

PRIMEIRA QUANTIFICAÇÃO DA VARIABILIDADE SAZONAL DA TURBIDEZ E DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO MAR NO ENTORNO DO ARQUIPÉLAGO DE ALCATRAZES (SE DO BRASIL)

Breylla Campos Carvalho¹, Ana Laura Tribst Correa², Luiz Felipe Machado Faria de Sousa³, Lino Augusto Sander de Carvalho⁴ e Áurea Maria Ciotti⁵

¹ CEBIMar/USP, b.carvalho@alumni.usp.br; ² CEBIMar/USP, ana.laura.correa@alumni.usp.br; ³ IGeo/UFRJ, luizfelipemfds@ufrj.br; ⁴ IGeo/UFRJ, lino.sander@igeo.ufrj.br e ⁵ CEBIMar/USP, ciotti@usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta a primeira quantificação da variabilidade temporal e espacial da temperatura superficial da água e da turbidez na região no entorno do Arquipélago de Alcatrazes, utilizando medições *in situ* e imagens de satélite Landsat 8. A área de estudo tem um papel relevante no conjunto de áreas marinhas protegidas no litoral de São Paulo (SE do Brasil) porém carece de uma série de dados para o monitoramento ambiental. Os resultados em resolução média mostram sazonalidade das variáveis mapeadas, além da forte correlação entre os dados medidos e estimados durante o inverno. Essas quantificações concordam com a variabilidade hidrodinâmica reportada em trabalhos prévios e sugerem ser possível se desenvolver ferramentas robustas com o desenvolvimento de algoritmos de sensoriamento remoto para monitorar e melhor entender o arquipélago ecologicamente.

Palavras-chave — Landsat-8, qualidade da água, sensoriamento remoto da água, medição *in situ*, área marinha protegida.

ABSTRACT

This paper presents the first quantification of the temporal and spatial variability of water surface temperature and turbidity in the region surrounding the Alcatrazes Archipelago, using in situ measurements and Landsat 8 satellite images. The study area plays a relevant role in the set of marine protected areas in the coast of São Paulo (SE Brazil) but has a lack of data series for environmental monitoring. The results in average resolution show seasonality of the mapped variables, as well as the strong correlation between measured and estimated data during winter. These quantifications agree with the hydrodynamic variability reported in previous works and suggest that it is possible to develop robust tools with the development of remote sensing algorithms to monitor and better understand the Archipelago ecologically.

Key words — Landsat-8, water quality, water remote sensing, in situ measurement, protected marine area.

1. INTRODUÇÃO

¹ Decreto Federal de 2 de agosto de 2016 e Decreto Federal 94.656, de 20 de julho de 1987.

A quantificação de variáveis descritoras da qualidade da água se tornou essencial para o entendimento do ambiente marinho, com destaque para a atenuação vertical da luz. Essa, fundamental para a produtividade primária e cadeia alimentar marinha, ainda interfere no comportamento de predadores visuais [1]. O entendimento das principais forçantes, bem como da variabilidade natural e antrópica da qualidade da água (e.g., [2]) é passo inicial para o desenvolvimento de ferramentas robustas para monitoramento e gestão dos mesmos.

A computação em nuvem para o processamento de grande volume de imagens de satélites [3], é uma opção eficaz de monitoramento ambiental. Essa ferramenta tem preenchido a lacuna do conhecimento sobre áreas de acesso restrito, com produtos relacionados à qualidade das águas oceânicas como a concentração de clorofila-a e do material orgânico dissolvido, a turbidez e o coeficiente de atenuação da luz e da temperatura superficial do mar (TSM), e.g., [4].

O Arquipélago de Alcatrazes, localizado na porção sudoeste da plataforma continental sudeste Brasileira (Figura 1) abriga muitos estudos ecológicos importantes do Atlântico Sul [5]–[12], sendo a maior unidade de conservação federal sob proteção integral na região Sudeste e Sul do Brasil. Todavia, dados ambientais têm sido raramente reportados e interpretados na área [6], [9]. Apresentamos a primeira quantificação da variabilidade sazonal de temperatura e turbidez superficiais no entorno de Alcatrazes, utilizando dados *in situ* e imagens de satélite de média resolução.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O Arquipélago de Alcatrazes (Figura 1) dista 20 milhas náuticas do continente e se insere na Unidade de Conservação Marinha categorizada como Refúgio de Vida Silvestre do Arquipélago de Alcatrazes e Estação Ecológica Tupinambás¹. É uma área marinha-insular composta por ilhas rochosas e sedimento arenosos [6], [8], sendo local de reprodução, alimentação, crescimento, abrigo e descanso para diversas espécies de organismos terrestres e marinhos, [5], [8], [9], [11], porém próxima a dois portos de intensa atividade (Santos e Rio de Janeiro) e assim sujeita a impactos

como poluição, introdução de espécies exóticas e sobrepesca [8]. Na plataforma continental do entorno de Alcatrazes as correntes tendem para nordeste no verão e para sudoeste no inverno [13] e há ocorrência de três massas d'água: Água Costeira, Água Tropical e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), sendo essa última com maior predominância na primavera e verão ligado a ressurgência costeira [13]. A região apresenta campo de ondas menos energético no verão, menos atuantes na porção mais abrigada da ilha (face norte) comparada com o lado exposto ou face sul [10].

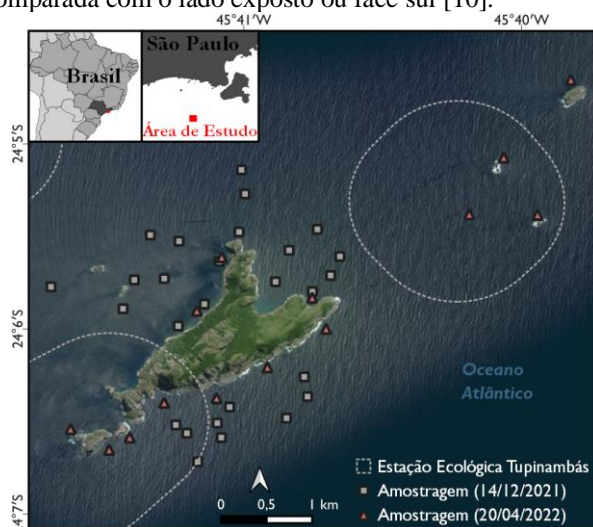


Figura 1. A área de estudo com os pontos de medição de turbidez e temperatura. Imagem de satélite Maxar© (2022) na cor verdadeira (QuickMapServices versão 0.19.26 para QGIS).

2.2. Campanhas Amostrais

Duas campanhas amostrais foram realizadas em 14 de dezembro de 2021 (27 estações) e 20 de abril de 2022 (14 estações) (Figura 1), no escopo do Projeto Mar de Alcatrazes (FAP/UNIFESP e PETROBRAS). Dados de turbidez foram adquiridos com um CTD AAQ-RINKO modelo AAQ127, JFE Advantech Co. Ltd. (sensor integrado com o de clorofila; tipo *back scattering*; faixa de medição 0 a 1000 UNT; resolução 0,03 UNT; acurácia $\pm 0,3$ UNT ou $\pm 2\%$; resposta 0,2 segundos). Os lançamentos manuais, abaixo de 1 m/s (5 Hz) proveram valores médios de turbidez para os primeiros 4 metros de profundidade. A transparência da água foi registrada com medidas da profundidade de desaparecimento do disco de Secchi (PSecchi) e correlacionada com a turbidez.

2.3. Processamento e análise das imagens de satélite

A aquisição e o processamento das imagens Landsat 8 foram realizadas na plataforma Google Earth Engine (GEE). Primeiramente foi feita a importação das coleções de imagens Landsat 8 (sensores OLI e TIRS) Coleção 2 brutas e de reflectância da superfície (RS) disponíveis entre setembro de

2013 e outubro de 2022, utilizando um filtro de cobertura de nuvens abaixo de 30%, e o Índice de Diferença Normalizada da Água modificado [14] para área mapeada, resultando em 77 cenas (órbita/ponto 218/77). Além disso, foi aplicada uma máscara de nuvens, utilizando as imagens de RS². Para correção atmosférica das imagens brutas aplicou-se o método proposto por [15], cujas rotinas estão disponibilizadas no repositório do SERVIR no git-hub³.

A concentração de sólidos em suspensão (CSS) foi calculada segundo [16] (Equação 1) e a turbidez (em unidade nefelométrica de turbidez; UNT) segundo [17] (Equação 2), sendo ambos calibrados com dados *in situ* da boia SP-1 do programa de monitoramento SIMCosta⁴ [18]:

$$CSS = 355,85 \frac{\rho_w}{1 - \left(\frac{\rho_w}{1,728}\right)} + 1,74 \text{ (Equação 1)}$$

$$UNT = 228,1 \frac{\rho_w}{1 - \left(\frac{\rho_w}{0,1641}\right)} \text{ (Equação 2)}$$

onde ρ_w corresponde à reflectância na banda do vermelho (B4) do sensor OLI. Os valores de TSM foram adquiridos da coleção de imagens do sensor TIRS, aplicando-se o fator de escala e de compensação [19] e convertidos para graus Celsius.

Na plataforma do GEE se computou as medianas de CSS, UNT e TSM de cada imagem, bem como elaborados os mapas com valores medianos sazonais de CSS, UNT e TSM. De forma a sintetizar e mapear as diferentes condições ópticas do entorno de Alcatrazes, foi aplicada uma análise espacial de agrupamento, levando em consideração os valores de CSS estimados e utilizado o classificador não supervisionado de agrupamento (wekaKMeans), limitado a três agrupamentos.

3. RESULTADOS

3.1. Condições medidas *in situ*

Em 14 de dezembro de 2021, os valores de turbidez *in situ* variaram entre 0,092 e 0,163 UNT, com média 0,117 UNT e os valores de PSecchi variaram entre 11,5 e 17 m, com média de 13,5 m. Na campanha amostral de 20 de abril de 2022, os valores de turbidez variaram entre 0,267 e 0,704, com média 0,465 UNT e os valores de PSecchi da água variaram entre 7 e 10 m, com média de 8,8 m (Figura 2). Na campanha de dezembro a correlação entre a turbidez e a PSecchi foi fraca ($r = -0,24$), porém robusta e negativa em abril ($r = -0,90$).

3.2. Mapeamento dos parâmetros a partir de imagens de satélite

Estimativas de CSS para as imagens disponíveis entre 2013 e 2022, variaram entre abaixo da detecção e 45,4 mg/L, com valores medianos entre 2,2 e 4,2 mg/L (Figura 3); notam-se maiores amplitudes para meses de inverno. Já a turbidez

² Algoritmo disponível em: https://github.com/fitoprincipe/geotools-code-editor/blob/master/cloud_masks

³ Repositório do SERVIR disponível em: <https://github.com/SERVIR/water-quality-gee>

⁴ Dados disponíveis em: <https://simcosta.furg.br/home>

estimada variou entre abaixo da detecção e 40,1 UNT, com valores medianos mensais entre 0,3 e 1,7 UNT e padrões similares ao apresentado por CSS. A TSM variou entre 17,3 e 34,9°C, com valores medianos mensais entre 17,8 e 31,5°C. Em suma, entre verão e inverno, os valores medianos de CSS e turbidez tendem a diminuir (~0,1 unidades). A sazonalidade da SST é evidente, com mediana entre 20 e 24°C entre maio e outubro e entre 25 e 27°C nos demais meses.

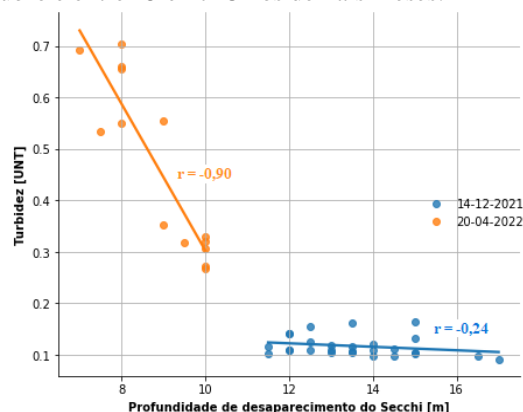


Figura 2. Valores de turbidez e profundidade do disco de Secchi (P_{Secchi}) medidas *in situ* nos dias 14 de dezembro de 2021 (n=27) e 20 de abril de 2022 (n=14).

A análise de agrupamento para os valores de CSS segregou a porção norte da ilha, na face abrigada, se estendendo em algumas áreas ao sul e sudeste da porção nordeste ao arquipélago, na face exposta.

A comparação entre os valores amostrados em 14/12/2021 e 20/04/2022 e estimados pelas imagens de 21/12/2021 e 28/04/2022 (datas mais próximas disponíveis) indicou para a turbidez, para dezembro uma diferença é ~0,8 UNT, enquanto que em abril a diferença foi de ~0,4 UNT (Figura 4), com valores superestimados a partir das imagens de satélite se comparados às medições *in situ*. Já a TSM para dezembro exibe uma diferença de < 2°C, enquanto que em abril a diferença é de ~4°C.

4. DISCUSSÃO

A primeira quantificação da variabilidade temporal e espacial da turbidez e da TSM no entorno de Alcatrazes apresenta dois aspectos importantes: (1) a sazonalidade das variáveis derivadas por imagens de satélite como medições *in situ* e (2) a setorização de áreas abrigadas e expostas no entorno do arquipélago.

Os dados de turbidez coletados *in situ* em abril (outono) foram duas vezes mais baixos na porção abrigada (~0,3) comparado a exposta (~0,6), semelhante ao observado para a CSS e turbidez estimados a partir das imagens de satélite, onde os valores medianos de turbidez na parte abrigada foi de ~0,7 e de ~0,8 na parte exposta. Ondas mais energéticas são reportadas nos meses de outono e inverno no lado exposto [10], que potencialmente ressuspendem os sedimentos do fundo próximo a ilha. Como sugerido por [11], as correntes predominantes para SE no outono e inverno podem trazer

sedimentos costeiros a Alcatrazes. Todavia, estudos sistemáticos são ainda necessários para se identificar as fontes reais de sedimentos ao Arquipélago em diferentes períodos.

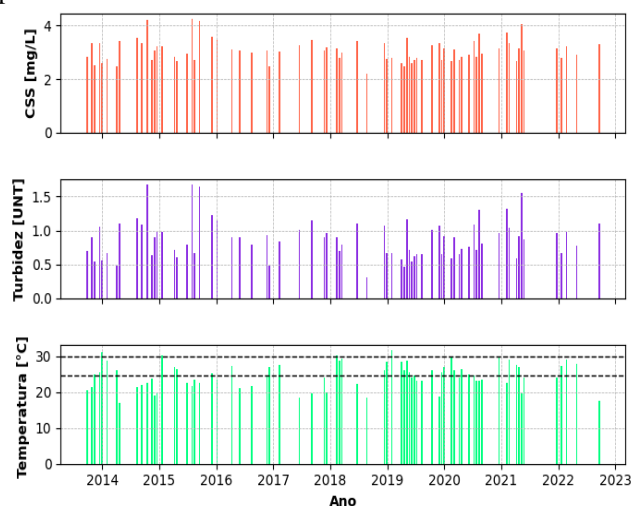


Figura 3. Medianas de cada imagem: concentração de sólidos em suspensão (CSS), turbidez e temperatura superficial do mar (TSM). As linhas pretas tracejadas no painel inferior indicam as temperaturas de 30,0°C e de 24,6°C (mediana da série).

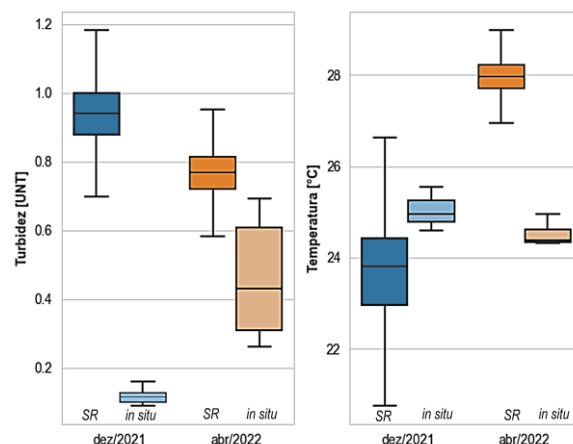


Figura 4. Variabilidade da turbidez (painel à esquerda) e da temperatura superficial do mar (painel à direita) estimados a partir de imagens de satélite Landsat 8 e de medições *in situ* realizadas com CTD em 14/12/2021 e 20/04/2022.

Os valores de P_{Secchi} mostram correlações negativas com a turbidez *in situ*, como esperado. Porém, as relações foram notavelmente menos robustas na campanha de dezembro, que pode estar ligada a limites de detecção da turbidez do sensor utilizado, ou a interferências com as medidas de P_{Secchi} em águas muito transparentes. Destacamos, porém, o ambiente luminoso complexo no Arquipélago, com variações de P_{Secchi} de 5-6 metros em cada campanha, fortemente guiadas pelos maiores valores de turbidez em abril.

A turbidez reportada neste trabalho concorda com as observações de [4] ao longo do litoral norte paulista, usando

imagens MODIS Aqua (resolução espacial de 250 m) para o período de 2005 a 2017, que mostram especificamente para a região de Alcatrazes, os valores notavelmente baixos quando comparados com aqueles próximos à costa. A utilização da imagem OLI com resolução espacial de 30 m e radiométrica de 16 bits, a série deste trabalho mostra valores de turbidez sazonais e maiores na primavera. Estudos futuros deverão incluir o campo dos ventos, como forçante na ressuspensão de sedimentos e mistura vertical da coluna d'água.

As estimativas de TSM por satélite variaram pouco no espaço, porém, a variação sazonal emerge tanto nessas como nas medições *in situ*, com temperaturas elevadas no verão e outono e mais baixas no inverno e primavera, como esperado [13]. A variação temporal da TSM em Alcatrazes destaca períodos com temperaturas elevadas, que podem facilitar o branqueamento significativo de corais como durante 2019 [12]. Poucos trabalhos usando a temperatura superficial disponibilizada na Coleção 2 das imagens Landsat 8 foram publicados [20]–[22], que indicam superestimação dos valores, e sugerem necessidade de melhorias tanto na correção atmosférica termal [22] como nos valores de emissividade [21]. Em contrapartida, [20] relata que a temperatura superficial disponibilizada na Coleção 2 é superior que a derivada a partir do algoritmo de canal único (*single-channel*) exibindo forte correlação com as medidas *in situ*. No presente estudo, comparando os valores estimados pelas imagens com aqueles amostrados *in situ*, encontrou-se algumas discrepâncias nos valores para abril de 2022, em que os valores estimados ficaram quase 3°C acima dos medidos. De todo modo, para que esses dados possam ser utilizados na região de Alcatrazes com maior segurança, é necessário aumentar a periodicidade das medições *in situ*, para verificar as diferenças e então, quem sabe, pensar em correções e calibrações.

5. CONCLUSÕES

Esta primeira quantificação da CSS, da turbidez e da TSM no entorno do Arquipélago de Alcatrazes permitiu identificar que os resultados obtidos por imagens de satélite de média resolução são compatíveis com as medições realizadas *in situ*. Assim, essa ferramenta tem o potencial de revelar tendências temporais e espaciais da turbidez no entorno do Arquipélago. Para monitorar a TSM na área, utilizando imagens Landsat 8 e a plataforma Google Earth Engine (GEE), mais esforços são necessários.

8. REFERÊNCIAS

[1] S. D. Job and D. R. Bellwood, "Light sensitivity in larval fishes: Implications for vertical zonation in the pelagic zone," *Limnol Oceanogr*, 45: 362–371, 2000.
[2] R. J. Wilson and M. R. Heath, "Increasing turbidity in the North Sea during the 20th century due to changing wave climate," *Ocean Science*, 15: 1615–1625, 2019.
[3] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sens Environ*, 202: 18–27, 2017.
[4] P. Bettencourt *et al.*, "Remote Sensing Applied to the Evaluation of

Spatial and Temporal Variation of Water Quality in a Coastal Environment, Southeast Brazil," *Journal of Geographic Information System*, 11: 500–521, 2019.
[5] F. Z. Gibran and R. L. de Moura, "The structure of rocky reef fish assemblages across a nearshore to coastal islands' gradient in Southeastern Brazil," *Neotropical Ichthyology*, 10: 369–382, 2012.
[6] N. T. Hoff, R. C. L. Figueira, and D. M. S. Abessa, "Levels of metals, arsenic and phosphorus in sediments from two sectors of a Brazilian Marine Protected Area (Tupinambás Ecological Station)," *Mar Pollut Bull*, 91: 403–409, 2015.
[7] F. A. Rolim *et al.*, "Network of small no-take marine reserves reveals greater abundance and body size of fisheries target species," *PLoS One*, 14: e0204970, 2019.
[8] Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade [ICMBio], "Plano de uso público do Refúgio de Vida Silvestre do Arquipélago de Alcatrazes," Brasília, 2020.
[9] T. C. Karlovic, R. R. Gomes, P. C. Paiva, E. A. Babcock, and J. F. Dias, "Functionality and Effectiveness of Marine Protected Areas in Southeastern Brazilian Waters for Demersal Elasmobranchs," *Front Mar Sci*, 8, 2021.
[10] L. S. Takase, L. P. Stein, N. T. Hoff, and E. Siegle, "Wave climate and power distribution around a rocky island: Alcatrazes, Brazil," *Ocean and Coastal Research*, 69, 2021.
[11] N. T. Hoff, L. S. Takase, E. Siegle, and J. F. Dias, "Mapeamento da sensibilidade ambiental a derrames de óleo do arquipélago dos Alcatrazes (São Paulo, Brasil)," *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 22: 43–80, 2022.
[12] T. N. S. Banha *et al.*, "Low coral mortality during the most intense bleaching event ever recorded in subtropical Southwestern Atlantic reefs," *Coral Reefs*, 39: 515–521, 2020.
[13] B. M. Castro, L. B. Miranda, L. S. Silva, R. F. C. Fontes, A. F. Pereira, and A. L. Coelho, "Processos físicos: Hidrografia, circulação e transporte," in *Oceanografia de um ecossistema subtropical - Plataforma de São Sebastião, SP*, A. M. S. Pires-Vanin, Ed. São Paulo: Edusp, 2008, pp. 59–121.
[14] H. Xu, "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery," *Int J Remote Sens*, 27: 3025–3033, 2006.
[15] B. P. Page, L. G. Olmanson, and D. R. Mishra, "A harmonized image processing workflow using Sentinel-2/MSI and Landsat-8/OLI for mapping water clarity in optically variable lake systems," *Remote Sens Environ*, 231, 2019.
[16] B. Nechad, K. G. Ruddick, and Y. Park, "Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters," *Remote Sens Environ*, 114: 854–866, 2010.
[17] A. I. Dogliotti, K. G. Ruddick, B. Nechad, D. Doxaran, and E. Knaeps, "A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters," *Remote Sens Environ*, 156: 157–168, 2015.
[18] L. F. M. Faria de Sousa, "Cor da água na baía de Guanabara e regiões costeiras adjacentes," Monography, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.
[19] E. Vermote, C. Justice, M. Claverie, and B. Franch, "Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product," *Remote Sens Environ*, 185: 46–56, 2016.
[20] S. Li, J. Wang, D. Li, Z. Ran, and B. Yang, "Evaluation of landsat 8-like land surface temperature by fusing landsat 8 and modis land surface temperature product," *Processes*, 9: 1–18, 2021.
[21] J. M. Galve, J. M. Sánchez, V. García-Santos, J. González-Piqueras, A. Calera, and J. Villodre, "Assessment of Land Surface Temperature Estimates from Landsat 8-TIRS in A High-Contrast Semiarid Agroecosystem," *Remote Sens (Basel)*, 14, 2022.
[22] Q. Vanhellemont, R. J. W. Brewin, P. J. Bresnahan, and T. Cyronak, "Validation of Landsat 8 high resolution Sea Surface Temperature using surfers," *Estuar Coast Shelf Sci*, 265, 2021.