

Emissários submarinos de esgotos como alternativa à minimização de riscos à saúde humana e ambiental

Ocean outfalls as an alternative to minimizing risks to human and environmental health

Renato Castiglia Feitosa ¹

Abstract *Submarine outfalls are proposed as an efficient alternative for the final destination of wastewater in densely populated coastal areas, due to the high dispersal capacity and the clearance of organic matter in the marine environment, and because they require small areas for implementation. This paper evaluates the probability of unsuitable bathing conditions in coastal areas nearby to the Ipanema, Barra da Tijuca and Icaraí outfalls based on a computational methodology gathering hydrodynamic, pollutant transport, and bacterial decay modelling. The results show a strong influence of solar radiation and all factors that mitigate its levels in the marine environment on coliform concentration. The aforementioned outfalls do not pollute the coastal areas, and unsuitable bathing conditions are restricted to nearby effluent launching points. The pollution observed at the beaches indicates that the contamination occurs due to the polluted estuarine systems, rivers and canals that flow to the coast.*

Key words *Ocean outfalls, Coliform, Water pollution*

Resumo *Emissários submarinos são apresentados como uma eficiente alternativa para o destino final de efluentes sanitários em regiões costeiras densamente povoadas em virtude da elevada capacidade de dispersão e depuração da matéria orgânica no ambiente marinho, e por demandar pequenas áreas para sua implementação. A probabilidade de condições impróprias de balneabilidade, em áreas costeiras adjacentes aos emissários submarinos de esgotos de Ipanema, Barra da Tijuca e Icaraí, é avaliada com base em metodologia computacional probabilística que contempla em conjunto a modelagem hidrodinâmica, de transporte e decaimento bacteriano. Os resultados mostram que as concentrações de coliformes fecais são influenciadas fortemente pela radiação solar e todos os fatores responsáveis por sua mitigação no ambiente marinho. Os referidos emissários não comprometem a balneabilidade na região costeira, visto que as condições impróprias de balneabilidade são restringidas às regiões adjacentes aos pontos de lançamento do efluente. A poluição observada nas praias é indicativa da contaminação que ocorre pelos sistemas lagunares, rios e canais ambientalmente degradados.*

Palavras-chave *Emissários submarinos, Coliformes, Poluição de águas*

¹ Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz. Av. Brasil 4365, Manguinhos. 21040-900 Rio de Janeiro RJ Brasil. rcfeitosa71@gmail.com

Introdução

A ocupação litorânea das principais cidades brasileiras tem se intensificado continuamente nos últimos anos. O adensamento populacional nas áreas litorâneas brasileiras não tem sido acompanhado por instalações adequadas de esgotamento sanitário. Nas últimas décadas a qualidade das águas costeiras tem sofrido um intenso processo de degradação pelo lançamento de esgotos domésticos que escoam para as praias sem qualquer tratamento, seja em despejos diretos ou através das redes de drenagem pluviais.

A contaminação das praias ocorre diretamente por fontes pontuais ou difusas ao longo da faixa litorânea, ou indiretamente por ligações com sistemas fluviais e lacunares, que pela falta de redes de esgotamento e tratamento das águas residuárias, acabam funcionando como coletores naturais de resíduos sólidos e líquidos. Tal fato remete à constante contaminação observada das praias, expondo as populações ao risco de contrair doenças tanto por contato primário como secundário com as águas poluídas.

Sistemas de esgotamento sanitário têm como objetivo minimizar os impactos decorrentes da poluição dos cursos d'água no que diz respeito tanto à preservação do meio ambiente, quanto à promoção de melhores condições de saúde pública. Entretanto, em regiões litorâneas a intensa ocupação do solo por empreendimentos imobiliários não disponibiliza espaço nem sequer para o tratamento do próprio esgoto gerado.

A disposição de esgotos através de emissários submarinos tem sido apontada como uma eficiente alternativa para o destino final de efluentes sanitários, em virtude da elevada capacidade de dispersão e depuração da matéria orgânica no ambiente marinho. Esta capacidade reside na intensa energia disponível no ambiente marinho em função da ação das correntes na dispersão do efluente, disponibilidade de oxigênio dissolvido, e por se apresentar como ambiente hostil à sobrevivência de microrganismos.

Estudos anteriores foram realizados por Feitosa^{1,2} na avaliação do impacto do lançamento de esgotos domésticos em águas costeiras. De acordo com a legislação CONAMA 274/2000, a avaliação da qualidade de águas é feita através da concentração de microrganismos indicadores de contaminação fecal, que permite avaliar a probabilidade de contaminação da população por microrganismos patogênicos de origem entérica. O uso de coliformes fecais como indicador na quantificação do grau de contaminação fecal

de águas costeiras por efluentes de emissários submarinos é justificado pelas altas densidades observadas destes microrganismos nos esgotos domésticos.

No presente trabalho são apresentados estudos relativos à probabilidade ocorrência de condições impróprias de balneabilidade na regiões costeiras adjacentes aos emissários submarinos de esgotos da Barra da Tijuca (ESEBT), Ipanema (ESEI) e Icaraí (ESEIC). Os dois primeiros estão localizados, respectivamente, na zona oeste e sul do município do Rio de Janeiro, enquanto que o último faz parte do de Niterói. Objetivava-se identificar se há ocorrência de contaminação das zonas balneáveis pelos referidos emissários, e quais seriam as possíveis fontes adicionais de contaminação.

Fundamentação teórica

Emissários submarinos de esgotos: definição, critérios de seleção e processos de mistura

Os emissários submarinos são basicamente constituídos por uma tubulação que transporta os efluentes domésticos gerados nas cidades litorâneas para o descarte final em alto mar. No Rio de Janeiro, os principais emissários são os da Barra da Tijuca, Ipanema e Icaraí.

No início da implantação dos sistemas de disposição oceânica não havia uma legislação específica para o tema. A título de exemplo, o emissário de Ipanema, implantado em 1975, promove o lançamento bruto de efluentes domésticos condicionados apenas por um sistema de peneiramento grosseiro. Atualmente a emissão de efluentes domésticos por emissários submarinos é regulamentada pelo Protocolo de Annapolis, da mesma forma que a emissão de gases foi regulamentada pelo Protocolo de Kioto. A Figura 1 ilustra esquematicamente a concepção dos emissários submarinos de esgotos. O esgoto coletado é encaminhado para tratamento prévio e posterior lançamento no meio aquático por meio de interceptor oceânico com tubulação difusora, a qual é composta por múltiplos orifícios com a finalidade de proporcionar a máxima diluição do efluente.

Os critérios para seleção dos emissários abrangem estudos populacionais, geográficos, oceanográficos, sanitários, hidráulicos, econômicos e microbiológicos. Do ponto de vista populacional e geográfico, é necessário o estudo da população

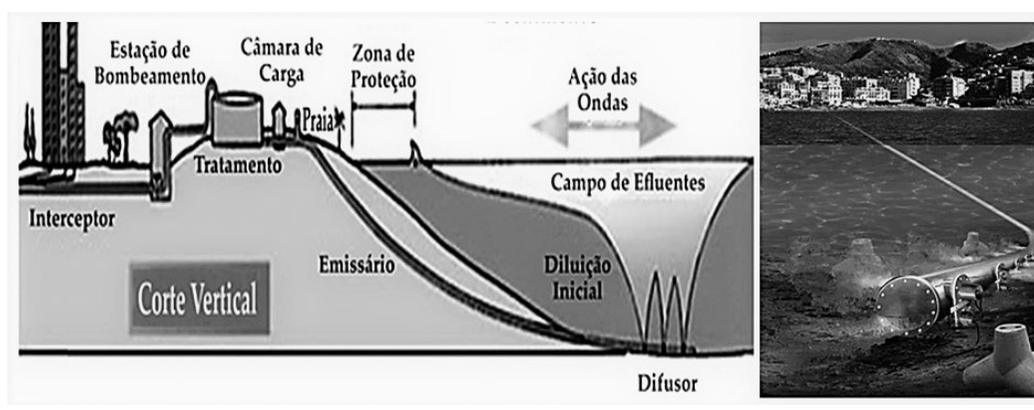


Figura 1. Esquema da descarga do efluente através de emissários submarinos.

atual e futura a ser atendida, e a segmentação geográfica das regiões a serem esgotadas. Os aspectos oceanográficos apresentam relevância na caracterização das correntes marinhas, uma vez que estas são mandatórias na determinação do ponto de lançamento do efluente. Adicionalmente, se faz necessário o entendimento dos perfis de densidade ambiente por regularem a mistura do efluente. Os estudos sanitários compreendem o nível de tratamento a ser dado ao efluente antes do seu lançamento no meio, que varia de acordo com parâmetros referentes às legislações locais, e que em alguns casos passam a ter relação com o ponto de lançamento. A título de exemplo, maiores níveis de tratamento passam a condicionar o efluente de modo a permitir seu lançamento em regiões mais próximas aos limites de balneabilidade. O viés econômico se baseia no método construtivo e no tipo de tubulação empregada. A concepção hidráulica não só é caracterizada pelo tipo de material empregado na tubulação como também considera os aspectos da linha difusora responsável pelos níveis de diluição do efluente. Os aspectos microbiológicos estão relacionados ao indicador escolhido na avaliação de qualidade de águas e serão abordados no tópico a seguir referente ao decaimento bacteriano.

Os critérios referentes aos emissários em questão foram estabelecidos na ocasião dos projetos dos mesmos, e são anteriores ao presente trabalho. Estudos prévios foram realizados de modo a fornecer subsídios para a implantação do emissário submarino da Barra da Tijuca. A Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro – CEDAE³ apresentou um relatório de impacto ambiental que levou em consideração

três opções na escolha do ponto de lançamento do efluente. Roberts⁴ avaliou a dispersão e a diluição da pluma de esgoto do referido emissário cuja caracterização hidrodinâmica se baseou em campanhas oceanográficas.

Deste modo, cabe ressaltar que os resultados aqui apresentados constituem um estudo de pós-avaliação das condições de balneabilidade nas regiões adjacentes ao ponto de lançamento dos efluentes.

No processo de mistura inicial do esgoto com a água ambiente, há duas regiões com características marcadamente distintas. A primeira ocorre nas proximidades da tubulação difusora do emissário. Esta região denominada campo próximo possui característica turbulenta, onde a mistura inicial do efluente com a água ambiente é intensa em função da velocidade do jato proveniente dos orifícios difusores. Após a mistura turbulenta inicial ocorre a transição para uma região do campo afastado, de menor turbulência, onde um processo menos intenso de mistura do efluente é governado pela ação das correntes oceânicas, e onde se inicia a degradação microbiológica. A seguir é apresentada uma descrição qualitativa específica para cada uma das regiões de mistura.

Região do campo próximo: Em cada orifício da tubulação difusora é formado um jato efluente cuja intensidade é muito superior a das correntes marinhas locais. Esta é uma região caracterizada pela mistura turbulenta do efluente com a água ambiente. Adicionalmente, uma vez lançado no ambiente a pluma efluente ascende devido à sua menor densidade quando comparada à da água marinha. No campo próximo são estabelecidas as principais características da pluma efluente: di-

luição inicial, elevação na coluna d'água e espessura. Estas características dependem fortemente das correntes incidentes sobre a tubulação difusora e do perfil de densidades ao longo da coluna d'água. Para condições semelhantes de correntes, quanto mais pronunciadas forem as variações de densidade da coluna d'água, entre o ponto de lançamento do efluente e a superfície livre, maior será a atenuação da mistura do efluente com o meio. Tal condição remete simultaneamente a uma menor elevação da pluma ao longo da coluna d'água, e menores níveis de diluição do efluente. Sob condições homogêneas de densidade ao longo da coluna a pluma sempre atinge a superfície livre. O posicionamento da pluma na coluna d'água é de extrema importância no decaimento bacteriano, uma vez que a radiação solar incidente depende fortemente da profundidade na qual a pluma encontra-se estabelecida.

Região do Campo afastado: Nesta região a pluma já estabilizada em uma determinada profundidade passa a ser transportada exclusivamente pelas correntes oceânicas, sob regime de turbulência significativamente inferior ao observado na região do campo próximo. A distribuição da concentração de coliformes no corpo d'água passa a depender das taxas de decaimento bacteriano.

Decaimento bacteriano

A quantificação do decaimento de bactérias indicadoras de contaminação fecal é de extrema importância na determinação dos níveis de concentração destes microrganismos em águas costeiras. Vários estudos de campo e laboratório têm sido realizados no intuito de se determinar as taxas de decaimento de microrganismos indicadores de contaminação no ambiente marinho. Feitosa e Rosman⁵ verificaram, através de uma compilação de estudos divulgados na literatura, a correlação do decaimento bacteriano com variações de temperatura, salinidade e radiação solar.

Temperatura: De acordo com Oliveira⁶, as variações de temperatura podem afetar nos microrganismos a velocidade de crescimento, exigências nutricionais, atividade enzimática e composição química.

Estudos⁷⁻¹⁰ mostram que a taxa de decaimento de bactérias do grupo coliforme é diretamente proporcional à temperatura. Noble et al.¹⁰ também verificaram um efeito significativo da temperatura sobre as taxas de decaimento de enterococos.

A temperatura possui maior influência no decaimento bacteriano na ausência de radiação

solar. Sob ação luminosa os efeitos da temperatura tornam-se pouco relevantes quando comparado aos efeitos da radiação¹¹⁻¹³.

Efeitos osmóticos – salinidade: Uma vez em águas marinhas, as bactérias entéricas estão sujeitas a um choque osmótico repentino. Deste modo, tais variações nas concentrações de sais nos meios em que são submetidas, irão influenciar a sobrevivência destes microrganismos no ambiente marinho⁸. Segundo Oliveira⁶, a salinidade influencia na velocidade de crescimento, fisiologia e reprodução da flora microbiana.

Em águas salgadas, a concentração de sais do meio é superior à concentração intracelular microbiana. Deste modo há passagem de água do meio intra para o extracelular, através da membrana plasmática, ocasionando a plasmólise, que corresponde à diminuição ou encolhimento desta. A importância deste fenômeno está na inibição do crescimento no momento em que a membrana plasmática se separa da parede celular¹⁴.

Alguns trabalhos^{9,15-17} observaram crescimento na taxa de decaimento de bactérias entéricas com o aumento dos níveis de salinidade.

Foto-oxidação: A radiação solar é de grande relevância no decaimento bacteriano. São encontradas correlações significativas entre as taxas de mortalidade de coliformes e a quantidade de radiação solar incidente^{7,9-13,15-24}. Microrganismos patogênicos, tais como *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Poliovirus* e *Salmonella*, apresentaram maior sobrevivência na ausência de radiação solar²⁵.

Segundo Chamberlin e Mitchell¹⁵ há evidências convincentes de que a variabilidade das taxas de decaimento de coliformes em águas marinhas pode ser primeiramente atribuída à intensidade luminosa na superfície livre, seguida de outros fatores no perfil de luminosidade ao longo da profundidade.

Fatores influentes nos níveis de radiação solar

As variações da radiação solar que chegam à atmosfera terrestre dependem dos seguintes fatores:

Variações na constante solar: A Constante Solar varia com a distância entre a terra e o sol. Esta variação de distância ocorre ao longo dos dias do ano em função da órbita elíptica da terra em relação ao sol. Entretanto, cabe ressaltar que estas variações são muito pequenas uma vez que a órbita da terra é praticamente circular.

Latitude e estações do ano: A latitude e as estações do ano influenciam a quantidade de ra-

dição incidente em uma determinada localidade na superfície terrestre. Estes dois fatores são responsáveis por variações na declinação solar em um ponto qualquer no planeta. Quanto mais perpendicular for a incidência de radiação maior será a quantidade de radiação recebida.

A Terra descreve em trajetória elíptica em torno do sol num plano que é inclinado em aproximadamente 23,5° em relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias do ano. Em qualquer época do ano, as condições que ocorrem no hemisfério sul, em termos de luminosidade e temperatura, são opostas às que ocorrem no hemisfério norte.

Condições meteorológicas e oceanográficas: São responsáveis pela atenuação da luz solar até atingir a pluma efluente, que pode estar junto à superfície livre ou submersa. A primeira ocorre em função das condições de nebulosidade, e atua na mitigação da radiação solar até atingir a superfície do mar. Em condições de céu claro a intensidade da radiação solar é aproximadamente três vezes maior do que condições de total nebulosidade¹. A segunda responde pela atenuação da luz solar ao penetrar o meio líquido, e está diretamente ligada às condições oceanográficas representadas pela turbidez, e pelo perfil de densidade do meio que irá limitar a mistura do efluente e a profundidade de confinamento da pluma.

Metodologia

A avaliação dos níveis de concentração da pluma efluente de emissários submarinos está baseada no uso de modelos computacionais hidrodinâmicos e de qualidade de águas. A seguir é apresentada uma descrição das etapas de implementação dos modelos visando caracterizar a circulação costeira e o transporte da pluma de contaminantes dos emissários submarinos da Barra da Tijuca, Ipanema e Icaraí. A modelagem hidrodinâmica e do transporte de contaminantes foi realizada através do sistema de modelos SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ²⁶. O modelo de campo próximo NRFIELD, baseado na metodologia de Roberts et al.²⁷, foi empregado na determinação da profundidade e espessura da pluma, necessárias na quantificação dos níveis de radiação solar incidentes sobre a pluma. A quantificação

da radiação solar incidente na superfície livre se baseia na formulação proposta por Martin e McCutcheon²⁸.

Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica consiste basicamente da determinação do padrão de correntes e níveis dos corpos d'água naturais ou artificiais, tais como rios, canais, lagos, Baías, estuários, mares e oceanos.

A modelagem permite o prognóstico hidrodinâmico, baseado na simulação de cenários pré-determinados que objetivam prever, por exemplo, o padrão de correntes em uma baía durante o período de maré enchente ou vazante, sob diferentes condições de ventos e outros parâmetros ambientais. Adicionalmente, é útil no diagnóstico ambiental no caso de falta de dados de medições disponíveis, e imprescindível para a modelagem da qualidade de águas.

Modelagem da pluma de coliformes

Neste estudo as bactérias coliformes fecais são consideradas como contaminantes de referência. As concentrações da pluma de contaminantes são de grande importância na delimitação das áreas que se encontram em limites aceitáveis de balneabilidade. Estes limites são classificados de acordo com a resolução Conama n° 274, de 2000, como valores inferiores a 1000 Coliformes fecais/100ml.

A modelagem da pluma de coliformes é subdividida em duas etapas distintas. A primeira constitui a modelagem do campo próximo. Nesta etapa, os dados de correntes gerados previamente pelo módulo hidrodinâmico, juntamente com o perfil de densidades ao longo da coluna d'água fornecidos como arquivo de entrada, são processados pelo modelo NRFIELD, na determinação da espessura e profundidade de confinamento da pluma efluente. Estas características são de grande relevância na modelagem do campo afastado na quantificação da fração da radiação solar incidente na superfície livre que atuará efetivamente ao longo da espessura da pluma. A segunda etapa da modelagem da pluma de contaminantes compreende a resolução do campo afastado, caracterizada pelo transporte do contaminante pelo campo de correntes gerado na modelagem hidrodinâmica, e por seu decaimento em função das variações ambientais de temperatura, salinidade e radiação solar. Visto que os níveis de radiação solar são preponderantes nas cinéticas de decaimento bacteriano, é necessária nesta etapa

de modelagem a inserção de dados referentes aos fatores que atuam direta ou indiretamente na sua atenuação durante o período da simulação. Esta atenuação ocorre tanto através da propagação da luz pela atmosfera quanto pelo meio líquido até a posição onde a pluma de contaminantes se encontra ao longo da coluna d'água. O percentual de cobertura de nuvens é o principal fator responsável pela atenuação da luz solar na atmosfera. Similarmente, dados referentes ao grau de turbidez da água ambiente são considerados de modo a indicar o grau de penetração da luz solar no meio líquido. Na modelagem de bactérias indicadoras, a taxa de decaimento é comumente representada pelo parâmetro T_{90} , que corresponde ao tempo necessário para que ocorra uma redução de 90% na população original de bactérias.

As taxas de decaimento bacteriano foram obtidas a partir da equação de Mancini⁹, que considera a variação simultânea da temperatura, salinidade e radiação solar ao longo da espessura da pluma. Esta metodologia apresenta boa capacidade preditiva da taxa de degradação de coliformes no ambiente marinho, de acordo com estudo realizado por Feitosa et al.²⁹

Os níveis de radiação solar empregados na modelagem foram calculados através do modelo proposto por Martin e McCutcheon²⁸. Os dados de entrada compreendem: dia, mês e ano do início da simulação; latitude da região de estudo; dados referentes ao nível de turbidez ambiente; temperatura de ponto de orvalho; e percentual de cobertura de nuvens.

Características da região de estudo e do lançamento de efluentes

Os emissários de Ipanema, Barra da Tijuca e Icaraí, recebem contribuição de esgotos cujas áreas de abrangência em relação às redes coletoras são distintas. Deste modo, o primeiro emissário citado possui a maior contribuição de esgotos, seguido pelos da Barra da Tijuca e Icaraí. Com base nisto, foram consideradas vazões constantes de 7,5, 5 e 1 m³/s, respectivamente.

Uma das premissas mais importantes na avaliação das concentrações de bactérias em plumas de emissários é a concentração inicial do efluente no instante do lançamento no meio. Neste estudo, foi considerada, para o emissário de Ipanema, uma concentração inicial de coliformes fecais típica de esgoto bruto de 7.10⁷ NMP/100ml, superior à dos emissários da Barra da Tijuca e Icaraí. Isto se deve ao fato de não haver, na época da implantação do referido emissário, exigências legais

quanto aos padrões de lançamento de efluentes domésticos em águas costeiras. Atualmente, uma legislação estadual exige tratamento primário, prévio ao lançamento no meio, que reduz as concentrações de coliformes fecais em aproximadamente 40%. Deste modo, foi adotada para os emissários da Barra de Tijuca e Icaraí uma concentração de 4,2.10⁷ NMP/100ml.

Resultados

A avaliação da contaminação de praias por emissários submarinos está baseada em resultados de modelagem probabilística computacional onde são avaliados três cenários distintos que compreendem diferentes condições sazonais (verão e inverno) e meteorológicas (céu claro e nublado).

Na Tabela 1 são apresentados os níveis máximos de radiação solar particulares para cada cenário na superfície livre e ao longo da espessura da pluma no meio líquido.

Em relação aos cenários acima citados, as condições de verão e inverno compreendem períodos de simulação de 14 dias, tomando como referência níveis de radiação dos meses de janeiro e junho, respectivamente. As condições meteorológicas de céu claro e totalmente nublado são referentes a percentuais de cobertura de nuvens de 5% e 100%. Em todos os cenários são consideradas situações de densidade de coluna d'água homogênea, que remete à condição de pluma efluente superficial ao longo de todas as simulações. Neste caso, pode-se afirmar que a intensidade de radiação solar atuante sobre a pluma se deva exclusivamente às variações horárias e de cobertura nebulosa.

Adicionalmente às características sazonais e meteorológicas supracitadas, no que diz respeito à penetração da luz no ambiente aquático, foram consideradas, em todos os cenários, plumas superficiais com espessura de 10 metros. Os níveis de turbidez são determinados pela profundidade do disco de Secchi (profundidade a partir da qual o disco não pode mais ser detectado a olho nu) que quantifica o grau de penetração dos raios solares no meio líquido. A profundidade do disco de Secchi adotada nas regiões adjacentes aos emissários submarinos da Barra da Tijuca e Ipanema foi de 8 metros. No caso do emissário submarino de Icaraí foi considerada uma profundidade de Secchi de 4 metros devido ao maior nível de turbidez das águas da Baía de Guanabara.

Os resultados apresentados nas Figuras 2, 3 e 4 mostram mapas com percentuais de proba-

bilidade referentes às condições impróprias de balneabilidade. As probabilidades apresentadas indicam o percentual de tempo, ao longo dos 14 dias de simulação, cujas concentrações de bactérias coliformes fecais em águas costeiras estão superiores às estabelecidas como satisfatória pela legislação Conama 274/2000. Os mesmos padrões de correntes são considerados nos três cenários apresentados. Deste modo, as diferenças entre os índices de probabilidade observados nas figuras devem-se exclusivamente à variação dos

níveis de radiação solar existentes em cada cenário simulado.

Dentre os cenários simulados, a condição de verão com céu totalmente nublado (Figura 3) apresenta a situação mais desfavorável, observando-se concentrações de coliformes fecais impróprias na maior parte do tempo na região delimitada entre os emissários da Barra da Tijuca e Ipanema.

A melhor condição observada ocorre durante o cenário de verão com céu claro, e a condição

Tabela 1. Características empregadas nos cenários simulados.

Emissário	Características do emissário		Radiação solar máxima na superfície livre (W/m ²)			Turbidez	Radiação solar máxima na pluma efluente (W/m ²)		
	Vazão (m ³ /s)	Concentração de coliformes fecais (NMP/100ml)	Verão céu claro	Verão nublado	Inverno céu claro	Profundidade de Secchi (metros)	Verão céu claro	Verão nublado	Inverno céu claro
Barra da Tijuca	5	4,2.10 ⁷	991	345	593	8	378	132	227
Ipanema	7,5	4,2.10 ⁷	991	345	593	8	378	132	227
Icaraí	1	7.10 ⁷	991	345	593	4	207	72	124

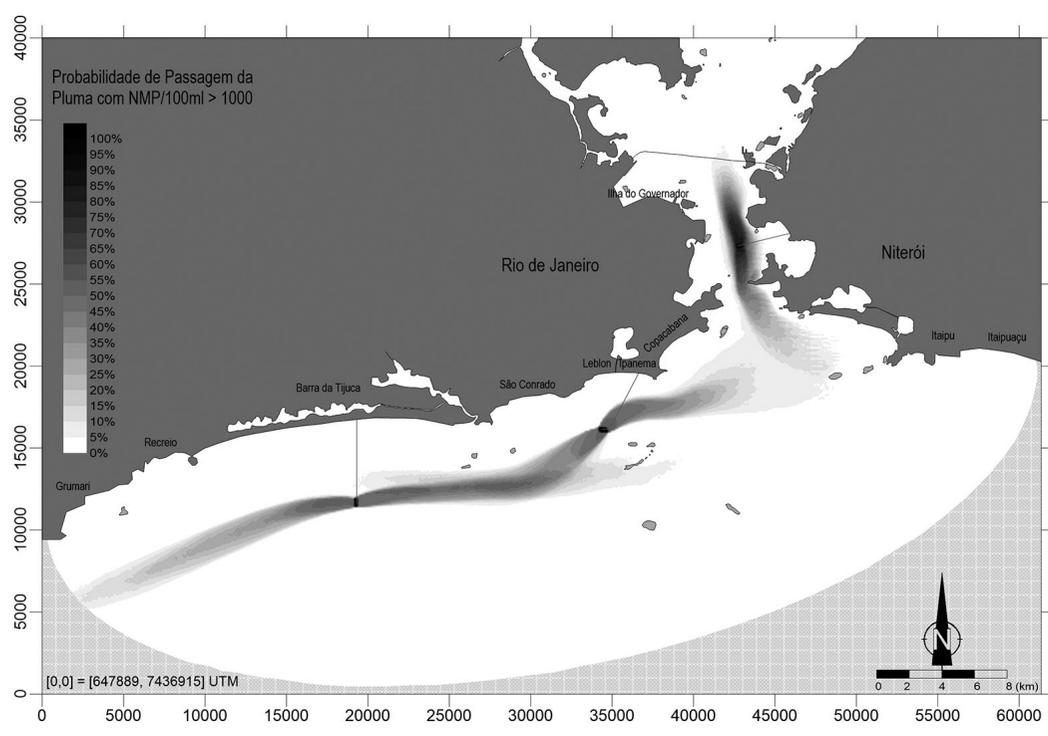


Figura 2. Níveis de probabilidade de concentrações impróprias de coliformes fecais em águas costeiras nas condições de verão e céu claro. As escalas horizontais e verticais estão indicadas em metros.

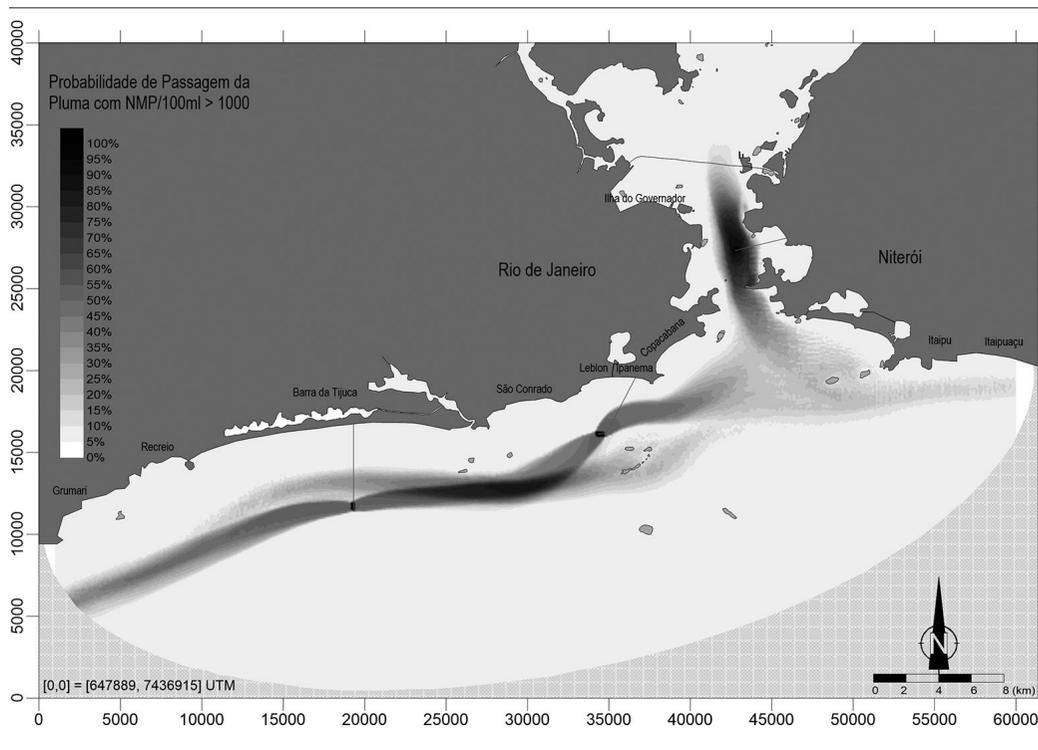


Figura 3. Níveis de probabilidade de concentrações impróprias de coliformes fecais em águas costeiras nas condições de verão e céu totalmente nublado. As escalas horizontal e vertical estão indicadas em metros.

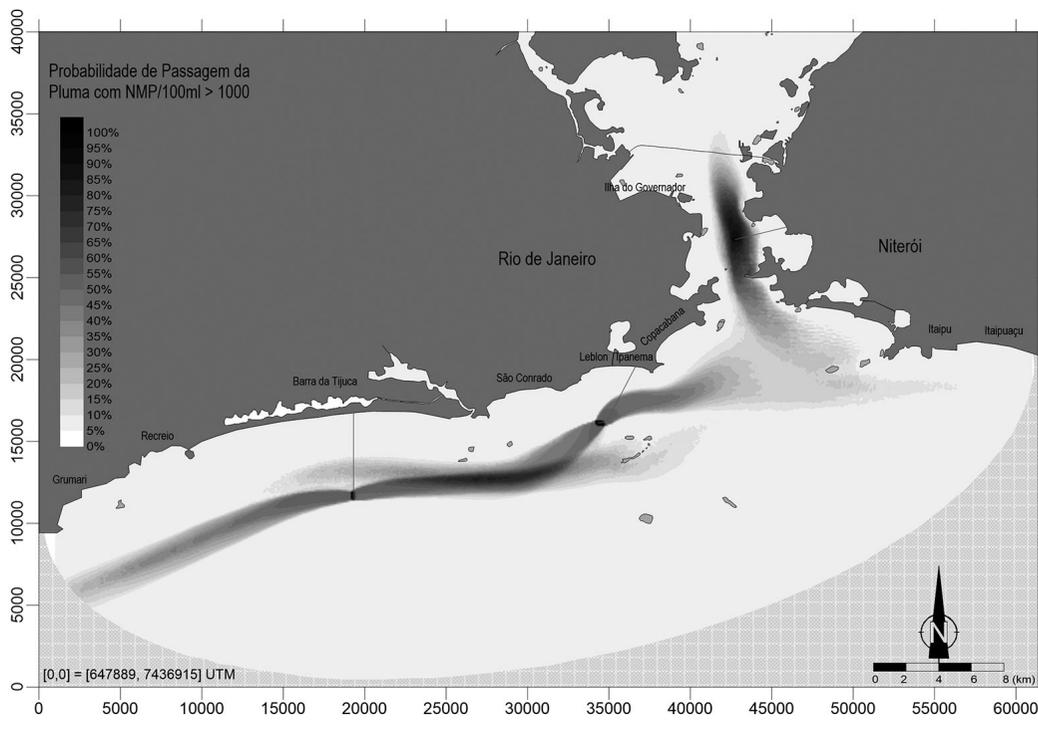


Figura 4. Níveis de probabilidade de concentrações impróprias de coliformes fecais em águas costeiras nas condições de inverno e céu claro. As escalas horizontal e vertical estão indicadas em metros.

intermediária ocorre no inverno com céu claro. Devido ao descarte de efluentes domésticos pelo emissário submarino de Icarai, a região adjacente à embocadura da Baía de Guanabara apresenta concentrações acima das permissíveis pela legislação na maior parte do tempo nos três cenários simulados.

Discussão

A degradação microbiológica no ambiente marinho mostrou uma relação direta com o aumento dos níveis de radiação solar incidente no meio líquido. Estudos de campo^{10,11,19,24} evidenciam a ação deletéria da radiação solar na degradação microbiana em águas marinhas e reforçam os padrões dos resultados observados no presente trabalho.

Em todos os cenários simulados, o lançamento de esgotos no meio ocorreu exclusivamente pelos emissários, não tendo sido considerados os pontos de lançamento situados junto à costa, provenientes de rios, sistemas lagunares e descargas pluviais. Deste modo, nos resultados apresentados não se observa o comprometimento da qualidade das águas na zona de balneabilidade. Isto é, os efluentes domésticos descartados pelos emissários não contaminam as praias.

Nas regiões ao entorno dos pontos de lançamento dos efluentes, suficientemente afastadas da linha de costa, se observam percentuais significativos de ocorrência de condições impróprias de balneabilidade. Adicionalmente, entre os emissários submarinos da Barra da Tijuca e Ipanema são constatadas zonas cuja balneabilidade fica comprometida em boa parte do tempo, devido à conjunção das suas respectivas plumas efluentes.

Comparativamente, se observa uma maior frequência de condições impróprias nas cercanias do emissário submarino de Icarai. Isto se deve a maior turbidez das águas da Baía de Guanabara em relação às adjacentes aos pontos de lançamento dos efluentes da Barra de Tijuca e Ipanema.

O estudo de impacto ambiental para a implantação do emissário submarino da Barra da Tijuca⁴ corroborou os resultados anteriormente apresentados no que diz respeito ao não comprometimento das zonas de balneabilidade pelo efluente do referido emissário. Fato similar também é comprovado pelo estudo realizado por Schaffel et al.³⁰, que avaliou a contaminação fecal das águas superficiais nas imediações do emissário submarino de Ipanema. Em ambos os casos foi constata-

tado que a contaminação das águas ocorre apenas nas regiões adjacentes aos pontos de lançamento dos efluentes, e que as ocasiões impróprias de balneabilidade indicam ser decorrentes da contaminação pelos canais e redes de drenagem poluídas que se comunicam com as praias.

No que diz respeito ao emissário de Icarai, os resultados observados mostram correlação com o estudo apresentado por Coelho³¹, o qual verificou uma piora na qualidade das águas em medições realizadas entre 2000 e 2005 na estação de monitoramento localizada no canal central de acesso à Baía. Tal fato indica estar relacionado à implantação, em 2001, do emissário submarino de esgotos de Icarai durante as obras do Programa de Despoluição da Baía de Guanabara (PDBG), que passou a descartar os efluentes no canal central. Entretanto, cabe ressaltar que após o início do funcionamento do referido emissário foi observada uma melhora na qualidade das águas da Praia de Icarai³¹.

Conclusões e recomendações

Na avaliação de qualidade de águas, bactérias do grupo coliforme são utilizadas como contaminantes referenciais. A radiação solar se apresenta como fator de maior relevância no decaimento de bactérias no ambiente marinho. Temperatura e salinidade são fatores relevantes apenas na ausência de radiação solar.

Os índices de concentração de coliformes fecais no meio possuem uma elevada correlação com os níveis de radiação solar incidente. Deste modo, todos os parâmetros meteorológicos e oceanográficos que interferem direta e indiretamente na intensidade de radiação solar são de grande relevância no estudo da pluma de concentração de coliformes.

A modelagem de plumas de emissários submarinos de esgotos tem se tornado objeto de extrema relevância, tanto na avaliação de impactos promovidos pelo lançamento destes efluentes no meio aquático, quanto na tomada de decisões relativas ao ponto de lançamento ideal, de modo a evitar a contaminação das áreas balneáveis.

O presente estudo objetivou avaliar o potencial de contaminação das zonas balneáveis pelos emissários submarinos da Barra da Tijuca, Ipanema e Icarai. Os resultados mostram que os referidos emissários não comprometem a qualidade das águas das praias, indicando que a contaminação destas ocorre pela sua ligação com sistemas de rios e canais poluídos que desaguam na costa.

De forma a corroborar o acima exposto, o estudo realizado por Vieira et al.³² atestou que as condições de balneabilidade na praia do Leblon se mostraram dependentes das observadas nos Canais do Jardim de Alah e Visconde de Albuquerque, o qual possui ligação com o Rio dos Macacos cujas águas são de baixa qualidade. No que concerne à região da Barra da Tijuca, a contaminação da praia ocorre principalmente pela sua ligação com o complexo lagunar de Jacarepaguá. Com base em boletim do Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA)³³ de abril de 2016 o referido complexo apresentou elevados níveis de contaminação microbiológica, o que mostra considerável estágio de degradação de suas águas. Adicionalmente ao exposto, Coelho³¹ também cita as galerias de drenagem de águas pluviais como agentes adicionais de poluição da faixa litorânea.

Atualmente, medidas são adotadas para mitigar a poluição. A título de exemplo, um barramento localizado na foz canal Visconde de Albuquerque impede, durante tempo seco, a contaminação da praia do Leblon pelas águas deste canal, que impedidas de desaguar no mar são encaminhadas para o emissário submarino de Ipanema.

Como exemplo internacional, no que diz respeito à eficiência na despoluição costeira decorrente da adoção de sistemas de disposição oceânica de esgotos (emissários submarinos), foi

constatada na década de 1990, em Sydney (Austrália), uma melhora significativa da qualidade das águas costeiras a partir da implantação dos mesmos (Sydney Water³⁴).

Por mais abrangente que sejam as redes coletoras de esgotos e mais eficientes os sistemas de tratamento, a elevada carga orgânica existente devido à elevada concentração populacional é capaz de comprometer e impactar os ecossistemas fluviais, lacunares, estuarinos e praias adjacentes, expondo a população ao risco através do contato com águas contaminadas. A Organização Mundial de Saúde, com o patrocínio solidário da USEPA (United States – Environment Protection Agency), publicou, em 1999, o “Protocolo de Annapolis”, inserido em uma série de documentos denominada como Proteção do Meio Ambiente do Homem - Água, Saneamento e Saúde. Este documento trata em seu texto o emprego de emissários submarinos como sistemas de disposição de esgotos sanitários como uma alternativa de muito baixo risco para a saúde humana, na qual a probabilidade de contato primário de banhistas com águas contaminadas é minimizada. Embora haja o impacto pontual no ponto de lançamento do efluente, o uso de sistemas de disposição oceânica de esgotos sanitários se apresenta como uma alternativa na preservação dos ambientes costeiros.

Referências

1. Feitosa RC. *Modelagem da Pluma do Emissário Submarino da Barra da Tijuca com T_{90} Variável* [dissertação]. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ; 2003.
2. Feitosa RC. *Acoplamento de Modelos de Campo Próximo e Campo Afastado com Cinética de Decaimento Bacteriano Variável – Aplicações em Emissários Submarinos* [tese]. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ; 2007.
3. Companhia Estadual de Águas e Esgotos (Cedae). *Estudo de Impacto Ambiental do Emissário de Esgotos Sanitários da Barra da Tijuca. Companhia Estadual de Águas e Esgotos – Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Cedae; 1988.
4. Roberts PJW. Dilution and Transport Prediction for Ocean Outfall. *Water Science and Tech* 1989; 21(8-9):969-979.
5. Feitosa RC, Rosman PCC. Emissários Submarinos de Esgotos: Aspectos de Qualidade de Água e Modelagem Computacional. In: Silva RCV, organizador. *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos VIII*. Porto Alegre: ABRH; 2008. p. 1-170.
6. Oliveira RB. *Indicadores de Poluição e Taxionomia de Leveduras do Estuário do Rio Paraíba do Norte, João Pessoa – PB, Brasil* [tese]. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ; 1990.
7. Šolic M, Krstulovic N. Separated and Combined Effects of Solar Radiation, Temperature, Salinity and pH on the Survival of Faecal Coliforms in Seawater. *Marine Pollution Bulletin* 1992; 24(8):411-416.
8. Rozen Y, Belkin S. Survival of Enteric Bacteria in Seawater. *FEMS Microbiol Rev* 2001; 25(5):513-529.
9. Mancini JL. Numerical Estimates of Coliform Mortality Rates Under Various Conditions. *Journal Water Pollution Control Fed* 2008; 50(11):2477-2484.
10. Noble RT, Lee IM, Schiff KC. Inactivation of Indicator Microorganisms from Various Sources of Faecal Contamination in Seawater and Freshwater. *J Appl Microbiol* 2004, 96(3):464-472.
11. Canteras JC, Inanes JA, Perez L, Koev KN. Modeling the Coliform Inactivation Rates in the Catambrian Sea (Bay of Biscay) From in Situ and Laboratory Determinations of T_{90} . *Water Science technology* 1995; 32(2):37-44.
12. Sarikaya HZ, Saatçi AM. Bacterial Die-away Rates in Red Sea Waters. *Water Science technology* 1995; 32(2):45-52.
13. Christoulas DG, Andreadakis AD. Application of the EU bathing water Directive to the Design of Marine Sewage Disposal Systems. *Water Science technology* 1995; 32(2):53-60.
14. Tortora GJ, Funke BR, Case CL. *Microbiologia*. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2000.
15. Chamberlin CE, Mitchell RA. Decay model for enteric bacteria in natural waters. In: Mitchell RA, editor. *Water Pollution Microbiology*. New Jersey: Willey-Interscience Publication; 1978. p. 325-348.
16. Fujioka RS, Hashimoto HH, Siwak EB, Young RHF. Effect of Sunlight on Survival of Indicator Bacteria in Seawater. *Applied and Environmental Microbiology* 1981; 41(3):690-696.
17. Bordalo AA, Onrassami R. Survival of Faecal Indicator Bacteria in Tropical Estuarine Waters (Bangpakong River, Thailand). *J Appl Microbiol* 2002; 93(5):864-871.
18. Yang L, Chang W, Huang M. Natural Desinfection of Wastewater in Marine Outfall Fields. *Water Research* 2000; 34(3):743-750.
19. Bellair JT, Parr-Smith GA, Wallis IG. Significance of Diurnal Variations in Fecal Coliform Die-off rates in the Design of Ocean Outfalls. *Journal of Water Pollution Control Federation* 1977; 49(9):2022-2030.
20. McCambridge J, McMeekin TA. Effect of Solar Radiation and Predacious Microorganisms on Survival of Fecal and Other Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 1981; 41(5):1083-1087.
21. Borrego JJ, Arrabal F, Vicenr A, Gomez LF, Romero P. Study of Microbial Inactivation in the marine Environment. *Journal Water Pollution Control Fed* 1983; 55(3):297-302.
22. Anderson SA, Turner SJ, Lewis GD. Enterococci in The New Zealand Environment: Implications for Water Quality Monitoring. *Water Science technology* 1995; 35(10-11):325-331.
23. Alkan U, Elliot DJ, Evison LM. Survival of Enteric Bacteria in Relation to Simulated Solar Radiation and Other Environmental Factors in Marine Waters. *Water Resource* 1995; 29(9):2071-2081.
24. Guillaud JF, Derrien A, Gourmelon M, Pommepu M. T_{90} as a Tool for Engineer: Interest and limits". *Water Science technology* 1995; 35(11-12):277-281.
25. Johnson DC, Enriquez CE, Pepper IJ, Davis TL, Gerba CP, Rose JB. Survival of *Giardia*, *Cryptosporidium*, Poliovirus and *Salmonella* in Marine Waters. *Water Science technology* 1997; 35(10-12):261-268.
26. Rosman PCC. SisBAHIA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – Documentação de Referência Técnica. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ; 2008.
27. Roberts PJW, Snyder WH, Baumgartner DJ. Ocean Outfall I: Submerged Wastefield Formation. *Journal of Hydraulics Eng* 1989; 115(1):1-25.
28. Martin JL, McCutcheon SC. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. Stockport; Lewis Publishers Inc; 1999.
29. Feitosa RC, Rosman PCC, Carvalho JLB, Cortes MBV, Wasserman JC. Comparative study of fecal bacterial decay models for the simulation of plumes of submarine sewage outfalls. *Water Science and Technology* 2013; 68(3):622-631.
30. Schaffel R, Paranhos R, Carvalho P, Pereira M, Matos F, Mendonça-Hagler LCS, Mayer L, Hagler AN. Contagens de coliformes fecais em águas de superfície nas proximidades do emissário submarino de Ipanema, Rio de Janeiro, RJ. In: *III Encontro Nacional de Microbiologia Ambiental*, 1990, São Paulo.
31. Coelho VMB. *Baía de Guanabara: uma história de agressão ambiental*. Rio de Janeiro: Casa da Palavra; 2007.
32. Vieira CB, Mendes ACO, Oliveira JM, Gaspar AMC, Leite JPG, Miagostovich MP. Vírus Entéricos na Lagoa Rodrigo de Freitas. *Oecologia Australis* 2012, 16(3):540-565.

33. Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA). Monitoramento da Qualidade da água, Sistema Lagunar de Jacarepaguá. [acessado 2016 jun 10]. Disponível em: http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mda5/~edisp/inea_009596.pdf
34. Sydney Waters. *Sydney's Deep-water Ocean Outfalls Long-term environmental performance*. Sydney: Australian Water Association; 2007.

Artigo apresentado em 11/12/2015

Aprovado em 03/07/2016

Versão final apresentada em 05/07/2016