

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTUDIO DE LA PLUMA DE DESCARGA GENERADA POR UN EMISARIO
SUBMARINO BAJO CONDICIONES MEDIAS Y EXTREMAS EN LA BAHÍA DE
COQUIMBO, IV REGIÓN, CHILE**

JAIME HERRERA BELTRÁN¹
PATRICIO WINCKLER GREZ²

RESUMEN

La concentración de coliformes fecales (CF) es un parámetro ambiental relevante en áreas destinadas a recreación (ZPL) y explotación de recursos bentónicos (AMERB). Este trabajo propone una metodología para estudiar las descargas de emisarios submarinos que contempla el forzamiento de corrientes debido a marea, viento y oleaje, siendo este último usualmente descartado en los estudios a nivel nacional. El caso de análisis corresponde al emisario de La Serena, cuyo difusor se encuentra a 19 [m] de profundidad y a 1.750 [m] de la costa. La simulación del oleaje se realiza mediante el módulo de propagación de oleaje Mike 21 SW y el campo de corrientes se calcula a través del módulo hidrodinámico Mike 21 HD, forzado mediante el tensor de radiación, la marea media y el viento local. La simulación de los procesos de mezcla se realiza en el campo cercano a través de Cormix 2, ajustando la concentración de CF en la línea central de la pluma con las modelaciones realizadas en el campo lejano mediante Mike 21 AD. Los resultados señalan una clara influencia del oleaje en la intensidad de las corrientes, generando vórtices que afectan la circulación general de la bahía. En los casos en que las corrientes son bajas, la concentración de CF en el AMERB Coquimbo supera lo establecido en el D.S. 90 (70 NMP/100ml), debido a la acumulación del contaminante en el punto de descarga. En los casos extremos se aprecia un claro sobrepaso de los límites normados para la ZPL (1000 NMP/100ml) y las AMERB; resultados que sugieren revisar la ubicación y diseño del difusor para cumplir la normativa.

¹ Alumno Memorista, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, UV – jaime.herrerab.1404@gmail.com

² Profesor Adjunto, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, UV - patricio.winckler@uv.cl

1. INTRODUCCIÓN

La población costera se encuentra ligada a actividades concebidas en ciudades portuarias, debido a la gran cantidad de puestos de trabajo que estas proveen (Cifuentes, Torres & Frías, 1991). El volumen de aguas servidas que se genera en dichas ciudades es de tal magnitud que su tratamiento es costoso debido, en parte, al escaso espacio disponible que hace inviable el uso de tratamientos de tipo secundario y terciario en tierra. Gracias a la capacidad depuradora natural del océano, se ha considerado históricamente la descarga de aguas servidas al mar utilizando emisarios submarinos, previa aplicación de un tratamiento primario mediante cámaras de rejillas y desarenadores. En dicho contexto, Leppe & Gonzalez (1997) establecen que la descarga de aguas servidas a través de emisarios submarinos, bien diseñados y alejados de la costa, es eficiente y genera un bajo impacto en el medio ambiente marítimo.

Como parte del proceso de diseño de emisarios, es necesario evaluar el impacto del vertido de aguas servidas i) en la zona de protección litoral (ZPL), dado que sus aguas se encuentran destinadas a la recreación y ii) en las áreas donde se cosechan organismos bivalvos (AMERB), los cuales subsisten filtrando agua de mar en su proceso de alimentación. En presencia de coliformes fecales (CF), los bivalvos pueden bioacumular bacterias patógenas en su interior, produciendo mariscos con la capacidad de transmitir enfermedades luego de su consumo (Ludwig, 1988; Cortés-Lara, 2003).

En este trabajo se propone una metodología para evaluar la eficiencia en la reducción de CF generada por el emisario submarino de La Serena, IV región de Chile (Figura 5). El emisario descarga a una profundidad de 19 [m] y a 1.750 [m] de la costa, en las inmediaciones de la bahía. Su pluma aflora a la superficie durante todo el año, como respuesta a las condiciones densimétricas del cuerpo de agua y a la baja profundidad del difusor. Los datos batimétricos utilizados en el modelo de elevación digital provienen de dos cartas náuticas facilitadas por el SHOA³. Se simulan escenarios medios y extremos caracterizados por las forzantes de marea, viento y oleaje, utilizando Mike 21 (HD-SW) para simular el campo hidrodinámico. Los procesos de mezcla en el campo cercano se simulan utilizando el programa Cormix 2 (Jirka & Doneker, 1991), ajustando sus resultados a Mike 21 AD en el campo lejano. Se cuantifica la concentración de CF en el límite de la ZPL⁴ y de las AMERB⁵, contrastando sus resultados con las exigencias de calidad de agua establecidas por las normas chilenas NCh 1333 of. 78 y D.S. 90/2000.

Además de la metodología para evaluar los campos hidrodinámicos y de concentración de la descarga, este trabajo tiene la novedad de i) incluir la forzante del oleaje en el campo hidrodinámico, ii) definir un procedimiento sistemático de acople entre los modelos de campo cercano y el de campo lejano, y iii) evaluar en forma rigurosa las concentraciones en las AMERB y ZPL. En la actual práctica, el oleaje se asume irrelevante en estudios de dispersión de contaminantes cuando el punto vertido se ubica fuera de la zona de rompiente, debido a que los términos advectivos no consideran parámetros adicionales asociados a la deriva de Stokes (Winckler, Liu & Mei, 2013). En este trabajo, el oleaje se considera como una velocidad adicional a las otras forzantes en los términos advectivos de la ecuación de advección-difusión.

³ Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

⁴ Zona de protección litoral. Límite normado de CF, 1000 [NMP/100ml].

⁵ Áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos. Límite normado de CF, 70 [NMP/100ml].

2. ÁREA DE ESTUDIO, MATERIALES Y METODOLOGÍA

El área de estudio se encuentra en la bahía de Coquimbo, ubicada en la IV región de Chile, entre las latitudes 29° 48' S - 29° 59' S y las longitudes 71° 15' O - 71° 24' O. Posee una extensión de 14.5 kilómetros aproximadamente y una boca orientada hacia el oeste, dejándola expuesta a las forzantes provenientes del tercer y cuarto cuadrante. Limita al norte con Punta Teatinos y al sur con Punta Tortuga, cuya presencia repercute sobre la hidrodinámica de la misma, modificando los patrones de corrientes y alterando la dirección de propagación del oleaje (Figura 5).

La Figura 1 ilustra la metodología propuesta, cuyo detalle se encuentra disponible en Herrera (2017). Ésta contempla i) la simulación hidrodinámica utilizando los forzantes de marea, vientos y oleaje; y ii) la simulación de los procesos de mezcla tanto en el campo cercano como lejano. La información utilizada para forzar los modelos hidrodinámicos y de mezcla es:

- Registro horario de marea en el Puerto de Coquimbo, correspondiente a febrero de 2012.
- Parámetros de resumen de oleaje del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016) en un nodo en aguas profundas (30°S, 72°30'O) entre 1997 y 2010.
- Registro horario de viento en una estación de la Red Agrometeorológica INIA (29°58'S, 71°21.168'O) entre febrero de 2011 y noviembre de 2015.
- Registros de corrientes en dos estaciones (F1: 29°56.5'S, 71°19.8'O; F2: 29°50.5'S, 71°18'O), y registros de temperatura y salinidad (29°55.7'S, 71°17.5'O) medidos en promedio 2,5 días en octubre de 2007, enero, mayo y agosto del 2008 (UV, 2009).

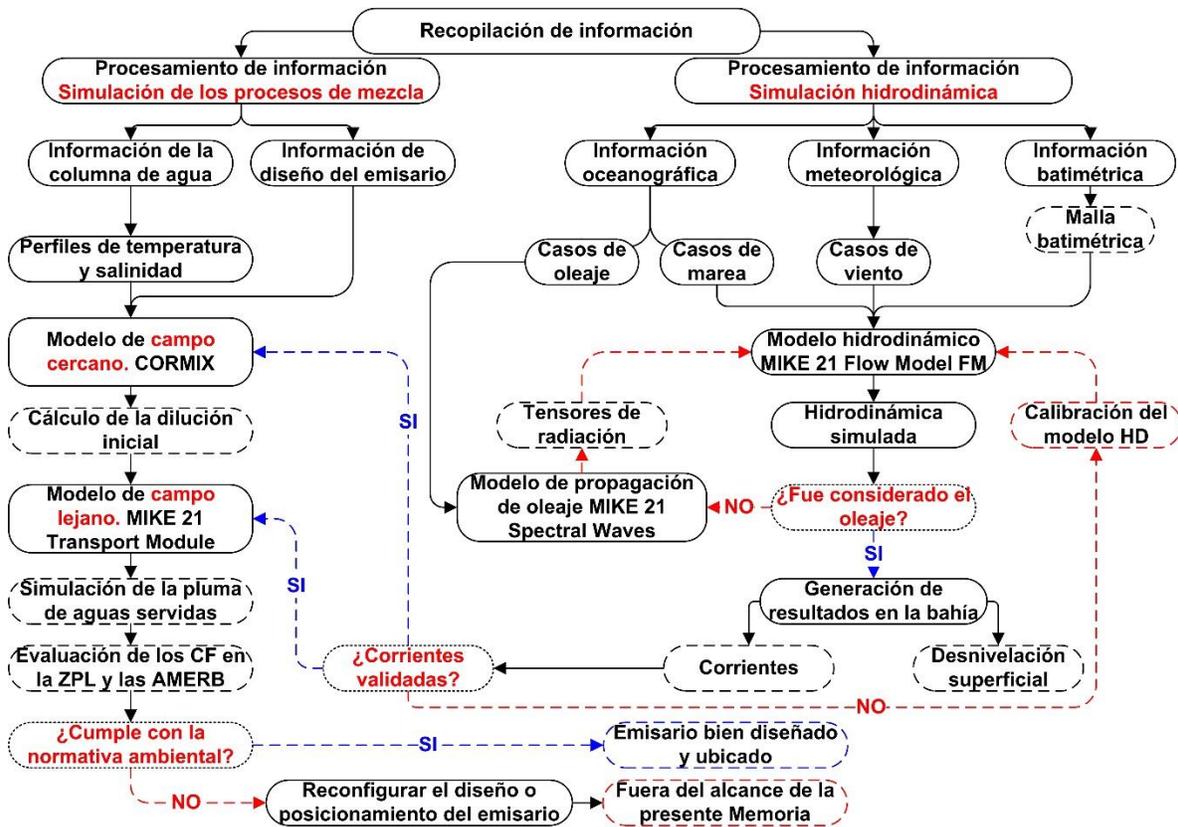


Figura 1. Estructura de la metodología.

Simulación Hidrodinámica

Para estudiar la evolución de una sustancia en el cuerpo de agua, se debe conocer la velocidad y la profundidad del flujo en cada punto de la zona de interés durante el intervalo de tiempo donde se desarrollan los procesos de mezcla. En el presente modelo hidrodinámico, desarrollado mediante el software Mike 21 Flow Model FM - HD (DHI, 2014a), el campo de velocidades es forzado por la marea, el viento y el oleaje. Las corrientes de marea se reflejan en movimientos periódicos que acompañan el ascenso y descenso del nivel del mar y que en zonas costeras, bahías o estuarios se conocen como corrientes de flujo y reflujo. Las corrientes generadas por el viento tienen una mayor intensidad en las capas superficiales del mar, que se transfiere a las capas inferiores a través de la viscosidad turbulenta. Las corrientes litorales, por su parte, son generadas por la incidencia oblicua del oleaje (Figura 2a) que puede llegar a alterar el patrón de circulación en una bahía (Fernández, 2012).

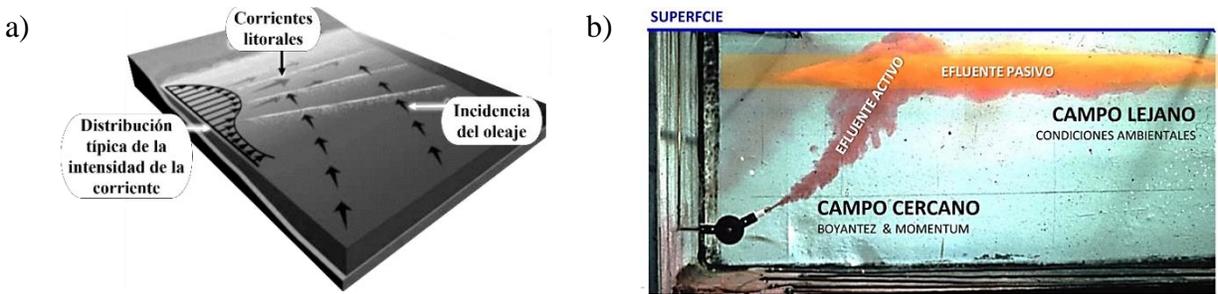


Figura 2. a) Corrientes litorales generadas por la incidencia oblicua del oleaje (COMET, 2012). b) Modelo físico de una descarga de boyantes positiva (Adaptado de Jirka & Doneker, 2008).

Ecuaciones de gobierno

El modelo hidrodinámico permite reproducir el flujo en forma bidimensional a través de las ecuaciones de continuidad y de conservación del momentum en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = -gh\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\rho_a C_d \bar{u}_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}{\rho_0} - \frac{n^2 g \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{1}{3}}} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -gh\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\rho_a C_d \bar{v}_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}{\rho_0} - \frac{n^2 g \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{1}{3}}} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

Donde \bar{u} y \bar{v} son las componentes de velocidad promediada en la vertical en las direcciones x e y , respectivamente, $\bar{u}_w = (u_w, v_w)$ es la velocidad del viento, h es la profundidad, η es la desnivelación instantánea (con $\eta + d = h$, donde d es la profundidad respecto del nivel estático), g es la aceleración de gravedad, ρ_0 es la densidad referencial del agua, ρ_a es la densidad del aire y S la magnitud de la descarga debido a fuentes puntuales. El término n representa el coeficiente de Manning, utilizado para calcular la tensión generada por la fricción del fondo. El término C_d es el

coeficiente de arrastre empírico del aire, considerado dependiente de la velocidad del viento a partir de la formulación (4), siendo $c_a = 0.001255$, $c_b = 0.002425$, $w_a = 7$ m/s y $w_b = 25$ m/s.

$$C_d = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases} \quad (4)$$

Los términos s_{ij} , con $i, j = x, y$ corresponden a las componentes del tensor de radiación debido al oleaje (Holthuijsen, 2007), y se obtienen a partir del modelo espectral de oleaje Mike 21 SW (DHI, 2014b). El forzamiento con mareas se efectúa en la condición de borde, ingresando un registro compuesto por la suma del i) nivel medio del mar en la zona de interés (0.9 m) y la ii) marea astronómica generada a partir del modelo global de mareas incorporado en Mike 21 Toolbox (Tidal), el cual considera ocho constituyentes armónicas (K1, O1, P1, Q1, M2, S2, N2 y K2). Debido al reducido tamaño del dominio, se descarta incluir forzamiento del potencial de marea en las ecuaciones de momentum (DHI, 2014c; Tan, 1992)

Para simular la transformación del oleaje desde aguas profundas al sector de interés se utilizó el módulo de propagación de oleaje Mike 21 SW. El modelo permite calcular la acción del oleaje $N(\sigma, \theta) = E/\sigma$ a través de la ecuación de balance de acción (Holthuijsen, 2007)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} = \frac{S_{in} + S_{bot} + S_{surf}}{\sigma} \quad (5)$$

donde E es el espectro de oleaje, σ es la frecuencia angular relativa y θ la dirección del oleaje. El término S_{in} es la transferencia de energía desde viento hacia el oleaje, S_{bot} la disipación de energía debido a la fricción con el fondo y S_{surf} la disipación de energía por rotura. Los términos $(c_x, c_y) = c_g + \mathbf{U}$ incluyen la celeridad de grupo c_g en los ejes x e y , y \mathbf{U} la velocidad de la corriente promediada en la vertical. Los parámetros c_θ y c_σ corresponden a las celeridades de propagación en el dominio de la dirección y frecuencia, respectivamente. Sus expresiones son

$$c_\theta = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]; \quad c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_x d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (6)$$

donde d la profundidad respecto del nivel estático, k es el número de onda, s es la coordenada espacial en dirección al oleaje y m es la coordenada perpendicular a s .

Casos de simulación

Se simularon seis casos medios y tres casos extremos⁶ (Tabla 1). Los casos medios (M1 a M6), agrupados para condición invernal y estival, fueron validados contra mediciones de campo. Los casos extremos representan las peores condiciones ambientales encontradas en los registros y se estructuran como la combinación de los eventos más intensos de las forzantes de viento y oleaje en

⁶ Previo a la definición de estos escenarios, se configuraron casos forzados sólo con marea, viento y oleaje, que luego fueron combinados. El detalle se incluye en Herrera (2017).

las direcciones NW, W y SW. Un análisis de sensibilidad ante variaciones de la marea (Herrera, 2017), permitió constatar que durante cuadratura y sicigia las corrientes no se modifican sustancialmente respecto de la marea media (casos medios ~8% y extremos ~3%). Por esa razón, se consideró sólo marea media en las simulaciones.

Tabla 1. Combinación de casos medios y extremos.

Forzante	Variable	Condición invernal			Condición estival			Condición extrema		
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	E1	E2	E3
Marea	Rango	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
Viento	U (m/s)	3.1	3.7	3.6	1.0	1.3	0.6	7.5	10.7	11.1
	Dir (°)	315°	290°	225°	315°	290°	225°	315°	290°	225°
Oleaje	Hs (m)	2.8	2.8	2.8	1.6	1.6	1.6	4.0	4.5	6.3
	Tp (s)	12.5	12.5	12.5	9.8	9.8	9.8	8.3	13	16
	Dir (°)	225°	225°	225°	225°	225°	225°	310°	252.5°	234.7°

El campo hidrodinámico obtenido con Mike 21 HD fue forzado mediante i) el tensor de radiación obtenido del campo de oleaje, ii) la marea media y iii) el viento local. Los modelos Mike 21 SW y HD fueron seteados para considerar el acoplamiento bidireccional (*full coupling*) entre el oleaje y las corrientes. Éste último fue calibrado utilizando un coeficiente de Manning de $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$ y validado con los registros de corrientes en dos puntos de la bahía (UV, 2009). El coeficiente de fricción del viento fue considerado dependiente de la intensidad y la viscosidad turbulenta no fue considerada debido a su nula influencia en la respuesta hidrodinámica (Herrera, 2017).

Para garantizar la estabilidad numérica del modelo hidrodinámico, se configuraron seis puntos dentro de la bahía (Figura 3a) en los que se evaluó el tiempo de estabilización de las corrientes simuladas por cada forzante. Se concluyó que el oleaje es la forzante que más tiempo demora en alcanzar la estabilidad, luego de tres días de modelación (Figura 3b). Por ende, se consideró un tiempo total de simulación de cinco días, utilizando los últimos dos para el proceso de vertido y estabilización del contaminante.

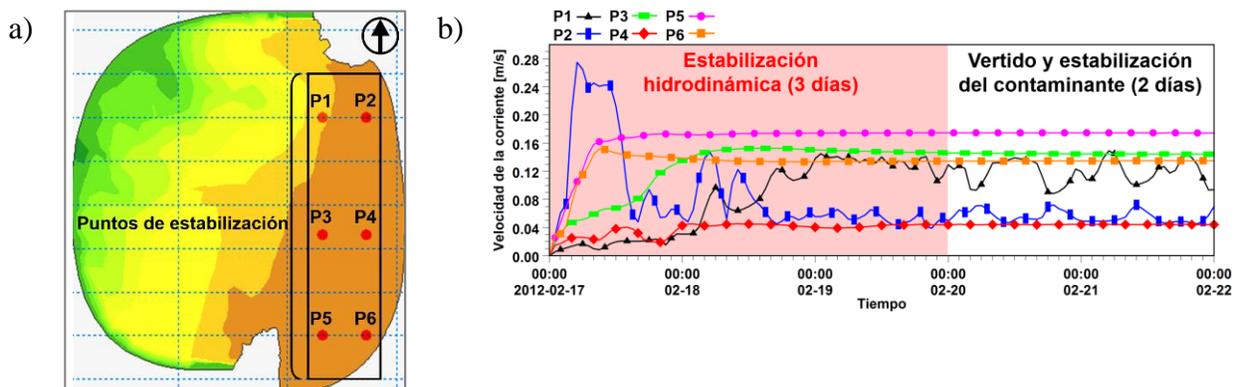


Figura 3. a) Puntos de estabilización. b) Estabilización del oleaje incidente del oeste.

Simulación de los Procesos de Mezcla

En el estudio de los vertidos de descargas boyantes, se distinguen las zonas de campo cercano y lejano (Figura 2b). En el campo cercano, el proceso de mezcla está dominado por la boyantes y el momentum de la descarga; el efluente se denomina activo pues genera modificaciones en el patrón hidrodinámico. Esta zona está controlada por el caudal del emisario, los parámetros de diseño del difusor, las propiedades del vertido y del cuerpo receptor. En el campo cercano se desarrolla la dilución inicial del contaminante, el cual asciende hasta alcanzar un plano de estratificación (Salas, 2000). Cuando se produce un equilibrio densimétrico entre el contaminante y el medio se establece el inicio del campo lejano, zona donde se produce tanto la dilución secundaria como terciaria, asociadas al decaimiento bacterial y al transporte debido al régimen de corrientes oceánicas, que pueden ser forzadas por vientos, mareas, oleaje o gradientes densimétricos, entre otros. En esta zona el efluente se denomina pasivo pues no genera modificaciones en el patrón hidrodinámico.

Campo cercano

Luego de la validación del modelo hidrodinámico (Herrera, 2017), se calculó la dilución inicial de la descarga en el campo cercano, a través Cormix 2. Este modelo se basa en el análisis dimensional del fenómeno, del cual derivan fórmulas semiempíricas del tipo escala de longitud para clasificar 31 clases de flujo, utilizando en su caracterización más de 25 módulos de cálculo (Jirka & Doneker, 1991). Los parámetros ingresados en el programa fueron: i) la velocidad en el punto de vertido simulada mediante Mike 21 HD, ii) el perfil densimétrico del cuerpo de agua, iii) las características del difusor, iv) la profundidad y v) características del vertido. Para el cálculo de la dilución inicial, se definió un caudal medio de operación de $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal máximo de $0.96 \text{ m}^3/\text{s}$.

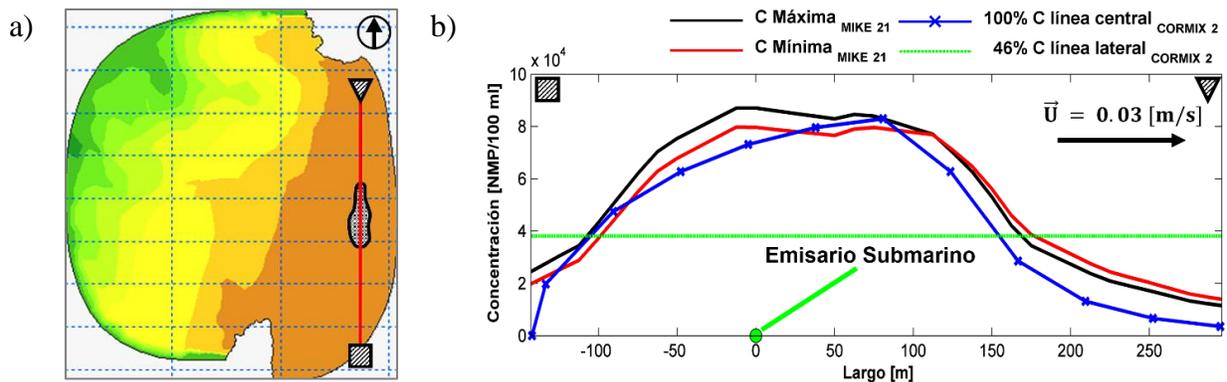


Figura 4. Concentración de CF en la línea central de la pluma para las últimas 24 horas de simulación, mediante Cormix 2 y Mike 21 AD. a) Esquema de la transecta. b) Caso simulado con un caudal de vertido medio.

El acoplamiento de campos cercano y lejano se desarrolló mediante un código en Matlab para compatibilizar la concentración calculada en el campo cercano mediante Cormix 2 y la obtenida en el campo lejano usando Mike 21 AD. Esta compatibilidad se definió en el transecto de la Figura 4a. En la Figura 4b se comparan las concentraciones máxima y mínima obtenidas mediante ambos modelos.

Campo lejano

La modelación en el campo lejano se realizó acoplando el módulo hidrodinámico con el de advección y difusión Mike 21 AD para un contaminante no conservativo (DHI, 2014d), descrito por la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hc) + \frac{\partial}{\partial x}(uhc) + \frac{\partial}{\partial y}(vhc) = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) - khc, \quad k = \frac{2.3}{T_{90}}, \quad (7)$$

donde c corresponde a la concentración media del contaminante en la profundidad, D_x y D_y son los coeficientes de difusión en la dirección x y y , T_{90} es el tiempo necesario para que disminuya el 90% de la concentración de coliformes remanentes en [hr], y k es la constante de decaimiento del contaminante, en [hr⁻¹]. La concentración en el punto de descarga se definió a partir de Cormix 2, según se explica en la sección precedente. Utilizando el modelo Mike 21 AD, se cuantificó la concentración de CF en la ZPL y en las AMERB de la bahía de Coquimbo (Figura 5, b-c) durante el último día de simulación y a través de una serie de transectas, para condiciones medias y extremas. Cada transecta corresponde a una polilínea con una distancia establecida en metros y un punto de inicio del trazado definido en la Figura 5, b-c. Para optimizar la visualización del contaminante en cada transecta, se acotó la distancia al segmento de interés (Figura 8 y Figura 10).

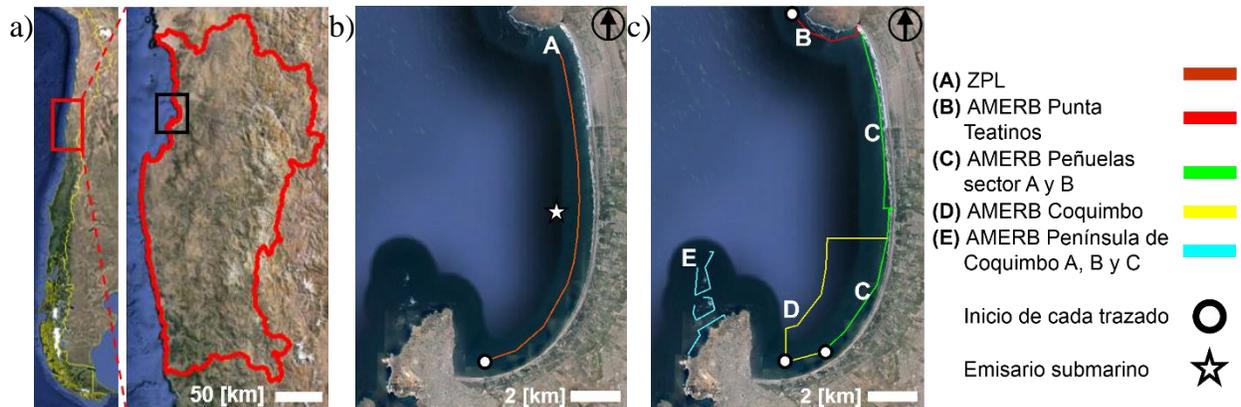


Figura 5. a) Región de Coquimbo, b) ZPL y c) AMERB's de la bahía de Coquimbo.

3. RESULTADOS

En esta sección se analizan i) los patrones hidrodinámicos en la bahía de Coquimbo forzados mediante oleaje, marea y vientos, ii) los patrones de advección y difusión de la pluma de aguas servidas y iii) la cuantificación de la concentración de CF sobre la ZPL y las AMERB, considerando los límites establecidos en las normas ambientales chilenas (NCh 1333 of. 78 y D.S. 90/2000).

Importancia del Oleaje en el Forzamiento de Corrientes en la Bahía de Coquimbo

Para evaluar la importancia relativa del oleaje en la respuesta hidrodinámica de la bahía de Coquimbo, se consideraron i) modelos que combinan marea, viento y oleaje y ii) modelos que sólo consideran marea y viento. En la Figura 6 se comparan las mediciones de corrientes en enero y y

mayo (2008) con los modelos con (Figura 6, a-c) y sin oleaje (Figura 6, b-d), en la que se observa que el oleaje es responsable de un aumento de ~70% en la velocidad. Con ello se demuestra el importante papel que cumple el oleaje como generador de corrientes litorales, especialmente en configuraciones costeras complejas como las bahías. Cada gráfico cuenta con dos conjuntos de datos correspondientes al registro promedio de las estaciones F1 (cuadro verde) y F2 (circulo amarillo), siendo comparados con la velocidad promedio de los casos simulados M1-M2-M3 (condición invernal) y M4-M5-M6 (condición estival), descritos en la Tabla 1. El detalle de este análisis se encuentra disponible en Herrera (2017).

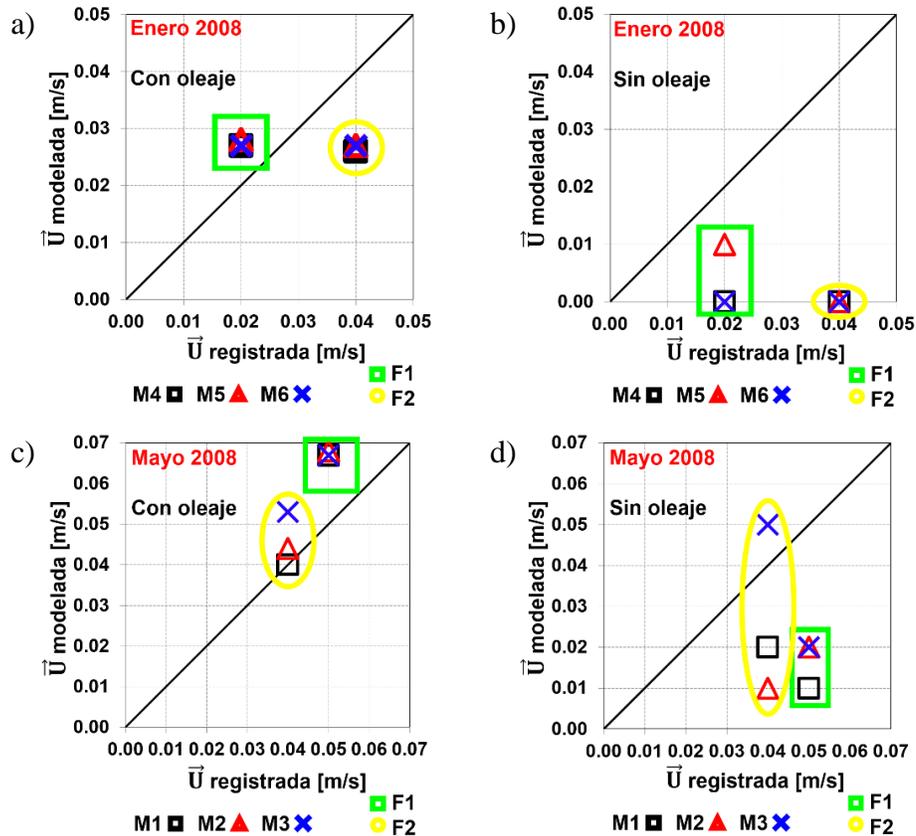


Figura 6. Comparación entre corrientes promedio simuladas y registradas en enero y mayo de 2008 para los modelos con oleaje (a–c) y sin oleaje (b–d).

Modelo Forzado Bajo Condiciones Medias

Las simulaciones hidrodinámicas para los casos M1 y M6 (Figuras 7a y 7b), presentan un vórtice antihorario (~1.4 km) en el extremo sur de la bahía y un vórtice horario en el centro de la misma (~3.5 km). La interacción entre ambos vórtices genera una corriente costa afuera, con dirección ~330°, que es consistente con imágenes satelitales donde se observa una pluma de sedimento en suspensión en esa dirección (Figuras 7c). Hacia el norte de la bahía, el patrón hidrodinámico presenta una tendencia direccional hacia el noreste. Para el caso M1, en el punto de vertido se calculó una corriente promedio igual a 0.03 m/s y la pluma de descarga presenta una forma ovalada cuyo extremo inferior se aproxima a la ZPL y a las AMERB tanto de Coquimbo como de Peñuelas

(Figuras 7d). En el caso M6 se obtuvo una corriente de 0.02 m/s en el punto de vertido y la pluma describe una forma circular, cuya extensión se aproxima a la ZPL y a las AMERB de Coquimbo y de Peñuelas (Figura 7e). En este caso, la acumulación de aguas servidas alrededor del punto de vertido se justifica por un medio receptor con deficiente advección.

En el caso M1 (Figura 8a) se aprecia una concentración de CF bajo el límite establecido para la ZPL según el D.S. 90 (1000 NMP/100ml). En las AMERB de Coquimbo (Figura 8c) y Peñuelas (Figura 8e) se mantiene la concentración de CF bajo el límite de 70 NMP/100ml señalado en el mismo cuerpo legal. Cabe notar que la concentración corresponde a un promedio las últimas 24 horas de simulación donde el modelo de transporte se encuentra estabilizado.

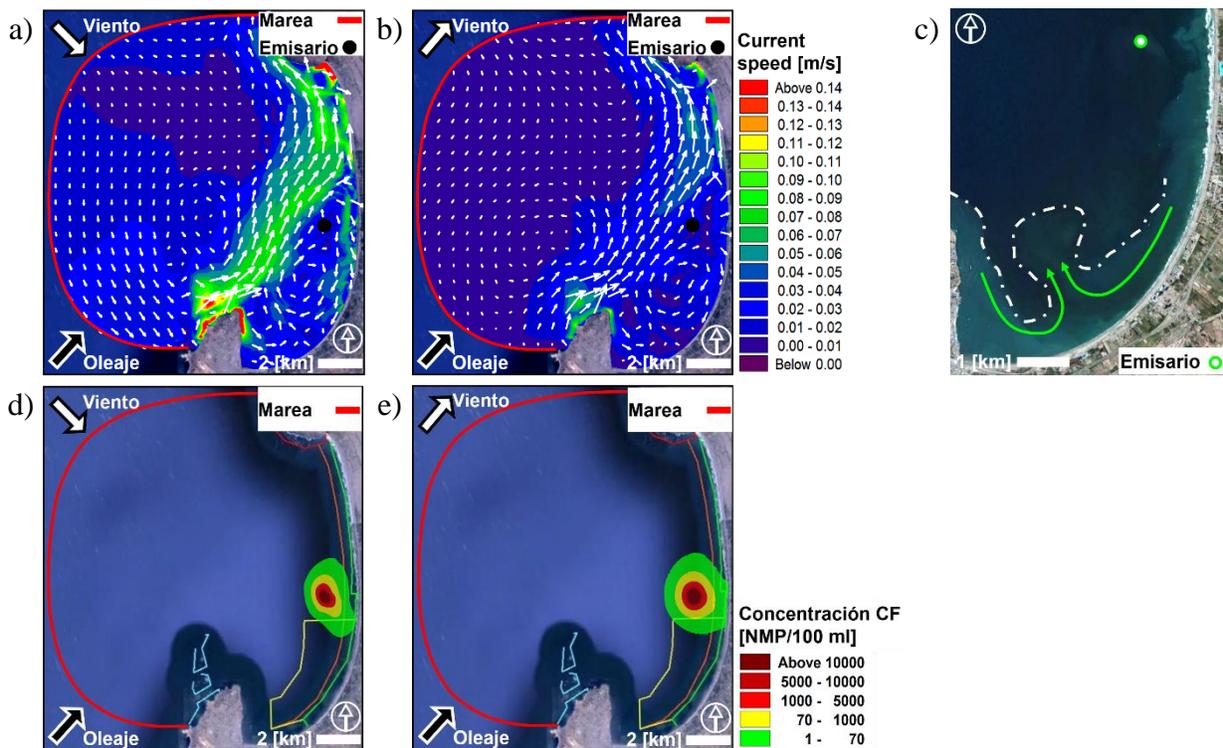


Figura 7. Gráficos del patrón hidrodinámico y de mezcla para los casos M1 y M6. Modelos hidrodinámicos para los casos a) M1 y b) M6. c) Zona sur de la bahía. Modelos de mezcla para los casos d) M1 y e) M6.

En el caso M6 (Figura 8b) no se excede el límite en la ZPL pero se presenta mayor concentración respecto al caso M1 como respuesta a la baja intensidad hidrodinámica (Figura 7b). En la AMERB de Coquimbo (Figura 8d) se presenta un sobrepaso del valor normado. En la AMERB de Peñuelas (Figura 8f) no se aprecia un sobrepaso del límite ambiental, pero se presenta un abrupto aumento en la concentración de CF correspondiente a la proximidad al punto de descarga del AMERB Peñuelas-Sector A. En síntesis, el caso M6 presenta una mayor aproximación a los límites establecidos por la normativa debido a la acumulación del contaminante sobre el punto de descarga.

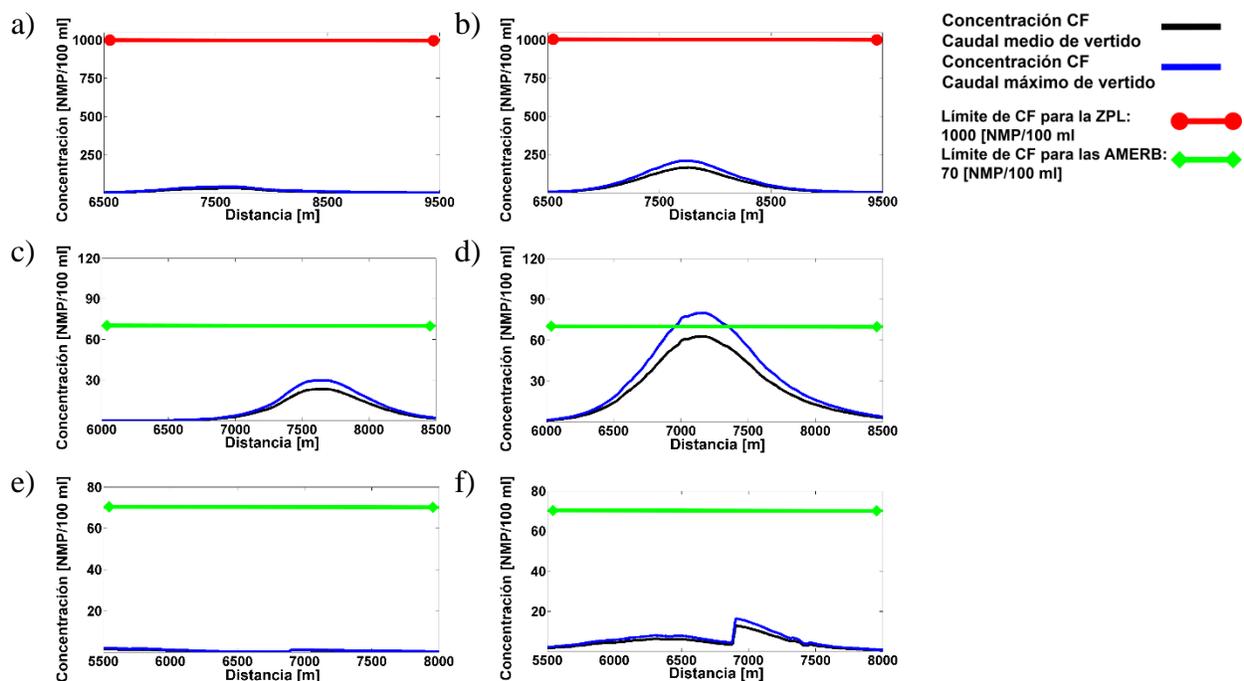


Figura 8. Concentración de CF en la ZPL para los casos a) M1 y b) M6; en la AMERB Coquimbo para los casos c) M1 y d) M6 y en la AMERB Peñuelas para los casos e) M1 y f) M6.

Modelo Forzado Bajo Condiciones Extremas

El análisis del campo hidrodinámico y el transporte del contaminante para los casos E1, E2 y E3, se analiza en esta sección. En el caso E1 se aprecia un patrón hidrodinámico direccionado al sur con ausencia de vórtices (Figura 9a). La intensidad de la corriente en el punto de descarga es de ~ 0.13 m/s. Se aprecia una advección de la pluma hacia el sur de la bahía (Figura 9d) que no afecta a la ZPL pero interactúa con el AMERB de Coquimbo alcanzando concentraciones que superan los 70 NMP/100ml.

Para el caso E2, el patrón hidrodinámico presenta vórtices de múltiples tamaños e intensidades (Figura 9b). En la zona sur de la bahía se observa una corriente hacia los 330° generada por la convergencia de dos vórtices. El punto de descarga se encuentra en el centro de un gran vórtice cuyas corrientes que oscilan entre 0.03 y 0.05 m/s con una leve tendencia hacia el sur. La pluma presenta bordes irregulares (Figura 9e) en respuesta a los vórtices y el contaminante alcanza tanto a la ZPL como a la AMERB de Coquimbo.

El caso E3 presenta un campo hidrodinámico más intenso con corrientes hacia el norte y velocidades promedio de 0.13 m/s en la descarga (Figura 9c). En las proximidades de dicho punto, las corrientes generan una fuerte advección de la pluma y distribuyen las aguas servidas a lo largo de la playa (Figura 9f). El contaminante se advecta a tal velocidad que los CF no tienen tiempo suficiente para decaer en forma natural.

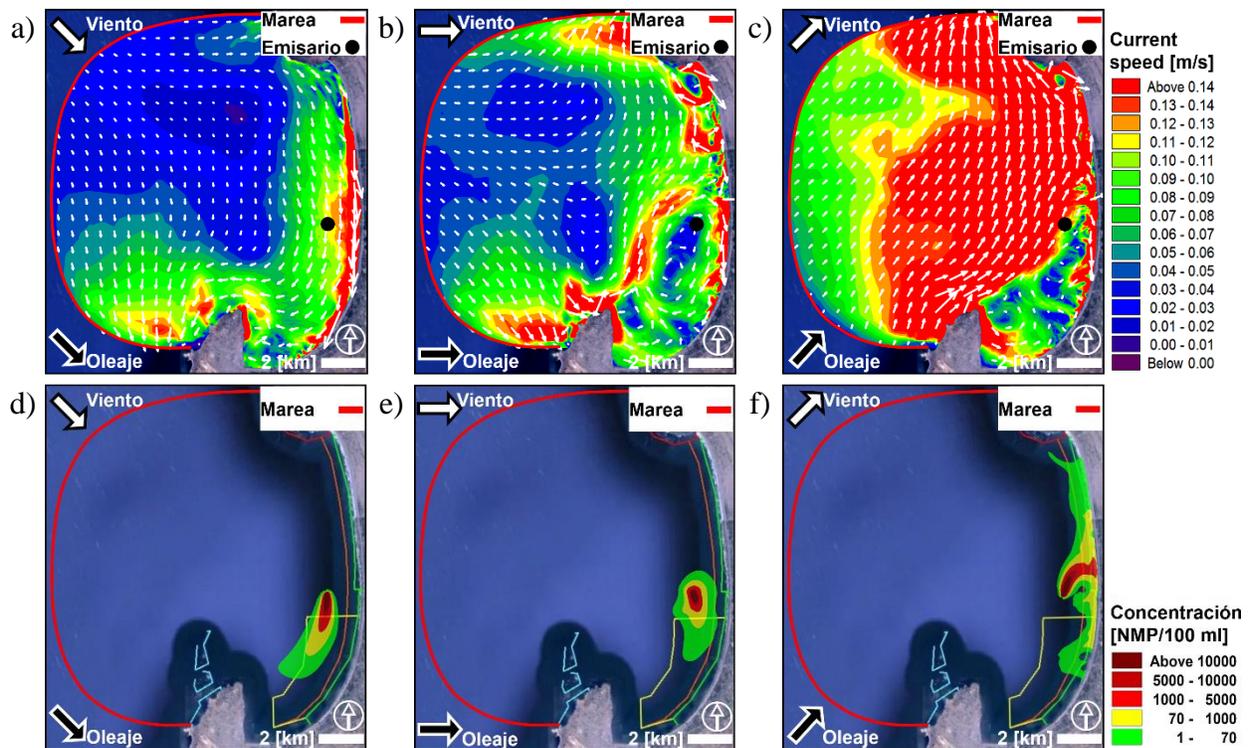


Figura 9. Gráficos del patrón hidrodinámico y de mezcla para los casos E1, E2 y E3. Modelos hidrodinámicos para los casos a) E1, b) E2 y c) E3. Modelos de mezcla para los casos d) E1, e) E2 y f) E3.

En la Figura 10a se presentan la concentración de CF en la ZPL para los casos extremos. En los casos E1 y E2, la concentración es tan baja que no se visualiza en el gráfico. En el caso E3 (forzado desde el suroeste), se alcanza una concentración máxima de ~ 3000 NMP/100ml en una sección de ~ 1 km, muy sobre el límite de 1000 NMP/100ml. En la AMERB de Coquimbo (Figura 10b) se observa que los casos E1 y E2 superan el límite ambiental (70 NMP/100ml). Específicamente, el caso E1 presenta un máximo de ~ 5000 NMP/100ml en un ancho de aproximadamente 1 km y el caso E2 alcanza los ~ 400 NMP/100ml con un ancho aproximado de 0.5 km. En la AMERB de Peñuelas (Figura 10c), la concentración es igual a cero para los casos E1 y E2. Sin embargo, el caso E3 alcanza una concentración de ~ 2000 NMP/100ml, superando el límite ambiental en ~ 5 km. En síntesis, los tres casos extremos afectan la bahía en diferentes zonas y concentraciones. Cuando la pluma se desplaza hacia el sur (casos E1 y E2), altera la calidad de agua del AMERB de Coquimbo y si se desplaza al este (caso E3), altera la ZPL y AMERB de Peñuelas.

4. CONCLUSIONES

En lo relativo al patrón hidrodinámico de la bahía de Coquimbo, se concluye que i) la marea produce un patrón oscilatorio con corrientes de baja intensidad, ii) el viento genera flujos hacia el sur o norte dependiendo de su dirección y en algunos casos crea un vórtice bien definido en la zona sur de la bahía y iii) el oleaje genera múltiples vórtices que afectan la circulación de la bahía, aumentando la corriente especialmente frente a Punta Tortuga. Los modelos que consideran oleaje

aumentan la intensidad de la corriente en un ~70%, lo que es validado con mediciones de campo. Se demuestra la importancia de esta forzante en la advección de la pluma de aguas servidas, aun cuando la descarga se encuentra fuera de la rompiente.

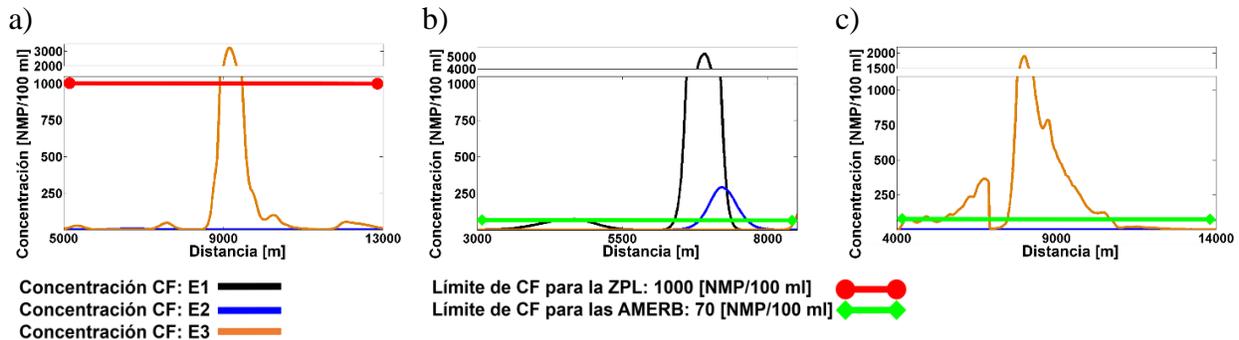


Figura 10. Concentración de CF en: a) ZPL, b) AMERB Coquimbo y c) AMERB Peñuelas.

El uso de estaciones puntuales para cuantificar la concentración de un contaminante es limitado. Para evaluar el impacto de forma rigurosa en áreas sensibles (ZPL o AMERB), es recomendable cuantificar la concentración de CF en un trazado que recorra el límite éstas, considerando una discretización temporal acorde a la intensidad hidrodinámica adyacente al punto de descarga.

La cuantificación de CF en el AMERB de Coquimbo del caso M6, excede el límite impuesto por el D.S. 90/2000. Dicho resultado se basa en la presencia de corrientes con baja intensidad que promueven la acumulación de aguas servidas sobre el punto de descarga. En los casos extremos, la pluma es advectada a lo largo de la bahía excediendo los límites ambientales tanto para la ZPL como las AMERB. Los casos forzados desde el noroeste y oeste afectan el AMERB de Coquimbo. El caso forzado desde el suroeste fue el único que afecta tanto la ZPL como el AMERB de Peñuelas. Estos resultados cuestionan la eficiencia del sistema de descarga de aguas servidas existente, por lo que se considera oportuno rediseñar el difusor del emisario y ubicarlo a una mayor profundidad su descarga.

La NCh 1333 of. 78 establece que la pluma de aguas servidas no debiera ser visible en la superficie. No obstante, de la inspección de imágenes satelitales y del modelado numérico, se observa un afloramiento de la misma en condiciones normales y extremas durante prácticamente todo el año. Este afloramiento junto a vientos provenientes del mar durante horas de la tarde, pueden generar un fuerte hedor en la playa y molestias en los usuarios. El impacto socioeconómico de los olores en la playa debiera ser evaluado en estudios posteriores, ya que puede afectar a la ciudad como zona turística.

Se considera necesario crear una norma de calidad secundaria (protección de recursos naturales), para establecer los requerimientos mínimos a evaluar en este tipo de proyectos. En la actualidad solo se cuenta con el D.S.90/2000 que establece concentraciones máximas en áreas sensibles, sin considerar escenarios medios y extremos, caudales de descarga medios y máximos, un plan de muestreo que considere zonas estratégicas (adyacentes al punto de descarga y en áreas sensibles) y estudios relacionados al T_{90} nocturno. Siendo la radiación solar el principal agente de mortalidad

bacterial, es de presumir que la pluma aumente su extensión durante la noche y afecte zonas sensibles sin poder ser fiscalizadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a DHI por facilitar la licencia académica de Mike 21, a MixZon Inc por la licencia estudiantil de Cormix. Se agradece al SHOA por el registro horario de marea en el Puerto de Coquimbo y al proyecto Fondef-IDeA IT3I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile” por la información de oleaje.

REFERENCIAS

- Beyá, J.; Álvarez, M.; Gallardo, A.; Hidalgo, H.; Aguirre, C.; Valdivia, J.; Parra, C.; Méndez, L.; Contreras, C.; Winckler, P.; & Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. ISBN: 978-956-368-194-9. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. Chile.
- Cifuentes, J. L.; Torres, P.; & Frías, M. (1991). El océano y sus recursos XII. El futuro de los océanos. México.
- Cortés-Lara, M. (2003). Importancia de los coliformes fecales como indicadores de contaminación en la Franja Litoral de Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit. *Biomed*, (14), 121-123.
- DHI. (2014a). Mike 21 Flow Model Hydrodynamic Module. Scientific Documentation. Denmark.
- DHI. (2014b). Mike 21 Spectral Waves Module. Scientific Documentation. Denmark.
- DHI. (2014c). Mike 21 Flow Model Hydrodynamic Module. User Guide. Denmark.
- DHI. (2014d). Mike 21 Flow Model Advection/Dispersion Module. User Guide. Denmark.
- Fernández, D. C. (2012). Estudio integral de la hidrodinámica y transporte de sedimentos en Chelem, Yucatán. México.
- Herrera, J. R. (2017). Estudio de la pluma de descarga generada por un emisario submarino bajo condiciones medias y extremas en la bahía de Coquimbo (Tesis de pregrado). Universidad de Valparaíso. Chile.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Pres.
- Jirka, G. H.; & Doneker, R. L. (1991). Hydrodynamic classification of submerged single-port discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(9), 1095-1112.
- Jirka, G. H.; & Doneker, R. L. (2008). Mixing Processes and Mixing Zone Analysis. Workshop: Brine Discharge Management. Environmental planning, prediction and management of brine discharges from desalination plants. Karlsruhe Institute of Technology.
- Leppe, A.; & Gonzalez, D. (1997). El emisario submarino como sistema de tratamiento de aguas servidas. Chile.
- Ludwig, R. G. (1988). Ubicación y diseño de emisarios submarinos. Perú.
- Salas, H. J. (2000 actualización de 1988). Emisarios submarinos. Enfoque general, conceptos básicos de diseño y requerimiento de datos para américa latina y el Caribe.
- Tan, W. (1992). *Shallow water hydrodynamics: mathematical theory and numerical solution for a two-dimensional system of shallow water equations*. China: Elsevier Science.
- The COMET Program. (2012). Rip Currents: Nearshore Fundamentals. Obtenido de <http://www.meted.ucar.edu/>
- Universidad de Valparaíso. (2009). Diagnóstico de los efectos de las descargas líquidas en la bahía de Coquimbo. Chile.
- Winckler, P.; Liu, P.; & Mei, C. (2013). Advective Diffusion of Contaminants in the Surf Zone. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*. 139. 437-454.