

Modelagem Computacional do lançamento conjunto dos efluentes dos emissários submarinos de esgotos da Barra da Tijuca, Ipanema e Icaraí (Rio de Janeiro).

Renato Castiglia Feitosa¹ & Paulo Cesar Colonna Rosman²

¹Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, PENO/COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,
renato@peno.coppe.ufrj.br

²Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, PENO/COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,
pccr@peno.coppe.ufrj.br

RESUMO: Este trabalho analisa a pluma de contaminação de coliformes fecais, em águas costeiras, proveniente do lançamento conjunto dos emissários submarinos de esgotos da Barra da Tijuca, Ipanema e Icaraí, considerando uma circulação hidrodinâmica realista e taxa de decaimento bacteriano variável em função da intensidade de radiação solar incidente sobre a pluma. O padrão de correntes da região em estudo responsável pelo transporte da pluma de coliformes fecais foi obtido através do sistema de modelos SisBaHiA®, desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ. O modelo RSBWIN foi utilizado para determinação das características da pluma no campo próximo, tais como espessura e a profundidade de confinamento, indispensáveis na quantificação da radiação solar incidente na determinação das características da região fonte para modelagem do campo afastado.

PALAVRAS CHAVE: emissários submarinos, decaimento bacteriano, radiação solar.

1. INTRODUÇÃO

A disposição oceânica 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 desses efluentes no ambiente marinho. Diversos estudos têm sido realizados para que seja avaliado o impacto do lançamento de esgotos domésticos em águas costeiras.

De acordo com a legislação CONAMA, 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.

A redução de bactérias no ambiente marinho é governada principalmente pela ação conjunta da salinidade, temperatura e radiação solar, sendo este último o principal fator influente na degradação bacteriana. A formulação proposta por Mancini [2] é utilizada na determinação da taxa de decaimento. Essa taxa é representada pelo parâmetro T_{90} , que corresponde ao tempo necessário, em horas, para que ocorra uma redução de 90% na concentração inicial de coliformes fecais. A quantificação do decaimento é um dos principais parâmetros a serem fornecidos para os modelos de transporte, no sentido de se estimar a perda de massa do contaminante, e,

consequentemente, as concentrações de coliformes fecais nas regiões adjacentes aos pontos de lançamento do efluente. A intensidade da radiação solar incidente é governada em função de parâmetros geográficos, sazonais, meteorológicos e ambientais. Os primeiros dois parâmetros são representados pela latitude do local em que é realizado o estudo, e pelas estações do ano que irão influenciar o ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre. O terceiro parâmetro representa a condição de cobertura nebulosa, e o último está diretamente ligado às condições do corpo d'água representadas pela turbidez, e pela variação vertical de densidade que irá limitar a profundidade de confinamento da pluma.

Este trabalho analisa aspectos relativos ao transporte de plumas efluentes dos 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 município de Niterói. O sistema de modelagem, hidrodinâmica e de transporte, existentes no SisBaHiA, desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ, foi utilizado no estudo da circulação hidrodinâmica e do transporte da pluma de contaminantes. Através deste sistema de modelos, obteve-se o padrão de correntes responsável pelo transporte da pluma de contaminantes. As características da pluma no campo próximo¹, tais como a espessura e a profundidade de confinamento, foram determinadas através do modelo RSBWIN (Roberts, [4]). Tais características são função dos padrões de correntes e das condições de estratificação do corpo d'água. Os níveis de concentração do contaminante no corpo d'água receptor, considerando diferentes condições hidrodinâmicas e ambientais, foram obtidos a partir do modelo de transporte Lagrangeano contido no SisBaHiA.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS:

A Figura 1 a seguir ilustra a localização dos três emissários em questão. Os emissários submarinos da Barra da Tijuca (ESEBT) e de Ipanema (ESEI) estão localizados, respectivamente, na zona oeste e sul do município do Rio de Janeiro e o emissário de Icaraí (ESEIC) localiza-se na cidade de Niterói.

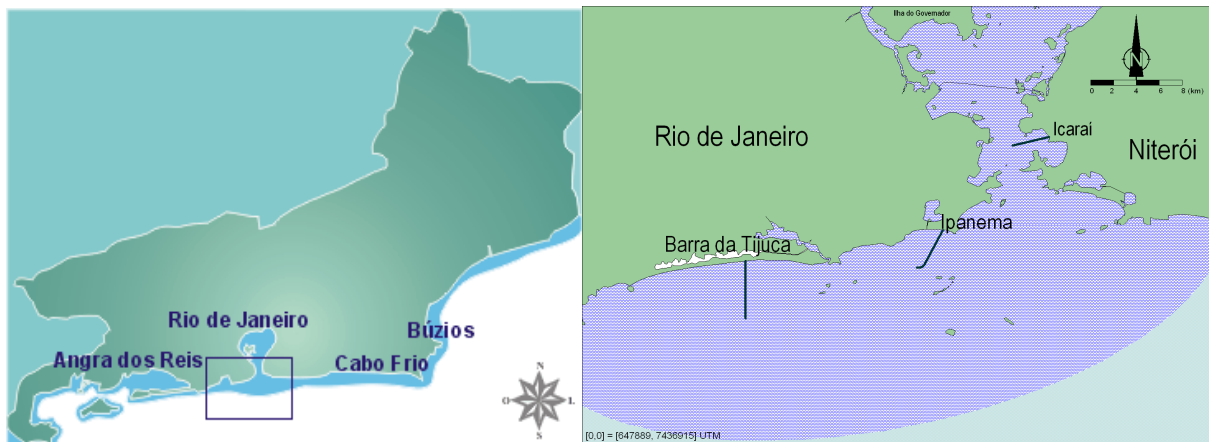


Figura 1- Localização da área de estudo

¹ - O campo próximo é uma região de intensa turbulência, onde a circulação hidrodinâmica é extremamente influenciada pelo jato efluente da tubulação difusora do emissário submarino.

3. DOMÍNIO MODELADO E MALHA DE DISCRETIZAÇÃO

A Figura 2 ilustra a discretização do domínio modelado com 7030 nós, perfazendo um conjunto de 1656 elementos finitos, utilizados para discretizar o domínio modelado. No módulo 3D foram definidos 21 níveis de profundidade ao longo da coluna d'água, formando um conjunto com 21×7030 pontos de cálculo.

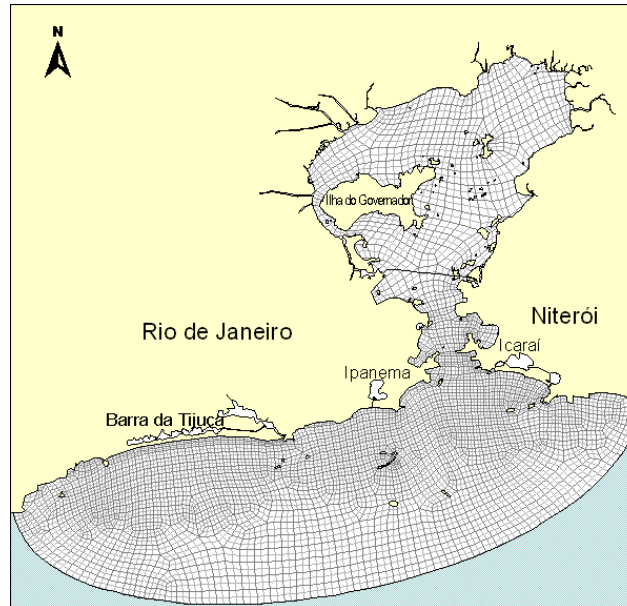


Figura 2 - Domínio tridimensional discretizado com uma pilha de 21 malhas contendo 21×1656 elementos finitos biquadráticos totalizando 147630 ($= 21 \times 7030$) pontos.

Os elementos da malha são subparamétricos, com funções de forma lagrangeanas lineares para definir a forma do elemento (quadrangular ou triangular), e quadráticas para aproximar as variáveis hidrodinâmicas e ambientais. A discretização espacial é feita por elementos finitos quadrangulares biquadráticos que possuem 9 nós, um em cada vértice, definindo sua geometria linear, um no meio de cada lado além de um no centro do elemento, definindo funções biquadráticas para as demais grandezas. Os elementos quadrangulares, por utilizarem tais funções, fornecem melhores aproximações do que os triangulares.

4. DADOS UTILIZADOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Os dados utilizados na modelagem compreendem: marés, ventos, batimetria do domínio considerado, vazões nos emissários e concentrações dos contaminantes de interesse. A seguir são detalhados os dados utilizados:

4.1. Dados de vento

Os dados de vento utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de medições horárias feitas pela INFRAERO Aeroportos Brasileiros, durante os anos de 1999 e 2000 (24 meses) no

4.3. Marés

A maré foi inserida no modelo através dos registros da série temporal (nove meses) de elevação do nível d'água na estação de Copacabana (Posto 6) realizados pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação). Através destes registros são obtidas 11 constantes harmônicas, apresentadas, que estão disponíveis no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da FEMAR - Fundação de Estudos do Mar. A série temporal de elevação do nível d'água durante um período de 16 dias, bem como as constantes harmônicas utilizadas na sua geração estão apresentadas na Figura 5.

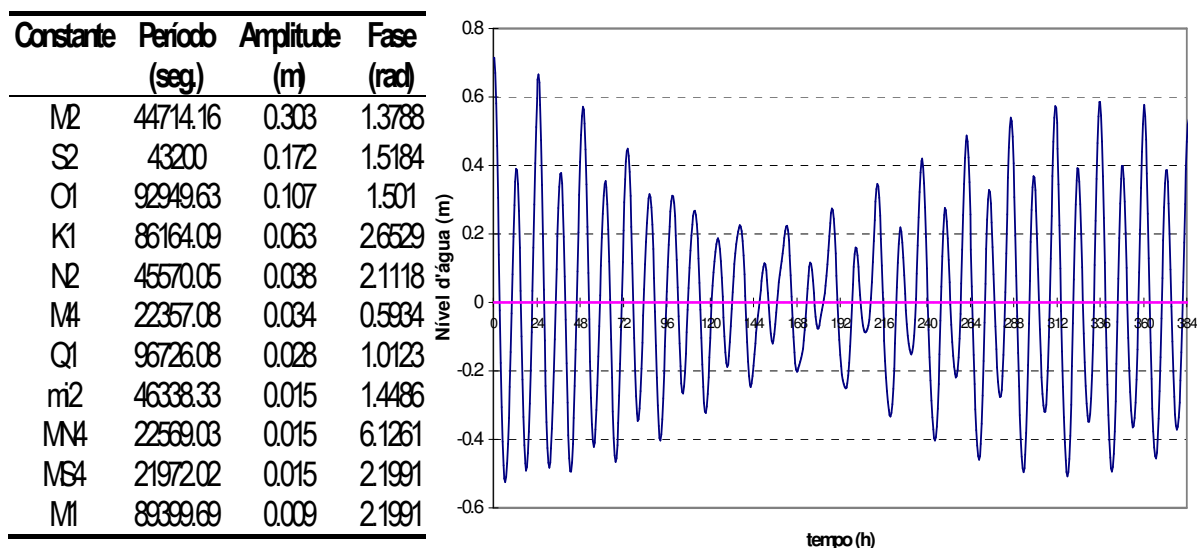


Figura 5 - A série temporal de elevação do nível d'água e as constantes harmônicas utilizadas na sua geração

4.4. Vazões dos emissários e concentrações dos efluentes consideradas no estudo

A Tabela 1 a seguir ilustra tanto as vazões, quanto as concentrações dos efluentes de cada emissário utilizadas na modelagem. No sentido de simplificar o problema foram considerados valores constantes destes conjuntos de dados.

Tabela 1 – Vazões e Concentrações iniciais dos efluentes utilizadas na modelagem

Emissário	Vazões (m ³ /s)	Concentração do efluente (NMP coliformes fecais / 100ml)
Ipanema (ESEI)	7,5	7.10 ⁷
Barra da Tijuca (ESEBT)	5,1	4,2.10 ⁷
Icaraí (ESEIC)	0,97	4,2.10 ⁷

5. MODELAGEM DA PLUMA DOS EMISSÁRIOS EM CONJUNTO

No processo de mistura inicial do esgoto com a água ambiente, há duas regiões com características marcadamente distintas. A primeira ocorre no campo próximo da linha difusora do emissário, na chamada zona de mistura ativa, região de intensa turbulência, onde a circulação hidrodinâmica é extremamente influenciada pelo jato efluente da tubulação difusora. Na medida em que se afasta da linha difusora, a pluma ejetada vai se misturando com a água ambiente, até tornar-se neutra. Na segunda região, então chamada de campo afastado ou zona de mistura neutra, a pluma neutra é transportada passivamente pelas correntes oceânicas. Devido às diferenças de escoamento entre as zonas de mistura ativa e passiva, são adotadas metodologias de modelagem específicas para cada zona.

5.1. Modelagem da zona de mistura ativa no campo próximo

Em geral, no caso de emissários submarinos de esgotos, os efluentes são lançados em águas oceânicas através de tubulações difusoras. Em cada orifício desta linha difusora é formado um jato efluente com uma velocidade muito superior à velocidade do escoamento ambiente. Deste modo há, portanto, uma grande diferença na quantidade de movimento entre o jato efluente e as correntes ambientes. Tal diferença na quantidade de movimento é responsável pela geração do escoamento típico da região de campo próximo. Esta é uma região caracterizada pelo arraste e mistura do jato efluente com a água ambiente, formando uma pluma flutuante. Uma vez que os esgotos sanitários possuem uma massa específica inferior à da água do mar, o cone de mistura então formado irá se elevar em direção à superfície livre, podendo atingi-la ou não, dependendo das variações verticais de densidade entre o ponto de lançamento do efluente e a superfície. A partir daí, tem-se uma pluma neutra sendo transportada passivamente pelas correntes oceânicas, caracterizando o transporte no campo afastado, ou na zona de mistura passiva.

A dinâmica do campo próximo pode ser resolvida através de modelagem computacional, onde são determinadas as principais características da pluma na região do campo próximo: comprimento da zona de mistura, diluição inicial, elevação do centro e espessura da pluma. Estas características dependem fortemente da intensidade e direção das correntes incidentes sobre a tubulação difusora e das variações verticais de densidade entre o ponto de lançamento do efluente e a superfície livre. Quanto maior for esta variação de densidade, menor será a diluição e a elevação alcançada pelo centro da pluma. A determinação deste último fator é de grande relevância nas reações cinéticas de decaimento de bactérias do grupo coliforme, uma vez que a radiação solar incidente depende fortemente da profundidade na qual a pluma encontra-se estabelecida. Para modelagem do campo próximo foi utilizado o modelo RSBWIN. Segundo resultados do modelo RSBWIN, considerando apenas a situação de coluna d'água homogênea a pluma atingiu a superfície livre com uma espessura de aproximadamente 15m.

5.2. Modelagem da zona de mistura passiva no campo afastado

Em uma determinada distância do ponto de lançamento, a pluma contaminante comporta-se neutramente em relação à água receptora. Isto é, a partir deste ponto, a pluma não interfere mais na hidrodinâmica ambiente, pois não existem diferenças entre as quantidades de movimento do efluente e do fluido receptor. Neste campo afastado, a pluma é transportada passivamente pelas

correntes oceânicas. Nesta zona de mistura passiva, a distribuição de concentrações no corpo d'água receptor, de um dado contaminante existente na pluma, dependerá principalmente dos seguintes processos, em geral altamente variáveis no tempo e no espaço:

- Advecção promovida pelas correntes oceânicas responsáveis pelo transporte do contaminante em questão. A modelagem do transporte de plumas depende da qualidade do modelo hidrodinâmico que gera o campo de correntes que advecção a pluma.
- Difusão turbulenta do contaminante. Esta turbulência ambiente é gerada por tensões de atritos internos na massa d'água, tensões de atrito do fluido com o fundo e atrito de vento na superfície livre. Em geral o transporte de plumas passivas é dominado pela advecção, mas a difusão turbulenta também é de fundamental importância. E, como no caso da advecção, também depende da qualidade do modelo hidrodinâmico, neste caso da qualidade do modelo de turbulência adotado.
- Reações cinéticas de produção ou decaimento do contaminante no meio receptor. No caso de esgotos sanitários, tendo coliformes fecais como contaminantes de referência, são consideradas reações de decaimento de primeira ordem. Como ao longo do dia na região em estudo, não ocorrem variações significativas de salinidade e temperatura, a variação na taxa de decaimento bacteriano será praticamente função da intensidade de radiação solar incidente. Para determinação da taxa de decaimento bacteriano, em função da temperatura, salinidade e radiação solar, foi utilizada a formulação proposta por Mancini [2]. A quantificação da radiação solar incidente inserida em tal formulação foi obtida através do modelo proposto por Martin e McCutcheon [3].

A intensidade de radiação solar incidente varia de acordo com as horas do dia, devido à rotação da terra e ao longo dos dias do ano, em função da variação diária da declinação da Terra em relação ao Sol. É também função da latitude do local em estudo, reflexão na superfície do corpo d'água, nebulosidade e atenuação atmosférica. Esta última está associada à umidade, quantidade de partículas presentes na atmosfera e ângulo de incidência da radiação solar sobre a mesma. Neste trabalho foram considerados os seguintes cenários avaliando os efeitos da luminosidade no decaimento de coliformes fecais:

- Comparação das plumas de concentração de coliformes fecais entre a condição de céu claro e totalmente nublado com respectivamente 5% e 100%, de cobertura de nuvens;
- Comparação das plumas de concentração de coliformes fecais entre as estações de verão e inverno sob condição de céu claro.

A profundidade de Secchi adotada, que quantifica o grau de penetração dos raios de luz na massa líquida, foi de 8m nas regiões adjacentes ao ESEI e ESEBT e 4m na região adjacente ao ESEIC. Cabe ressaltar que este menor valor adotado é devido ao maior nível de turbidez das águas no interior da Baía de Guanabara. Os valores de salinidade e temperatura da água, supostos constantes, foram respectivamente iguais a 34‰ e 24°C.

A Figura 6 mostra os valores médios do T_{90} ao longo da espessura da pluma para diferentes condições sazonais e meteorológicas. Em linhas gerais verifica-se que quanto maior a intensidade de radiação solar incidente maior é o valor da taxa de decaimento observado. Pode-se também observar que para condições sazonais e meteorológicas idênticas, são observados maiores valores de decaimento para a região de Icaraí, em virtude do menor poder de penetração da luz solar em águas com elevados níveis de turbidez.

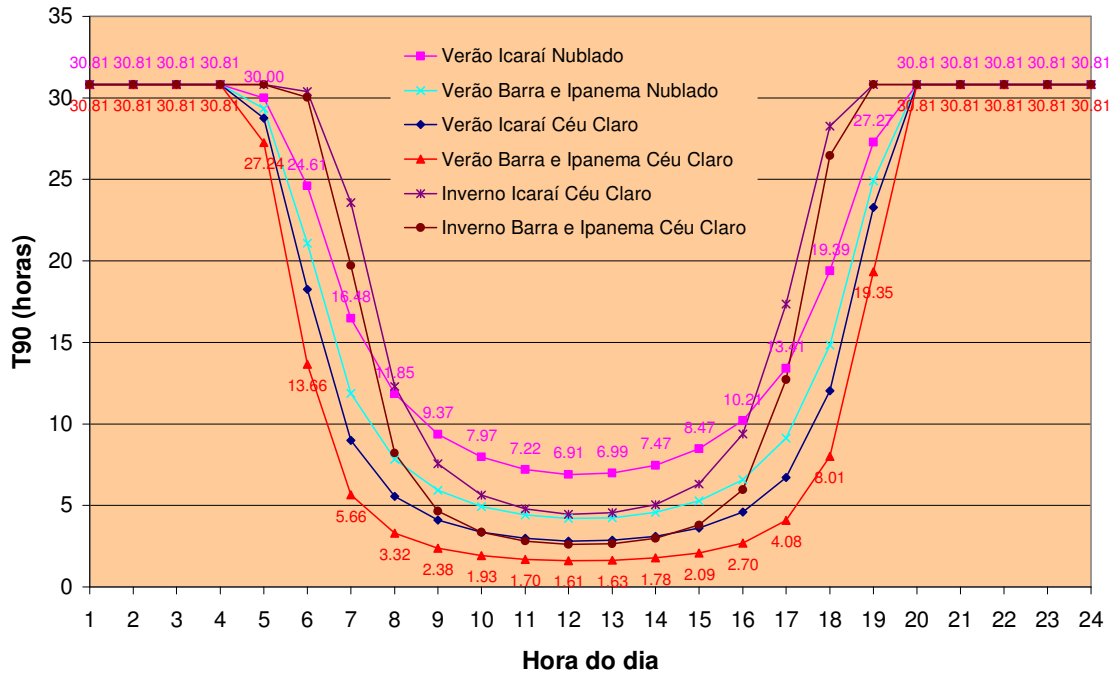


Figura 6 – Valores de T_{90} ao longo das horas do dia para diferentes condições meteorológicas e sazonais.

6. RESULTADOS

A Figura 7 e a Figura 8 mostram, respectivamente, a influência das variações das condições meteorológicas e sazonais, nas taxas de decaimento bacteriano para a situação de coluna d'água homogênea. Nesta podem ser observados maiores comprimentos da pluma de contaminantes, como consequência de uma taxa menor de decaimento bacteriano para a situação de céu totalmente nublado e inverno, respectivamente.

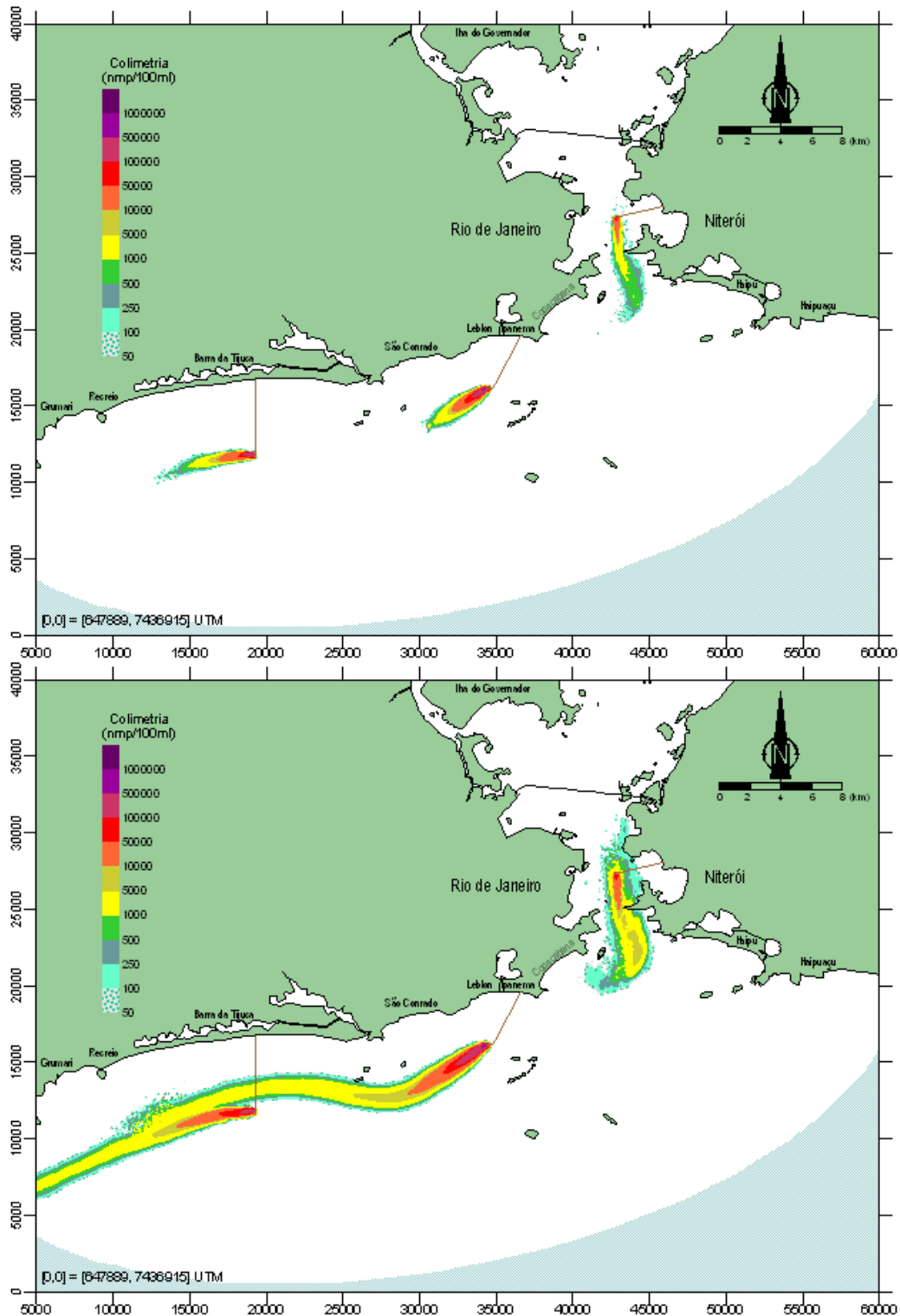


Figura 7 - Comparação da influência da radiação solar variando, durante o verão, de acordo com as condições meteorológicas. A estampa superior indica a condição de céu claro e a estampa inferior corresponde à situação de céu totalmente encoberto. Parte superior da pluma atingindo a superfície livre com espessura aproximada de 15 metros. Intensidade de radiação solar incidente correspondente às 14:00 do dia.

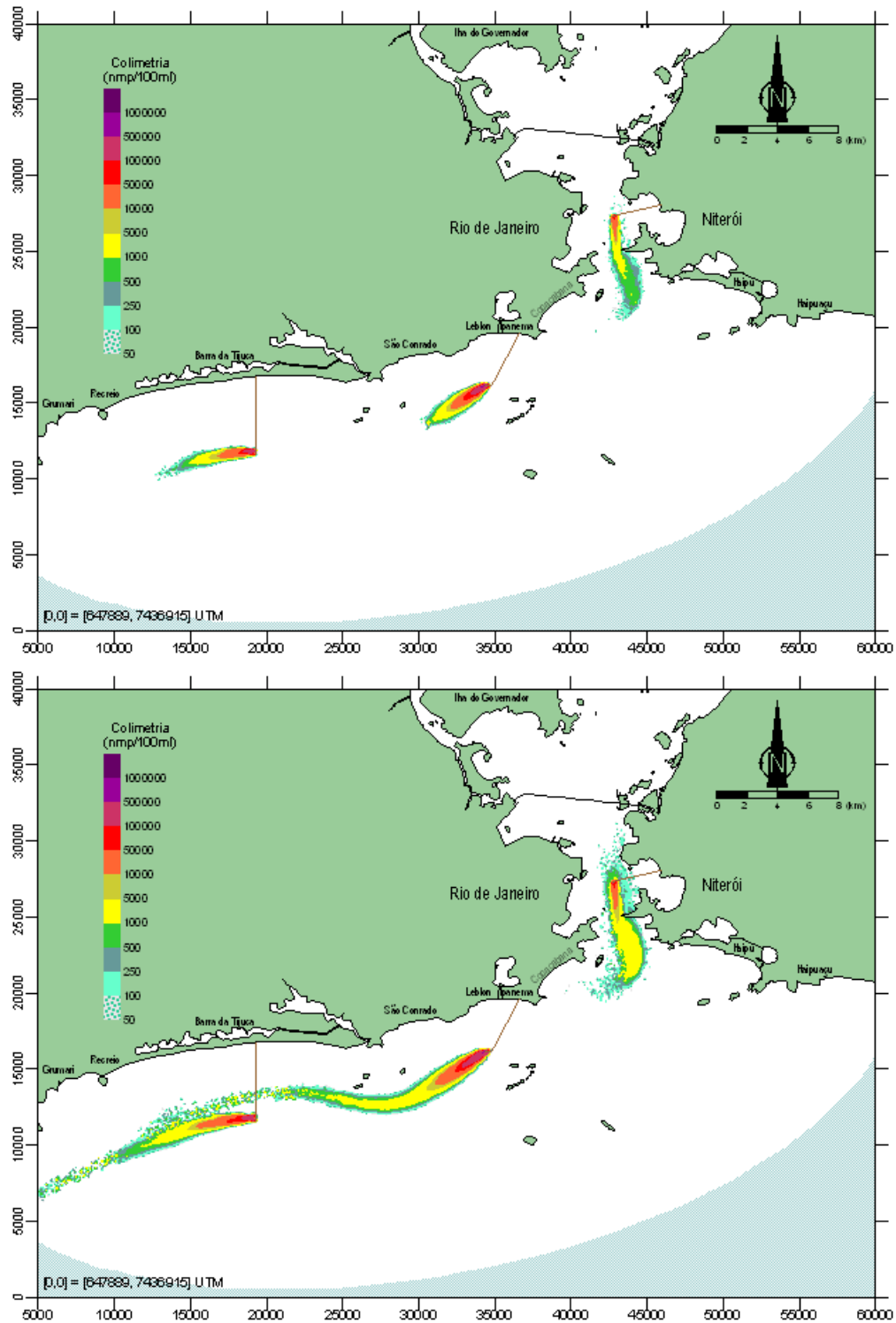


Figura 8 - Comparação da influência da radiação solar variando de acordo com as estações do ano, sob condição de céu claro. A estampa superior indica a condição de verão e a estampa inferior corresponde à situação de inverno. Parte superior da pluma atingindo a superfície livre com espessura aproximada de 15 metros. Intensidade de radiação solar incidente correspondente às 14:00 do dia.

7. OBSERVAÇÕES E CONCLUSÕES

A radiação solar é um dos fatores mais importantes no decaimento de bactérias, sendo encontradas correlações significativas entre as taxas mortalidade de coliforme e a quantidade de radiação solar incidente. Estudos realizados por Chamberlin & Mitchell [1] e observações de campo feitas por Gameson & Gould (1975) e Foxworthy & Kneeling (1969) (*apud* Chamberlin & Mitchell [1]), produziram 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 e outros fatores influentes no perfil de luminosidade ao longo da profundidade. A radiação solar afeta fortemente a sobrevivência de coliformes fecais nos primeiros 30 m abaixo da superfície, sendo seu efeito muito pouco pronunciado abaixo deste limite (Šolic & Krstulovic, [6]). A ação bactericida da radiação solar através da coluna d'água é atenuada por reflexão e absorção. A porção de luz solar transmitida depende da profundidade em questão, turbidez e comprimento de onda da radiação solar incidente. Deste modo, o uso de modelos de campo próximo, na determinação das principais características da pluma tais como espessura e profundidade de confinamento, mostrou-se de grande valia na mensuração da intensidade de radiação solar incidente sobre a pluma, e conseqüentemente na quantificação da variação horária das taxas de decaimento bacteriano. Cabe também ressaltar que o conhecimento de outros fatores que determinarão indiretamente a intensidade de radiação solar incidente, tais como turbidez e estratificação da coluna d'água, condições meteorológicas, geográficas e sazonais, passam a ocupar uma posição de extrema relevância na modelagem de pluma de emissários submarinos de esgotos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHAMBERLIM, C. E. & MITCHELL, R., 1978, "A decay model for enteric bacteria in natural waters". In: *Water Pollution Microbiology*. Edited by Ralph Mitchell. Willey-Interscience Publication. Vol. 2: 325-348.
2. MANCINI, J.L., 1978 "Numerical Estimates of Coliform Mortality Rates Under Various Conditions". *Journal Water Pollution Control Fed.*, v.50, n. 11(Nov) pp. 2477-2484.
3. MARTIN, J.L., McCUTCHEON, S.C., 1999, *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. 1 ed. Florida, Lewis Publishers, Inc.
4. ROBERTS, P.J.W., SNYDER, W.H., BAUMGARTNER, D.J., 1989(a), "Ocean Outfall I, II e III: Submerged Wastefield Formation". *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, v. 115, n. 1 (Jan), pp. 1-70.
5. ROSMAN, P.C.C., 2001, "Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental". In: *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol. 5)*, Capítulo 1, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH.
6. ŠOLIĆ, M., KRSTULOVIĆ, N., 1992, "Separated and Combined Effectes os Solar Radiation, Temperature, Salinity and pH on the Survival of Faecal Coliforms in Seawater"