

## Dispersión de la pluma de efluente sanitario en playa Boracéia, Sao Paulo

MSc. Jacqueline Pedrera Yanes

Estudiante de Doctorado. Departamento de Engenharia Mecanica. Escola Politécnica-USP  
email: [j.pedrera@usp.br](mailto:j.pedrera@usp.br)

Dr. Prof. Jayme Pinto Ortiz

Departamento de Engenharia Mecanica. Escola Politécnica-USP  
Departamento de Engenharia Mecanica. Instituto Mauá de Tecnologia  
email: [jportiz@usp.br](mailto:jportiz@usp.br)

Ing. Robinson Siqueira Garcia

Estudiante Iniciación Científica. Departamento de Engenharia Mecanica. Escola Politécnica-USP  
email: [robin17sg@gmail.com](mailto:robin17sg@gmail.com)

### RESUMEN

Estudios de sistemas de emisarios submarinos son de gran importancia en Brasil, teniendo en cuenta la relación costo- beneficio y el impacto ambiental. El análisis técnico de esta opción debe ir acompañado de un análisis de impacto ambiental en la zona de descarga para adaptar el sistema a la legislación vigente, regulada en Brasil por el Consejo Nacional de Medio Ambiente. En este trabajo se estudia la posibilidad de implementación de un emisario submarino en la playa Boracéia. Fue realizada una modelación hidrodinámica para establecer el comportamiento de la evolución de la pluma del efluente sanitario mediante la comparación de diferentes lugares de descarga y caudales. Los resultados muestran la viabilidad de esta opción.

**Palabras clave:** dispersión de pluma, emisario submarino, simulación hidrodinámica.

## Wastewater plume dispersion in Boracéia beach, Sao Paulo

### ABSTRACT

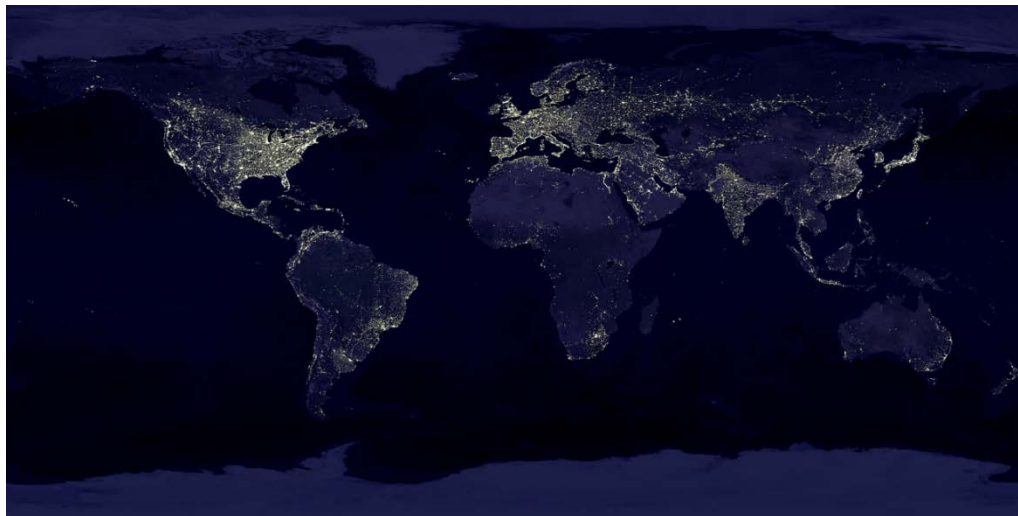
Studies of outfall systems are of great importance in Brazil, taking into account cost-benefit ratio and environmental impact. Technical analysis of this option must be accompanied by an environmental impact analysis in the discharge zone to adapt the system to the current legislation, regulated in Brazil by the National Environment Council. The possibility of implementing a submarine outfall on the beach Boracéia is studied in this work. Hydrodynamic modeling of the behavior of the effluent plume was made to establish the system performance by comparing different points of discharge and flow rates. The results show the feasibility of this option.

**Keywords:** plume dispersion, submarine outfall, hydrodynamic simulation.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el interés por la protección del medio ambiente se ha incrementado de forma notable a nivel internacional. La contaminación de los cuerpos de agua por vertidos de aguas residuales, práctica común en la historia de la humanidad, es uno de los problemas más preocupantes en la gestión del saneamiento ambiental. Con el desarrollo de la vida humana: la industrialización, la urbanización y el crecimiento de la población en áreas costeras, el volumen de vertidos de aguas residuales sin tratamiento previo o un mínimo cuidado siquiera, en ríos costeros o directamente en el mar, ha aumentado drásticamente causando la contaminación de las aguas y comprometiendo el uso de esos recursos (Ortiz et al. 2006).

Más del 50% de la población mundial, o sea, tres mil millones de personas, se concentra en la actualidad a menos de 60 kilómetros de la costa (Naval et al. 2001) (figura 1), valor que puede variar estacionalmente en países como Brasil, donde la población costera aumenta significativamente en verano.



**Figura 1. Imagen nocturna de la Tierra (NASA 2009)**

La calidad de las aguas costeras de Brasil, está fuertemente influenciada por las condiciones de saneamiento existentes en las ciudades costeras. Brasil tiene alrededor de 8 500 km de costa y en ella se encuentran 13 de las 27 capitales y 16 de las 28 regiones metropolitanas, las cuales albergan un cuarto de la población brasileña (26,6%), casi 51 millones de personas (IBGE, 2011). Como promedio viven 87 habitantes por kilómetro cuadrado, o sea, cinco veces más que la media nacional de 17 hab/km<sup>2</sup>. La mayoría de esas ciudades no poseen la infraestructura necesaria para un saneamiento adecuado, por lo que la descarga de las aguas residuales domésticas a las playas es un hecho rutinario.

Según el Sistema Nacional de Información sobre Saneamiento (SNIS), en 2010 el servicio de recolección de aguas residuales en Brasil, apenas atendía un 46,2 % de la población. Esta situación se vuelve aún más alarmante, cuando se constata que solo un 37% de esa agua residual recolectada, recibe tratamiento antes de ser vertida en el cuerpo de agua más próximo. De acuerdo con el Informe sobre Desarrollo Humano 2013 de la ONU, Brasil está en el lugar 85 del ranking de países de índice de desarrollo, entre otras causas, por los problemas de saneamiento que enfrenta.

La situación del saneamiento en el Estado de Sao Paulo es más favorable que la media brasileña. En los últimos años, las inversiones del Gobierno del Estado en colaboración con las inversiones del Banco Japonés de Cooperación Internacional – JBIC, produjeron una mejora considerable en el índice de servicio de alcantarillado estadual, elevándolo a un 90% en el año 2010. Sin embargo en 2012, según el SNIS, los municipios de la costa de Sao Paulo alcanzaron apenas un 47,35 % de aguas residuales recolectadas (destacando el municipio de Santos con un índice de 100 %) con solo un 38% de las mismas tratadas, por lo que se puede concluir que con algunas excepciones, los municipios costeros paulistas descargan considerable cantidad de aguas residuales sin tratar directamente en ríos, arroyos y la costa, problema que debe acentuarse con el aumento previsto de la población.

La CETESB (Companhia de Tecnología de Saneamento Ambiental) en 1968, ante el evidente deterioro de las aguas costeras, inició la vigilancia del medio ambiente costero a través, primeramente, de campañas regulares y esporádicas de mediciones de la calidad del agua en las playas y, posteriormente, ampliando a los ríos costeros y a los emisarios submarinos. Estos estudios proporcionaron datos importantes que mostraron la existencia de cambios en los medios acuáticos, con pérdidas considerables en la calidad del agua y daño al medio ambiente, con peligro para la salud pública. Según Ortiz et al. (2006), estos índices muestran que existen deficiencias por parte del gobierno para la gestión de los recursos hídricos de manera adecuada a las necesidades sociales y económicas, a fin de lograr una gestión sostenible del agua.

En áreas costeras son ampliamente utilizadas dos alternativas básicas para la eliminación de las aguas residuales: el lanzamiento submarino a través de largos emisarios, precedido de un pre-tratamiento de las aguas residuales o el tratamiento de aguas residuales, generalmente a un nivel secundario con desinfección final y posterior descarga en ríos costeros o bahías.

Al principio, los sistemas de alcantarillado descargaban directamente en zonas costeras alejadas de las zonas más pobladas, pero con el tiempo la población costera creció y las áreas urbanizadas se expandieron. Pronto el hedor y los residuos sólidos en las costas comenzaron a ser percibidos por la población. Esta forma de eliminación de las aguas residuales causó la degradación de muchas playas.

Después de muchas observaciones y estudios, ingenieros sanitarios llegaron a una composición de sistema de descarga en el mar, que comprende unidades de acondicionamiento previo para eliminar los sólidos gruesos y parte de las sustancias en suspensión, y una larga tubería asentada en el fondo del mar, que alcanza grandes profundidades, para la disposición final del efluente resultante que es realizada a través de múltiples orificios (difusores), que permiten la dilución efectiva del efluente en el agua del mar (Subtil et al. 2012).

Según Ortiz et al. (2006), las ventajas de este método se pueden resumir en: un menor costo de implantación, operación y mantenimiento del sistema, en comparación con los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, un menor impacto visual, menos problemas de olor en la estructura en tierra y menor cantidad de lodos, resultantes del tratamiento previo, para eliminar. No obstante, también tiene desventajas, como son: dificultades de construcción y el mantenimiento de los difusores, la pérdida de calidad del agua en el lugar de lanzamiento o la necesidad de un seguimiento continuo.

Estos sistemas son utilizados en muchos países y sus proyectos son definidos en función de la profundidad de descarga, la longitud y el diámetro del emisario, el flujo de descarga, el tipo de sistema de difusores etc., sin embargo, la cuestión del nivel de tratamiento previo a la descarga continúa siendo un punto de polémica.

En los países más desarrollados como España y Estados Unidos, la cuestión del tratamiento previo en tierra de las aguas residuales es más restrictiva y cuidadosa, mostrando buenos resultados tanto en el mantenimiento de la calidad y la recuperación de las propiedades perdidas de los cuerpos receptores y en cuanto a la reutilización de efluente tratado para otros fines.

En el litoral paulista las experiencias con sistemas de emisarios submarinos se concentran en regiones de gran concentración urbana como Praia Grande, Santos o Guarujá, en el litoral sur. También se encuentran los de Sao Sebastiao e Ilha Bela, además de un emisario submarino de efluentes industriales, instalado en el Canal de Sao Sebastiao y operado por la Petrobras.

Estos emisarios fueron proyectados y construidos por diferentes empresas privadas, nacionales y extranjeras, a menudo sin ninguna visión sistémica del proceso de gestión, y cuyo diseño de base de datos es insuficiente, cuando deberían haber sido proyectados obedeciendo a un plan de gerenciamiento costero y respetando criterios de eficiencia, costo y preservación ambiental (Ortiz et al. 2006).

La CETESB inició el monitoreo de estos sistemas en 2002, recogiendo muestras semestrales en dos emisarios de la costa paulista, los cuales fueron complementados por estudios científicos de simulación hidrodinámica de la pluma en la descarga de los efluentes, lo que permitió la evaluación del impacto en el medio marino. El sistema estuarino de Santos es considerado el área más crítica del estado de Sao Paulo a causa de la degradación de sus aguas. Esta situación es el resultado de la presencia del polo petroquímico de Cubatao, de las características del efluente del emisario submarino en el interior de la bahía de Santos y de la polución difusa, debida a la descarga clandestina de aguas residuales, provenientes de la ocupación y uso irregular de las tierras costeras (Do Carmo et al. 2012).

Estudios muestran que, a pesar de los problemas que presentan estos emisarios, los sistemas de emisarios submarinos bien proyectados, construidos y monitoreados, son una alternativa viable, en particular en los países en desarrollo, donde los recursos financieros son limitados.

Hasta hace poco tiempo, los sistemas con emisarios submarinos solo eran viables para ser construidos en grandes ciudades debido, fundamentalmente, a las dificultades de su construcción, el alto costo del equipamiento especializado que requieren y a la falta de profesionales locales debidamente especializados para su mantenimiento y preservación. Actualmente, con la disponibilidad de nuevos materiales y métodos modernos de construcción, es posible que pequeñas comunidades costeras puedan disponer de los recursos necesarios para la construcción de emisarios relativamente largos.

Se sabe que la costa del estado de Sao Paulo es una de las áreas con mayor densidad demográfica del país. En el período más reciente, el mayor crecimiento poblacional ocurre en el litoral norte, principalmente en los municipios de Sao Sebastiao, Ilhabela y Caraguatatuba, relacionado fundamentalmente con la expansión de las ciudades para las áreas periféricas, a causa de la falta de espacio disponible, y el encarecimiento del suelo urbano. En Bertioga el factor turístico ejerce un peso mayor (Do Carmo et al. 2012).

En el litoral norte, el escenario actual del saneamiento básico referente a la recolección y tratamiento de aguas residuales domésticas, unido al crecimiento poblacional de la zona, conformado casi en su totalidad por pequeños municipios (50 000 habitantes como media, ver tabla 1), hacen necesarios los estudios para la búsqueda de soluciones y alternativas con las cuales estas pequeñas comunidades puedan atender sus necesidades.

Varios estudios recientes han demostrado que la elección de sistemas con emisarios submarinos es más económica en la mayoría de los casos, cuando se compara con otros sistemas

de tratamiento y desecho de aguas residuales, incluso si se tiene en cuenta el costo ambiental (Ortiz et al. 2006), (Arasaki y Ortiz 2006), (Souza et al. 2007), (Freitas 2010).

**Tabla 1. Municipios del litoral norte paulista y la situación del saneamiento**

Municipio	Población	% aguas residuales colectadas	% aguas residuales tratadas	Carga Contaminante (kg DBO/día)		Cuerpo Receptor
				Potencial	Removida	
Ubatuba	80 604	33%	100%	4 200	1 793	Ríos/Mar
Caraguatatuba	104 150	51%	100%	5 347	2 454	Ríos/Mar
Ilhabela	29 308	4%	10%	1 388	5	Ríos/Mar
Sao Sebastiao	76 344	43%	71%	4 013	961	Ríos/Mar
Bertioga	47 645	33%	100%	2 604	773	Río Itapanhaú

Con los datos analizados en el estudio, Arasaki y Ortiz (2006) proponen nuevos valores per cápita de referencia para la implantación de nuevas estaciones de tratamiento de aguas residuales y sistemas con emisarios submarinos con tratamiento preliminar en el litoral paulista, de acuerdo con la población equivalente. Estos valores mostraron que los costos de implantación de sistemas con emisarios submarinos son menores, principalmente para poblaciones de hasta 50 000 habitantes, ver tabla 2.

**Tabla 2. Comparación entre sistema de tratamiento de aguas residuales convencional y sistema de emisario submarino y tratamiento preliminar (costo de implantación per cápita)**

Población	hasta 50 000	hasta 100 000	hasta 200 000
Estación convencional con Lodo Activado	94,35 R\$	98,55 R\$	111,97 R\$
Sistemas con emisarios submarinos + tratamiento preliminar	56,41 R\$	83,01 R\$	75,16 R\$

No obstante las diversas ventajas de estos sistemas, muchos investigadores y centros de investigación ambientales siguen mostrando preocupación por los impactos negativos al medio ambiente, restando un largo camino de investigaciones con la intención de desarrollar tecnologías para minimizar los posibles impactos. Según Ortiz (2006) será necesario establecer algunos objetivos de estudio que posibiliten que la opción con emisarios submarinos sea ventajosa, tales como:

- Análisis costo-beneficio entre las opciones de estación de tratamiento convencional y el sistema con emisario submarino.
- Sistematización de parámetros de diseño y de operación de emisarios submarinos con estación de pre-tratamiento.
- Simulación computacional aplicada al proceso de dilución del efluente de agua residual tratada en la salida del emisario.
- Legislación ambiental adecuada y realista para la regulación de la zona de mistura y el monitoramiento de la pluma del efluente en la salida del emisario, entre otros.

Siendo así, todas las investigaciones que puedan aportar en este sentido, colaborarán de forma importante en la mejora del saneamiento en el litoral paulista.

### **Legislación brasileña**

Desde el año 1986 en Brasil fue adoptada la Resolución CONAMA 20, que establece las normas para la calidad de las aguas saladas para regular el uso de los emisarios. En el 2000 la Resolución CONAMA 274 y posteriormente la Resolución CONAMA 357, presentaron importantes avances al introducir nuevos parámetros de calidad de las aguas, límites a ser considerados y la definición de cuatro clases de agua salina y salobre y sus usos y normas de calidad respectivas. Esta última resolución introdujo por primera vez el concepto de zona de mezcla como: "región del cuerpo receptor donde se produce la dilución inicial del efluente", y determinó que: "en la zona de mezcla, el órgano ambiental competente podrá autorizar, tomando en consideración el tipo de sustancia, valores en desacuerdo con los establecidos para la respectiva clase de agua, siempre que esto no comprometa los usos previstos para el cuerpo de agua". En 2011, la Resolución CONAMA 430 amplió las condiciones, criterios, normas, parámetros y directrices para la gestión de las descargas de efluentes de aguas residuales en cuerpos de agua, alterando parcialmente y complementando la Resolución CONAMA 357/2005.

### **Utilización de la modelación computacional aplicada al diseño y control de los vertidos**

La utilización de simulación computacional para el estudio del proceso de dispersión de la pluma de efluente, reproduciendo la zona de mezcla en cualquier tipo de cuerpo de agua, constituye hoy una herramienta imprescindible en el proceso de decisión, tanto para los órganos ambientales cuanto para las empresas encargadas del saneamiento. (Ortiz y Bessa 2004)

Para ello son utilizados programas computacionales, que aplican modelos matemáticos desarrollados para simular los fenómenos que ocurren en la dilución de los poluentes. Esos modelos estiman la dilución en función de parámetros de profundidad, diámetro de los agujeros del difusor y velocidad de salida, diferencia de densidades, estructuras de corrientes con estratificación o sin ella y otros.

Actualmente existen varios softwares que pueden ser utilizados en la simulación de la dispersión de la pluma de efluente tales como: el 3PLUMES y el Visual Plumes, hechos disponibles por la Agencia Ambiental Federal Americana (Environment Protection Agency - USA), para determinar la longitud del emisario y para el proyecto de difusor. Otros software muy usados en este tipo de aplicación son el CORMIX, el Mike 21, el DELFT 3D, el AQUALAB, el SisBaHiA y el Chemmap.

### **OBJETIVO**

Teniendo en cuenta estos aspectos, el objetivo de este trabajo es realizar un estudio hidrodinámico de una región costera, usando simulación computacional, para verificar la viabilidad técnica y ambiental de un sistema de eliminación de aguas residuales domésticas de una pequeña población a través de un emisario submarino, observando el comportamiento de la pluma de efluente, en cuanto a su dirección y el abatimiento de poluentes, con el fin de evaluar el impacto de su implantación en la zona costera delimitada a 300 metros de la costa.

### **ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA**

El área de estudio se encuentra en la playa Boracéia que está ubicada en la ciudad de Bertioga, perteneciente a la región metropolitana de la Baixada Santista y localizada en el litoral norte paulista. Considerada un área en desarrollo, este litoral alberga pequeñas poblaciones en franco crecimiento.

Para el presente estudio fue considerada la existencia de dos comunidades de 25 000 y 30 000 habitantes respectivamente. Para la cuantificación del gasto del efluente fueron considerados un consumo de agua per cápita de 200 L/día y un coeficiente de retorno igual a 0,8, resultando en 47 L/s y 64 L/s de gasto de aguas residuales domésticas, respectivamente. El nutriente utilizado como patrón fue el fósforo, con una concentración en el punto de lanzamiento de 5 mg/L, típica de aguas residuales domésticas.

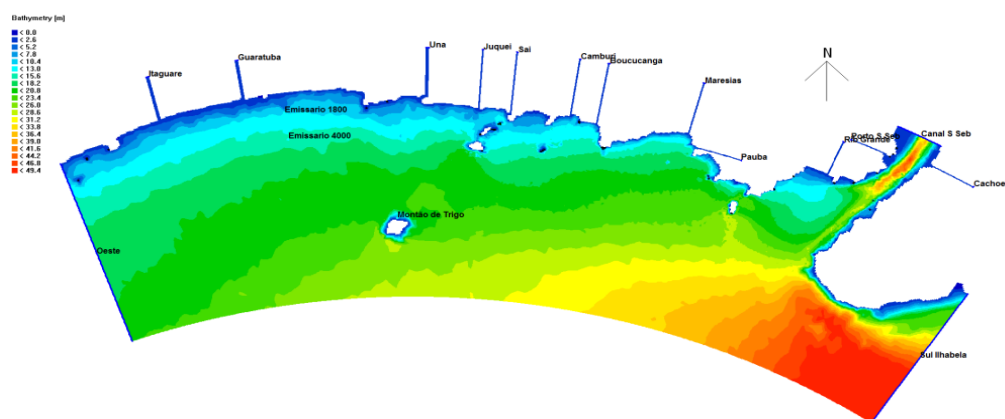
Para la simulación hidrodinámica de la región, se utilizó el conjunto de modelos integrados Delft 3D, que puede realizar simulaciones de regiones costeras, ríos o estuarios. Este software permite simular el flujo, advección y dispersión, transporte de sedimentos y la morfología, además de la calidad del agua, en modelos bidimensionales y tridimensionales. En este estudio fue realizada una simulación bidimensional con el modulo Delft3D-Flow. De los modelos teóricos, para la simulación del proceso de dispersión de la pluma, fue usado el UM3.

Para el modelado de la batimetría, se entraron datos de las cartas náuticas de la región para crear una malla. Se usó una malla (grid) con 110 633 células bidimensionales de aproximadamente 100x100 metros y con 5 capas equidistantes. Para la rugosidad del fondo se adoptó un coeficiente de Manning constante e igual 0,027 para ambas direcciones, ver figura 2.

Para las entradas de marea, en el borde este del modelo, se usaron las constantes armónicas determinadas por los mareógrafos localizados en el puerto de Sao Sebastiao y en el este de Ilhabela (Saco Sombrío), disponibles por la marina de Brasil en internet. Para efectos de comparación y calibración, se usaron datos de mareas de la Ilha do Montao de Trigo.

Para el borde oeste del modelo, se obtuvo con el Instituto Oceanográfico una serie temporal de dos años (2004 y 2005) con intervalo de tiempo de una hora. El borde inferior de la malla fue considerado cerrado. Los valores adoptados de gasto para los ríos que llegan a la región estudiada, fueron tomados de los informes de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), usándose los flujos medios anuales.

En relación con la entrada de la salinidad y la temperatura, se aplicaron valores constantes de 34,6 ppt para el agua marina, 5 ppt para las aguas de los ríos y una temperatura constante de 22,75 °C.



**Figura 2. Batimetría de la región modelada (desde la ensenada de Sao Lourenco y la isla Sao Sebastiao)**

El periodo simulado en el modelo hidrodinámico es el comprendido entre el 01/07/2005 y el 31/07/2005, habiéndose analizado el comportamiento hidrodinámico de la pluma del efluente en posiciones previamente escogidas como posibles locales de lanzamiento, ver tabla 3.

Los valores de concentración del poluente fueron medidos en 19 puntos a lo largo de la costa predefinidos en la batimetría y, comparados con el valor estipulado por la resolución CONAMA 357/2005 que establece para aguas salina de clase 1 una concentración de 0,062 mg/L de fósforo total.

**Tabla 3. Distancia desde los puntos de lanzamiento escogidos a la costa y la profundidad asociada**

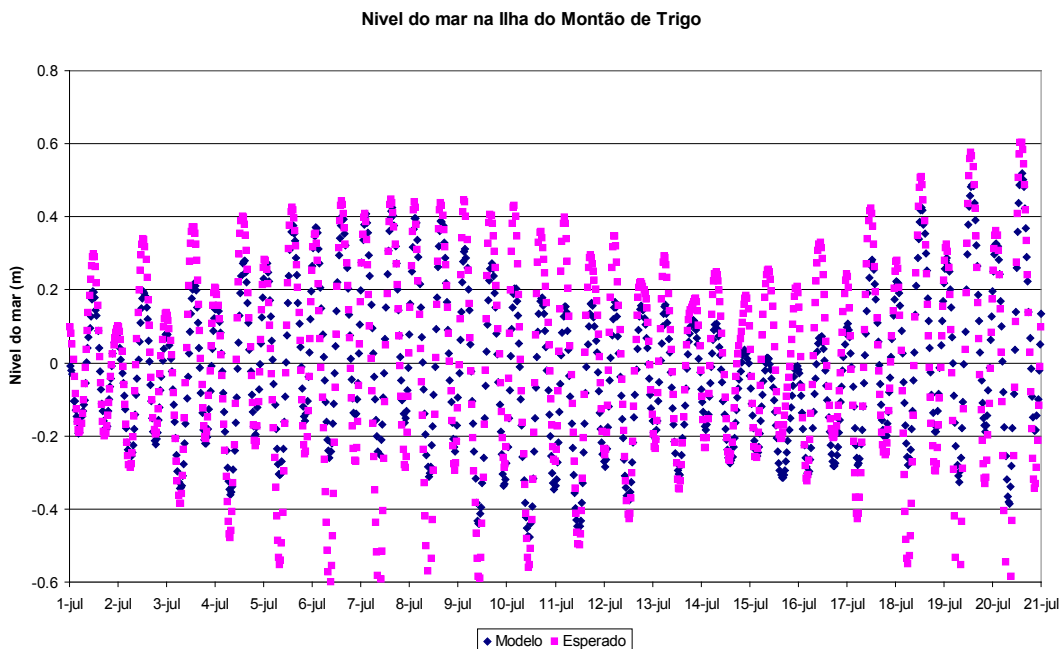
Distancia de la costa (m)	Profundidad (m)
1 500	6,7
1 800	9,75
2 000	10,8

Los perfiles de velocidad obtenidos alimentaron el modelo de campo próximo (UM3) para luego entrar con la carga de poluente en el Delft3D donde fue simulado el comportamiento de la pluma en el campo distante y las condiciones de calidad de las aguas costeras en la zona de mezcla.

## RESULTADOS

### Modelo hidrodinámico – calibración

El modelo fue calibrado usando los valores de los marégrafos ubicados en la Ilha do Montao de Trigo. Como puede verse en la figura 3, los valores simulados son muy semejantes a los reales para el periodo modelado.



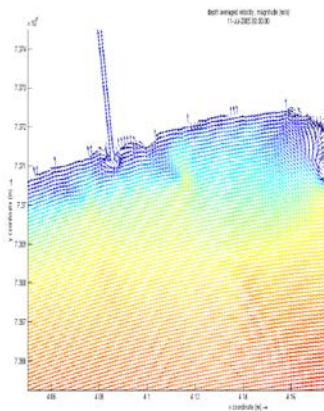
**Figura 3: Nivel del mar modelado vs. esperado en la región de la isla Montao de Trigo (Período del 01 a 21 de julio de 2005)**



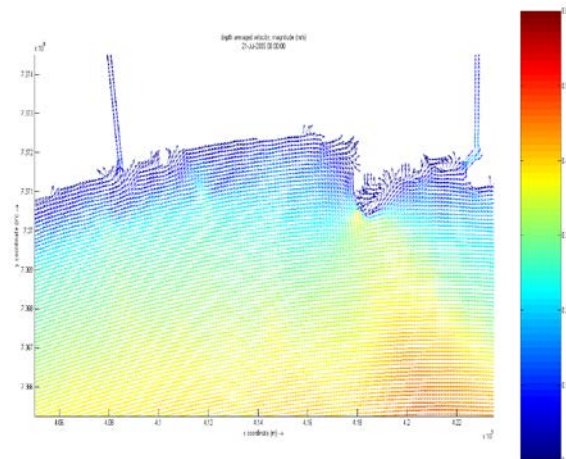
### Campo de velocidades y perfil de velocidad en el punto de lanzamiento

Del modelo hidrodinámico, se extrajeron los datos de los campos de velocidad resultantes de la simulación.

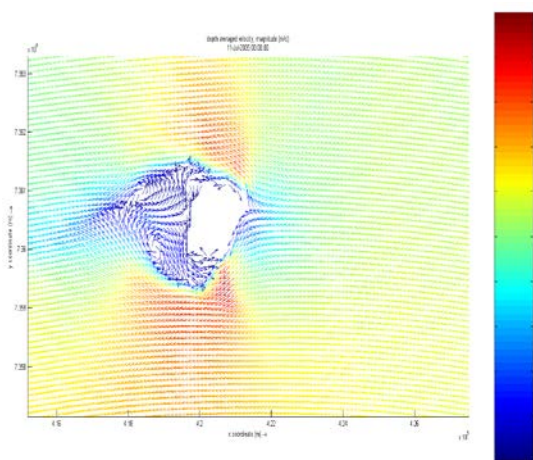
Las figuras 4 y 5 muestran el campo de velocidades medias de la región de la playa Boracéia y en las figuras 6 y 7, el campo de velocidades de la región de la isla Montao de Trigo.



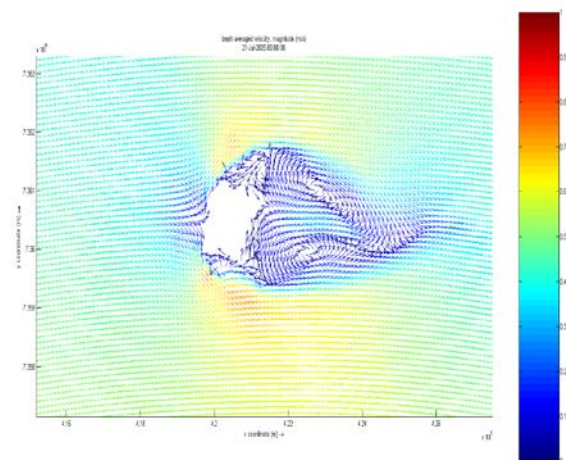
**Figura 4: Campo de velocidades medias (playa Boracéia). Horario simulado: 11/07/2005 00h00min**



**Figura 5: Campo de velocidades medias (playa Boracéia). Horario simulado: 21/07/2005 00h00min**



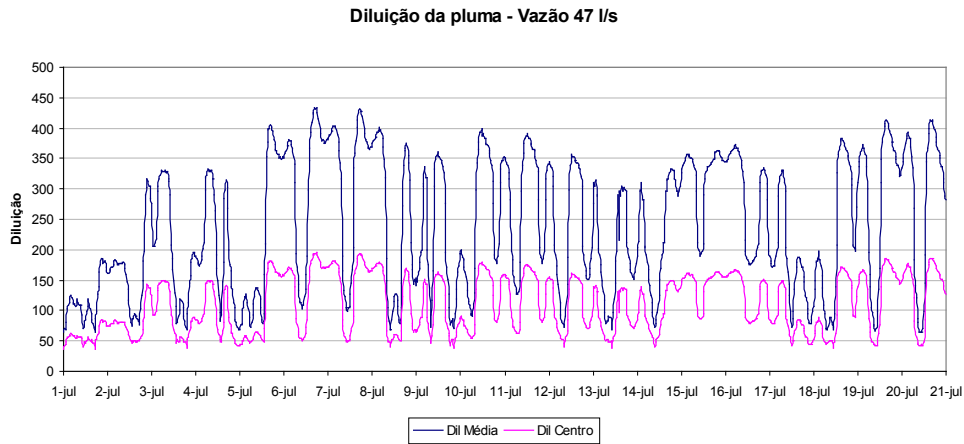
**Figura 6: Campo de velocidades medias (Isla Montao de Trigo). Horario simulado: 11/07/2005 00h00min**



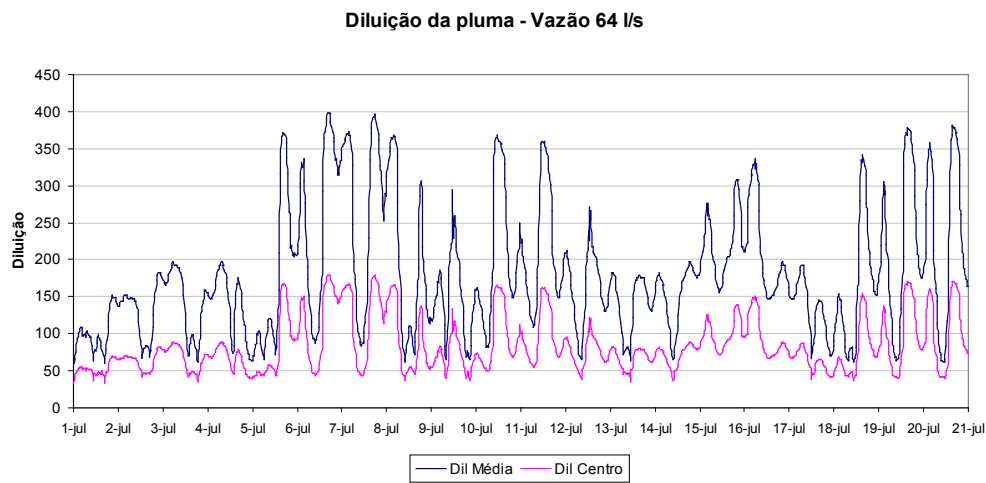
**Figura 7: Campo de velocidades medias (Isla Montao de Trigo). Horario simulado: 07/07/2005 00h00min**

### Simulación del campo próximo

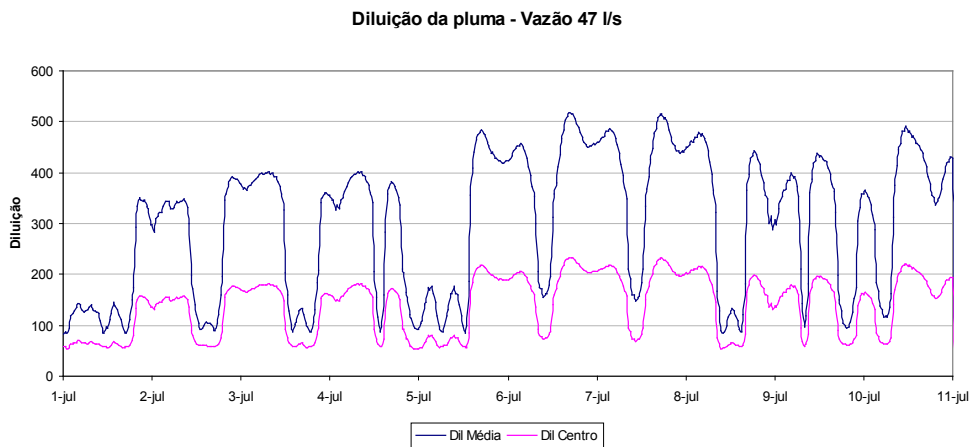
De la simulación hidrodinámica, se obtuvieron los perfiles de velocidades de los puntos seleccionados para el lanzamiento, y fueron usados en el modelo de campo próximo UM3. Los resultados de la dilución inicial, media y en el centro de la pluma, pueden verse en las figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13. Fue representado un período de 20 días para la longitud de emisario de 1500 metros, y de 10 días para 1800 y 2000 metros.



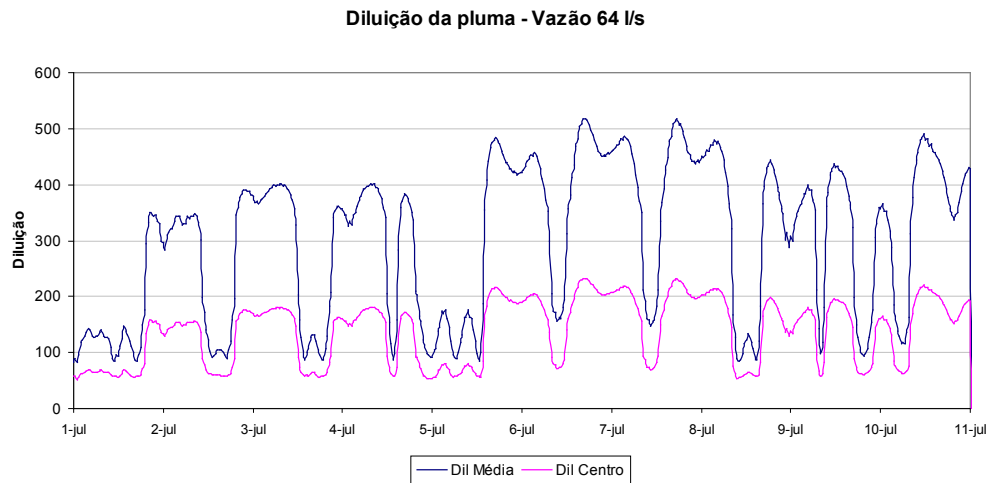
**Figura 8: Dilución inicial de la pluma de efluente (47 L/s y lanzamiento a 1500 m de la costa)**



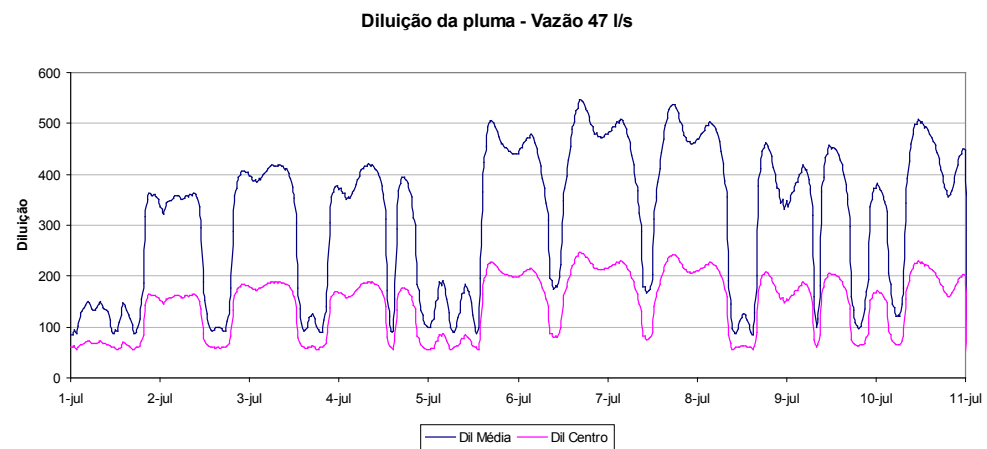
**Figura 9: Dilución inicial de la pluma de efluente (64 L/s y lanzamiento a 1500 m de la costa)**



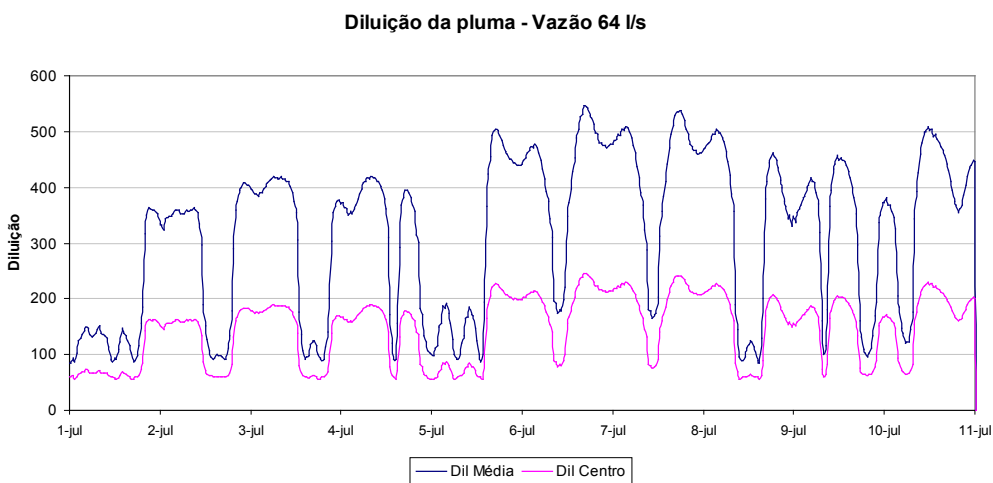
**Figura 10: Dilución inicial de la pluma de efluente (47 L/s y lanzamiento a 1800 m de la costa)**



**Figura 11: Dilución inicial de la pluma de efluente  
(64 L/s y lanzamiento a 1800 m de la costa)**



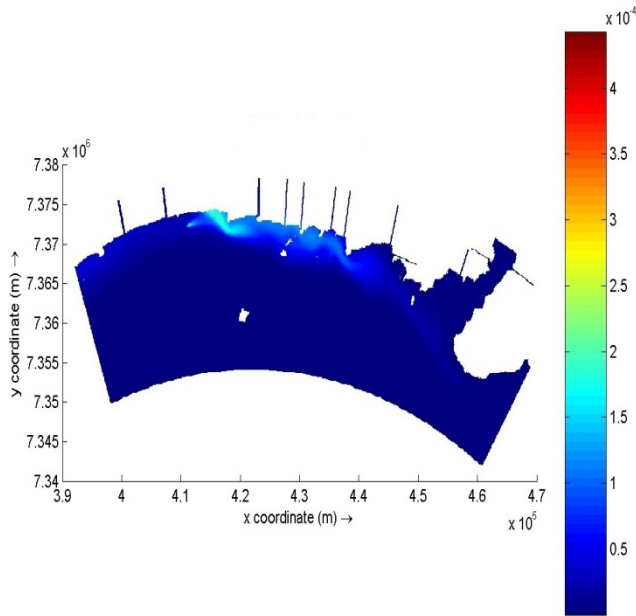
**Figura 12: Dilución inicial de la pluma de efluente  
(47 L/s y lanzamiento a 2000 m de la costa)**



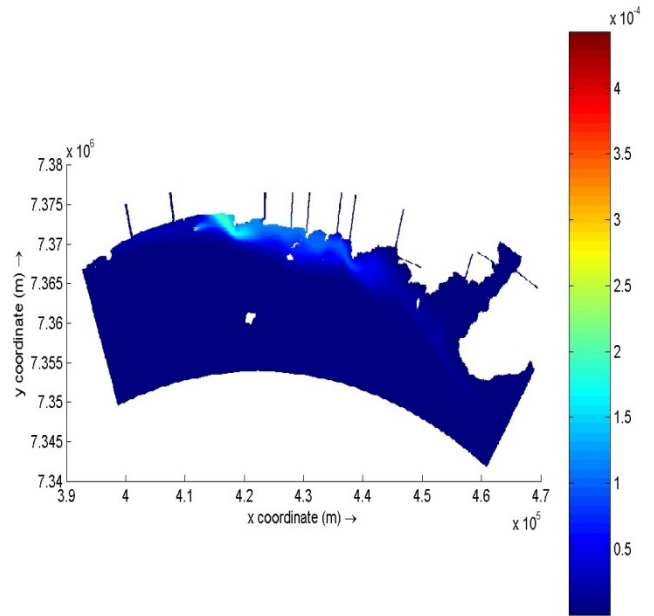
**Figura 13: Dilución inicial de la pluma de efluente  
(64 L/s y lanzamiento a 2000 m de la costa)**

### Simulación del campo distante

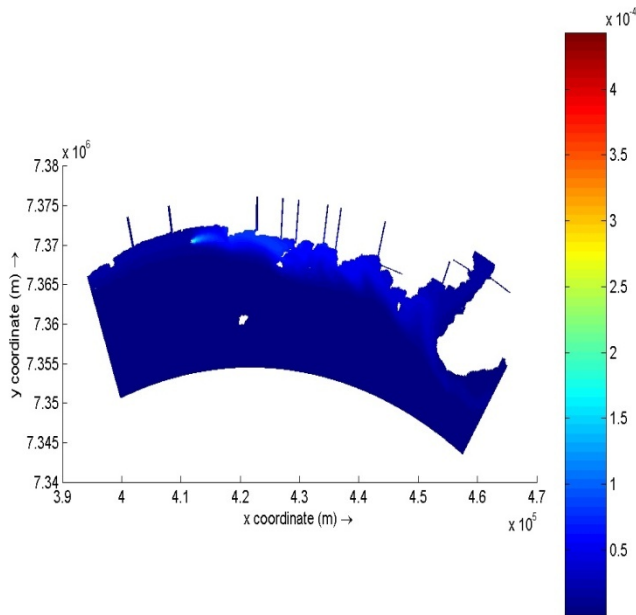
Los resultados del modelo de campo próximo fueron acoplados a un modelo hidrodinámico. En las figuras 14, 15, 16, 17, 18 y 19 se muestra el comportamiento de la pluma de efluente representado mediante la concentración de fósforo pasados 20 días de simulación.



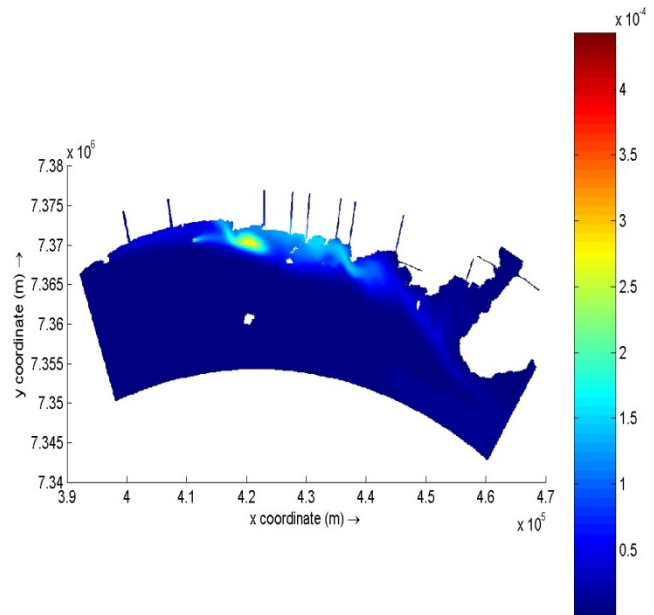
**Figura 14: Concentración de fósforo ( $10^{-4}$  mg/L) en la capa intermedia (47L/s - 1500 m)**



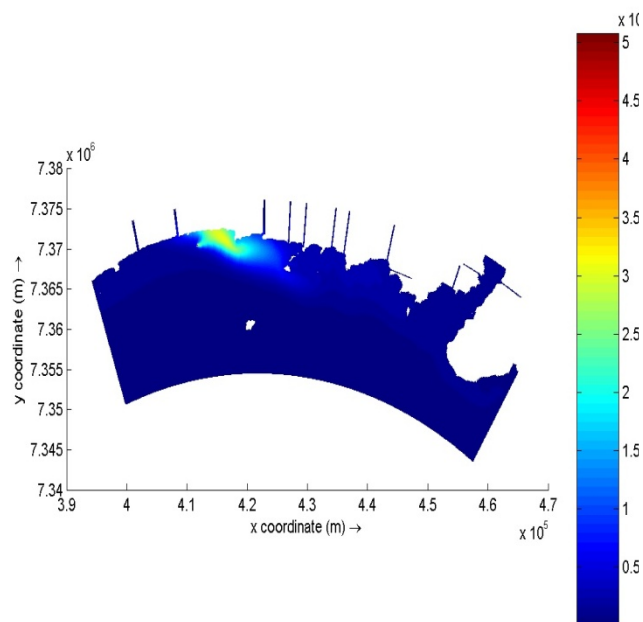
**Figura 15: Concentración de fósforo ( $10^{-4}$  mg/L) en la capa intermedia (64L/s - 1500 m)**



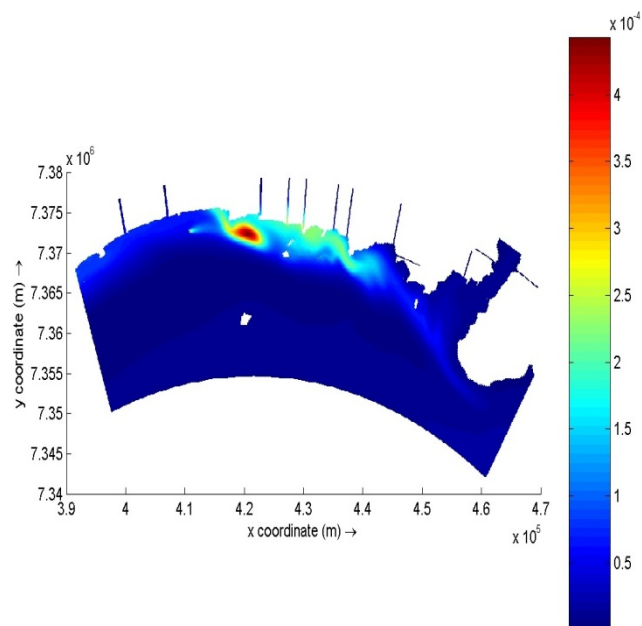
**Figura 16: Concentración de fósforo ( $10^{-4}$  mg/L) en la capa intermedia (47L/s - 1800 m)**



**Figura 17: Concentración de fósforo ( $10^{-4}$  mg/L) en la capa intermedia (64L/s - 1800 m)**



**Figura 18: Concentración de fósforo ( $10^{-4}$  mg/L) en la capa intermedia (47L/s - 2000 m)**



**Figura 19: Concentración de fósforo ( $10^{-4}$  mg/L) en la capa intermedia (64L/s - 2000 m)**

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se observa que existe una alta dilución ya en el punto de lanzamiento, que cumple inmediatamente las concentraciones límites establecidas en la resolución CONAMA 357/2005 de 0,062 mg/L de fósforo total, para las aguas salinas de clase 1. Esto permitiría un punto de lanzamiento más próximo a la costa, disminuyendo el costo y la complejidad de la implantación del emisario submarino en el lugar.

Aunque el nivel de concentración del poluyente es bajo, se observó que la pluma, debido a la corriente preferencialmente paralela a la línea de la costa en el lugar de interés, tiende a estar muy próxima a la misma, a lo que se debe brindar especial atención para respetar la legislación que determina el área protegida de 300 m desde la costa. Según aumenta la distancia entre el punto de descarga y la costa, hay una menor interacción entre la pluma y la línea de costa.

## CONCLUSIONES

- Se observa, en principio, el potencial técnico y ambiental de la utilización de emisarios submarinos, para satisfacer las necesidades de pequeñas poblaciones en el área de interés, debido a la alta dilución inicial verificadas en las simulaciones presentadas. No obstante, este estudio es apenas una evaluación preliminar, están previstos otros estudios que considerarán la frontera inferior de la malla abierta y una malla más refinada con células menores.
- Será realizada también una modelación tridimensional para obtener el proceso de dilución de la pluma a lo largo de la columna de agua, particularmente importante en los casos de estratificación vertical del cuerpo de agua. También serán incorporados nuevos estudios demográficos, considerando el crecimiento actual de la región estudiada, de forma tal que el flujo de descarga sea actualizado.
- En un futuro próximo, se pretende que esta herramienta computacional pueda proporcionar informaciones importantes para la toma de decisión en la elección de los sistemas de

tratamiento de aguas residuales. Para comunidades costeras con poblaciones pequeñas (menos de 50 000 habitantes), es importante que la opción de sistemas de eliminación de aguas servidas a través de emisarios submarinos, pueda ser comparada con las opciones de tratamiento y disposición convencionales, incluyendo la evaluación de los posibles impactos ambientales y los costos de construcción y mantenimiento.

## RECONOCIMIENTO

Se agradece a la CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior) y al Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica de la Universidade de Sao Paulo.

## REFERENCIAS

- Arasaki E. y Ortiz J.P.** (2006). “Critérios de decisão aplicados aos emissários submarinos no litoral paulista”. Ed. Emissários Submarinos: Projeto, Avaliação de Impacto Ambiental e Monitoramento. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Sao Paulo. Brasil.
- Do Carmo R.L., Márques C. y Itapura de Miranda Z.A.**(2012). “Dinâmica demográfica, economia e ambiente na zona costeira de Sao Paulo”. Ed. Textos Nepo 63. Sao Paulo. Brasil.
- Freitas S.**(2010). “Proposta de metodologia de projeto de sistema de disposição oceânica de esgotos sanitários, em localidades de pequeno porte”. Tese de Maestría. Ingeniería Ambiental. Universidade do Estado de Rio Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil.
- Naval L. P., Bandeira J. S., Silva C. D. F. y Wanderley T. F.**(2001). “Estudo da Eficiência de uma Estação de Tratamento de Esgoto de Palmas”. II Congresso Científico do Centro Universitário Luterano. Tocantins. Brasil.
- Souza J.F., Azebedo J.L., Oliveira L.R. y Soares I.D.** (2007). “Emissários submarinos, uma alternativa para a disposição final de efluentes em cidades costeiras”. Departamento de Física. Universidade Federal do Rio Grande. Brasil.
- Subtil E.L., Mierzwa J.C., Ortiz J.P., Garcia R.S., García A. and Alba J.G.** (2012). “Environmental response of wastewater inputs through SSO (Santos Submarine Outfall) utilizing an eutrophication numerical model”. Journal of Shipping and Ocean Engineering, vol. 1, no. 2, pp. 68-75.
- Ortiz J.P. y Bessa K.L.** (2004). “Modelagem computacional de descarga de efluentes em canal com análise dos campos próximo e distante”. IAHR-Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Sao Pedro. Sao Paulo. Brasil.
- Ortiz J.P., Arasaki E. y Marcelino E.B.** (2006). “Visão geral dos Emissários Submarinos no Litoral Paulista”. Ed. Emissários Submarinos: Projeto, Avaliação de Impacto Ambiental e Monitoramento. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (CETESB). Sao Paulo. Brasil.