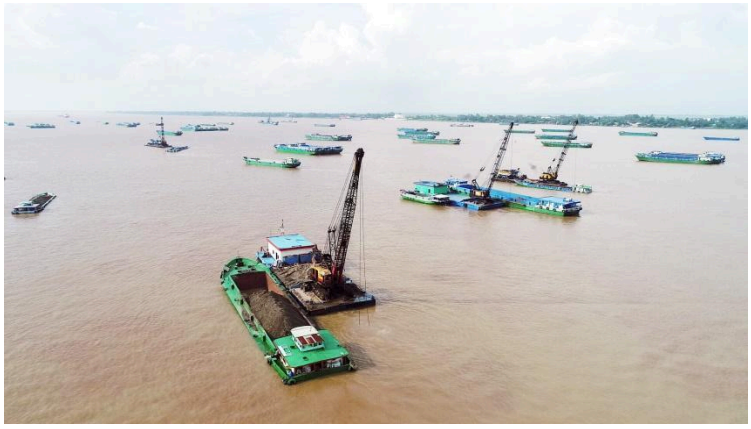
Ngân sách khai thác cát được đo đạc có hệ thống mới cho đồng bằng sông Cửu Long cho thấy chiều hướng gia tăng và khối lượng được ước tính thấp đáng kể.

(New systematically measured sand mining budget for the Mekong Delta reveals rising trends and significant volume underestimations)

Charles-Robin Gruel, Edward Park, Adam D. Switzer, Sonu Kumar, Huu Loc Ho, Sameh Kantoush, Doan Van Binh and Lian Feng

Bình Yên Đông lược dịch

International Journal of Applied Earth Observationbs and Geoinformation – 21 March 2022



Khai thác cát sông Mekong ở Việt Nam. [Ảnh: Tuổi Trẻ]

1. Phần giới thiệu

Nhu cầu cát gia tăng để xây cất và cải tạo đất, châm ngòi bởi dân số gia tăng nhanh chóng và tăng trưởng kinh tế ở Á Châu, đã gây ra mức độ khai thác cát ở đáy sông chưa từng thấy (de Leeuw et al., 2010; Dan Grariletea, 2017; Torres et al., 2017; UNEP, 2019; Best, 2019) trong những thập niên gần đây. Việc lấy cát từ đáy sông thường không được kiểm soát trong hầu hết nam và đông nam Á Châu và số lượng và ảnh hưởng phần lớn vẫn được che giấu vì hoạt động ở dưới nước. Tuy nhiên, cát sông là một tài nguyên có giới hạn và nó phải được quản lý thích hợp để tránh những thay đổi tai hại cho thủy học

của sông có thể châm ngòi cho những biến đổi không thể đảo ngược của các hệ thống sinh thái tự nhiên. Những biến đổi nầy có thể bao gồm sinh kế và gây ra suy thoái đáng kể cho các dịch vụ hệ sinh thái địa phương (Kondolf, 1997; Kondolf et al., 2014; Loc et al., 2017; Lamb et al., 2019).

Khai thác cát có những hậu quả ngắn và dài hạn. Ảnh hưởng ngắn hạn của việc khai thác cát gồm có sạt lở bờ sông, đục khoét đáy sông, và điều chỉnh mực nước ngầm; trong khi trong dài hạn, khai thác cát có thể làm tổn thương nguồn cung cấp nước, tăng cường xâm nhập của nước mặn, và giảm sự nối kết của đồng lụt (Kondolf, 1997; Torres et al., 2017; Beiser, 2018; Park et al., 2020; Park et al., 2021; Loc et al., 2021). Mặc dù có những hậu quả được biết nầy, nghiên cứu khai thác cát bị giới hạn vì thiếu dữ kiện khu vực đối với ngân sách khai thác phần lớn được thúc đẩy bởi sự vắng mặt tuyệt vọng của những hệ thống theo dõi hữu hiệu (Peduzzi, 2014).

Khai thác cát trái phép hay không có kiểm soát là một vấn đề toàn cầu (Koehnken and Rintoul, 2018). Điều nầy đặc biệt lo ngại ở Á Châu trong các quốc gia như Việt Nam, Cambodia, và Lào nơi thiếu các khuôn khổ kiểm soát và giấy phép, cùng với việc theo dõi kém hiệu quả (Nguyen, 2011; Bravard et al., 2013; Koehnken and Rintoul, 2018; Koehnken et al., 2020). Vì các hoạt động đại qui mô bắt đầu trong thập niên 1990s, sông Mekong ở Việt Nam đã bị ảnh hưởng nặng nề bởi việc nạo vét đáy sông đáng kể (Bravard et al., 2013). Khai thác cát trong Mekong phần lớn được thực hiện bằng máy xúc trên xà lan đổ lên một đoàn tàu hay xà lan. Hoạt động nạo vét có khuynh hướng nằm bên trong vùng chuyển nhượng tương tự cho đến khi hết cát hay giấy phép khai thác hết hạn (Ng and Park, 2021).

Ở Việt Nam, giấy phép được phân quyền trong năm 2005, thay đổi từ cấp quốc gia đến cấp tỉnh, gây nên một sự gia tăng lũy tiến trong số giấy phép khai thác cát được cấp (Schiappacasse et al., 2019). Việc phân quyền cũng hạn chế nghiêm trọng khả năng để xác định chính xác con số và khả năng hoạt động của doanh nghiệp đang hoạt động. Điều nầy có lẽ do những hạn chế của nhân sự và khả năng kỹ thuật trong chánh quyền tỉnh, cũng như phối hợp hạn chế giữa các cơ quan liên hệ (Schiappacasse et al., 2019). Chánh phủ Việt Nam tiên đoán nhu cầu cát từ đáy sông vào khoảng 2,1 đến 2,3 triệu m3 từ 2016 đến 2020 và các tiên đoán hiện nay nằm ở 1,5 triệu m3 vào năm 2040 ở ĐBSCL (SIWRP, 2015; Koehken and Rintoul, 2018; Eslami et al., 2019). Tuy nhiên, các ước tính chính xác của việc lấy cát ở ĐBSCL vẫn không biết, và các tài liệu khoa học đề nghị rằng khối lượng cát được khai thác có lẽ khác biệt đáng kể với thống kê chánh thức (Jordan et al., 2019). Kết quả là, không những việc đánh giá ảnh hưởng môi trường do các hoạt động khai thác cát sông phức tạp bởi môi trường năng động và bao la,

nó cũng làm cho phức tạp thêm bởi quyền kiểm soát giới hạn trong các quốc gia bị ảnh hưởng. Vì thế, có sự cần thiết cấp bách để cứu xét các đường lối mới để đánh giá dựa trên khu vực việc khai thác cát ở đáy sông.

Hậu quả tiêu cực của các hoạt động khai thác cát trái phép hay thiếu kiểm soát ở Đông Nam Á đã bắt đầu đi vào môi trường. Ở ĐBSCL, có nhiều cố gắng đáng chú ý trong việc định lượng ngân sách khai thác gồm có Bravard et al. (2013) đã khảo sát các người khai thác và cung cấp một cái nhìn về cường độ khai thác cát sông dọc theo sông Mekong. Brunier et al. (2014) phân tích một bộ dữ kiện chiều sâu của ĐBSCL từ năm 1998 đến 2008 và làm nổi bật thêm ảnh hưởng của việc lấy cát quá mức; Anthony et al. (2015) đi xa hơn các khảo sát để nối kết sạt lở bờ biển ở đồng bằng với việc lấy cát trong sông; và Eslami et al. (2019), phân tích sự gia tăng của xâm nhập nước mặn một phần được thúc đẩy bởi gia tăng khai thác cát sông.

Để làm ngân sách, Jordan et al. (2019) đo đạc khối lượng cát được lấy dọc theo một đoạn ngắn (20 km) của sông Tiền và cung cấp những ngân sách lấy cát chi tiết trong các tỉnh khác nhau của ĐBSCL, mặc dù ngân sách hầu hết được dựa trên các báo cáo chánh thức. Ở Cambodia, Hackney et al. (2020, 2021) chú trọng đến sự mất ổn định bờ liên quan đến khai thác cát và đo đạc một ngân sách cát phỏng đoán bằng cách dùng hình ảnh PlanetScope. Tuy nhiên, những cố gắng để ước tính các con số cát được lấy là ước tính ở địa phương (Jordan et al., 2019) chỉ phản ánh những thời kỳ riêng biệt (Brunier et al., 2014), hay dựa trên báo cáo chánh thức không đầy đủ hoặc không chính xác (Bravard et al., 2013; Eslami et al., 2019). Thay vào đó, các ước tính rất phức tạp vì bản chất năng động cao của

thành phần vì xà lan có thể di chuyển hàng ngày, và các tiến trình sông tự nhiên có thể xóa dần bất cứ dấu vết của khai thác cát qua bồi lắng hay thay đổi.

Ở đây, chúng tôi cung cấp ước tính đầu tiên của ngân sách khai thác cát trên toàn ĐBSCL (~700 km2 của hệ thống lòng lạch) bằng cách dùng đo đạc tại chỗ mới lạ vượt qua những bất định và thiên vị của các phương pháp hiện hữu và các trị số được công bố. Trước hết chúng tôi đếm con số xà lan khai thác cát bằng cách dùng hình ảnh có độ phân giải cao (Googla Earth và Planet Scope), nơi chúng tôi xác định loại tàu để phân loại. Con số được kiểm chứng tại chỗ trong năm 2020-2021. Bước thứ hai liên quan đến việc phát triển một sự liên hệ định lượng giữa bản đồ cường độ tàu của hình ảnh radar theo thời gian của Sentinel-1 và bản đồ khác biệt chiều sâu (từ 2014 đến 2017) dọc theo một đoạn dài 100 km được khai thác mạnh mẽ trong sông Tiền (bao gồm ~15% ĐBSCL). Trong bước cuối cùng, liên hệ

toán được áp dụng cho toàn thể ~700 km2 của ĐBSCL (vùng được chọn trong nghiên cứu nầy) để kiến tạo một ngân sách khai thác cát hàng năm và tính toán mức đục khoét giữa 2015 và 2020. Ngân sách mới của chúng tôi được so sánh một cách địa lý và lịch sử với những ước tính trước đây từ các ấn bản khác nhau.

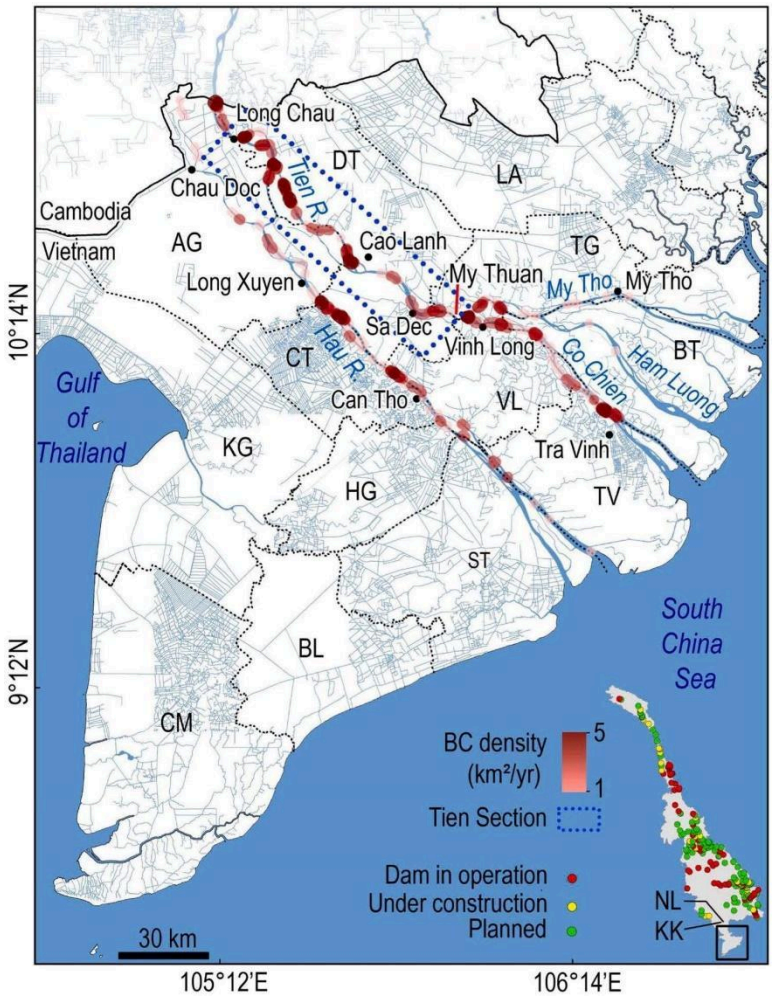
2. Dữ kiện và phương pháp

2.1. Vùng nghiên cứu: ĐBSCL

ĐBSCL là đồng bằng lớn thứ 3rd trên thế giới và là một vùng rộng 40.000 km2 nằm bên trong biên giới của Việt nam. Vùng lòng lạch rộng khoảng 875 km2 (nhưng 700 km2 được phân tích trong công việc nầy) được chia giữa 2 nhánh chánh, Hậu (Bassac) và Tiền (Mekong), được nối với nhau bởi lòng lạch Vàm Nao. Lưu lượng hàng năm ở ĐBSCL ở Neal Luong và Koh kel (Cambodia) vào khoảng 13.000 m3/sec. 75% của lưu lượng sông Mekong phát xuất từ sông Tiền ở thượng lưu của Vàm Nao nơi nó chia gần như bằng nhau giữa sông Tiền và Hậu (Brunier et al., 2014). Chế độ thủy học gồm có 2 mùa khô từ tháng 11 đến tháng 5 và mùa mưa từ tháng 6 đến tháng 10, chiếm 80% lưu lượng tổng cộng hàng năm (MRC, 2019). Các lòng lạch chánh của ĐBSCL đi qua 9 tỉnh ở Việt Nam, một phần được tách rời bởi lòng lạch ở giữa (Hình 1).

2.2. Khảo sát chiều sâu tại chỗ và bản đồ đục khoét

Khảo sát chiều sâu được thực hiện bằng cách dùng Teledyne RD Instrument Workhorse Rio Grande 600 KHz Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) cho 491 mặt cắt trong tháng 7 năm 2014 và 380 trong tháng 9 năm 2017 (Supplemetary Text 2) dọc theo khúc sông Tiền dài 100 km (TS). Diện tích của TS được ước tính khoảng 120 km2 (Binh et al., 2020), bắt đầu 15 km hạ lưu của biên giới Việt Nam-Cambodia và chấm dứt khoảng 2 km hạ lưu của cầu Mỹ Thuận, ngay trước khi lòng lạch phân thành nhành Mỹ Tho và Cổ Chiên. Diện tích bao gồm lòng lạch Vàm Nao. Chúng tôi tạo nên một bản đồ khác biệt chiều sâu (độ phân giải 40 m) từ việc đục khoét và tích lũy liên tục từ 2014 đến 2017. Để tối thiểu hóa sự méo mó của các trị số vì các số ở ngoài, chúng tôi trung bình dữ kiện chiều sâu bằng cách dùng thống kê bằng mắt. Sau đó, chúng tôi lấp các khoảng trống trong dữ kiện bằng cách nội suy thẳng 2 chiều (bilinear) (5x5 window).



Hình 1. Bản đồ của ĐBSCL cho thấy mật độ và phân phối của xà lan có cần trục và bản đồ của lưu vực Mekong lồng vào cho thấy các đập (MRC), KK= trạm Koh Kehl, NL= trạm Neak Luong. Khúc sông Tiền (TS) tương ứng với khảo sát chiều sâu được cho thấy bên trong hình chữ nhật điểm tròn xanh. Các điểm đen tương ứng với các thành phố ven sông. Thượng và hạ sông Tiền, được tách rời ở mũi tên Mỹ Thuận. AG=An Giang, BL=Bạc liêu, BT=Bến Tre, CM=Cà Mau, CT=Cần Thơ, DT=Đồng Tháp, HG=Hậu Giang, KG=Kiên Giang, LA=Long An, ST=Sóc Trăng, TG=Tiền Giang, TV=Trà Vinh, VL=Vĩnh Long (Nguồn: OpenStreetMap, Humanitarian Data Exchange) (Để diễn dịch tham khảo màu trong hình nầy, người đọc được giới thiệu đến phiên bản trên mạng của bài nầy).

ĐBSCL chịu ảnh hưởng bởi các tiến trình sông khác nhau. Sự hiện diện của các đập làm giảm nguồn phù sa, tạo nên độ dốc thoai thoải, vì sạt lở và độ di chuyển ngang được giữ tương đối thấp. Sự khác biệt chiều sâu thu thập được ở đây tương ứng với khoảng 15% của toàn thể lòng lạch của ĐBSCL (98

km2) gần bằng mức đục khoét trung bình hàng năm và tương ứng với vài mùa nước cao thấp với nguồn phù sa nhỏ và bồi lắng cân bằng mỗi năm. Vì thế, sự khác biệt chiều sâu dùng trong nghiên cứu nầy được xem là phỏng chừng của chiều sâu đục khoét phần lớn do các hoạt động khai thác cát.

2.3. Hệ thống xếp loại tàu

Dựa trên cuộc khảo sát tại chỗ trong năm 2020-2021 và các quan sát hình ảnh Google Earth (2019-2020), chúng tôi thấy rằng chiều dài của các tàu hoạt động dọc theo các sông ở ĐBSCL thay đổi từ 5 đến 80 m. Đối với mục đích của chúng tôi, chúng tôi chỉ cứu xét các tàu liên quan đến khai thác cát có thể được phân biệt dễ dàng bởi hình dáng, sự hiện diện của cát trên tàu và hợp thành đoàn. Điều nầy cho phép chúng tôi xác định các điểm nóng khai thác cát và ước tính mật độ. Bằng cách dùng hình ảnh Google Earth có độ phân giải cao (~0,5 m) trong năm 2019-2020, chúng tôi giả sử toàn bộ 1.150 tàu dọc theo khúc sông dài 130 km dọc theo sông Tiền, và một phần của nhánh Cổ chiên. Để kiểm chứng hệ thống xếp loại tàu của chúng tôi, chúng tôi thực hiện một cuộc khảo sát tại chỗ dọc theo một khúc sông dài 80 km của sông Tiền trong 3 ngày (22 tháng 12 năm 2020 và 3 và 15 tháng 1 năm 2021). Các điểm nóng khai thác cát được thăm viếng vào những ngày được chỉ định vào khoảng 5:45 AM đến 6:11 PM, để phù hợp với lúc vệ tinh hình ảnh Sentinel-1A bay ngang. Tọa độ GPS của tàu được ghi nhận, và hình ảnh của từng tàu được chụp. Dữ kiện nầy đoạn được so sánh với các tàu qua hình ảnh của Sentinel-1. Đo đạc từ hình ảnh của Google Erath và công tác tại chỗ cho phép chúng tôi nhắm đến các xà lan khai thác cát có hiệu quả. Quan sát của chúng tôi cho thấy xà lan được trang bị cần trục (BC) có hình dáng đặc biệt và thường được bao quanh bởi một số tàu để vận chuyển cát. Vị trí ngẫu nhiên của các tàu ở chung quanh BC, sự lân cận, và nối kết tấn số cao (chiều dài cộng dồn) trông như một vùng sáng lớn duy nhất (50% lớn hơn) trong hình ảnh radar. Vì phương pháp phát hiện của chúng tôi không thể phân biệt loại tàu và tách rời các tàu cá nhân, một chiều dài tối thiểu được dùng làm tiêu chuẩn phát hiện.

2.4. Ước tính ngân sách khai thác cát của ĐBSCL bằng cách dùng viễn thám

Chúng tôi khoanh vùng nghiên cứu ở ĐBSCL bằng Chỉ số Khác biệt Nước Bình thường hóa (normalized difference water index (NDWI)) từ hình ảnh của Lansat 8 Operational Land Imager (OLI). Để được phạm vi trung bình của các lòng lạch, một hình ảnh được thu thập mỗi năm từ 2014 đến 2020 (McFeeters, 1996) (Supplementary Test 1) và gộp lại do khó khăn trong việc lấy hình ảnh không có mây. Chúng tôi áp dụng ngưỡng 0,1 DN để khoanh vùng nước từ khối đất. Sau khi loại trừ các vùng không phải là lòng

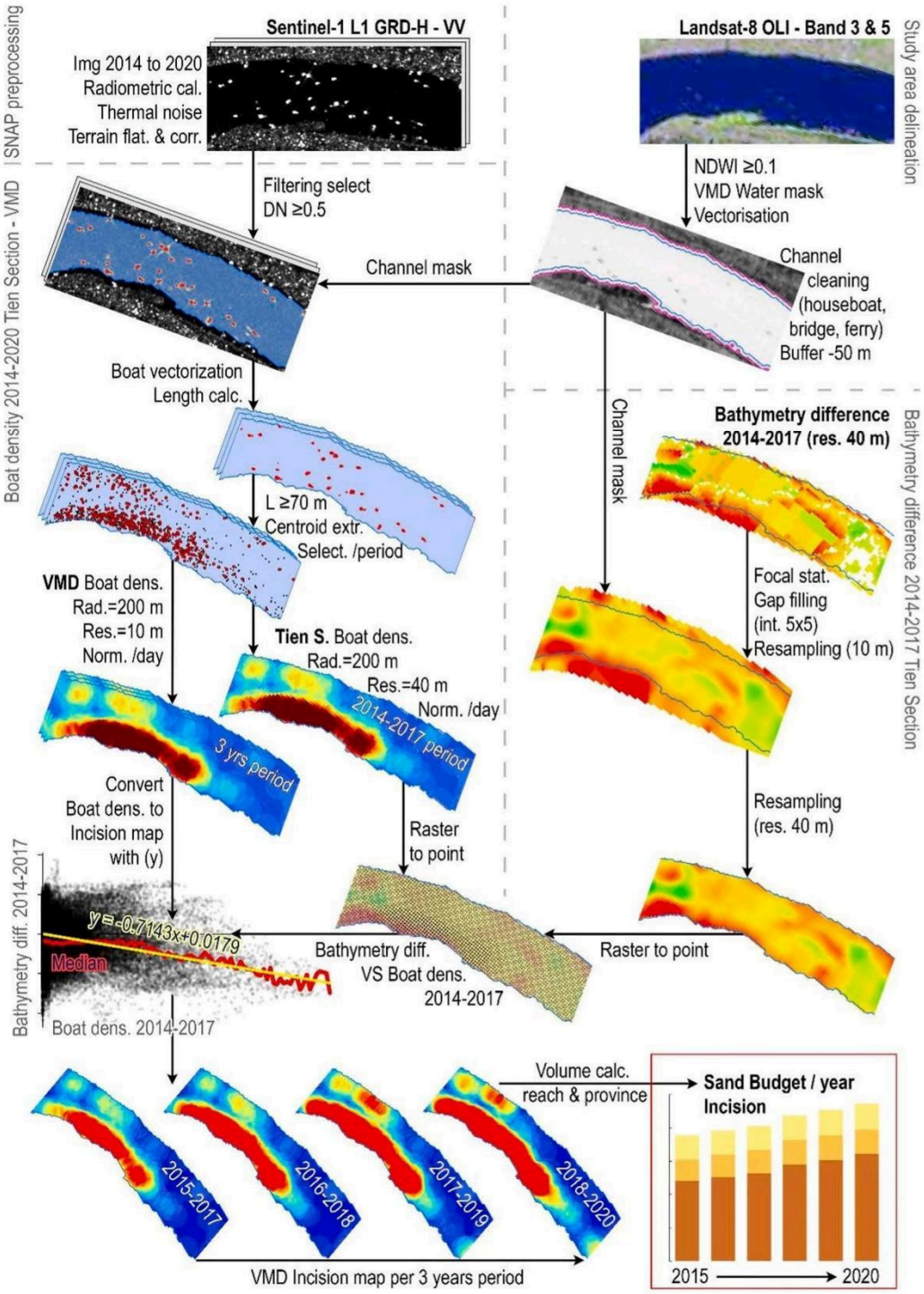
lạch chẳng hạn như kinh đào, ruộng lúa, nhà thuyền, cầu và đường phà, chúng tôi loại trừ tất cả diện tích trong khoảng 50 m của bờ lòng lạch để tối thiểu hóa nhiễm âm từ các tàu không hoạt động (được dùng để khai thác cát hay các mục đích khác cũng như đậu dọc theo bờ), để loại bỏ bất cứ nhiễm âm dội lại từ việc xây cất và phát hiện không phải tàu. Dựa trên các hình ảnh Google Earth, diện tích chung quanh cầu Vàm Cống và Mỹ Tho và một phần nhỏ của Cần Thơ được loại ra khỏi phân tích vì có mật độ tàu cao không liên hệ đến điểm khai thác cát. Chúng tôi dùng hình ảnh của Sentinel-1A (L1) có độ phân giải 20 m của quỹ đạo đi xuống (no18) Synthetic Aperture Radar (SAR) Ground Range Detected High resolution (GRD-H) trong phân cực kép (VV+VH) thu được trong Interferometric Wide (IW) (Supplementary Text 3). Toàn thể ĐBSCL được bao trùm bởi một băng duy nhất trong cùng ngày (vào lúc 5:45 AM), mỗi 12 ngày kể từ ngày 6 tháng 10 năm 2014, dưới 2 tháng sau khảo sát chiều sâu thứ 1st của chúng tôi (Supplementary Hình 1, Supplementary Bảng 1). Ưu điểm của SAR nằm trong sự chống lại mây bao phủ, hiện tượng khí quyển, và góc cao độ mặt trời. SAR cũng có đủ độ phân giải để phát hiện tàu và cho thấy tương phản cao giữa nước và cấu trúc tàu. Vì năng lượng radar phản chiếu thay đổi với nhiều yếu tố chẳng hạn như hình dạng của mục tiêu, kích thước, chiều hướng, vận tốc, và vật liệu, việc chọn lựa phân cực thích hợp rất quan trọng (Kurekin et al., 2019; Lanz et al., 2020). Trong khi tài liệu khoa học báo cáo rằng phân cực ngang VH tối ưu để phát hiện tàu, kết quả của chúng tôi cho thấy rằng phân cực VH cho thấy một liên hệ tốt hơn giữa tàu được phát hiện và bộ dữ kiện chiều sâu khác nhau.

Trước hết, chúng tôi chế biến tất cả hình ảnh Sentinel-1A (cả lên lẫn xuống) có sẵn (N=293) ở ĐBSCL giữa 6 tháng 10 năm 2014 và 22 tháng 12 năm 2020 (xem toàn thể phương pháp trong Supplementary Text). Những hình ảnh nầy được chế biến trước với phóng xạ, điều chỉnh hình học, loại trừ nhiễm âm nhiệt và mặt chuẩn WGS84, bằng cách dùng ESA Sentinel Application Platform (SNAP). Sau khi lọc các vết đốm, kiểm tra bằng mắt và mô phỏng, chúng tôi áp dụng một ngưỡng 0,5 với hệ số rãi rác ($\gamma 0$) cho mỗi hình ảnh để loại trừ các ô cổ xưa. Sau đó, chúng tôi chuyển các nhóm ô được chọn thành khung số. Nó được làm để loại nhiễm âm, tách rời những tàu ở gần nhau và để loại các tàu nhỏ hơn. Khung số được cắt bằng cách dùng vùng nghiên cứu ĐBSCL. Sau khi vectơ hóa các tàu lấy cát (mặt tàu phản chiếu), chúng tôi tự động đo đạc chiều dài và diện tích. Sau đó, chúng tôi dùng trung tâm của mỗi tàu như 1 điểm.

Chỉ dùng dữ kiện quỹ đạo xuống, chúng tôi thực hiện nhiều mô phỏng cùng với dữ kiện tại chỗ để phân biệt tàu khai thác cát với các tàu khác. Những mô phỏng nầy cho thấy một ngưỡng ≥70 m của chiều

dài tàu được tối ưu để phù hợp với vùng đục khoét. Nững tàu nầy (≥70 m) được chọn mỗi năm và rồi cho mỗi thời kỳ của năm (thí dụ tháng 10 năm 2014 đền tháng 12 năm 2017). Đoạn chúng tôi tạo nên một bản đồ mật đô tàu có độ phân giải 10 m và định nghĩa một vùng đệm có bán kính 200 m sau khi mô phỏng với các bán kình khác nhau (100-300 m). Các bản đồ nhiệt cho thấy mật độ tàu (số tàu trong 1 km2) được bình thường hóa bàng cách chia các trị số của khung số với số hình ảnh trong thời kỳ (91 hình ảnh từ 2014 đến 2017). Cuối cùng, bản đồ nhiệt được thử lại với 40 m để phù hợp với độ phân giải của bản đồ khác biệt chiều sâu và biến thành điểm (N=61.663). Các trị số tương ứng giữa chiều sâu và mật độ tàu được vẽ và khác biệt chiều sâu trung vị cho mỗi mật độ tàu 0,1 được tính toán. Một phương trình hồi quy được rút ra. Sau đó, chúng tôi dùng mật độ tàu/ngày (1 hình ảnh cho mỗi 12 ngày), bình thường hóa mỗi 3 năm để ước tính mức đục khoét và khối lượng cát được lấy đi từ phương trình hồi quy ở qui mô ĐBSCL. Phương pháp nầy được áp dụng cho mỗi năm từ 2015 đến 2020 trong thời khoảng 3 năm (thí dụ, các trị số 2015-2017, 2016-2018, vân vân). Sau đó, chúng tôi trung bình các trị số chồng lên nhau để có một trị số trung bình cho mỗi năm (công việc được trình bày trong Hình 2). Đối với kết quả của chúng tôi cùng với các tuyên bố tổ chức (Supplementary Text 4 and 5, Bảng 6 và 7), chúng tôi tính toán khối lượng cát được lấy đi trong các tỉnh khác nhau bằng cách dùng các ranh giới hành chánh rãi rác.

Để kiểm chứng sự liên hệ giữa mật độ tàu và cường độ khai thác cát, chúng tôi vẽ bản đồ của tất cả xà lan được trang bị ít nhất 1 cần trục (BC) trên khắp ĐBSCL từ năm 2014 đền 2020 bằng cách dùng 1 hình ảnh mỗi năm trên Google Earth. Khi các năm bị thiếu, chúng tôi dùng +/- 1 năm. Đoạn, chúng tôi đo một độ tàu/km2 (200 m bán kính) của mỗi tàu ≥70 m trong quỹ đạo xuống (N=42.054) và khoảng cách của chúng với BC gần nhất (N=1.181) ở ĐBSCL trong thời kỳ từ 2014 đến 2020. Số tàu (chiều dài ≥70 m) và sự phát ra hơi nóng của chúng cũng được điều tra trên qui mô toàn ĐBSCL từ năm 2014 đến 2020 bằng cách dùng dữ kiện từ quỹ đạo lên và xuống. Hai nhánh nằm dọc theo TS được phân tích. Mặt cắt A (7,2 km) được chọn vì nó nằm trên dòng chánh của sông Tiền và được quan sát có mật độ tàu thấp hơn (vắng hoạt động khai thác cát) trong thời gian nghiên cứu. Trong khi đó, mặt cắt B (9,4 km) nằm ở gần Sa Đéc, là một điểm nóng khai thác cát được nghiên cứu trước đây trong tháng 4-5 năm 2018 bởi Jordan et al. (2019). Chúng tôi lấy mẫu kết quả của chúng tôi trong cùng đoạn sông giữa 2015 và 2020 và so sánh trị số của chúng tôi với trị số của họ. các trị số trong các ấn bản khác nhau chú trọng đến khúc sông và thời kỳ riêng cũng được so sánh theo thời gian và không gian ở qui mô ĐBSCL.

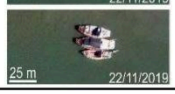
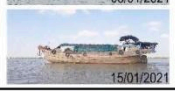


Hình 2. Lưu đồ phương pháp minh họa việc tính toán ngân sách cát và đục khoét đáy sông trên Sentinel-1 SAR và sự khác biệt chiều sâu. (Copernicus Sentinel data 2020, chế biến bởi ESA).

3. Kết quả và thảo luận

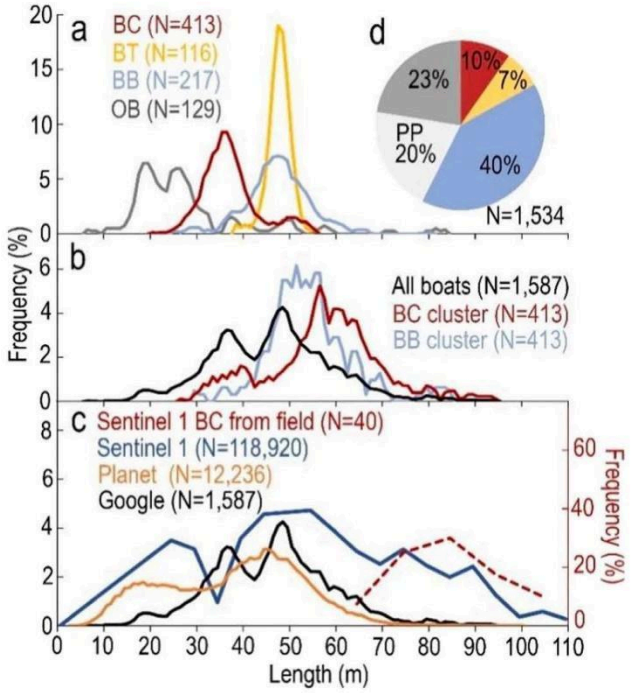
3.1. Hoạt động của tàu khai thác cát và các điểm nóng

Các quan sát trên hình ảnh của Google Erath trong 2019-2020 cho thấy các xà lan với cần trục (BC) được dùng để lấy cát chiếm 10% tất cả tàu liên quan đến việc khai thác cát (Bảng 1, Hình 3). Các xà lan được dùng riêng để vận chuyển cát (BT) được đẩy hay kéo chiếm 7%. Các tàu xanh (BB) chiếm 40% của tất cả các tàu được cơ giới hóa và có thể được dùng cho vật liệu khác hay vận chuyển lúa. Phần 43% còn lại phần lớn gồm có kéo-đẩy, phà, đánh cá và tàu chở hành khách. Các điểm nóng khai thác cát có đặc điểm là tàu tập trung cao. Khoảng 82% các tàu trong khúc sông chúng tôi nghiên cứu thì vắng vẻ, trong khi 18% được nối kết với 1 hay nhiều tàu. Chú trọng đến BC, 76% của chúng được nối kết với tàu khác (BT hay BB) để chất cát. Ngược lại, chỉ có 25% BB được nối kết với 1 tàu, 59% của chúng được nối với một BC. Tương tự, BT hầu hết đơn độc hay trong 25% trường hợp, được nối với một BC.

Boat type	Google Earth image	Ground observation	Length (m)	Area (m^2)	Frequency (%)
Barges with Crane (BC)			M = 37 STD = 6	M = 450 STD = 97	10
Barges for Transport (BT)			M = 47 STD = 2	M = 558 STD = 52	7
Blue Boats (BB)			M = 47 STD = 7	M = 376 STD = 87	40
Other Boat and Pusher / Puller (OB / PP)			M = 27 STD = 13	M = 168 STD = 168	43

Bảng 1. Các loại tàu dọc theo khúc sông được khảo sát với hình ảnh Google Earth (tỉ lệ bằng nhau). Trung vị và độ lêch tiêu chuẩn của chiều dài và diện tích.

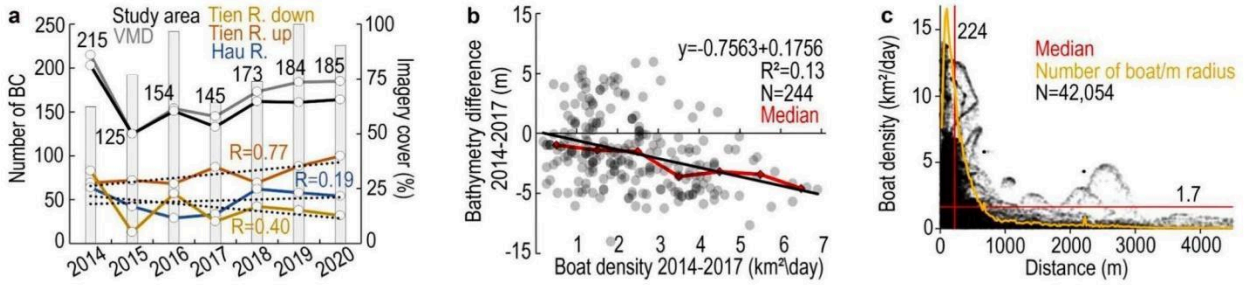
Từ các quan sát Google Earth, kích thước của tàu riêng rẽ cho thấy một sự phân phối bình thường cho tất cả BC, BT và BB (Hình 3). Mặc dù không thể phân biệt giữa BB và BT bằng cách dùng chiều dài, BC, tiêu biểu cho cốt lõi của hoạt động khai thác cát, rất khác biệt. Tuy nhiên, một BC duy nhất chỉ xảy ra trong 24% của tổng số hoạt động, vì chúng hầu hết được nối liền với các tàu vận chuyển cát khác. Từ việc phân tích trên radar Sentinel-1, kích thước của các nhóm tàu gồm có BC được trộn lẫn với các nhóm BB. Tuy nhiên, ngoại trừ lúc đậu, hầu hết các nhóm BB ở chung quanh BC được dùng để khai thác cát. So sánh giữa BC được quan sát tại chỗ và kích thước phát hiện trên Sentinel-1 cùng ngày cho thấy rằng 73% của BC có chiều dài trên 70 m với hầu hết từ 70 đến 90 m chiều dài.



Hình 3. Kích thước tàu và phân phối của mỗi loại. a. Chiều dài và tần số của BC, BT, BB và OB trên Google Earth. Các trị số trung bình di động (thời kỳ=3) được trình bày. b. Chiều dài và tần số của tất cả tàu duy nhất và nhóm tàu, chiều dài của nhóm BC và BB từ Google Earth. Các trị số trung bình di động (thời kỳ=3) được trình bày. c. Chiều dài và tần số của tất cả tàu riêng rẽ và tập trung từ Google Earth, Tàu được đo trên hình ảnh PlanetScope, Tàu được phát hiện từ Sentinel-1 SAR và chiều dài từ Sentinel-1 của BC được quan sát và xác định vị trí tại chỗ. Các trị số trung bình di động (thời kỳ=3) được trình bày ngoại trừ Sentinel-1. d. Phân phối của những loại tàu khác nhau trong ĐBSCL.

Đối với các năm 2014, 2016, 2017, 2018 và 2020, hình ảnh Google Earth bao trùm khoảng 55% ĐBSCL. Trong năm 2015 và 2019, ĐBSCL được bao trùm hoàn toàn bởi Google Earth. Trong số vùng không được bao phủ, ~75% nằm ở hạ lưu nơi hoạt động khai thác cát tương đối thấp. Hoạt động BC trong ĐBSCL đặc biệt cao trong năm 2014 với khoảng 215 tàu. Nó giảm xuống 42% trong năm 2015 còn 125 BCE trước khi tăng dần đến 185 BCE trong năm 2020 (Hình 4). Con số BC giảm được quan sát giữa năm 2014 và 2015 hầu hết nằm ở các nhánh Mỹ Tho, Hàm Luông và Cổ Chiên. Trong vùng nầy của ĐBSCL, con số BC tụt giảm (R=0,40) giữa năm 2015 và 2020 trong khi ở thượng lưu của sông Tiền, gia tăng (R=0,77) từ 69 đến 100. Con số BC trong sông Hậu, thay đổi ít, với thay đổi nhỏ sau 2016. Con số tổng

cộng của BC trong lòng lạch giống nhau trong năm 2015 và 2016, nhưng sự khác biệt nầy gia tăng từ 12 đến 22 giữa năm 2017 và 2020. 7% của BC trong ĐBSCL được quan sát giữa 2014 và 2020 không nằm trong vùng nghiên cứu, nhưng dọc theo bờ sông; điều nầy có nghĩa là chúng có thể đậu hay được dùng vào ban đêm.



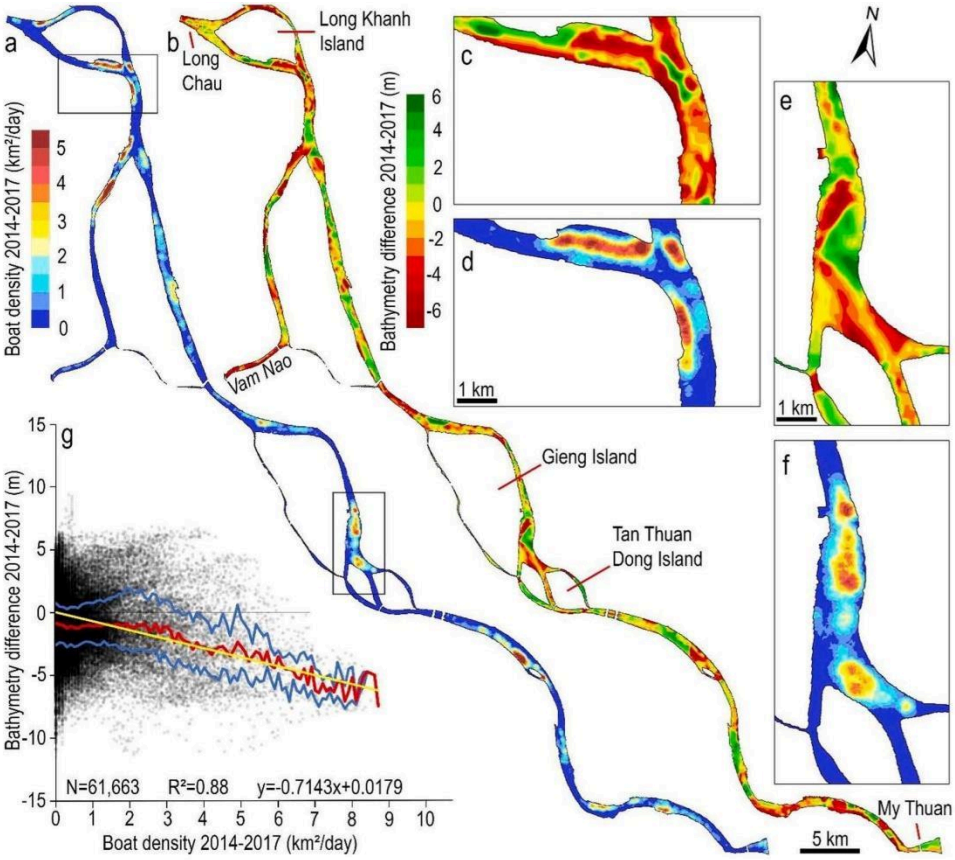
Hình 4. Số xà lan với cần trục, phân phối và khoảng cách với các tàu được phát hiện bằng Sentinel-1 từ 2014 đến 2020. a. Tiến triển của con số BC trong thời kỳ 2014-2020 trong ĐBSCL và trong lòng lạch của vùng nghiên cứu, sông Tiền: thượng và hạ lưu, sông Hậu. Biểu đồ trình bày phần của Google Earh bao trùm ĐBSCL cho mỗi năm và khung đen là vị trí trong ĐBSCL. B. Mật độ tàu trung vị (x) và sự khác biệt chiều sâu trung vị chung quanh bán kính 200 m của mỗi BC trong TS. c. Biểu đồ cho thấy trong x là khoảng cách giữa tất cả các tàu (≥70m) với BC gần nhất (khoảng cách tối đa 4.500 m). Trong y là mật độ của tàu chung quanh mỗi tàu nầy. Đường màu cam tương ứng với tần số khoảng cách BC-Tàu (m). Hai đường đỏ tương ứng với trung vị x và y. Đường dợn sóng giữa 1.000 và 3.000 m tương ứng với hầu hết lòng lạch nơi BC có thể hiện diện, nhưng hình ảnh Google Earth thiếu sót. (Diễn dịch màu sắc trong hình nầy, người đọc có thể xem phiên bản trên mạng của bài viết.)

75% của 224 BCE nằm dọc khúc sông Tiền (TS) từ năm 2014 đến 2017 nằm trong vùng đục khoét (trung vị của vùng bán kính 200 m). 93% của BC với mật độ tàu ở chung quanh ≥ 3 tàu/km2 cũng nằm trong vùng đục khoét (R2=0,13, độ dốc=-0,76). Trung vị của các trị số khác biệt chiều sâu được rút ra từ mỗi ô cho thấy một sự gia tăng liên tục của đục khoét với sự gia tăng song hành của mật độ tàu. Bằng cách đo đạc khoảng cách giữa BC và tất cả tàu được phát hiện (N=42.054) ở ĐBSCL, 50% tàu có mật độ trên 1,7 tàu/km2 (Hình 4). Khoảng 50% tàu nằm cách BC dưới 224 m, và 50% tàu nầy có mật độ cao hơn 2,8 tàu/km2. Diện tích bao trùm bởi bán kính 224 m của vùng đệm BC chỉ chiếm 11% điện tích của toàn thể ĐBSCL.

Bản đồ mật độ tàu khai thác cát của chúng tôi trên ĐBSCL cho thấy những biến đổi không gian lớn. Chúng tôi xác định một vài điểm nóng khai thác cát quan trọng dọc theo biên giới Cambodia trên sông Tiền (Supplementary Hình 2 và 3). Các vị trí lấy cát mạnh mẽ cũng được tìm thấy chung quanh cù lao Long Khánh, lòng lạch đi đến Vàm Nao, cù lao Thuận Đông và chung quanh Sa Đéc. Hạ lưu của Mỹ Thuận, điểm nóng quan trọng được phát hiện chung quanh hợp lưu của nhánh Mỹ Tho và Cổ Chiên. Trên sông Hậu, nồng độ của tàu khai thác cát có vẻ thấp hơn với các điểm nóng nằm gần Cần Thơ, Bình Hòa, và Cái Dầu. Khai thác cát cũng xảy ra gần Định An, vài km từ bờ biển; điều nầy được kiểm chứng bởi quan sát BC trên Google Earth. Trong năm 2015, 59 điểm nóng được phát hiện trong ĐBSCL với trị số trung bình là 0,29 km2. Trong năm 2020, có khoảng 70 vùng như thế với trị số trung bình cao hơn 0,34 km2. Từ năm 2015 đến 2020, khoảng 69% các điểm nóng nằm trên sông Tiền, với diện tích điểm nóng trung bình khoảng 0,44 km2. Các điểm nóng nằm ở hạ lưu Mỹ Thuận và trong sông Hậu chiếm từ 11% đến 20% các điểm nóng, theo thứ tự, với một diện tích trung bình nhỏ hơn 0,08 km2.

3.2. Ngân sách khai thác cát đáy sông của ĐBSCL

Khác biệt chiều sâu giữa 2014 và 2017 trên TS cho thấy chiều sâu đục khoét trung bình là 1,02 m (STD – 2,6 m). Dọc theo khúc sông được khảo sát, 60% của diện tích bị sạt lở, trong khi 27% được bồi lắng, và vùng còn lại thay đổi giới hạn giữa 0,5 và -0,5 m (Hình 5). Mật độ tàu trung vị của khúc sông được khảo sát khoảng 0,35 tàu/km2 với 6% diện tích vùng cho thấy có trên 3 tàu/km2. 73,4% khúc sông được khảo sát có mật độ tàu dưới 1 tàu/km2.



Hình 5. Khác biệt chiều sâu và mật độ táu dọc theo TS. a, d, f: Mật đồ tàu/km2 2014-2017. b, c, e: khác biệt chiều sâu 2014-2017. g: Mật độ tàu 2014-2017 vs khác biệt chiều sâu 2014-2017 vẽ ở độ phân giải 40 m. Các đường xanh tương ứng với Q1 và Q3, đường đỏ là trung vị của khác biệt chiều sâu ở mỗi 0,1 mật độ tàu. (Diễn dịch màu sắc trong hình nầy, người đọc có thể xem phiên bản trên mạng của bài viết.)

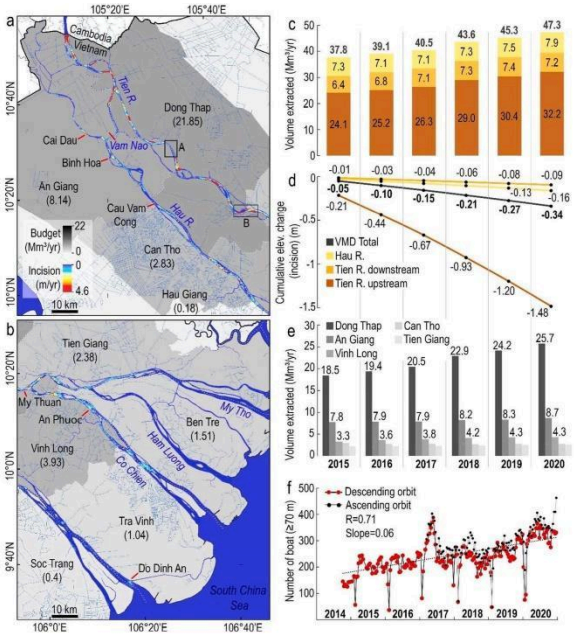
Bằng cách vẽ mức độ đục khoét vs mật độ tàu cho mỗi ô, chúng tôi có được R2=0,88 của khác biệt chiều sâu trung vị (y = -0,7143x + 0,0179) tương ứng với khác biệt chiều sâu trung vị khoảng – 1 m cho những vùng với mật độ tàu giữa 0 và 3 (Hình 5). Độ dốc của mô hình hồi quy thẳng rút ra giữa đục khoét đáy sông và mật độ tàu thì đáng kể thống kê ở 95% (trị số p dưới 0,001). Ngoài ngưỡng 3 tàu/km2, khác biệt trung vị trong chiều sâu gia tăng 1 m (thí dụ, gia tăng đục khoét 1 m) cho mỗi tàu/km2 thêm. Bằng cách so sánh thời kỳ 2014-2017 với 2018-2020 trong vùng khảo sát, chúng tôi quan sát sự gia tăng trong mật độ tàu ~ 32% so với trung bình (từ 0,85 đến 1,13 tàu/km2). Tuy nhiên, 47% khu vực với 3 hay nhiều tàu hơn trong năm 2014-2017 đã giảm mậy độ (dưới 2 tàu/km2) trong thời

kỳ 2018-2020. Sự sụt giảm mật độ tàu nầy có lẽ do cát cạn kiệt trong những nơi nầy hay giấy phép hết hạn.

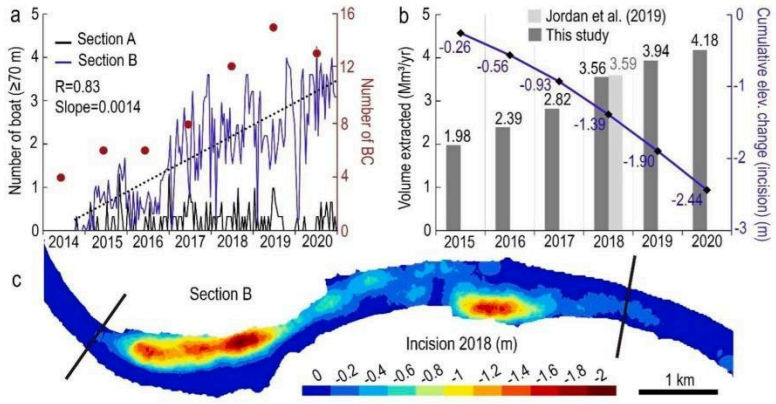
Chúng tôi tính rằng tổng số khối lượng 253,58 triệu m3 cát được khai thác trong ĐBSCL trong thời kỳ 2015-2020, với khối lượng trung bình là 42,26 triệu m3/năm (Hình 6, Supplementary Bảng 2 và 5). Vùng được khai thác nhiều nhất nằm ở thượng lưu của Mỹ Thuận trên sông Tiền và có khối lượng khai thác tổng cộng là 167,17 triệu m3 hay ~66% tổng số khối lượng được khai thác ở ĐBSCL. Các điểm nóng ở hạ lưu Mỹ Thuận có ngân sách lấy cát thấp hơn ở 42,19 triệu m3 (~17% tổng số). Ngược với sông Tiền, sông Hậu có ngân sách lấy cát thấp hơn là 44,22 triệu m3 (~17%).

Khối lượng khai thác giữa 2015 và 2020 gia tăng liên tục ở ĐBSCL với mức gia tăng trung bình hàng năm là 1,9 triệu m3, hay tổng số gia tăng 25% (9,5 triệu m3) (Hình 6). Đáng chú ý, năm 2017-2018 gia tăng trên gấp đôi các năm trước (3,17 triệu m3) trong khi 2015-2016 và 2016-2017 gia tăng ít hơn ở mức 1,3 triệu m3 và 1,38 triệu m3, theo thứ tự. Thời kỳ 2018-2019 và 2019-2020 cho thấy một gia tăng 1,62 triệu m3 và 2,03 triệu m3, theo thứ tự (Supplementary Bảng 2). Chiều hướng gia tăng nầy phần lớn là do việc khai thác ở thượng lưu sông Tiền, được quan sát có sự gia tăng đều đặn (34% từ 2015 đến 2020) trong khối lượng cát được khai thác. Việc khai thác cát đạt cao điểm trong năm 2017-2018, chiếm 2,71 triệu m3 (khác biệt liên năm trung bình 1,62 triệu m3).

Hạ lưu của Mỹ Thuận (khác biệt liên năm trung bình 160.000 m3) có một sự gia tăng nhẹ trong hoạt động khai thác cát, và sụt giảm sau năm 2019. Sông Hậu cũng cho thấy một sự sụt giảm vừa phải giữa 2015 và 2017 và gia tăng nhẹ từ từ trong những năm sau (khác biệt liên năm trung bình 110.000 m3).



Hình 6. Khối lượng khai thác, mức đục khoét và hoạt động của tàu. a,b: Bản đồ cho thấy các điểm nóng khai thác cát và đục khoét trung bình ở ĐBSCL. Tỉnh rãi rác từ HDX và ngân sách khai thác cát trung bình của mỗi tỉnh đươc trình bày trong khung màu xám. Ba khúc sông được nghiên cứu ở ĐBSCL (thượng và hạ lưu sông Tiền, sông Hậu) được phân biệt bởi đường màu đỏ ở Vàm Nao và Mỹ Thuận. Khúc A và B, được thảo luận trong Hình 7, được phân chia bởi các khung màu đen. c: Khối lượng khai thác mỗi năm ở thượng lưu sông Tiền (màu nâu), Mỹ Tho, Hàm Luông và Cổ Chiên (màu cam), sông Hậu, (màu vàng) và tổng cộng của ĐBSCL (màu xám đậm ở bên trên). d: Đục khoét cộng dồn trong cùng thời gian và các khúc sông có cùng màu như c. e: Năm tỉnh hàng đầu với ngân sách khai thác cát hàng năm cao nhất (trung bình ≥ 2 triệu m3/năm), tương đương với 93% ngân sách (Supplementary Test 5, Bảng 7). f: Số tàu được phát hiện (≥70 m) trong mỗi hình ảnh từ tháng 10 năm 2014 đến tháng 12 năm 2020 cho quỹ đạo lên và xuống trong ĐBSCL, trị số thấp ~70 tàu, được quan sát hàng năm tương ứng với thời kỳ Tết Âm lịch (~ tháng 2). (Diễn dịch màu sắc trong hình nầy, người đọc có thể xem phiên bản trên mạng của bài viết.)



Hình 7. Hoạt động khai thác cát dọc theo khúc sông A và B gần Sa Đéc. a: Số tàu ≥70 m/km2 được phát hiện giữa tháng 10 năm 2014 đến tháng 12 năm 2020 vào lúc 5:45 AM (quỹ đạo xuống) trên khúc sông A và B. Số BC quan sát được dọc theo khúc sông nầy mỗi năm (màu đỏ) trên Google Earth. Các hình ảnh thiếu trong năm 2018 tương ứng với trung bình 2017-2019. b: Khối lượng được khai thác từ năm 2015 đến 2020 trong khúc sông B và khối lượng được đo đạc bởi Jordan et al. (2019) trong năm 2018 trong cùng nơi (xám nhạt). Đục khoét cộng dồn dọc theo khúc sông B màu xanh. c: Bản đồ cho thấy đục khoét trong năm 2019 dọc theo khúc sông B (giữa km 6 và km 15 trong Jordan et al. (2019). (Diễn dịch màu sắc trong hình nầy, người đọc có thể xem phiên bản trên mạng của bài viết.)

Vẽ to ra, chúng tôi hàm ý rằng toàn thể ĐBSCL có đục khoét tổng cộng khoảng 0,34 m trong 6 năm với vận tốc 0,06 m/năm. Trong số 3 khúc sông được nghiên cứu (sông Hậu, thượng và hạ sông Tiền), hạ lưu sông Tiền có đục khoét ít nhất với mức hạ thấp khoảng 0,09 m trong 6 năm tương đương với mức trung bình là 0,02 m/năm. Ngược lại, thượng lưu sông Tiền, nhánh sông đến tận biên giới Cambodia, có đục khoét sâu nhất khoảng 1,48 m trong 6 năm với mức trung bình hàng năm là 0,25 m. Trong sông Hậu, chúng tôi suy đoán một mức đục khoét 0,16 m trong 6 năm, hay 0,03 m/năm.

Mức đục khoét ở ĐBSCL được ước tính khoảng 0,13 m/năm bởi Brunier et al. (2014) trong thời kỳ 1998-2008. Trị số nầy trên 2 lần cao hơn mức đục khoét trung bình do chúng tôi tính toán (0,06 m/năm) cho thời kỳ 2015 đến 2020. Gần đây, Binh et al. (2021) tính mức đục khoét trung bình khoảng 0,16 m/năm trên sông Tiền và Hậu cho thời kỳ 1998-2014 và 0,5 m/năm cho thời kỳ 2014-2017. Chúng tôi đạt được mức đục khoét 0,67 m/năm cho thời kỳ 2015-2017, thí dụ, 0,22 m/năm trong phần nầy của sông Tiền và đến biên giới.

Từ 2015 đến 2020, mật độ tàu ≥70 m chiều dài đã gia tăng 68% từ 0,21 tàu/km2 đến 0,35 tàu/km2. Thượng lưu sông Tiền có sự gia tăng đáng kể nhất trong số tàu lớn từ 0,72 đến 1,54 tàu/km2. Ngược lại, hạ lưu sông Tiền cho thấy mật độ tàu gia tăng vừa phải khoảng 20% và chỉ có 5% trên sông Hậu. Sau khi loại dữ kiện bất thường trong thời kỳ Tết Âm lịch, con số tàu được phát hiện trên khắp ĐBSCL đã gia tăng đều đặn (R=0,71 và độ dốc=0,06) với trị số trung bình 202 trong năm 2015, đến khoảng 325 trong năm 2020 (gia tăng 61%). Trong khúc sông A, chúng tôi quan sát một hoạt động ổn định giữa 2014 và 2020, với trị số trung bình khoảng 0,2 tàu/km2 vào lúc 5:45 AM (buổi sáng) và 0,5 tàu/km2 vào lúc 6:10 PM (buổi chiều) (Hình 6 và 7). Trong khúc sông B, tuy nhiên, sự khác biệt giữa quỹ đạo buổi sáng và chiều ít đáng kể hơn, với sự khác biệt vào khoảng 0,1 tàu/km2.

3.3. Ngân sách và phân tích so sánh đục khoét

Các ngân sách khai thác cát được công bố cho ĐBSCL, phần lớn chú trọng đến vị trí địa dư của đồng bằng (Jordan et al., 2019) hay dựa trên thống kê chánh thức (Eslami et al., 2019; Jordan et al., 2019). Ngân sách khai thác cát khu vực của ĐBSCL được ước tính bởi Bravard et al. (2031), đề nghị một ngân sách 7,75 triệu m3 cho năm 2012, dựa trên các báo cáo của các nhà khai thác dọc theo một phần của ĐBSCL (Bảng 2). Các tính toán của Bravard et al. (2013) bằng khoảng ~8,5 triệu m3 trong tổng số nếu chúng ta ngoại suy trị số của họ với toàn thể vùng nghiên cứu của chúng tôi. Sau đó, Brunier et al. (2014), dựa trên sự khác biệt chiều sâu giữa 1998 và 2008 dọc theo một phần của sông Hậu và Tiền, đã nói rằng trị số trung bình 20 triệu m3/năm, thí dụ, 35,5 triệu m3/năm được khai thác trong toàn thể ĐBSCL. Gần đây hơn, Eslami et al. (2019) và Jordan et al. (2019) ước tính ngân sách 28 triệu m3 (2015) và 17,77 triệu m3 (2018), từ các giấy phép được cấp bởi các cơ quan chánh phủ. Mặc dù họ nói đến 2 năm khác nhau, hai tham khảo cuối cùng nầy ngoại suy đến 28 triệu m3/năm và 22 triệu m3/năm ở qui mô ĐBSCL (Bảng 2). Chúng tôi tính toán khối lượng khai thác là 37,8 triệum3 cho năm 2015. Con số nầy tì 35% nhiều hơn trị số của Eslami et al. (2019). Đáng kể hơn, ước tính của chúng tôi là 43,6 triệu m3 trong năm 2018 thì 2,5 lần cao hơn các trị số của Jordan et al. (2019). Đối với thời kỳ 1998-2008, Brunier et al. (2014) tường trình khai thác cát trong sông Hậu nhiều hơn sông Tiền (55%). Tuy nhiên, tính toán của chúng tôi cho thấy chỉ có 17% các điểm nóng từ năm 2015 đến 2020.

Budget measured (Mm^3)	Period (Years)	Studied covered reach (km^2)	Volume (Mm^3/ km^2/yr)	Annual budget Extrapolated at the VMD scale (710 km^2)	Data sources and methods	References
7.75	1 (2012)	613 VMD Main stem of Hậu and Tiền	0.012	8.5	Field survey based on individual questionary for each extraction site. Location, granulometry, staff capacity, number of vehicle and equipment, number of years in operation, seasonal calendar, quantity extracted.	Bravard et al. (2013)
200 (90 Tiền – 110 Hậu)	10 (1998–2008)	400 205 km on the Tiền 143 km on the Hậu	0.05	35.5	Bed volume change loss measured with bathymetry data from MRC	Brunier et al. (2014)
28	1 (2015)	710 VMD	0.0394	28	Issued mining licenses	Eslami et al. (2019)
17.77	1 (2018)	572 VMD Without Bến Tre and Tiền Giang provinces	0.031	22	Data collected from institutions: Departments of Natural Resources and Environment (DONREs), the Southern Mineral Control Department (SMCD), Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE)	Jordan et al. (2019)
4.64 (+/- 0.31) Mm^3	1 (2018)	N/A Tiền R.	N/A	N/A	Bathymetric survey in April-May 2018 along 20 km of reach with MBES	Jordan et al. (2019)
2100 – 2300	4 (2016–2020)	N/A Whole Vietnam	N/A	N/A	Governmental declarations projections	Koehnken and Rintoul (2018)
253.58	6 (2015–2020)	710 VMD without bridge, ferry, houseboats, buffer –50 *m*	0.059	42.26	Bathymetry survey in 2014 and 2017 Field Survey in 2020 and 2021 Remote sensing using Sentinel-1 in 2014–2020	This study

Bảng 2. So sánh một số ngân sách khai thác cát chọn lọc ở ĐBSCL.

Theo Jordan et al. (2019), cát được khai thác trong tỉnh Tiền Giang trong năm 2018 là 510.000 m3 mặc dù trái phép. Tương tự, trong khi khai thác cát bị cấm trong tỉnh Bến Tre, các tác giả nầy không thể kiểm chứng nếu hoạt động khai thác cát thật sự vắng mặt. So sánh với Jordan et al. (2019), phân tích của chúng tôi đối với 2 tỉnh nầy cho thấy việc lấy cát ít nhưng đều đặn trong cùng thời kỳ với các trị số trung bình tương ứng là 2,38 triệu m3/năm và 1,51 triệu m3/năm ở Tiền Giang và Bến Tre (Supplementary Table 7). Cũng nên lưu ý rằng Jordan et al. (2019) cho thấy rằng mức ước tính của họ cho Tiền Giang trong năm 2018 có lẽ bị ước tính thấp, phù hợp với trị số được ước tính lại là 2,42 triệu m3/năm trong nghiên cứu nầy. Tương tự, chúng tôi ước tính mức 1,51 triệu m3/năm cho Bến Tre (1,57 triệu m3 trong năm 2018), vì một vài BCs được thấy rõ ràng trên hình ảnh Google Earth.

Từ tháng 4 và 5 năm 2018, Jordan et al. (2019) ước tính một khối lượng khai thác là 3,59 triệu m3 dọc theo khúc sông 10 km (km 6 đến km 15 trong Jordan et al. (2019), gần Sa Đéc. Các quan sát theo thời gian các BC từ Google Earth, cùng với sự phát hiện của Sentinel-1, cho thấy rằng khai thác cát dọc theo khúc sông nầy có thể bắt đầu sau năm 2015 (Hình 7a). Hoạt động trở nên thường thấy hơn và thấy rõ sau tháng 9 năm 2016 với sự gia tăng gấp 4 lần đến năm 2020. Điều nầy ám chỉ rằng nơi nầy đã được đào mạnh mẽ trong 1,5 năm trước khi được khảo sát bởi Jordan et al. (2019). Số BC được phát hiện trong vùng nầy giữa 2015 và 2020 chưa bao giờ vượt quá 8 cho đến 2018 và khoảng 14 trong năm 2019 và 2020. Từ 2014 đến 2020, con số gia tăng đáng kể đến tổng số 60 được quan sát, chiếm 5,8% của tất cả các BCs được quan sát trên khắp ĐBSCL. Tổng số cát khai thác đo được trong khúc sông B trong cùng thời gian là 18,87 triệu m3, tương ứng với khoảng 7,4% ngân sách của toàn thể ĐBSCL cho thời kỳ

2015 đến 2020. Giữa 5 năm nầy, khối lượng cát được khai thác gia tăng trên 2 lần. Trong năm 2018, khối lượng được khai thác khoảng 3,56 triệu m3 dựa trên ước tính của chúng tôi. Trong cùng năm, đo đạc tại chỗ của Jordan et al (2019) cho thấy 3,59 triệu m3 cát được lấy đi trong 8 hố có diện tích ≥2.500 m2. Dọc theo khúc sông nầy, chúng tôi đo đạc tổng số đục khoét 2,44 m trong 6 năm hay trung bình 0,4 m/năm. Trong năm 2018, đục khoét do khai thác cát được thấy là 0,46 m.

3.4. Khai thác cát trái phép và báo cáo chánh thức

Ngân sách khai thác cát trong nghiên cứu nầy thì 35% và 146% cao hơn ngân sách được báo cáo bởi Eslami et al. (2019) và Jordan et al. (2019), theo thứ tự. Phân tích so sánh trong các tỉnh khác nhau với các kết quả kiếm được bởi các tác giả khác nhau làm nổi bật sự bất đồng đáng kể của các báo cáo chánh thức. Chúng tôi cũng ghi nhận rằng những ước tính nầy có lẻ được ước tính thấp so sánh với các trị số từ các nguồn chánh thức. Ngoài ra, nhiều tài liệu (tạp chí, bài viết khoa học) đã báo cáo ự tăng cường gần đây của các hoạt động khai thác cát trái phép (Beiser, 2018; Bendixen et al., 2019; Duan et al., 2019). Trong bài viết nầy, con số BC gia tăng được quan sát từ Google Earth nằm dọc theo bờ vào ban ngày sau 2017, là một chỉ số của khai thác mờ ám tiềm tàng. Các tin tức mâu thuẫn khác cũng hiện hữu, thí dụ, Koehken and Rintoul (2018) ghi nhận một công ty duy nhất (bán trên internet) nói rằng họ có thể cung cấp từ 500.000 đến 1 triệu m3 cát từ ĐBSCL mỗi tháng, đó là 12 triệu m3/năm. Nhưng trong cùng năm, các cơ quan chánh phủ cung cấp một ngân sách khai thác tổng cộng là 17,7 triệu m3 cho Jordan et al. (2019). Vì Bravard et al. (2013) báo cáo rằng có khoảng 39 công ty khai thác cát ở ĐBSCL trong năm 2012 và nếu con số nhà khai thác không giảm trong 6 năm tới, chúng ta có thể mong đợi rằng khối lượng được tuyên bố cho khu vực thì rất thấp.

Jordan et al. (2019) báo cáo rằng khai thác cát (ít nhất cho năm 2018) bị cấm trong 2 tỉnh Tiền Giang và Bến Tre, tuy nhiên, 510.000 m3 cát được lấy trong vùng được khảo sát nhỏ trong tỉnh Tiền Giang (Jordan et al., 2019). Những nghiên cứu như thế hàm ý rằng khai thác cát trái phép là một vấn đề kéo dài trong khu vực. Tương tự, quan sát các BCs từ Google Earth cho thấy một sự sụt giảm đáng kể hoạt động trong 2 tỉnh nầy từ năm 2015 đến 2020. Vì ranh giới tỉnh hầu hết là giữa lòng lạch, ranh giới không được định nghĩa rõ ràng và chuyển dịch của BC trong những vùng nầy tạo những điều kiện thuận lợi cho những người khai thác trái phép hoạt động qua các lỗ hỗng trong luật lệ, nhất là vào ban đêm.

4. Kết luận

Mặc dù ĐBSCL là một vùng khai thác cát nhiều nhất trên thế giới, ngân sách khai thác cát hiện nay bị giới hạn bởi một số chướng ngại kỹ thuật và tổ chức. Ở đây, chúng tôi cho thấy một đường lối mới lạ, dựa trên sự liên hệ của các đo đạc vật chất (khảo sát chiều sâu) và dữ kiện viễn thám được kiểm chứng tại chỗ để định lượng việc khai thác cát trong quá khứ và hiện tại trên toàn thể ĐBSCL. Kết quả của chúng tôi cho thấy rằng, 42 triệu m3/năm cát được lấy hàng năm và điều nầy gây đục khoét ~0.34 m (0,06 m/năm) trên toàn thể ĐBSCL từ năm 2015 đến 2020. Trong thời gian nầy, mức khai thác cát đã gia tăng ~5% mỗi năm. Sự khác biệt trong các trị số được báo cáo từ các cơ quan địa phương thay đổi từ 35% đến 146%. Sông Tiền (kể cả các phụ lưu) rộng 65% vùng ĐBSCL, chiếm 83% ngân sách của ĐBSCL, mặc dù chỉ có 45% trong năm 1998-2008. Chúng tôi suy đoán rằng ước tính thấp hiện nay của ngân sách khai thác cát trước hết là do các phương pháp giới hạn, đó là, chú trọng đến những vùng địa dư nhỏ và thứ nhì, lệ thuộc vào thống kê được công bố, hầu như lỗi thời hay không chính xác. Mặc dù lý do thứ nhất liên quan đến chướng ngại dụng cụ của các nghiên cứu hiện hữu, các hạn chế khác được nối kết với sự thiếu khả năng để tuần tra những vùng rộng lớn và sự thịnh hành của các hoạt động khai thác cát trái phép lan tràn khiến chánh quyền địa phương không thể quản lý và theo dõi hoàn toàn các hoạt động khai thác. Đường lối của chúng tôi vượt qua tất cả các giới hạn ở trên với chi phí rất thấp. Ngân sách mới của chúng tôi cũng có thể giúp thực hiện các khuôn khổ pháp lý được cải thiện trong việc khai thác cát để bảo tồn sự cân bằng khả chấp giữa nguồn cung cấp tự nhiên và khai thác. Cuối cùng, mặc dù ĐBSCL là thí nghiệm của chúng tôi, đường lối của chúng tôi có thể được thực hiện dễ dàng ở những nơi khai thác cát xảy ra mạnh mẽ hay ở nơi hoạt động nầy không được định nghĩa rõ ràng hay được kiểm soát.

Cảm tạ

Nghiên cứu nầy được tài trợ bởi Nanyang Technoligical University (#SUG-NAP 3/19EP) và Ministry of Education of Singapore (#Tier1 RT06/19,#Tier1 2021-T1-001-056 and #Tier2 MOE-T2EP402A20-0001). Các tác giả cũng cảm ơn Japan-ASEAN Science, Technonogy and Innovation Platform (JASTIP), và Supporting Program for Interaction-based Initiative Team Studies (SPIRITS 2016) của Kyoto University. Chúng tôi cảm ơn European Space Agency (ESA) đã cung cấp dữ kiện Sentinel-1 được dùng trong nghiên cứu nầy. Chúng tôi cũng cảm ơn Jana Lim đã giúp đỡ kỹ thuật. Nghiên cứu nầy được hỗ trợ bởi Earth Observatory of Singapore qua tài trợ từ National Researh Foundation Singapore và Singapore Ministry of Education qua sáng kiến Research Centres of Excellence. Công việc nầy gồm có đóng góp EOS số 436.

Tài liệu tham khảo

Anthony, E.J., Brunier, G., Besset, M., Goichot, M., Dussouillez, P., Nguyen, V.L., 2015. Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. Sci. Rep. 5 (1) https://doi.org/10.1038/srep14745.

Beiser, V., 2018. Dramatic photos show how sand mining threatens a way of life in Southeast Asia https://www.nationalgeographic.com/science/article/vietnam-mekong-illegal-sand-mining. (Online; accessed 01-July-2021).

Bendixen, M., Best, J., Hackney, C., Iversen, L.L., 2019. Time is running out for sand. Nature 571 (7763), 29–31.

Best, J., 2019. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. Nat. Geosci. 12 (1), 7–21.

Binh, D.V., Wietlisbach, B., Kantoush, S., Loc, H.H., Park, E., Cesare, G.d., Cuong, D.H., Tung, N.X., Sumi, T., 2020. A novel method for river bank detection from landsat satellite data: A case study in the Vietnamese Mekong delta. Remote Sens. 12 (20), 3298. https://doi.org/10.3390/rs12203298.

Binh, D.V., Kantoush, S.A., Sumi, T., Mai, N.P., Ngoc, T.A., Trung, L.V., An, T.D., 2021. Effects of riverbed incision on the hydrology of the Vietnamese Mekong Delta. Hydrol. Process. 35 (2) https://doi.org/10.1002/hyp.v35.210.1002/hyp.14030.

Bravard, J.-P., Goichot, M., Gaillot, S., 2013. Geography of Sand and Gravel Mining in the Lower Mekong River. EchoGéo (26). https://doi.org/10.4000/echogeo.13659.

Brunier, G., Anthony, E.J., Goichot, M., Provansal, M., Dussouillez, P., 2014. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation. Geomorphology 224, 177–191.

Dan Gavriletea, M., 2017. Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of sand market. Sustain. 9.

de Leeuw, J., Shankman, D., Wu, G., de Boer, W.F., Burnham, J., He, Q., Yesou, H., Xiao, J., 2010. Strategic assessment of the magnitude and impacts of sand mining in Poyang Lake. China. Reg. Environ. Chang. 10 (2), 95–102.

Duan, H., Cao, Z., Shen, M., Liu, D., Xiao, Q., 2019. Detection of illicit sand mining and the associated environmental effects in China's fourth largest freshwater lake using daytime and nighttime satellite images. Sci. Total Environ. 647, 606–618.

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

Hackney, C.R., Darby, S.E., Parsons, D.R., Leyland, J., Best, J.L., Aalto, R., Nicholas, A.P., Houseago, R.C., 2020. River bank instability from unsustainable sand mining in the lower Mekong River. Nat. Sustain. 3 (3), 217–225.

Hackney, C.R., et al., 2021. Sand mining far outpaces natural supply in a large alluvial river. Earth Surf. Dyn. 1–20.

Jordan, C., Tiede, J., Lojek, O., Visscher, J., Apel, H., Nguyen, H.Q., Quang, C.N.X., Schlurmann, T., 2019. Sand mining in the Mekong Delta revisited - current scales of local sediment deficits. Sci. Rep. 9 (1) https://doi.org/10.1038/s41598-019-53804-z.

Koehnken, L. & Rintoul, M., 2018. Impacts of Sand Mining on Ecosystem Structure, Process & Biodiversity in Rivers. WWF.

Koehnken, L., Rintoul, M.S., Goichot, M., Tickner, D., Loftus, A.-C., Acreman, M.C., 2020. Impacts of riverine sand mining on freshwater ecosystems: A review of the scientific evidence and guidance for future research. River Res. Appl. 36 (3), 362–370.

Kondolf, G.M., 1997. Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. Environ. Manage. 21, 533–551.

Kondolf, G. M., Rubin, Z. K., and Minear, J. T.. 2014. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. Water Resour. Res. 5158-51–69. doi:10.1002/2013WR014979. Reply.

Kurekin, A., Loveday, B., Clements, O., Quartly, G., Miller, P., Wiafe, G., Adu Agyekum, K., 2019. Operational monitoring of illegal fishing in Ghana through exploitation of satellite earth observation and AIS data. Remote Sens. 11 (3), 293. https://doi.org/10.3390/rs11030293.

Lamb, V., Marschke, M., Rigg, J., 2019. Trading Sand, Undermining Lives: Omitted Livelihoods in the Global Trade in Sand. Ann. Am. Assoc. Geogr. 109 (5), 1511–1528.

Lanz, P., Marino, A., Brinkhoff, T., Koster, F., M ¨ oller, M., 2020. The inflatesar campaign: ¨ Evaluating sar identification capabilities of distressed refugee boats. Remote Sens. 12, 1–32.

Loc, H.H., Thi Hong Diep, N., Can, N.T., Irvine, K.N., Shimizu, Y., 2017. Integrated evaluation of Ecosystem Services in Prawn-Rice rotational crops. Vietnam. Ecosyst. Serv. 26, 377–387.

Loc, H.H., Van Binh, D., Park, E., Shrestha, S., Dung, T.D., Son, V.H., Truc, N.H.T., Mai, N.P., Seijger, C., 2021. Intensifying saline water intrusion and drought in the Mekong Delta: From physical evidence to policy outlooks. Sci. Total Environ. 757, 143919. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143919.

McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. Int. J. Remote Sens. 17 (7), 1425–1432.

Nguyen, M. D., 2011. River sand mining and management: A case of Cau River in Bac Ninh province, Vietnam. Econ. Environ. Progr. Southeast Asia Res. Rep. No. 2011-RR7.

Ng, W.X., Park, E., 2021. Shrinking Tonlé Sap and the recent intensification of sand mining in the Cambodian Mekong River. Sci. Total Environ. 777, 146180. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146180.

Park, E., Ho, H.L., Tran, D.D., Yang, X., Alcantara, E., Merino, E., Son, V.H., 2020. Dramatic decrease of flood frequency in the Mekong Delta due to river-bed mining and dyke construction. Sci. Total Environ. 723, 138066. https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2020.138066.

Park, E., Loc, H.H., Van Binh, D., Kantoush, S., 2021. The worst 2020 saline water intrusion disaster of the past century in the Mekong Delta: Impacts, causes, and management implications. Ambio 51 (3), 691–699.

Peduzzi, P., 2014. Sand, rarer than one thinks. Environ. Dev. 11, 208–218.

Schiappacasse, P., Müller, B., Linh, L.T., 2019. Towards responsible aggregate mining in Vietnam. Resources 8, 1–15.

SIWRP, 2015. Report on existing sand exploitation and sand demand forecast up to 2020 and 2040 in lower Mekong Delta.

Torres, A., Brandt, J., Lear, K., Liu, J., 2017. A looming tragedy of the sand commons. Science (80-. 357 (6355), 970–971.

UNEP, 2019. Sand and Sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. 56.

1. Supplementary text

1.1. Supplementary text 1: Đồng bằng sông Cửu Long và khúc sông Tiền

Các phân tích ngân sách khai thác cát được dựa trên bộ dữ kiện Sentinel-1 bắt đầu từ tháng 10 năm 2014 đến tháng 12 năm 2020 (Supplementary Hình 1). Trong thời gian nầy, lòng lạch bị sạt lở và cải tạo đất. Để cứu xét sự di động của sông và loại trừ nhiễm âm từ vật khác, trước hết chúng tôi rút ra phạm vi tối thiểu liên năm của lòng lạch Đồng bằng sông Cửu Long ở Việt Nam (ĐBSCL) trong mùa khô 2014-2020. Chúng tôi dùng hình ảnh Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) (độ phân giải 30 m) được tải xuống từ U.S. Geological Survey (USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov). Chúng tôi áp dụng Normalized Difference Water Index (NDWI) như sau:

$$NDWI = \frac{Green - Near\ infrared}{Green + Near\ infrared}$$

Chúng tôi áp dụng một ngưỡng Digital Number (DN) 0,1 để phân biệt nước và đất. Hệ thống lòng lạch chánh được chọn và các vùng nước như ruộng lúa và kinh đào được loại ra. Phạm vi lòng lạch được cắt từ biên giới Cambodia đến cửa sông. Sau đó, chúng tôi xác định và loại bỏ các đường phà cũng như các cầu và nhà nổi. Để tối thiểu hóa nhiễm âm từ việc xây cất và các tàu neo, chúng tôi áp dụng một vùng đệm 50 m để loại bỏ tất cả các vùng bên trong lề 50 m. Điều nầy dựa trên nguyên tắc khai thác cát không xảy ra gần bờ cũng như cầu, đường phà. Vùng nghiên cứu sau cùng đại diện 710 km2 tương

ứng với 80% vùng lòng lạch ban đầu. Cuối cùng, các kết quả đầu tiên cho thấy một mật độ tàu đáng kể để buôn bán chung quanh các thành phố Mỹ Thạnh (dài 7 km), Mỹ Tho (7 km) và Cần Thơ (1 km). Chúng tôi loại bỏ những vùng nầy vì không có khai thác cát xảy ra ở những nơi nầy. Một khúc sông dài 120 km của vùng nghiên cứu ĐBSCL nầy, khúc sông Tiền (TS), bắt đầu từ 15 km cách biên giới Cambodia và chấm dứt 2 km hạ lưu cầu Mỹ Thuận và lòng lạch Vàm Nao được phân tích riêng.

1.2. Supplementary text 2: Khảo sát chiều sâu tại chỗ và bản đồ đục khoét

Đáy sông dọc theo TS được đo đạc bởi một nhóm từ Đại học Kyoto. Nhóm dùng Teledyne RD Instrument Workhorse Rio Grande 600 KHz Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) được kết hợp với Trimble GPS được gắn trên sào để định vị. Tổng cộng có 491 và 380 mặt cắt cách nhau từ 200 đến 1.000 m được đo đạc trong tháng 7 năm 2014 và tháng 9 năm 2017. Chiều sâu đáy sông đo đạc được sửa lại với mực nước bằng cách dùng hệ thống đo đạc mực nước dọc theo sông (SRHMC). Các điểm chiều sâu được nội suy bằng Isotropic universal Kriging theo sau bởi phương pháp lũy thừa với phương trình kernel. Sau đó, các điểm được hội tụ thành raster. Raster nầy được rút ra ở độ phân giải 40 m. Khác biệt chiều sâu được tính toàn bằng cách khấu trừ cao độ đáy sông giữa 2014 và 2017. Bằng cách dùng dụng cụ thống kê trọng tâm cho cửa sổ 5 pixels, các khoảng trống trong sự khác biệt chiều sâu của raster được điền khuyết và các trị số được trung bình bằng cách nội suy để tối thiểu hóa những méo mó trong các trị số do những trị số ngoại biên. Vì bộ dữ kiện gồm có dữ kiện liên tục theo không gian (đó là bản chất của chiều sâu lòng lạch). Bộ dữ kiện được tái thử nghiệm bằng nội suy hai chiều ở độ phân giải 10 m trước khi được cắt để phù hợp với TS. Sau cùng, raster được tái thử nghiệm trở lại độ phân giải ban đầu (40 m).

1.3. Supplementary text 3: Ngân sách khai thác cát và đục khoét dùng Sentinel-1

Vệ tinh Sentinel-1A và Sentinel-1B từ Cơ quan Không gian Âu Châu (European Space Agency (ESA)) (https://scihub.copernicus.eu), có độ phân giải thời gian 6 ngày. ĐBSCL được bao phủ bởi Sentinel-1A trong quỹ đạo xuống (vào lúc 5:45 AM) kể từ 6 tháng 10 năm 2014 trong lúc quỹ đạo lên (vào lúc 6:10 PM cùng ngày) sau 13 tháng 3 năm 2017 (Supplementary Hình 2). Vệ tinh Sentinel-1B chỉ có sau tháng 10 năm 2016. Để có bộ dữ kiện phù hợp với tần số và khối lượng giữa các thời kỳ 2014-2015 và 2016-2020, chúng tôi không dùng Sentinel-1B. Phân tích sau đây được thực hiện đầu tiên bằng cách dùng các tàu từ quỹ đạo lên và xuống (với thời điểm khác nhau) nhưng kết quả cho chúng tôi một liên

hệ thấp hơn với sự khác biệt chiều sâu chỉ dùng hình ảnh của quỹ đạo xuống. Chúng tôi dùng ESA Sentinel Applications Platform (SNAP)

(https://step.esa.int/main/toolboxes/snap) để chế biến 178 ảnh (Supplementary Bảng 1). Các hình ảnh Sentinel-1A trong cấp 1, quỹ đạo xuống (no18) Synthetic Aperture Radar (SAR) Ground Range Detected High resolution (GRDH) dual polarization (VV+VH) được thu thập trong Interferometric Wide (IW). Chúng tôi điều chỉnh các hình ảnh và chúng tôi loại trừ các nhiễm âm nhiệt. Sau đó, chúng tôi làm phẳng và sửa lại địa hình trong nội suy 2 chiều bằng cách dùng SRTM 1 sec và chiếu hình ảnh lên WGS84 48N. Trong khi tài liệu khoa học báo cáo rằng xuyên phân cực VH tối ưu để phát hiện tàu, kết quả của chúng tôi cho thấy rằng phân cực VV cho một sự liên hệ tốt hơn nhiều giữa tàu được phát hiện và được nhắm đến (các điểm nóng khai thác cát) và bộ dữ kiện khác biệt chiều sâu.

Dựa trên khảo sát tại chỗ của chúng tôi trong 2020-2021 và quan sát hình ảnh Google Earth (2019-2020), chúng tôi thấy rằng các tàu hoạt động dọc theo các sông ở ĐBSCL hầu hết dài từ 5 đến 80 m, và độ phân giải hình là 20 m (khoảng pixel 10 m). Ở các điểm nóng khai thác cát, khoảng cách giữa các tàu có khuynh hướng nhập nhiều tàu thành 1 cụm. Điều nầy đưa đến việc ước tính thấp con số và mật đô tàu. Sau khi thử với các số DN từ 0 đến 1, chúng tôi xác định rằng áp dụng ngưỡng DN ≥0,5 đưa đến kết quả tối ưu. Sau đó, chúng tôi đổi các hình ảnh thành các trị số nhị phân, loại bỏ các trị số không nhắm đến và áp dụng vùng nghiên cứu ĐBSCL. Các pixels còn lại tương ứng với các tàu được vector hóa và thực thể được tách ra thành 1 phần duy nhất. Chúng tôi tính thống kê định lượng của các đặc tính chánh chẳng hạn như chiều dài, rộng, diện tích. Trung tâm của tàu (đa giác) được ra thành điểm. Các mô phỏng theo ngưỡng diện tích và chiều dài được thử và tiêu chuẩn chiều dài đại diện kết quả tốt hơn. Khác biêt chiều dài ngưỡng và thay đổi chiều dài được thử (≥50m, ≥60m, ≥70m, ≥80m, ≥90m, ≥50m&<90m, ≥60m&<90m, ≥70m&<90m, ≥80m%<90m, ≥50m&<100m, ≥60m&<100m, ≥70m&<100m và ≥80m&<100m). Các tàu có chiều dài ≥70m, đại diện 24% tổng số tàu được chọn cho sự liên hệ cao và đại diện thống kê tốt của toàn thể tàu được phát hiện. Ngoài ra, công tác thực hiện trong năm 2020 và 2021 cho thấy rằng các xà lan được trang bị cần trục để khai thác trong 93% tình huống (N=40) được phát hiện với chiều dài ≥70m trên hình ảnh Sentinel-1.

Các tàu ≥70m được phát hiện trong thời gian tháng 10 năm 2014 đến tháng 12 năm 2017 được chọn và phân tích trong TS để phù hợp với thời kỳ khác biệt chiều sâu. Bằng cách dùng những tàu nầy như

điểm, chúng tôi tạo nên một bản đồ nhiệt với độ phân giải 10 m. Các vòng tròn lân cận khác nhau với bán kính thay đổi 100, 150, 200, 250 và 300 m được thử. Bán kính 200 m cho một liên hệ tốt nhất với khác biệt chiều sâu. Dân số tại chỗ dùng chiều dài làm tiêu chuẩn cũng được thử trước ngưỡng chiều dài 70 m nhưng liên hệ thấp hơn nhiều với thông số nầy. Bản đồ nhiệt được bình thường hóa bằng cách chia các trị số với số hình của thời kỳ 2014-2017 (91) để có mật độ tàu cho mỗi km2 mỗi ngày. Chúng tôi lại cắt raster một lần nữa bằng cách dùng TS và thử lại với pixel 10 m với độ phân giải 40 m để phù hợp với bộ dữ kiện khác biệt chiều sâu.

Cuối cùng, chúng tôi rít ra các trị số của raster thành điểm và dùng những điểm nầy để rút ra các trị số khác biệt chiều sâu chồng lên nhau. Bộ dữ kiện nầy có 61.663 pixels. Chúng tôi vẽ thay đổi chiều sâu vs mật độ tàu, rồi rút ra mật độ tàu trung vị được tính sau cùng cho mỗi 0,1 mật độ tàu và phương trình hồi quy được rút ra từ đường cong nầy.

Chúng tôi áp dụng tiến trình mật độ tàu nầy cho toàn thể ĐBSCL vào mỗi thời gian 3 năm từ 2015 đến 2020 ngoại trừ 2014 chỉ có 7 hình ảnh. Có 87 hình ảnh trong 3 năm nghiên cứu, ngoại trừ 2015-2017 chỉ có 84 hình ảnh (Supplementary Bảng 1). Phương trình hồi quy rút ra từ TS được áp dụng cho 4 thời gian mật độ tàu và bản đồ đục khoét được tạo ra và thử lại ở độ phân giải 20 m cho số trị số giảm. Chúng tôi tách rời phần thượng và hạ lưu của sông Tiền ở cầu Mỹ Thuận, và tách rời sông Hậu khỏi sông Tiền ở Vàm Nao. Các trị số được rút ra như các điểm và rồi 1 bảng để tính đục khoét và ngân sách cát. Các trị số được tính cho từng năm bằng cách chia cho 3, tương ứng với thời gian 3 năm. Sau đó, chúng tôi trung bình các trị số chồng lên nhau để tìm trị số trung bình cho mỗi năm. Thí dụ, có 3 trị số cho năm 2017 (2015-2017, 2016-2018 và 2017-2019); 3 trị số nầy là trung bình để được trị số duy nhất cho năm 2017 (Supplementary Bảng 2 và 5). Tiến trình nầy ở khúc sông cũng được áp dụng ở tỉnh để so sánh với các báo cáo của cơ quan bằng cách dùng ranh giới hành chánh được cung cấp bởi Humanitarian Data Exchange (HDX) (https://data.humdata.org).

1.4. Supplementary text 4: Xà lan với cần trục ở tỉ lệ tỉnh

Để bổ sung cho chương 2.1 của bài. Hoạt động của tàu khai thác cát và các điểm nóng. Ở tỉ lệ tỉnh, Đồng Tháp, An Giang và Vĩnh Long đại diện 75% số xà lan với cần trục (BC) được phát hiện ở ĐBSCL (Supplementary Bảng 6). Hậu Giang và Sóc Trăng chỉ có 1%. Cũng cần lưu ý rằng trong năm 2018 (ít nhất), khai thác cát bị cấm chánh thức trong các tỉnh Bến Tre và Tiền Giang, nhưng nơi nầy chứng kiến

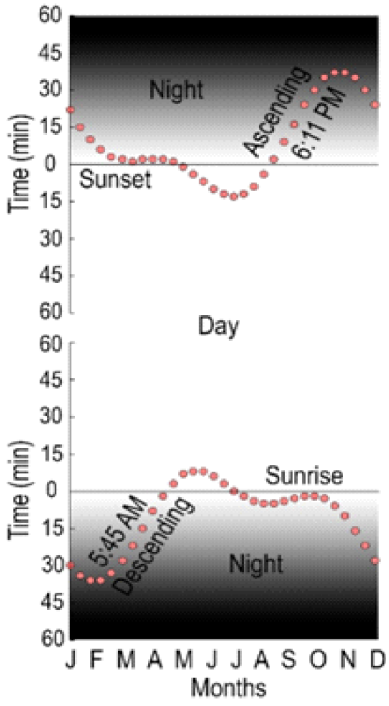
một sự sụt giảm liên tục, nhưng sau đó gia tăng trong năm 2020, 9 BCs được phát hiện trong tỉnh Tiền Giang.

1.5. Supplementary text 5: Ngân sách cát ở tỉ lệ tỉnh

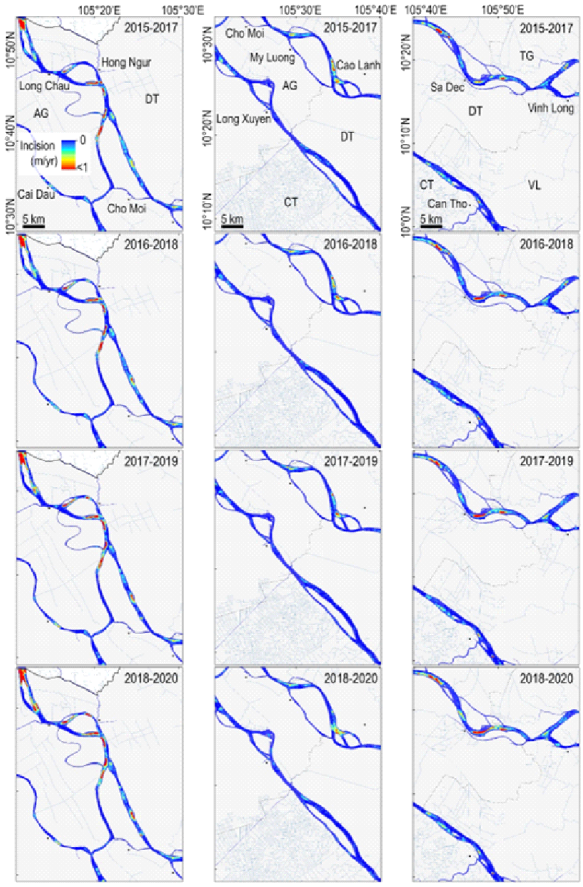
Để bổ sung cho chương 2.2 của bài. Ngân sách khai thác cát của ĐBSCL. Tỉnh Đồng Tháp bao gồm sông Tiền và một phần sông Hậu có mức khai thác cát cao nhất với trung bình 21,85 triệu m3/năm chiếm khoảng 52% (131 triệu m3 trong 6 năm) của tổng số ngân sách cát (Hình 3, Supplementary Bảng 7). An Giang, gồm có một phần sông Tiền và Hậu, là vùng khai thác nhiều thứ nhì với trung bình 8,14 triệu m3/năm (48,48 triệu m3 trong 6 năm). Các tỉnh khác có mức khai thác hàng năm dưới 4 triệu m3. Đặc biệt, Sóc Trăng và Hậu Giang nằm trên hữu ngạn của sông Hậu có mức khai thác thấp nhất là 400.000 m3/năm và 180.000 m3/năm, theo thứ tự.

Ba tỉnh hàng đầu về ngân sách khai thác hàng năm: Đồng Tháp, An Giang và Vĩnh Long cũng có mức khai thác gia tăng đều đặn trong thời kỳ phân tích. Đặc biệt, Đồng Tháp gia tăng 39,5% (từ 18,5 triệu m3 đến 25,7 triệu m3) từ năm 2015 đến 2020, theo sau là An Giang và Vĩnh Long với mức gia tăng 11,7% (từ 7,8 triệu m3 đền 8,7 triệu m3) và 30,8% (từ 3,3 triệu m3 đến 4,3 triệu m3). Ngược lại, mức khai thác ở tỉnh Bến Tre tăng liên tục cho đến 2017, sau đó giảm dần 13%. Đối với Cần Thơ, mức khai thác giảm từ 2015 và 2016 và ổn định cho đến năm 2020 (2,8 triệu m3/năm).

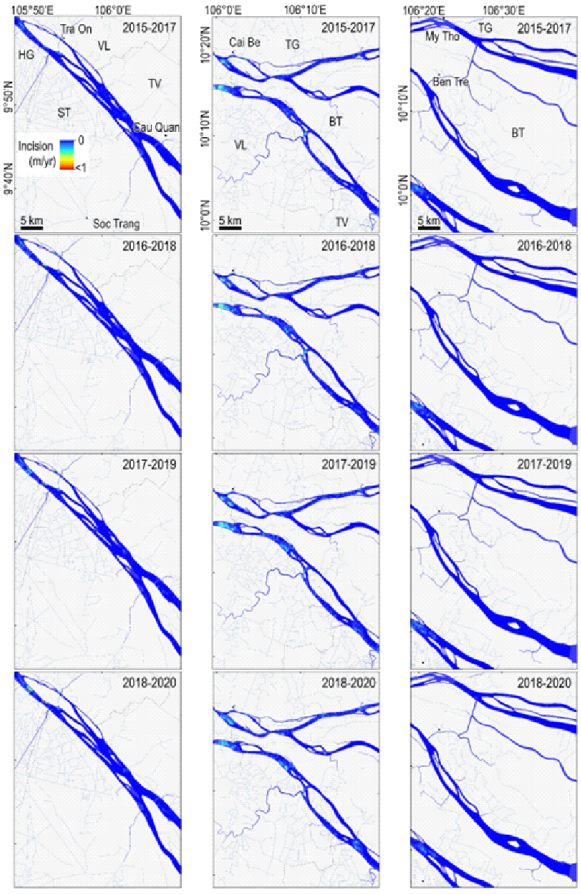
2. Supplementary figures



Hình 1. Thời điểm Sentinel-1 trong quỹ đạo lên xuống theo lúc mặt trời mọc và lặn trong năm.



Hình 2. Bản đồ đục khoét trong ĐBSCL cho mỗi 3 năm (trên xuống) trung bình hàng năm từ thượng đến hạ lưu (trái sang phải).



Hình 3. Bản đồ đục khoét trong ĐBSCL cho mỗi 3 năm (trên xuống) trung bình hàng năm từ thượng xuống hạ lưu (trái sang phải).

3. Supplementary tables

Years / Periods	Descending orbit (5:45 AM)	Ascending orbit (6:11 PM)
2014	7	0
2015	26	0
2016	29	0
2017	29	25

2018	29	29
2019	29	31
2020	29	30
2014-2017	91	
2015-2017	84	
2016-2018	87	
2017-2019	87	
2018-2020	87	

Bảng 1. Hình ảnh Sentinel-1 GRD-H có sẵn và được chế biến theo quỹ đạo lên xuống (cùng ngày). 10 hình ảnh thiếu trong quỹ đạo xuống và 1 trong quỹ đạo lên.

Period of 3 years	Volume per period (Mm3)
2015-2017	113.39
2016-2018	121.19
2017-2019	129.71
2018-2020	141.89

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Volume per year (Mm3/yr)	37.80	37.80	37.80			
		40.40	40.40	40.40		
			43.24	43.24	43.24	
				47.30	47.30	47.30

Volume averaged per year (Mm3/yr)	37.80	39.10	40.48	43.64	45.27	47.30

Bảng 2. Tính toán ngân sách khai thác cát ở ĐBSCL.

Period of 3 years	Volume per period (Mm3)
2015-2017	72.25
2016-2018	78.81
2017-2019	85.70
2018-2020	96.62

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Volume per year (Mm3/yr)	24.08	24.08	24.08			
		26.27	26.27	26.27		
			28.57	28.57	28.57	
				32.21	32.21	32.21
Volume averaged per year (Mm3/yr)	24.08	25.18	26.31	29.01	30.39	32.21

Bảng 3. Tính toán ngân sách khai thác cát trong sông Tiền thượng lưu của Mỹ Thuận

Period of 3 years	Volume per period (Mm3)
2015-2017	19.20
2016-2018	21.79
2017-2019	22.56
2018-2020	21.62

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Volume per year (Mm3/yr)	6.40	6.40	6.40			
		7.26	7.26	7.26		
			7.52	7.52	7.52	
				7.21	7.21	7.21
Volume averaged per year (Mm3/yr)	6.40	6.83	7.06	7.33	7.36	7.21

Bảng 4. Tính toán ngân sách khai thác cát trong sông Tiền hạ lưu của Mỹ Thuận

Period of 3 years	Volume per period (Mm3)
2015-2017	21.94
2016-2018	20.60
2017-2019	21.45

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Volume per year (Mm3/yr)	7.31	7.31	7.31			
		6.87	6.87	6.87		
			7.15	7.15	7.15	

2018-2020	23.65				7.88	7.88	7.88
		Volume averaged per year (Mm3/yr)	7.31	7.09	7.11	7.30	7.52	7.88

Bảng 5. Tính toán khai thác cát trong sông Hậu

Provinces	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Đồng Tháp	58	62	62	73	63	70	87	475
Vĩnh Long	35	14	40	12	42	45	29	217
An Giang	35	23	14	23	27	35	41	198
Trà Vinh	25	4	8	12	16	11	5	81
Cần Thơ	18	10	9	11	9	9	12	78
Bến Tre	26	1	14	10	5	7	0	63
Tiền Giang	17	11	7	4	2	2	9	52
Hậu Giang	0	0	0	0	7	4	2	13
Sóc Trăng	1	0	0	0	2	1	0	4

Bảng 6. Số BC quan sát được trên Google Earth từng năm trong mỗi tỉnh

Provinces	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total	Mean
Đồng Tháp	18.45	19.42	20.47	22.89	24.15	25.74	131.11	21.85
An Giang	7.79	7.87	7.91	8.21	8.34	8.71	48.84	8.14

Vĩnh Long	3.32	3.63	3.83	4.17	4.29	4.34	23.58	3.93
Cần Thơ	3.00	2.83	2.80	2.75	2.78	2.82	16.99	2.83
Tiền Giang	2.23	2.27	2,30	2.42	2.48	2.61	14.31	2.38
Bến Tre	1.44	1.53	1.59	1.57	1.54	1.38	9.04	1.51
Trà Vinh	1.00	0.97	1.00	1.05	1.10	1.14	6.26	1.04
Sóc Trăng	0.44	0.43	0.42	0.39	0.37	0.35	2.41	0.40
Hậu Giang	0.14	0.15	0.18	0.20	0.22	0.21	1.11	0.18

Bảng 7. Ngân sách khai thác cát từng tỉnh mỗi năm (m3/năm)

https://mekong-cuulong.blogspot.com/2022/05