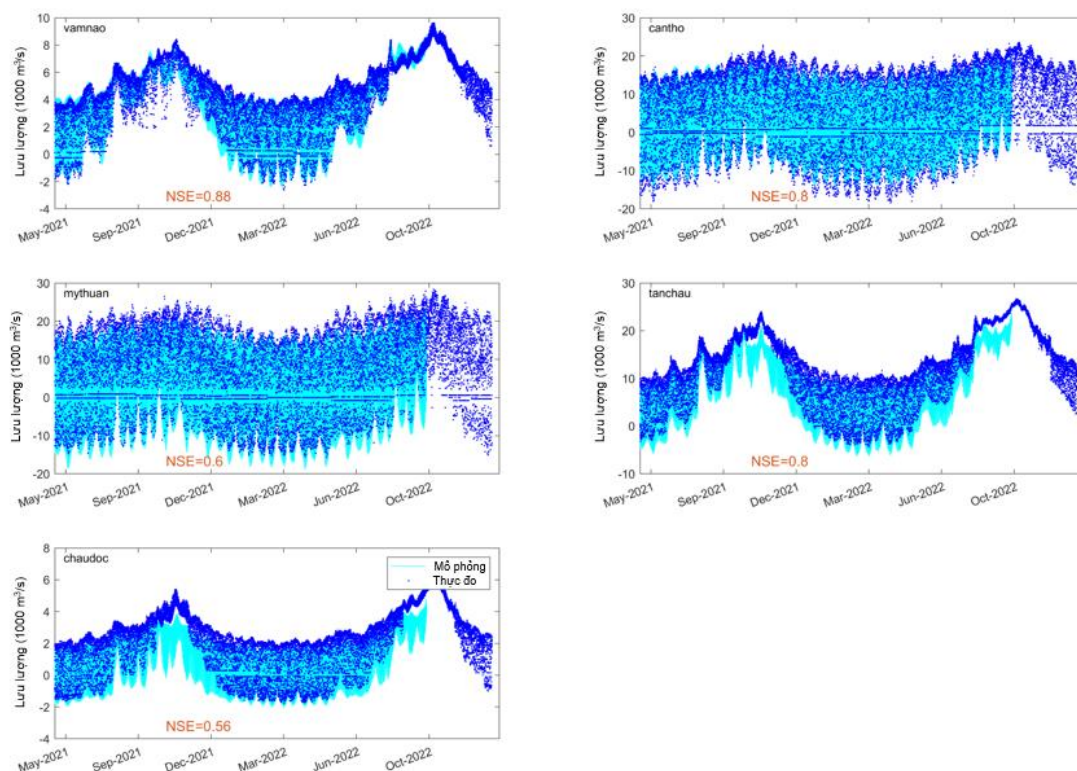
Hình 4-10: Hiệu suất của mô hình đối với mực nước tại các trạm ở Campuchia trong giai đoạn từ 2021-2022.



Hình 4-11: Hiệu suất của mô hình đối với mực nước tại các trạm ở Việt Nam trong giai đoạn từ 2021-2022.



Hình 4-12: Hiệu suất của mô hình đối với lưu lượng tại các trạm ở Campuchia.



Hình 4-13: Hiệu suất của mô hình đối với lưu lượng tại các trạm ở Việt Nam.

Nhìn chung, mô hình hiệu chỉnh hoạt động tốt mực nước và lưu lượng do các giá trị NSE lớn hơn mức đạt yêu cầu. Mô hình có thể nắm bắt được sự thay đổi hàng năm của dữ liệu đo được, đây là một chỉ số quan trọng về hiệu suất của mô hình. Hiệu suất mô hình đã được cải thiện nhờ dữ liệu độ sâu chính xác hơn.

4.4 Mô phỏng kịch bản vận chuyển trầm tích

Để bắt đầu đơn giản nhất có thể, các bước chạy sơ bộ áp dụng lớp cát dày 50 m với đường kính trầm tích 200 μ m (cát mịn) trong toàn bộ miền tính của mô hình (runfs). Độ dày 50 m được áp dụng để đảm bảo lượng cát dồi dào ở khắp mọi nơi trong suốt cả năm. Runfs đóng vai trò là cơ sở cho các thiết lập mô hình nâng cao hơn, phân tích độ nhạy và tinh chỉnh mô hình.

Phân tích độ nhạy một cách có hệ thống sẽ khám phá được tác động của lượng trầm tích đáy (không có cát gần cửa sông phù hợp với quan sát), tính chất của cát (tức là đường kính trung bình, $D_{50} = 100 \mu\text{m}$ và $D_{50} = 300 \mu\text{m}$) và bao gồm các phần trầm tích bùn mịn hơn, trong đó chúng tôi áp dụng phương pháp thiết lập bùn theo đề xuất của (Thành và cộng sự, 2019). Bảng 4-4 cho thấy thông số kỹ thuật của các lần chạy đã được thực hiện. Ngoài ra, chúng tôi so sánh kết quả mô hình với SSC từ quan trắc hiện trường và vận chuyển tải lượng đáy từ hệ thống đo MBES. Tất cả các lần chạy đều được thực hiện trong hai năm liên tiếp với các điều kiện như nhau. Điều này được thực hiện như một phần bổ sung cho thủy động lực học (ví dụ: xem xét các quá trình thủy động lực học làm đầy và cạn nước của hồ Ton Le Sap) và hình thái động lực học khi sử dụng hai phân đoạn trầm tích hoặc lượng trầm tích thay đổi theo không gian. Cách tiếp cận "hình thái động lực học" chỉ tính đến việc cập nhật sự sẵn có của cát và thành phần đáy (trong trường hợp có bùn), không tính đến cao độ đáy sông.

Bảng 4-4: Định nghĩa của các kịch bản mô phỏng khác nhau (run-names).

| Run-name | |
|----------|--|
| Fs | Sand $D=200\mu\text{m}$, đồng nhất |
| fsD100 | Sand $D=100\mu\text{m}$, đồng nhất |
| fsD300 | Sand $D=300\mu\text{m}$, đồng nhất |
| Fssdb | Sand $D=200\mu\text{m}$, cát sẵn có dựa trên dữ liệu |
| Fsm | Sand/mud $D=200\mu\text{m}$, cát sẵn có dựa trên dữ liệu chỉ có bùn gần cửa sông, $w_{\text{mud}}=0.1\text{mm/s}$ |
| Fsmc | Sand/mud $D=200\mu\text{m}$, cát sẵn có dựa trên dữ liệu chỉ có bùn gần cửa sông, $w_{\text{mud}}=0.5\text{mm/s}$ |
| Fsmf | Sand $D=200\mu\text{m}$, đồng nhất |

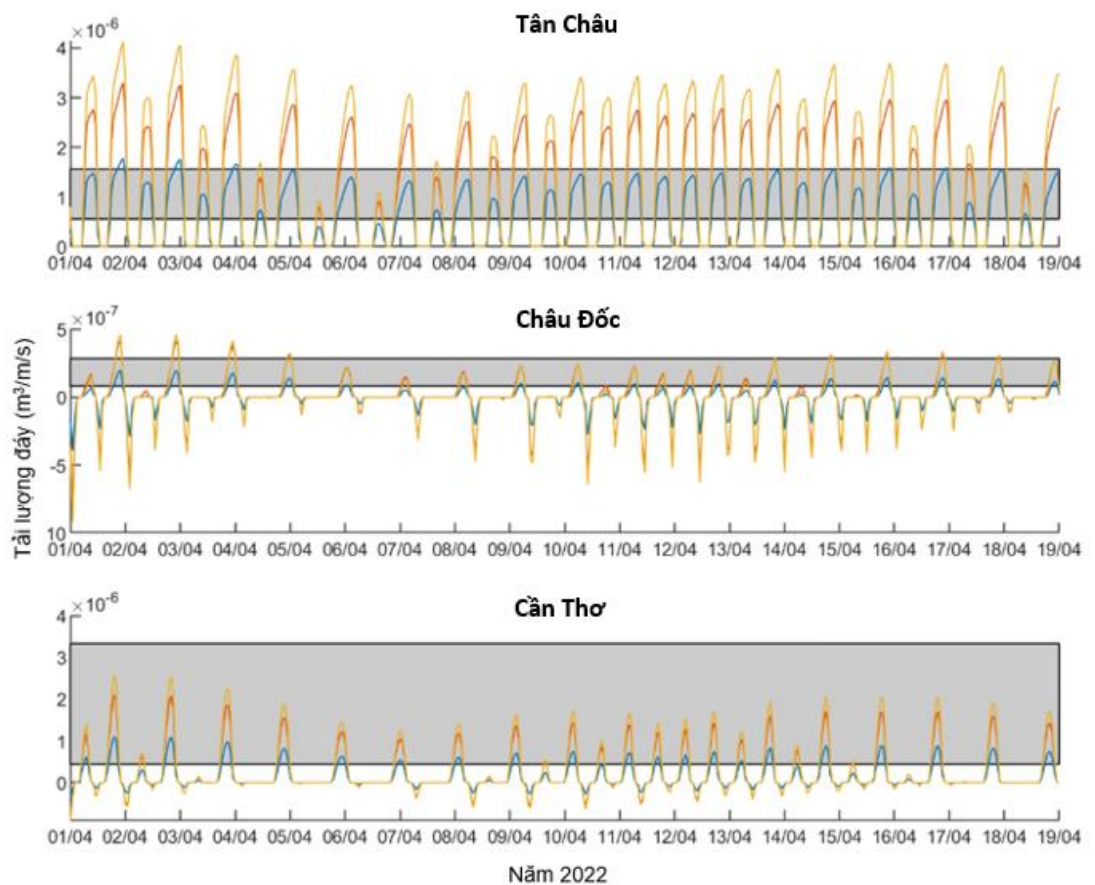
4.5 Hiệu chỉnh vận chuyển cát

4.5.1 Tải lượng đáy

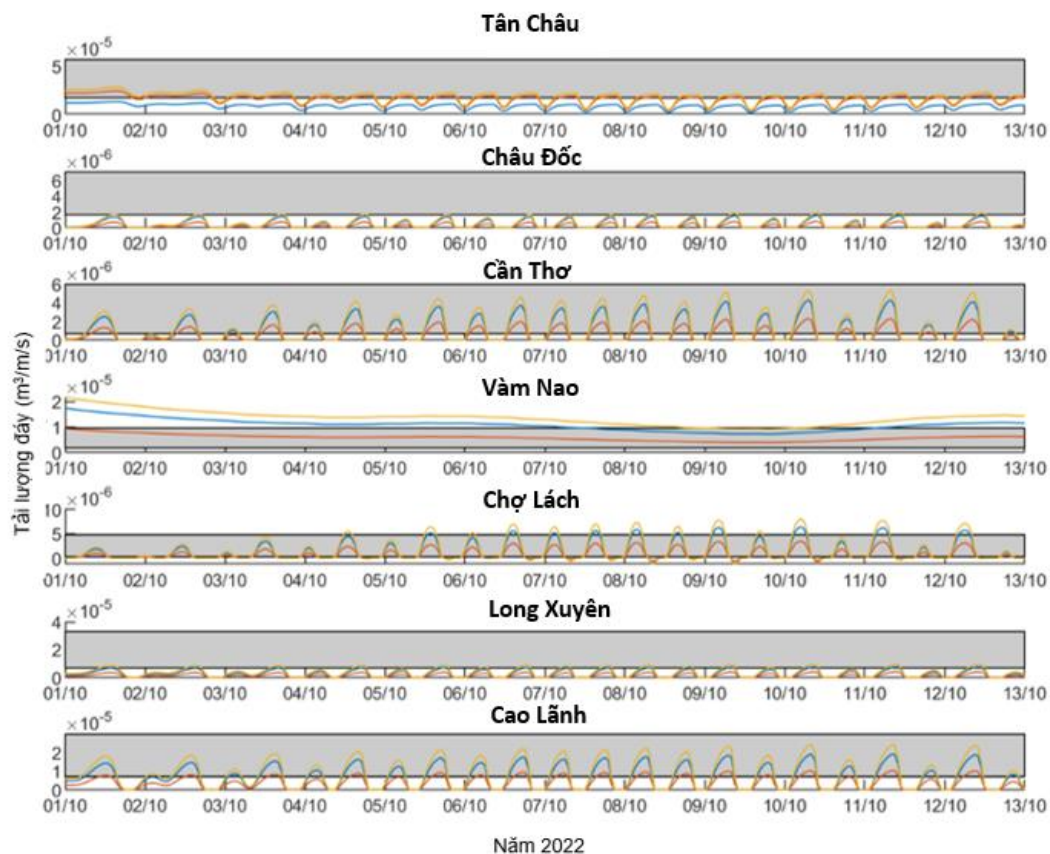
Hình 4-14 và Hình 4-15 so sánh vận chuyển tải lượng đáy theo mô hình năm 2022 với ước tính tải lượng đáy theo kết quả đo đạc MBES năm 2022 bao gồm cả phạm vi không chắc chắn. Sự vận chuyển tải lượng đáy được mô hình hóa cho thấy tín hiệu thủy triều mạnh trong khi dữ liệu dựa trên MBES dựa trên tải lượng đáy được tính trung bình trong 18 và 12 ngày tương ứng trong mùa khô và mùa mưa. Do đó, tải lượng đáy được tính bằng MBES nên được xem xét là một giá trị trung bình, hoặc giá trị "dư" tốt hơn. Hơn nữa, cần lưu ý rằng tải lượng đáy được tính toán bởi (van Rijn và cộng sự, 1993) không bao gồm thành phần tải lượng lơ lửng của cát góp phần vào sự di chuyển của đụn cát và được bao gồm trong các giá trị 'tải lượng đáy' thu được thu thập từ phương pháp theo dõi đụn cát. Tải lượng đáy được mô hình hóa nhìn chung có cùng độ lớn với tải lượng vận chuyển có nguồn gốc từ MBES. Do đó, dường như không cần hiệu chỉnh thêm công cụ dự đoán của Van Rijn. Đáng chú ý, Vàm Nao có ít sự thay đổi thủy triều hơn, nguyên nhân là do sự chênh lệch mực nước ở đoạn sông Vàm Nao ít chịu sự thay đổi của thủy triều. Vào mùa mưa, số liệu dựa trên MBES tại Tân Châu, Châu Đốc, Long Xuyên và Cao Lãnh có xu hướng cao hơn giá trị mô hình ở ba trạm. Phân tích độ nhạy áp dụng các đường kính trầm tích khác nhau ($D=100$, 200 và 300 μm , được áp dụng thống nhất) cho thấy động lực học vẫn tương tự nhưng cường độ thì khác nhau. Lưu ý rằng đường kính trầm tích lớn hơn không nhất thiết dẫn đến tải lượng đáy ít hơn. Với chế độ dòng chảy bằng nhau, tổng vận chuyển trầm tích (tức là tải lượng lơ lửng và tải lượng đáy) sẽ nhỏ hơn đối với đường kính lớn hơn trong khi tải lượng đáy (thường là một phần nhỏ trong tổng tải lượng) có thể lớn hơn.

Hình 4-16 và Hình 4-17 trình bày vận chuyển tải lượng đáy tích lũy trong mùa khô và mùa mưa. Tải lượng đáy tích lũy được mô hình hóa và từ MBES có cùng hướng và nhìn chung có cùng độ lớn. Việc ước tính lượng vận chuyển dựa trên dữ liệu MBES nói chung thường đánh giá quá mức lượng cát vận chuyển được mô phỏng, trừ khi ở Tân Châu trong mùa khô và Vàm Nao cũng như Chợ Lách trong mùa mưa. Sự không chắc chắn của ước tính lượng vận chuyển dựa trên dữ liệu MBES nói chung là lớn hơn so với sự không chắc chắn liên quan đến đường kính trầm tích.

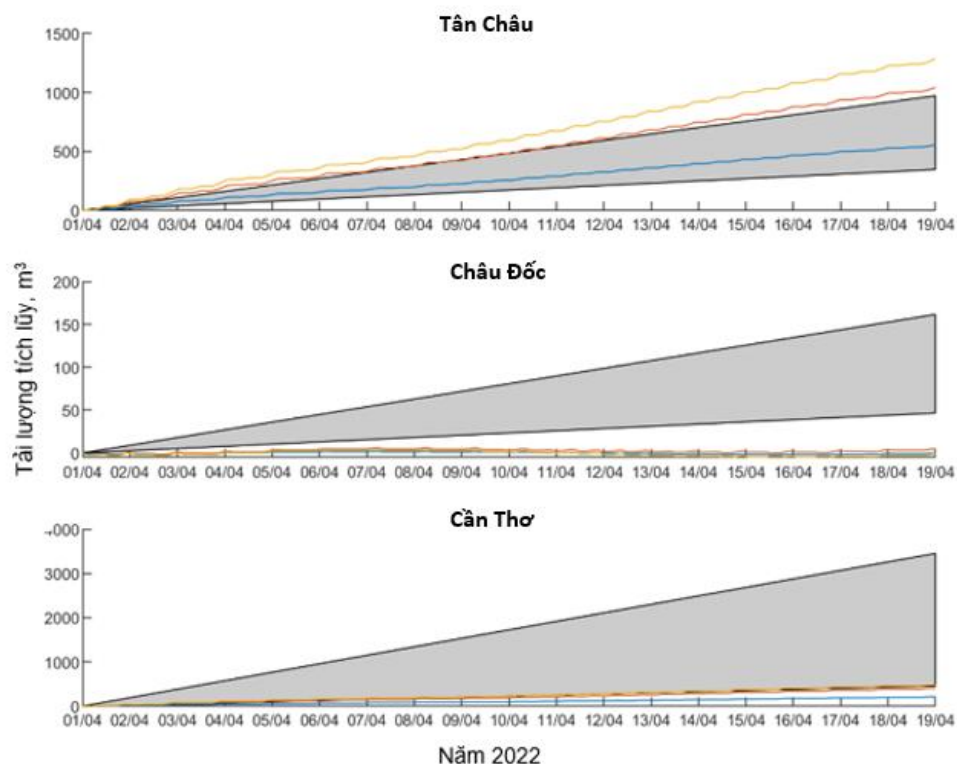
Sự tương đồng giữa lượng vận chuyển được ước tính từ MBES và kết quả mô hình là khá tích cực, đặc biệt khi xem xét đến sự không chắc chắn và phép ngoại suy chiều rộng liên quan đến phân tích dựa trên MBES và đưa ra sự không chắc chắn liên quan đến các đặc tính trầm tích được áp dụng trong mô hình. Chúng tôi hy vọng các dạng đáy có nhiều khả năng xuất hiện nhất tại các vị trí có vận tốc dòng chảy lớn nhất (và vận chuyển tải lượng đáy) trên mặt cắt ngang. Do đó, phép ngoại suy tải lượng đáy từ số liệu MBES trên toàn bộ chiều rộng sẽ dẫn đến ước tính quá cao, điều này có thể thấy rõ từ các số liệu. Có vẻ như tải lượng đáy từ MBES thực tế hơn đối với tốc độ vận chuyển thấp hơn, tiệm cận với các giá trị được mô phỏng.



Hình 4-14: Vận chuyển tải lượng đáy mùa khô tại Tân Châu (ảnh trên), Châu Đốc (ảnh giữa) và Cần Thơ (ảnh dưới). Kết quả mô hình được thể hiện bằng các đường màu đỏ ($D=100\mu\text{m}$, runfsD100), các đường màu xanh lam ($D=200\mu\text{m}$, runfs) và các đường màu vàng ($D=300\mu\text{m}$, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình \pm độ lệch chuẩn bao gồm độ không chắc chắn về chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 18 ngày dựa trên phân tích MBES.

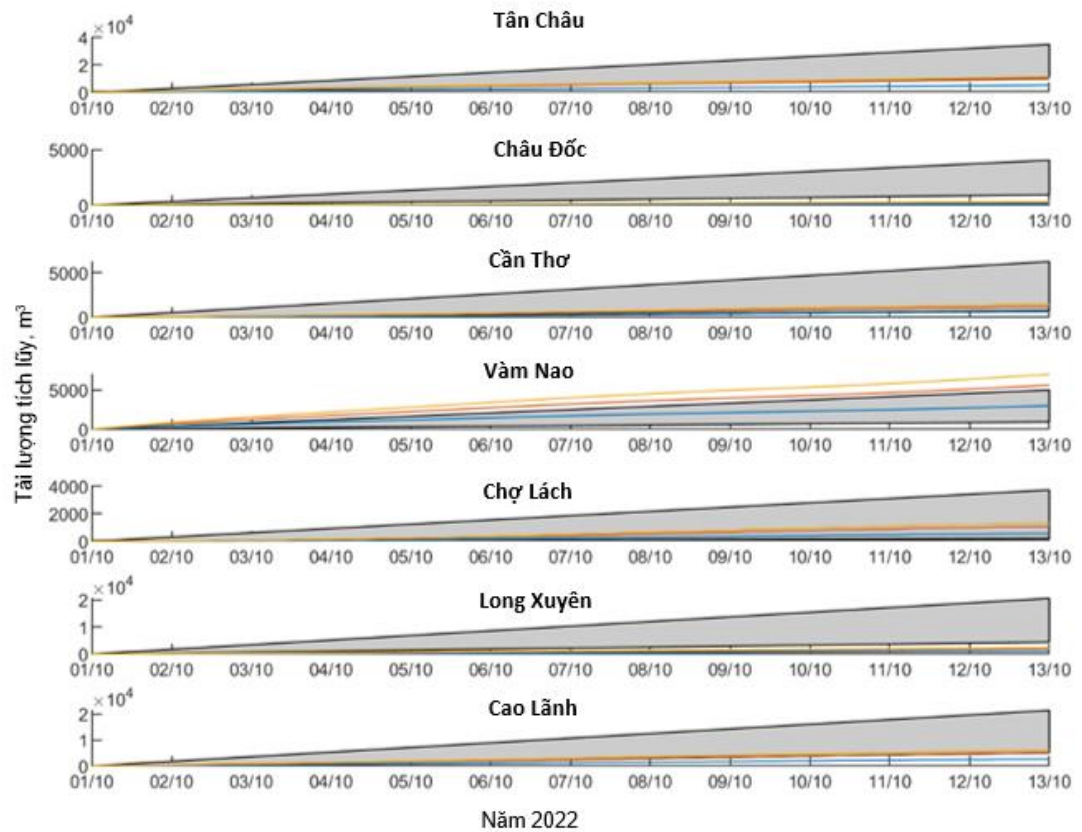


Hình 4-15: Vận chuyển tải lượng tại mùa mưa, từ trên xuống, Tân Châu, Châu Đốc, Cần Thơ, Vàm Nao, Chợ Lách, Long Xuyên, Cao Lãnh. Kết quả mô hình được thể hiện bằng các đường màu đỏ ($D=100\mu\text{m}$, runfsD100), các đường màu xanh lam ($D=200\mu\text{m}$, runfs) và các đường màu vàng ($D=300\mu\text{m}$, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình \pm độ lệch chuẩn bao gồm độ không chắc chắn về chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 12 ngày dựa trên phân tích MBES.



Hình 4-16: Vận chuyển tải lượng đáy tích lũy mùa khô qua các mặt cắt Tân Châu (bảng trên), Châu Đốc (bảng giữa) và Cần Thơ (bảng dưới). Kết quả mô hình được thể hiện bằng các đường màu đỏ ($D=100\mu\text{m}$, runfsD100),

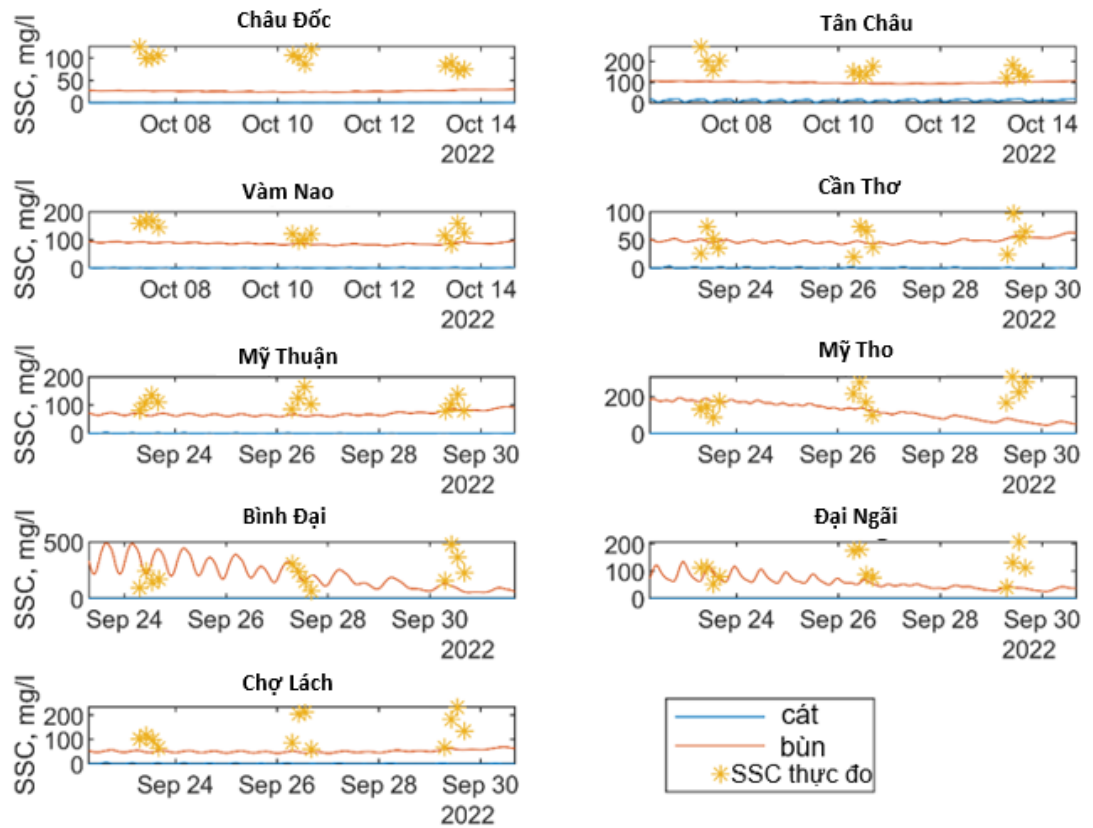
các đường màu xanh lam ($D=200\mu\text{m}$, runfs) và các đường màu vàng ($D=300\mu\text{m}$, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình \pm độ lệch chuẩn bao gồm độ không chắc chắn về chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 18 ngày dựa trên phân tích MBES và ngoại suy trên mặt cắt ngang.



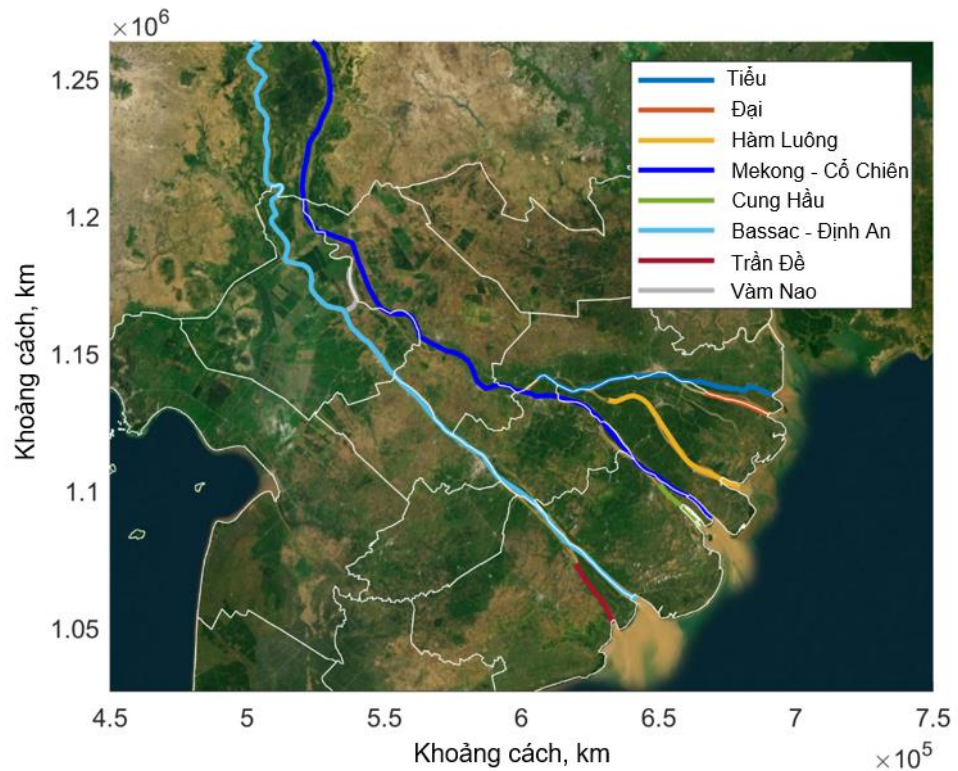
Hình 4-17: Tải lượng đáy tích lũy mùa mưa vận chuyển qua các mặt cắt (từ trên xuống) Tân Châu, Châu Đốc, Cần Thơ, Vàm Nao, Chợ Lách, Long Xuyên, Cao Lãnh. Kết quả mô hình được đưa ra trong các đường màu đỏ ($D=100\mu\text{m}$, runfsD100), các đường màu xanh lam ($D=200\mu\text{m}$, runfs) và các đường màu vàng ($D=300\mu\text{m}$, runfsD300). Vùng màu xám thể hiện phạm vi ước tính tải lượng đáy (trung bình \pm độ lệch chuẩn bao gồm cả độ không chắc chắn của chiều rộng dòng chảy) tính trung bình trong 12 ngày dựa trên phân tích MBES và ngoại suy trên mặt cắt ngang.

4.5.2 Tải lượng lơ lửng

Do nồng độ trầm tích lơ lửng (SSC) bị chi phối bởi phần trầm tích mịn (bùn/sét), nên chúng tôi đã sử dụng mô hình cát-bùn để kiểm định SSC được mô phỏng so với SSC được quan trắc trong dự án. Hình 5-16 cho thấy mức SSC trong bùn được mô phỏng tương tự như mức SSC quan trắc được ở tất cả các trạm ngoại trừ Châu Đốc với mức SSC quan trắc lớn hơn 2 đến 3 lần. Một phát hiện quan trọng là nồng độ cát lơ lửng vẫn nhỏ hơn ít nhất một bậc so với nồng độ bùn được mô phỏng. Điều này phù hợp với các phép đo tại các vị trí ở thượng nguồn hơn (xem Hình 4-4 và Hình 4-5). Tình hình và hiệu chỉnh hơn nữa có thể dẫn đến sự tương đồng tốt hơn giữa các mức SSC quan trắc và mô phỏng nhưng không được coi là một phần của nghiên cứu hiện tại.



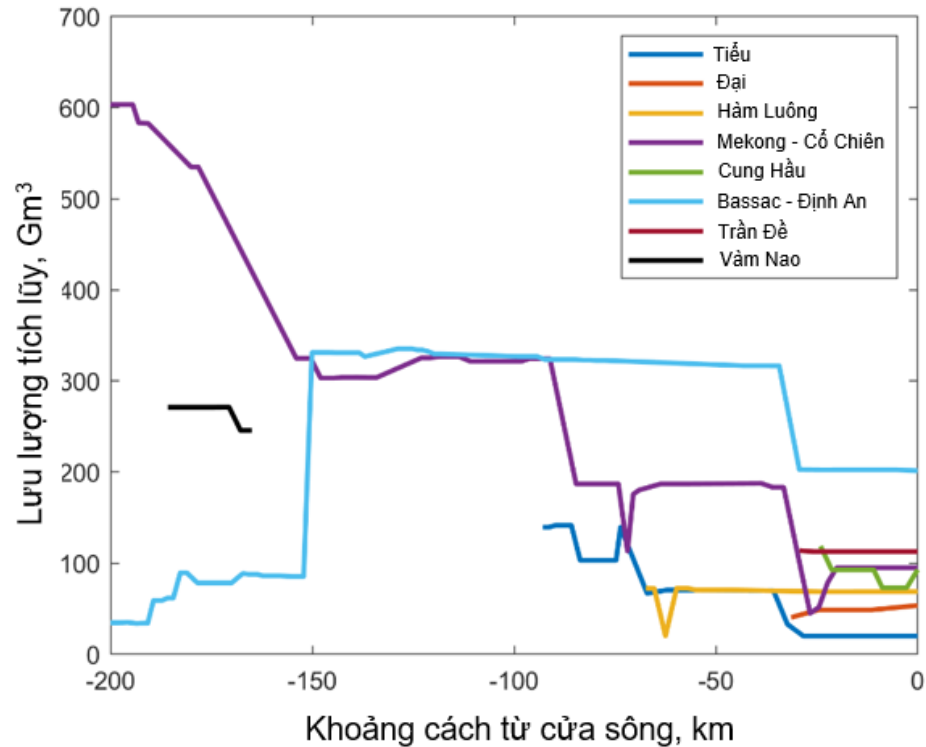
Hình 4-18: So sánh SSC được mô phỏng (cát và bùn, runfsm) và quan trắc (thực đo)



Hình 4-19: Các nhánh sông ĐBSCL (đường có màu), biên giới tỉnh đường trắng.

Phần này trình bày sự phân bố dòng chảy và trầm tích năm 2022 trên các nhánh khác nhau trong ĐBSCL. Hình 4-19 xác định bằng màu áp dụng cho các nhánh sông ĐBSCL khác nhau. Trước hết, Hình 4-20 thể hiện sự phân bố dòng chảy sông năm 2022. Dòng chảy lớn nhất vào ĐBSCL tại Tân Châu qua nhánh Mekong - Cổ Chiên trong khi khoảng 5% dòng chảy vào ĐBSCL tại Châu Đốc qua sông Hậu. Đoạn sông Vàm Nao phân phối lượng nước này với khối lượng gần như tương tự trong phạm vi khoảng 175 km tính từ cửa sông. Cách cửa sông

Bassac 100 km, các nhánh Bassac và Cổ Chiên lại chia thành 7 nhánh phụ trong đó Bassac mang lượng nước lớn nhất. Hình 4-21 cho thấy tổng vận chuyển cát tích lũy (tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng) qua các mặt cắt ngang tại các vị trí có dữ liệu MBES. Vận tải lớn nhất (đường cong dốc nhất trong Hình 4-21) xảy ra trong mùa mưa ở tất cả các trạm mặc dù cường độ có thể khác nhau ở mỗi trạm. Tín hiệu mùa mưa yếu hơn đối với các trạm Châu Đốc, Long Xuyên, Cần Thơ (dọc sông Hậu) và Chợ Lách. Theo nhánh sông Cổ Chiên các trạm Tân Châu, Vàm Nao, Cao Lãnh có khối lượng vận chuyển lớn nhất. Do các kết quả này trích xuất từ mô phỏng với lượng cát dư thừa trong hệ thống (chạy với độ dày cát ban đầu là 50 m), chúng đã đánh giá quá cao tốc độ vận chuyển thực tế.



Hình 4-20: Phân bố dòng chảy tích lũy trên các nhánh sông ĐBSCL trong năm 2022

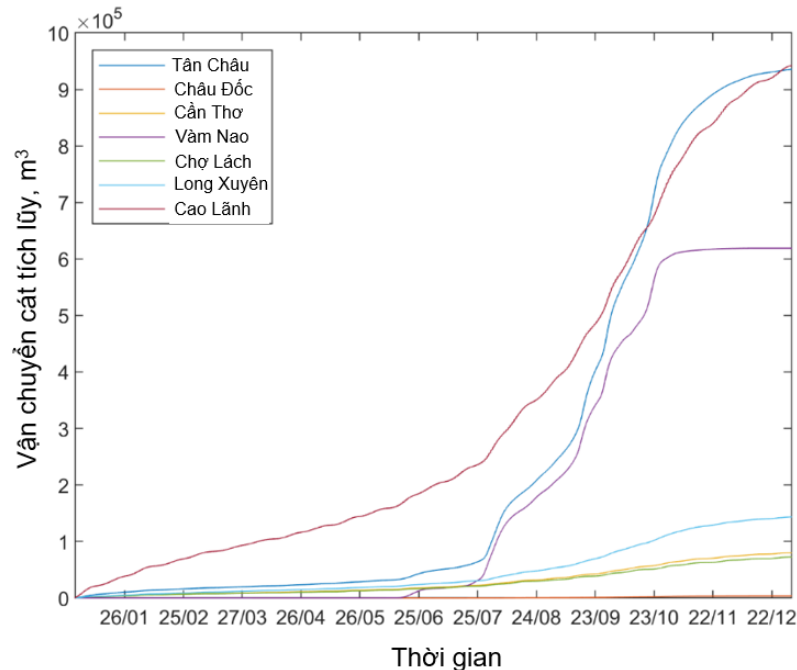
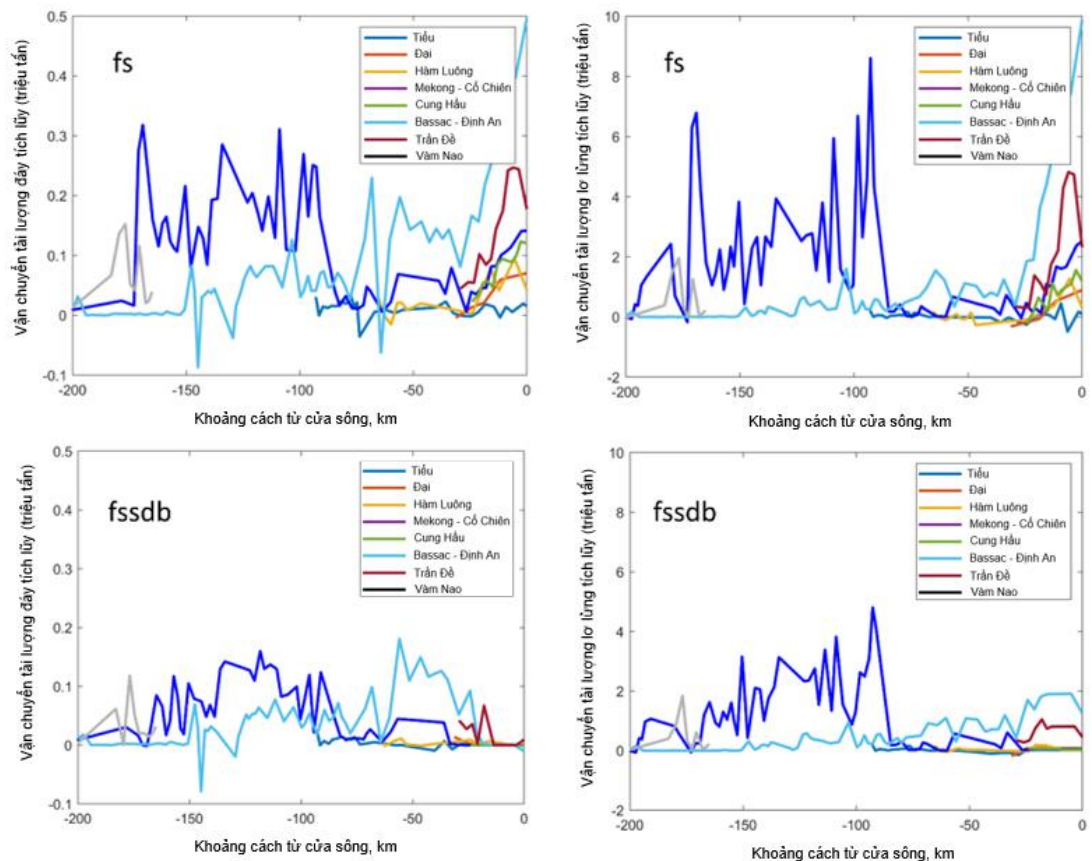


Figure 4-21: Runfs cumulative sand transport over year 2022 for various stations spread over the ĐBSCL that have MBES data.

Ở các khoảng cách khoảng 10 km Hình 4-22 cho thấy vận chuyển tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng tích lũy năm 2022 dọc theo các nhánh sông ở ĐBSCL. Tải lượng đáy thường nhỏ hơn tải lượng lơ lửng một cấp số mũ. Tải lượng lơ lửng lớn nhất xảy ra ở km 200 và km 90, tức là ở nhánh Mekong - Cổ Chiên giữa biên giới Campuchia và đoạn phân nhánh vào cửa Tiểu. Tuy nhiên, khối lượng vận chuyển cát tối đa năm 2022 khó có thể vượt quá 8 triệu tấn/năm, nhỏ hơn nhiều so với khối lượng khai thác cát được ước tính trong Chương 3.

Cả tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng đều giảm đáng kể trên nhánh Mekong - Cổ Chiên sau khi nhánh nhánh tại cửa Tiểu. Một lý do có thể là sự phân nhánh gây ra sự phân bố dòng chảy và vận tốc thấp hơn với khả năng vận chuyển cát tương ứng thấp hơn. Những giải thích khác là các điểm phân nhánh nằm trong môi trường nơi chế độ dòng chảy chuyển sang chế độ thủy triều, nơi vận chuyển cát bởi thủy triều giảm đi do mặt cắt ngang lớn hơn. Lý do thứ ba có thể là việc khai thác trong quá khứ đã dẫn đến các mặt cắt sâu hơn làm giảm dòng chảy và vận chuyển cát. Sự lắng đọng cát có nhiều khả năng xảy ra ở khu vực có độ dốc vận chuyển cát không gian lớn nhất.

Tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng được tính toán đều cho thấy hiện tượng “tăng đột biến” dọc theo các nhánh sông. Điều này được cho là do sự thay đổi không gian của cường độ vận tốc. Vận chuyển cát, đặc biệt là vận chuyển cát đáy, bị chi phối bởi vận tốc địa phương. Những vận tốc này có thể thay đổi đáng kể dọc theo sông Mekong do sự thay đổi về mặt cắt ngang. Các biến đổi có thể là có thật (mặt cắt rộng hơn, nông hơn so với sâu hơn và hẹp hơn do bờ đê hoặc kè) nhưng cũng có thể là kết quả của việc thiết lập mô hình. Độ phân giải lưới đôi khi có thể quá thô, thiếu các phần kênh sâu hơn. Một nguyên nhân khác là số lượng dữ liệu mặt cắt ngang hạn chế ở một số đoạn sông đòi hỏi phải nội suy dữ liệu theo chiều dọc dẫn đến nội suy độ sâu 2D tốt nhất có thể nhưng vẫn quá thô trong một số vùng của miền tính mô hình.



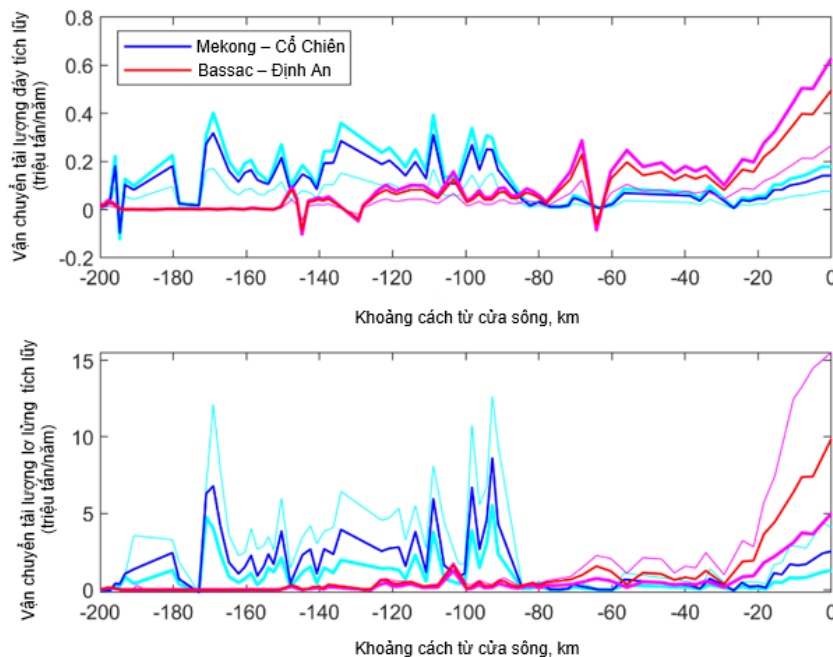
Hình 4-22: Vận chuyển tải lượng đáy tích lũy (cột bên trái) và tải lượng lơ lửng tích lũy năm 2022 (cột bên phải), vận chuyển cát cho runfs (hàng trên) và runfssdb (hàng dưới)

Các lần chạy mô hình sơ bộ cho thấy hiện tượng “gai nhọn” giảm khi mô hình cho phép điều chỉnh hình thái động lực học, đây có thể là một cách tiếp cận bổ sung hữu ích. Thông thường, mức tăng đột biến lớn nhất sẽ giảm 30% trong thời gian 3 năm hoạt động hình thái. Do đó, độ

đốc không gian trong vận chuyển cát dẫn đến sự thay đổi hình thái động lực học làm trơn tru độ sâu và giảm độ dốc vận chuyển không gian. Tuy nhiên, giả sử rằng phần lớn những bất thường này là do độ phân giải hạn chế của phép đo độ sâu, có thể kết luận rằng hình thái động lực học được tính toán không có mối quan hệ chặt chẽ với những thay đổi hình thái thực tế. Các hoạt động hình thái học không được xem xét thêm trong nghiên cứu này.

Tại một số địa điểm, vận chuyển tải lượng đáy cho thấy vận chuyển âm (tức là hướng vào đất liền). Các vị trí này gắn liền với sự hợp lưu của các nhánh hoặc các vị trí ở hạ nguồn các cù lao trong một nhánh. Chúng ít nhiều mang tính nhân tạo và có thể liên quan đến việc đơn giản hóa trong sơ đồ hóa và do đó nên được bỏ qua.

Hình 4-23 thể hiện phân tích độ nhạy đối với đường kính cát. Đường kính lớn hơn thực sự dẫn đến tải lượng tổng thể giảm, tương ứng vận chuyển tải lượng đáy lớn hơn và vận chuyển trầm tích lơ lửng nhỏ hơn. Áp dụng đường kính cát 100 μm dẫn đến vận chuyển cát lớn nhất mặc dù vận chuyển cát tối đa (~12 triệu tấn/năm) vẫn nhỏ so với khối lượng khai thác (~50 triệu tấn/năm).

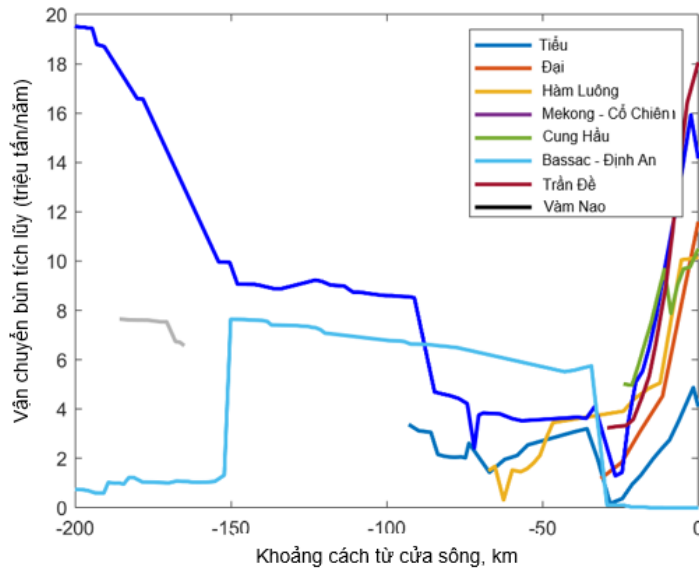


Hình 4-23: Vận chuyển cát tích lũy dọc theo nhánh Cổ Chiên và Bassac năm 2022. Đường nét liền thể hiện runfs, đường mảnh thể hiện runfsD100 và đường dày runfsD300.

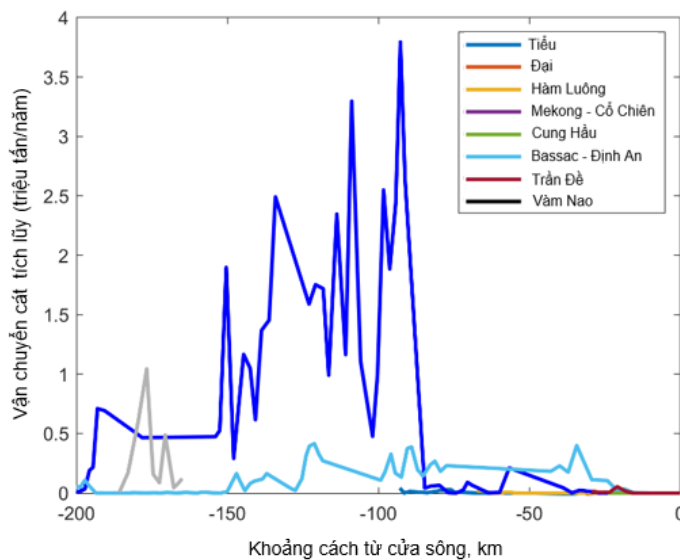
Đáng chú ý, vận chuyển cát tích lũy tăng đáng kể về phía nhiều cửa của các nhánh. Đồng thời, Gugliotta và cộng sự (2017) và Hình 4-5 cho thấy những khu vực này trên thực tế được bao phủ bởi bùn và lượng cát hiện diện rất hạn chế. Do đó, lượng cát vận chuyển lớn hơn tại cửa sông phải được coi là sự hạn chế của mô hình.

Hình 4-22 cũng cho thấy kết quả của runfssdb với lượng cát sẵn có được điều chỉnh trong đáy sông mô tả lượng cát sẵn có hạn chế trong 25 km đầu tiên tính từ cửa sông và số lượng hạn chế trong ĐBSCL dựa trên phân tích lượng cát sẵn có được mô tả trong Chương 3. Trong trường hợp đó, lượng cát được vận chuyển lượng cát giảm trên toàn miền nhưng đặc biệt là ở các vùng cửa sông.

Hình 4 24 và Hình 4-25 cho thấy khối lượng bùn và cát hàng năm cho runfsm bao gồm cả cát và bùn. Thể tích bùn thường lớn hơn một cấp số mũ so với thể tích cát. Ngoài ra, sự xuất hiện của các đỉnh bất thường (gai nhọn) trong không gian cũng ít hơn nhiều. Điều này là do trầm tích mịn ở trạng thái lơ lửng dễ dàng phân tán hơn cát nên nó ít chịu sự thay đổi vận tốc cục bộ hơn. Do đó, quá trình vận chuyển trầm tích mịn bị chi phối bởi các quá trình khuếch tán – lắng đọng thay vì các quá trình lắng đọng - lơ lửng như trong trường hợp cát. Các khu vực không có sẵn ngăn cản vận chuyển cát cục bộ. Ngoài ra, khối lượng vận chuyển cát nói chung giảm 10-20% do sự có mặt của bùn trong đáy cản trở sự phân tán và vận chuyển cát.



Hình 4-24: Vận chuyển bùn tích lũy năm 2022 cho runfsm



Hình 4-25: Vận chuyển cát tổng tích lũy năm 2022 (tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng) cho runfsm

4.6 So sánh với mô hình vận chuyển trầm tích mịn

Thành và cộng sự (2021) đã hiệu chỉnh mô hình vận chuyển trầm tích cổ kết dính mịn dựa trên tải lượng trầm tích ước tính từ các phép đo. Bảng 5-3 so sánh cường độ vận chuyển trầm tích mịn tích lũy của Thành và cộng sự (2021) với cường độ vận chuyển cát tích lũy (tải lượng lơ lửng và tải lượng đáy) trong nghiên cứu này (runfsm). Rõ ràng, vận chuyển trầm tích mịn lớn hơn nhiều so với vận chuyển cát lơ lửng, trong khi tải lượng đáy nhỏ hơn nhiều so với vận chuyển tải lượng cát lơ lửng. Lượng trầm tích mịn được vận chuyển vẫn ở mức thấp, khoảng 30% tải lượng trầm tích mịn theo Thành và cộng sự (2021). Điều này có lẽ là do dòng chảy sông cao hơn trong năm 2018 mà Thành và cộng sự (2021) đã tính ngân sách. Vận chuyển cát tại các cửa của các nhánh khác nhau hầu như không xuất hiện trong nghiên cứu này (ít nhất là trong hầu hết các dòng chảy thực tế) do lượng cát sẵn có ở khu vực đó có hạn. Thành và cộng sự (2021) đã áp dụng đáy sông cứng nên khối lượng bùn ở cửa sông trong nghiên cứu hiện tại (có trừ lượng bùn ban đầu ở đáy cửa sông) là lớn hơn nhiều.

Các ước tính theo mô hình vận chuyển tải lượng đáy và tải lượng lơ lửng đi vào ĐBSCL tại Tân Châu (3,1 triệu tấn/năm) thấp hơn so với khối lượng ước tính $6,18 \pm 2,01$ triệu tấn/năm trong giai đoạn 2013-2014, bởi Hackney và cộng sự 2020.

Bảng 4-5: Tải lượng trầm tích qua các mặt cắt ngang, *biểu thị mặt cắt tại cửa sông.

| Trạm | Trầm tích mịn (Thành và công sự 2021) cho năm 2011 [triệu tấn] | Trầm tích mịn (nghiên cứu này) cho năm 2022 [triệu tấn] | Tải lượng cát lơ lửng (nghiên cứu này - runfsm) cho năm 2022 [triệu tấn] | Tải lượng cát đáy (nghiên cứu này - runfsm) cho năm 2022 [triệu tấn] |
|----------------|--|---|--|--|
| Kratie | 99.6 | 36.5 | 3 | 0.3 |
| Chroy Changvar | 93.6 | 33.6 | 10 | 0.6 |
| OSP MRC | 11.3 | 5.6 | 0.0 | 0.00 |
| Koh Norea | 72.4 | 29.9 | 2.8 | 0.3 |
| Châu Đốc | 4.5 | 3.1 | 0.0 | 0.0 |
| Tân Châu | 73.9 | 21.8 | 3.0 | 0.14 |
| Vàm Nao | 25.8 | 7.6 | 0.9 | 0.07 |
| Cần Thơ | 21 | 6.7 | 0.11 | 0.05 |
| Mỹ Thuận | 30.7 | 8.6 | 0.16 | 0.05 |
| Trần Đề* | 3.3 | 18.6 | 0.04 | 0.0 |
| Định An* | 8.8 | 0.0 | 0.04 | 0.0 |
| Cung Hầu* | 3.3 | 10.3 | 0.0 | 0.0 |
| Cổ Chiên* | 2.8 | 14.1 | 0.0 | 0.0 |
| Hàm Luông* | 1.3 | 10.1 | 0.0 | 0.0 |
| Đại* | 1.9 | 11.6 | 0.0 | 0.0 |
| Tiểu* | 1.4 | 4 | 0.0 | 0.0 |

4.7 Thảo luận về mô hình vận chuyển cát

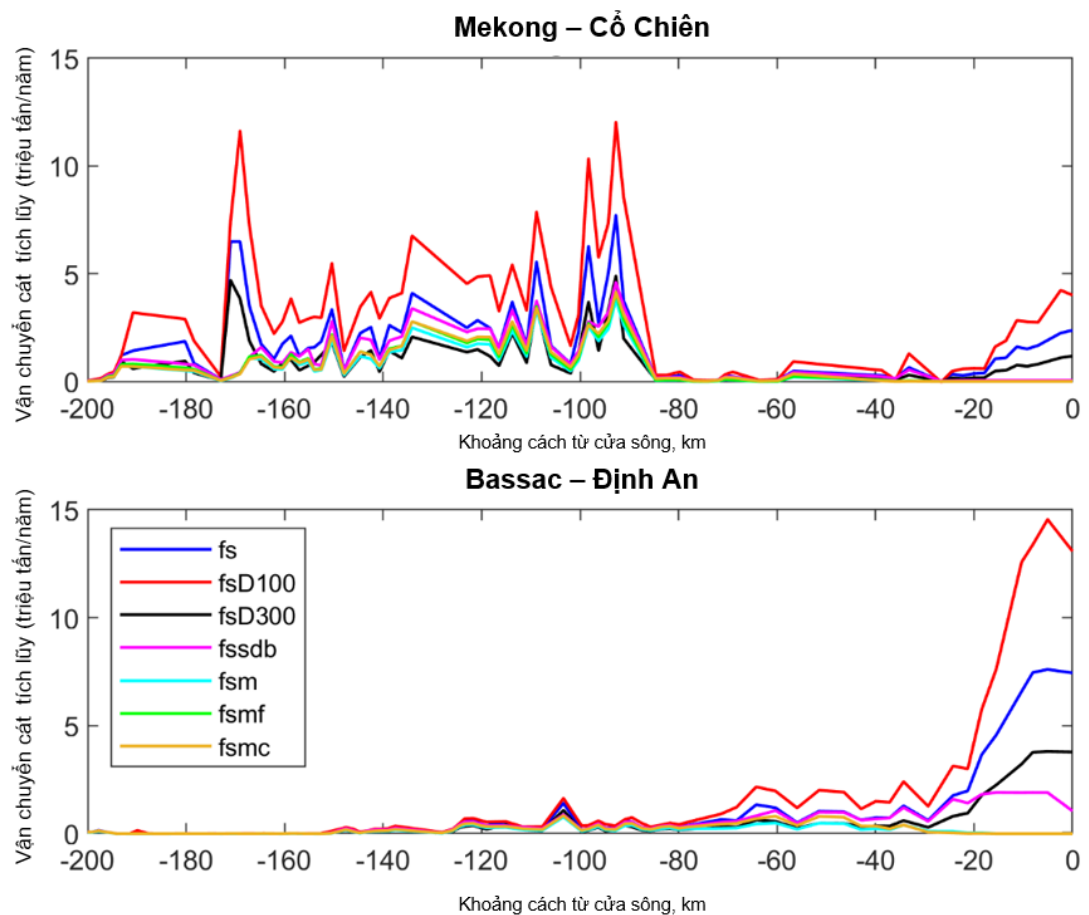
Việc kiểm định kết quả mô hình dựa trên nồng độ cát đo được vẫn là một thách thức, đặc biệt là liên quan đến tải lượng cát lơ lửng. Các ước tính tải lượng đáy duy nhất có được từ đo đạc MBES trong nghiên cứu này thường lớn hơn nhưng có cùng độ lớn với tải lượng đáy được mô hình hóa. Mặc dù vận chuyển cát lơ lửng đóng góp lớn nhất vào tổng lượng vận chuyển cát nhưng không có phép đo nào về nồng độ cát lơ lửng. Kết quả mô hình và dữ liệu khan hiếm từ các vị trí thượng nguồn ở Campuchia và tại biên giới Campuchia cho thấy rằng vận chuyển cát lơ lửng có cường độ lớn hơn tải lượng đáy, trong khi vận chuyển hạt mịn (phù sa/bùn) lớn hơn vận chuyển cát lơ lửng. Điều này được chứng minh bằng kết quả mô hình.

Kết quả mô hình cho thấy tổng khối lượng vận chuyển cát năm 2022 vẫn còn nhỏ so với khối lượng khai thác cát ước tính hàng năm là ~50 triệu tấn/năm hoặc một loạt các cài đặt tham số mô hình. Khối lượng vận chuyển cát tối đa hầu như không vượt quá 7 triệu tấn/năm và thường ít hơn nhiều đối với phần lớn ĐBSCL. Đúng như mong đợi, việc vận chuyển tải lượng đáy được mô hình hóa thường nhỏ hơn một cấp số mũ so với vận chuyển tải lượng lơ lửng. Dữ liệu đầu và dữ liệu kiểm định mô hình vẫn khan hiếm về mặt không gian và có chất lượng hạn chế. Điều này dẫn đến phạm vi không chắc chắn trong đầu ra của mô hình và cách diễn giải nó. Phân tích độ nhạy cho thấy sự vận chuyển cát là một hàm số của đường kính trầm tích, lượng trầm tích sẵn có và sự hiện diện của bùn. Tuy nhiên, Hình 4-26 cho thấy vận chuyển cát vẫn ở mức thấp so với khối lượng khai thác ước tính đối với một loạt các biến thể tham số đầu vào của mô hình ước tính tốt nhất. Việc áp dụng mức giảm đường kính 50% một cách phi thực tế (~30%) sẽ làm tăng khối lượng vận chuyển cát tối đa tại một số địa điểm. Việc áp dụng phân bố lượng cát sẵn có và sự hiện diện của bùn thực tế hơn sẽ giúp giảm khối lượng vận chuyển cát từ 20-30%. Runfsm có thể coi là lần tính toán thực tế nhất. Tác động của sự thay đổi đặc tính bùn (runfsmc và runmf) vẫn còn hạn chế.

Phương pháp mô hình hóa của chúng tôi phù hợp để đánh giá vận chuyển cát ở quy mô hệ thống, như sự biến động theo mùa và sự suy giảm xu hướng vận chuyển cát trong ĐBSCL. Việc diễn giải các kết quả của mô hình sang quy mô nhỏ hơn sẽ đặt ra nhiều câu hỏi hơn. Ví dụ, điều này đúng khi cần phải lập ngân sách cát của tỉnh. Lý do chính gây lo ngại là việc vận chuyển cát qua một mặt cắt nhất định phụ thuộc nhiều vào chất lượng đo độ sâu ở mặt cắt đó. Kết quả là, việc vận chuyển cát được mô hình hóa qua các mặt cắt ngang ở thượng nguồn hoặc hạ nguồn vài km có thể dễ dàng sai khác với hệ số từ 2-5. Kết quả mô hình dựa trên khả

năng vận chuyển cát. Trong thực tế, việc vận chuyển cát cũng sẽ phụ thuộc vào sự thay đổi sẵn có của cát ở đáy, mô hình nhiễu loạn chi tiết và hiệu ứng trễ. Kết quả của mô hình sẽ đáng tin cậy hơn khi những dữ liệu chi tiết này có sẵn ở ranh giới tình để hiệu chỉnh độ phân giải cao hơn của mô hình phù hợp với điều kiện địa phương. Cuối cùng, một số ranh giới tình nằm dọc theo lòng các nhánh sông Mê Kông. Điều này ngụ ý rằng sự phân bố theo chiều ngang của cát trở thành một yếu tố quan trọng. Các kết quả mô hình về sự phân bố mặt cắt của khối lượng xói mòn và lắng đọng cát không thể được kiểm định và có thể dễ dàng khác biệt theo hệ số 2-3 so với khối lượng quan trắc được [thiếu].

Chúng tôi nhấn mạnh rằng việc vận chuyển cát theo mô hình và ngân hàng cát được trình bày trong báo cáo này cần được giải thích một cách thận trọng. Đặc biệt là việc vận chuyển cát ra biển tại cửa sông của các nhánh khác nhau được coi là không mang tính đại diện do cách tiếp cận 2D không bao quát được động lực nước mặn-ngọt 3D. Tuy nhiên, kết quả mô hình cho thấy lượng cát cung cấp cho khu vực cửa sông vẫn khá nhỏ so với lượng cát cung cấp vào DBSCL.



Hình 4-26: Vận chuyển cát tích lũy vào năm 2022 dọc theo hai nhánh chính của sông Mekong cho các lần chạy mô hình khác nhau, trong đó runfsm có thể được coi là phù hợp nhất.

5 Tham vấn các bên liên quan

5.1 Tham vấn

Các cuộc họp tham vấn được thực hiện ở cấp khu vực với Ủy ban sông Mekong Việt Nam, cấp quốc gia với 4 bộ (MONRE, MARD, MOC, MPI) và cấp tỉnh với 13 tỉnh (Sở TN&MT). Danh sách các cuộc họp tham vấn được cung cấp trong Bảng 5-1 trong khi thông tin chi tiết có thể được tìm thấy trong Phụ lục B. Các tham vấn khác đã được gửi các tài liệu và thông tin liên quan qua thư điện tử (email). Một số phát hiện chính từ tham vấn cũng được tóm tắt trong đoạn dưới đây để chú ý.

Bảng 5-1: Danh sách các cuộc họp tham vấn

| # | Tên đơn vị | Thời gian tham vấn | Phương thức tham vấn | Người phụ trách |
|---|--|--------------------|----------------------|--|
| 1 | Cục viễn thám Quốc gia | 25/02/2022 | Gặp trực tiếp | Bà Loan, Ban thư kí, 0977036268. Ông Lê Quốc Hưng, 0914486663 Ông Đạt, 0983156866 |
| 2 | Vụ Vật liệu Xây dựng, Bộ xây dựng | 21/02/2022 | Email | Ông Lương Văn Hùng: 0983197966 Email: luongvanhungbxd@gmail.com |
| 3 | Vụ kế hoạch, Bộ kế hoạch và đầu tư | 01/03/2022 | Họp trực tuyến | Ông Sơn, Ban thư kí: 0898579189. Phụ trách: Bà Nguyễn Thị Thu Phương 0902186816 – Chuyên gia Bà Đinh Tâm Hiền- Vụ kế hoạch |
| 4 | Đại học Cần Thơ | 01/03/2022 | Họp trực tuyến | Viện biến đổi khí hậu Email: vbdkh@ctu.edu.vn Ông Tuấn 0908909063 |
| 5 | Tổng cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam | 01/03/2022 | Email | Ông Lưu Thế Long 0918840648 Email: long.luu2003ltdb@gmail.com |
| 6 | Sở NN&PTNT Sở TN&MT của các tỉnh Tiền Giang, Bến Tre, Trà Vinh, Sóc Trăng, Vĩnh Long, Cần Thơ, Hậu Giang, An Giang, Đồng Tháp | 21-25/02/2022 | Gặp trực tiếp | |

Một số điểm chính đã được thảo luận trong các cuộc họp này và được tóm tắt như sau:

- Nhận xét/phản hồi chính:
 - ✓ Kết quả dự án có thể được tích hợp vào quy hoạch cấp tỉnh của địa phương.
 - ✓ Cần rà soát các quy định hiện hành, làm rõ mục tiêu chính của quy hoạch khai thác cát và xác định cơ quan chủ chốt chịu trách nhiệm quản lý, quy hoạch khai thác cát.
 - ✓ Dự kiến chia sẻ kết quả dự án để tích hợp vào quy hoạch tỉnh.
 - ✓ Hầu hết các đơn vị đều thể hiện thiện chí hỗ trợ và chia sẻ dữ liệu/thông tin liên quan nhưng cơ chế chia sẻ dữ liệu cũng như chi phí liên quan (tuân thủ quy định của pháp luật) sẽ được các cấp quản lý cao hơn thảo luận và chấp thuận.
 - ✓ Hai mô hình được đề xuất sử dụng để mô phỏng thủy động lực học và trầm tích ĐBSCL trong dự án này (Delft3D-FM và TELEMAC) vì vậy việc tích hợp các mô hình này là rất quan trọng.

Thu thập dữ liệu thứ cấp: Hầu hết dữ liệu/thông tin liên quan đã được thu thập. Dữ liệu bao gồm các báo cáo, tài liệu, các nghiên cứu/dự án trước đây hoặc hiện có. Sau hội thảo báo cáo tiến độ lần thứ nhất diễn ra vào ngày 14/7/2022, tại TP.HCM, đơn vị tư vấn Deltares (Hà Lan) phối hợp với Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường (CEFD - Việt Nam) triển khai phương án thu thập địa chất, dữ liệu lỗ khoan tại ĐBSCL. Được sự hỗ trợ tích cực của Cục Địa chất, Cục Khoáng sản và Sở Tài nguyên và Môi trường các tỉnh trong khu vực nghiên cứu, đơn vị tư vấn đã thu thập được trên 20 tài liệu, chủ yếu là các báo cáo về quy định tài nguyên, quy hoạch thăm dò, khai thác, sử dụng khoáng sản, cát san lấp, cát sông làm vật liệu xây dựng thông thường. Các tài liệu trên cung cấp tọa độ lỗ khoan, độ sâu, độ sâu của từng lớp/mặt cắt địa chất, độ sâu của bề mặt đất, phân tích kích thước hạt của mẫu đất lấy từ lỗ khoan và các thông tin về đụn cát như chiều dài, chiều rộng, tọa độ, ước tính tổng trữ lượng cát di động hiện có, chất lượng cát, ... đáp ứng nhu cầu tính toán trữ lượng và phân bố tài nguyên cát vùng ĐBSCL nói riêng và các tỉnh trong vùng nghiên cứu.

5.2 Hội thảo

Hội thảo là một trong những hoạt động chính để thu hút sự tham gia của các bên liên quan, nhằm mục đích giúp các bên liên quan được thông báo và tham gia vào các hoạt động của dự án cũng như tiến độ trong suốt dự án. Trong 6 tháng đầu tiên của dự án, hai hội thảo đã được tổ chức: 1) hội thảo khởi động vào ngày 3 tháng 3 năm 2022, 2) hội thảo về tiến độ lần thứ nhất vào ngày 14 tháng 7 năm 2022 và 3) hội thảo về tiến độ lần thứ 2 vào ngày 18 tháng 5 năm 2023. Các hội thảo được tổ chức theo hình thức kết hợp (trực tiếp và trực tuyến) do WWF-Việt Nam phối hợp với Cục Quản lý đề điều và Phòng, chống thiên tai làm đối tác chính. Hầu hết các bên liên quan chính như đã nêu trong giai đoạn khởi động đều tham gia. Các bài thuyết trình và các tài liệu hỗ trợ khác (như tờ rơi, bảng câu hỏi) đã được Tư vấn chuẩn bị và được WWF-Việt Nam xem xét trước hội thảo. Phản hồi đáp được tổ chức ngay sau phần trình bày của chuyên gia tư vấn để tạo sự tương tác cởi mở và hiệu quả với các bên liên quan. Bên cạnh phần Hỏi & Đáp, một bảng câu hỏi đã được phát cho tất cả những người tham gia để trả lời bằng văn bản cho công việc của Tư vấn.

5.2.1 Hội thảo khởi động

Hội thảo khởi động (ngày 3 tháng 3 năm 2022) nhằm giới thiệu các thành viên trong nhóm với các bên liên quan và thu thập phản hồi về phương pháp tiếp cận đề xuất của dự án cũng như thông tin chi tiết về hai gói công việc khảo sát thực địa và thiết lập mô hình. Sau đây tóm tắt những điểm chính:

- Vị trí của các trạm quan trắc, vị trí khảo sát ban đầu do Tư vấn đề xuất và đã tham khảo ý kiến của WWF-Việt Nam, VNDDMA và tất cả các bên tham gia. Hầu hết các bên liên quan chính đều nhất trí với địa điểm và lịch trình khảo sát được lựa chọn.

- Độ chính xác của các phương pháp khảo sát: Các phương pháp khảo sát đã được chứng minh là có thể áp dụng trên toàn thế giới theo các tiêu chuẩn hoặc hướng dẫn quốc tế hoặc quốc gia.
- Thu thập dữ liệu để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình: Hầu hết dữ liệu quan trắc thủy động lực và trầm tích lịch sử và gần thời gian thực cho đến năm 2022 sẽ được cung cấp bởi Đài KTTV Nam Bộ, tư vấn phụ của liên doanh Deltares. Dữ liệu khác đã được lấy từ các nghiên cứu trước đây. Dữ liệu sẽ được kiểm tra và xác minh trước khi được sử dụng cho công việc mô hình hóa.
- Nhu cầu đào tạo: Tư vấn sẽ đào tạo cán bộ kỹ thuật ở cả cấp quốc gia và cấp tỉnh.



Hình 5-1: Hội thảo khởi động tại Cần Thơ

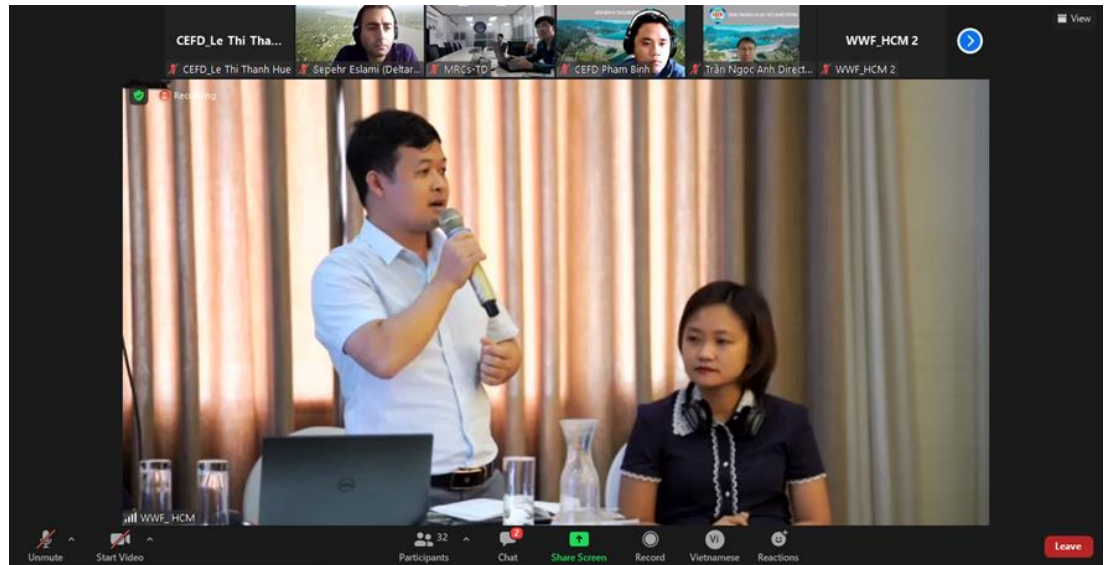
5.2.2 Hội thảo báo cáo tiến độ lần 1

Hội thảo tiến độ lần 1 (ngày 12 tháng 5 năm 2022) nhằm thu thập phản hồi về đợt khảo sát đo đạc đầu tiên và kết quả ban đầu của các công việc khác nhau, đặc biệt là để chuẩn bị cho đợt khảo sát mùa mưa. Những điểm sau đây là những điểm chính từ hội thảo tiến độ lần 1:

- Ước tính trữ lượng cát di động hiện có dựa trên các phép đo SBP theo phương pháp đã được trình bày trong báo cáo khởi động.
- Xác định vị trí bờ bị xói lở, bồi lắng: phân tích các yếu tố liên quan đến quá trình xói lở, bồi lắng.
- Ước tính khai thác cát bằng hình ảnh vệ tinh: Google Earth Engine và thuật toán phân loại sẽ được áp dụng để phân biệt các loại tàu khác nhau để ước tính khối lượng khai thác cát. Tuy nhiên, điều cần thiết là thu thập thêm thông tin từ chính quyền địa phương để hiệu chỉnh và kiểm định kết quả phân tích.
- Di chuyển trạm đo đặc giữa Mỹ Thuận và Tân Châu: Về nguyên tắc, các địa điểm đã được thống nhất trước. Tuy nhiên, đã có cuộc thảo luận xem xét di chuyển một trong các trạm từ hạ nguồn (gần biển) lên thượng nguồn (giữa Tân Châu và Mỹ Thuận) để có thêm thông tin cho đoạn sông đó. Các lập luận phản đối: a) trạm bổ sung có thể không nâng cao hiểu biết về hệ thống sông của chúng tôi vì đây chỉ là một điểm tham chiếu với các điều kiện tương đối giống với các trạm thượng nguồn và hạ nguồn của dòng sông so với một trạm

gần biển và bị ảnh hưởng bởi độ mặn, b) thiếu dữ liệu mực nước đáng tin cậy gần vị trí đo đạc có khả năng ảnh hưởng đến độ chính xác của các quan trắc MBES.

- Chia sẻ và trao đổi dữ liệu: Việc chia sẻ dữ liệu với chính quyền địa phương phải tuân theo các quy định của chính phủ. Việc trao đổi dữ liệu với MRC là cần thiết và đòi hỏi sự phối hợp hơn nữa giữa MRC và WWF-Việt Nam.



Hình 5-2: Đại diện của liên doanh tư vấn trả lời các câu hỏi của đại biểu tại Hội thảo báo cáo tiến độ lần 1

5.2.3 Hội thảo báo cáo tiến độ lần 2 (Hội thảo kiểm định)

Hội thảo tiến độ lần 2 (ngày 18 tháng 5 năm 2023) nhằm trình bày các đợt khảo sát thực địa đã hoàn thành và đặc biệt là thu thập phản hồi về dự thảo ngân hàng cát cho Đồng bằng sông Cửu Long. Một bản tóm tắt các điểm chính được trình bày dưới đây:

- Kết quả của các hoạt động sau đã được trình bày tại hội thảo: khảo sát thực địa, vận chuyển tải lượng đáy, ước tính khối lượng khai thác cát từ hình ảnh vệ tinh, ước tính trữ lượng cát di động hiện có, thiết lập mô hình ngân hàng cát.
- Phản hồi từ cán bộ các tỉnh cho thấy kết quả nhìn chung phù hợp với dữ liệu của các địa phương.
- Tuy nhiên, cần phải chi tiết hóa và trực quan hóa kết quả trữ lượng cát di động hiện có cho từng tỉnh để có thể lồng ghép vào quy hoạch tỉnh.



Hình 5-3: Đại diện của liên doanh tư vấn gói Ngân hàng Cát trả lời các câu hỏi của đại biểu tại hội thảo báo cáo tiền độ lần 2.

5.3 Tập huấn

5.3.1 Tập huấn quan trắc

Nhằm trao đổi kiến thức về đo đạc và khảo sát cần thiết cho nghiên cứu ngân hàng cát, một hội thảo đào tạo kéo dài hai ngày đã được tổ chức vào ngày 28 và 29 tháng 3 năm 2022 tại thành phố Vĩnh Long. Tổng cộng có 35 học viên tham gia tập huấn, chủ yếu là cán bộ kỹ thuật của Bộ TN&MT, Bộ NN&PTNT, Sở TN&MT và Sở NN&PTNT. Khóa tập huấn tập trung vào hai chủ đề chính: (i) các phương pháp và kế hoạch quan trắc thủy động lực học và trầm tích lơ lửng bao gồm xử lý dữ liệu và (ii) các phương pháp và kế hoạch theo dõi đụn cát và địa chấn tầng nông. Ngày đầu tiên các học viên sẽ được đào tạo lý thuyết và sau đó là đào tạo thực địa tại trạm thủy văn Mỹ Thuận để đào tạo thực tế vào ngày thứ 2. Phần hỏi đáp được lồng ghép chặt chẽ trong quá trình đào tạo, được hỗ trợ bởi sự tương tác chủ động giữa học viên và giảng viên. Tài liệu tập huấn cũng được phát cho các học viên bằng tiếng Việt để các học viên dễ hiểu và tham khảo sau này. Trong quá trình đào tạo, một số câu hỏi đã được đặt ra về phương pháp và độ chính xác của chúng. Các chuyên gia của đơn vị tư vấn đã mở rộng các phương pháp để giải quyết tất cả các mối quan tâm của học viên.



Hình 5-4: Trình diễn/thử nghiệm thiết bị EdgeTech 6205s (đo sâu hồi âm đa tia - MBES)

5.3.2 Tập huấn mô hình

Mục tiêu chính là giới thiệu các chức năng cơ bản và cung cấp hướng dẫn toàn diện về tạo lưới, nội suy độ sâu, thiết lập mô hình thủy động lực, thực hiện mô hình và xử lý kết quả bằng cách sử dụng Delft 3D-FM và mô hình trầm tích cho Đồng bằng sông Cửu Long. Hội tập huấn kéo dài hai ngày đã được tổ chức vào ngày 06 và 07 tháng 7 năm 2023 tại Thành phố Cần Thơ.

Tham dự hội thảo có đại diện của nhiều cơ quan, tổ chức, trong đó có Cục Quản lý đề điều và Phòng, chống thiên tai, Bộ NN&PTNT, Văn phòng Ủy hội sông Mekong Việt Nam tại Thành phố Hồ Chí Minh, Cục Địa chất Việt Nam và Cục Khoáng sản Việt Nam. Cùng tham dự còn có đại diện Sở Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, Sở Tài nguyên và Môi trường các tỉnh An Giang, Đồng Tháp, Cần Thơ, Hậu Giang, Vĩnh Long, Bến Tre, Trà Vinh, Sóc Trăng và Tiền Giang. Ngoài ra, đại diện của WWF-Việt Nam và nhiều viện nghiên cứu, trường đại học, đơn vị nghiên cứu cũng đã tham gia sự kiện này.

Là một phần của giai đoạn chuẩn bị cho khóa tập huấn, một cuộc khảo sát toàn diện đã được thực hiện để đánh giá mức độ hiểu biết của học viên về các mô hình vận chuyển trầm tích. Trong số 20 phiếu khảo sát được thu thập từ các học viên, nhận thấy rằng chỉ có 02 học viên (10% số học viên được hỏi) đã có kinh nghiệm trước đó hoặc tiếp xúc thực tế với các mô hình vận chuyển trầm tích trong công việc chuyên môn. Điều này cho thấy hầu hết các học viên, bao gồm 18 học viên (90% số học viên được hỏi), chưa từng có kinh nghiệm những mô hình như vậy. Cuộc khảo sát cũng cung cấp những hiểu biết có giá trị về mức độ kỳ vọng và nguyện vọng của học viên đối với khóa tập huấn. Trong số những học viên được hỏi trước đây chưa từng gặp hoặc sử dụng các mô hình vận chuyển trầm tích, họ đều thể hiện mong muốn nhất trí và kiên định là nâng cao kiến thức, hiểu biết và trình độ thành thạo trong việc sử dụng hiệu quả mô hình vận chuyển trầm tích cho các nhiệm vụ liên quan đến công việc. Các học viên coi khóa tập huấn là cơ hội đặc biệt để thu hẹp khoảng cách kiến thức và tiếp thu các kỹ năng thực tế, nâng cao đáng kể năng lực chuyên môn.

Bảng 5-2: Số liệu thống kê khảo sát học viên trước khóa tập huấn sử dụng mô hình.

| Danh mục | Đánh giá | | | | |
|--|----------|-----|-----|------------|---------|
| | Xuất sắc | Tốt | Khá | Trung bình | Hạn chế |
| Tạo lưới tính toán | | | 1 | 1 | |
| Nội suy độ sâu | | | 2 | 1 | |
| Chuẩn bị các điều kiện biên | | 1 | 2 | 1 | |
| Thiết lập tham số mô hình | | 1 | 2 | | |
| Xử lý kết quả tính toán | | | 1 | 1 | |
| Thiết lập mô hình vận chuyển trầm tích | | | | | |

Khóa tập huấn được thiết kế tỉ mỉ nhằm truyền đạt những kiến thức cần thiết và kỹ năng thực hành cần thiết để sử dụng hiệu quả mô hình vận chuyển trầm tích trong dự án. Những người tham gia đã được giới thiệu về các chức năng chính của mô hình và được hướng dẫn một cách có hệ thống thông qua một loạt các bước cụ thể để triển khai thành công mô hình. Khóa học bao gồm các khía cạnh quan trọng như tạo lưới, nội suy độ sâu, chuẩn bị các điều kiện biên, thiết lập tham số mô hình, xử lý kết quả và thiết lập mô hình vận chuyển trầm tích.

Sau khi kết thúc khóa tập huấn, những học viên tham gia đã tiến hành đánh giá hiệu quả của khóa học và tác động của khóa tập huấn đến kết quả học tập của họ. Việc đánh giá bao gồm việc khảo sát mức độ thành thạo của học viên trong việc sử dụng mô hình ngân hàng cát, vốn là một thành phần quan trọng của mô hình vận chuyển trầm tích. Đáng chú ý, kết quả thu được từ cuộc khảo sát sau khóa tập huấn chỉ ra rằng những học viên đã thể hiện năng lực đáng khen ngợi, đạt được kết quả tích cực trong việc sử dụng mô hình ngân hàng cát (xem Bảng 5-3 để biết kết quả chi tiết).

Ngoài đánh giá về kỹ thuật, khóa tập huấn còn nhận được phản hồi từ các học viên tham gia thông qua các phiếu đánh giá. Các phản hồi đều rất tích cực, trong đó các học viên bày tỏ sự hài lòng với chất lượng, nội dung và cách thức tổ chức khóa tập huấn. Phản hồi của học viên phản ánh mức độ đánh giá cao về những kiến thức có giá trị và khả năng ứng dụng thực tế. Phản hồi chi tiết và đánh giá của người học viên được trình bày trong Bảng 5-4.

Bảng 5-3: Số liệu thống kê khảo sát học viên sau khóa tập huấn sử dụng mô hình.

| Danh mục | Đánh giá | | | | |
|--|----------|-----|-----|------------|---------|
| | Xuất sắc | Tốt | Khá | Trung bình | Hạn chế |
| Tạo lưới tính toán | 6 | 9 | 5 | 1 | |
| Nội suy độ sâu | 6 | 7 | 8 | | |
| Chuẩn bị các điều kiện biên | 5 | 11 | 5 | | |
| Thiết lập tham số mô hình | 4 | 11 | 6 | | |
| Xử lý kết quả tính toán | 5 | 8 | 7 | 1 | |
| Thiết lập mô hình vận chuyển trầm tích | 7 | 5 | 8 | | 1 |

Bảng 5-4: Đánh giá chất lượng khóa tập huấn.

| Danh mục | Đánh giá | | | | |
|---------------------------------|----------|-----|-----|------------|---------|
| | Xuất sắc | Tốt | Khá | Trung bình | Hạn chế |
| 1. Nội dung tập huấn | 8 | 13 | | | |
| 2. Tài liệu tập huấn | 8 | 12 | 1 | | |
| 3. Chất lượng giảng viên | 10 | 11 | | | |
| 4. Mức độ tiếp thu của học viên | 5 | 12 | 3 | | |

Khóa tập huấn đã thành công, hoàn thành mục tiêu trang bị cho học viên tham gia kiến thức chuyên môn cần thiết để sử dụng thành thạo mô hình vận chuyển trầm tích. Kết quả đánh giá tích cực sau tập huấn và phản hồi của học viên tham gia nhấn mạnh tính hiệu quả của việc tập huấn trong việc nâng cao hiểu biết và kỹ năng của học viên tham gia, đảm bảo khả năng áp dụng mô hình một cách hiệu quả trong bối cảnh của dự án. Kiến thức thu được từ khóa huấn luyện chắc chắn sẽ góp phần vào thành công chung của dự án trong việc giải quyết các thách thức về vận chuyển trầm tích và quản lý môi trường.



Hình 5-5: Tập huấn mô hình tại Cần Thơ



Hình 5-6: Tập huấn sử dụng mô hình ngân hàng cát.

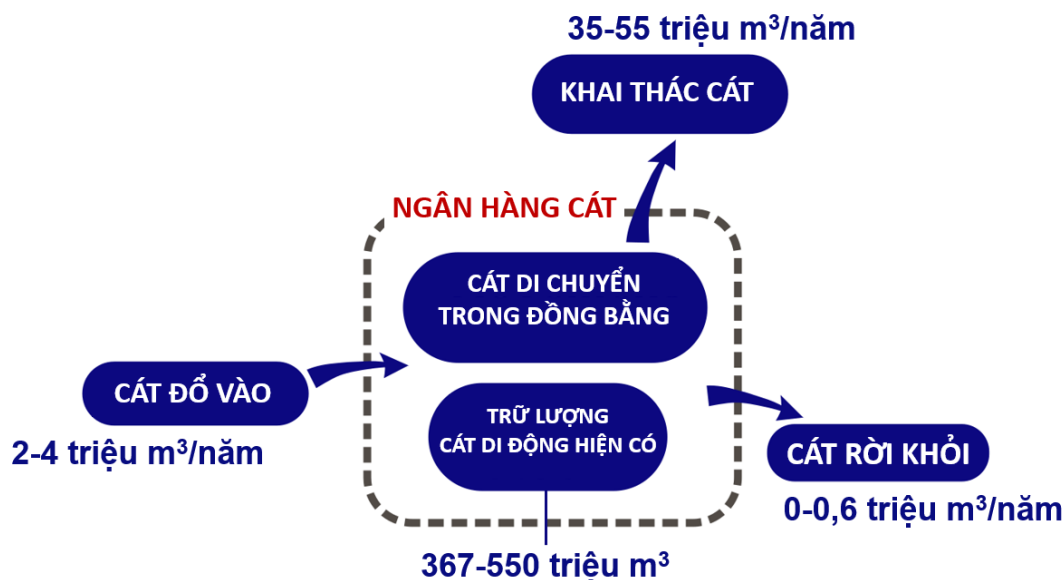
6 Ngân hàng cát toàn khu vực đồng bằng sông Cửu Long (WP2)

Để thiết lập ngân hàng cát cho ĐBSCL, cần xác định năm yếu tố: **1)** lượng cát vào Đồng bằng sông Cửu Long, **2)** sự di chuyển của cát trong vùng đồng bằng, **3)** trữ lượng cát di động hiện có của ĐBSCL, **4)** khai thác cát từ đồng bằng và **5)** cát rời khỏi vùng đồng bằng. Hình 6-1 cung cấp góc nhìn tổng quan về cách các thành phần khác nhau của nghiên cứu hiện tại đóng góp như thế nào vào ngân hàng cát trên toàn vùng đồng bằng. Đầu vào cát từ thượng nguồn được lấy từ kết quả mô hình số, được hiệu chỉnh bằng dữ liệu thượng nguồn của MRC và các phép đo đạc tại thực địa (MBES). Khai thác cát ở các đoạn sông khác nhau được ước tính từ ảnh vệ tinh. Sự di chuyển của cát ở đồng bằng cũng như cát rời khỏi đồng bằng được tính toán bằng mô hình số và được hỗ trợ bởi các phép đo MBES. Cuối cùng, trữ lượng cát di động hiện có trong vùng đồng bằng được tính toán từ dữ liệu đo đạc địa chấn tầng nông ~550 km dọc sông Tiền và sông Hậu.



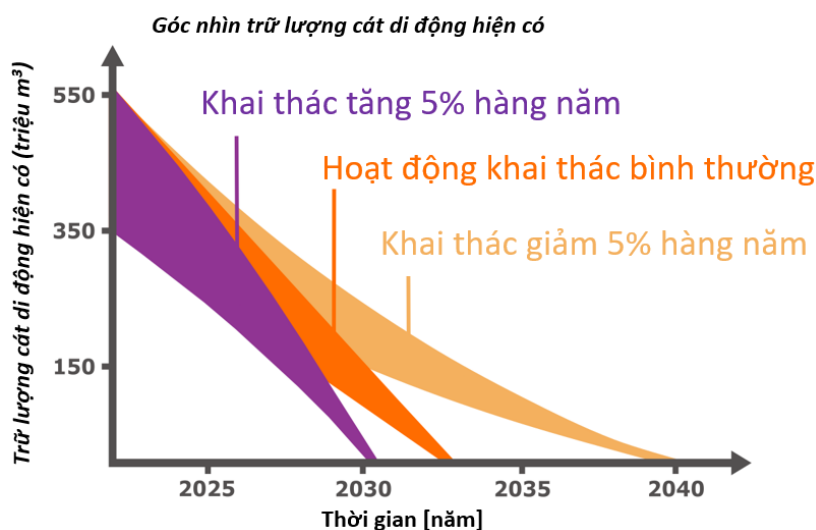
Hình 6-1: Tổng quan sự đóng góp của các hoạt động khác nhau thiết lập ngân hàng cát ĐBSCL.

Nhiều hợp phần khác nhau của hàng sách cát đã được hoàn thiện trong các phần khác nhau của báo cáo. Từ phân tích, chúng tôi đã xác định rằng cát đổ vào đồng bằng ở mức 2-4 triệu m^3 /năm trong khi lượng cát trao đổi với đại dương (lượng cát rời khỏi đồng bằng) là gần như không đáng kể (0-0,6 triệu m^3 /năm). Ước tính trữ lượng cát (chủ yếu là cát di động) lên tới gần 367-550 triệu m^3 cát trong vùng đồng bằng, trong khi ước tính khối lượng khai thác cát ở mức 35-55 triệu m^3 /năm. Hình 6-2 tóm tắt trữ lượng cát của Đồng bằng sông Cửu Long dưới dạng đơn giản là đổ vào đồng bằng, rời khỏi đồng bằng và khai thác so với trữ lượng cát di động hiện có.



Hình 6-2: Ước tính các hợp phần khác nhau của ngân hàng cát.

Kết quả của nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng đối với việc quản lý tài nguyên của đồng bằng sông Cửu Long. Với tốc độ khai thác hiện tại, mặc dù lượng cát rời khỏi đồng bằng là rất nhỏ, do nguồn cung cấp từ thượng nguồn hạn chế, chúng tôi cho rằng trữ lượng cát di động hiện có chỉ có thể tồn tại trong vòng một thập kỷ. Hình 6-3 cho thấy ước tính trên và dưới về sự suy giảm trữ lượng cát di động hiện có theo ba kịch bản khai thác khác nhau: a) tốc độ khai thác hiện tại tăng 5%, b) hoạt động khai thác như bình thường và c) giảm 5% tốc độ khai thác hiện tại. Theo kế hoạch giảm thiểu sự phụ thuộc vào cát sông có kiểm soát, trữ lượng cát di động hiện có có thể kéo dài đến năm 2040. Tuy nhiên, dự án này không nghiên cứu các tác động về hình thái và môi trường của việc khai thác toàn bộ lượng cát hiện có. Mặc dù điều này có thể sẽ dẫn đến tình trạng mất ổn định bờ sông hơn nữa (xói mòn bờ) cũng như xói mòn bờ biển, dựa trên dự đoán về độ mặn của Eslami và cộng sự, (2021c), việc mất nửa tỷ m³ trầm tích (trong trường hợp này là cát) từ hệ thống sông ĐBSCL có thể làm tăng thêm 10-15% số diện tích bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn trong ĐBSCL. Lưu ý rằng ngân hàng cát hiện tại chỉ là dự báo nhanh vào năm 2022. Ví dụ, nguồn cung cát từ thượng nguồn có thể giảm do tiếp tục khai thác ở Campuchia, nhưng do nguồn cung chỉ chiếm một phần nhỏ so với trữ lượng và khai thác nên điều này sẽ có tác động hạn chế đến những dự đoán trong tương lai. Hơn nữa, xói mòn do khai thác cát ở thượng nguồn cũng có thể gây ảnh hưởng đến hạ nguồn. Do đó, nên xem xét tính chất xuyên biên giới của quản lý trầm tích (bao gồm cát) ngoài ĐBSCL trong hợp tác đa phương.



Hình 6-3: Triển vọng vào giữa thế kỷ với các ước tính trên và dưới về lượng cát đến, rời khỏi, khai thác và trữ lượng cát di động hiện có.

7 Tài liệu tham khảo

- Achete, F. M., van der Wegen, M., Roelvink, D., and Jaffe, B.: Suspended sediment dynamics in a tidal channel network under peak river flow, *Ocean Dyn.*, 66, 703–718, <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0944-0>, 2016.
- Allison, M. A., Weathers, D. H., and Meselhe, E. A.: Bottom morphology in the Song Hau distributary channel, Mekong River Delta, Vietnam, *Cont. Shelf Res.*, 147, 51–61, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.05.010>, 2017.
- Anthony, E. J.: Deltas, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119117261.ch13>, 9 March 2015.
- Ashley, G. M.: Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem, *J. Sediment. Res.*, 60, 160–172, <https://doi.org/10.2110/jsr.60.160>, 1990.
- Bernard, L. and Stéphane, M.: Evolution of Ripple Field Architecture during Sediment Transport, as Measured by CT Scanning, in: *Sediment Transport*, IntechOpen, 2011.
- Bomers, A., Schielen, R. M. J., and Hulscher, S. J. M. H.: The influence of grid shape and grid size on hydraulic river modelling performance, *Environ. Fluid Mech.*, 19, 1273–1294, <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09670-4>, 2019.
- Bravard, J.-P., Goichot, M., and Gaillot, S.: Geography of Sand and Gravel Mining in the Lower Mekong River, 26, <https://doi.org/10.4000/echogeo.13659>, 2013.
- Brunier, G., Anthony, E. J., Goichot, M., Provansal, M., and Dussouillez, P.: Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels , *Mekong delta : The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation*, 224, 177–191, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.009>, 2014.
- C., V. R. L., C., N. M. W., Theo, van der K., Eelco, N., and Arnold, van K.: Transport of Fine Sands by Currents and Waves, *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, 119, 123–143, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1993\)119:2\(123\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:2(123)), 1993.
- Chapman, A. and Darby, S.: Evaluating sustainable adaptation strategies for vulnerable mega-deltas using system dynamics modelling: Rice agriculture in the Mekong Delta's An Giang Province, Vietnam, *Sci. Total Environ.*, 559, 326–338, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.162>, 2016.
- Darby, S. E., Hackney, C. R., Leyland, J., Kummu, M., Lauri, H., Parsons, D. R., Best, J. L., Nicholas, A. P., and Aalto, R.: Fluvial sediment supply to a mega-delta reduced by shifting tropical-cyclone activity, *Nature*, 539, 276–279, <https://doi.org/10.1038/nature19809>, 2016.
- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H. et al. (2016). Earth's Surface Water Change over the Past 30 Years. *Nature Climate Change*, 6, 810–813, <https://doi.org/10.1038/nclimate3111>
- Dunn, F. E., Darby, S. E., Nicholls, R. J., Cohen, S., Zarfl, C., and Fekete, B. M.: Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress, *Environ. Res. Lett.*, 14, 84034, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab304e>, 2019.
- Eslami, S.: Environmental change in a mega-delta, dynamics of salt intrusion in the Vietnamese Mekong Delta, Utrecht University, <https://doi.org/10.33540/1367>, 2022.

- Eslami, S., Hoekstra, P., Kernkamp, H., Trung, N. N., Duc, D. Do, Quang, T. T., Februarianto, M., Dam, A. Van, and Vegt, M. van der: Flow Division Dynamics in the Mekong Delta: Application of a 1D-2D Coupled Model, <https://doi.org/10.3390/w11040837>, 2019a.
- Eslami, S., Hoekstra, P., Nguyen Trung, N., Ahmed Kantoush, S., Van Binh, D., Duc Dung, D., Tran Quang, T., and van der Vegt, M.: Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation, *Sci. Rep.*, 9, 18746, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55018-9>, 2019b.
- Eslami, S., Hoekstra, P., Kernkamp, H. W. J., Nguyen Trung, N., Do Duc, D., Nguyen Nghia, H., Tran Quang, T., van Dam, A., Darby, S. E., Parsons, D. R., Vasilopoulos, G., Braat, L., and van der Vegt, M.: Dynamics of salt intrusion in the Mekong Delta: results of field lằn đoervations and integrated coastal-inland modelling, *Earth Surf. Dyn.*, 9, 953–976, <https://doi.org/10.5194/esurf-9-953-2021>, 2021a.
- Eslami, S., Hoekstra, P., Minderhoud, P. S. J. ., Trung, N. N., Hoch, J. M. ., H.Sutanudjaja, E., Dung, D. D., TranQuang, T., Voepel, H. E. ., Woillez, M.-N., and Vegt, M. van der; Projections of salt intrusion in a mega-delta under climatic and anthropogenic stressors, *Nat. Commun. Earth Environ.* (accepted Publ., <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00208-5>, 2021b.
- Eslami, S., Hoekstra, P., Minderhoud, P. S. J., Trung, N. N., Hoch, J. M., Sutanudjaja, E. H., Dung, D. D., Tho, T. Q., Voepel, H. E., Woillez, M.-N., and van der Vegt, M.: The projection data of saline water intrusion in the Mekong Delta under climatic and anthropogenic drivers, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4772967>, May 2021c.
- Frappart, F., Do Minh, K., L'Hermitte, J., Cazenave, a., Ramillien, G., Le Toan, T., and Mognard-Campbell, N.: Water volume change in the lower Mekong from satellite altimetry and imagery data, *Geophys. J. Int.*, 167, 570–584, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03184.x>, 2006.
- Gugliotta, M., Saito, Y., Nguyen, V. L., Ta, T. K. O., Nakashima, R., Tamura, T., Uehara, K., Katsuki, K., and Yamamoto, S.: Process regime, salinity, morphological, and sedimentary trends along the fluvial to marine transition zone of the mixed-energy Mekong River delta, Vietnam, *Cont. Shelf Res.*, 147, 7–26, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.03.001>, 2017.
- Hackney, C. R., Darby, S. E., Parsons, D. R., Leyland, J., Best, J. L., Aalto, R., Nicholas, A. P., and Houseago, R. C.: River bank instability from unsustainable sand mining in the lower Mekong River, *Nat. Sustain.*, <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0455-3>, 2020.
- Jordan, C., Tiede, J., Lojek, O., Visscher, J., Apel, H., Nguyen, H. Q., Quang, C. N. X., and Schlurmann, T.: Sand mining in the Mekong Delta revisited - current scales of local sediment deficits, *Sci. Rep.*, 9, 17823, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53804-z>, 2019.
- Kernkamp, H. W. J., Van Dam, A., Stelling, G. S., and De Goede, E. D.: Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf, *Ocean Dyn.*, 61, 1175–1188, <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0423-6>, 2011.
- Koehnken, L.: Discharge Sediment Monitoring Project (DSMP) 2009 - 2013: Summary & Analysis of Results Final Report, Mekong River Commission, Vientiane, Lao PDR, 2014.
- Kondolf, G. M., Rubin, Z. K., and Minear, J. T.: Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation, *Water Resour. Res.*, <https://doi.org/10.1002/2013WR014651>, 2014.
- Kummu, M. and Varis, O.: Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River, 85, 275–293, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.024>, 2007.
- Lauri, H., De Moel, H., Ward, P. J., Räsänen, T. A., Keskinen, M., and Kummu, M.: Future changes in Mekong River hydrology: Impact of climate change and reservoir operation on discharge, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4603–4619, <https://doi.org/10.5194/hess-16-4603-2012>, 2012.

- Le, T. V. H., Nguyen, H. N., Wolanski, E., Tran, T. C., and Haruyama, S.: The combined impact on the flooding in Vietnam's Mekong River delta of local man-made structures, sea level rise, and dams upstream in the river catchment, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 71, 110–116, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.08.021>, 2007.
- Leary, K. C. P. and Buscombe, D.: Estimating sand bed load in rivers by tracking dunes: a comparison of methods based on bed elevation time series, *Earth Surf. Dyn.*, 8, 161–172, <https://doi.org/10.5194/esurf-8-161-2020>, 2020.
- Lu, X., Kumm, M., and Oeurng, C.: Reappraisal of sediment dynamics in the Lower Mekong River, Cambodia, *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, 1855–1865, <https://doi.org/10.1002/esp.3573>, 2014.
- Manh, N. V., Dung, N. V., Hung, N. N., Merz, B., and Apel, H.: Large-scale suspended sediment transport and sediment deposition in the Mekong Delta, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3033–3053, <https://doi.org/10.5194/hess-18-3033-2014>, 2014.
- Manh, N. Van, Dung, N. V., Hung, N. N., Kumm, M., Merz, B., and Apel, H.: Future sediment dynamics in the Mekong Delta floodplains: Impacts of hydropower development, climate change and sea level rise, *Glob. Planet. Change*, 127, 22–33, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.001>, 2015.
- Martyr-koller, R. C., Kernkamp, H. W. J., Dam, A. Van, and Wegen, M. Van Der: Application of an unstructured 3D finite volume numerical model to flows and salinity dynamics in the San Francisco Bay-Delta, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 192, 86–107, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.04.024>, 2017.
- Milliman, J. D. and Fransworth, K. L.: *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, 392 pp., 2011.
- Minderhoud, P. S. J., Middelkoop, H., Erkens, G., and Stouthamer, E.: Groundwater extraction may drown mega-delta: projections of extraction-induced subsidence and elevation of the Mekong delta for the 21st century, *Environ. Res. Commun.*, 2, 11005, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab5e21>, 2020.
- MRC: Overview of the Hydrology of the Mekong Basin, Mekong River Commission, Vientiane, 2005.
- MRC: The Flow of the Mekong, Mekong River Comm., 1–12, 2009.
- N. Moriasi, D., G. Arnold, J., W. Van Liew, M., L. Bingner, R., D. Harmel, R., and L. Veith, T.: Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Trans. ASABE*, 50, 885–900, <https://doi.org/10.13031/2013.23153>, 2007.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*, *J. Hydrol.*, 10, 282–290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6), 1970.
- Simons, D. B., Richardson, E. V., and Nordin Jr., C. F.: Bedload equation for ripples and dunes, Professional Paper, <https://doi.org/10.3133/pp462H>, 1965.
- SIWRP: Report on existing sand exploitation and sand demand forecast up to 2020 and 2040 in lower mekong Delta, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2015.
- Stephens, J. D., Allison, M. A., Di Leonardo, D. R., Weathers, H. D., Ogston, A. S., McLachlan, R. L., Xing, F., and Meselhe, E. A.: Sand dynamics in the Mekong River channel and export to the coastal ocean, *Cont. Shelf Res.*, 147, 38–50, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.08.004>, 2017.
- Ta, T. K. O., Nguyen, V. L., Tateishi, M., Kobayashi, I., Saito, Y., and Nakamura, T.: Sediment facies and Late Holocene progradation of the Mekong River Delta in Bentre Province, southern Vietnam: An example of evolution from a tide-dominated to a tide- and wave-dominated delta, *Sediment. Geol.*, 152, 313–325, [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00098-2](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00098-2), 2002.

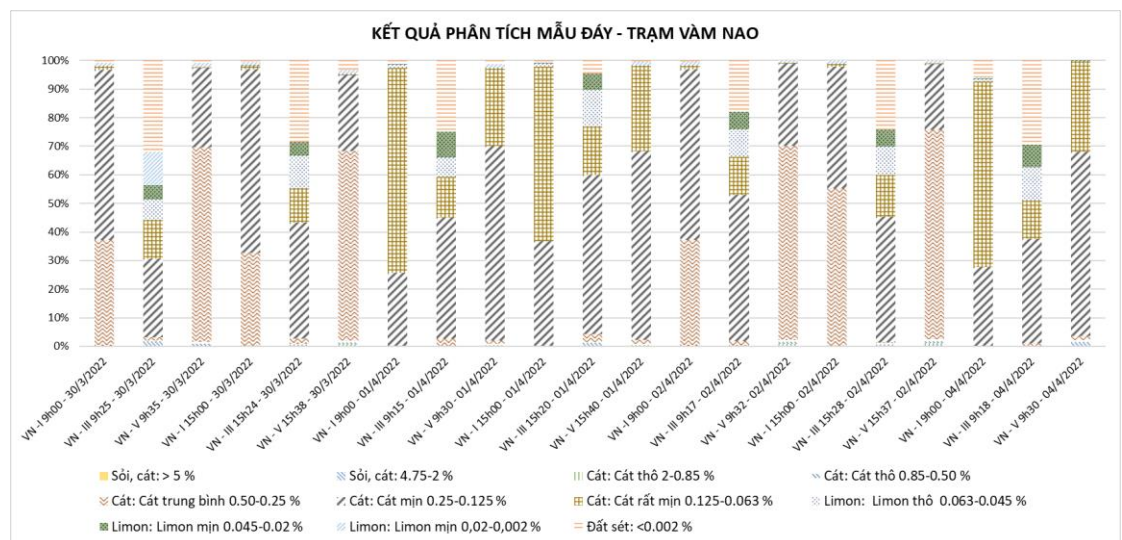
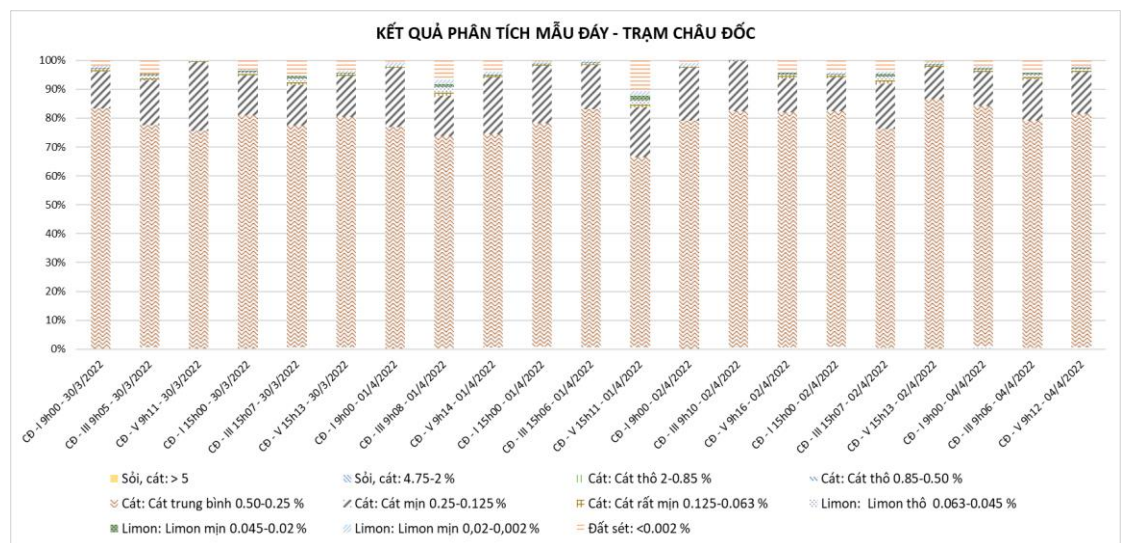
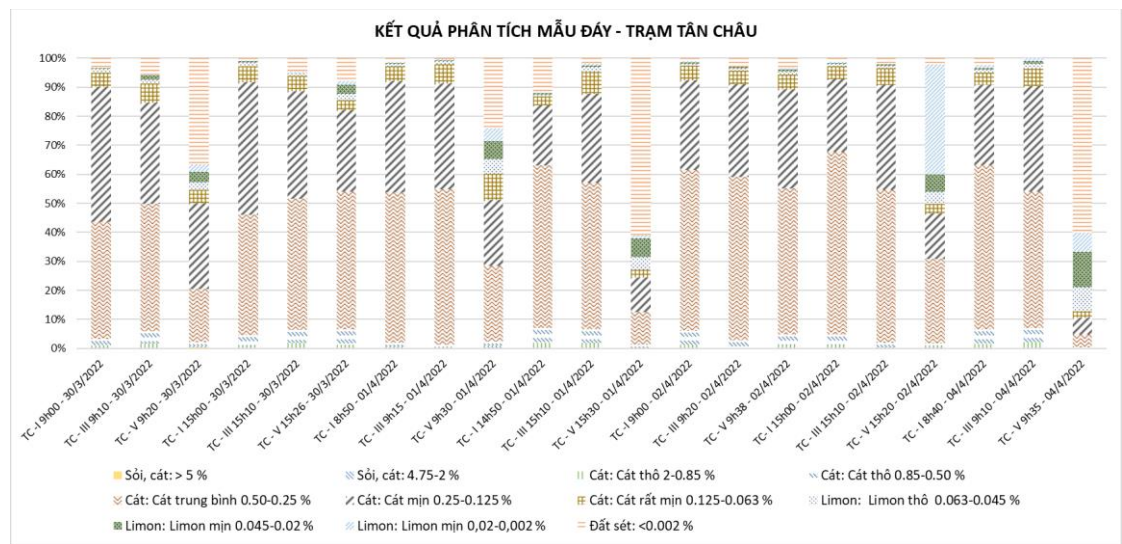
- Thanh, V. Q.: Modeling of hydrodynamics and sediment transport in the Mekong Delta, IHE-Delft, <https://doi.org/https://doi.org/10.4233/uuid:8f42f588-17a1-4e1e-af12-dcc52e7a26b2>, 2021.
- Thanh, V. Q., Reyns, J., Wackerman, C., Eidam, E. F., and Roelvink, D.: Modelling suspended sediment dynamics on the subaqueous delta of the Mekong River, *Cont. Shelf Res.*, 0–1, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.07.013>, 2017.
- Thanh, V. Q., Roelvink, D., van der Wegen, M., Reyns, J., Kernkamp, H., Van Vinh, G., and Thi Phuong Linh, V.: Flooding in the Mekong Delta: Impact of dyke systems on downstream hydrodynamics, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2019, 1–34, <https://doi.org/10.5194/hess-2019-64>, 2019.
- Thanh, V. Q., Roelvink, D., van Der Wegen, M., Reyns, J., Kernkamp, H., Vinh, G. Van, and Linh, V. T. P.: Flooding in the Mekong Delta: the impact of dyke systems on downstream hydrodynamics, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 189–212, 2020.
- Thi Ha, D., Ouillon, S., and Van Vinh, G.: Water and Suspended Sediment Budgets in the Lower Mekong from High-Frequency Measurements (2009–2016), <https://doi.org/10.3390/w10070846>, 2018.
- Tu, L. X., Thanh, V. Q., Reyns, J., Van, S. P., Anh, D. T., Dang, T. D., and Roelvink, D.: Sediment transport and morphodynamical modeling on the estuaries and coastal zone of the Vietnamese Mekong Delta, *Cont. Shelf Res.*, 186, 64–76, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.07.015>, 2019.
- Van, P. D. T., Popescu, I., Van Griensven, a., Solomatine, D. P., Trung, N. H., and Green, a.: A study of the climate change impacts on fluvial flood propagation in the Vietnamese Mekong Delta, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4637–4649, <https://doi.org/10.5194/hess-16-4637-2012>, 2012.
- Vasilopoulos, G., Quan, Q. L., Parsons, D. R., Darby, S. E., Tri, V. P. D., Hung, N. N., Haigh, I. D., Voepel, H. E., Nicholas, A. P., and Aalto, R.: Establishing sustainable sediment budgets is critical for climate-resilient mega-deltas, *Environ. Res. Lett.*, 16, 64089, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac06fc>, 2021a.
- Vasilopoulos, G., Quan, Q. L., Parsons, D. R., Darby, S. E., Tri, V. P. D., Hung, N. N., Haigh, I. D., Voepel, H. E., Nicholas, A. P., and Aalto, R.: Establishing sustainable sediment budgets is critical for climate-resilient mega-deltas, *Environ. Res. Lett.*, 16, 064089, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac06fc>, 2021b.
- Wassmann, R., Hien, N. X., Hoanh, C. T., and Tuong, T. P.: Sea level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: water elevation in the flood season and implications for rice production, *Clim. Change*, 66, 89–107, <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043144.69736.b7>, 2004.
- Wolanski, E., Huan, N. N., Dao, L. T., Nhan, N. H., and Thuy, N. N.: Fine-sediment dynamics in the Mekong River estuary, Viet Nam, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 43, 565–582, 1996.
- Xing, F., Meselhe, E. A., Allison, M. A., and Weathers, H. D.: Analysis and numerical modeling of the flow and sand dynamics in the lower Song Hau channel, Mekong Delta, *Cont. Shelf Res.*, 147, 62–77, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.08.003>, 2017.

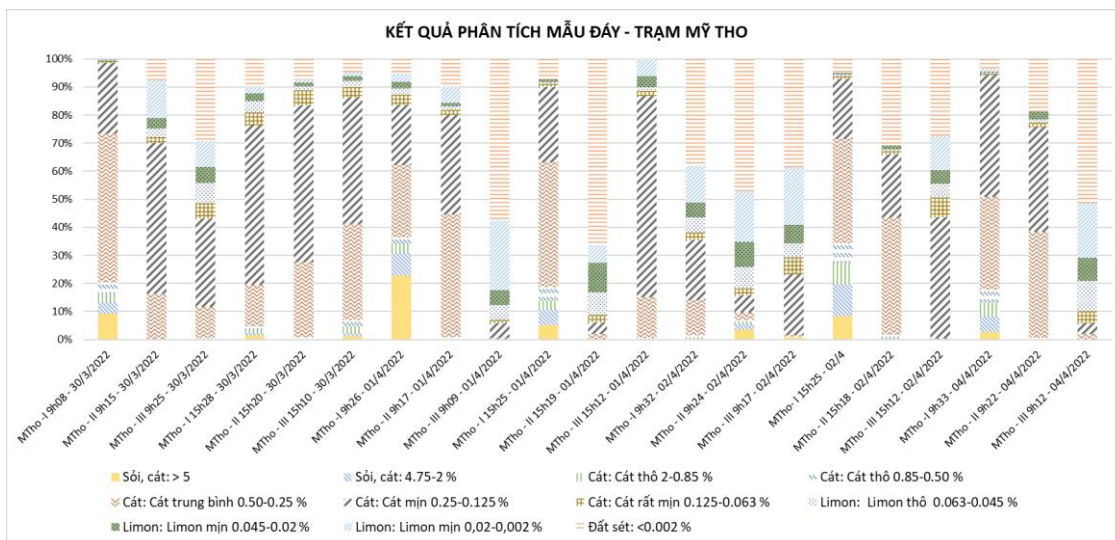
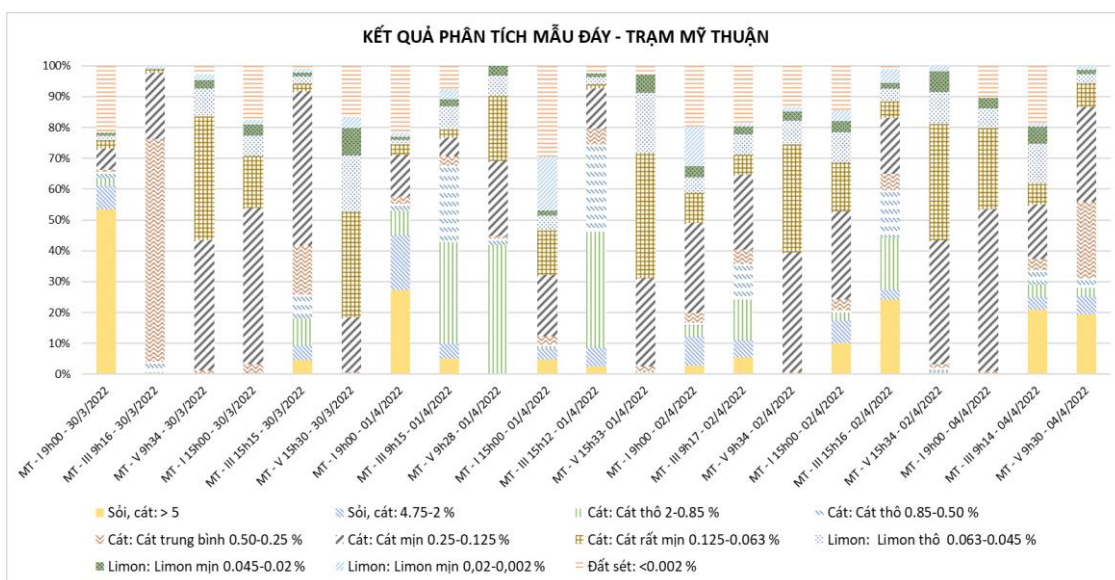
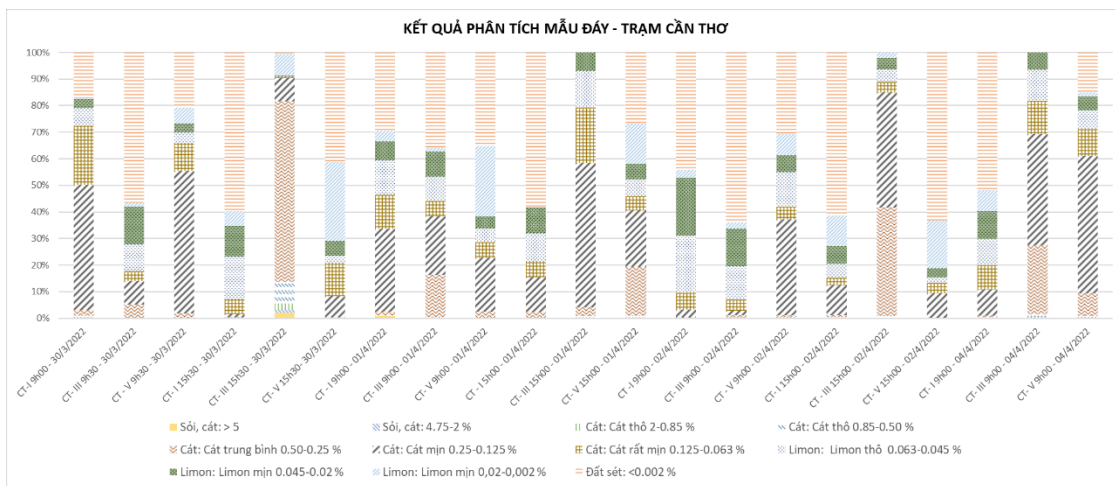
A Phụ lục A

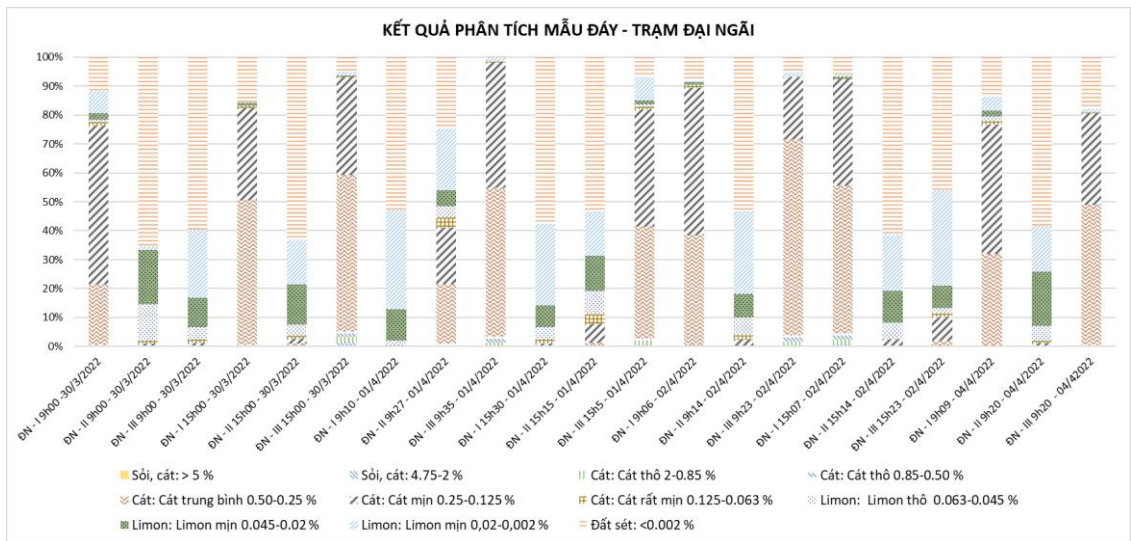
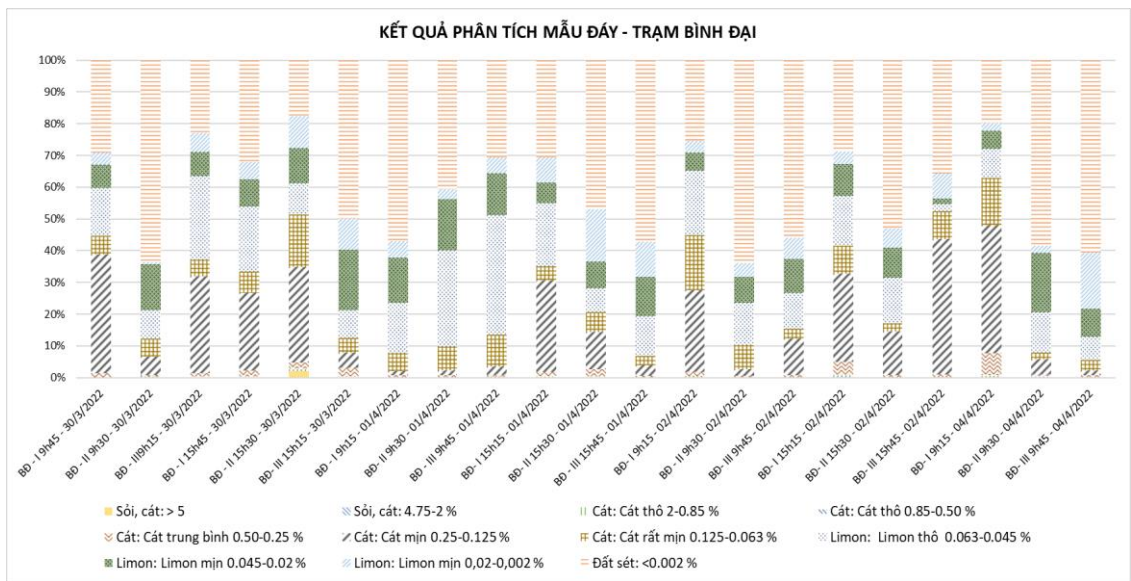
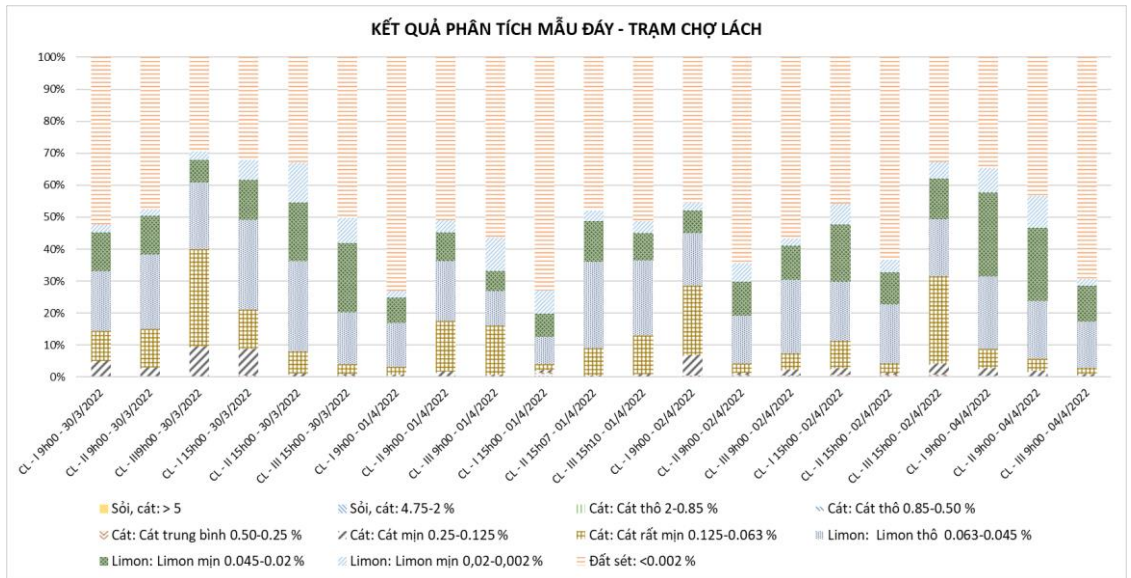
Kết quả chi tiết mẫu đáy sông được thu thập trong cả mùa khô và mùa mưa.

A.1

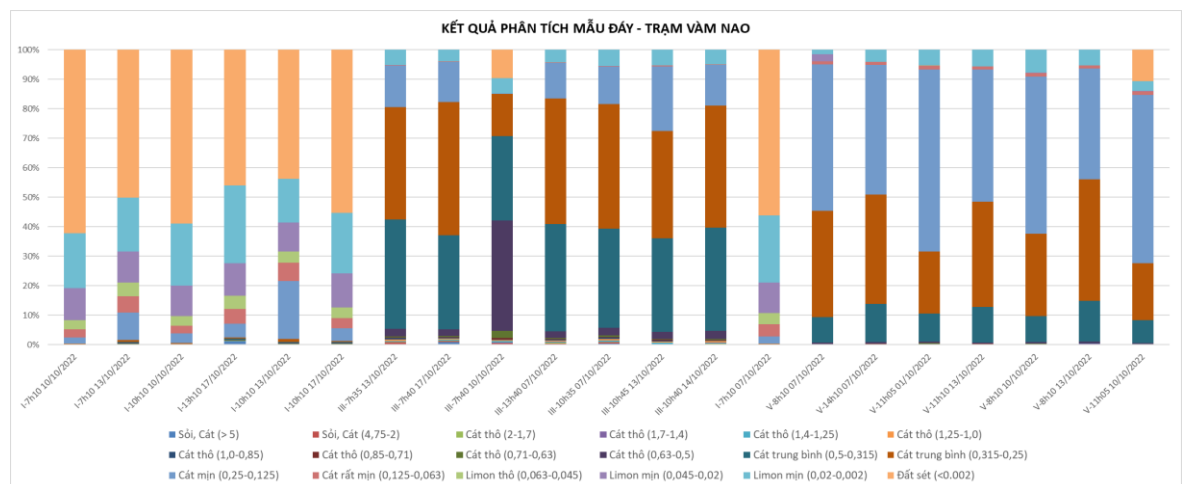
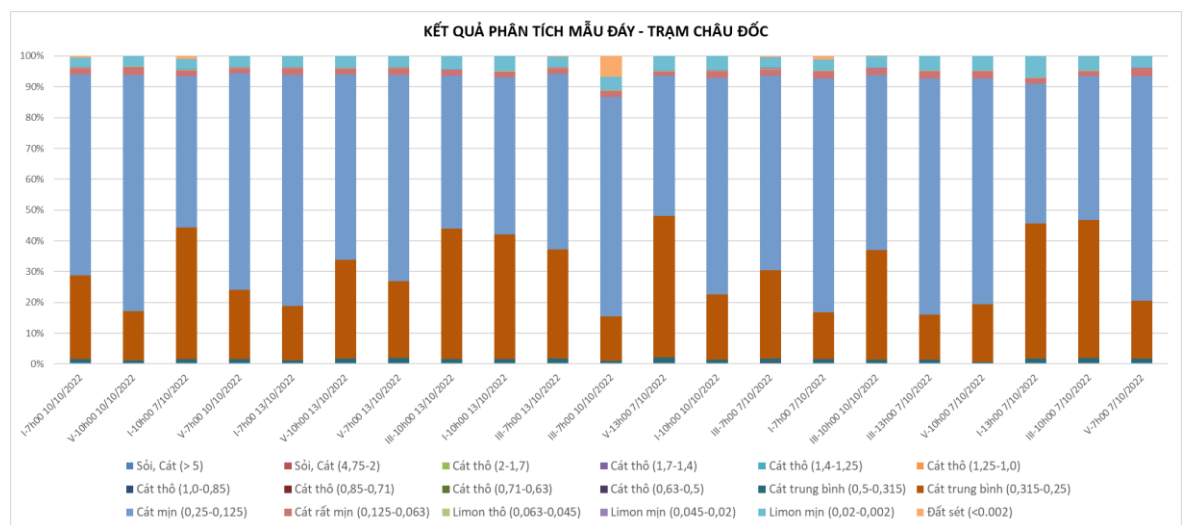
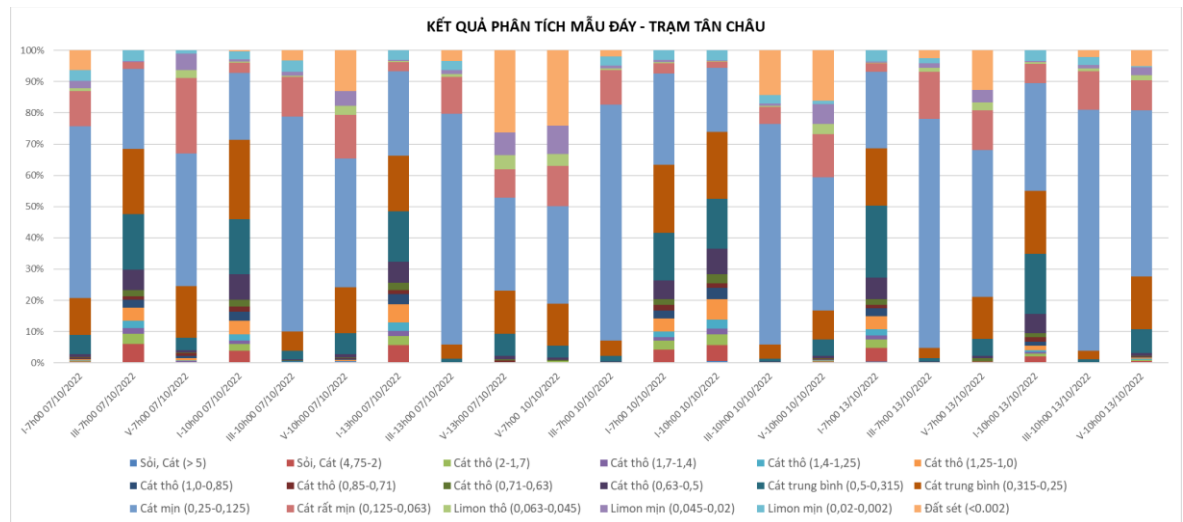
Kết quả lấy mẫu đáy sông trong mùa khô

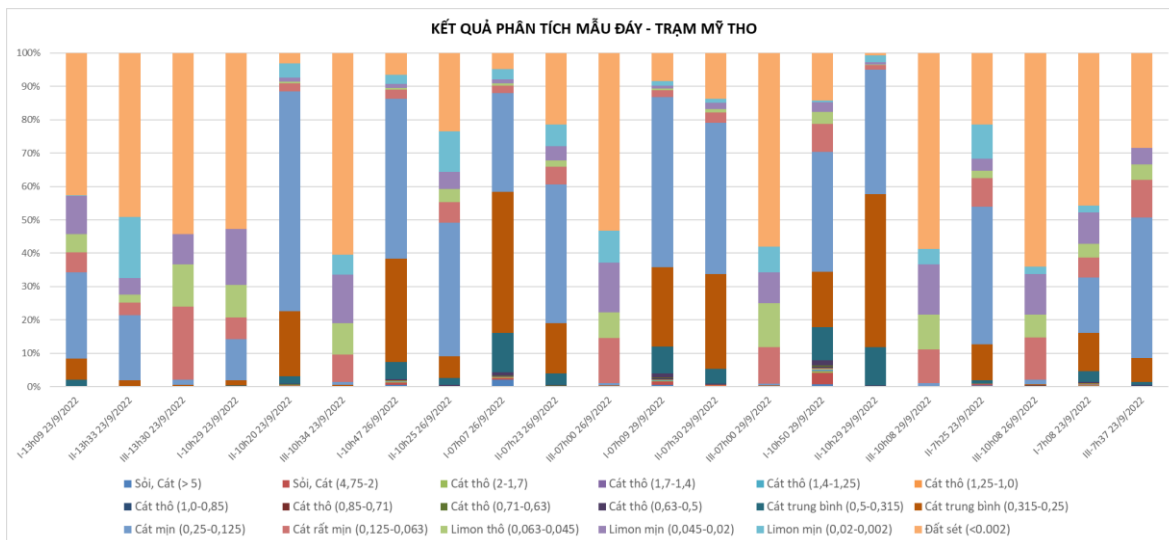
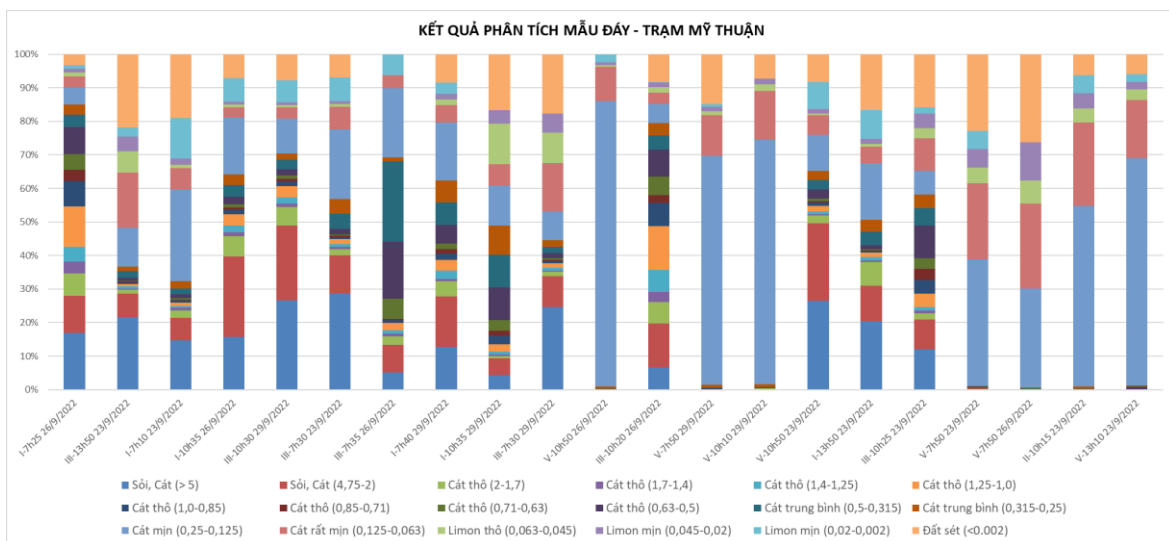
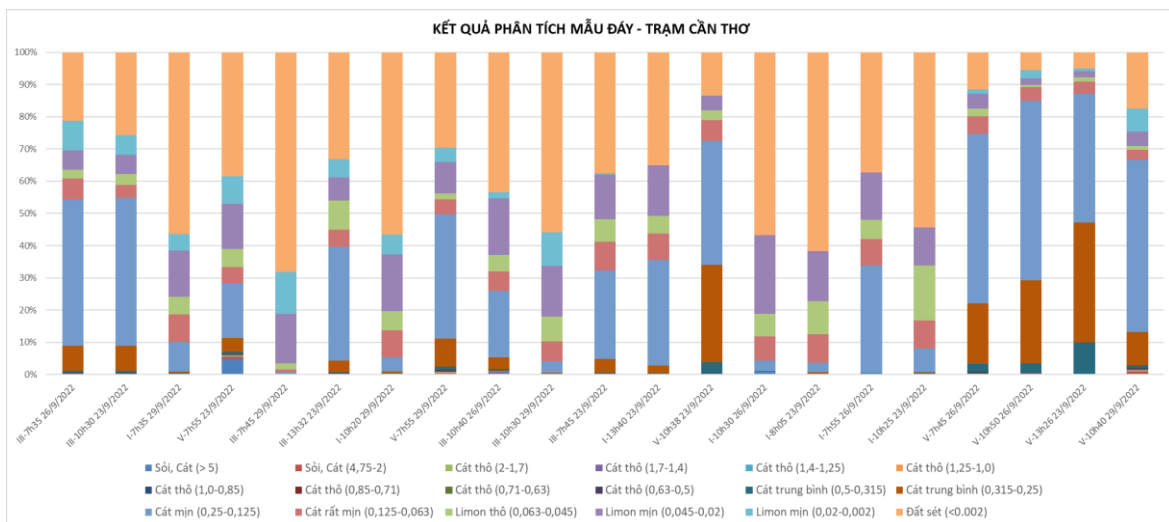


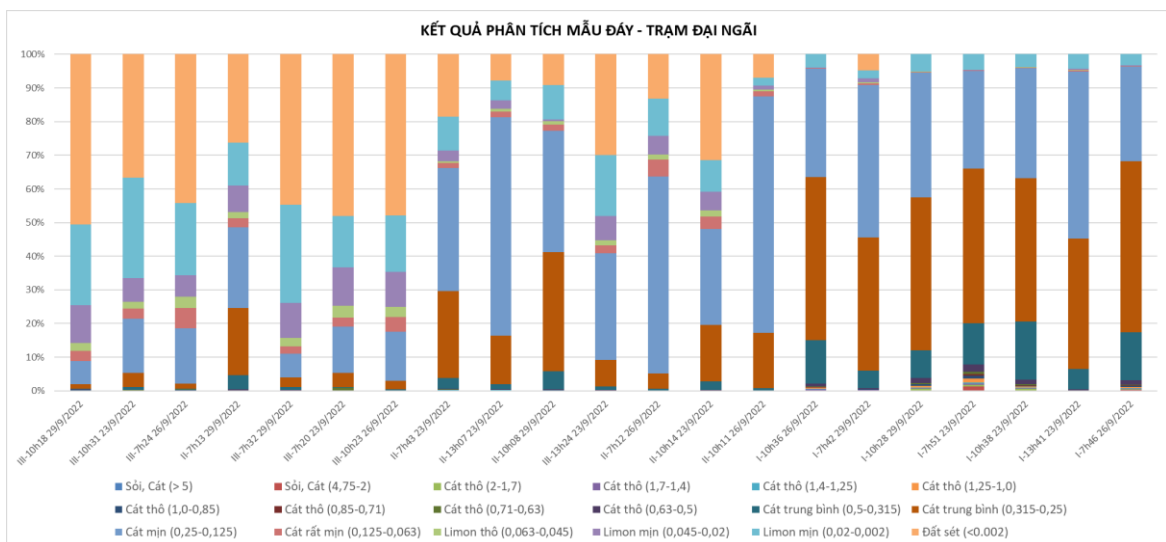
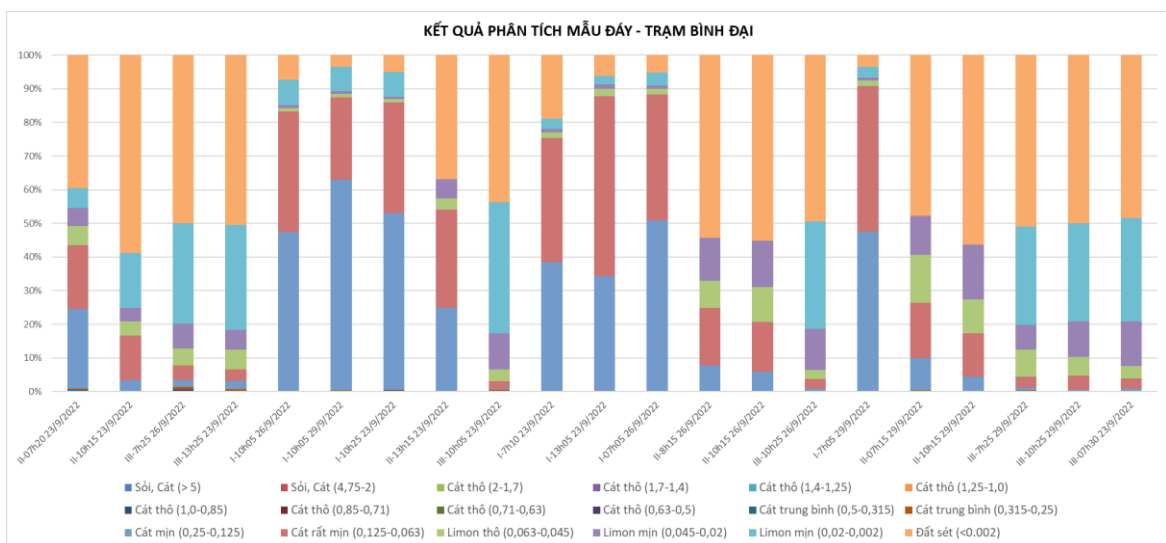
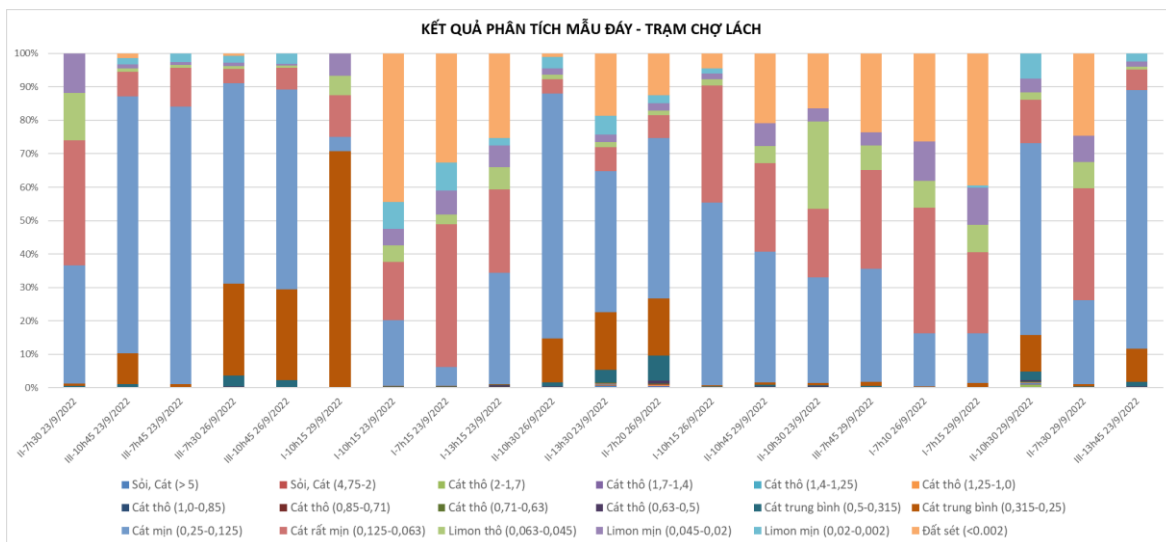




A.2 Kết quả lấy mẫu đáy sông trong mùa mưa

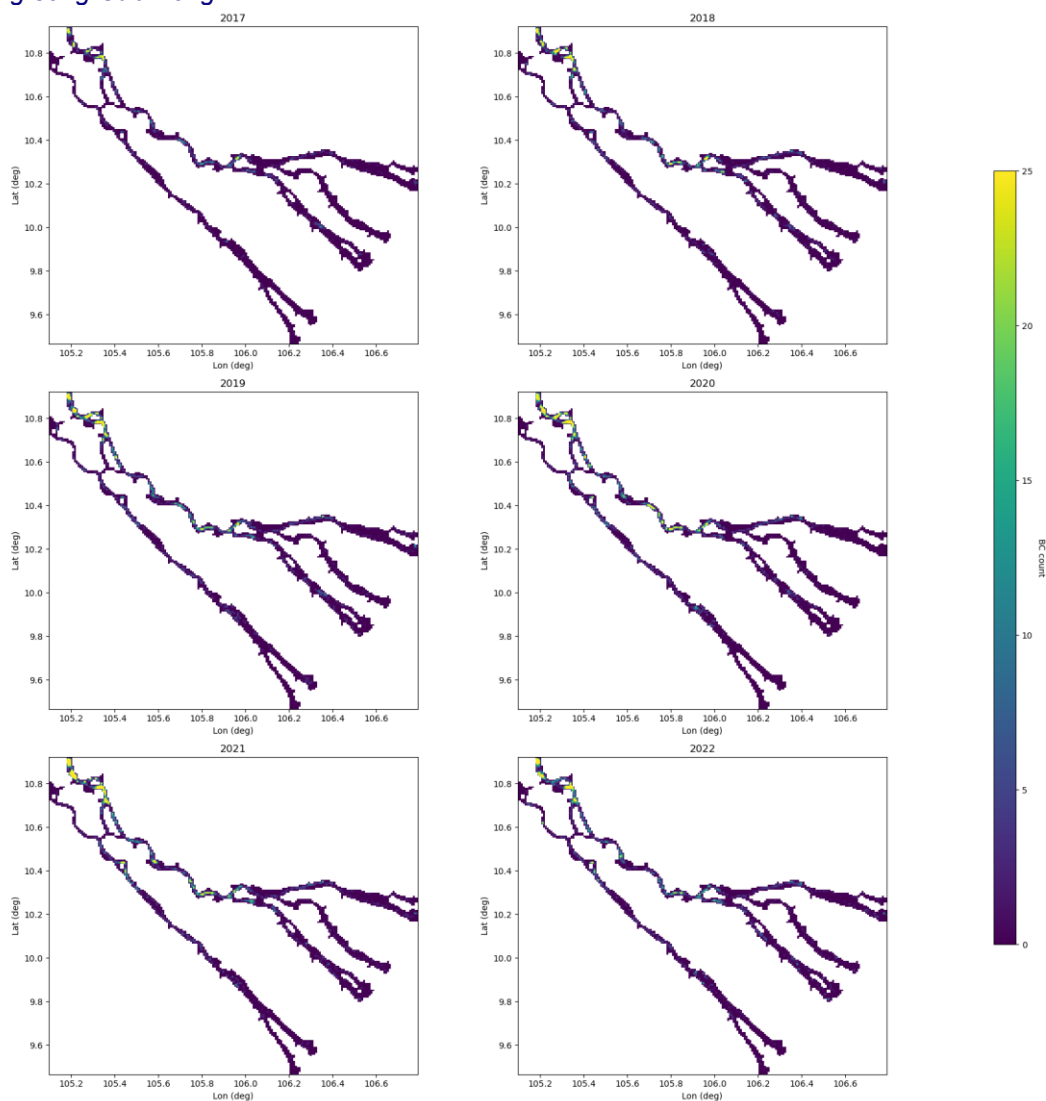






B Phụ lục B

Bản đồ hoạt động theo không gian của các tàu khai thác cát được phát hiện trên khắp Đồng bằng sông Cửu Long.



Deltares is an independent institute for applied research in the field of water and subsurface. Throughout the world, we work on smart solutions for people, environment and society.

Deltares

www.deltares.nl