

MODELADO 3D EN EL LITORAL MARINO: IMPACTO DE VERTIDOS INDUSTRIALES Y ALTERNATIVAS SUSTENTABLES

Pablo A. Tarela y Francisco van Avermaete

Grupo de Modelización y Simulación de Dispersión de Contaminantes, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional, San Martín 1171 (2804) Campana, Provincia de Buenos Aires, Argentina, ptarela@fi.uba.ar

Palabras Clave: Modelo hidrodinámico, Transporte contaminantes, Litoral marino, Coherens, Tridimensional.

Resumen. En este trabajo se presenta un estudio sobre la problemática del vertido de efluentes líquidos industriales sobre áreas costeras marinas. Se trata del caso de la industria pesquera en Puerto Deseado (prov. de Santa Cruz, Argentina). El estudio contempla la caracterización del problema, tanto en lo referido a efluentes como calidad de agua marina, el análisis de soluciones y la evaluación de la performance de las alternativas planteadas.

Para este último análisis, se han aplicado herramientas de la mecánica computacional, a partir del uso del modelo matemático *Coherens* para la representación del patrón de corrientes y amplitud de marea y, a partir de sus módulos de transporte de sustancias y vectores biológicos, para la simulación de los campos de concentración de contaminantes.

El modelo *Coherens* es impermanente y tridimensional, y discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes mediante un esquema explícito en diferencias finitas, aplicándose la condición de estabilidad de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). El cierre del modelo puede realizarse mediante distintos esquemas de turbulencia, definidos por el usuario, lo mismo que el esquema de estabilización por términos advectivos dominantes. Este tipo de detalles se discuten en el presente trabajo, en el cual se describen los aspectos numéricos del estudio, en virtud de la temática del Congreso. La performance del modelo hidrodinámico se presenta en relación a los procesos de validación mediante la comparación de soluciones numéricas con datos de campo obtenidos mediante una boya oceanográfica automática instalada en la zona de estudio durante un periodo de varias semanas. Se ha logrado en este sentido, un excelente acuerdo entre los niveles y velocidades simulados respecto de las mediciones.

Para resolver el problema actual de impacto costero de la actividad pesquera, como solución conceptual se ha analizado la construcción de plantas de tratamiento y emisarios submarinos, localizados estratégicamente. En el trabajo se muestra como el modelo es capaz de representar el problema actual, y la comparación en términos relativos para las alternativas planteadas, incluyendo distintos tipos de tratamiento de efluentes líquidos a realizar previo al vertido.

Entre otras conclusiones, se muestra que una representación impermanente y 3D ha sido fundamental en el estudio, en virtud de que los vuelcos no son constantes (existe una fuerte dependencia con la hora del día y el día de la semana) y en relación a los cambios topográficos del cuenco hidráulico y la localización de los difusores de los emisarios.

1 INTRODUCCION

En los últimos tiempos, en la Patagonia se han aplicado políticas de manufactura de la industria pesquera en tierra. Específicamente, la limpieza y preparación de pescado para la venta local y exportación, se realizan en establecimientos que por cuestiones logísticas se localizan sobre el litoral marino, cerca del área portuaria de recepción.

Ambientalmente, esto implica que los deshechos sólidos, semisólidos y líquidos del proceso del pescado ya no se arrojan en forma distribuida en el mar, sino que deben ser gestionados en tierra. Particularmente, los efluentes líquidos de proceso son vertidos en la costa sobre la que se emplazan los establecimientos industriales, provocando un problema de contaminación orgánica sobre las aguas y playas contiguas.

Uno de los sitios donde ocurre esta problemática es la ciudad de Puerto Deseado, en la Provincia de Santa Cruz. Datos municipales indican que el 65% del total de exportaciones corresponde a la Industria Pesquera, confirmando de esta manera el fuerte desarrollo de la actividad en la ciudad. En las costas de Puerto Deseado se emplaza una decena de establecimientos pesqueros, la mayoría de los cuales procesa pescado fresco o congelado, generando importantes volúmenes de efluentes líquidos. Los vertidos se realizan, a través de conductos de pequeñas dimensiones, en forma directa hacia la ría que comunica el mar Argentino con el río Deseado.

Dentro del Proyecto Marino Patagónico (PNUD 2008) administrado por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, se desarrolló una componente dirigida a estudiar este tema y proponer soluciones. La metodología general planteada para el estudio consistió en realizar las siguientes tareas (JMB 2008):

- Recopilación y análisis de antecedentes
- Relevamiento de campo
- Campaña de monitoreo de efluentes líquidos y calidad de aguas
- Modelado matemático de transporte de contaminantes
- Planteo de alternativas de tratamiento de efluentes
- Evaluación de performance de alternativas mediante simulación numérica

Como resultado del desarrollo de los dos primeros ítems citados, se pudo comprobar que la contaminación orgánica costera debería ser mayoritariamente debido a los vertidos pesqueros, dado que en la ciudad no se desarrollan otras actividades industriales de envergadura que generen este tipo de efluentes, y porque la salida de la planta de tratamiento cloacal de Puerto Deseado está ubicada en aguas abiertas de la costa marina, fuera del ámbito de la ría.

A los efectos de caracterizar la situación ambiental al momento del estudio, se llevaron a cabo campañas de monitoreo de efluentes industriales y calidad de aguas. Los primeros se realizaron para cada una de las plantas pesqueras existentes, incluyendo vertidos múltiples o procesos diferenciales, a los efectos de una mejor caracterización. Esto porque, por ejemplo, las etapas de proceso, limpieza o descongelado derivan en composiciones diferentes de los efluentes asociados. Además, existe una fuerte dependencia de la calidad y caudal de los vertidos con la hora del día, e función del programa de trabajo de cada planta, el cual se realiza por turnos y no es continuo.

En simultáneo con las mediciones de efluentes, se llevaron a cabo campañas de monitoreo de calidad de aguas, mediante toma de muestras directas en toda la extensión de la ría de Puerto Deseado, tareas llevadas a cabo desde embarcación con el apoyo de la Prefectura Naval Argentina.

En lo que sigue, se desarrolla en forma resumida el trabajo realizado en lo referido a los ítems restantes, esto es, la modelación matemática hidrodinámica y de transporte de contaminantes.

2 MODELADO MATEMATICO HIDRODINAMICO

2.1 Modelo Coherens

Para cuantificar el impacto de los vertidos de las industrias pesqueras en las aguas de la ría de Río Deseado, se aplicó un modelo matemático hidrodinámico y otro de dispersión de contaminantes. Hidrodinámicamente, la ría está sujeta a distintos forzantes:

- La acción de las mareas,
- La acción de los vientos locales y el oleaje,
- La descarga del río tributario,
- La penetración de una cuña salina, como consecuencia de las diferencias de densidad entre las aguas dulces del tributario y el agua salada del mar.

Es sabido que, debido al último fenómeno enumerado, se produce un gradiente de salinidad entre la boca de la Ría y el interior de la misma, lo cual tiene influencia directa sobre la hidrodinámica del estuario y la calidad de sus aguas.

Entre otros detalles, esto implica que el modelo más adecuado para representar la hidrodinámica de la ría es uno de tipo 3D (tridimensional), es decir, aquel que resuelve el campo horizontal y vertical de velocidades.

Para este estudio se utilizó el modelo hidrodinámico *Coherens* (Luyten et al., 1999), especialmente desarrollado para el estudio de problemas ambientales en zonas costeras.

El modelo es tridimensional, y especialmente apto para representar el flujo en zonas como las de la ría de Río Deseado, afectadas por un régimen de mareas y vientos que dan lugar a corrientes localizadas. En su desarrollo inicial, el modelo fue aplicado en el Mar del Norte, pero la física que representa es de carácter universal, por lo cual se puede extender a otros lugares.

Coherens es un modelo hidrodinámico tridimensional para plataformas continentales y áreas costeras. Está acoplado con modelos biológicos y de transporte de sedimentos y de contaminantes. Resuelve procesos de mesoescala y variaciones estacionales.

Este modelo es una herramienta en pos de la mejor comprensión de los procesos físicos y ecológicos, de la predicción y del monitoreo en zonas costeras. Algunas ventajas relevantes del modelo son la transparencia debida a su estructura modular y la flexibilidad provista por la posibilidad de seleccionar distintos procesos, esquemas y tipos de forzantes.

El programa computacional *Coherens* consta de cuatro componentes principales:

- Una parte física cuyo módulo general resuelve las ecuaciones de advección-difusión.
- Una parte microbiológica que trata la dinámica del microplankton, de los detritus, del nitrógeno inorgánico disuelto y del oxígeno inorgánico disuelto.
- Un módulo Euleriano de sedimentos que trata la deposición y la resuspensión de partículas tanto orgánicas como inorgánicas.
- Un modelo de transporte de contaminantes con ambas componentes, Euleriana y

Lagrangiana.

Coherens ha sido utilizado con éxito en estudios previos (Destuynder y Tarela, 2002; Destuynder, 2002; Tarela et al., 2005; van Avermaete y Tarela, 2005).

2.2 Implementación del modelo hidrodinámico

En función de los objetivos perseguidos (evaluación de impactos en la zona costera de la ciudad de Río Deseado, en el interior de la ría y transferencia al mar a través de la boca) y debido a que el problema bajo estudio tiene un alcance local (del orden de algunos kilómetros a pocas decenas de kilómetros), se optó por establecer para el estudio un dominio computacional de aproximadamente 11 km de desarrollo en la dirección norte-sur, y 24 km de desarrollo en la dirección este-oeste. De esta manera, el dominio cubre la ría en toda su extensión de interés, desde la frontera sudoeste que corresponde aproximadamente al extremo navegable del interior de la ría, y hasta la zona de mar abierto más allá de la boca de la misma.

La batimetría se obtuvo a partir de la digitalización de la carta náutica H-361 del Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina (SHN) cuya última corrección data del 27 de diciembre de 2005. Las profundidades se dan en metros con respecto al plano de reducción (límite inferior de la media de las bajamares de Sicigias).

La zona no navegable, que no ha sido relevada por el SHN para la formulación de cartas náuticas, ha sido construida mediante la utilización de imágenes satelitales. Para ello se ha construido en primer lugar el contorno Tierra-Agua, y luego se han establecido curvas de nivel extrapolando la información de las cartas náuticas disponibles.

Los valores así obtenidos, junto con los extraídos de las cartas, fueron procesados posteriormente mediante métodos de interpolación que permiten obtener la información necesaria para ingresar en el modelo.

El área de estudio varía aproximadamente 1 minuto en latitud entre el extremo norte y el sur del dominio, lo cual se traduce en una variación relativa del parámetro de Coriolis inferior al 1%. Por ello se desprecia la variación de éste parámetro con la latitud.

La densidad de referencia y los coeficientes de expansión por salinidad y temperatura (β_S, β_T) se consideran constantes. La densidad ρ se calcula mediante la siguiente ecuación lineal:

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta_S (S - S_0) - \beta_T (T - T_0)) \quad (1)$$

donde ρ_0 , S_0 , T_0 son una densidad, una salinidad y una temperatura de referencia. Se utilizaron los siguientes valores:

$$\beta_S = 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ PSU}^{-1} \quad (2)$$

$$\beta_T = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad (3)$$

$$\rho_0 = 1020 \text{ kg/m}^3, S_0 = 30 \text{ PSU}, T_0 = 10^\circ\text{C} \quad (4)$$

La turbulencia sigue un esquema de una ecuación. La longitud de mezcla se da por la fórmula de Blackadar, y se utilizan condiciones limitantes de tipo $k-\varepsilon$.

Para los efectos disipativos del cuenco, se calculó la altura de rugosidad efectiva de la

siguiente manera (Tarela, 2000):

$$K_s(n) = 15 \cdot H \cdot e^{-\left(\frac{1}{3} + \frac{K \cdot H^{1/6}}{n \cdot \sqrt{g}}\right)} \quad (5)$$

con H la profundidad local, n el coeficiente de Manning, K la constante de Von Karman y g la aceleración de la gravedad.

Se trabajó con 3 valores de coeficiente de Manning, utilizando el siguiente criterio:

- Para las zonas de flujo principal (las más profundas, canales de acceso) con $n=0.022$, asociado a arenas de fondo
- Para las zonas de restingas, $n=0.04$
- Para las zonas intermedias, $n=0.028$

Para la definición de la onda de marea, se dispone de la predicción del SHN frente a Puerto Deseado. Dichas predicciones son amplitudes de pleamar y de bajamar que se interpolaron cada 3 minutos mediante un filtro cosinusoidal. El modelo requiere como dato de entrada las ondas existentes en los bordes llamados marítimos e interno "fluvial". Para la definición de la misma se aplicó un desfase por propagación de la onda mareal oceánica.

Como condición inicial, las corrientes se tomaron nulas y la elevación de la superficie en forma uniforme conforme al valor correspondiente al borde marítimo sur.

2.3 Aspectos numéricos

Por el tipo de discretización empleada, el modelo *Coherens* trabaja con mallas regulares (estructuradas). Esta potencial desventaja sobre modelos en elementos finitos, con mayor adaptabilidad a contornos irregulares, es salvada hoy en día a través de la disponibilidad de procesadores con buena velocidad de cálculo. Esto permite trabajar sobre mallas con pequeños pasos, que logran representar satisfactoriamente la geometría del cuenco bajo análisis.

En esta aplicación, la resolución horizontal de la grilla es uniforme, de 50 m x 50 m, por lo que el dominio computacional posee 477 columnas por 219 filas. La generación de la malla se realiza mediante una digitalización de las interfases tierra-agua, y la confección de una matriz máscara que se carga al modelo por código de programa. Otra matriz similar, incorpora la información batimétrica, obtenida de las fuentes citadas y preparada para todo el dominio computacional mediante técnicas de interpolación de nodos cercanos.

En la vertical, el modelo trabaja con coordenadas σ , adaptando la altura de las celdas dinámicamente, en función de las variaciones de profundidad local. Esto implica que la malla de discretización se modifica de acuerdo a la solución hidrodinámica que se va obteniendo al integrar el problema en el tiempo. Para esta aplicación, se consideraron 10 capas de discretización. De esta manera, la malla computacional global presenta 477x219x10 volúmenes, de los cuales una fracción corresponde a los volúmenes (agua) de discretización.

Como es sabido, las escalas de tiempo horizontales y verticales en este tipo de flujos son distintas, lo cual es explotado por el modelo *Coherens* (de integración explícita) para avanzar diferencialmente la solución en los campos horizontales y verticales, permitiendo una gran optimización de los tiempos de cálculo sin perder precisión en la solución. En este caso de estudio, los pasos de tiempo para los modos barotrópico y baroclínico son de 1,25s y 10s, respectivamente. Surge una relación 1:8, consistente con las referencias de otros trabajos

(Lazure and Dumas, 2007). Para lograr la estabilidad del esquema de discretización se debe respetar la condición de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), que impone un paso de tiempo barotrópico máximo de 1.35s. Luego, los pasos de tiempo elegidos cumplen el criterio CFL, asegurando la convergencia.

Para contemplar la influencia mareal externa, los datos en el borde marino se actualizaron cada 3 minutos. Este tiempo surgió de corridas previas que mostraron que una actualización de mayor frecuencia no tiene mayor influencia en los resultados numéricos. De notarse que esta condición es particular para esta aplicación, dado que en otros casos el tiempo de actualización puede ser muy distinto: mayor para áreas simuladas del orden de cientos de kilómetros, y mucho menor para problemas locales de detalle, con efectos significativos por gradientes verticales de temperatura.

El esquema de estabilización elegido para la advección es el upwind. Esta decisión se basa en los ensayos de sensibilidad realizados por Destuynder (2002), quien encontró que la diferencia entre los resultados de elevaciones y de corrientes para un esquema TVD y upwind para la advección de momento es despreciable. Esto es previsible, ya que no aparecen frentes o gradientes fuertes en el dominio que podrían ser difundidos por un esquema upwind. Además, éste esquema cuenta con la ventaja de ser poco costoso desde el punto de vista computacional: aproximadamente la mitad que el esquema TVD.

No se considera en este trabajo la utilización de difusión numérica horizontal dado que aumenta los tiempos de trabajo sin modificar sensiblemente los resultados (Simionato, 2003).

2.4 Validación

Para validar el modelo hidrodinámico se compararon sus salidas con las predicciones de marea en Puerto Deseado y con mediciones de corrientes realizadas por el SHN en 7 estaciones del cuerpo de agua.

De estas últimas, 5 están ubicadas en la zona interior de la Ría (M1 a M5), una está sobre el cauce principal en la zona de la boca (F), y la restante es una boya que se encuentra registrando diferentes tipos de datos en la zona oceánica.

En primer lugar se compararon los niveles (amplitudes y fases) de las predicciones del SHN en Puerto Deseado con los niveles modelados en el mismo sitio. La figura que sigue muestra la comparación citada. Durante las primeras 6 horas el modelo pasa de la condición inicial (artificial) a una situación de estabilidad dinámica. Luego, se observa que el acuerdo es excelente, ya que la forma general de las oscilaciones es respetada por el modelo, reproduciendo en forma muy precisa tanto las amplitudes como las fases.

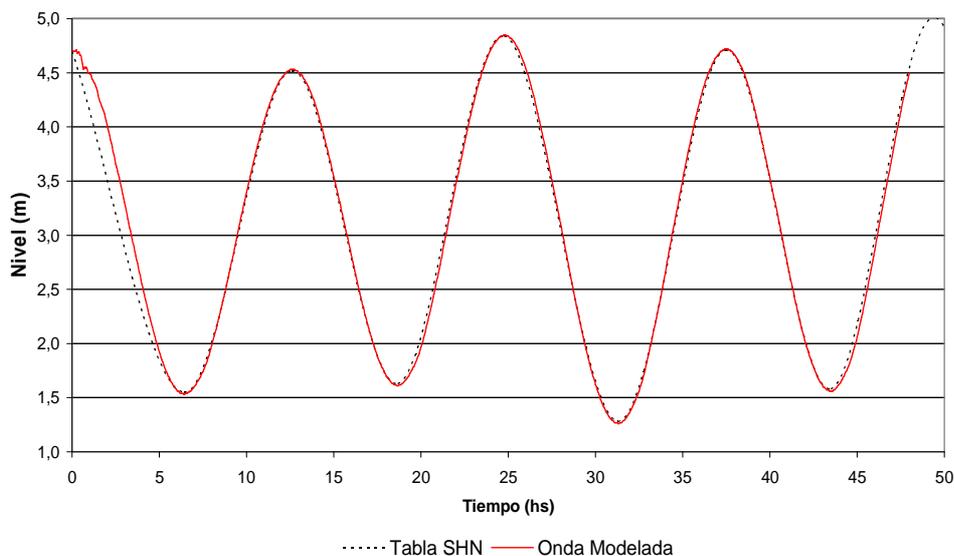


Figura 1. Comparación de niveles en Puerto Deseado.

Para ejemplificar el acuerdo obtenido en el conjunto de estaciones internas de la Ría, se utiliza el caso del Sitio F.

Las figuras que siguen presentan la comparación entre la medición de corrientes realizada por el SHN y la situación modelada. Puede verse (Figura 2) que la dirección de la corriente está muy bien representada, ya sea en pleamar como bajamar, e incluso en las direcciones próximas a la situación de estoa. En el caso de las intensidades de velocidad, el modelo sigue el patrón medido pero levemente sobreestimado, con valores modelados de hasta 0.1 m/s superiores (ver Figura 3).

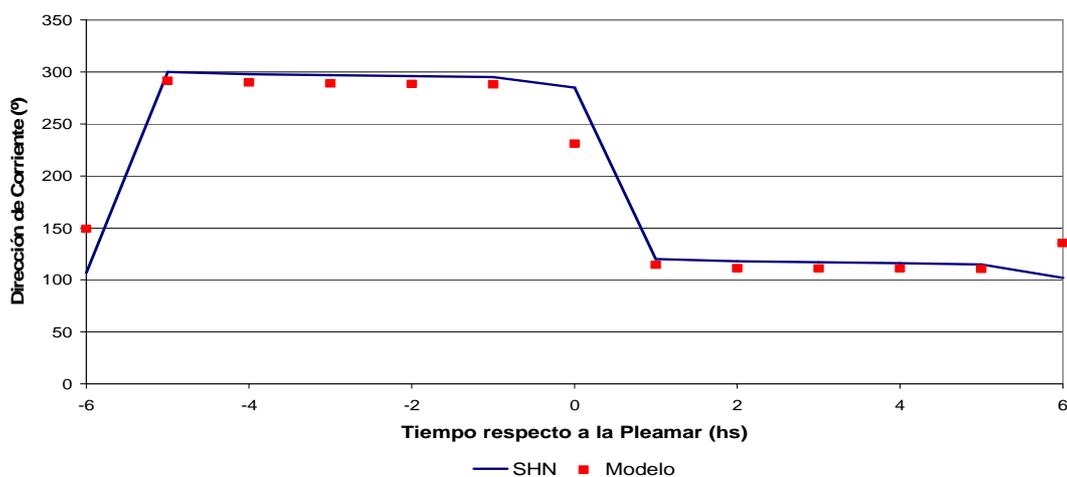


Figura 2. Comparación de direcciones en sitio F.

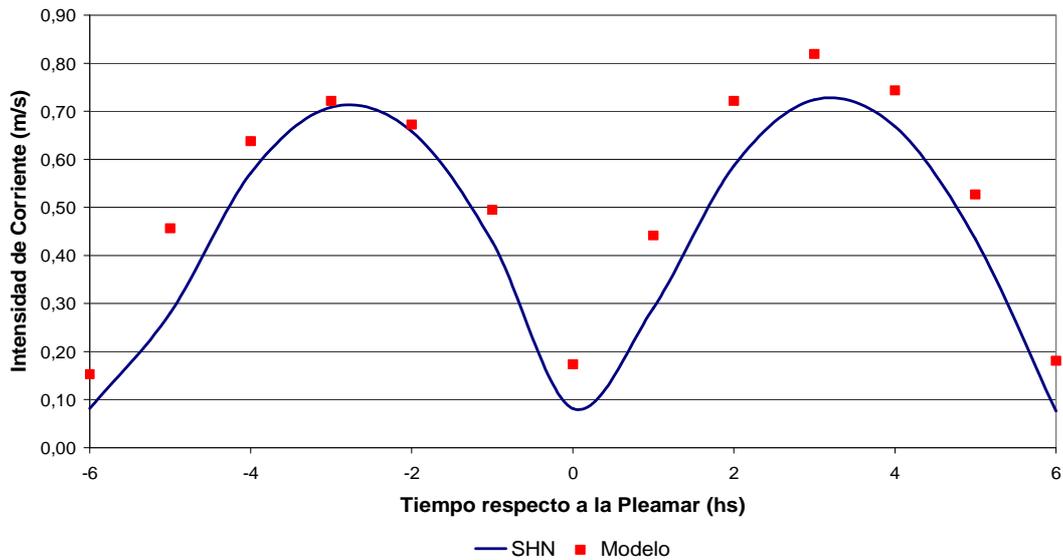


Figura 3. Comparación de intensidades en sitio F.

Se contó con una serie de datos del SHN, provenientes de medición con boya más allá de la boca de la Ría. Se trata de un registro continuo con valores de dirección e intensidad de corrientes para un período de varias semanas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para algunos días seleccionados. En el caso del módulo (intensidad, ver Figura 4) de velocidades, se observa un muy buen acuerdo entre mediciones y simulación, especialmente el seguimiento de la forma ondulatoria. Las intensidades medidas y simuladas son muy similares para todo el período.

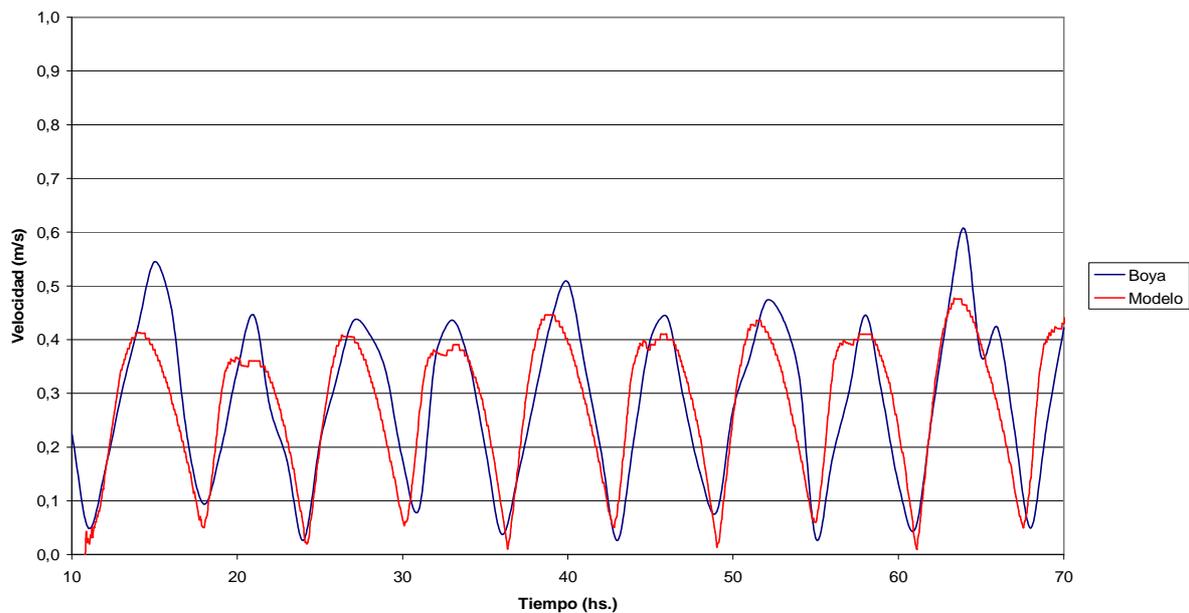


Figura 4. Comparación de evolución de intensidades medidas en la Boya del SHN y simuladas.

Además, en la Figura 5 se presenta la comparación de direcciones en el tiempo. Nuevamente luce un acuerdo muy satisfactorio, representándose el patrón general de la evolución, los momentos de cambio de dirección y su duración, como así también las direcciones principales en creciente y bajante.

Por lo expuesto hasta aquí el modelo se considera satisfactoriamente validado.

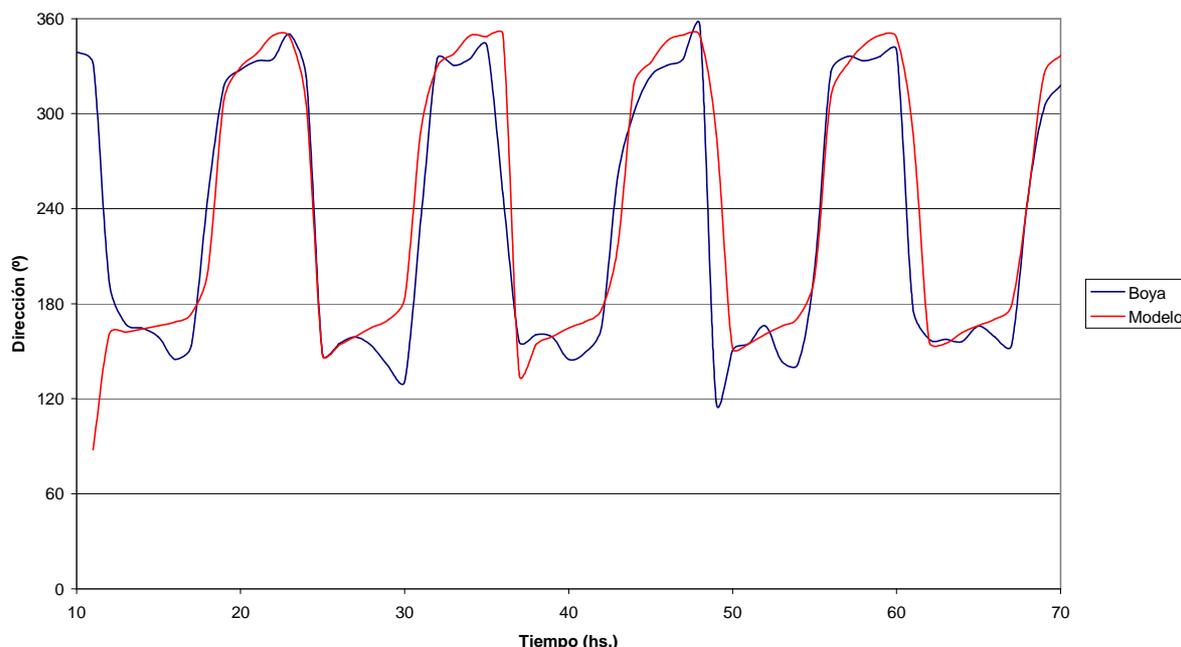


Figura 5. Comparación de evolución de direcciones medidas en la Boya del SHN y simuladas.

3 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

3.1 Implementación del modelo de calidad de aguas

Sobre el modelo hidrodinámico se implementó un modelo de calidad de aguas, por aplicación de los módulos correspondientes del modelo *Coherens*, que como se citó previamente, resulta apto para simular el transporte y dispersión de contaminantes y sedimentos.

El modelo puede representar todos los mecanismos de transporte presentes en este sistema:

- Advección
- Difusión
- Efectos de oleaje
- Transformación por reacción bioquímica
- Sedimentación

El área de estudio es idéntica a la definida previamente para el modelo hidrodinámico, ya descrito detalladamente. Es decir, se consideró el impacto en la calidad de las aguas para toda la extensión de la ría, además de la boca y la zona externa en mar abierto.

Los parámetros numéricos del modelo *Coherens* se definieron en un todo de acuerdo con aquellos presentados en la implementación hidrodinámica.

Del mismo modo, se respetaron las mismas condiciones de borde, agregándose en este caso las fuentes que representan los distintos vertidos. Para este caso, se cuenta con la base de datos de emisión obtenida de la campaña de monitoreo de efluentes del propio Proyecto. Del mismo modo, previamente se desarrolló un esquema de operación para cada una de las plantas estudiadas, debido a las particularidades de proceso y horarios de cada una. Esto es, las fuentes varían entre ellas, en el tiempo y en el espacio, para cada semana típica de operación.

Además, se adaptó el paso de tiempo de modo tal de respetar las condiciones de estabilidad del esquema de discretización (número de Courant de malla).

Se modelaron aquellos contaminantes de criterio que permiten definir las tendencias principales por grupos específicos:

- Demanda biológica de oxígeno (DBO_5)
- Detergentes (SAAM)
- Grasas y aceites (SSEE)
- Nutrientes: Fósforo (P) y Nitrógeno (N)

La DBO_5 es un indicador del contenido de materia orgánica. Los detergentes y las grasas y aceites constituyen indicadores de la actividad de la industria pesquera, siendo específicamente representativos de sus vertidos, con diferencias importantes entre los casos de procesamiento de merluza y calamar (los dos principales productos en la zona). Los nutrientes son los dos básicos para el crecimiento algal, y pueden aportar información sobre potencial impacto en el ecosistema local.

La simulación del decaimiento de los contaminantes una vez vertidos al cuerpo de agua de la ría, debido a la acción de las reacciones bioquímicas, se simuló mediante cinéticas de primer orden (Tarela et al., 2005).

3.2 Resultados en la situación actual

Los campos de concentración instantánea de DBO_5 permiten observar que el parámetro más representativo del tipo de impacto de los efluentes pesqueros, tiene un alcance local y acotado a las costas de la ciudad de Puerto Deseado, con momentos en los cuales se extiende, sobre la costa, algo más allá de los límites de la ciudad. Se observa inicialmente un impacto localizado sobre la costa, en momentos de cambio de marea. Los campos sucesivos muestran que las plumas cambian de orientación con el cambio de marea, siempre siguiendo la línea de costa y permaneciendo junto a la misma. Las plumas de la noche son más pequeñas y no alcanzan la boca de la ría. Finalmente, a la madrugada el impacto es residual, localizado y de menor envergadura, en función del cese de operaciones previo.

Por cuestiones de límites de tamaño de archivo impuestos por el ENIEF, a continuación solamente se presentan algunas imágenes para el parámetro DBO_5 y distribución en la capa superficial. Por ejemplo, la figura 6 presenta el caso de los valores máximos de DBO_5 obtenidos luego de una simulación dinámica de 1 mes de duración. El modelo muestra que existen áreas costeras localizadas donde se exceden los niveles guía, para este y otros parámetros.

Los análisis mostraron una influencia menor en la componente de viento sudeste como potencial efecto de retención de contaminantes en el interior de la ría, localizando el aumento del impacto únicamente sobre la zona costera.



Figura 6. Campo de concentración máxima de DBO_5 para una simulación de 30 días. Sectores en rojos y amarillos superando los niveles guía.

Las simulaciones dinámicas realizadas permitieron observar que existían 2 franjas costeras (área de 9 plantas y área portuaria donde se instala la décima planta) para las cuales la calidad de las aguas presenta deficiencias. El resto de las costas de la ría, incluyendo la ría interior, permanecen libres de mayores impactos. Del mismo modo, la transferencia de contaminantes y nutrientes a mar abierto, es relativamente baja y no representa un problema de envergadura.

3.3 Alternativas sustentables

En función de los resultados obtenidos, se plantearon alternativas para resolver el problema observado. Básicamente, se estudiaron tecnologías de tratamiento de efluentes líquidos y puntos de vertido, y mediante el uso del modelo se analizaron las respuestas óptimas. Como antecedente inmediato para el planteo de este tipo de estrategias, se puede citar la gestión ambiental de las aguas de la ría de Río Gallegos (Tarela et al., 2008).

De los casos vistos, y en honor a la brevedad, aquí se presentan dos escenarios.

En primer término, la implantación de una planta de pre-tratamiento común a las 10 pesqueras. El objeto de la planta es la captación de sólidos mayores de 1 mm, y la eliminación de flotantes. La descarga se realiza mediante un emisario submarino de 400 metros de longitud, estratégicamente localizado en una zona profunda de flujo máximo (lo cual favorece la mezcla turbulenta de contaminantes), ubicación definida con la ayuda del modelo hidrodinámico. Nótese que en este problema de corrientes complejas, no se sostiene la hipótesis de mezcla vertical completa para este tipo de soluciones, por lo cual se requiere el uso de un modelo 3D para una correcta representación.

A continuación se presentan las plumas de dispersión debidas al funcionamiento del emisario para distintas horas del día y para DBO_5 , representadas aquí como campos instantáneos de sobre-concentración para un día de operación normal de las plantas pesqueras. Los resultados presentados, como antes, corresponden a la capa superficial de agua. Se observa que las plumas penetran la ría y tienden a salir hacia mar abierto siguiendo el ritmo de la marea y alineándose con el eje longitudinal de la ría. Con el comienzo de la marea creciente, el estrechamiento del cuenco hidráulico a la altura de punta Cascajo produce una

separación lateral de flujo y se genera un vórtice de tamaño considerable a la altura de la zona portuaria, donde hay tendencia a la acumulación de contaminantes.

Se observa que el rango de concentraciones está por debajo de 1 mg/l, es decir, por debajo del nivel usual de cuantificación de las técnicas analíticas para este parámetro.

También se han obtenido los campos de concentración máxima de contaminantes para toda la ría, luego del período de simulación dinámica representado (1 mes). La figura 13 permite comprobar que los niveles de concentración alcanzados resultan muy inferiores a los niveles guía de calidad de agua en prácticamente toda la zona representada. La excepción son los puntos aledaños a los difusores del emisario, donde se observan, como es de esperar, las concentraciones máximas. El área (profunda) circundante de los difusores presenta concentraciones locales que exceden los niveles guía de calidad de aguas, como es de esperar, ya que se la considera una zona de sacrificio. Pero en aguas de las capas superficiales se obtienen valores aceptables en prácticamente toda la extensión de la ría.

Así, en el caso de la DBO_5 se aprecia que la zona costera resulta totalmente saneada con el emisario en funcionamiento.

En términos generales, considerando el cuerpo de agua en su conjunto, se puede inferir que el impacto ambiental del emisario es bajo y admisible. Sin embargo, esta solución no respeta los límites legales de vuelco, por lo cual se analizaron otras variantes.



Figura 7. Campo de concentración de DBO₅ para planta de pre-tratamiento y emisario unificados. Hora 10.



Figura 8. Campo de concentración de DBO₅ para planta de pre-tratamiento y emisario unificados. Hora 13.



Figura 9. Campo de concentración de DBO₅ para planta de pre-tratamiento y emisario unificados. Hora 16.



Figura 10. Campo de concentración de DBO₅ para planta de pre-tratamiento y emisario unificados. Hora 19.



Figura 11. Campo de concentración de DBO_5 para planta de pre-tratamiento y emisario unificados. Hora 22.

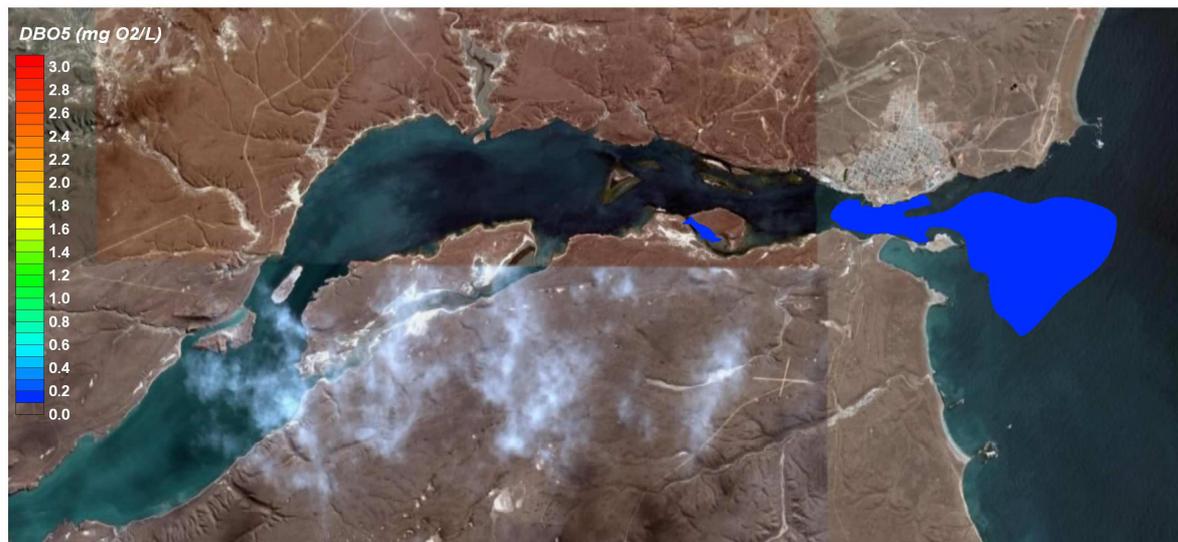


Figura 12. Campo de concentración de DBO_5 para planta de pre-tratamiento y emisario unificados. Hora 01.

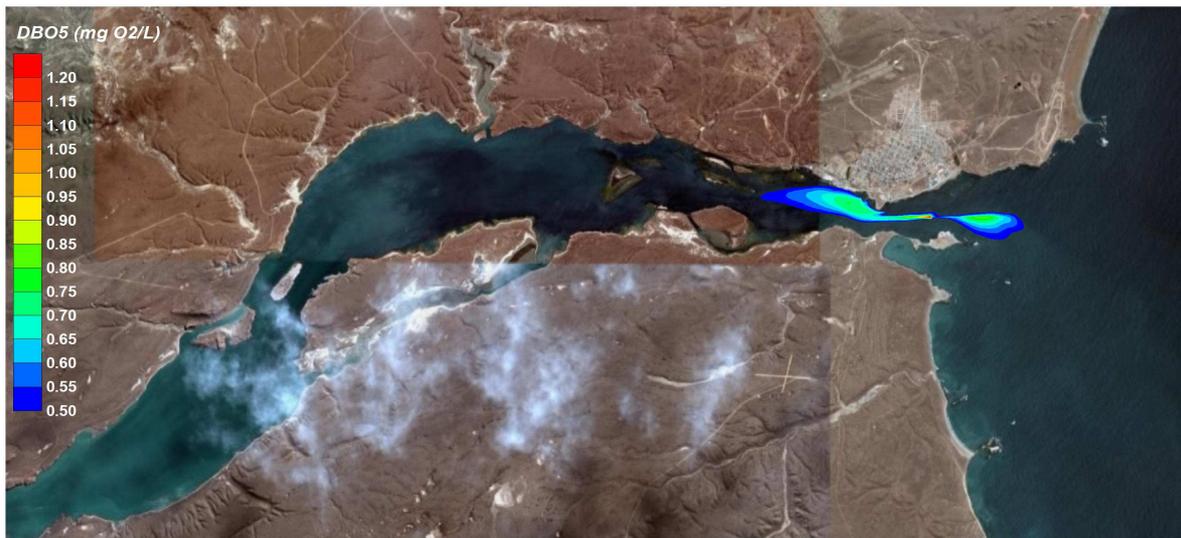


Figura 13. Campo de concentración superficial máxima de DBO₅ para planta de pre-tratamiento y emisario unificados.

El segundo caso presentado corresponde a un tratamiento más integral, mediante aplicación de tecnología físico-química. Para algunos parámetros, mediante esta técnica se podría lograr el cumplimiento de los límites de vertido, aunque como subproducto se obtienen barros a gestionar. La Figura 14 muestra el campo superficial de concentraciones máximas de DBO₅ en este caso, considerando un emisario idéntico al del caso previo, y para una simulación que permite realizar una comparación directa con la planta de pre-tratamiento. Se observa una reducción significativa en la carga orgánica sobre las aguas de la ría. Lo propio ocurre con el resto de los parámetros.



Figura 14. Campo de concentración superficial máxima de DBO₅ para planta de tratamiento físico-químico y emisario unificados.

4 CONCLUSIONES

El uso del modelo como herramienta de gestión, en conjunto con el resto de determinaciones directas e indirectas realizadas, permitió apreciar el alcance actual del impacto por contaminación debido a vuelcos pesqueros, como así también el impacto relativo en la implementación de medidas mitigatorias.

Si bien aquí se presentaron algunos ejemplos, en el proyecto se estudiaron diversas alternativas, para cada una de las cuales se evaluó la performance ambiental mediante las simulaciones numéricas en régimen dinámico. Junto con aspectos normativos y económicos, la evaluación conjunta permite establecer que la sustentabilidad ambiental de la industria pesquera en Puerto Deseado es perfectamente lograda implementando una gestión adecuada, en particular sobre los efluentes líquidos y sobre los residuos sólidos generados por las plantas. Como en muchas situaciones, se plantea un compromiso entre el marco legal, las posibilidades económicas de la industria y la real capacidad de depuración de los medios receptores.

El trabajo presentado muestra un ejemplo más del uso de la mecánica computacional para ayudar a comprender mecanismos físicos complejos y establecer comparaciones cuantitativas en búsqueda de soluciones óptimas.

Para el usuario, el modelo *Coherens* continúa siendo poco amigable, en cuanto a que la totalidad de la información debe ser cargada por software, incluyendo condiciones de borde no previstas originalmente en el modelo, como ser la zona de difusión de los emisarios submarinos. Del mismo modo, el post-procesamiento debe ser realizado fuera del modelo. Al momento de la escritura de este trabajo se está recibiendo una nueva versión actualizada del modelo, cuya performance se espera poder comentar en próximas reuniones ENIEF.

Pero por otro lado, el modelo muestra nuevamente su robustez, especialmente puesta de manifiesto en esta aplicación, en la cual se ha podido validar el mismo para distintos parámetros y en diversas situaciones dinámicas y puntos del recinto de simulación, por comparación directa con datos obtenidos en una boya oceanográfica de última generación.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

El trabajo, en su conjunto, fue financiado por el Proyecto Marino Patagónico PNUD-ARG 02/018 DON 28385 AR.

Los autores desean expresar su agradecimiento, por su colaboración en la realización de los estudios, a las Autoridades del Proyecto Marino Patagónico, Autoridades Provinciales y Municipales, personal de la Base de Prefectura Naval Argentina Puerto Deseado, empresas pesqueras de Puerto Deseado y al Servicio de Hidrografía Naval Argentino.

Especialmente se agradece la colaboración de la Lic. Elbia Coria, (ex) Directora General de Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Ambiental de la Provincia de Santa Cruz.

REFERENCES

- Cabelli, V.J. "Health effects criteria for marine recreational waters", Research Triangle Park, EPA. 98 p., EPA-600/1-80-031 (1984)
- Destuynder, V. y Tarela, P.A., "Modelación de la cuña salina del Río de la Plata", XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba (2002)
- Destuynder, V., "Modelación Hidrodinámica Tridimensional del Río de la Plata", Tesis de Ingeniería para la Universidad de Lyon, Francia, defendida en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Director: Tarela, P.A. (2002)

- JMB, Análisis y Diagnóstico del vertido de Efluentes para la Industria Pesquera, Puerto Deseado, preparado para Proyecto Marino Patagónico (2008)
- Lazure, P. and Dumas, F., “An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)”, *Advances in Water Resources*, Elsevier (2007, in press)
- Luyten P.J., Jones J.E., Proctor R., Tabor A., Tett P. and 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 pp. (1999)
- PNUD Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Proyecto Marino Patagónico ARG 02/018 DON 28385 AR (2008)
- Tarela, P.A. “Sedimentación en embalses: modelación matemática y simulación numérica“, Tesis de Doctorado aprobada por la Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires (2000)
- Tarela, P.A., van Avermaete, F., Calamante, A., Perone, E., Kuriyagawa, M. y Hirai, R., Diseño ambiental del emisario submarino de la ciudad de Río Gallegos (2005)
- Tarela, P.A., Perone, E.A. and van Avermaete, F., Improving the Coastal Environment at the End of the World, COPEDEC VII, Dubai, United Arab Emirates (2008).
- US-EPA, “Ambient Water Quality Criteria for Bacteria: Bacteriological Ambient Water Quality Criteria for Marine and Fresh Recreational Waters”, Office of Research and Development Office of Water Regulations, Washington, D.C. (1986)
- Van Avermaete, F. y Tarela, P.A., “Transporte de sedimentos en el Río de la Plata: uso combinado de modelación numérica e imágenes sensoriales”, Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina (2005)