

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE DESCARGA UTILIZANDO UN
MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGIANO**

MSc. Ing. Mónica Fossati, Ing. Mariana Fernández y Dr. Ing. Ismael Piedra-Cueva
Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFLA. J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay,
mfossati@fing.edu.uy

RESUMEN:

En este trabajo se presentan las características y los principales resultados obtenidos durante el trabajo de evaluación de las alternativas de disposición final, mediante emisarios subacuáticos, de los líquidos cloacales generados y que se prevén puedan generarse en los próximos años en la ciudad de Montevideo y en el área Maldonado-Punta del Este. El trabajo se centra fundamentalmente en la identificación de diferentes alternativas de vertimiento y en la evaluación de sus impactos sobre la calidad del agua en la zona, mediante la realización de un estudio prospectivo utilizando un modelo numérico de corrientes y de calidad de agua tridimensional implementado para representar las condiciones de la zona de interés. Utilizando este tipo de herramientas de última generación es posible considerar los principales factores físicos que intervienen en el transporte de sustancias de forma integrada y por lo tanto se incluyen en el proceso de análisis y comparación de alternativas la mayor cantidad de variables posibles.

ABSTRACT:

This paper presents the characteristics and principal results of an alternatives study of sewage effluent final disposal into the sea with a submerged outfall for the city of Montevideo and the area of Maldonado-Punta del Este. This work is focused on the identification of alternatives and on the evaluation of the potential impact that the discharged effluent can have on the water quality of the nearby zone. This was achieved by implementing a 3D hydrodynamic and water quality model in the zone of study. With the aid of these innovative tools it is possible to consider the principal physical factors that are involved in the transport of substances in an integrated way. Therefore, a wide range of variables is included in the analysis and comparison of the different alternatives of sewage effluent final disposal.

PALABRAS CLAVES:

Modelación de calidad de agua, Río de la Plata, emisarios subacuáticos.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se han desarrollado proyectos de mejora del sistema de saneamiento de las ciudades costeras de Montevideo y Punta del Este, en los cuales se prevé la descarga de los líquidos residuales tratados al Río de la Plata y al Océano Atlántico mediante emisarios subacuáticos. La capital del Uruguay, Montevideo, tiene un millón y medio de habitantes y sobre la costa del Río del Plata se encuentran varias playas que reciben a sus pobladores y a turistas en la estación de verano. Por otro lado, Punta del Este es el principal balneario del Uruguay y cada año lo visitan más 530.000 turistas que se sienten atraídos por la buena infraestructura, los excelentes servicios y la increíble belleza natural del lugar.

Los proyectos de saneamiento de las dos ciudades tienen características muy distintas pero en ambos casos se debe evaluar el impacto de la descarga subacuática sobre las playas y zonas costeras aledañas. La Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) por un lado y la empresa Tahal Consulting Engineers por el otro, encomendaron al Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República de Uruguay que realizara la evaluación de las alternativas de descarga utilizando herramientas numéricas de avanzada que simularan distintos escenarios de funcionamiento. Estos estudios se llevaron a cabo aplicando un modelo numérico hidrodinámico baroclínico y un modelo de transporte de sustancias tridimensional en las zonas costeras de ambos departamentos, a partir de los cuales es posible obtener la variación temporal de las corrientes, niveles, salinidad y la concentración del contaminante descargado en cualquier punto del dominio analizado.

Se utilizó en este estudio el modelo numérico tridimensional MOHID. Este modelo ha sido desarrollado en el Instituto Superior Técnico - Maretec de Portugal y se aplicó en los dos subdominios de interés, la costa de Montevideo y la costa de Punta del Este. En los últimos años se han realizado varios trabajos de modelación del flujo en Río de la Plata y el Océano Atlántico utilizando el MOHID (Fossati y Piedra-Cueva, 2006; IMFIA, 2006). Específicamente para el análisis de las distintas alternativas de descarga y para la evaluación de sus potenciales impactos se utilizó el módulo de calidad de aguas lagrangiano del MOHID (MARETEC, 2006). Los modelos de transporte lagrangianos son muy útiles para simular procesos locales con gradientes acentuados. El módulo de calidad de aguas del MOHID simula el transporte de la pluma generada por la descarga de partículas de un contaminante dado utilizando el campo de corrientes calculado con el módulo hidrodinámico. Las principales características y resultados de la implementación y calibración del modelo hidrodinámico en la zona costeras uruguayas se incluyen en el trabajo “Modelación hidrodinámica tridimensional del Río de la Plata utilizando modelos encajados” presentado en este congreso.

OBJETIVO

El principal objetivo de este trabajo es presentar la metodología de análisis de alternativas de descarga aplicando una herramienta numérica sofisticada que permita evaluar el impacto sobre la calidad bacteriológica de las aguas. La misma ha sido aplicada para evaluar las distintas alternativas de descarga mediante emisarios subacuáticos del líquido residual pretratado de las ciudades de Montevideo y de Punta del Este. Para sintetizar se presentan los resultados obtenidos en el caso de estudio de Punta del Este.

METODOLOGIA

El estudio de alternativas desarrollado comprende las siguientes etapas:

- 1- Definición de las distintas alternativas de descarga a evaluar. Se deben definir la longitud y alineación del emisario, el diseño preliminar del difusor y las características del efluente, es decir, caudal y concentración de contaminante.
- 2- Implementación y calibración del modelo utilizando una grilla de cálculo de alta resolución centrada en la zona de descarga. Definición de una red de puntos de monitoreo en las zonas de interés.
- 3- Simulación hidrodinámica de un período de tiempo representativo de las condiciones medias del flujo.
- 4- Simulación de cada una de las alternativas de descarga definidas en la etapa 1 con el modelo de transporte de sustancias que utiliza el campo de corrientes, niveles y salinidad calculados en la etapa anterior. Cálculo de las curvas de frecuencia de la concentración del contaminante en las zonas monitoreadas y evaluación de los impactos generados por cada alternativa.
- 5- Comparación de la afectación de las distintas alternativas y selección de una alternativa.
- 6- Diseño del difusor. Determinación de la longitud del difusor, número de puertos, diámetro y orientación de los mismos respecto a la alineación del emisario.
- 7- Análisis de sensibilidad de la solución del modelo a los parámetros del mismo.

Etapas

En esta etapa se deben identificar y definir las principales alternativas de descarga que se evaluarán, sin limitar la posibilidad de definir nuevas alternativas a partir de los resultados obtenidos. Estas alternativas en general resultan del estudio de prefactibilidad de la ubicación de la planta de pretratamiento asociada al emisario subacuático. Es importante definir además de la zona de emplazamiento, la longitud y la alineación del emisario, el diseño preliminar del difusor y las características del efluente, es decir, caudal y concentración de contaminante.

El estudio de alternativas de descarga en Montevideo considera la descarga del líquido residual de la zona Oeste de Montevideo en el Río de la Plata a través de un futuro emisario ubicado en Punta Yeguas en simultáneo con la descarga del líquido residual de la zona Este de la ciudad que se realiza actualmente a través del emisario de Punta Carretas. Fueron evaluadas dos alternativas de descarga ubicadas a 2.000 m de la costa en la zona de Punta Yeguas, un emisario con alineación Norte Sur y otro con una alineación de aproximadamente 41° hacia el Oeste de la dirección Norte Sur.

Para el caso de Punta del Este se evaluaron en primer lugar las alternativas de descarga del líquido cloacal sin considerar un tratamiento previo, lo que significó una alta concentración de contaminante en el líquido vertido al cuerpo de agua receptor. La descarga se caracteriza por un caudal igual a 1,7 m³/s y una concentración de coliformes igual a 1x10⁸ ufc/100ml. Se consideraron tres trazas posibles de emisario, Punta del Chileno, Punta Salina y San Rafael, cuya ubicación y alineación se pueden observar en el esquema de la zona que se presenta en la Figura 1.

En la traza de Punta del Chileno se estudiaron tres longitudes de emisario, 1.700 m, 3.500 m y 6.000 m, con profundidades de 14 m, 15,3 m y 18,2 m respectivamente. En la traza de Punta Salina se definieron dos longitudes a estudiar, 2.100 m y 5.500 m, y la profundidad en las mismas es de aproximadamente 22 m y 24 m, respectivamente. Por último en la traza de San Rafael fueron analizadas cuatro longitudes de emisario, 2.000 m, 3.000 m, 4.000 m y 5.000 m, cuyas

profundidades son 15 m, 16 m, 18 m y 20 m, respectivamente. Estas alternativas fueron analizadas utilizando tres mallas de detalle de alta resolución, celdas con lados entre 100 y 200 m, definidas previamente en el desarrollo del modelo hidrodinámico.

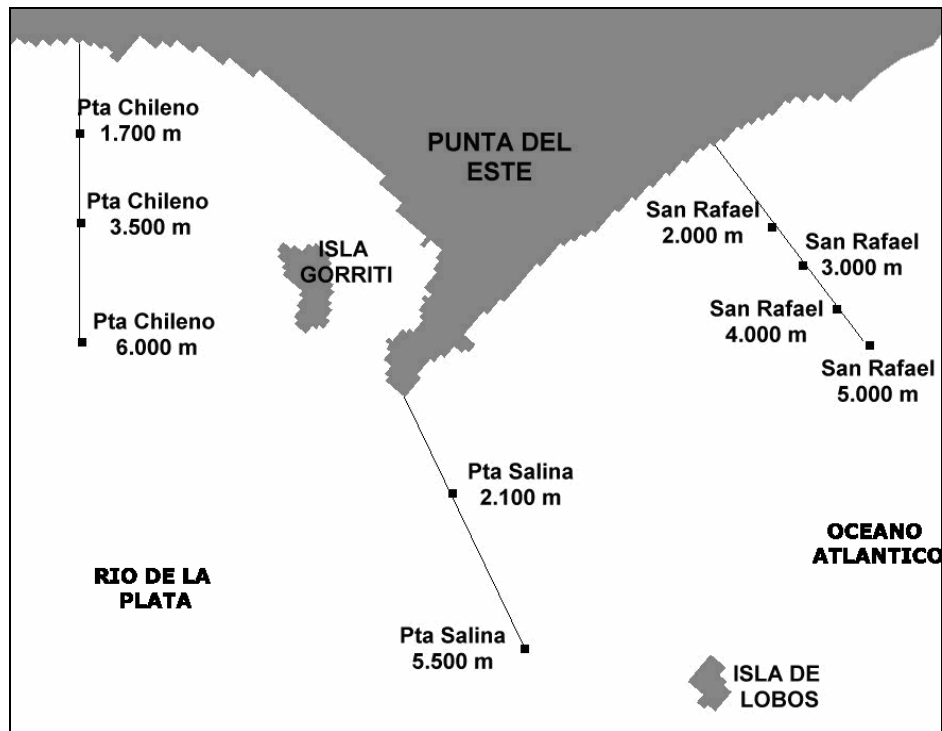


Figura 1.- Ubicación y alineación de las alternativas de emisarios largos analizadas en Punta Chileno, Punta Salina y San Rafael.

En una segunda instancia se analizaron con el modelo numérico las alternativas de descarga a través de emisarios cortos considerando un tratamiento del líquido residual bruto. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de emisarios largos, y por motivos relacionados con la posible implementación de una planta de tratamiento en la zona terrestre, el análisis de alternativas de emisarios cortos se realizó considerando una descarga en la zona de Rincón del Indio, entre la parada 30 y 31 de la Playa Brava a aproximadamente 1.000 m de la Barra del Arroyo Maldonado (traza definitiva). La ubicación y alineación de dicha traza se presenta en la Figura 2, donde también se puede observar la ubicación de los puntos de descarga analizados en relación a la morfología de la zona, como la Barra del Arroyo Maldonado, Punta Salina, las Islas Gorriti y de Lobos, etc.

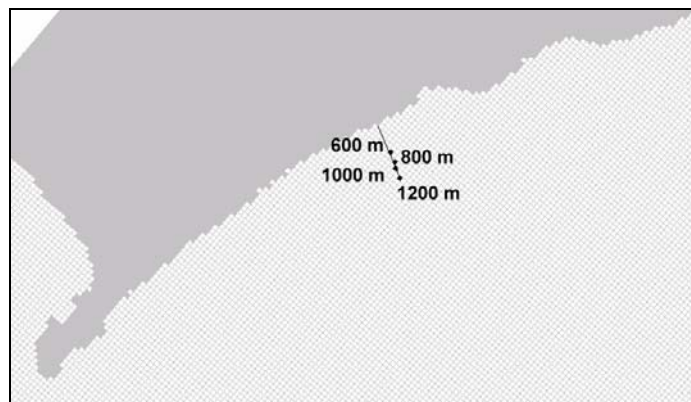


Figura 2.- Ubicación y alineación de la traza definitiva, y longitudes de emisarios cortos analizados.

Se estudiaron cuatro alternativas de longitudes de emisarios sobre la traza definitiva, 600 m, 800 m, 1.000 m y 1.200 m. La descarga se caracteriza por un caudal igual a $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y una concentración de coliformes igual a 1×10^4 ufc/100ml en condiciones de diseño e igual a 1×10^6 ufc/100ml en

condiciones de contingencia (bajo el supuesto de que la unidad de desinfección o alguna otra unidad de la planta de tratamiento sufra un desperfecto y quede inoperante durante cierto período de tiempo).

Los emisarios subacuáticos descargan el líquido residual a través de varias bocas o puertos ubicados en el extremo final del emisario (difusor) de forma de mejorar la mezcla inicial del chorro descargado con el medio receptor y obtener una mayor dilución. Debe definirse entonces una configuración del difusor para realizar el análisis de las alternativas. Por ejemplo en el estudio de Maldonado todas las alternativas se estudiaron con un difusor estándar formado por 24 puertos de descarga horizontal de 0,2 m de diámetro equidistribuidos en una zona de difusor de 100 m de largo y ubicados a 1,5 m del fondo.

Etapas 2

Implementación del modelo

Para estudiar las diferentes alternativas de vertimiento del líquido residual a través de emisarios subacuáticos y para la evaluación de sus impactos, se utilizó el módulo de calidad de aguas lagrangiano del MOHID. Este módulo simula el transporte de la pluma generada por la descarga de partículas de un contaminante dado, utilizando el campo de corrientes y las propiedades del agua calculado previamente utilizando otros módulos del modelo MOHID. Para los dos casos analizados se desarrolló un sistema de modelos anidados para representar las zonas de interés con una alta resolución (Figura 1). El modelo simula el transporte del contaminante vertido considerando los procesos de advección y difusión por mezcla así como también el decaimiento bacteriano para el caso de coliformes fecales. También se simula el campo cercano de la descarga submarina con el módulo MOHIDJET que trabaja acoplado con el módulo lagrangiano del campo lejano. El MOHIDJET reproduce la mezcla inicial del chorro descargado con el cuerpo de agua receptor y a partir de eso calcula la dilución inicial de la descarga.

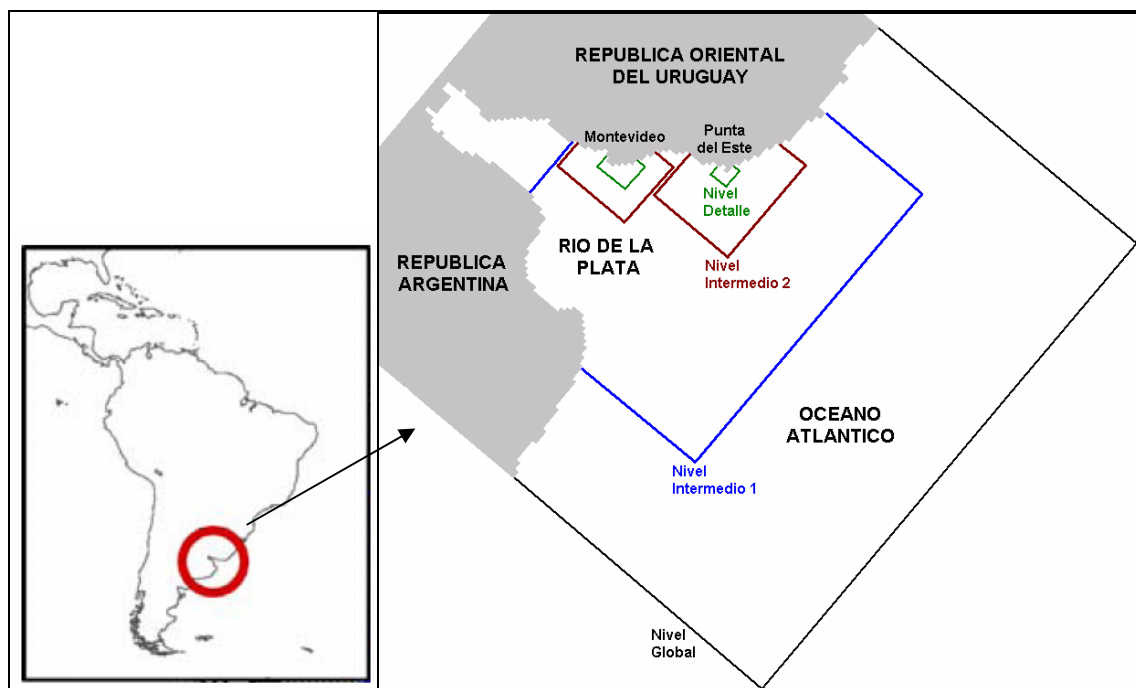


Figura 3.- Dominios de cálculo de los cuatro niveles de resolución definidos para simular la hidrodinámica en Montevideo y Punta del Este.

Cuando se calcula el transporte de una sustancia de forma lagrangiana es posible resolver la ecuación de transporte de forma desacoplada con las ecuaciones de cantidad de movimiento. Esto

significa que el módulo lagrangiano puede “leer” la información hidrodinámica del sistema y actualizar sus cálculos, sin necesidad de resolver todas las variables a la vez. En esta etapa de modelación del transporte de sustancias, el modelo calcula en cada instante de tiempo la posición y la concentración del contaminante en cada una de las partículas descargadas a partir de la información de corrientes, niveles y salinidad ya calculada en la etapa de modelación hidrodinámica baroclínica que se presentó en el trabajo “Modelación hidrodinámica tridimensional del Río de la Plata utilizando modelos encajados”. Esto puede realizarse solo en el nivel de detalle, lo que permite una gran agilidad a la hora de estudiar diferentes alternativas de descarga una vez modelado el campo hidrodinámico y las propiedades del agua del período que se quiere analizar.

Calibración del modelo

Para resolver el sistema de ecuaciones que gobiernan el transporte de una determinada sustancia es necesario definir o calcular algunos parámetros del modelo lagrangiano. En el caso de los coliformes fecales el valor de T90 es uno de los parámetros que hay que definir para que el modelo calcule la evolución de las partículas. En el modelo el valor de T90 puede definirse como constante en el tiempo o variable. En estos trabajos se utilizó la formulación de Chapra que calcula el T90 a partir de los valores de salinidad, temperatura y radiación solar. La salinidad y la radiación solar son calculadas en el modelo en cada instante de tiempo, mientras que la temperatura se considera constante en todo el dominio de cálculo e igual a 20°C. El modelo calcula entonces un factor T90 que varía en el tiempo y espacialmente, tanto en el plano horizontal como en la dirección vertical, en función de los valores de salinidad y radiación solar en cada celda de la malla.

Ensayos de T90 y análisis de los mismos realizados por la Intendencia en Montevideo muestran que en superficie, durante la temporada estival, el parámetro T90 posee un valor medio diurno de aproximadamente 20 hs. Los ensayos de T90 realizados en Punta del Este determinaron para esta zona un valor mínimo diurno de entre 2 y 4 horas. Estos valores fueron considerados como valores de referencia para ajustar el T90 determinado por el modelo para cada una de las aplicaciones. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 4 la variación diaria del T90 obtenida con el modelo para el día 27/12/1991 para una partícula ubicada en la superficie en la zona cercana a Punta Salina. En la misma se observa que en la noche el valor de T90 es máximo (ya que la radiación solar es nula) con un valor de aproximadamente 41 horas, y es determinado principalmente por la salinidad de la zona. Por otro lado en el día el T90 mínimo en ese caso es igual a 2,5 horas al mediodía.

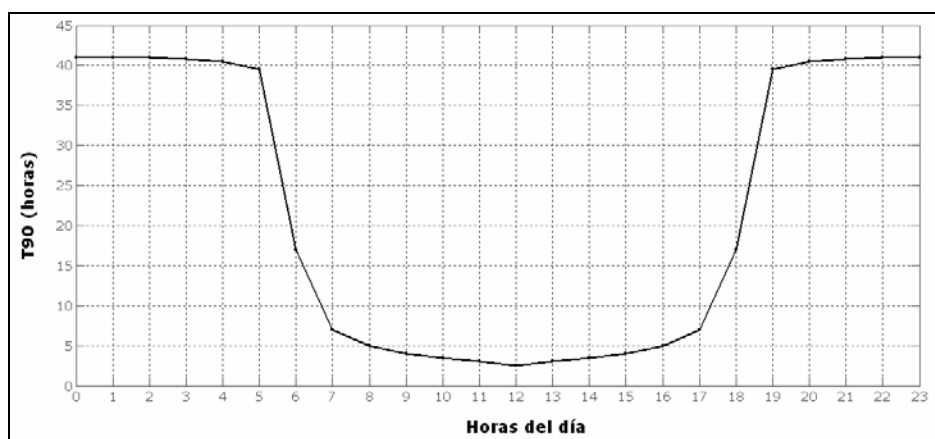


Figura 4.- Ejemplo de la variación diaria del parámetro T90 calculada por el modelo a partir de la radiación solar, temperatura y salinidad.

Otro de los parámetros que deben ingresarse al modelo de transporte lagrangiano son los parámetros equivalentes a los coeficientes de difusión turbulenta del contaminante descargado. Para definir estos parámetros del modelo se utilizaron los valores recomendados en el manual del mismo ya que

no se cuenta con mediciones de campo. Una vez seleccionada la alternativa que genera menor impacto se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados a dichos parámetros.

Definición de las zonas de control

El análisis de las diferentes alternativas consistió en la simulación de la evolución de la pluma descargada considerando una descarga continua durante un período de tiempo correspondiente al verano. La evolución de dicha pluma es monitoreada a través de la definición de áreas de control. Estas áreas de monitoreo se denominan boxes, pueden incluir una celda o varias en el plano horizontal y en cada uno de ellos el modelo calcula en cada instante de tiempo la concentración de coliformes fecales en toda la columna de agua, es decir, en un volumen que incluye las diez capas de agua definidas en la dirección vertical. Para el estudio de Montevideo se definieron como boxes las celdas que representan las principales playas de la ciudad (Figura 5). Para Maldonado se definieron, para cada una de las mallas de detalle, boxes en la zona de playas ubicados a 300 m de la costa cada 500 m aproximadamente y además se definieron zonas de control alrededor de las Islas Gorriti y de Lobos por ser zonas de baños y de cría de mariscos. A modo de ejemplo en la Figura 6 se presentan los boxes en la zona de playas y los boxes definidos en la costa de la Isla Gorriti en la malla de detalle 2.



Figura 5.- Ubicación de los boxes de monitoreo de zona de playas en la malla de detalle de Montevideo.

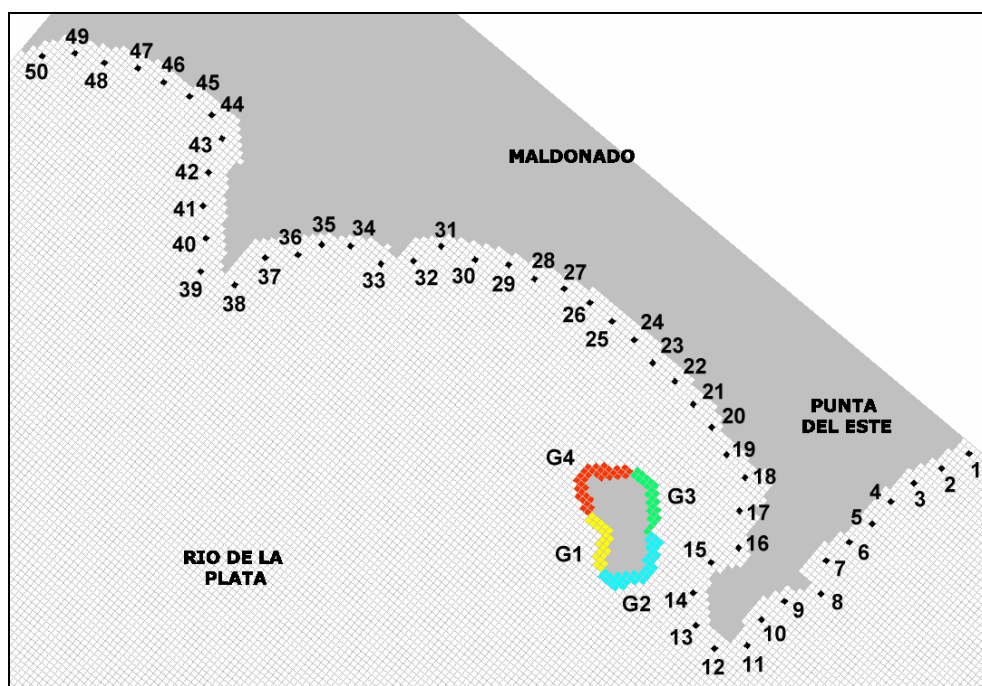


Figura 6.- Ubicación de los boxes de monitoreo costeros y de las Islas definidos en la malla de detalle 2.

Etapas 3

El período de tiempo seleccionado para la modelación hidrodinámica y posterior modelación de la pluma de descarga debe ser un período representativo de las condiciones medias del flujo. Para el caso de Maldonado, el período de modelación seleccionado corresponde al verano de 1992. Se utilizó un período correspondiente a la estación de verano ya que representa las condiciones del caudal de diseño, las cuales corresponden a una mayor población en la zona por el veraneo y representa condiciones del cuerpo de agua correspondientes a la época de uso de las playas. Desde el punto de vista de los forzantes, este período puede considerarse como representativo de condiciones medias, ya que ni los niveles, ni el caudal de aporte fluvial ni los vientos presentan valores extremos durante este período.

En otros casos, a veces es importante además analizar situaciones extremas de vientos o situaciones de estiaje, que favorezcan el impacto de la pluma de descarga sobre las zonas de interés.

Etapas 4

En esta etapa se simulan todas las alternativas de descarga definidas en la etapa 1 con el modelo lagrangiano de transporte que utiliza los campos hidrodinámicos calculados en la etapa anterior. Una vez simuladas las diferentes alternativas de descarga a través de emisarios subacuáticos, se realiza la evaluación de los impactos generados por las mismas sobre la balneabilidad de las playas cercanas a la descarga y también sobre las zonas de cría de mariscos (Islas Gorriti y de Lobos) para el caso de Maldonado.

El impacto generado por cada una de las alternativas de descarga analizadas fue evaluado a través del control de las curvas de frecuencia acumulada de la concentración de coliformes fecales. Dicha concentración se calcula a partir de los resultados obtenidos con el modelo en cada una de las áreas de monitoreo definidas previamente y distribuidas en toda la zona costera. La modelación permite realizar un monitoreo cuasi continuo, con un valor de concentración promedio en las diez capas verticales que conforman cada box cada una hora durante todos los días simulados. De esta forma para cada simulación se cuenta con una serie de valores de concentración en los boxes de monitoreo definidos.

Los resultados obtenidos en el estudio de las distintas alternativas de emisario simuladas se evaluaron en base a la normativa europea relativa a la calidad de aguas de baño (Comunidad Europea, 2003) en las cuales se trabaja con frecuencias de ocurrencia (Tabla 1). Dicha normativa establece que aquellas aguas en las que al menos el 95% de los muestreos no sobrepasa las 2.000 ufc/100ml son aguas aptas para el baño de buena calidad. Aquellas aguas que cumplan con lo anterior y además cumplan con que al menos el 80% de los muestreos no sobrepase las 100 ufc/100ml se clasifican como aguas aptas para el baño de muy buena calidad, mientras que aquellas aguas que no cumplan ni siquiera con la primera condición se clasifican como aguas no aptas para el baño. Para evaluar los resultados obtenidos con las distintas alternativas de descarga en los boxes definidos alrededor de la Isla de Lobos se utilizó el criterio exigido en la normativa europea relativa a la calidad de aguas para la cría de mariscos (Comunidad Europea, 1979). Dicha normativa propone como criterio de calidad de agua para asegurar la buena calidad de los moluscos directamente consumidos por el hombre que al menos el 75% de los muestreos no sobrepase las 300 ufc/100ml.

Tabla 1.- Clasificación de las aguas de baño en base a los valores de concentración de coniformes fecales según la normativa europea.

Aguas de baño	Cant. Muestreos \leq 2000 ufc/100 ml	Cant. Muestreos \leq 100 ufc/100 ml
Aptas		
Muy buena calidad	$\geq 95\%$	$\geq 80\%$
Buena calidad	$\geq 95\%$	$< 80\%$
No Aptas	$< 95\%$	-

Etapas 5

Una vez realizadas las simulaciones de todas las alternativas definidas, se evalúa la calidad obtenida en los puntos de monitoreo a partir del cálculo de las curvas de frecuencia de ocurrencia de concentración del contaminante, en este caso coliformes fecales. Utilizando la norma es posible clasificar cada una de las playas monitoreadas según el criterio establecido por la normativa utilizada. Además, se puede realizar un análisis comparativo entre las distintas alternativas de descarga definidas. Para el caso de Maldonado, se realizó un análisis comparativo de los impactos generados por las distintas alternativas para una misma traza y para todas las trazas en conjunto.

Etapas 6

Una vez seleccionada la alternativa de descarga de menor impacto, se realiza un análisis del diseño del difusor, el cual consiste en definir varios prediseños de difusores y realizar un análisis comparativo de los mismos eligiendo aquel difusor que maximice la dilución inicial y minimice el impacto generado por la descarga sobre las zonas de monitoreo. Se analizaron distintas orientaciones de los puertos de descarga, entre otros, puertos de descarga horizontal y vertical, así como también difusores descargando a 90°, 45° y colineales con el eje del difusor.

Etapas 7

Por último, es importante realizar un análisis de sensibilidad de la solución del modelo respecto a los principales parámetros del mismo, con el objetivo de conocer las variaciones que pueden generarse en la solución obtenida en el caso de que los parámetros, y por tanto los procesos que representan, sean diferentes. Se estudió la sensibilidad del modelo de transporte a tres parámetros diferentes, dos que intervienen en la representación del movimiento turbulento de las partículas descargadas y un tercer parámetro que interviene en la representación de la difusión turbulenta. Las simulaciones realizadas en este análisis de sensibilidad mantienen las principales características de modelación utilizadas para la evaluación de alternativas. La única diferencia es que se duplican los parámetros de difusión con el propósito de conocer la evolución de la descarga en una situación más desfavorable a la definida en el estudio de alternativas.

RESULTADOS: CASO MALDONADO-PUNTA DEL ESTE

Emisarios Largos

El análisis de alternativas de descarga a través de emisarios largos consistió en la simulación de la evolución de la pluma considerando una descarga continua durante 18 días en época de verano y su monitoreo a través de la definición de boxes en la zona de playas a 300 m de la costa y en la costa de las Islas Gorriti y de Lobos.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestra la pluma de descarga superficial y la concentración de coliformes fecales en la misma, obtenida con el modelo en dos instantes de tiempo seleccionados

al descargar en la traza de Punta Salina a 5.500 m de la costa. El primer instante (a) corresponde a una situación de flujo entrante al Río de la Plata, en donde la pluma se desplaza hacia el Noroeste alcanzando con concentraciones muy bajas la costa Sureste de la Isla Gorriti pero sin afectar la zona de Punta Salina, principalmente debido a la gran distancia existente entre la costa y el punto de descarga. El segundo instante seleccionado (b) se corresponde con una situación de flujo saliente y paralelo a la costa de la Playa Brava en el cual se observa la cercanía de la descarga a la Isla de Lobos y la afectación que la pluma genera sobre la misma.

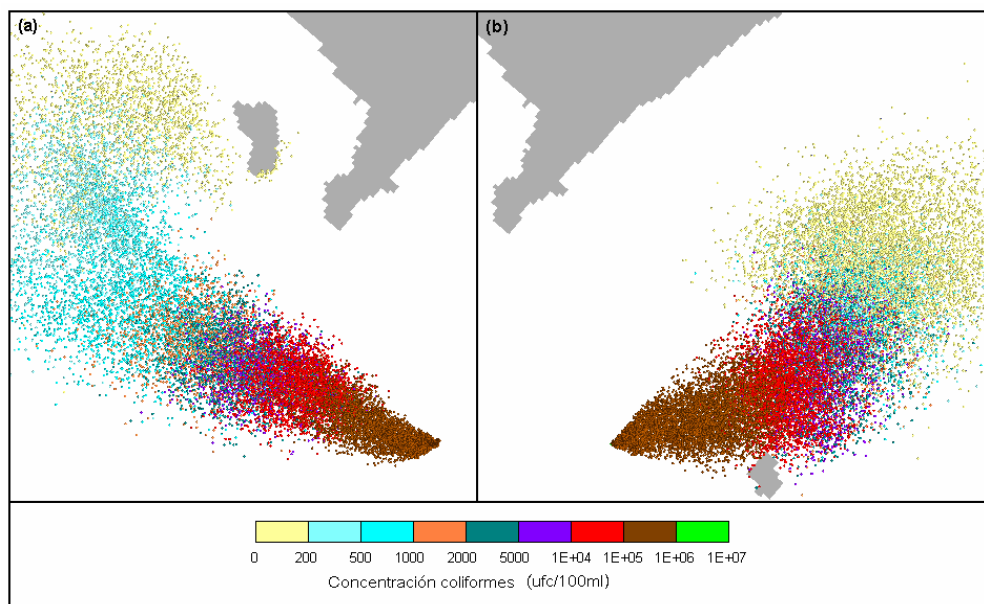


Figura 7.- Ubicación y concentración de la pluma de descarga obtenida con el modelo al descargar en Punta Salina a 5.500 m de la costa en dos instantes del período modelado.

La dilución inicial promedio calculada a partir de los resultados del modelo utilizando el difusor estándar mencionado anteriormente para las distintas alternativas de emisarios largos se presenta en la Tabla 2. En la misma se observa que las mayores diluciones iniciales se obtuvieron con las alternativas de descarga en Punta Salina y San Rafael, siendo el valor más alto el obtenido en San Rafael a 5.000 m de la costa. En la Figura 8 se presenta a modo de ejemplo la variación temporal de la dilución inicial durante los 18 días de simulación de la descarga en la traza de Punta Salina a 5.500 m de la costa, donde se observa que la dilución inicial en general oscila alrededor de 85, con picos mayores a 150 y valores bajos menores a 50.

Tabla 2.- Dilución inicial media obtenida para las alternativas de descarga a través de emisarios largos.

Alternativa	Dilución inicial
Punta Salina	
2.100 m	85
5.500 m	87
San Rafael	
2.000 m	75
3.000 m	83
4.000 m	87
5.000 m	90
Punta Chileno	
1.700 m	49
3.500 m	67
6.000 m	75

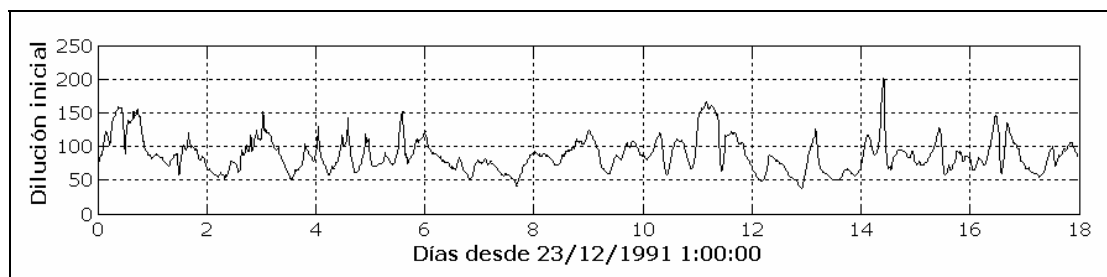


Figura 8.- Variación temporal de la dilución inicial obtenida durante los 18 días simulados con la descarga en Punta Salina a 5.500 m de la costa.

Para cada una de las alternativas de descarga analizadas se obtuvo la variación temporal de la concentración de coliformes en cada uno de los boxes de control definidos. A partir de cada serie se calculó la curva de frecuencia en cada box para cada alternativa. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 9 la variación temporal obtenida para la alternativa de descarga en Punta Salina a 2.100 m en un box ubicado a 300 m de la costa sobre la punta. En la misma se observa que la afectación en la costa no ocurre de forma continua, sino que se da a través de diferentes eventos en los cuales la pluma se dirige hacia la costa. Se observa por ejemplo que entre los días 4 y 8 en la costa de Punta Salina se registran colimetrías mayores a 100 ufc/100ml casi todo el tiempo, y en cambio entre los días 8 y 10 la zona no se ve afectada.

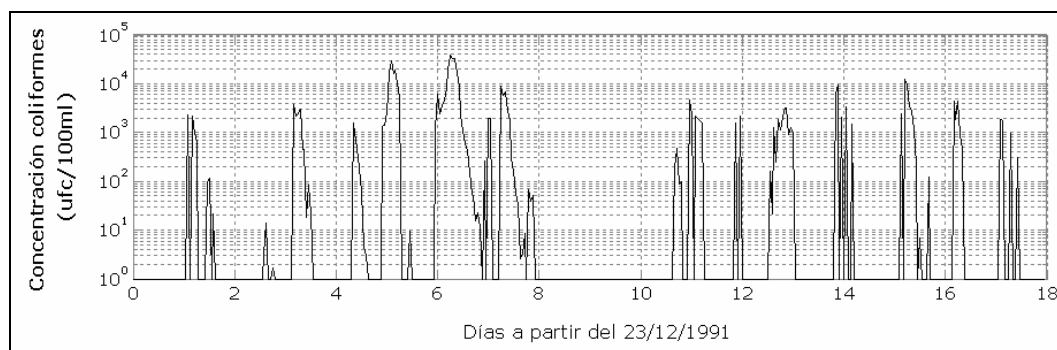


Figura 9.- Variación temporal de la concentración de coliformes durante los 18 días simulados con la descarga en Punta Salina a 2.100m en un box costero ubicado sobre la punta.

Con el fin de realizar un análisis conjunto de las nueve alternativas de emisarios largos analizadas se presentan en la Tabla 3 las curvas de frecuencia en el box más afectado con cada una de las alternativas de descarga analizadas.

Tabla 3.- Frecuencia de ocurrencia (%) para los distintos rangos de colimetría obtenidos con el modelo en los boxes costeros más afectados para cada alternativa de emisarios largos analizada.

Rangos (ufc/100ml)	Pta Sal 2100 Box n° 20	Pta Sal 5500 Box L1	San Raf 2000 Box n° 1	San Raf 3000 Box n° 1	San Raf 4000 Box n° 1	San Raf 5000 Box n° 1	Pta Chi 1700 Box n° 34	Pta Chi 3500 Box G1	Pta Chi 6000 Box G1
< 100	76.6	80.1	46.1	63.4	87.5	97.2	53.2	67.1	92.1
< 200	78.9	84.3	49.3	66.7	89.1	97.5	57.4	69.4	93.3
< 500	81.0	89.1	53.2	73.1	91.9	98.6	62.3	73.8	94.2
< 1000	83.8	92.6	58.8	79.9	94.9	98.6	67.6	76.2	95.8
< 2000	87.5	94.9	66.4	83.8	97.0	99.5	70.8	78.9	97.5
< 5000	91.4	97.9	75.0	91.4	99.8	100.0	75.7	82.2	98.1
< 1E+04	94.0	99.1	85.0	97.5	100.0	100.0	78.9	86.1	98.6
< 2E+04	96.8	99.5	95.1	99.5	100.0	100.0	85.2	89.6	99.1
< 5E+04	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	92.4	94.9	100.0
< 1E+05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	97.7	100.0
< 5E+05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+06	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+07	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Los resultados muestran que con las alternativas de descarga Punta Salina 2.100 m, San Rafael 2.000 m y 3.000 m y Punta Chileno 1.700 m y 3.500 m, se registraron colimetrías mayores a 2.000

ufc/100ml durante porcentajes de tiempo mayores al 5% en la zona más afectada. Por lo tanto, en base a la clasificación de aguas de baño definida en la normativa europea, dichas alternativas de descarga contaminan alguna zona costera cercana impidiendo su uso para el baño recreativo. Por otro lado, aun las zonas costeras más afectadas con las alternativas de emisarios de descarga Punta Chileno 6.000 m, y San Rafael 4.000 m y 5.000 m cumplen con la clasificación de aguas aptas para baño de muy buena calidad.

Cabe destacar que a pesar de que la zona más afectada de las alternativas de descarga en Punta Chileno 3.500 y 6.000 m coincide con una zona de cría de mariscos (costa de la Isla Gorriti) también es una zona de baños. Por lo tanto, dichas alternativas fueron evaluadas en base al criterio de balneabilidad ya es más restrictivo que el criterio de calidad de agua para la cría de mariscos.

Para evaluar la alternativa de descarga en Punta Salina 5.500 m a la luz de la normativa europea fue necesario comparar los resultados obtenidos en la simulación con el criterio exigido en dicha normativa relativo a la calidad de aguas para la cría de mariscos. La normativa europea propone como criterio de calidad de agua para asegurar la buena calidad de los moluscos directamente consumidos por el hombre que al menos el 75% de los muestreos no sobrepase las 300 ufc/100 ml. Por lo tanto, las aguas costeras de la Isla de Lobos cumplen con el criterio de aptitud para cría de moluscos al descargar en la traza Punta Salina a 5.500 m. Por otro lado, la zona de baño más afectada con esta alternativa de descarga entra dentro de la clasificación de aguas aptas para baño de muy buena calidad.

En síntesis, los resultados presentados muestran que los emisarios más cortos analizados en cada traza generan un impacto significativo sobre las playas cercanas, con concentraciones menores a 2000 ufc/100ml durante porcentajes de tiempo menores a un 95%. En general el aumento de longitud mejora la calidad de las playas cercanas a la descarga aunque en ciertos casos aparecen otras afectaciones. En Punta Salina la mayor longitud analizada mejora la calidad en las playas cercanas a Punta Salina que se veían afectadas por un emisario más corto, no así en la costa de la Isla de Lobos. En San Rafael en cambio, ocurre que a medida que se aumenta la longitud del emisario el impacto sobre todas las playas cercanas disminuye, siendo mayor esa disminución al pasar de los 2.000 m a los 3.000 m de longitud. En Punta Chileno aumentar de 1.700 m a 3.500 m mejora considerablemente la calidad en las playas pero impacta profundamente la Isla Gorriti y al aumentar a 6.000 m los resultados muestran que la afectación generada en la zona de playas y en la Isla Gorriti es aceptable.

Finalmente se concluye a partir de este análisis de emisarios largos que la descarga en la traza definida como San Rafael es la que genera menor afectación en las playas y en las islas a igual longitud de emisario. En dicha traza se puede afirmar que, a partir de una longitud de emisario entre 3.000 m y 4.000 m, las condiciones de balneabilidad en las playas cercanas se verían muy poco afectadas, garantizándose condiciones de calidad para el uso de baño recreativo en las mismas a partir de los 4.000 m de longitud.

Emisarios Cortos

El análisis de alternativas de descarga a través de emisarios cortos consistió en la simulación de la evolución de la pluma considerando una descarga continua durante 30 días en época de verano y su monitoreo a través de la definición de boxes en la zona de playas a 300 m de la costa y en la costa de las Islas Gorriti y de Lobos.

En todas las alternativas de descarga con emisarios cortos ubicados sobre la traza definitiva que fueron analizadas en este trabajo se registraron colimetrías menores a 100 ufc/100ml el 100% del tiempo en todos los boxes de monitoreo definidos bajo las condiciones de diseño. Por lo tanto, en

base a la clasificación de aguas de baño definida en la normativa europea, las aguas de baño de las zonas costeras cercanas a la descarga entran dentro de la clasificación de aguas aptas para baño de muy buena calidad para las cuatro longitudes de emisario analizadas.

Los resultados obtenidos al analizar la descarga de la planta bajo condiciones de contingencia muestran en cambio que un emisario de 600 m ubicado en la traza definitiva generaría un impacto significativo sobre la balneabilidad de la zona costera cercana, es decir sobre la Playa Brava de Punta del Este y las playas de La Barra. Este impacto disminuye considerablemente al aumentar la longitud de dicho emisario pero la mejora más significativa se observa al aumentar a 800 m la longitud del mismo.

La Tabla 4 presenta la curva de frecuencia en los boxes más afectados en situación de contingencia para cada alternativa de descarga analizada. A partir de los valores presentados en dicha tabla se puede observar que ninguna de las longitudes de emisario analizadas cumple, bajo condiciones de contingencia, el requisito impuesto por la norma para clasificar a las aguas como aptas para el baño de muy buena calidad. Sin embargo, todas las longitudes verifican la condición que clasifica a las aguas como aptas para baño de buena calidad. Es importante resaltar también que ninguna de las alternativas, aún en situación de contingencia, afecta bacteriológicamente a las Islas cercanas (Gorriti y Lobos) ni a la costa Oeste de Punta de la Salina.

Tabla 4.- Frecuencia de ocurrencia (%) para los distintos rangos de colimetría obtenidos con el modelo en los boxes costeros más afectados para cada alternativa de emisarios cortos analizada.

Rangos (ufc/100ml)	600 m		800 m		1000 m		1200 m	
	Box n°21	Box n°26	Box n°20	Box n°25	Box n°18	Box n°23	Box n°18	Box n°23
< 100	52.2	65.1	63.9	72.9	67.1	72.8	72.6	80.4
< 200	61.9	75.1	72.6	79.4	78.9	79.0	82.8	86.8
< 500	76.0	84.6	88.5	89.3	96.1	88.9	97.8	93.2
< 1000	88.5	91.5	96.4	95.6	100.0	96.1	100.0	97.5
< 2000	97.6	96.8	99.7	98.5	100.0	98.8	100.0	99.0
< 5000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 2E+04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 5E+04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

A partir de lo anterior se considera que dentro del rango de longitudes analizadas sobre la traza definitiva la alternativa aceptable desde el punto de vista de la balneabilidad de las playas del balneario es un emisario de 800 m. Con un emisario de dicha longitud, los resultados obtenidos con el estudio de modelación muestran que se estarían garantizando playas clasificadas como de muy buena calidad para baños en toda la costa de Punta del Este y Maldonado bajo las condiciones de diseño del funcionamiento de la planta de tratamiento proyectada. Por otra parte, en caso de que dicha planta sufriera algún tipo de mal funcionamiento y se descargara bajo condiciones de contingencia, las playas cercanas a la zona de descarga se transformarían en playas aptas para baños de buena calidad durante el corto período de tiempo que se supone durarían las fallas.

Diseño del Difusor

Una vez seleccionada la ubicación y la longitud del emisario subacuático a través del cual será descargado el líquido cloacal tratado de la zona de Punta del Este y Maldonado al Océano Atlántico, se realizó un diseño preliminar del difusor. Fueron definidos 6 prediseños o tipos de difusores que se diferencian en la alineación de los puertos de descarga. En la Figura 10 se presenta un esquema de la vista en planta, del perfil y de la sección transversal de los distintos difusores definidos, donde se observa la posición de los puertos en cada uno.

Los resultados obtenidos en el análisis del diseño del difusor muestran que la alineación de los puertos influye considerablemente en los valores de dilución inicial y en las colimetrías registradas

en los boxes de control definidos en la zona costera cercana a la descarga. En la Tabla 5 se presentan los valores de dilución inicial promedio, máxima y mínima obtenidos en el período simulado para las distintas alternativas de difusores analizadas. Por un lado, el análisis comparativo de las diluciones iniciales obtenidas con los distintos difusores analizados muestra que una descarga vertical o a 45° del plano horizontal no favorece la mezcla del líquido descargado con el medio receptor. Esto se debe principalmente a que dichas alineaciones favorecen la flotación del líquido descargado que existe naturalmente por la diferencia de densidades, ya que la descarga es menos densa que el agua salada del Océano Atlántico. Las descargas en el plano horizontal en cambio favorecen la mezcla inicial y dentro de las distintas alineaciones horizontales analizadas la que logra una mayor mezcla inicial es una descarga perpendicular a la costa, es decir, paralela a la alineación del emisario. Esto se debe principalmente a que la alineación de dicho difusor optimiza la influencia de las corrientes en la mezcla inicial, ya que las mismas en el punto de descarga tienen una dirección preferencial de flujo paralela a la costa, es decir, perpendicular al emisario y por ende perpendicular a los puertos de descarga.

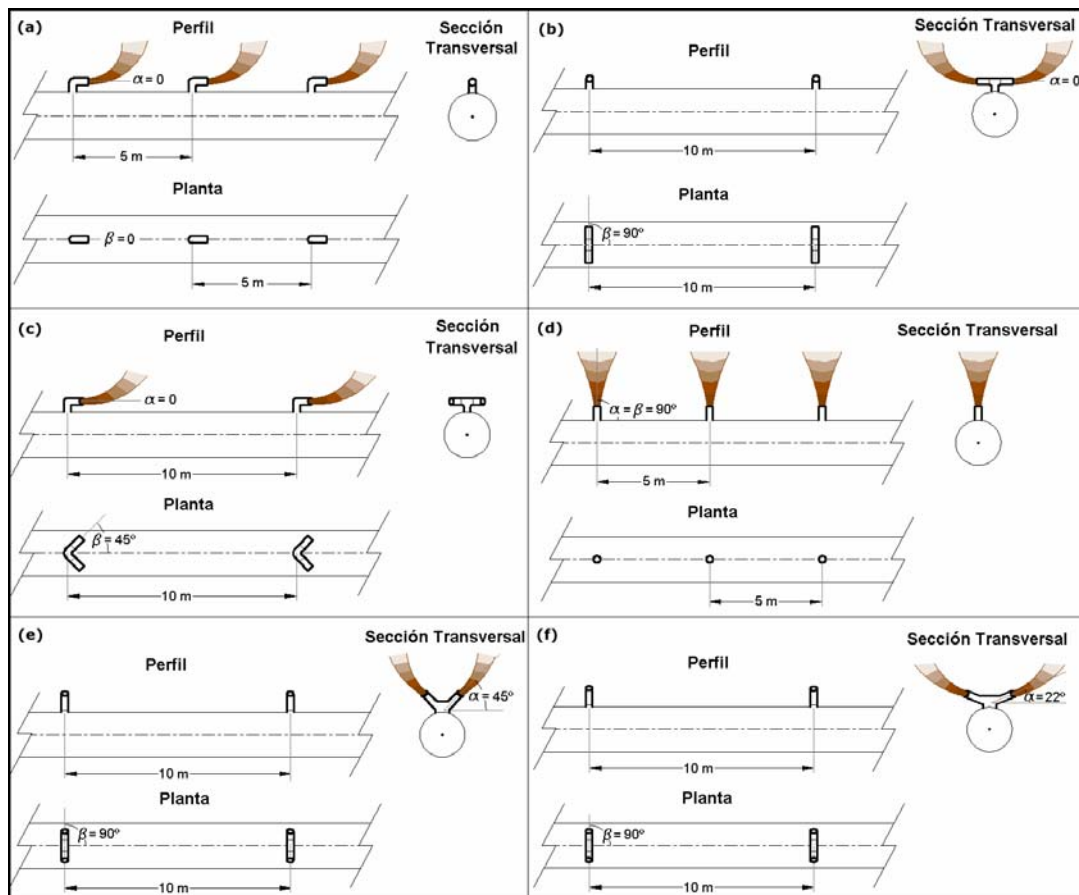


Figura 10.- Vista en planta, perfil y sección transversal de la zona de difusores para las alternativas de difusores analizadas (a) Difusor 1, (b) Difusor 2, (c) Difusor 3, (d) Difusor 4, (e) Difusor 5 y (f) Difusor 6.

Tabla 5.- Dilución inicial promedio, máxima y mínima obtenida con cada uno de los difusores analizados.

Alternativa	Dilución Inicial		
	Promedio	Máxima	Mínima
Difusor 1	71	542	22
Difusor 2	66	425	22
Difusor 3	66	436	22
Difusor 4	3	8	2
Difusor 5	4	9	3
Difusor 6	52	340	21

Análisis de Sensibilidad

Los resultados obtenidos durante el análisis de sensibilidad de la solución a los parámetros del modelo muestran que los parámetros asociados a la componente turbulenta del movimiento de las partículas tienen gran influencia en la modelación de las colimetrías en la zona de los boxes costeros. De todas formas, aún duplicando los valores de estos parámetros (condición más desfavorable), el emisario a 800 m garantiza condiciones de alta calidad para baños en las playas cercanas a la descarga. Por otro lado, los resultados muestran que el parámetro relacionado con la difusión turbulenta del contaminante tiene una menor influencia en los resultados obtenidos que los parámetros que controlan el movimiento turbulento de las partículas. No obstante, se ha identificado que variaciones de dicho parámetro generan mayores colimetrías máximas en los boxes costeros. Nuevamente en este caso hay que observar que se garantizan condiciones de muy buena calidad en las playas ya que las colimetrías máximas en los boxes no superan el valor de 35 ufc/100 ml. Para mayor seguridad se realizaron las simulaciones con los parámetros más desfavorables para las condiciones de contingencia pero se observó que incluso bajo estas condiciones las playas de la zona se clasificarían como de buena calidad para el baño recreativo según la normativa europea.

CONCLUSIONES

Se ha utilizado un modelo lagrangiano de transporte de sustancias basado en el flujo hidrodinámico simulado previamente para realizar un estudio prospectivo de las alternativas de descarga del líquido residual de Montevideo y de Punta del Este a través de emisarios subacuáticos.

El avance de los recursos computacionales y de las herramientas numéricas como el modelo MOHID, permiten analizar distintas soluciones para este tipo de problemas de forma integrada y permiten a su vez la selección de alternativas que minimizan los posibles impactos generados. Los buenos resultados obtenidos en estos trabajos certifican la metodología utilizada y ponen de manifiesto el valor y la gran utilidad de estas herramientas numéricas en proyectos de similares características.

REFERENCIAS

- Comunidad Europea** (2003). TEXTO consolidado producido por el sistema CONSLEG de la Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. CONSLEG: 1976L0160 — 05/06/2003.
- Comunidad Europea** (1979). Directiva 79/923/CEE del Consejo, de 30 de Octubre de 1979 relativa a la calidad exigida a las aguas para cría de moluscos. DOCE 281/L, DE 10-11-79.
- Fossati, M. y Piedra-Cueva, I.** (2006). “Modelación tridimensional de la circulación en el Río de la Plata”. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana, Venezuela.
- IMFIA** (2006). Informe Final PDT SC_O_P_19_04 “Modelación hidrosedimentológica del Río de la Plata”. Proyecto de Desarrollo Tecnológico. Uruguay.
- MARETEC** (2006). “Lagrangian Module (Mohid). User Guide”.