

# A qualidade da água costeira na baía de Ubatuba-SP: integração entre modelagem numérica e métodos econométricos para diagnóstico baseado em serviços ecossistêmicos

*Igor Ruiz Atake*

*Joseph Harari*

*Paulo Antônio de Almeida Sinisgalli*

## **RESUMO**

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a qualidade da água na baía de Ubatuba - SP e sua relação com atividades antrópicas, como o turismo e a habitação, através de modelagem numérica computacional. Foi utilizado o módulo Delft3D-FLOW, para simular as condições hidrodinâmicas na região costeira, e o Delft3D-WAQ, para analisar a qualidade da água no meio marinho; e, com base nesses resultados, foi verificada a Disposição a Pagar (DAP) implícita por boa qualidade da água costeira, utilizando o preço de imóveis na região do estudo. A modelagem hidrodinâmica reproduziu as condições meteoceanográficas na região, bem como a redução de escala da plataforma continental rasa para a área da bacia de Ubatuba. Foram utilizados dados secundários de qualidade dos corpos hídricos superficiais, além de dados pluviométricos, delimitação

de bacias e balneabilidade costeira para a elaboração das premissas de modelagem da qualidade da água. As regiões com pior qualidade se concentram nas imediações da Praia de Itaguá, em especial na foz do Rio Acaraú. Foi aplicado um modelo de precificação hedônica, utilizando um algoritmo de aprendizado de máquina, com o modelo XGBoost. O modelo atingiu 97,62 % de acurácia em explicar o preço das casas e, através da análise de interpretabilidade, verificou-se que a balneabilidade não é um fator determinante para o aumento ou redução do preço de um imóvel. Infere-se que as condições ambientais não implicam em escolhas econômicas, apesar de ser um problema reconhecido no município. A baía de Ubatuba atua, de fato, como um serviço ecossistêmico na região, porém como um uso substituto a uma melhor infraestrutura de saneamento na região. Este trabalho é baseado na Dissertação de Mestrado defendida em 09 de maio de 2022 por Igor Ruiz Atake, no Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (Procam) do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, intitulada “A qualidade da água costeira na Baía de Ubatuba-SP: integração entre modelagem numérica e métodos econométricos para diagnóstico baseado em serviços ecossistêmicos” (Atake, 2022).

**Palavras-chave:** Modelagem numérica; modelagem de qualidade da água; serviços ecossistêmicos costeiros; precificação hedônica; modelos de aprendizado de máquina.

## 1. INTRODUÇÃO

A região do litoral norte do Estado de São Paulo sofreu uma grande mudança ao longo do século passado. Em 1940, o município de Ubatuba possuía aproximadamente 3.800 habitantes; entretanto, a partir da década de 1950, estradas começaram a ser abertas para a região, retirando o município do isolamento e criando uma dinâmica populacional, impulsionada principalmente pelo turismo oriundo do município de Taubaté. Com a abertura da BR-101 (Rio-Santos), na década de 1980, o turismo atingiu um nível mais elevado no município, desencadeando o processo de especulação imobiliária da região, ainda ditada por costumes da população caieira (Luchiari, 1999).

Há um grave desequilíbrio provocado pela adoção, ao longo do século XX, de um modelo de turismo baseado na sazonalidade e na criação de um significativo parque de residências de veraneio em todas as cidades litorâneas do Estado de São Paulo. A modalidade de turismo denominada de “segunda residência” traz enormes inconvenientes e desafios. Esse tipo de turismo demanda a implantação de infraestrutura urbana para atender os picos das temporadas de veraneio, deixando-a ociosa em grande parte do ano (Raimundo; Fracalanza; Jacobi, 2017).

Além disso, segundo o Instituto Água e Saneamento (<https://www.aguaesaneamento.org.br/>), os serviços de esgotamento sanitário do Município de Ubatuba, sob concessão da Sabesp (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), têm um índice de atendimento em Ubatuba de 41,74 %, enquanto no próprio estado de São

Paulo o atendimento médio é de 90,5 %, demonstrando a discrepância entre o município e o restante do estado.

O desequilíbrio ecossistêmico causado por ações antrópicas é algo que se volta contra a própria sociedade, apesar de haver serviços e bens ecossistêmicos não contabilizados, pois não são reconhecidos como tal. Neste sentido, há diversos trabalhos que definem tais contribuições como **serviços ecossistêmicos**. Estes, por sua vez, fornecem provisões para sustentar a vida humana através de suas reações e complexidades (Assessment, 2005; Costanza *et al.*, 1997; de Groot *et al.*, 2010).

Partindo do ponto de vista de que a qualidade ambiental constitui um serviço ecossistêmico fornecido, este trabalho visa entender a dinâmica da modelagem ambiental da poluição aquática (de águas doces e marinhas) e sua valoração econômica. Uma das maneiras de observar os impactos de despejo de esgoto clandestino é através da qualidade da água de corpos superficiais. As bacias hidrográficas do Litoral Norte são de área restrita, nas quais os rios deságuam, em geral, em bacias próximos de suas áreas fonte (CBH-LN, 2017). Neste contexto, os rios de baixa vazão e pequena extensão espacial têm pouco tempo para realizar a autodepuração dos contaminantes orgânicos, fazendo com que parte da poluição chegue às zonas costeiras.

Considerando o problema delineado acima, o presente trabalho visa quantificar o impacto do desequilíbrio na qualidade da água no município de Ubatuba, por meio da elaboração de um modelo hidrodinâmico que fornece subsídios para a modelagem de qualidade da água. Em seguida busca-se inferir, através de algoritmos de aprendizado de máquina, o impacto da qualidade da água na disposição a pagar (DAP) por imóveis próximos ou distantes das regiões mais poluídas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Modelagem hidrodinâmica

Foi utilizado o sistema de Modelos Delft3D (Deltares, 2013a) para fazer a redução dos processos de média e larga escala para uma dimensão em que é possível observar os processos de diluição de contaminantes na zona costeira. A região modelada, sua batimetria e os limites da grade computacional utilizada são apresentados na Figura 1.

O Delft3D possibilita representar diversos processos físicos em suas formulações. No entanto, como a modelagem hidrodinâmica proposta para a região do estudo é a redução de escala das observações de dimensões maiores, apenas alguns processos são considerados para simulação, sendo esses representados inicialmente pelas condições de contorno laterais, que incluem os de processos da dinâmica costeira (maré, nível médio do mar, correntes, temperatura e salinidade). Além das condições de contorno da borda, deve-se utilizar forçantes que atuam na superfície do domínio – são as forçantes atmosféricas – vento, pressão, umidade, temperatura do ar, cobertura de nuvens e radiação de onda curta

incidente, que são consideradas de forma variável no espaço e no tempo. A grade da modelagem hidrodinâmica possui 497 elementos de grade no sentido longitudinal por 238 elementos no sentido latitudinal, com resolução horizontal em torno de 200 m.

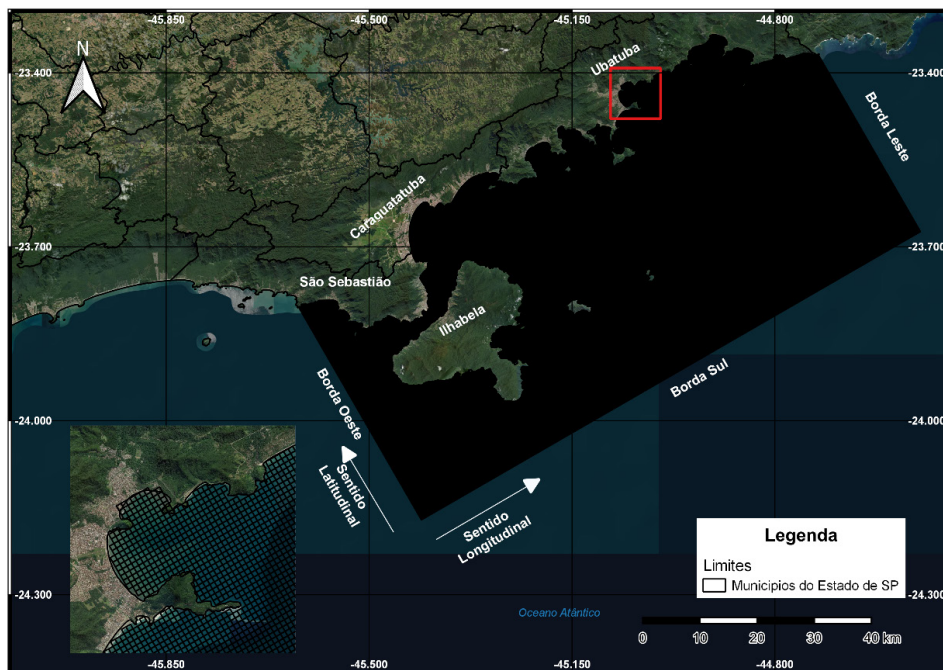


Figura 1 – Área de estudo, batimetria e limites da grade computacional do modelo hidrodinâmico. No detalhe, pode-se observar a baía de Itaguá e a localização do rio Acaraú, onde análises mais detalhadas foram realizadas ao longo do estudo.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a especificação de correntes, nível médio do mar, temperatura e salinidade, optou-se por utilizar os resultados do modelo global HYCOM – Hybrid Coordinate Model (Modelo de coordenadas híbridas) (Chassignet *et al.*, 2007). Para a maré, as constantes harmônicas do TPXO 8.0 (Egbert; Erofeeva, 2002) foram extraídas através do software Delft Dashboard; essas constantes são tratadas em procedimentos internos do aplicativo, de modo a ajustar seus parâmetros oceânicos, para regiões costeiras modeladas. Na fórmula da condição de contorno Riemann (utilizada nas bordas externas do modelo hidrodinâmico), necessita-se da elevação total, portanto é realizada a soma da previsão harmônica (Schureman, 1958a) com as elevações fornecidas pelo modelo HYCOM para cada período desejado. As velocidades normais à borda são obtidas a partir da decomposição vetorial de cada componente de velocidade do HYCOM. Para a especificação das profundidades médias dos pontos de borda, foram utilizadas as informações de cartas náuticas com as devidas interpolações para as posições de interesse.

O Delft3D permite ao usuário fornecer dados de entrada atmosféricos variáveis no espaço e no tempo, sendo este o padrão adotado para a melhor representação da interação oceano-atmosfera na modelagem hidrodinâmica. O conjunto de dados meteorológicos selecionado foi o NCEP CFSv2 (Saha *et al.*, 2014), sendo a sigla CFS referente a Climate Forecasting System (Sistema de Previsão Climática). O CFSv2 é um modelo oceânico-atmosférico-terrestre, que acopla diversos dados de entrada e fornece previsões diárias para diversas variáveis ambientais. No presente trabalho, foram utilizadas como forçantes atmosféricas do modelo a intensidade e direção dos ventos a 10 m de altura do nível médio do mar, além da pressão atmosférica. Para representar a troca de calor entre o oceano e a atmosfera, foram utilizados os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, cobertura de nuvens e radiação de onda curta incidente.

## 2.2 Modelagem de qualidade da água

A discretização do domínio numérico para a modelagem de qualidade de água foi definida como 10 vezes mais refinada do que a modelagem hidrodinâmica, atingindo resolução horizontal de cerca 20 x 20 m.

O domínio numérico das simulações de qualidade da água foi ajustado para responder a um conjunto de informações que possibilitasse o uso dos dados para validação e comparações. No processo de aninhamento, foi reduzido o número de camadas sigma de 8 para 5, visto que, na plataforma rasa, os processos de estratificação térmica e halina perdem relevância. Tal aproximação reduz a complexidade e o tempo de processamento das simulações sem prejudicar a estabilidade das simulações e sua qualidade. Foram utilizados dados de qualidade hídrica fornecidos pelas estações de monitoramento da Cetesb (Cetesb, 2020), bem como o monitoramento realizado pelo Instituto Costa Brasilis no rio Acaraú (dados disponíveis em <http://costabrasilis.org.br/projetos/rio-acarau-ubatubasp/>).

Para estimativa da vazão dos rios em Ubatuba, Buchianeri (2004) utilizou modelos de chuva-vazão, isto é, modelos hidrológicos simplificados que utilizam séries históricas de chuva, além de características meteorológicas e hidrológicas para fornecer séries de vazões aproximadas ao que de eventos reais. O modelo adotado foi o SMAP - Soil Moisture Accounting Procedure (Lopes; Braga Jr; Conejo, 1981). O SMAP é um modelo determinístico baseado na divisão da vazão em escoamento superficial e em escoamento subterrâneo.

Considerando os valores obtidos em trabalhos anteriores, aplicados ao contexto do presente estudo, os parâmetros de calibração são:

- Área de drenagem: variável para cada bacia;
- Capacidade de saturação do solo: 1105 mm;

- Parâmetro de escoamento superficial: 4,3;
- Parâmetro de recarga subterrânea: 57,7%
- Evapotranspiração potencial: variável por mês para a Bacia do Rio Grande (mm/dia).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
126,9	119,7	121,3	85,9	68,5	52,1	51,3	59,5	65,1	82,2	96,8	120,3

A modelagem foi realizada para dois períodos:

- 1) Verão: 10/01/2018 a 10/02/2018;
- 2) Inverno: 10/06/2018 a 10/07/2018.

Nesses períodos, com duração de um mês cada, são utilizados os resultados do aninhamento do modelo hidrodinâmico de maior escala (aproximadamente 100 km de extensão) para o modelo de qualidade da água de menor escala (aproximadamente 5 km de extensão), com a utilização de todas as componentes oceânicas e atmosféricas do modelo maior. Em contrapartida, a vazão e os constituintes de cada rio são inseridos somente na modelagem de pequena escala.

No que concerne aos constituintes descartados e às vazões dos rios, na Tabela 1 são apresentados valores considerados para os períodos simulados de verão e inverno.

**Tabela 1** – Concentrações de constituintes presentes nos rios que chegam à baía de Ubatuba, para os períodos simulados de verão e inverno

Rio	Período	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)	Coliformes Totais (NMP 100/ml)
Acaraú	Verão	2,75	55.000,0
	Inverno	0,22	140,0
Tavares ou Lagoa	Verão	1,93	1.800,0
	Inverno	0,16	176,0
Grande	Verão	15,25	1.900,0
	Inverno	1,24	264,0
Indaiá	Verão	7,66	176,0
	Inverno	0,62	128,0

### 2.3 Precificação de serviços ecossistêmicos

Os trabalhos de Chen *et al.* (2020) e Grybauskas *et al.* (2021) demonstram como distintos modelos de aprendizado de máquina são capazes de explicar a influência de fatores locais na definição dos preços de imóveis, em suas respectivas áreas de estudo. Para isso, são utilizados os valores shapley (HART, 1989; SHAPLEY, 1953), que são baseados na teoria dos jogos, isto é, um ramo da matemática aplicada que busca identificar como ações de jogadores influenciam uma ação de opositores. Pela ampla aplicabilidade da teoria, ela é utilizada em diversos campos do conhecimento, com destaque na área econômica.

Desta maneira, para explicar os resultados oriundos dos modelos, são utilizados algoritmos para identificar que fatores que determinaram os resultados obtidos - no caso do presente estudo, o preço dos imóveis. Para isso, é utilizada a biblioteca SHAP (Lundberg; Lee, 2017), para a linguagem de programação Python.

Finalmente, para compor uma base de dados capaz de fornecer respostas aos preços hedônicos dos imóveis, são necessários dados das imediações, identificando potenciais fatores que aumentam ou diminuem o preço de um determinado imóvel. Para elaborar essa base, foram coletados dados de imóveis no Zap Imóveis (<https://www.zapimoveis.com.br/>) e, a partir da geolocalização destes, foram adicionadas informações socioeconômicas, pontos de interesse local e as condições de balneabilidade, conforme dados da Cetesb (2020).

A consulta às informações imobiliárias, feita em 08/11/2021, retornou 1.049 imóveis com geolocalização definida ao menos por bairro. Para cada imóvel, são fornecidas as seguintes variáveis:

**1- Valor de consulta: preço em reais (R\$) disposto na plataforma do Zap Imóveis, 2-Área total em m<sup>2</sup>, 3 - Número de dormitórios, 4- Número de banheiros, 5- Número de vagas de estacionamento de veículos.**

O Censo Demográfico é a mais complexa operação estatística realizada por um país quando são investigadas as características de toda a população e dos domicílios do Território Nacional. Para incluir mais elementos espaciais ao conjunto de dados do CENSO 2010 (BRASIL, 2010), optou-se por utilizar a API (Application Programming Interface) do Google Places, de modo a coletar estabelecimentos e outros pontos de interesse localizados na área de interesse. Após a coleta, os locais coletados dividem-se nas categorias:

**restaurantes, bares, lojas, supermercados, mercados, polícia, escolas, lojas de conveniência, padarias, caixas automáticos de banco, postos de combustíveis, academias de ginástica, cafés, salões de beleza.**

Quanto à qualidade da água, optou-se por utilizar as coletas realizadas pela CETESB na região costeira do Município de Ubatuba. Essas informações são essenciais para determinar se é possível ou não se banhar nas imediações de uma bandeira indicando a qualidade da água.

Para agregar os dados na base, foram coletados, a partir de séries temporais de Enterococos, os seguintes dados:

- 1) distância do imóvel até a bandeira da CETESB mais próxima;
- 2) concentração média de Enterococcus (2006-2020);
- 3) concentração máxima de Enterococcus (2006-2010).

Com exceção da Base Google Places e das características dos imóveis, todas as outras variáveis foram adicionadas buscando pela informação na menor distância possível. Para a base de localidades, foram contabilizados quantos pontos de interesse havia em um raio de 2 km (através de junção espacial) de distância da propriedade. Assim, na Tabela 1 são demonstradas, resumidamente, as variáveis consideradas em cada um dos imóveis.

Tabela 2 – Descrição das variáveis consideradas para a precificação hedônica

Variável	Tipo	Unidade
<b>Variável Dependente</b>		
Preço Anunciado da Propriedade	Variável dependente	R\$
<b>Características do Imóvel</b>		
Área Total		m <sup>2</sup>
Número de Banheiros		Quantidade
Número de Quartos		Quantidade
Número de Vagas		Quantidade
<b>CENSO 2010</b>		
Rural ou Urbano	Dummy	-
Número de Domicílios		Quantidade
Número de Residentes		Quantidade
Densidade Habitantes		Hab./km <sup>2</sup>
Renda média per capita		R\$/Hab.
<b>Google Places (valores dentro de 2,0 km)</b>		
Número de Restaurantes		Quantidade
Número de Bares		Quantidade
Número de Lojas		Quantidade
Número de Supermercados		Quantidade
Número de Conveniências		Quantidade
Número de Delegacias de Polícia		Quantidade

Variável	Tipo	Unidade
Número de Escolas		Quantidade
Número de Padarias		Quantidade
Balneabilidade da água Costeira - CETESB		
Média da concentração de Enterococcus 2012-2020		NMP/100 ml
Máximo da concentração de Enterococcus 2012-2020		NMP/100 ml
Distância do imóvel até a bandeira mais próxima		km

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Modelagem hidrodinâmica

Com constantes harmônicas de maré da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) para o Porto de São Sebastião, foi efetuada uma previsão harmônica (Schureman, 1958). Para demonstrar a validade do modelo, aplica-se um tratamento através da metodologia desenvolvida por Godin (1972). São aplicados filtros, de maneira a retirar os sinais não relacionados à maré astronômica, possibilitando a comparação entre a previsão harmônica de maré e os resultados do modelo. O resultado da série filtrada é demonstrado na Figura 2.

Após a realização dos procedimentos numéricos, demonstra-se que o modelo é capaz de reproduzir a previsão harmônica da FEMAR, com um índice skill (Willmott, 1981) de 0,95, enquanto o índice de Concordância (Willmott; Robeson; Matsuura, 2012), foi de 0,81.

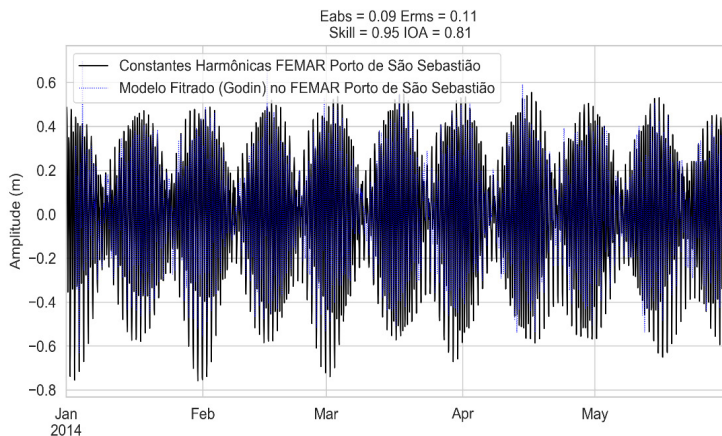


Figura 2 – Comparação das elevações (m) entre modelo filtrado através da metodologia de Godin (1972) e previsão de maré a partir das constantes harmônicas da FEMAR.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Através de solicitação ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), foram obtidos dados coletados para o Projeto Biota, com interesse na baía do Araçá, região vizinha ao Porto de São Sebastião.

Os dados de corrente foram coletados de 15 de janeiro de 2014 a 31 de maio de 2014, compreendendo boa parte das estações de verão e outono, na posição 23,81° S 45,40° W. O equipamento utilizado foi um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, instrumento que mede perfis de correntes através do Efeito Doppler), e as informações foram registradas apenas para uma profundidade.

Na Figura 3 são apresentadas as séries temporais de velocidades decompostas nas direções U (zonal) e V (meridional) para as medições e para os resultados do modelo (referentes à posição geográfica em que o ADCP foi fundeado).

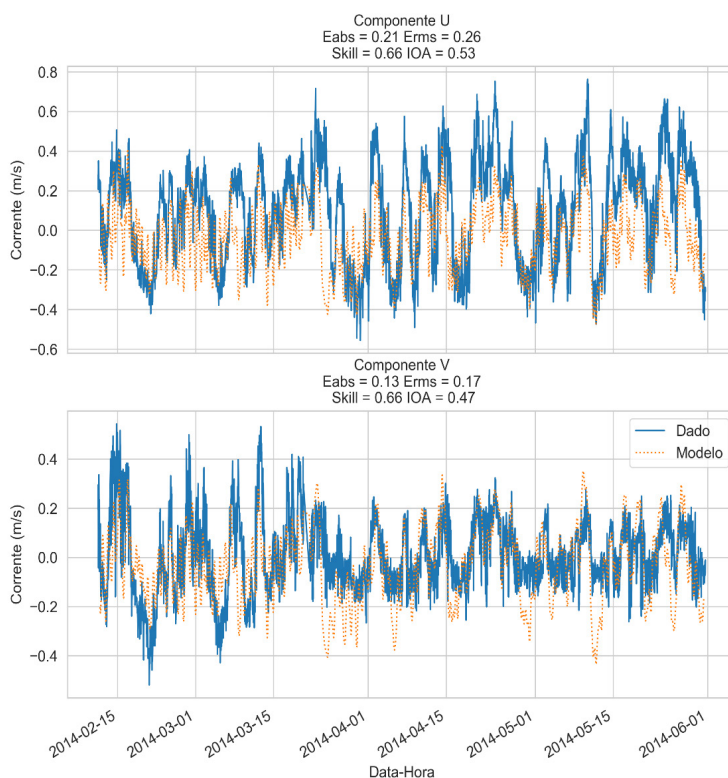
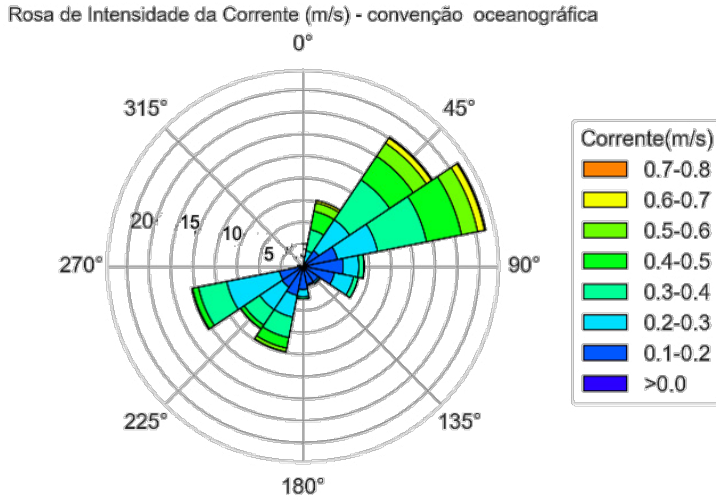


Figura 3 – Série das componentes U e V de velocidade de resultados do modelo e de medições de ADCP (fundeado nas imediações da baía do Araçá, canal de São Sebastião).

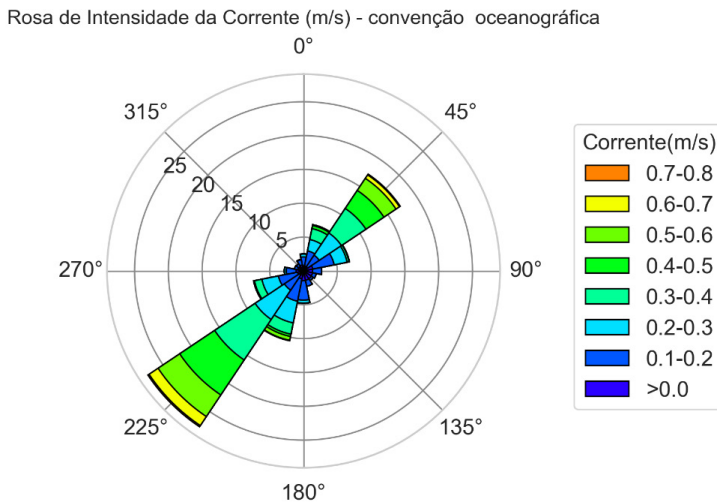
Fonte: Elaborada pelos autores.

O índice skill para as componentes U e V chega a 0,66 e o índice de concordância foi de 0,53 para a componente U e 0,47 para a componente V. Embora não seja próximo ao valor da concordância para maré, a calibração para correntes é, em geral, mais difícil, devido à sua grande variabilidade em função dos inúmeros fatores que influenciam a sua magnitude e direção.



**Figura 4** – Histogramas direcionais de corrente para o ADCP fundeado na baía do Araçá em 2014 (com a declinação magnética de 14,84° Oeste incluída).

Fonte: Elaborada pelos autores.



**Figura 5** – Histograma direcional de correntes calculadas pelo modelo (na mesma posição que foi realizado o fundeio do ADCP, na baía do Araçá).

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3.2 Modelagem de qualidade da água

Após simulação por um mês para cada um dos períodos de inverno e verão, foram obtidas as concentrações médias para cada elemento de grade, bem como a probabilidade de encontrar concentrações acima do limite estabelecido pela CONAMA 274 (BRASIL, 2001), correspondente a 2.500,0 NMP/ 100 ml (Figuras 6 e 7).

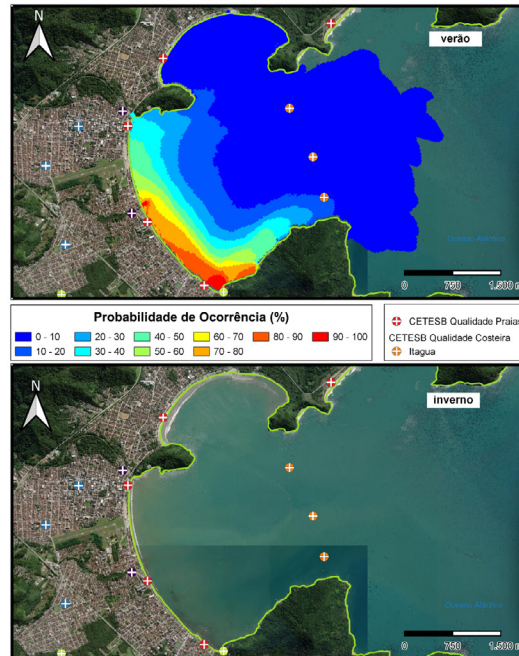


Figura 6 – Concentrações médias de Coliformes Termotolerantes calculadas nos processamentos do modelo de qualidade da água, ao longo dos períodos de verão e inverno, na baía de Ubatuba.

Fonte: Adaptada pelo autor de QGIS 3.12, Google Earth Satellite

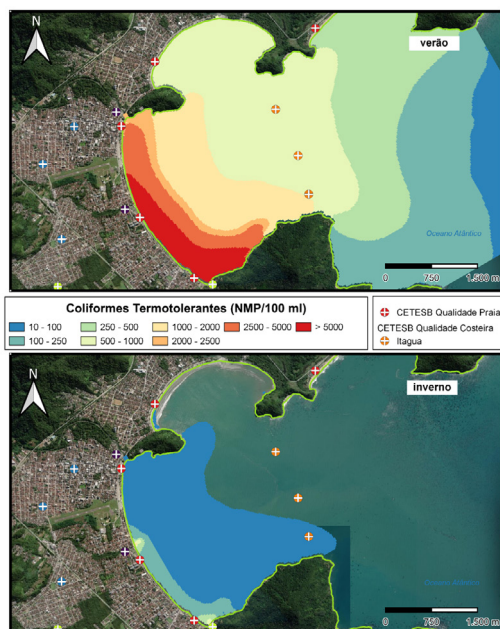


Figura 7 – Probabilidade de ocorrência de concentrações de Coliformes Termotolerantes acima de 2.500,0 NMP/100 ml, segundo os cálculos do modelo ao longo dos períodos de verão e inverno, na baía de Ubatuba.

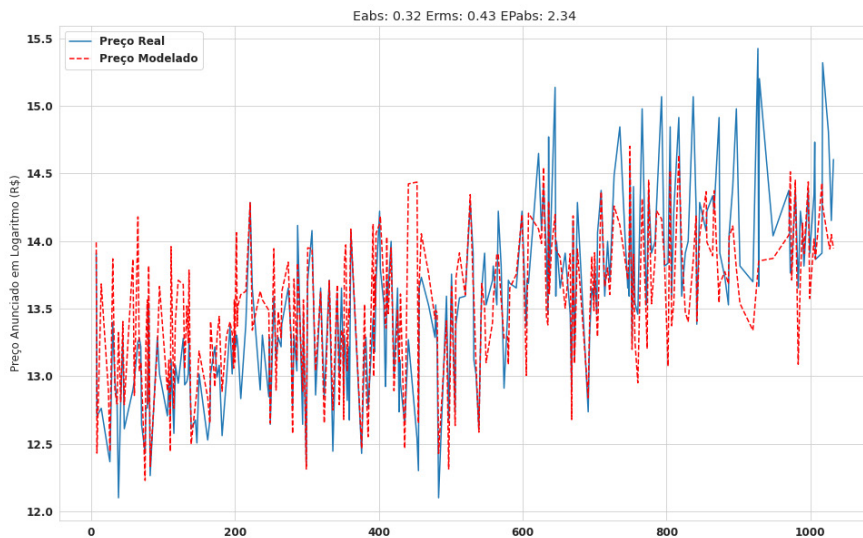
Fonte: Adaptada pelo autor de QGIS 3.12, Google Earth Satellite

### 3.3 Precificação de serviços ecossistêmicos

Para a precificação de serviços ecossistêmicos, um conjunto total de 1 049 imóveis foi dividido em 75% para treino (786 imóveis) e 25% para teste (263). Este processo é necessário para ajustar os hiperparâmetros do modelo XGBoost (através da linguagem de programação Python), de modo a diminuir os erros ao fazer as previsões de preços.

No processo de validação, o modelo XGBoost utilizado para a precificação hedônica foi capaz de atingir uma acurácia média de 97,66% (ou Erro Absoluto Médio de 2,34 %) em relação ao conjunto de testes, demonstrando o potencial que a metodologia teve em aprender as alavancas das variáveis na base de informações geoprocessadas.

Na Figura 8, são apresentadas as comparações entre o preço anunciado real (azul), e o preço anunciado pelo modelo (vermelho tracejado). Observa-se que o modelo reproduz com bastante eficácia a maior parte dos imóveis com valores inferiores a 14,0 log do preço real (equivalente a aproximadamente R\$ 1.200.000,00). No entanto, a partir deste limiar, a aderência do modelo aparentemente perde acurácia. No entanto, há menos imóveis a partir deste limite, o que prejudicou a base de treino, fazendo com que a performance não atingisse a precisão atingida em imóveis mais baratos.



**Figura 8** – Validação do modelo de precificação hedônica, utilizando a base de teste para verificação. Nota-se uma acurácia de 97,66 % ao analisar o conjunto previsto como um todo.

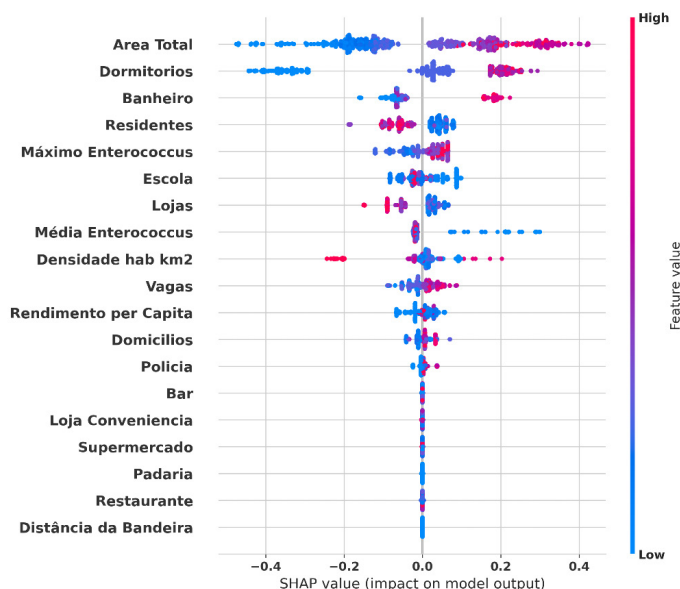
Fonte: Elaborada pelos autores.

Assim, a partir dos resultados obtidos, considera-se que o modelo tem capacidade de responder com alta precisão à dinâmica de preços dos imóveis na região de Ubatuba, demonstrando que características especiais dos próprios imóveis são o suficiente para encontrar uma aproximação ao preço de negociação.

Para deixar a análise mais clara, na Figura 9 é apresentado o gráfico do tipo “enxame de abelhas”, muito similar ao gráfico anterior, mas os valores shapley são apresentados sem considerar apenas o módulo, demonstrando, portanto, como uma variável pode ser responsável por abaixar ou aumentar o preço de um imóvel. A linha central vertical indica o valor 0 shapley, ou seja, baixo impacto. Quanto mais distante de 0 no eixo X, maior é o impacto da variável. A cor de cada ponto representa o quanto o valor de cada variável representava na amostra de cada imóvel.

Fica evidente que, quanto maior a área do imóvel, mais caro ele tende a ser, e quanto menor, mais barato. O mesmo padrão se repete para o número de dormitórios e de banheiros. Quanto a número de residentes, nota-se que quanto maior o número de residentes nas imediações, menor o preço de um imóvel. Este mesmo efeito se repete no número de lojas nas imediações e na densidade de habitantes (número de habitantes por km<sup>2</sup>).

Ao analisar as variáveis de poluição (Máximo valor de Enterococcus e Média de Enterococcus), quanto menor o valor de máximo de Enterococcus, maior seria o preço de um imóvel; mas isto não foi verificado. Na verdade, a variável Máximo Enterococcus identifica mais o bairro de Itaguá do que a poluição em si; isto se dá pelo fato que ambas as estações mais poluídas do município de Ubatuba se encontram nas duas estações de monitoramento de Itaguá, ao mesmo tempo que é uma das regiões mais valorizadas do município. Nesse caso, tal peso demonstra que a poluição em si não explica a piora nas condições locais e, com base nesta análise, não é considerada na negociação de um imóvel.



**Figura 9** – Gráfico tipo “Enxame de Abelhas” das variáveis mais significativas do modelo XGBoost. O eixo X representa o impacto negativo ou positivo dos valores shapley, enquanto a cor das amostras representa a magnitude do valor de cada variável em relação à média.

Fonte: Elaborada pelos autores.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Modelagem hidrodinâmica

Através dos resultados do modelo hidrodinâmico e de sua validação com dados, além de comparação com a bibliografia de referência, pode-se afirmar que a metodologia proposta é capaz de reproduzir as feições oceanográficas satisfatoriamente e ser utilizada na modelagem de qualidade da água.

Tanto os dados quanto os resultados do modelo representam o que vários autores observaram com outros conjuntos de dados para o Canal de São Sebastião (Castro Filho; Miranda, 1998; Dottori; Siegle; Castro Filho, 2015; Silva; Miranda; Castro Filho, 2005). No canal, as correntes geradas por maré são de menor intensidade quando comparadas às correntes forçadas pelos ventos sinóticos e locais. Essas correntes de superfície, por sua vez, têm resposta praticamente instantânea com os ventos locais e também com os ventos gerados pela Alta Subtropical do Atlântico Sul ou Sistemas de Frentes Frias (Castro Filho, 1990). Detalhes sobre os resultados de modelagem hidrodinâmica e sua validação podem ser encontrados em Atake (2022).

Em resumo:

- 1) Para validação do nível, só foi possível utilizar as constantes harmônicas da FEMAR. Dessa forma, demonstrou-se que o modelo consegue reproduzir as oscilações harmônicas de maré.
- 2) As correntes no ponto de validação tiveram aderência esperada ao descrito na bibliografia e reproduziram o comportamento bimodal observado nos dados obtidos junto ao BNDO.

### 4.2 Modelagem de qualidade da água

Para a modelagem de qualidade da água, foi elaborado um novo modelo hidrodinâmico de escala reduzida, utilizando os resultados do modelo de maior escala devidamente validado. Verificou-se que foi possível propagar o sinal de maior escala para o modelo de maior resolução sem alterações no sinal de elevação da superfície do mar, validando assim a abordagem proposta.

A partir dos resultados de verão e inverno, dos mapas probabilísticos e das séries temporais, pode-se inferir as seguintes conclusões (Atake, 2022):

- 1) O Rio Acaraú tem papel relevante na piora da qualidade ambiental da baía de Ubatuba. Sendo o rio mais poluído do município, as imediações da sua foz tendem a apresentar concentrações de coliformes acima dos limites ambientais estabelecidos
- 2) Há sazonalidade no aporte de coliformes termotolerantes na baía de Ubatuba.

- 3) Concentrações abaixo dos limites ambientais chegam eventualmente até a estação de monitoramento da qualidade da água costeira, realizada pela Cetesb.
- 4) De acordo com os mapas de probabilidade de ocorrência, as piores condições ambientais tendem a concentrar-se próximas à faixa de areia e à Praia de Itaguá.

### 4.3 Precificação de serviços ecossistêmicos

As técnicas elaboradas para chegar aos resultados são produto de um corte espacial, ao considerar apenas os imóveis em Ubatuba, e um corte no tempo, visto que só foram avaliados imóveis que estavam à disposição para venda no período da pesquisa (Atake, 2022).

O artigo de meta-análise de Boyle e Kiel (2001) discute diferentes modelos de preços hedônicos que considerem variáveis ambientais, tais como qualidade do ar, qualidade da água e proximidade a aterros sanitários e outros acidentes ambientais, nos Estados Unidos da América. Especialmente para a qualidade da água, todos os estudos apontaram efeitos significativos de queda de preço em localidades de pior qualidade. No entanto, a pior qualidade esteve mais associada a fatores visuais, como por exemplo a alta turbidez da água.

Pela escassez de estudos similares no Brasil, pode-se inferir que uma possibilidade é a existência de um mercado que não leve em conta alguns fatores, ou mesmo não há informação adequada na hora da compra, ao menos no município de Ubatuba. Isto é, as condições ambientais que impactam os preços não são relevantes no contexto local. Há ainda a possibilidade de se avaliar que a precificação hedônica pode não ser uma metodologia precisa para identificar o valor associado aos serviços ecossistêmicos neste recorte temporal e espacial.

No entanto, assim como discutido em Carrilho e Sinisgalli (2018), na baía do Araçá, a maior contribuição de serviços ecossistêmicos foi justamente o serviço de substituição de tratamento de efluentes na baía, visto que a capacidade de autodepuração do meio substitui em parte a necessidade de uma infraestrutura sanitária no valor de milhões de reais. Paralelamente, tal serviço também é prestado pela baía de Ubatuba, em outra escala de valores.

Levando em conta todos os fatores e custos envolvidos, pode-se dizer que a região central de Ubatuba atua como uma zona de sacrifício ambiental, evitando custos da ordem de milhões para manter uma qualidade ambiental, visto que o problema da qualidade da água fica em segundo plano e outras praias do município podem prover o entretenimento a quem é capaz de se locomover e arcar com os respectivos custos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem hidrodinâmica, elaborada de Ilhabela até aproximadamente a divisa dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, reproduziu satisfatoriamente as condições baro-

tropicais e baroclínicas da circulação costeira. Complementarmente, a redução de escala de um modelo com elementos de grade de 200 n x 200 m, para outro refinado, com elementos de grade de 20 x 20 m, através de aninhamento offline, foi efetuada com sucesso.

A modelagem implementada permite a reprodução do estudo feito na baía de Ubatuba para outras localidades, permitindo analisar condições de locais específicos e considerar não apenas a qualidade da água, mas também o transporte de sedimentos, a incidência de ondas e outros efeitos de cunho oceanográfico ou socioambiental.

A abordagem de modelagem da precificação hedônica, levando em conta os dados de balneabilidade no município, não encontrou impacto relevante das concentrações para a determinação dos preços dos imóveis no município. As maiores contribuições para mudanças no preço dos imóveis são as próprias características deles. Através da análise de Interpretabilidade dos algoritmos, encontrou-se que a variável do número máximo de *Enterococcus* estava mais relacionada ao bairro de Itaguá do que à condição de balneabilidade.

A partir da comparação com a bibliografia e com outros estudos que aplicaram métodos distintos, infere-se que, para Ubatuba, no recorte espacial e temporal adotado, a precificação hedônica não é uma boa ferramenta para mensuração dos serviços ecossistêmicos. Assim como levantado na metodologia, o fato de o Brasil ser um país heterogêneo de diversas maneiras (economicamente e geomorfologicamente), implica em maior dificuldade da aplicação do método de precificação hedônica. Verifica-se que a baía de Ubatuba atua hoje como um serviço de substituição no município, evitando custos de construção e manutenção de aparatos de saneamento básico e / ou ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ASSESSMENT, M. E. *Living beyond our means: natural assets and human well-being: statement from the board*. [s.l.] Millennium Ecosystem Assessment, 2005.
- ATAKE, I. R. *A qualidade da água costeira na Baía de Ubatuba-SP: integração entre modelagem numérica e métodos econométricos para diagnóstico baseado em serviços ecossistêmicos*. 2022.
- BOYLE, M.; KIEL, K. A Survey of House Price Hedonic Studies of the Impact of Environmental Externalities. *Journal of Real Estate Literature*, v. 9, n. 2, p. 117–144, 1 jan. 2001.
- BRASIL, C. Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. *DOU*, n. 18, p. 70–71, 2001.
- BRASIL, I. Instituto Brasileiro de geografia e Estatística. *Censo demográfico*, v. 2010, p. 11, 2010.
- BUCHIANERI, V. C. *Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba*. Mestrado em Recursos Florestais—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 13 abr. 2004.

- CARRILHO, C. D.; DE ALMEIDA SINISGALLI, P. A. Contribution to Araçá Bay management: The identification and valuation of ecosystem services. *Ocean & Coastal Management*, v. 164, p. 128–135, 2018.
- CASTRO FILHO, B. M. Wind driven currents in the Channel of São Sebastião: winter, 1979. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 38, n. 2, p. 111–132, 1990.
- CASTRO FILHO, B. M. DE; MIRANDA, L. B. DE. Hydrographic properties in the São Sebastião Channel: daily variations observed in March 1980. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 46, n. 2, p. 111–123, 1998.
- CETESB, C. A. D. E. SÃO PAULO. Qualidade das Praias Litorâneas no Estado de São Paulo 2012. *Série Relatórios. São Paulo: CETESB*, [s.d.].
- CHASSIGNET, E. P. *et al.* The HYCOM (hybrid coordinate ocean model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, v. 65, n. 1–4, p. 60–83, 2007.
- CHEN, L. *et al.* Measuring Impacts of Urban Environmental Elements on Housing Prices Based on Multisource Data—A Case Study of Shanghai, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 9, n. 2, p. 106, 10 fev. 2020.
- COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, v. 387, n. 6630, p. 253–260, 1997.
- DE GROOT, R. S. *et al.* Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, v. 7, n. 3, p. 260–272, 2010.
- DOTTORI, M.; SIEGLE, E.; CASTRO FILHO, B. M. Hydrodynamics and water properties at the entrance of Araçá Bay, Brazil. *Ocean Dynamics*, v. 65, n. 12, p. 1731–1741, dez. 2015.
- EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, v. 19, n. 2, p. 183–204, 2002.
- GODIN, G. *The analysis of tides*. [s.l.: s.n.].
- GRYBAUSKAS, A.; PILINKIENĖ, V.; STUNDŽIENĖ, A. Predictive analytics using Big Data for the real estate market during the COVID-19 pandemic. *Journal of Big Data*, v. 8, n. 1, p. 105, dez. 2021.
- HART, S. Shapley value. Em: *Game theory*. [s.l.] Springer, 1989. p. 210–216.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA JR, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP, A simplified hidrologic model. Symposium on Rainfall Runoff Modeling. Mississippi. *Anais...*1981.
- LUCHIARI, M. T. D. P. O lugar no mundo contemporâneo: turismo e urbanização em Ubatuba-SP. 1999.
- LUNDBERG, S.; LEE, S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *arXiv:1705.07874 [cs, stat]*, 24 nov. 2017.
- RAIMUNDO, S.; FRACALANZA, A. P.; JACOBI, P. R. GOVERNANÇA DA ÁGUA EM ÁREAS TURÍSTICAS: UM ESTUDO DE CASO DO LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. CHÁVEZ, Eduardo Salinas; MAURO; Cláudio Antonio Di;

- MORETTI, Edvaldo Cesar (Org.). *Água, recurso hídrico: bem social transformado em mercadoria*. Tupã: ANAP, p. 189–200, 2017.
- SAHA, S. *et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 13 mar. 2014.
- SCHUREMAN, P. *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. [s.l.] US Government Printing Office, 1958a. v. 4
- SCHUREMAN, P. *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. [s.l.] US Government Printing Office, 1958b. v. 4
- SHAPLEY, L. S. Stochastic games. *Proceedings of the national academy of sciences*, v. 39, n. 10, p. 1095–1100, 1953.
- SILVA, L. DOS S.; MIRANDA, L. B. DE; CASTRO FILHO, B. M. DE. Numerical study of circulation and thermohaline structure in the São Sebastião Channel. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 407–425, 2005.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical geography*, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.
- WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 2012.

