

MODELACIÓN NUMÉRICA PARA LA DEFINICIÓN DE ESCENARIOS HIDRODINÁMICOS CRÍTICOS DEL FUTURO EMISARIO SUBMARINO DE PUERTO MADRYN

Mariano Corral^a, Mariana Pagot^a, Claudia Oroná^a, Andrés Rodríguez^a y Antoine Patalano^a

^aLaboratorio de Hidráulica - Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Av. Filloy s/n. Córdoba, Argentina, mcorral@com.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/hidraulica>

Palabras Clave: Hidrodinámica, Puerto Madryn, Golfo Nuevo, COHERENS.

Resumen. La ciudad de Puerto Madryn se ubica en la región noreste de la Provincia del Chubut, mas precisamente sobre la Bahía Nueva o extremo Oeste del Golfo Nuevo. Esta localidad que, en la actualidad, cuenta con una población urbana del orden de 80.000 habitantes posee con un sistema cloacal que concentra los desagües sobre la costa y los impulsa para su tratamiento hasta lagunas de estabilización que se ubican 130 m en un sector montañoso arriba de la costa. Sin embargo, en algunas situaciones de emergencia, como rotura de bombas o tuberías, el efluente no tratado escurre superficialmente hasta ingresar en los sumideros y conductos pluviales hasta llegar a la costa, saliendo directamente a la playa y generando problemas ambientales. Para paliar este problema se activa un plan de contingencia que alerta a la población sobre la necesidad de no bañarse en ese sector de playas como medida precautoria. Ante estas eventuales situaciones de emergencia, la Municipalidad de Puerto Madryn prevé la construcción de un emisario submarino que realice la disposición final en el mar. Este trabajo presenta un resumen de los estudios realizados en la zona con el objeto de caracterizar el ambiente hidrodinámico de la bahía y la capacidad de dilución para el diseño de una obra tipo emisario submarino. En este caso en particular, las corrientes costeras se encuentran influenciadas por el régimen de mareas y la acción del viento, por lo que se han realizado diferentes simulaciones numéricas con el modelo COHERENS (que simula los procesos hidrodinámicos tridimensionales) para definir los escenarios críticos del diseño de esta obra. Con respecto a la dilución se han realizado modelaciones con CORMIX, modelo que incluye el campo cercano, campo lejano y decaimiento y los condicionantes ambientales establecidos por el municipio. Como resultado del proceso se ha definido una propuesta preliminar de obras (a nivel de prediseño), las que consisten en una estación de bombeo en la costa y un emisario tipo multipuerto de 28 m que descarga a una profundidad de 18 m. Esta descarga se localizará sobre el extremo del muelle Luis Piedrabuena ubicado a 800 m de la línea de costa.

1 INTRODUCTION

La ciudad de Puerto Madryn se ubica en la región Noreste de la Provincia del Chubut ($42^{\circ} 46'$ latitud Sur y $65^{\circ} 02'$ longitud Oeste), mas precisamente sobre la Bahía Nueva o extremo Oeste del Golfo Nuevo (Figura 1). Esta localidad que en la actualidad cuenta con una población urbana del orden de 80.000 habitantes posee con un sistema cloacal que concentra los desagües sobre la costa y los impulsa para su tratamiento hasta lagunas de estabilización en un sector montañoso que se ubican a una altura de 130 m con respecto a la costa, sin embargo en algunas situaciones de emergencia como rotura de bombas o tuberías el efluente no tratado escurre superficialmente hasta ingresar en los sumideros y conductos pluviales hasta llegar a la costa, saliendo directamente a la playa y generando serios problemas ambientales.

Con el objeto de solucionar este problema la Municipalidad de Puerto Madryn prevé la construcción de un emisario submarino que realice la disposición final en el mar ante estas eventuales situaciones de emergencia. El presente trabajo presenta un resumen de los estudios realizados en la zona con el objeto de caracterizar la hidrodinámica de la bahía para el diseño de una obra tipo emisario submarino. En este caso en particular, las corrientes costeras se encuentran influenciadas por el régimen de mareas y la acción del viento, por lo que se han realizado diferentes simulaciones numéricas con el objeto de definir los escenarios críticos para el diseño del emisario.



Figura 1: Ubicación general del Golfo Nuevo y ciudad de Puerto Madryn

2 METODOLOGÍA

Se han combinado herramientas numéricas para determinar las condiciones hidrodinámicas del sector. En particular para obtener las corrientes a la escala del Golfo Nuevo, como por ejemplo por el ingreso y egreso de la onda de marea y las corrientes producidas por el esfuerzo de corte por viento se ha utilizado el modelo COHERENS.

Con respecto a la dilución se han realizado modelaciones con el modelo CORMIX que incluyen el campo cercano, campo lejano y el decaimiento de las bacterias.

2.1 Modelo COHERENS

Para la simulación numérica se ha empleado el modelo numérico tridimensional COHERENS (Luyten et al., 1999), desarrollado para costas y plataformas marinas. El mismo se compone de un módulo hidrodinámico, que se puede acoplar al módulo biológico y de contaminación para resolver procesos estacionales y de mesoescala. El código fuente ha sido desarrollado en el período 1990-1998 por un grupo multinacional como parte del proyecto MAST de la Unión Europea (Marine Science and Technology Programme).

Durante las últimas décadas una serie de modelos tridimensionales para costas y plataformas han sido desarrollados por diversas instituciones de investigación (Nihoul y Jamart, 1987; Dyke y Davies, 1992 y Lynch y Davies, 1995). Entre las principales ventajas del modelo COHERENS se destaca que utiliza la técnica “mode-splitting” para resolver la ecuación de momentum 2-D y 3-D como en el Princeton Ocean Model (POM). Además se dispone de diversos esquemas para la turbulencia que varían desde simples expresiones algebraicas de una o dos ecuaciones de energía turbulenta (Mellor, 1998) hasta modelos k-ε.

Las ecuaciones básicas del modelo son:

- Continuidad

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_3} = 0 \quad (1)$$

- Momentum

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial x_2} + w \frac{\partial u}{\partial x_3} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_T \frac{\partial u}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{11} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{21} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial x_2} + w \frac{\partial v}{\partial x_3} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_T \frac{\partial v}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{12} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{22} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho_0 g \quad (4)$$

Donde: u , v , w son las componentes de corrientes en coordenadas cartesianas; ρ es la densidad del fluido; p es la presión; f es la frecuencia de Coriolis ($=2\Omega \text{ seno } \phi$); Ω es la frecuencia de rotación de la tierra ($=2\pi/86164 \text{ rad/s}$); ν_T es la viscosidad de remolino vertical; g es la aceleración de la gravedad; ϕ es la latitud local; τ_{ii} son las componentes horizontales de las tensiones de corte.

El modelo COHERENS utiliza en el espacio el método de diferencias finitas conservativas. La grilla elegida para la discretización horizontal es conocida como “Arakawa C” y en la versión disponible no se puede variar el tamaño de los elementos para el detalle en sectores particulares, ya que utiliza una malla rectangular de paso constante.

El modelo COHERENS por ejemplo ha sido aplicado para el estudio de la intrusión de la cuña salina en el Río de La Plata (Destuynder, 2002), descargas fluviales en la Laguna Mar Chiquita (Corral et al., 2009) entre otros trabajos.

3 CORRIENTES POR MAREAS

El Golfo Nuevo posee unos 70 km de largo y un ancho de 48 Km en su parte central y 17 Km en su boca, con una profundidad máxima de 158 m que se caracteriza por ser más

profundo que la plataforma continental adyacente.

La batimetría del Golfo Nuevo y la plataforma continental ha sido tomada de las cartas náuticas H-215 y H-218 del Servicio de Hidrografía Naval. Estos datos batimétricos de distribución irregular fueron interpolados para obtener una malla regular con una resolución de 1 Km con 63 y 66 puntos en X e Y respectivamente (Figura 2).

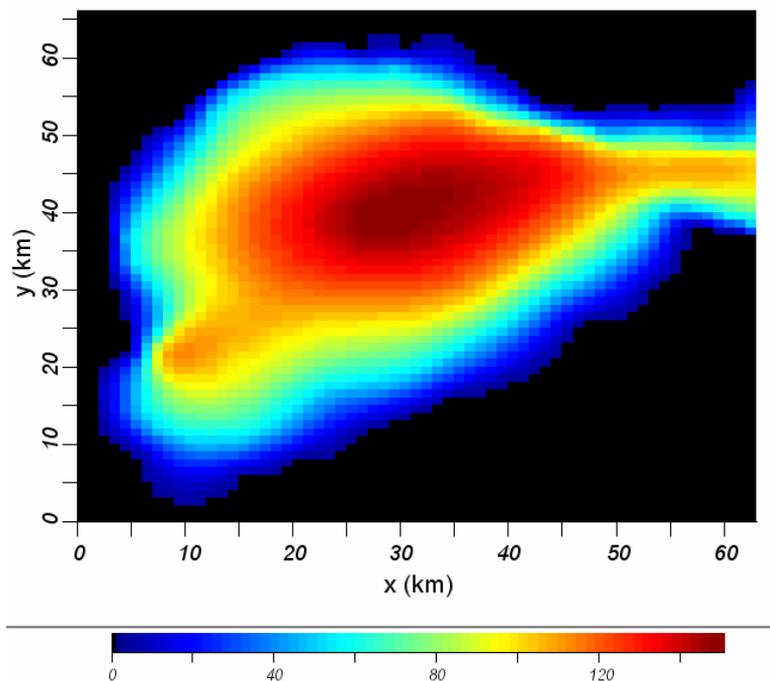


Figura 2: Batimetría del Golfo Nuevo utilizada con COHERENS (profundidad en metros)

En la dirección vertical se utilizaron 10 capas, cuyo espesor varía con el tiempo, ya que el tamaño del paso vertical se adapta a la profundidad local.

El paso de tiempo para el modo barotrópico (gradiente de presión) ha sido de 10 seg., mientras que para el baroclínico (gradiente de flotación) de 60 seg., respetando la condición de Courant-Friedrichs-Levy. Para la turbulencia se ha adoptado un esquema de una ecuación, mientras que para la advección de momento se ha utilizado el esquema “upwind”.

Debido a las dimensiones del Golfo Nuevo se ha incorporado para la modelación el efecto de Coriolis, ya que estimaciones preliminares del número de Rossby indican que debe tenerse en cuenta y el modelo COHERENS permite considerarlas.

Como condición de borde se ha fijado una condición de marea semidiurna M2, que representa casi el 90% de la energía total por marea en el Golfo Nuevo (Rivas, 1983). El 10% restante corresponde al aporte de otros modos y para el objeto del presente trabajo se considera que su influencia no es significativa. El modelo inicialmente está en reposo, es decir, las velocidades u , v y w son nulas en todo el dominio. Para la frontera abierta hacia el mar se ha especificado una condición clásica de marea semidiurna con amplitud de 4 m, valor medio de marea en la zona.

En la siguiente figura (Figura 3) se presenta la variación de los residuos de niveles en el sector del muelle Piedrabuena, observándose que prácticamente a partir de 12 días de simulación se llega a un estado de equilibrio, es decir el nivel puede ser representado por una función periódica de componente semidiurna, con período 12,42 hr, como la que se presenta en la Figura 4.

Es importante destacar también que no se produce prácticamente una variación ni en la amplitud ni en el período de la marea entre la boca del golfo y el sector del muelle.

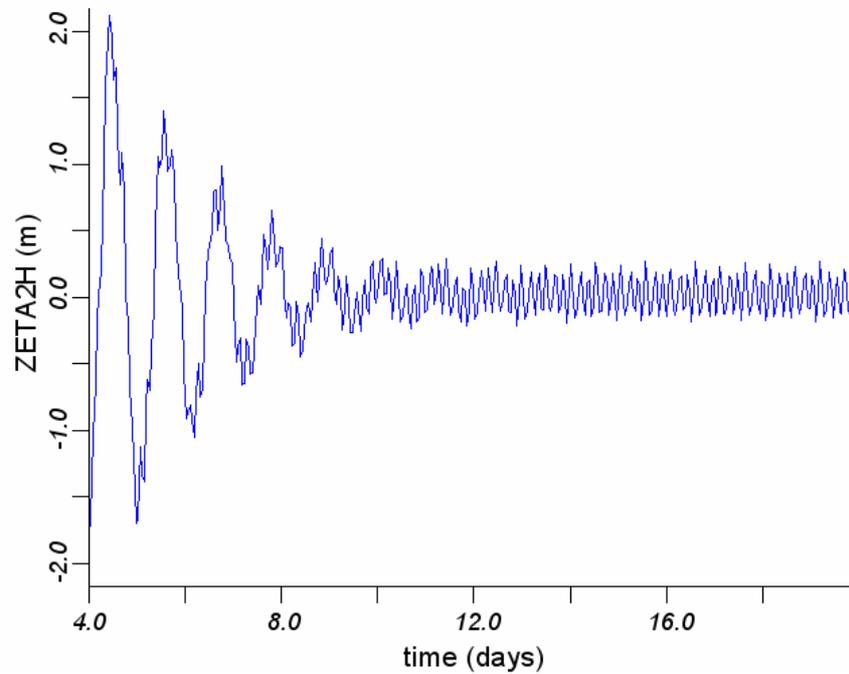


Figura 3: Residuos de niveles en Muelle Piedrabuena

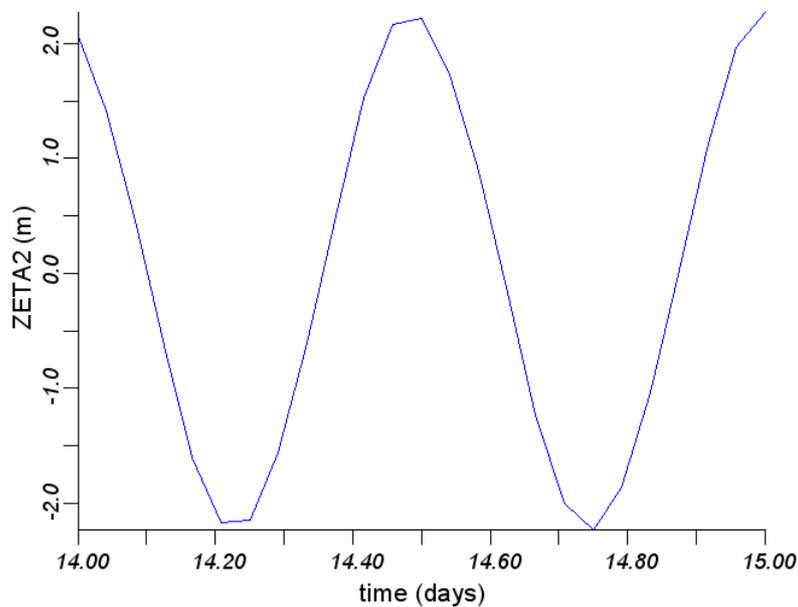


Figura 4: Niveles en Muelle Piedrabuena (modelación)

En la [Figura 5](#) se presenta los residuos de velocidad en el sector del muelle Piedrabuena, en donde nuevamente se puede observar que a partir de 12 días de simulación se llega a un estado de equilibrio, es decir, la velocidad puede ser representada por una función periódica de componente semidiurna (12,42 hr).

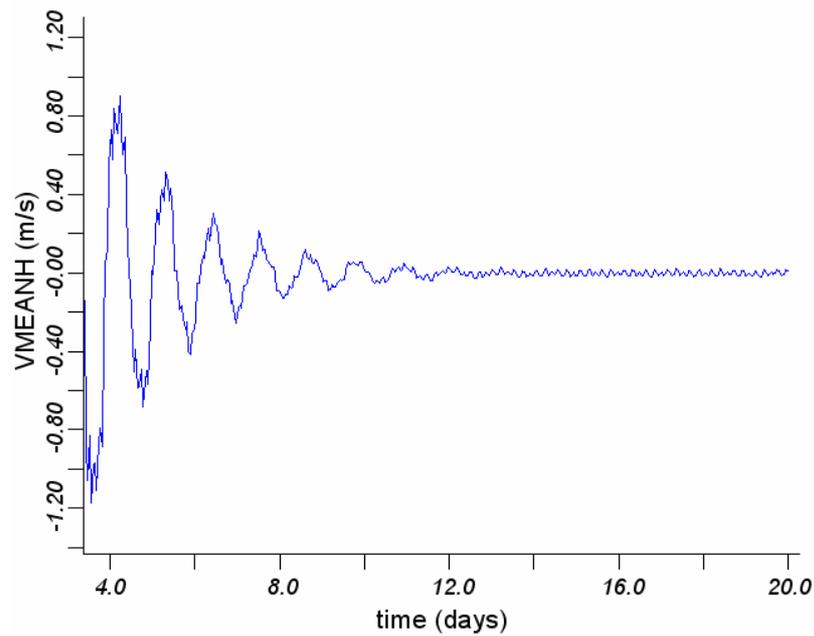


Figura 5: Residuos de velocidad en Muelle Piedrabuena

En las siguientes figuras (Figura 6 y Figura 7) se presenta la circulación general a escala del Golfo Nuevo, destacándose en la primera (Figura 6) el ingreso de la onda de marea y en la segunda (Figura 7) la salida. A modo de calibración se compararon estas velocidades con las publicadas en Mazio et al. (2004) de una serie de mediciones realizadas cerca de la boca del Golfo, en las cuales se presentaba para una profundidad de 54 m una velocidad de 0,57 m/s, valor similar a los 0,60 m/s obtenidos en las simulaciones con COHERENS.

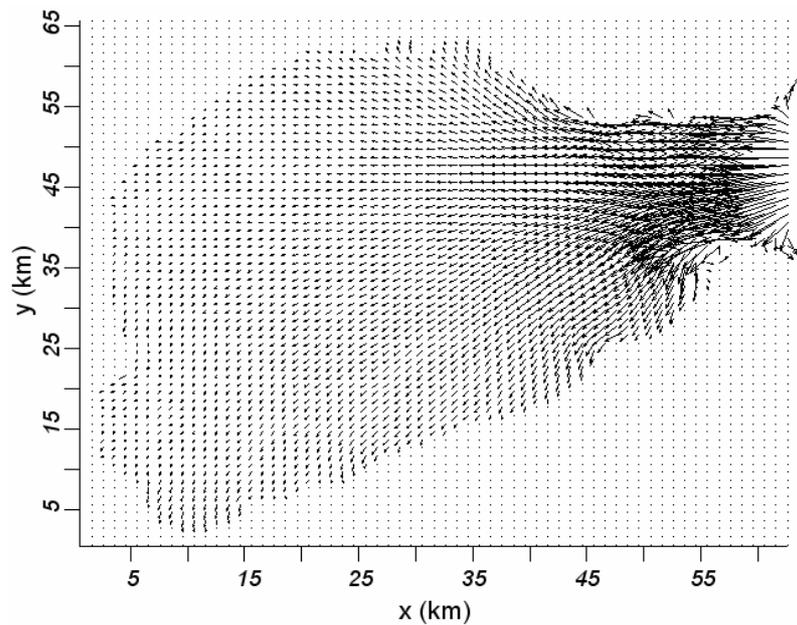


Figura 6: Ingreso de marea al Golfo Nuevo

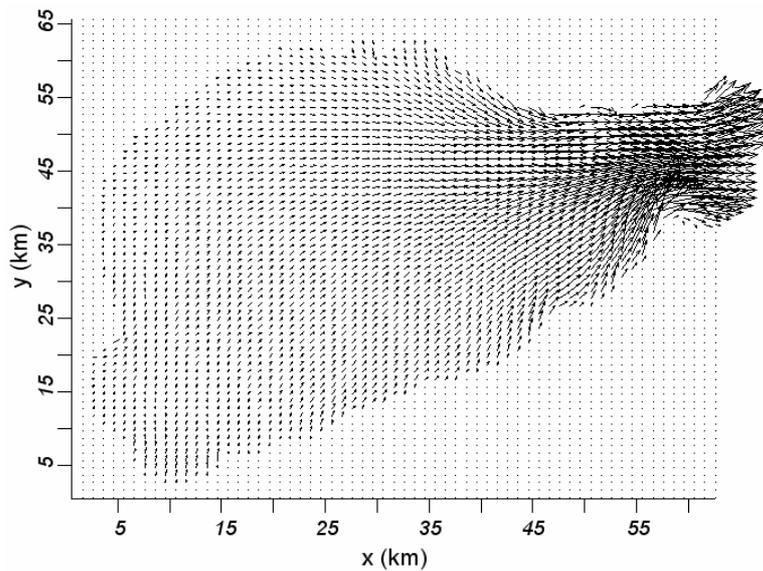


Figura 7: Salida de marea del Golfo Nuevo

En resumen, el proceso de ingreso y egreso de la onda de marea produce mayores velocidades en el sentido perpendicular a la costa (entre 0,04 a 0,08 m/s) que en el sentido paralelo (entre 0,02 y 0,04 m/s).

4 CORRIENTES POR VIENTO

Se ha supuesto que la velocidad del viento es constante en toda la grilla y para el cálculo de las tensiones de corte por viento se ha utilizado la expresión de Smith y Banke (1975), la cual se presenta a continuación.

$$C_D = 10^{-3} (0.63 + 0.066|U_{10}|) \quad (5)$$

Siendo: C_D coeficiente de arrastre superficial y U_{10} la velocidad del viento a una altura de referencia de 10 m.

Es importante comentar que para obtener las corrientes por viento se ha realizado simulaciones hasta obtener un estado estacionario de las velocidades. A modo de ejemplo se presenta en la [Figura 8](#) la velocidad superficial en un nodo ubicado cercano al muelle, en la que se observa que prácticamente a los 10 días se obtiene un estado estacionario, por lo que las simulaciones han sido de una duración de 20 días y se ha tomado el campo de velocidades finales de la simulación.

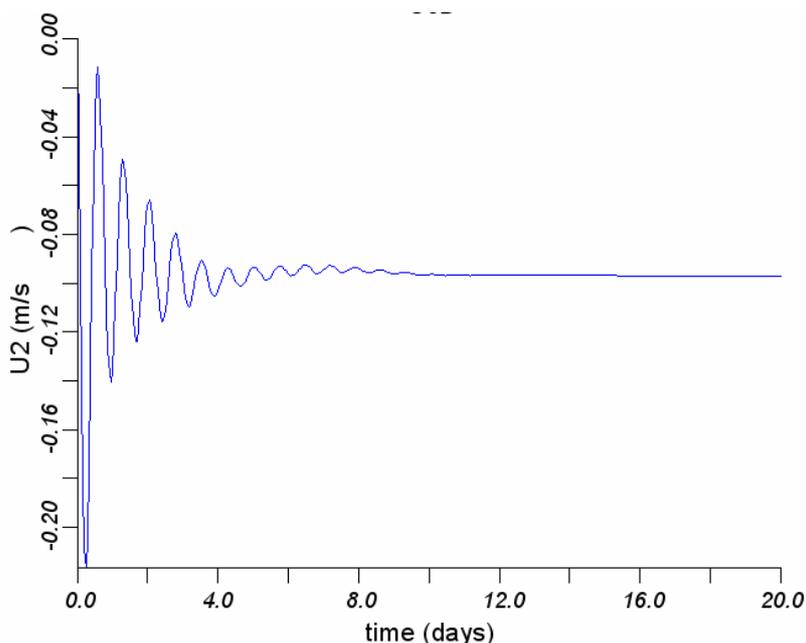


Figura 8: Velocidad superficial en nodo cercano al muelle

Considerando que la alineación que presenta la costa de Puerto Madryn es prácticamente N-S, para diseñar el emisario se deben analizar los vientos que pueden provocar que la pluma se dirija hacia la costa y no los que provoquen corrientes que se alejen de la costa. Por ejemplo, los vientos predominantes de Puerto Madryn provienen desde el continente (W), pero éstos llevarán la pluma hacia aguas afuera (ver Figura 9) y no serán críticos a la hora de definir las dimensiones del emisario.

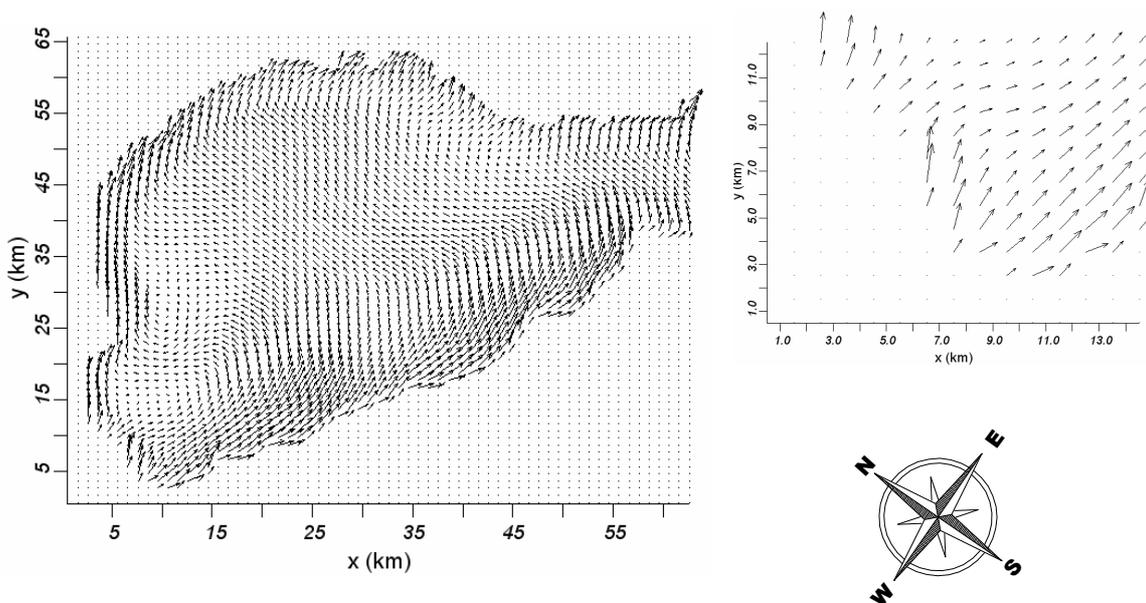


Figura 9: Velocidad superficial con viento 6 m/s de dirección Oeste (W)

Los vientos que provocan que la pluma se dirija hacia la costa son los provenientes desde el octante NE hasta el S, por lo que se han adoptado como escenarios las direcciones NE, E, SE y S. Se simuló estos cuatro escenarios de condiciones medias, basados en las

probabilidades que indican las estadísticas de viento.

A modo de ejemplo se presentan los escenarios simulados en estado estacionario para direcciones del viento E y S, en las cuales se ha colocado en la izquierda el dominio completo de la simulación mientras que en el sector derecho un detalle en el sector de la Bahía Nueva.

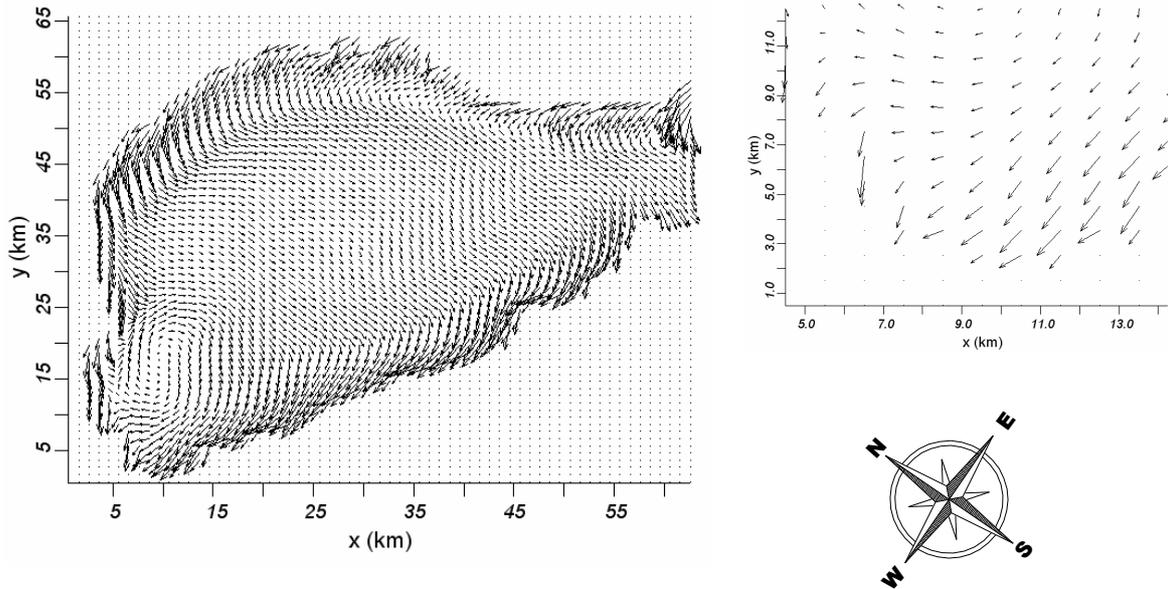


Figura 10: Velocidad superficial con viento 5,4 m/s de dirección Este (E)

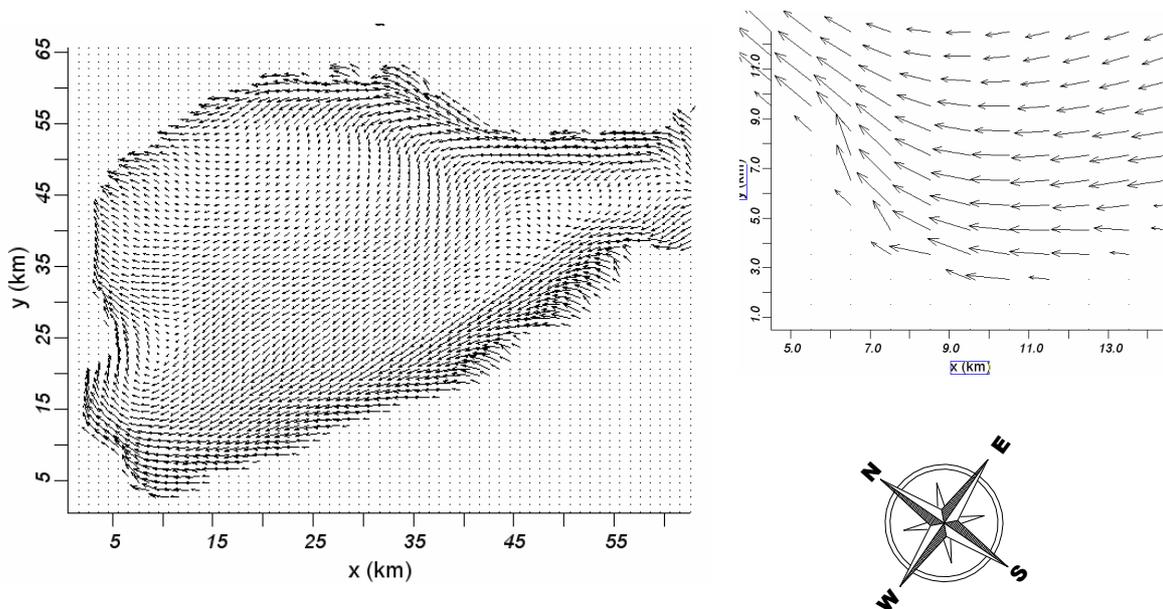


Figura 11: Velocidad superficial con viento 6 m/s de dirección Sur (S)

En resumen, los vientos que provienen desde el NE y el S, los cuales se encuentran más alineados con la costa provocan velocidades longitudinales o litorales con una velocidad de entre 0,10 y 0,15 m/s, mientras que los más perpendiculares al continente como la dirección E

provocan velocidades hacia la costa de entre 0,07 a 0,12 m/s.

En síntesis se observa de las simulaciones numéricas de corrientes por marea y viento, que las segundas son más importantes y es con ellas que se alimenta la simulación en campo cercano con el caso más desfavorable de viento.

5 DILUCION CON CORMIX

Con respecto a la determinación de la dilución en la descarga se han planteado diferentes alternativas de disposición que cumplan con la normativa ambiental vigente en la zona y los requerimientos especificados por la Municipalidad de Puerto Madryn. Para representar la dilución de la descarga y dispersión del medio marino se ha utilizado el modelo CORMIX de reconocido uso en este tipo de procesos, analizando variantes en las variables principales del emisario, como la longitud del emisario, la profundidad de la descarga y el tipo de descarga (puerto único/monopuerto o multipuerto).

Como se ha mencionado anteriormente los vientos que provienen desde el NE y el S, los cuales se encuentran más alineados con la costa provocan velocidades longitudinales o litorales con una velocidad de entre 0,10 y 0,15 m/s, lo que llevaría la pluma del emisario hacia el sector Norte y Sur de la Bahía Nueva. A su vez, los vientos más perpendiculares al continente como la dirección E, provocan corrientes hacia el continente que hacen que la pluma sea advectada hacia la costa céntrica de Puerto Madryn, por lo que desde el punto de vista de la dilución en campo lejano es menor el tiempo de recorrido y por lo tanto el decaimiento de contaminantes. Esto resulta en que el viento del Este produce corrientes que producen un campo de velocidades críticas con respecto a la dilución y por lo tanto se considera que representa el escenario para el diseño del emisario.

En los siguientes apartados se analizan las diferentes configuraciones geométricas establecidas para el emisario considerando los datos suministrados por el comitente.

5.1 Descarga Tipo Monopuerto

Se han evaluado diferentes diámetros para el puerto de descarga, variando entre 100, 200, 300 y 400 mm. Los resultados se presentan en las siguientes figuras y tablas.

En la siguiente figura (Figura 12) se ha estimado la concentración en el límite de la zona de baño, pudiéndose observar que ninguna de las configuraciones propuestas cumple con las concentraciones admisibles para la zona de baño (menor a 1.000 col/100 ml), lo que descarta la posibilidad de descargar con un emisario monopuerto.

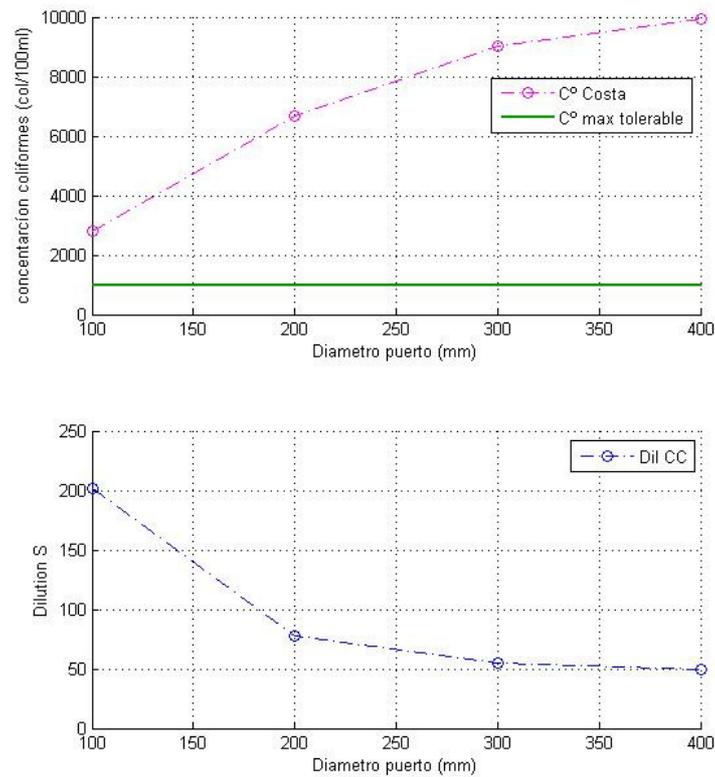


Figura 12: Variación de la concentración/dilución para descarga tipo monopuerto

5.2 Descarga Tipo Multipuerto

Con el apoyo de literatura del tema se ha prediseñado el emisario y esta configuración inicial ha sido ingresada al modelo CORMIX para estimar la dilución inicial. La metodología ha consistido básicamente en aumentar la longitud del difusor hasta lograr que la concentración en el límite de la zona de baño sea menor a la establecida como admisible. En la [Figura 13](#) se presenta la dilución para diferentes longitudes del difusor.

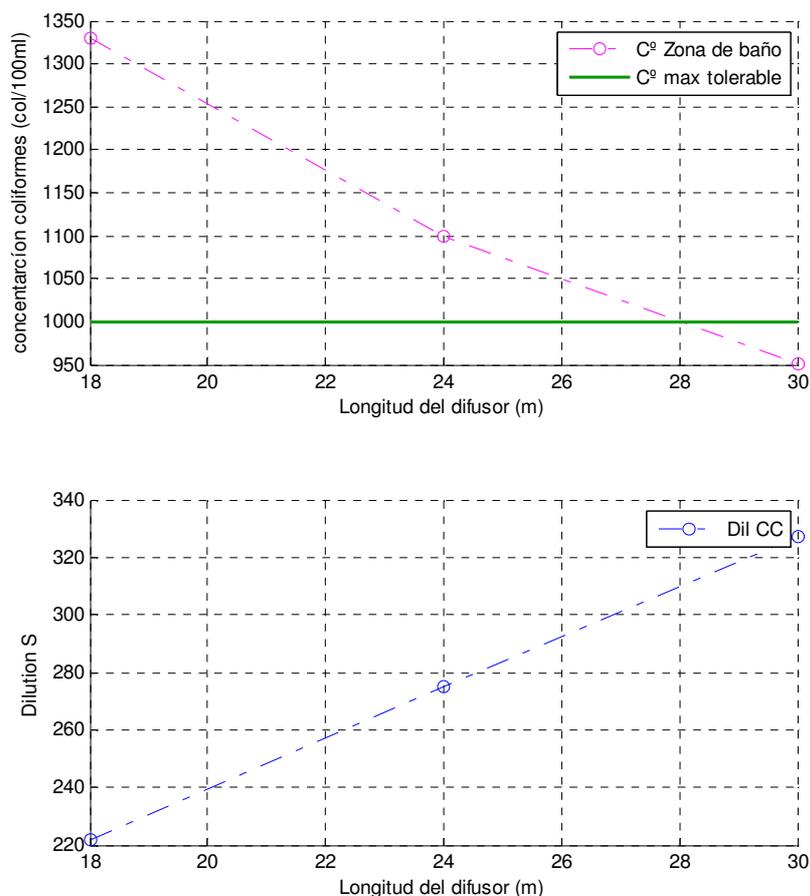


Figura 13: Variación de la concentración/dilución para descarga tipo multipuerto

Si se observa en las figuras anteriores (Figura 12 y Figura 13), la dilución en campo cercano aumenta con la longitud del difusor, dado que depende del caudal por unidad de longitud del difusor. Si se toman en cuenta los condicionantes ambientales establecidos, es decir una concentración de 1000col/100ml, para una descarga multipuerto resulta necesario al menos un difusor de 28 m de longitud.

En resumen, para cumplir con los condicionantes establecidos se ha propuesto –a nivel de prediseño- un alimentador de 800 m de longitud que descargue a una profundidad de al menos 18 m y cuyo extremo se debe construir en forma de T el tramo emisario con una longitud mínima de 28 m.

6 CONCLUSIONES

De la modelación efectuada con el modelo COHERENS para representar el ingreso y egreso de la onda de marea, surge que por un lado los niveles y velocidades pueden ser representados por una función periódica que en términos prácticos no tiene atenuación o ampliación en cuanto a la amplitud ni el período, con respecto a la onda en la boca del Golfo.

El ingreso de la onda de marea produce mayores velocidades en el sentido perpendicular a la costa (entre 0,04 a 0,08 m/s) que en el sentido paralelo (entre 0,02 y 0,04 m/s).

De las simulaciones realizadas con viento surge como es esperable que los vientos predominantes de Puerto Madryn, los cuales provienen desde el continente (W), llevarán la pluma de efluentes hacia aguas afuera y no serán críticos para el diseño del emisario.

Los vientos que provocan que la pluma se dirija hacia la costa son los provenientes desde

el octante NE hasta el S y de las simulaciones se desprende que los casos en que los vientos se encuentran más alineados con la costa (NE y S) provocan velocidades longitudinales o litorales con una velocidad de entre 0,10 y 0,15 m/s, mientras que los más perpendiculares al continente como la dirección E provocan velocidades hacia la costa de entre 0,07 a 0,12 m/s. De la comparación de las velocidades resultantes surge que el viento es el agente impulsor dominante.

Para cumplir con los condicionantes ambientales establecidos por la Municipalidad de Puerto Madryn se ha propuesto -a nivel de prediseño- una tubería de alimentación de 800 m de longitud que descargue a una profundidad de al menos 18 m y el extremo se debe construir en forma de T el tramo emisario con una longitud mínima de 28 m.

7 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado desde el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, en el marco de un proyecto de extensión denominado “Asistencia Técnica especializada en el tema Emisario Submarino de la Ciudad de Puerto Madryn (Provincia de Chubut)”, por lo que se agradece la información brindada por la Municipalidad de Puerto Madryn.

REFERENCIAS

- CENPAT – CONICET. *Estadísticas Climatológicas. Frecuencia de dirección y Velocidad de Viento*. Área Física Ambiental. Centro Nacional Patagónico. Por Frumeto, O. y Davies, E., 2000. <http://www.cenpat.edu.ar/fisicambien/climaPM.htm>
- Corral M., Rodríguez A., Pagot M., Fernández R., Pozzi C. y Oroná C. *Modelación numérica de descargas fluviales en la laguna de Mar Chiquita*. Mecánica Computacional, (García Bauza C. D., Lotito P. A., Parente L. A. y Vénere M. J. Eds.), Publicación de AMCA, Tandil. ISSN 1666-6070. 28:2787-2803, 2009.
- Destuynder V., *Modelación Hidrodinámica Tridimensional del Río de la Plata*, Tesis de ingeniería para la Universidad de Lyon (Francia). Director: Tarela, P.A., 2002.
- Dyke P. P. G. y Davies A. M. (Editors), *Mathematical models of the North Sea and surrounding continental shelf seas*. Proceedings of JONSMOD 90, Birkenhead, U.K., 2–5 April 1990. Continental Shelf Research, 12(1): 211, 1992.
- Lanfredi N. W., *Corrientes superficiales en aguas costeras del Golfo Nuevo*. Centro Nacional Patagónico. Serie Informes Científicos. 1: 1-15, 1974.
- Luyten P.J., Jones J.E., Proctor R., Tabor A., Tett P. y Wild-Allen K., *COHERENS – A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation*. MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, 914, 1999.
- Lynch D. R. y Davies A. M. (Editors), *Quantitative skill assessment for coastal ocean models*. Coastal and Estuarine Studies, American Geophysical Union, Washington D.C., 47: 510, 1995.
- Mellor, G., *User Guide for a Three Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*, Princeton University, 1-43, 1998.
- Nihoul J. C. J. y Jamart B. M. (Editors), *Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics*. Elsevier Oceanography Series, 45: 624, 1987.
- Smith S. D. y Banke E. G., *Variation of the sea surface drag coefficient with windspeed*, Quarterly Journal Meteorological Society, 101:665–673, 1975.
- Rivas A. L., *Análisis de la circulación costera en Golfo Nuevo*. Acta Oceanographica

Argentina, 3(2):49-66, 1983.