

Modelagem numérica da dispersão de plumas de *Enterococcus* na Baixada Santista (litoral central do estado de São Paulo, Brasil)

Samuel Hora Yang

Joseph Harari

Elisabete de Santis Braga

Resumo

Este estudo teve como objetivo analisar a dispersão das plumas de efluentes dos emissários submarinos e das fontes de poluição difusas da Baixada Santista, quanto às concentrações de *Enterococcus*, diante dos níveis máximos estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). Foram usados os módulos hidrodinâmico e de qualidade da água do modelo *Delft3D*, e o módulo UM3 do modelo *Visual Plumes*. A modelagem de campo próximo confirmou que os emissários estão bem dimensionados e operam eficientemente; e a modelagem de campo distante mostrou que as concentrações de *Enterococcus* superaram o limite do Conama em algumas praias, devido à ação de algumas fontes difusas na costa.

Palavras-chave: Poluição; Esgoto; Qualidade da Água.

1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras possuem grande importância socioeconômica e abrigam a maioria da população mundial em suas dependências e proximidades (Polette; Asmus, 2017). A ocupação antrópica, combinada com as atividades desenvolvidas nas zonas costeiras, pode produzir impactos ambientais negativos prejudiciais à sociedade, tais como os descartes de esgotos domésticos e/ou industriais sem nenhum tipo de tratamento diretamente no oceano, os quais podem causar alterações das características físico-químicas e da qualidade sanitária da água, a proliferação de microrganismos patogênicos nocivos à saúde humana, bem como também afetar de forma prejudicial o turismo, que é a principal fonte de renda de muitas cidades litorâneas (Yang; Harari; Braga, 2018).

Com as crescentes taxas de urbanização e desenvolvimento econômico, a produção de esgoto sanitário tornou-se uma das formas mais comuns de poluição em municípios ao longo do litoral brasileiro. Entretanto, o lançamento de esgoto no oceano via emissários submarinos é uma opção economicamente viável em relação aos sistemas de tratamento padrão de esgoto sanitário, pois, quando bem dimensionados e operando de maneira correta, os emissários submarinos se tornam benéficos à manutenção da qualidade da água e de balneabilidade das praias. Ademais, os modelos numéricos aplicados e desenvolvidos para análises hidrodinâmicas e de qualidade da água consistem em uma importante ferramenta computacional para realizar monitoramentos ambientais em zonas costeiras, por conseguirem simular a dispersão de plumas lançadas por emissários submarinos e/ou por fontes difusas com grande precisão (Yang; Harar; Braga, 2019).

A modelagem de plumas lançadas por emissários submarinos considera que a mistura dos efluentes na água ocorre em três zonas: campo próximo, onde se tem os processos iniciais de mistura e de dispersão da pluma (as características da tubulação difusora e da hidrodinâmica local são muito importantes nesses processos); o campo intermediário, onde a pluma alcança o seu equilíbrio hidrostático no ambiente; e o campo distante, onde a dispersão da pluma (já em equilíbrio hidrostático alcançado) passa a ocorrer exclusivamente por advecção e difusão (JIRKA & AKAR, 1991). Já a modelagem de plumas emitidas por fontes difusas (rios, córregos e canais) considera apenas a zona de campo distante.

2. ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado na Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), que engloba nove municípios no litoral central do Estado de São Paulo (CETESB, 2018). A Figura 1 mostra a delimitação da área de interesse, a batimetria, e a localização dos municípios.

Em termos de saneamento básico, a RMBS dispõe de cinco emissários submarinos de esgoto: três em Praia Grande, um em Santos (que também atende São Vicente) e

um em Guarujá (SABESP, 2013); e dispõe também de um total de 14 estações de tratamento de esgoto (CETESB, 2018). Considerando todos os municípios, até o presente, não há uma infraestrutura que assegure 100% de coleta e tratamento de esgoto na RMBS, e isto faz com que parte dos efluentes seja descartada inadequadamente (na forma de esgoto bruto) em corpos hídricos (rios, córregos e canais), cujo destino final é o oceano (NPH, 2017).

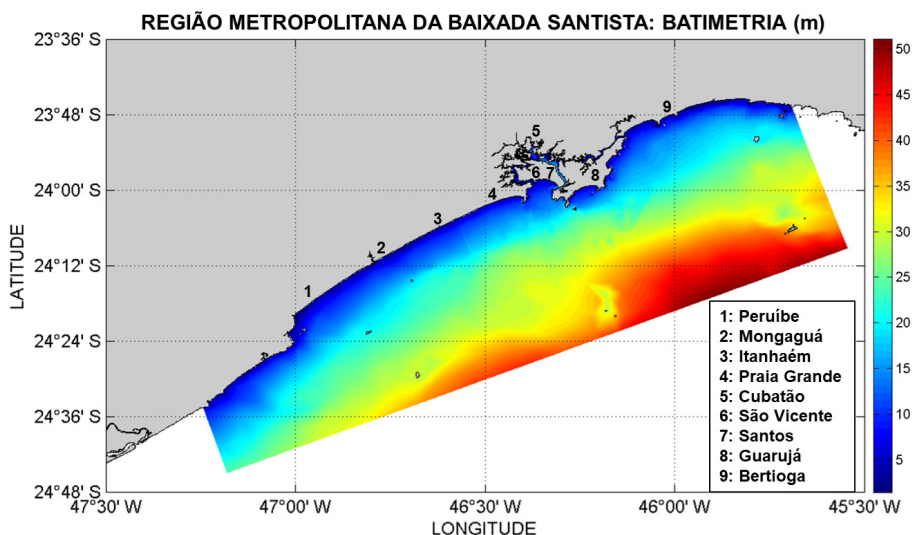


Figura 1 – Batimetria (em metros) da área de estudo delimitada para o presente trabalho, juntamente com a localização dos nove municípios da RMBS.

Fonte: Elaborada pelos autores.

3. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi analisar a dispersão das plumas de efluentes emitidas simultaneamente pela operação dos emissários submarinos de esgoto e pelas fontes de poluição difusas da RMBS, com a aplicação de um modelo numérico, e comparar os resultados da concentração de *Enterococcus* adquiridos através da modelagem com os limites máximos estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) para este indicador bacteriano (segundo a Resolução n. 274/2000).

4. METODOLOGIA

4.1 Modelagem hidrodinâmica

A etapa de modelagem hidrodinâmica foi realizada com o módulo hidrodinâmico do modelo numérico *Delft3D*, o D3D-FLOW (Deltares, 2019a). Informações do D3D-FLOW e da formulação de suas equações encontram-se em Deltares (2019a). Foi estabelecida uma grade computacional (tipo C de Arakawa) de 520 por 180 células

(limites na Figura 1), com espaçamento horizontal de 350 metros; a discretização das equações na vertical considerou 15 camadas do tipo Sigma; e nas bordas foram adotadas condições de contorno do tipo *Riemann* (Walsh, 1973). O modelo hidrodinâmico foi processado para agosto de 2016 (inverno) e fevereiro de 2017 (verão), sendo que todas as informações do processamento do modelo D3D-FLOW (incluindo a sua validação) estão disponíveis em Yang (2022). Um dos principais parâmetros usados na validação foi o *Index of Agreement* (IOA), cujo valor ideal (concordância total entre as séries comparadas) corresponde a 1 (Willmott, 1982).

4.2 Modelagem de qualidade da água

A modelagem de qualidade da água deste estudo foi realizada em duas etapas: primeiro, a modelagem de campo próximo; e depois, a modelagem de campo distante. Para tanto, foi necessário adquirir uma série de informações na literatura, descritas a seguir.

A bactéria fecal do gênero *Enterococcus* foi selecionada como indicador de qualidade da água nas modelagens de dispersão das plumas. O limite máximo estabelecido pela Resolução Conama N.º 274/2000 corresponde a 100 UFC/100mL de *Enterococcus* em águas salinas e salobras (Brasil, 2001). Quando tal limite é superado, há riscos e efeitos negativos para a saúde humana e para a qualidade da água, o que torna este gênero de bactéria um eficiente indicador de poluição, e assim, o monitoramento de sua distribuição por meio de simulações numéricas pode contribuir às ações de preservação ambiental.

As fontes poluidoras presentes na RMBS foram subdivididas em: fontes pontuais (representadas por emissários submarinos de esgoto), sendo considerados os três emissários submarinos de Praia Grande (PG1, PG2 e PG3), o emissário submarino de Santos (ESS), e o emissário submarino de Guarujá (ESG); e fontes difusas (representadas por rios, córregos e canais que deságuam diretamente no oceano ou em estuários), onde foi considerado um total de 73 descargas difusas na região (11 rios continentais, 26 rios estuarinos, 12 despejos independentes e 24 canais artificiais), após a realização de uma extensa revisão bibliográfica de documentos técnico-científicos pertencentes à Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e ao Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas (NPH) da Universidade Santa Cecília (Unisantia). Maiores detalhes e informações das fontes poluidoras se encontram em Yang (2022).

A modelagem de campo próximo das plumas de *Enterococcus* dos cinco emissários submarinos da RMBS foi realizada com o módulo *Three Dimensional Updated Merge* (UM3) do modelo *Visual Plumes* (VP), detalhado em Baumgartner, Frick & Roberts (1994). Informações técnicas dos emissários submarinos (ver Tabela 1) foram obtidas em Ortiz, Garcia & Subtil (2011), Baptistelli e Marcellino (2016), Ortiz, Yanes e Braulio Neto (2016) e Yang, Harari e Braga (2019); a Figura 3 indica a localização dos lançamen-

tos de suas plumas. As concentrações médias sazonais de *Enterococcus* presentes nas plumas de efluentes lançadas pelos cinco emissários submarinos da RMBS (ver Tabela 2) foram adquiridas em SABESP (2006a) para o ESS; em SABESP (2006b) para o PG1 e o PG2; e foram estimadas para o PG3 e o ESG, com base na quantidade máxima de habitantes atendida por tais emissários, conforme Ortiz, Yanes & Braulio Neto (2016). Deve ser ressaltado que a modelagem de campo próximo foi realizada com as vazões máximas dos emissários submarinos e com lançamentos contínuos e constantes de bactérias a cada hora; o contaminante considerado na modelagem (não conservativo) teve taxa de decaimento T_{90} (tempo necessário para a eliminação de 90% das bactérias), calculada com base em Yukselen *et al.* (2003) para cada uma das 15 camadas verticais Sigma, cujos valores obtidos encontram-se em Yang (2022).

Tabela 1 – Informações técnicas dos cinco emissários submarinos da RMBS

Emissário Submarino	PG1	PG2	PG3	ESS	ESG
Vazão máxima (m ³ /s)	1,04	1,05	1,40	5,30	1,45
Comprimento total (m)	3300	3300	4000	4425	4500
Diâmetro da tubulação (m)	1	1	1	1,75	0,90
Comprimento do tubo difusor (m)	25	25	420	425	300
Número de difusores	5	5	150* ¹	158* ²	150* ³
Espaçamento entre difusores (m)	5	5	5,60	5,38	4
Diâmetro dos difusores (m)	0,175	0,175	0,125* ¹	0,22* ²	0,12* ³

*¹: Difusores situados em dupla. Portanto, 75 duplas com dois difusores de 0,0625 m cada.

*²: Difusores situados em dupla. Portanto, 79 duplas com dois difusores de 0,11 m cada.

*³: Difusores situados em dupla. Portanto, 75 duplas com dois difusores de 0,06 m cada.

Fonte: Ortiz, Garcia e Subtil (2011); Baptistelli e Marcellino (2016); Ortiz, Yanes e Braulio Neto (2016); Yang, Harari e Braga (2019).

Tabela 2 – Valores médios sazonais de *Enterococcus* nos emissários submarinos da RMBS

<i>Enteroc.</i> (UFC/100mL)	PG1	PG2	PG3	ESS	ESG
Inverno	5,13 x 10 ⁵	6,05 x 10 ⁵	5,59 x 10 ⁵	6,24 x 10 ⁵	5,59 x 10 ⁵
Verão	6,61 x 10 ⁵	7,32 x 10 ⁵	6,96 x 10 ⁵	7,13 x 10 ⁵	6,94 x 10 ⁵

Fonte: Sabesp (2006a).

Após a modelagem de campo próximo, foi realizada a modelagem de campo distante, através do módulo de qualidade da água do *Delft3D*, o D3D-WAQ (Deltares, 2019b). Informações das equações resolvidas pelo D3D-WAQ encontram-se em Deltares (2019b).

Os resultados hidrodinâmicos obtidos no D3D-FLOW e os resultados da modelagem de campo próximo das plumas de *Enterococcus* dos emissários submarinos (obtidos no UM3) foram inseridos no D3D-WAQ, junto com informações das plumas das 73 fontes de poluição difusa (as quais foram consideradas somente na modelagem de campo distante, também com lançamento contínuo e constante de bactérias a cada hora). Valores médios sazonais das vazões nas fontes difusas foram extraídas de Sampaio *et al.* (2008), NPH (2017), Yang *et al.* (2019) e Ribeiro (2021); já as concentrações médias sazonais de *Enterococcus* foram estimadas a partir das concentrações médias sazonais de *Escherichia coli* disponibilizadas por Braga *et al.* (2000), Sabesp (2006b), Coelho (2013), Sabesp (2013), Sutti (2014), Cetesb (2017), Cetesb (2018) e InfoÁguas (2021), através de uma regressão linear desenvolvida pela equipe de pesquisadores do NPH Unisanta, com base em amostras coletadas *in situ* na RMBS (ver Figura 2); esta regressão foi aplicada com sucesso por Ribeiro *et al.* (2019) e Ribeiro (2021). Os valores médios sazonais das vazões e das concentrações de *Enterococcus* nas fontes difusas se encontram disponíveis em Yang (2022).

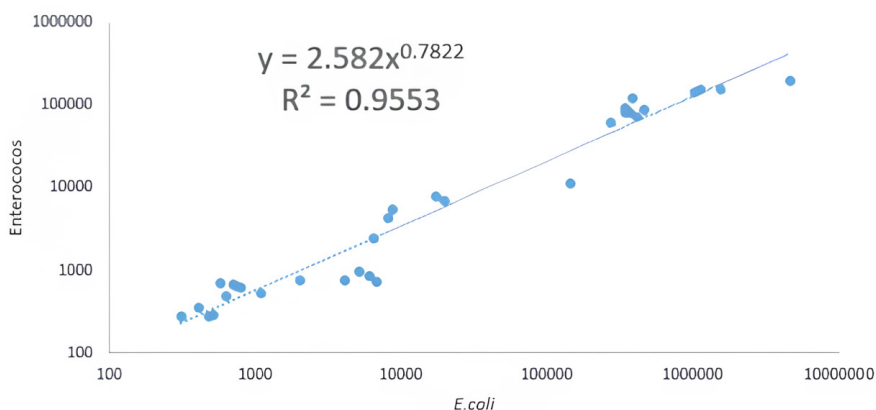


Figura 2 – Regressão linear de *E. coli* x *Enterococcus* na RMBS.

Fonte: NPH Unisanta.

O D3D-WAQ permite que processos físicos e químicos específicos sejam ativados de forma independente para cada indicador de poluição, o que possibilita a criação de cenários que representam o decaimento dos contaminantes no ambiente de modo realístico (DELTARES, 2019b). Portanto, para uma melhor representação do decaimento das bactérias *Enterococcus*, foi selecionado o processo de mortalidade, cujos parâmetros considerados na modelagem de campo distante estão dispostos na Tabela 3.

Para monitorar a variação temporal das concentrações de *Enterococcus* nas plumas oriundas da operação simultânea dos cinco emissários submarinos e das 73 fontes de poluição difusa, foram escolhidos seis pontos de monitoramento (três em Praia Grande, um em Santos e dois em Guarujá), conforme a Figura 3.

Tabela 3 – Parâmetros considerados para a mortalidade de *Enterococcus* no D3D-WAQ

Mortalidade de <i>Enterococcus</i>	Inverno	Verão	Referência
Clorinidade da água do mar (mg/L)	20000	20000	D3D-WAQ (Default)
Coefficiente de mortalidade por temperatura	1,07	1,07	D3D-WAQ (Default)
Temperatura média mensal (°C)	21	28	Lellouche <i>et al.</i> (2016)
Radiação solar média mensal (W/m ²)	160	300	Saha <i>et al.</i> (2014)
Duração média do dia (d)	0,4711	0,5373	Deltares (2019b)
Fração UV da luz visível	0,12	0,12	D3D-WAQ (Default)

Fonte: Elaborada pelos autores.

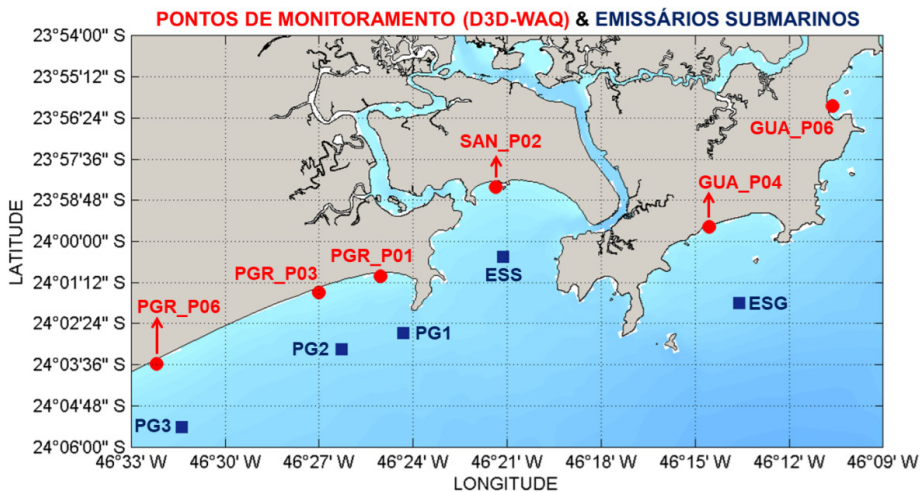


Figura 3 – Pontos de monitoramento e localização dos emissários submarinos da RMBS.

Fonte: Elaborada pelos autores.

O D3D-WAQ foi validado qualitativamente para 40 pontos costeiros ao longo da grade, através da Equação 1: proposta por Yang (2022), esta equação realiza o cálculo do módulo das diferenças dos intervalos de tempo com qualidade da água adequada (Δtqa), entre as séries temporais de bactérias modeladas ($tqa_{Mod(i)}$) e observadas ($tqa_{Obs(i)}$). A qualidade de água foi considerada adequada quando as concentrações de *Enterococcus* estiveram abaixo do limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA N.º 274/2000. Ademais, foi estabelecido que Δtqa não poderia ultrapassar 25% do tempo de simulação para que um ponto de monitoramento fosse validado quanto a *Enterococcus*; e para que o D3D-WAQ fosse considerado validado, o total de comparações deveria ter no mínimo metade dos casos validados. Todos os detalhes da validação qualitativa do D3D-WAQ estão em Yang (2022).

$$\Delta tqa = \left| tqa_{Mod(i)} - tqa_{Obs(i)} \right|$$

Equação 1 – Diferença de tempo de qualidade da água adequada (Yang, 2022).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Modelagem hidrodinâmica

O processamento do D3D-FLOW registrou elevações de nível do mar e direção e intensidade de correntes concordantes com os padrões locais (Yang, 2022).

A validação do modelo hidrodinâmico gerou excelentes resultados para elevação (valores médios de IOA de 0,93 no inverno e 0,91 no verão) e correntes (valores médios de IOA foram de 0,84 no inverno e 0,66 no verão, para a componente zonal; e de 0,83 no inverno e 0,68 no verão, para a componente meridional); assim, o D3D-FLOW pôde ser considerado como validado em relação à circulação total na RMBS. Resultados completos da modelagem hidrodinâmica e da validação do D3D-FLOW estão disponíveis em Yang (2022).

5.2 Modelagem de qualidade da água (campo próximo)

Resultados da modelagem de campo próximo feita através do modelo VP-UM3, representados por histogramas angulares da concentração de bactérias *Enterococcus* nos cinco emissários submarinos da RMBS, nos períodos de agosto de 2016 (inverno) e fevereiro de 2017 (verão), encontram-se disponíveis respectivamente nas Figuras 4 e 5.

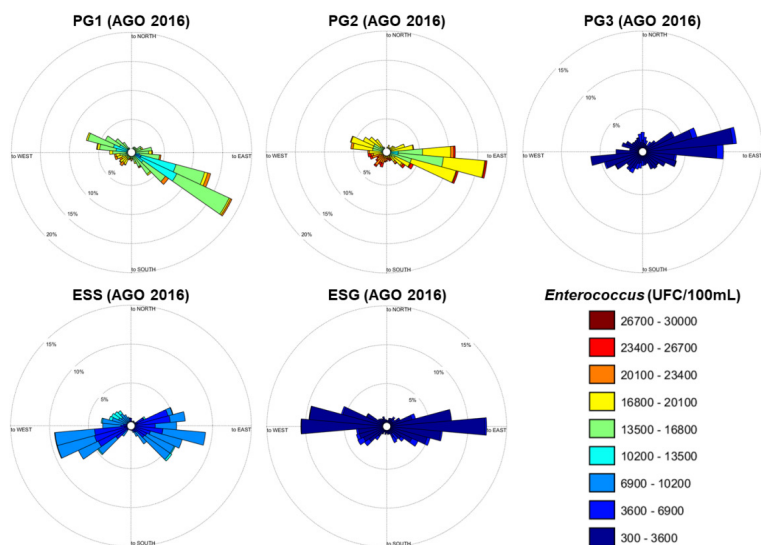


Figura 4 – Histogramas angulares das concentrações de *Enterococcus* nas plumas dos emissários submarinos da RMBS, referentes a agosto de 2016.

Fonte: Elaborada pelos autores.

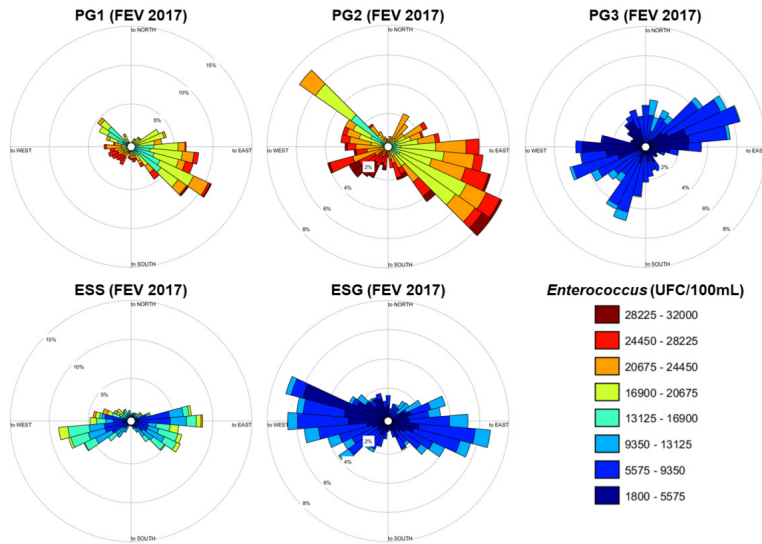


Figura 5 – Histogramas angulares das concentrações de *Enterococcus* nas plumas dos emissários submarinos da RMBS, referentes a fevereiro de 2017.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os histogramas angulares obtidos da modelagem de campo próximo (Figuras 4 e 5) indicaram que as direções predominantes na dispersão inicial das plumas dos emissários PG1 e PG2 foram para noroeste e para sudeste, o que indica maior influência das correntes de maré, perpendiculares à costa; por outro lado, na dispersão inicial das plumas dos emissários PG3, ESS e ESG, as direções que prevaleceram foram para oeste-sudoeste e para leste-nordeste, que estão associadas com as correntes geradas pelo vento (respectivamente ventos predominantes e passagens de frentes frias). Tais padrões de transporte confirmam os resultados dos experimentos numéricos realizados por Harari, França e Marques (2007), Ferreira, Harari e Sartor (2018) e Yang, Harari e Braga (2019), em sub-regiões da RMBS.

Ao realizar uma comparação dos histogramas angulares (Figuras 4 e 5), ficou evidente a maior concentração de bactérias durante o mês de fevereiro de 2017 (período de verão), em decorrência do grande aumento temporário da população (turistas) e o consequente aumento da poluição por esgotos no verão (Cetesb, 2018). O limite máximo estabelecido pela Resolução Conama N° 274/2000 para *Enterococcus* em águas salinas e salobras é de 100 UFC/100mL (Brasil, 2001), e conforme as Figuras 4 e 5, as concentrações nas plumas dos cinco emissários submarinos da RMBS não apresentaram valores inferiores a este limite em nenhum momento na etapa de campo próximo, como consequência dos elevados valores iniciais lançados pelos emissários (ver Tabela 2). Os estudos de Gregorio (2009), Ferreira, Harari e Sartor (2018) e Yang, Harari e Braga (2019), que respectivamente realizaram a modelagem de campo próximo da pluma de coliformes termotolerantes do ESS, da pluma de *Enterococcus* do ESG, e das

plumas de *Escherichia coli* do PG1, PG2 e PG3, mostraram resultados similares aos obtidos no processamento do campo próximo deste estudo: maiores concentrações de bactérias nas plumas durante o verão, e concentrações de bactérias acima dos limites estabelecidos pelo Conama, no verão e no inverno.

5.3 Modelagem de qualidade da água (campo distante)

Resultados da modelagem de campo distante realizada no modelo D3D-WAQ, com as concentrações de *Enterococcus* na superfície, representados por séries temporais dos meses de agosto de 2016 e fevereiro de 2017, estão nas Figuras 6 e 7 (pontos de monitoramento em Praia Grande) e nas Figuras 8 e 9 (pontos de monitoramento em Santos e Guarujá).

As plumas emitidas pelos cinco emissários submarinos da RMBS atingem o equilíbrio hidrostático não muito distante de seus pontos de lançamento e sofrem diluição conforme são transportadas pelas correntes (além da ação do processo ativo de mortalidade das bactérias configurado no modelo D3D-WAQ, ver Tabela 3); ao chegarem às praias, as concentrações de *Enterococcus*, em geral, são menores que o limite estabelecido pelo CONAMA, situação também verificada por Yang, Harari e Braga (2019) na modelagem de plumas de *Escherichia coli* na região de Praia Grande. Entretanto, de acordo com as séries temporais dos seis pontos monitorados (ver Figuras 6, 7, 8 e 9), nota-se a ocorrência de concentrações de *Enterococcus* acima do limite máximo de 100 UFC/100mL em ambos os períodos simulados, muito possivelmente devido à presença de 24 canais artificiais que podem conter esgoto bruto, os quais deságuam diretamente nas praias dos municípios de Praia Grande (dez canais), Santos (sete canais) e Guarujá (sete canais na praia da Enseada) (Sabesp, 2006a; Sabesp, 2006b; Sabesp, 2013). Os despejos advindos dos canais podem contribuir ao aumento da concentração de bactérias, piorar os índices de qualidade da água e afetar a balneabilidade das praias, situação confirmada por monitoramentos realizados pela CETESB nos meses de agosto de 2016 e fevereiro de 2017 em praias desses municípios, as quais ocasionalmente apresentaram períodos de balneabilidade imprópria (CETESB, 2017; CETESB, 2018). Os resultados obtidos pelo D3D-WAQ neste estudo foram concordantes com SABESP (2013) e Ferreira Harari e Sartor (2018), que registraram maiores concentrações de *Enterococcus* nas proximidades dos emissários submarinos; e com Ribeiro (2021), que registrou maiores concentrações desta bactéria em praias e dentro do estuário, regiões mais vulneráveis ao descarte de esgoto bruto por fontes difusas.

Um resumo da validação qualitativa do modelo D3D-WAQ está disponibilizado na Tabela 4: com 51 de 80 validações possíveis (63,75% de casos validados), o D3D-WAQ foi considerado como validado quanto à dispersão das plumas de *Enterococcus* provenientes das fontes poluidoras consideradas neste estudo. Os resultados completos e detalhados da validação qualitativa do D3D-WAQ estão em Yang (2022).

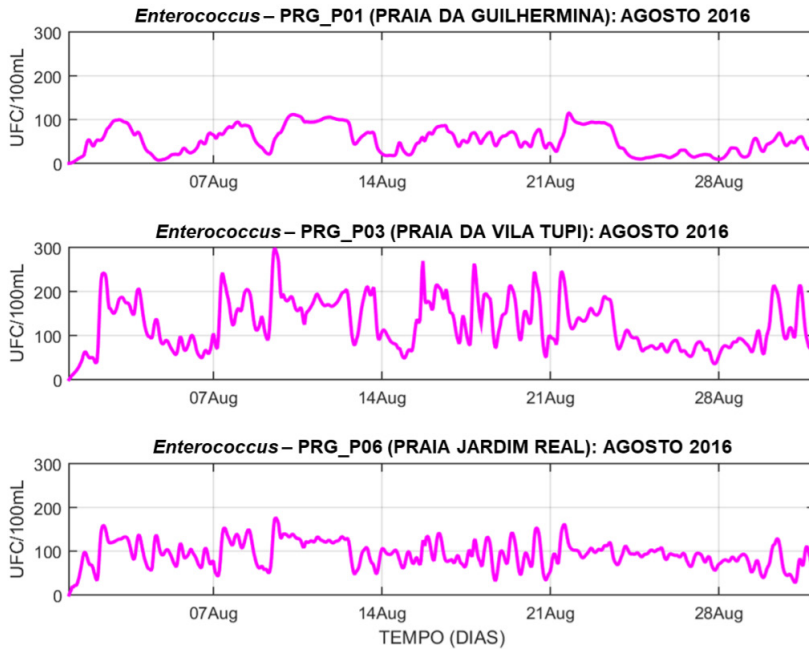


Figura 6 – Séries temporais das concentrações de *Enterococcus*, na superfície, nos pontos selecionados em Praia Grande (PGR_P01, PGR_P03 e PGR_P06), em agosto de 2016.

Fonte: Elaborada pelos autores.

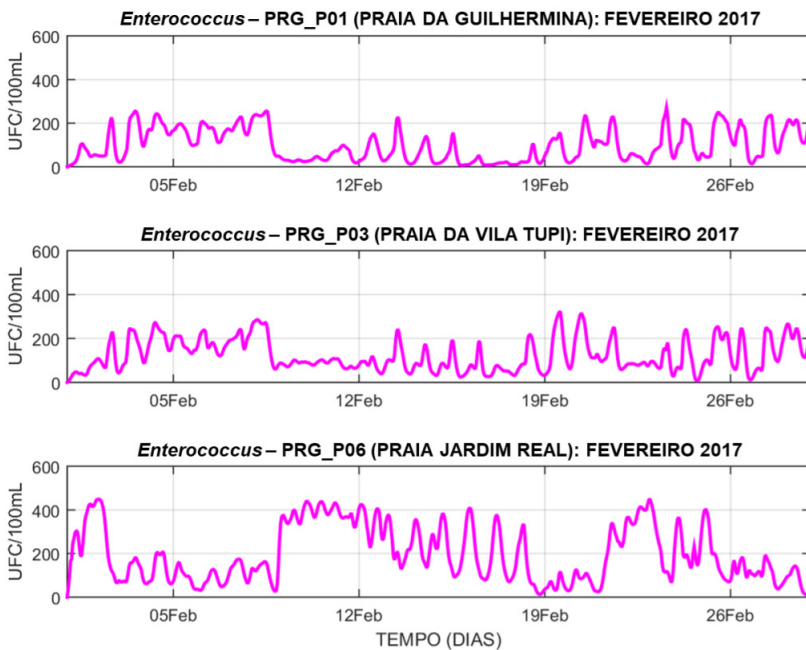


Figura 7 – Séries temporais das concentrações de *Enterococcus*, na superfície, nos pontos selecionados em Praia Grande (PGR_P01, PGR_P03 e PGR_P06), em fevereiro de 2017.

Fonte: Elaborada pelos autores.

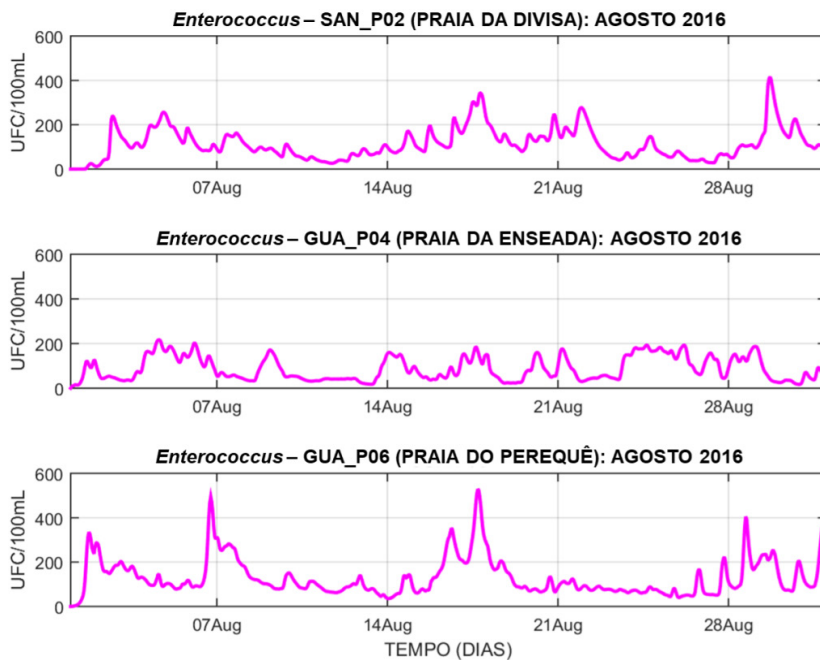


Figura 8 – Séries temporais das concentrações de *Enterococcus*, na superfície, nos pontos selecionados em Santos e Guarujá (SAN_P02, GUA_P04 e GUA_P06), em agosto de 2016.

Fonte: Elaborada pelos autores.

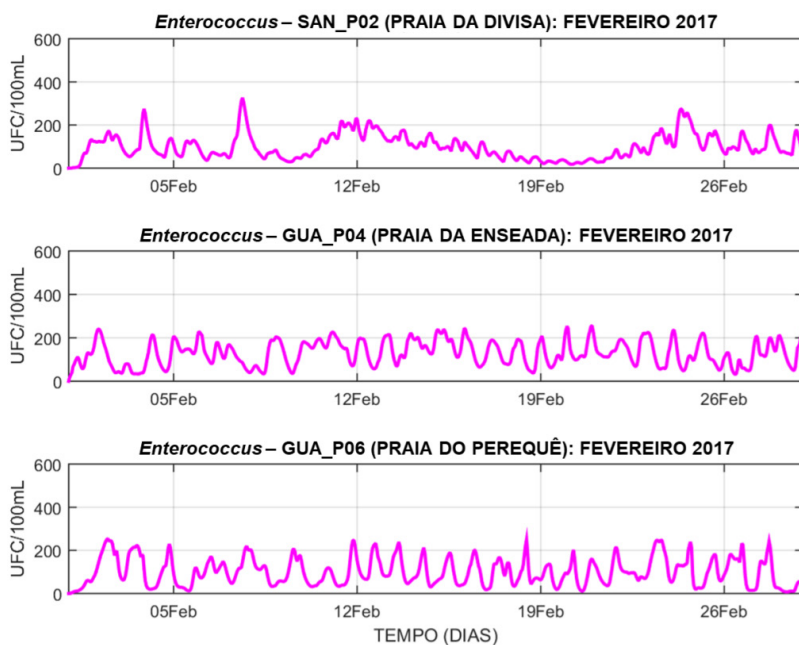


Figura 9 – Séries temporais das concentrações de *Enterococcus*, na superfície, nos pontos selecionados em Santos e Guarujá (SAN_P02, GUA_P04 e GUA_P06), em fevereiro de 2017.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 4 – Resumo da validação qualitativa do D3D-WAQ para *Enterococcus*

Validações ($\Delta t_{qa} \leq 25\%$)	AGO 2016	FEV 2017	VALIDAÇÕES	POSSÍVEIS
Peruíbe	3	3	6	6
Itanhaém	7	7	14	14
Mongaguá	3	2	5	6
Praia Grande	6	1	7	16
São Vicente e Santos	2	0	2	16
Guarujá	3	3	6	10
Bertioga	6	5	11	12
TOTAL (D3D-WAQ)	30	21	51	80

Fonte: Elaborada pelos autores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem hidrodinâmica realizada através do D3D-FLOW representou as feições hidrodinâmicas da RMBS com elevado grau de confiabilidade, tendo fornecido resultados devidamente validados e concordantes com a literatura.

A modelagem de campo próximo realizada no VP-UM3 indicou que correntes de maré e correntes geradas pelo vento são ambas influentes na dispersão inicial das plumas dos cinco emissários submarinos abordados. Apesar das concentrações de *Enterococcus* ainda superarem o limite máximo indicado pelo CONAMA até as plumas atingirem o equilíbrio hidrostático (a partir de elevados valores iniciais lançados, ver Tabela 2), de um modo geral, as diluições iniciais das plumas emitidas pelos emissários submarinos foram satisfatórias, o que indica que eles são bem dimensionados e operam adequadamente. Os eventuais períodos de balneabilidade imprópria em algumas praias da região estudada (principalmente em Praia Grande, Santos e Guarujá) podem ser estar relacionados às descargas de fontes difusas. Uma possibilidade de solucionar este problema é realizar adequações e melhorias no sistema de saneamento básico em algumas localidades da RMBS.

A modelagem de campo distante com o D3D-WAQ também indicou que os cinco emissários submarinos da RMBS estão dimensionados de maneira correta e funcionando eficientemente, além de confirmarem a hipótese levantada por Yang (2016) e por Yang, Harari & Braga (2018), os quais mencionam que eventuais períodos de balneabilidade imprópria, e de baixos índices de qualidade da água nas praias da RMBS, podem ter origem em contribuições de fontes difusas que deságuam nas praias

contendo esgoto bruto não tratado, oriundas de despejos não conectados à rede de saneamento. Políticas públicas são necessárias para solucionar os atuais problemas dos descartes de esgoto bruto nas praias da RMBS, bem como no Sistema Estuarino de Santos e São Vicente.

O modelo D3D-WAQ foi validado de modo qualitativo, o que indica sua eficiência na modelagem de dispersão das plumas em campo distante com alto grau de confiabilidade, e uma boa qualidade dos valores usados nos parâmetros que representaram o processo ativo da mortalidade desta bactéria. As diferenças encontradas nas comparações entre os tempos de qualidade da água adequada (com base em *Enterococcus*) registrados pelo D3D-WAQ e pelas amostragens *in situ* da CETESB foram mais significativas nas praias de Santos e São Vicente, e menos significativas nas praias dos demais municípios. Deve ser ressaltado que o critério da Resolução CONAMA N.º 274/2000 considera os resultados obtidos nas cinco últimas coletas para classificar a condição de balneabilidade de uma determinada praia (BRASIL, 2001), enquanto os resultados gerados pelo modelo D3D-WAQ possuem resolução temporal de uma hora; ou seja, a baixa resolução temporal das coletas *in situ* da CETESB (de uma semana) pode eventualmente diminuir a precisão das informações de balneabilidade e de qualidade da água instantânea de uma praia, conforme mencionado por Yang (2016).

Por fim, a metodologia empregada neste trabalho poderá servir de referência em futuros estudos e monitoramentos que envolvam análise de qualidade da água com o uso da modelagem numérica da dispersão de plumas de efluentes contendo *Enterococcus* e outros contaminantes oriundos de fontes poluidoras pontuais e difusas (rios, córregos, canais etc.), o que pode contribuir para significativas melhorias no saneamento básico da RMBS.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTELLI, S.C.; MARCELLINO, E.B. Seawater monitoring under the influence of Sabesp sea outfalls in Baixada Santista (south coast) and north coast - São Paulo State - Brazil. *Revista DAE*, n. 204 (Edição Especial): pp. 47 - 56, Outubro 2016.
- BAUMGARTNER, D.J.; FRICK, W.E.; ROBERTS, P.J.W. *Dilution models for effluent discharges*. 3. edition. Portland: Usepa, 1994. 189p.
- BRAGA, E.S.; BONETTI, C.V.D.H.; BURONE, L. & BONETTI FILHO, J. Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the Baixada Santista Estuarine System - Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 40, 2, pp. 165 - 173, February 2000.
- BRASIL. Resolução n. 274 de 29 de novembro de 2000. *Diário Oficial da União*, n 18, pp. 70 - 71, Janeiro 2001.
- CETESB. *Qualidade das praias litorâneas no estado de São Paulo - 2016*. Relatório técnico. São Paulo: Cetesb, 2017. 183p.

- CETESB. *Qualidade das praias litorâneas no Estado de São Paulo – 2017*. Relatório técnico. São Paulo: Cetesb, 2018. 196p.
- COELHO, F.R. *Caracterização físico-química, microbiológica e ecotoxicológica das águas dos canais de drenagem urbana de Santos (São Paulo, Brasil)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade de Ecossistemas Costeiros e Marinheiros. Santos: 2013. 69p.
- DELTARES. *Delft3D-FLOW User manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments*. Version 3.15. Delft: 2019a. 680p.
- DELTARES. *D-Water quality user manual: versatile water quality modeling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio)chemical and biological processes*. Version 5.06. Delft: 2019b. 380p.
- FERREIRA, F.R.; HARARI, J.; SARTOR, S.M. Análise da dispersão de esgoto nas águas das praias do Guarujá (SP) e seu risco à saúde dos banhistas. In: SINISGALLI, P.A.A.; JACOBI, P.R. *Caminhos do conhecimento em interdisciplinaridade e meio ambiente*. São Paulo: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2018, pp. 82-106.
- GREGORIO, H.P. *Modelagem numérica da dispersão da pluma do emissário submarino de Santos*. (Dissertação de Mestrado) – Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, São Paulo: 2009. 108p.
- HARARI, J.; FRANÇA, C.A.S.; MARQUES, J. Aplicações da modelagem numérica da Baía de Santos (SP, Brasil): correntes residuais e dispersão de poluentes. In: *Anais do 1º Encontro Internacional de Governança da Água na América Latina*, São Paulo, 2007.
- INFOÁGUAS. Sistema InfoÁguas. São Paulo: Cetesb, 2021. Disponível em: <https://sistemainfoaguas.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 03 fev. 2021.
- JIRKA, G.H.; AKAR, P.J. Hydrodynamic classification of submerged multiport diffuser discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (9): pp. 1113-1128, September 1991.
- LELLOUCHE, J.M.; LEGALLOUDEC, O.; REGNIER, C.; LEVIER, B.; GREINER, E.; DREVILLON, M. *Quality information document for the GLOBAL ocean sea physical analysis and forecasting products: Global_Analysis_Forecast_Phy_001_024*. Technical report. Version 2.3 (Issue 1.3). Brussels: CMEMS, 2016. 67p.
- NPH. Implantação do sistema de monitoramento e previsão da qualidade da água por meio de modelagem numérica ambiental e desenvolvimento de base de dados na Bacia Hidrográfica do Estuário de Santos - São Vicente. Relatório técnico. Santos: Universidade Santa Cecília, 2017. 125p.
- ORTIZ, J.P.; GARCIA, R.S.; SUBTIL, E.L. New design of santos submarine outfall: hydrodynamic modeling simulation at the Santos Bay. In: *Proceedings of International Symposium on Outfall Systems*, Mar del Plata, 2011.
- ORTIZ, J.P.; YANES, J.P.; BRAULIO NETO, A. Wastewater marine disposal through outfalls on the coast of São Paulo State - Brazil: an overview. *Revista DAE*, n. 204 (Edição Especial), pp. 29 - 46, Outubro 2016.

- POLETTE, M.; ASMUS, M.L. Meio ambiente marinho e impactos antrópicos. In: CASTELLO, J.P. & KRUG, L.C. *Introdução às ciências do mar*. 1. reimp. Pelotas: Editora Textos, 2017. pp. 500 - 520.
- RIBEIRO, R.B. *Previsão de balneabilidade com o uso da modelagem numérica operacional para as praias das Baías de Santos e de São Vicente*. Tese de Doutorado, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (Procam), São Paulo: 2021. 163p.
- RIBEIRO, R.B.; SAMPAIO, A.F.P.; RUIZ, M.S. & HARARI, J. Influência do escoamento de águas pluviais na balneabilidade das praias em Santos, Brasil. In: *Anais do 9º Congresso sobre Planejamento e Gestão Costeira dos Países de Expressão Portuguesa*, Lisboa, 2019.
- SABESP. Prestação de serviços referentes à execução dos programas de monitoramento ambiental da área sob influência do emissário submarino de esgotos de Santos / São Vicente e de monitoramento ambiental da área sob influência dos emissários submarinos de esgotos de Praia Grande - Subsistemas 1, 2 e 3. Relatório técnico. Volume 01 (Avaliação do monitoramento de Santos/São Vicente), São Paulo: SABESP, 2006a. 247p.
- SABESP. Prestação de serviços referentes à execução dos programas de monitoramento ambiental da área sob influência do emissário submarino de esgotos de Santos / São Vicente e de monitoramento ambiental da área sob influência dos emissários submarinos de esgotos de Praia Grande - Subsistemas 1, 2 e 3. Relatório técnico. Volume 02 (Avaliação do monitoramento de Praia Grande), São Paulo: SABESP, 2006b. 380p.
- SABESP. Relatório de integração do monitoramento da qualidade das águas e dos sedimentos da disposição oceânica dos emissários submarinos e dos esgotos afluentes e efluentes das estações de pré-condicionamento dos sistemas de esgotos sanitários do Guarujá, de Santos e São Vicente e da Praia Grande. Relatório técnico. Volume 01. São Paulo: DTA Engenharia, 2013. 511p.
- SAHA, S.; MOORTHI, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; BEHRINGER, D.; HOU, Y.; CHUANG, H.; IREDELL, M.; EK, M.; MENG, J.; YANG, R.; MENDEZ, M.P.; VAN DEN DOOL, H.; ZHANG, Q.; WANG, W.; CHEN, M. & BECKER, E. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, v. 27, pp. 2185 - 2208, March 2014.
- SAMPAIO, A.F.P.; MATEUS, M.; RIBEIRO, R.B.; BERZIN, G. A modelling approach to the study of faecal pollution in the Santos Estuary. In: NEVES, R.; BARETTA, J.; MATEUS, M. *Perspectives on integrated coastal zone management in South America*. Lisboa: Editora Universitária do Instituto Superior Técnico, 2008, pp. 425 - 434.
- SUTTI, B.O. Estudo hidrológico e da qualidade da água de dois rios tributários do Canal de Bertoga, município de Guarujá (SP), sujeitos a diferentes níveis de interferências antropogênicas. Dissertação de Mestrado, Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade de Ecossistemas Costeiros e Marinhos, Santos: 2014. 114p.
- WALSH, J.L. History of the Riemann Mapping Theorem. *The American Mathematical Monthly*, 80, 3, pp. 270 - 276, March 1973.

- WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of the model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 11, pp. 1309-1313, November 1982.
- YANG, S.H. Análise das condições ambientais e da dispersão de plumas de efluentes na região costeira centro-sul do Estado de São Paulo com uso da modelagem numérica. Dissertação de Mestrado, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (Procam), São Paulo: 2016. 299p.
- YANG, S.H. Análise de condições hidrodinâmicas e da qualidade da água na região costeira central do Estado de São Paulo através de modelagem numérica. Tese de Doutorado, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (Procam), São Paulo: 2022. 638p.
- YANG, S.H.; HARARI, J. & BRAGA, E.S. Análise da qualidade da água no litoral dos municípios de Praia Grande e Itanhaém – São Paulo, Brasil. In: SINISGALLI, P.A.A. & JACOBI, P.R. *Caminhos do conhecimento em interdisciplinaridade e meio ambiente*. São Paulo: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2018, pp. 60-81.
- YANG, S.H.; HARARI, J. & BRAGA, E.S. Modelagem de plumas de efluentes entre Praia Grande e Peruíbe, litoral do Estado de São Paulo, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24(4): pp. 697 - 708, Julho/Agosto 2019.
- YANG, S.H.; HARARI, J.; RIBEIRO, R.B.; CORTEZ, T. & RUIZ, M.S. Efeitos da intensificação de tempestades em praias do Estado de São Paulo, Brasil. In: *Anais do 9º Congresso sobre Planejamento e Gestão Costeira dos Países de Expressão Portuguesa*, Lisboa, 2019.
- YUKSELEN, M.A.; CALLI, B.; GOKYAY, O. & SAATCI, A. Inactivation of coliform bacteria in Black Sea waters due to solar radiation. *Environment International*, n. 29, pp. 45-50, 2003.

