

EVALUACIÓN DE LAS AGRUPACIONES DE CONCESIONES DE ACUICULTURA IMPLEMENTADAS EN LA INDUSTRIA DEL CULTIVO DEL SALMÓN EN CHILE EN BASE A ZONAS ESTIMADAS POR MODELOS DE TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS

Roberto Riquelme^a, Patricio Campos^b, Alfredo Troncoso^c, Marco Salamanca^c, Marcus Sobarzo^c, Cristian Agurto^d y Luis Bravo^c

^a*Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de Concepción, roberto.riquelme@ing-mat.udec.cl, <http://www.ing-mat.udec.cl/>,*

^b*Programa de Doctorado en Acuicultura, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*

^c*Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción*

^d*Centro de Biotecnología, Universidad de Concepción*

Palabras Clave: Modelo Hidrodinámico, Trayectoria de Partículas, Epidemiología, Salmonicultura, derivadores numéricos, excursión de marea.

Resumen. Estudios epidemiológicos realizados en Noruega, Escocia y Canadá indican que el virus de la anemia infecciosa (ISA) es transmitido vía salmones infectados, residuos y/o efluentes de procesamiento. Los patrones de ocurrencia del ISA sugieren que hay transporte por vectores a gran escala como también transporte pasivo a pequeña escala a través del agua de mar. Noruega, Escocia y Canadá han implementado zonas de control y vigilancia definidas hidrológicamente para reducir el potencial de transporte del virus ISA a través del agua. En Chile en 2009, se establecieron Áreas de Manejo Sanitario en atención a las características epidemiológicas, oceanográficas, operativas y geográficas que justifiquen su manejo sanitario coordinado. El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia entre sitios de cultivo basado en el desplazamiento de derivadores numéricos, compararlos con zonas de control basadas en la excursión de marea, y evaluar las Áreas de Manejo de Bahías en el canal Caucahue, Isla de Chiloé, Chile. Se generan zonas de excursión de mareas usando un modelo tri-dimensional (3D) de circulación y seguimiento de trayectoria de partículas y se evalúa la superposición entre sitios de cultivo de salmónidos, zonas de control y Agrupación de Concesiones de Acuicultura en el área de Quemchi, Chiloé. El modelo es una adaptación del modelo QUODDY y tiene las siguientes propiedades: actualización implícita o explícita del tiempo, no lineal, tridimensional, pronóstico en la temperatura y la salinidad, avanzado sistema de turbulencia, superficie libre y varias posibles superficies o condiciones de frontera laterales de océanos. Predice en un 80% trayectorias de derivadores reales y pone en evidencia la amplia superposición de las trayectorias de derivadores numéricos con los sitios de cultivo y el desplazamiento fuera de los límites de la Agrupación de Concesiones de Acuicultura analizadas.

1 INTRODUCCIÓN

En 2007 Chile concentraba el 31% de la producción mundial de salmón cultivado (Iizuka y Katz, 2011). Sin embargo, en julio de 2007 se confirma la aparición del primer caso de virus ISA en el sur de Chile, iniciándose una fuerte caída en la producción de salmón y un fuerte impacto negativo en la economía basada en esta industria.

Investigaciones realizadas en brotes de ISA en Chile, (Mardones et al., 2009) y Noruega, (Lyngstad et al., 2008), concuerdan que el inicio de la enfermedad es lento para luego propagarse con un comportamiento epidémico alrededor del foco inicial. La dinámica de agrupamiento en torno al foco inicial hace suponer la transmisión pasiva del virus entre centros de producción cercanos, siendo entonces una variable importante la proximidad (distancia) entre ellos. La tasa de decaimiento (sobrevida y viabilidad) de las partículas virales en el ambiente acuático depende fuertemente de las características del agua donde se encuentra el virus, principalmente salinidad y temperatura. Aun así, diversos estudios concuerdan que la supervivencia infectante del virus es cercana a 12 horas o un ciclo de mareas completo (Salama y Murray 2009; Lovdal y Enger 2002).

Las corrientes oceánicas dispersan y transportan las partículas virales en los cursos de agua circundantes y posiblemente transmiten la enfermedad a otros centros de cultivo de peces en el área. Las rutas seguidas, las distancias recorridas y la extensión temporal del transporte vía acuática de los patógenos, dependen de las corrientes oceánicas (Beattie et al. 2005; Ellis et al. 2005; Stucchi, et al. 2005). La pertinencia y eficacia de la zonificación de las Áreas Aptas para la Acuicultura debe ser apoyada y confirmada por estudios oceanográficos y, en especial, la generación de modelos hidrodinámicos 3D adaptados para las distintas zonas costeras que permitan simular distintas situaciones forzantes.

La simulación de la trayectoria de partículas basada en modelos de circulación numérica son herramientas útiles para investigar el rol del movimiento del agua en el transporte y dispersión de patógenos. La simulación facilita una estimación de las distancias a las que son transportadas las partículas desde sus fuentes, las rutas de desplazamiento de las partículas y una historia cronológica de las posiciones de las partículas (Stucchi et al. 2005; Murray 2003). Noruega, Escocia y Canadá han implementado Zonas de Control definidas hidrológicamente para reducir el potencial de transporte del virus ISA a través del agua. Dentro de las Zonas de Control, alrededor de los sitios infectados, hay requerimientos de descanso y desinfección de los sitios de cultivo, restricciones sobre la transferencia de peces y una creciente vigilancia de la salud de los peces. En Chile, el Servicio Nacional de Pesca estableció Áreas de Manejo Sanitario para el manejo del ISA. Chang et al. (2005) utilizaron explícitamente estimaciones de rutas de excursión de mareas como agentes del transporte de enfermedades en un análisis de factores riesgo asociados con brotes de ISA en New Brunswick, Canadá, usando un modelo tridimensional de seguimiento de partículas adaptado para el área de estudio. El modelo estima las corrientes de marea dividiendo el área geográfica en triángulos (elementos finitos) y mediante la solución numérica de ecuaciones de movimiento en cada punto x , y , z , t de la grilla.

Por otro lado, Stucchi et al (2005), usaron un modelo bidimensional (TIDE2D) de frecuencia de elementos de dominio finito para calcular las corrientes de marea, junto con un modelo 3D (TIDE3D), un método de elementos finitos armónicos usado para calcular las corrientes de flotabilidad diagnóstica 3D o campos de flujo medio (Z_0) que surgen de una densidad específica para la región. Las simulaciones de las trayectorias de partículas fueron llevadas a cabo con una versión modificada del programa DROG3D distribuido por el grupo de modelación de Quoddy.

Murray et al. (2005), usaron un modelo acoplado más sofisticado en el fiordo de Torridon, Escocia. El modelo está basado en el modelo GF8 del estuario Saint Lawrence y ajustado para la batimetría local. El modelo de seguimiento de partículas toma las salidas del modelo hidrodinámico e interpola la posición exacta de las partículas, usando una ponderación del inverso del cuadrado.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia entre sitios de cultivo basado en el desplazamiento de derivadores numéricos, compararlos con zonas de control basadas en la excursión de marea, y evaluar las Áreas de Manejo de Bahías en el canal Caucahue, Isla de Chiloé, Chile. Para esto, se generan zonas de excursión de mareas usando un modelo 3D de circulación y seguimiento de trayectoria de partículas y se evalúa la superposición entre sitios de cultivo de salmónidos, zonas de control y Agrupación de Concesiones de Acuicultura en el área de Quemchi, Chiloé.

2 METODOLOGÍA

En esta sección se muestra la metodología empleada en este trabajo.

2.1 Área de Estudio

Los estudios y simulaciones se desarrollaron en una zona de cultivo de salmónes en el canal Caucahue, Isla de Chiloé, Región de Los Lagos, Chile (Figura 1).

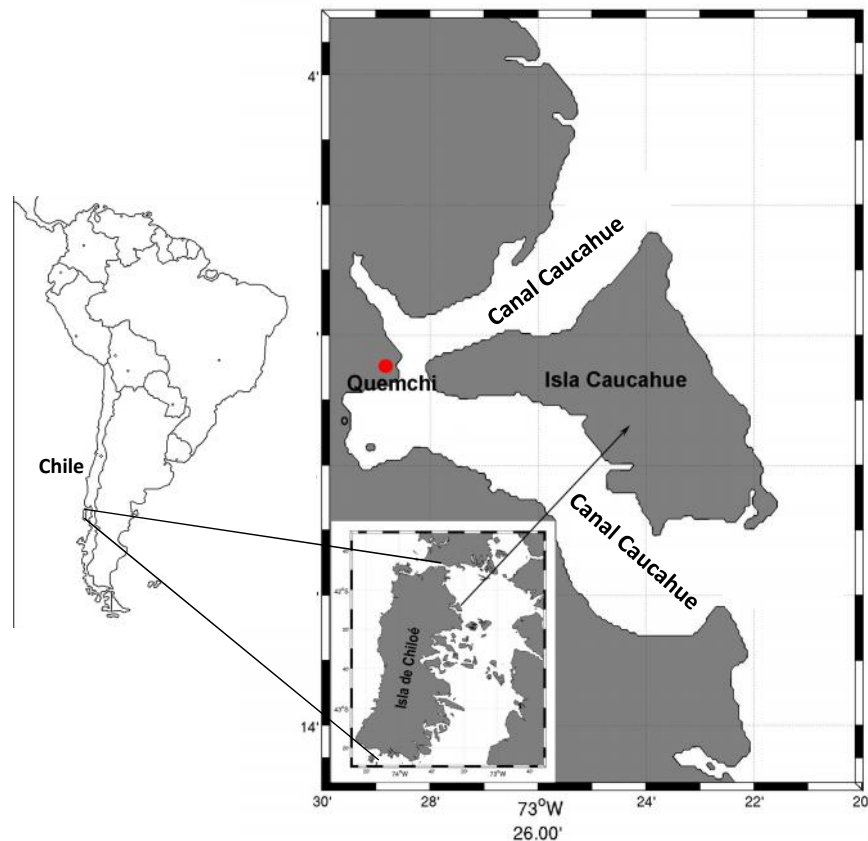


Figura 1: Área de estudio: Canal Caucahue (Quemchi) Isla de Chiloé, Chile.

2.2 Estudios oceanográficos y correntometría lagrangiana

Con el objetivo de obtener información para alimentar y adaptar el modelo (afinar) a las condiciones locales, se realizaron tres cruceros para el estudio de la dinámica de las corrientes marinas y la estructura hidrográfica del canal Caucahué. Junto a esto se realizaron mediciones hidrográficas de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. Los estudios de corriente lagrangianas se realizaron en las mismas fechas que los cruceros oceanográficos y en tres periodos complementarios, todos durante periodos de mareas de sicigias. Para esto se utilizaron seis derivadores implementados con GPS tipo DataLogger (GLOBALSAT DG-100) que permitieron una autonomía y precisión del seguimiento de sus trayectorias reales para validar las salidas del modelo posteriormente.

2.3 Modelo hidrodinámico 3D

Se hicieron estimaciones de las excursiones de marea alrededor de los sitios de cultivo usando un Modelo 3D de seguimiento de partículas adaptado para el área de estudio. El modelo es programado en ambiente MATLAB basado en las ecuaciones de conservación de momento, conservación de la masa, transporte de temperatura, difusión para la salinidad y de estado para la densidad, a las cuales se les aplica el efecto de Coriolis, aproximación de Bousinesq y la aproximación hidrostática; después se agrega la ecuación de dispersión.

En la resolución del modelo se aplica una transformación sigma coordenada y se utiliza el método de diferencias finitas sobre C-grid de Arakawa.

El modelo estima las corrientes de marea dividiendo el área geográfica en rectángulo (volúmenes finitos) y mediante la solución numérica de ecuaciones de movimiento en cada punto x , y , z , t de la grilla. Se calcula un perfil de profundidad de las corrientes en cada esquina de cada rectángulo cada 36 segundos.

Para la validación del modelo en las regiones de estudio, se comparó las salidas de derivadores numéricos con derivadores reales y se midió el error obtenido.

Para obtener el valor del error se definieron dos errores y el error final es el máximo de estos errores, a saber sean: coordenada del derivador real en el tiempo, coordenada del derivador numérico en el tiempo, el camino recorrido del derivador real en el tiempo y el camino recorrido del derivador numérico en el tiempo.

2.4 Simulaciones de trayectorias de derivadores numéricos

Las 'partículas' o derivadores numéricos, son pasivos y con flotabilidad neutra y son transportados a través de la grilla del modelo por las corrientes calculadas. Para el canal Caucahué se simuló la liberación de un total de 3.492 derivadores numéricos, lanzados desde 291 puntos de la siguiente forma: 291 derivadores numéricos en el instante $t=0$, 291 derivadores en el instante $t=1$ hora, y así sucesivamente hasta completar 11 horas. Todos los derivadores fueron seguidos hasta transcurridos un tiempo de 24 horas desde la liberación inicial. Se utilizó una grilla de 130 x 130 m.

Las coordenadas de lanzamiento de los derivadores numéricos corresponden a los nodos de una grilla de líneas separadas por 60 m y dibujada sobre los módulos de cultivo de las concesiones de acuicultura, buscando abarcar la zona cubierta desde la línea de flotadores que delimita los módulos de cultivo. Estos derivadores modelados fueron liberados y mantenidas a 1 m bajo la superficie del mar. La posición de cada derivador numérico se registró cada 36 segundos durante las 24 horas (aproximadamente dos ciclos de marea, 12,42 x 2 horas). Algunos derivadores numéricos fueron seguidos por un tiempo menos a 24 horas, debido a que sus trayectorias impactaban en la costa.

Para delimitar el área geográfica cubierta por una excursión de marea, se dibujó los límites de las trayectorias de los todos derivadores numéricos liberados desde los nodos elegidos dentro del área cubierta por el módulo de cultivo cada una hora durante el período de 24 horas.

Se esquematizó en Autocad las superposiciones de cada área de excursión de marea derivada del modelo con los sitios de cultivo, las áreas concéntricas alrededor de cada sitio de cultivo y los límites de las Agrupaciones de Concesiones de Acuiculturas definidas por la Subpesca.

3 RESULTADOS

A continuación presentaremos los resultados obtenidos.

3.1 Modelo hidrodinámico y de transporte

El modelo que aquí se presenta es la adaptación del modelo QUODDY (Greenberg et al., 2005) que se ha aplicado en varios estudios (Werner et al., 1993; Lynch et al., 1996; Lynch et al., 1997; Lynch and Werner, 1997). El modelo tiene las siguientes propiedades: actualización implícita o explícita del tiempo, no lineal, tridimensional, pronóstico en la temperatura y la salinidad, avanzado sistema de turbulencia (Mellor y Yamada, 1982), superficie libre y varias posibles superficies o condiciones de frontera laterales de océanos.

Un fluido considerado como medio continuo puede ser descrito a través de las ecuaciones de conservación de masa, de momento y de la energía. La conservación de la masa se expresa mediante la ecuación de continuidad.

Además estas ecuaciones se simplifican asumiendo las hipótesis de aproximación hidrostática y aproximación de Boussinesq.

Entenderemos por **aproximación hidrostática**: como en el océano los fenómenos a escala horizontal son mucho mayores que las verticales, es factible pensar que las aceleraciones verticales son pequeñas respecto a los otros términos que intervienen (en dirección vertical) en la ecuación de momento. En realidad, y analizando los órdenes de magnitud, los dos únicos términos que contribuyen son la presión y la gravedad. Con esto, esta ecuación queda reducida al balance hidrostático de las fuerzas

$$\dots g = -\frac{\partial P}{\partial z}, \quad (1)$$

es decir, el peso del fluido balancea idénticamente la presión.

Entenderemos por **Aproximación de Boussinesq**: las aceleraciones del flujo son menores que las de la gravedad y por tanto las variaciones de la densidad sólo son importantes cuando afectan a los términos gravitatorios y no a los de inercia. En resumen, las diferencias de densidad son desconsideradas a menos que sean multiplicadas por la gravedad.

A continuación daremos una leve descripción del modelo que se plantea, para lo cual usaremos las notaciones dadas en la Tabla 1.

$t(x, y, z)$	altura del agua superficial (diferencias en el nivel del mar debido a las variaciones horizontales)
$h(x, y)$	profundidad del nivel agua sin tomar en cuenta las variaciones horizontales (no depende del tiempo)
$H(x, y, t)$	profundidad total
$v(x, y, z, t)$	velocidad tridimensional

$\bar{v}(x, y, t)$	velocidad promedio en profundidad
$F_m(x, y, t)$	velocidad en la superficie
$F_m(x, y, t)$	momento horizontal no-advectivo
$F_T(x, y, t)$	calor horizontal no-advectivo
$F_S(x, y, t)$	salinidad horizontal no-advectivo
$N(x, y, z, t)$	viscosidad vertical turbulenta
$\dots(x, y, z, t)$	densidad del agua
\dots_0	valor de referencia de densidad del agua
$\mathbb{E}(x, y, t)$	tensión del viento
\dagger_0	constantes numéricas para conservación de masa
f	coriolis
g	constante de gravedad
C_d	coeficiente de arrastre de tensión superficial
$\nabla(\nabla_{xy})$	operador gradiente (horizontal)

Tabla 1: Notaciones utilizadas en el modelo.

Consideremos las dos componentes horizontales de la ecuación del momento

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v + f \times v + g \nabla_{xy} \zeta - \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{g}{\dots_0} \int_z^{\zeta} \nabla_{xy} \dots dz + F \quad (2)$$

las ecuaciones de conservación de temperatura y salinidad

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla S = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (4)$$

donde T corresponde a temperatura, S es la salinidad, K_H es la difusividad vertical del remolino.

En casos donde ocurren un número limitado de fenómenos físicos puede utilizarse un modelo más simple, sin embargo cuando se tienen modelos de áreas donde son importantes la estratificación y el forzamiento de la marea, se necesita al menos la complejidad de un modelo Mellor Yamada (Mellor and Yamada, 1982) de 2 1/2 niveles, el cual es conocido en la literatura como “esquema cerrado Mellor-Yamada de 2 1/2 niveles”. El cual evalúa los coeficientes de viscosidad vertical y difusividad vertical relacionando el producto de una escala de velocidad turbulenta y una longitud de turbulencia a macroescala, l conocida. Esta escala de velocidad es tomada como la raíz cuadrada de la energía cinética turbulenta, $q^2/2$. El submodelo de turbulencia es representado por dos ecuaciones de transporte para q^2 y $q^2 l$.

Así, las ecuaciones correspondientes, con las modificaciones debido a Galperin et al. (1988), para la energía cinética turbulenta y la turbulencia a macro escala, en coordenadas cartesianas están dada por

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla q^2 = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\dots_0} K_H \frac{\partial \dots}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} \quad (5)$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla q^2 l = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + l E_1 K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\dots_0} K_H \frac{\partial \dots}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} \quad (6)$$

donde E_1 y B_1 son constantes experimentales y el termino \tilde{W} determina lo que es llamado función de proximidad de pared la cual asegura que la solución tienda a las formas de las capas de contorno cercanas a las fronteras (superficie y fondo).

Tomando el número de Richarson

$$G_H = \frac{l^2 g}{q^2 \dots_0} \left[\frac{\partial \dots}{\partial z} \right] \quad (7)$$

se definen las funciones estabilidad, S_H y S_M , como

$$S_H \left[1 - (3A_2 B_2 + 18A_1 A_2) G_H \right] = A_2 \left[1 - 6 \frac{A_1}{B_1} \right] \quad (8)$$

$$S_M \left[1 - 9A_1 A_2 G_H \right] - S_H \left[(18A_1^2 + 9A_1 A_2) G_H \right] = A_1 \left[1 - 3C_1 - 6 \frac{A_1}{B_1} \right] \quad (9)$$

donde valores empíricos en las expresiones anteriores especificados en Mellor and Yamada (1982) son $A_1=0.92$; $A_2=0.74$; $B_1=16.6$; $B_2=10.1$; $C_1=0.08$; $E_1=1.8$.

Además, se tiene que

$$K_M = l q S_M \quad (10)$$

$$K_H = l q S_H \quad (11)$$

$$K_q = l q S_q, \quad (12)$$

donde S_q es una constante de estabilidad.

Una ventaja del actual modelo es que los coeficientes de intercambio turbulentos y el componente vertical de la energía cinética turbulenta dependen solamente de G_H , Mellor and Yamada (1982). Con lo cual, las funciones de estabilidad inhiben la turbulencia con el aumento de estratificaciones estables.

Para modelar la turbulencia horizontal hay que considerar que, debido a que la escala de los fenómenos estudiados es mayor en dirección horizontal que vertical, la discretización espacial es menos fina horizontal que verticalmente. Por lo tanto, en las ecuaciones (3) y (4) los términos F_x , F_y ($F = (F_x, F_y)$), F_T y F_S representan efectos de la corriente que se manifiestan

a una escala menor y no pueden ser resueltos directamente por la malla adoptada. Estos procesos son conocidos como procesos a escala sub-celda, y se parametrizan considerando términos de viscosidad/difusividad horizontal y vertical.

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (13)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_M \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (14)$$

$$F_T = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (15)$$

$$F_S = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial S}{\partial y} \right). \quad (16)$$

Generalmente en problemas de aplicación oceanográfica los factores de difusividad horizontal, A_H , y viscosidad horizontal, A_M , son calculados de acuerdo a Smagorinsky (1963), a saber,

$$A_H = C_H \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$A_M = C_M \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (18)$$

Donde C_M , C_H se les denomina parámetro de Horcon y corresponden a los coeficientes horizontales adimensionales de viscosidad y difusividad turbulenta, respectivamente.

Se utilizan valores para estos parámetros, C_H y C_M , en el rango 0.10 a 0.20 (Mellor 1996), pero, si el espaciamiento de la malla es muy pequeña C_H y C_M pueden ser nulos. Una ventaja de utilizar la formulación de Smagorinsky es que C_H y C_M son adimensionales; lo que hace que A_M decrezca mientras a medida que la resolución mejora y que A_M sea pequeño si el gradiente velocidad es pequeño.

En coordenadas cartesianas, la ecuación de onda, de la cual se determina la elevación, χ es

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} + \ddagger_0 \frac{\partial \chi}{\partial t} - \nabla_{xy} \cdot \left[-v \Big|_{z=\chi} \frac{\partial \chi}{\partial t} + \int_{-h}^{\chi} \left[v \cdot \nabla v + \frac{g}{\dots_0} \int_z^{\chi} \nabla_{xy} \dots dz' - F \right] dz \right. \\ \left. + gH \nabla_{xy} \chi + f \times H \bar{v} - \ddagger_0 H \bar{v} - H \Psi + C_d |v_b| v_b \right] = 0. \quad (19)$$

Del modelo hidrodinámico se predicen las corrientes que son usadas para calcular el movimiento de las partículas a partir de un modelo de transporte. A partir de la velocidad en un punto dado se usa para establecer el movimiento de una partícula en un tiempo dado.

Para el transporte de partículas actualmente se usan varios modelos, muchos de ellos estocásticos, los cuales son implementados numéricamente en clúster, lo cual en este momento no podríamos implementarlos.

Un modelo muy usado para determinar el transporte de partículas y está basado en estimar la velocidad Euleriana usando una técnica Lagrangeana (Forrester 1973; Hunter 1987). Esta técnica consiste que al comienzo de cada paso de tiempo a partir de la posición y velocidad ya calculada se predice una nueva posición, la nueva posición es predicha por

$$d(t + \Delta t) = dt + \Delta t v(t). \quad (20)$$

Para disminuir los errores de desplazamientos generados, la velocidad de la posición proyectada es promediada con la velocidad de la posición inicial, es decir,

$$d(t + \Delta t) = dt + \frac{\Delta t}{2} [v(t) + v(t + \Delta t)]. \quad (21)$$

Este proceso se itera hasta que el promedio de las velocidades cambie menos de 0.1 cm. Este esquema es estable para

$$dt < \frac{2}{\max \left\{ \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right|, \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right| \right\}}. \quad (22)$$

3.2 Supuestos y validación del modelo hidrodinámico

De acuerdo con los principales resultados de los estudios oceanográficos, el canal Caucahué corresponde a un ambiente costero dominado por la influencia de corrientes de mareas semidiurnas (período: 12,42 horas) y por mareas quincenales. Además, las corrientes se encuentran predominantemente alineadas con el eje principal del canal y la estructura media de las corrientes muestra un flujo de dos capas. La influencia del viento sobre las corrientes fue de menor importancia frente a la influencia de las mareas. En general, ninguna de las componentes de la corriente total mostró mayor relación con el viento local.

El registro de la altura de marea en el canal Caucahué, corresponden a semidiurnas y hay una clara alternancia de periodos de sicigia y cuadratura. Del análisis de armónicos de las series de alturas del nivel del mar, las de mayor importancia fueron O1, K1, N2, M2 y S2, las cuales en conjunto contienen porcentajes mayores a 78 de la energía total de la onda de marea en las dos series de tiempo analizadas.

Por lo tanto, el modelo se ajustó para predecir la trayectoria de derivadores numéricos lanzados durante la estación de otoño-invierno, incorporando como forzante principal la marea.

Para la validación del modelo hidrodinámico 3D, se usó las trayectorias de derivadores lanzados entre 0-5 m en la campaña de otoño de 2011. Se comparó las salidas de los derivadores numéricos con las trayectorias de los derivadores reales y se midió el error obtenido; este fue menor a 23%.

3.3 Simulaciones de trayectorias de derivadores numéricos

La zona cubierta por las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde los tres módulos de cultivo de la concesión ubicada al norte del canal Caucahué (Figura 2a), forman un perímetro que se va ensanchando en su desplazamiento hacia el exterior del canal Caucahué abandonándolo por su boca norte (punta Morro Lobos). No se observa una excursión significativa hacia el interior o sur del canal.

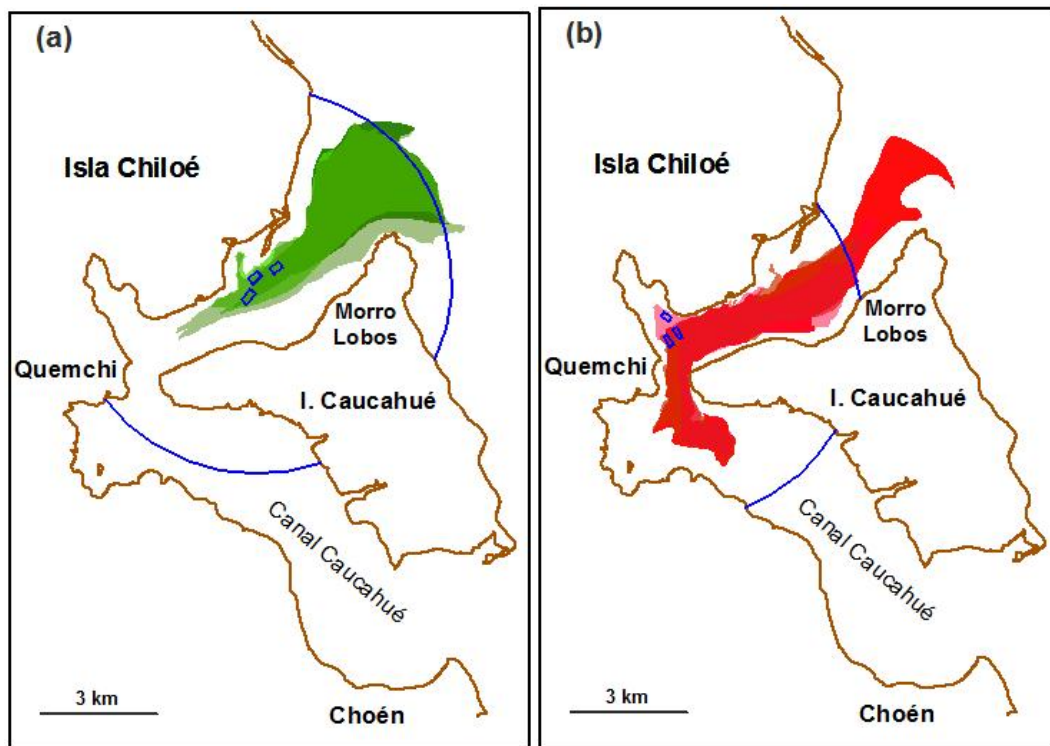


Figura 2: Área de las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde a) tres módulos de la concesión de cultivo de salmónidos N° 1 (Punta Arena) y b) tres módulos de la concesión de cultivo de salmónidos N° 2 (Tubildad) del Canal Caucahué y su relación con una Zona de Control de radio igual a 5 km (en azul)

La zona cubierta por las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde los tres módulos de cultivo de la concesión ubicada en la parte central del canal, forma un perímetro que se incursiona hacia el sur del canal Caucahué sobrepasando la bahía de Quemchi (Figura 2b). Hacia el norte del canal los derivadores numéricos se desplazan relativamente más que hacia el sur, abandonando el canal Caucahué los derivadores numéricos lanzados desde el módulo de cultivo ubicado más hacia el exterior de la ensenada de Tubildad.

Al comparar la superposición de las zonas de excursión de mareas estimadas por el modelo hidrodinámico con las Zonas de Control de 5 km de radio (Figura 2a y 2c) se observa ambos límites de sus zonas de excursión de marea sobrepasan los límites de Zona de Control de 5 km de radio, por la boca norte del canal de Caucahué.

Las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde los dos módulos de cultivo de la concesión ubicada en la parte centro sur del canal (Figura 3c), se desplazan hacia el sur desde su zona de lanzamiento. Sin embargo, dentro de las 24 horas de seguimiento, los derivadores no abandonan el canal Caucahué y la zona de influencia tiene una forma alargada y paralela a la costa. En ambos casos, los derivadores numéricos no traspasan los límites de la Zona de Control de 5 km de radio.

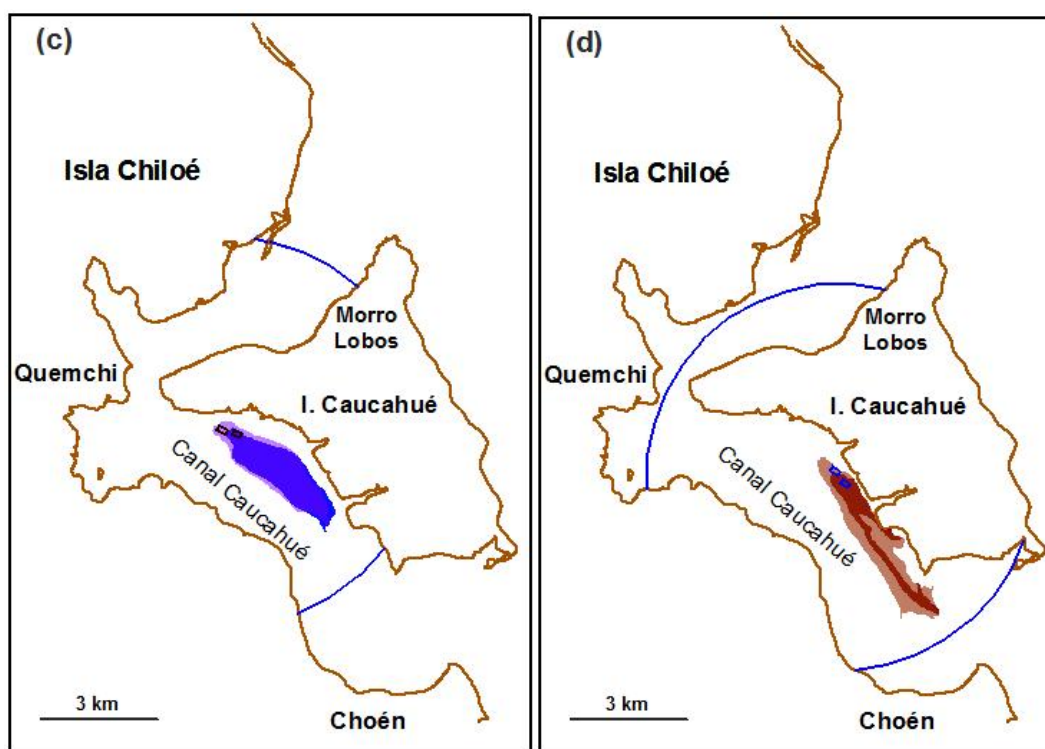


Figura 3: Área de las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde c) dos módulos de la concesión de cultivo de salmónidos Pillihue y d) dos módulos de la concesión de cultivo de salmónidos Curbitas en el Canal Caucahué y su relación con una Zona de Control de radio igual a 5 km (en azul)

Las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde los dos módulos de cultivo de la concesión ubicada en la concesión Curbita, se desplazan hacia el sur desde su zona de lanzamiento (Figura 3d), acercándose a la boca sur del canal Caucahué. La forma de las trayectorias de los derivadores seguidos durante las 24 horas de modelación es alargada y aunque no abandonan el canal Caucahué, su límite sur se acerca a la boca del canal.

Las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde los dos módulos de cultivo de la concesión Cheñique, se desplazan hacia el sur desde su zona de lanzamiento (Figura 4e) siguiendo la línea de costa, pero sin abandonar el canal Caucahué.

Las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde los dos módulos de cultivo de la concesión Choén, muestran un desplazamiento neto hacia el sur de su zona de lanzamiento (Figura 4f), abandonando el canal Caucahué por su boca sur, siguiendo la línea de costa.

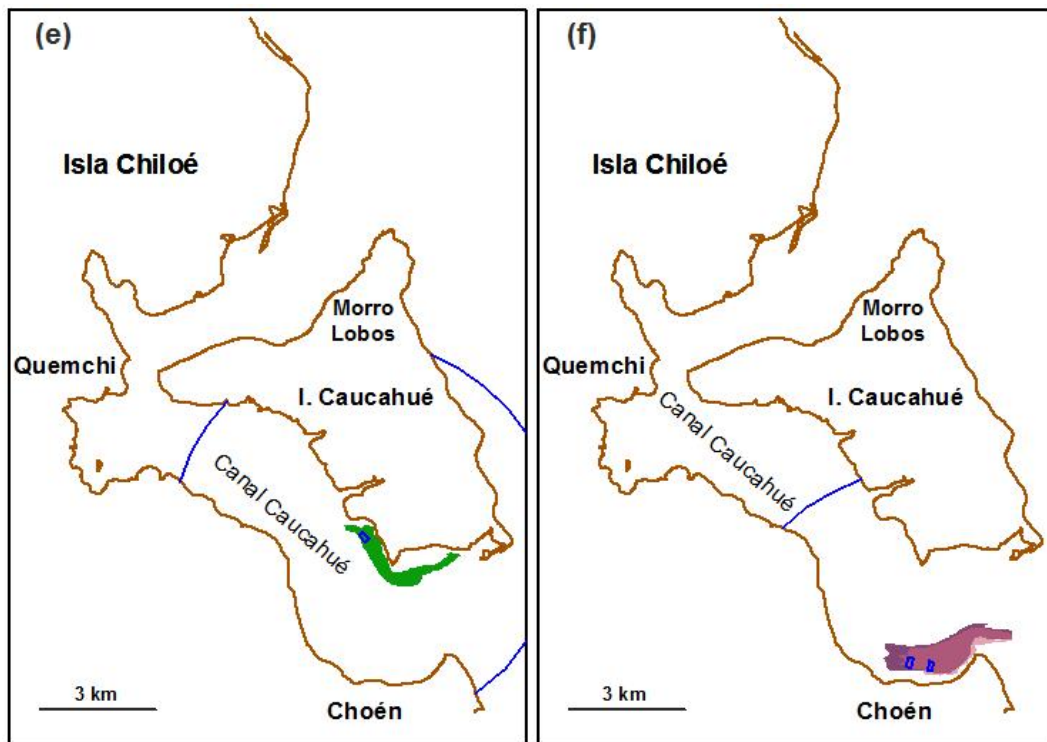


Figura 4 Área de las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados desde e) el módulo único de la concesión de cultivo de salmónidos Cheñique y f) los dos módulos de la concesión de cultivo de salmónidos Choén del Canal Caucahué y su relación con una Zona de Control de radio igual a 5 km (en azul).

En la Figura 5 se muestra la superposición de todas las excursiones de marea estimadas por el modelo hidrodinámico con la Agrupación de Concesiones de Acuicultura (ACA) N° 7. En esta se puede observar que hay un claro desplazamiento de las trayectorias de los derivadores numéricos hacia fuera de los límites de la ACA N°7 por el norte del canal Caucahué. Las aguas que dejan el ACA N°7, según el modelo, son las provenientes de las concesiones Punta Arena y Tubildad. Para el caso de las concesiones ubicadas en la parte sur del canal Caucahué, las excursiones de marea (o trayectorias de derivadores numéricos estimadas por el modelo) no traspasan los límites de la ACA N°7 establecida por la Subsecretaría de Pesca (Subpesca).

Por otro lado, dentro de las 24 horas de modelación de las trayectorias de los derivadores, se observa que no hay superposición entre las excursiones de marea de las concesiones ubicadas al norte del canal con concesiones ubicadas en la parte sur del canal. De igual modo, no hay mezclas de trayectorias entre los grupos de concesiones ubicadas al sur de canal.

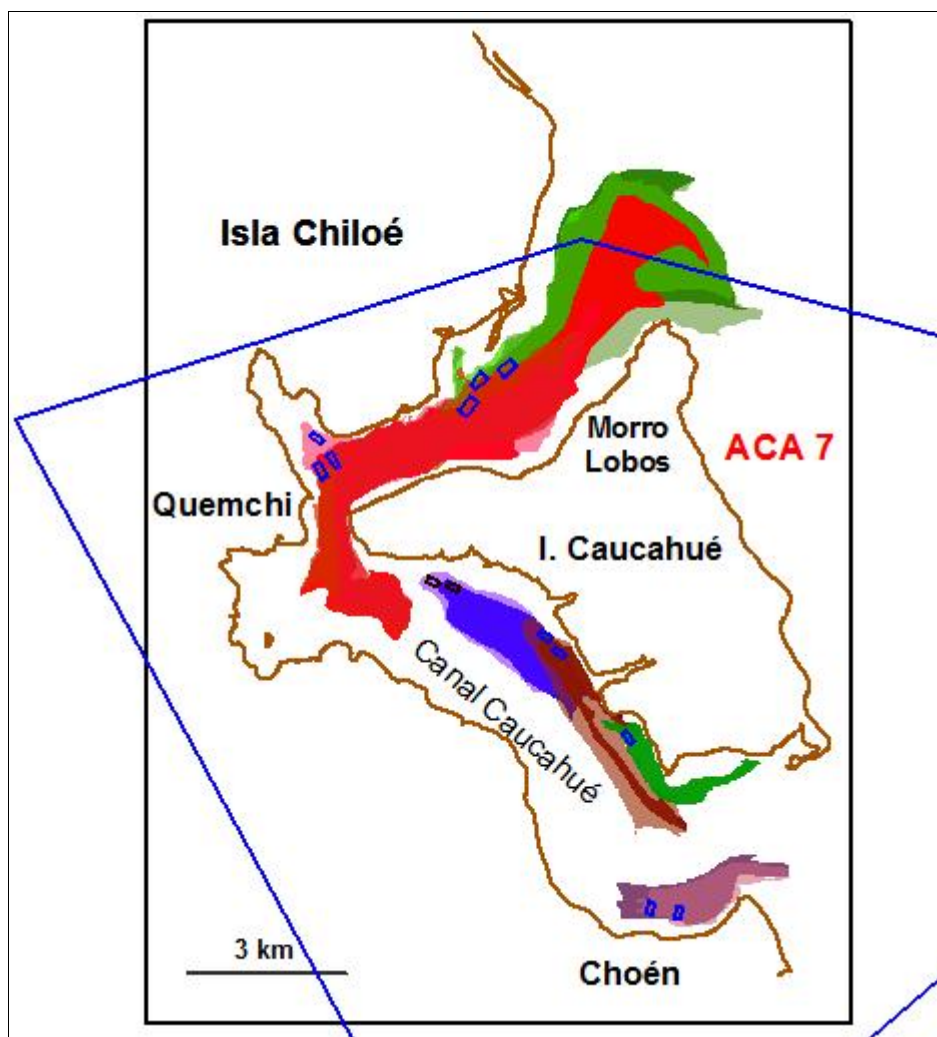


Figura 5: Superposición del área cubierta por las excursiones de marea estimadas por el modelo con la Agrupación de Concesiones de Acuicultura N° 7 definida por la Subsecretaría de Pesca (en azul)

4 CONCLUSIONES

Las trayectorias de los derivadores numéricos se superponen a la mayor parte de las Zonas de Control (5 km de radio alrededor de los sitios de cultivo), por lo que estas no constituirían medidas de gestión sanitaria efectivas en el área analizada. En relación con las Zonas de Vigilancia definidas por Subpesca (Agrupaciones de Concesiones de Acuicultura) los derivadores numéricos describen trayectorias que alcanzan entre 7 y 16 km a lo largo del canal Caucahué, y, en algunos casos, abandonan el canal por la boca norte o sur fuera de la ACA N° 7. Dentro de un periodo de 24 horas un derivador numérico podría penetrar en otras Agrupaciones de Concesiones de Acuicultura adyacentes.

La simulación del comportamiento de derivadores numéricos lanzados bajo condiciones de marea extrema, es decir, el peor escenario desde el punto de vista de las mareas, y seguidos durante 24 horas (2 ciclos de marea), permitió estimar las excursiones de marea bajo estas condiciones para las concesiones de cultivo de salmónidos que operan en el canal Caucahué.

La zona cubierta por las trayectorias de los derivadores numéricos lanzados en la parte norte del canal Caucahué (Figura 2 a) muestra una tendencia a abandonar el canal por su boca norte y traspasar los límites de su Zona de Control de 5 km de radio. Su forma más o menos elíptica y

movimiento neto hacia el norte de su zona de lanzamiento, indican que la zona de resguardo sanitario debería buscar proteger la parte norte y no suponer una zona circular de influencia. Sin embargo, el mayor desplazamiento es de aproximadamente 5,1 a 5,7 km, pero se debe tener en cuenta que el tiempo de seguimiento de los derivadores numéricos fue de 24 horas, por lo que podría ocurrir un mayor desplazamiento fuera de los límites fijados. En relación con la Agrupación de Concesiones de Acuicultura N° 7, el modelo indica que esta excursión de marea también traspasa los límites de ésta.

Similar situación se observa con las excursiones de marea simuladas para la concesión ubicada más al interior del canal (Figura 2 b), cuyas aguas abandonarían una eventual Zona de Control de 5 km por la parte norte del canal. Sin embargo, a diferencia de las concesiones ubicadas más al norte, aquí se observa una mayor incursión hacia el sur del canal, lo que estaría indicando que un centro de cultivo ubicado en ese sector influenciará zonas tanto hacia el norte como también al sur.

Las excursiones de marea de las concesiones de cultivo ubicadas en la parte central del canal (Figuras 3 c y d), no traspasan los límites de una Zona de Control de 5 km, ni abandonan los límites de la ACA 7.

Al superponer todas la excursiones de marea obtenidas del lanzamiento de derivadores numéricos, se puede constatar la existencia de 3 grandes zonas, cuyos límites no se superponen (Figura 5). Esta información es relevante para un manejo más detallado de las medidas de bioseguridad, puesto que permite focalizar las precauciones en los sitios de cultivo ubicados más al norte. Sin embargo, se debe tener en consideración que esta es una situación resultante de un seguimiento de los derivadores durante 24 horas. Si se modela para un mayor periodo podrían cambiar estos límites. De igual modo, en situación no extrema, por ejemplo en periodos de cuadratura, los límites de estos sitios de cultivo podrían estar aún más separados. Además, las distancias recorridas por los derivadores numéricos desde los sitios de liberación, las rutas tomadas y el grado de dispersión, son sitio específicas (Stucchi, 2005).

La simulación de la trayectoria de partículas basada en modelos de circulación numérica son herramientas útiles para investigar el rol del movimiento del agua en el transporte y dispersión de patógenos. La simulación facilita una estimación de las distancias a las que fueron transportadas las partículas desde sus fuentes, las rutas de desplazamiento de las partículas y una historia cronológica de las posiciones de las partículas (Stucchi *et. al* 2005; Murray 2003).

Los modelos de circulación numérica están basados en supuestos y estimaciones simplificadas. En algunos casos los datos usados para forzar el modelo son limitados (Stucchi *et. al.* 2005; Chang, 2005). En consecuencia, la interpretación de las simulaciones de trayectorias de partículas debe tomar en consideración dichas limitaciones e incertidumbres.

Como conclusión general, las trayectorias de derivadores numéricos liberados desde sitios de cultivo de salmónidos en el canal Caucahué, superan los límites establecidos por los métodos basados en la excursión de mareas de 5 km de radio y los límites de la Agrupaciones de Concesiones de Acuicultura definidas en el Reglamento sobre Medidas de Protección, Control y Erradicación de Enfermedades de Alto Riesgo para las Especies Hidrobiológicas, para la zona de estudio.

REFERENCIAS

- Beattie M. J., McGeachy S. M., Chang B. D., and F. H. Page. Water Movement and Fish Health in the Salmon Farming Industry of Southwestern New Brunswick. Bull. Aquacul. Assoc. Canada 105-1: 34-43. 2005.
- Chang BD, Page FH, Losier RJ, Greenberg DA, Chaffey JD, McCurdy EP. Application of a

- tidal circulation model for fish health management of salmon farms in the Grand Manan Island area, Bay of Fundy. *Bull. Aquacul. Assoc. Canada* 105-1:22-33. 2005.
- Ellis, S., Gustafson, L., Giray, C., Robinson, T., Marenghi, F and P. Merrill. Hydrographics and the epidemiology of ISA: Findings from a high-risk region in Maine and New Brunswick. *Bull. Aquacul. Assoc. Canada* 105-1: 44-51. 2005.
- Forrester, C. K., A method of time centering the Lagrangian marker particle computation. *J. Comput. Physics*, 12, 269-274, 1973.
- Galperin B., Kantha L.H., Hassid S., and Rosati A. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. *J. Atmos. Sci.*, 45:55-62, 1988.
- Greenberg D., Shore J., Page F., and Dowd M. A finite element circulation model for embayments with drying intertidal areas and its application to the Quoddy region of the Bay of Fundy. *Ocean Modelling*, 10, 211-231, 2005.
- Hunter, J. R. The application of Lagrangian particle-tracking techniques to modelling of dispersion in the sea. J. Noye [ed.] "Numerical modelling: applications to marine systems." Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 257-269, 1987.
- Iizuka, M., and Katz J. Natural Resource Industries, 'Tragedy of the Commons' and the Case of Chilean Salmon Farming. *International Journal of Institutions and Economies* 2-3, 259-286, 2011.
- Lovdal, T. and Enger, O. Detection of infectious salmon anemia virus in sea water by nested RT-PCR. *Dis Aquat Organ*, 49, 123-8. 2002.
- Lynch D., Holboke M., and Naimie C. The Maine coastal current: Spring climatological circulation. *Continental Shelf Research*, 17, 605-634, 1997.
- Lynch D., Ip J., Naimie C., and Werner F. Comprehensive coastal circulation model with application to the Gulf of Maine. *Continental Shelf Research*, 16, 875-906, 1996.
- Lynch D., and Werner F. Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part II: Nonlinear timestepping model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 12, 507-533, 1997.
- Lyngstad, T. M., Jansen, P. A., Sindre, H., Jonassen, C. M., Hjortaas, M. J., Johnsen, S. and Brun, E. Epidemiological investigation of infectious salmon anaemia (ISA) outbreaks in Norway 2003-2005. *Prev Vet Med*, 84, 213-27. 2008.
- Mardones, F. O., Pérez, A. M. and Carpenter, T. E. Epidemiologic investigation of the re-emergence of infectious salmon anemia virus in Chile. *Dis Aquat Organ*, 84, 105-14. 2009.
- Mellor G.L. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Technical report, Princeton University, 1996.
- Mellor G.L., and Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluids problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20:851-875, 1982.
- Murray AG. The epidemiology of infectious salmon anemia in Scotland. In: *International Response to Infectious Salmon Anemia: Prevention, Control, and Eradication: Proceedings of a Symposium; 3-4 September 2002; New Orleans, LA.* (O Miller, RC Cipriano, tech. coords.). US Dept. Agriculture, Animal and Plant Health Inspection Service; US Dept. Interior, US Geological Survey; US Dept. Commerce, National Marine Fisheries Service (Washington, DC). *Tech. Bull.* 1902:55-62. 2003.
- Murray AG., Amundrud TL. and PA. Gillibrand. Models of hydrodynamic pathogen dispersal affecting Scottish salmon production: Modelling shows how Scotland eradicated ISA, but not IPN. *Bull. Aquacul. Assoc. Canada* 105-1:79-86. 2005.
- Salama, N. K. G. and Murray, A. G. Farm size as a factor in hydrodynamic transmission of pathogens in aquaculture fish production. *Aquaculture Environment Interactions*, 2, 61-74. 2011.

- Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91:99-164, 1963.
- Stucchi, D. J., Henry, R.F. y and M.G.G. Foreman. Modelling the transport and dispersion of IHN pathogens in the Broughton Archipelago, British Columbia. *Bull. Aquacul. Assoc. Canada* 105-1:52-59. 2005.
- Werner F., Blanton J., Lynch D., and Savidge D. A numerical study of the continental shelf circulation of the U.S. South Atlantic Bight during autumn of 1987. *Continental Shelf Research*, 13, 971-997, 1993.