



Foto: Estuario del Reloncaví, Región de Los Lagos, Chile. © WWF Chile – Kevin SCHAFER

Modelos para la Evaluación de la Capacidad de Carga de Fiordos Aplicables a Ecosistemas del Sur de Chile

Autores: Fabián Tapia¹ y Susana Giglio²
Edición: Paula Moreno³

¹Centro COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción.

²Programa de Magister en Ciencias mención Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción

³Coordinadora Programa de Acuicultura, WWF Chile.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento explosivo de la salmonicultura en el sur de Chile, y los recientes problemas de orden sanitario que dicho sector productivo ha debido enfrentar, evidencian la necesidad de incorporar criterios oceanográficos y herramientas de modelación cuantitativa a la evaluación del impacto de esta actividad sobre ecosistemas acuáticos, y sobre otras actividades humanas que se desarrollan en la región.

A fines del año 2009 se ha otorgado un total de 2.909 concesiones de acuicultura, de las cuales 1.145 corresponden a cultivos de salmónidos, con un 33,3% en la región de Los Lagos; 60,1% en Aysén y 6,6% en Magallanes (www.subpesca.cl). Un gran número de éstas se encuentran ubicadas en fiordos y canales, principalmente por las favorables condiciones físicas y químicas del agua, y por la protección que la geomorfología de estas cuencas semi-cerradas otorga a las instalaciones de cultivo. Son estas mismas condiciones topográficas, batimétricas e hidrodinámicas las que convierten a los fiordos y canales en sistemas altamente sensibles y potencialmente vulnerables al impacto de la acumulación de materia orgánica sobre el fondo, producto de fecas y alimento no consumido, y de los desechos metabólicos de los peces en cultivo. La capacidad de un fiordo para asimilar estos ingresos sin que las condiciones físico-químicas del agua bajen por sobre un nivel mínimo de calidad depende en gran medida de la variabilidad espacial y temporal en las tasas de recambio de agua, y de la composición y capacidad metabólica de la fauna bentónica. De esta forma, los patrones de variabilidad física y biológica actúan en conjunto para determinar, de un lugar a otro y de una época del año a la otra, la “capacidad de carga” o nivel de tolerancia que una determinada cuenca tiene a la incorporación de materia orgánica y desechos metabólicos producto del cultivo intensivo de peces.

Sobrepasar esta capacidad implica que las condiciones físicas y químicas del agua y sedimentos pueden, eventualmente, verse alteradas a la escala de toda una cuenca y poner en peligro la sobrevivencia de la fauna y flora autóctonas, la sustentabilidad de la actividad salmonicultora, y el desarrollo de otras actividades humanas en la región. Por ello, y dada la importancia económica y el nivel de crecimiento de la salmonicultura en Chile, WWF ha encargado la realización de una recopilación y revisión de la información disponible sobre modelos de estimación de capacidad de carga, con un énfasis en los métodos utilizados en países líderes en producción de salmónidos de cultivo en el mundo: Chile, Noruega, Canadá y Escocia.

Concepto de capacidad de carga y tipos de modelos utilizados en su evaluación

Se entiende por capacidad de carga la máxima producción de peces que permita mantener ciertos parámetros ambientales considerados críticos (e.g. concentración de oxígeno disuelto, presencia y/o abundancia de fauna bentónica) dentro de límites pre-establecidos y considerados aceptables desde el punto de vista del impacto sobre la calidad del agua y condición del sistema bentónico asociado. Tradicionalmente, la capacidad de carga se ha evaluado a la escala de cada centro de cultivo, y ha incorporado las condiciones ambientales para los propios peces en cultivo como un requerimiento de calidad del agua. Durante esta década, sin embargo, se ha discutido la necesidad de estudiar el impacto de los cultivos de sobre la calidad del agua y de las condiciones del bentos a la escala de toda una cuenca. Siguiendo esta progresión de escalas, los modelos cuantitativos utilizados para evaluar capacidad de carga en salmonicultura, y las variables críticas a considerar para cada uno, pueden clasificarse en las siguientes categorías:

1. Modelos de escala local centrados en los peces de cultivo.

- Especie cultivada y su fisiología: tasas de crecimiento, asimilación de alimento, excreción.
- Régimen productivo: peso inicial y de cosecha, densidad de individuos por jaula.

- Tipo de alimento: composición y raciones.
- Condiciones físicas y químicas del agua: variabilidad en temperatura, oxígeno disuelto y concentración de nutrientes.

2. Modelos de escala local centrados en el bentos.

- Batimetría del área de ubicación del cultivo.
- Régimen de corrientes y circulación en el área.
- Tipo de alimento y tasa de alimentación de los peces.
- Factor de conversión y tasas de asimilación de los peces.
- Tasas de sedimentación de partículas: pellets de alimento y fecas.
- Acumulación de materia orgánica en el fondo.
- Granulometría del sedimento.
- Niveles de oxígeno disuelto en el agua suprayacente al fondo.
- Metabolismo del bentos: demanda de oxígeno para metabolizar materia orgánica acumulada.
- Balances de oxígeno y amonio: en sedimento y agua suprayacente.
- Condición del bentos: presencia-ausencia, abundancia y/o diversidad de infauna bentónica.

3. Modelos de calidad de agua a escala local.

- Concentraciones de oxígeno y amonio disuelto en el agua que ingresa a las jaulas.
- Resultados de modelos que consideran el metabolismo de los peces de cultivo (consumo de oxígeno y producción de metabolitos, principalmente amonio), y su impacto sobre los niveles ambientales (columna de agua y sedimento).
- Corrientes y su variabilidad vertical y temporal (cerca de la superficie y del fondo, variabilidad vertical en velocidades).
- Dimensiones y disposición espacial de las jaulas (tamaño de las jaulas, profundidad, número y arreglo espacial de las jaulas, orientación del centro de cultivo con respecto a batimetría local y a la circulación).

4. Modelos de calidad de agua a la escala de una cuenca.

- Batimetría y topografía de la cuenca de estudio (fiordo, canal, estuario).
- Régimen de circulación (forzamiento por mareas, viento y aportes de agua dulce).
- Ingreso de nutrientes (ríos, escorrentía, descargas humanas, y cultivos de peces).
- Ingreso de oxígeno (ríos, mezcla vertical inducida por viento o forzamiento oceánico).

Aunque la mayoría de las aplicaciones de estos modelos corresponde a estudios realizados con posterioridad a la instalación de un centro de cultivo, y principalmente con fines de monitoreo ambiental, modelos de la segunda categoría se utilizan regularmente en la evaluación de sitio requerida previo al otorgamiento de una concesión.

RESULTADOS

MODELO	País	Tipo de Modelo	Especies	Escala	Sustrato	Parámetros	Variables de salida	PAIS EN QUE SE HA APLICADO			
								Canadá	Chile	Escocia	Noruega
DEPOMOD	Reino Unido	Modelo de seguimiento de partículas, utilizado para predecir flujos de material de desecho y su impacto sobre el bentos asociado a los centros de cultivo.	Salmón, bacalao	Centro de cultivo	Columna de agua y bentos	Coefficientes de dispersión horizontal y vertical, contenido de agua y digestibilidad del alimento utilizado, estimaciones de exceso de alimento (i.e. cantidad de alimento no ingerido por los peces), velocidad de hundimiento del alimento y de las fecas.	Tasa de deposición de material de desecho sobre el fondo marino a diferentes distancias del centro de cultivo. Mapas de distribución espacial de la acumulación de materia orgánica y condiciones asociadas.	Chamberlain & Stucchi (2007)	Gargiulo (2007)	Cromey <i>et al.</i> (2002b)	
MOM	Implementado en Suecia a partir de estudios sobre fiordos de Noruega	Modelo de tipo modular, con submodelos de peces, dispersión, bentos, y calidad de agua. Utilizado para estimar biomasa de peces que mantiene calidad ambiental en columna de agua y sedimentos por sobre niveles pre-establecidos.	Salmón, bacalao	Centro de cultivo	Columna de agua y bentos	Especie de pez, tipo de alimento, condiciones de cultivo (dimensiones y número de jaula, ciclo de producción), variabilidad ambiental (temperatura, corrientes), concentraciones ambientales de oxígeno y amonio, concentraciones máximas(mínimas) permisibles.	Producción máxima para cada mes del año y de acuerdo a 3 criterios: (1) oxígeno y (2) amonio en columna de agua, y (3) oxígeno en agua de fondo.				Stigebrandt <i>et al.</i> (2004)
FjordEnv	Suecia/Noruega	Modelo de calidad de agua basado en una descripción hidrodinámica de un fiordo o cuenca semi-cerrada. Puede ser usado para calcular efectos ambientales de los centros de cultivo.	Salmón	Secciones de un fiordo	Columna de agua	Batimetría de la cuenca, régimen de mareas, variabilidad del viento, variabilidad en estructura hidrográfica, parámetros ópticos y bioquímicos.	Intensidad de mezcla e intercambio de agua, tiempos de residencia en diferentes estratos de profundidad, tasa de consumo de oxígeno y concentración mínima de oxígeno en la cuenca.				Stigebrandt <i>et al.</i> (2004)
LESV	Reino Unido	Modelo dinámico para estimar efecto del input de nutrientes y MOP sobre la calidad de agua en una cuenca semi-cerrada. Se utiliza en conjunto con un modelo físico de 3 capas que describe la circulación de la cuenca.	-	Secciones de un fiordo	Columna de agua	Concentración de materia orgánica particulada (MOP), oxígeno disuelto, concentración de nutrientes, clorofila fraccionada por tamaños, radiación, variables hidrográficas.	Cambios en la biomasa y composición del microplancton, cambios en las concentraciones de oxígeno disuelto.			Portilla <i>et al.</i> (2009)	
SinMod	Noruega	Modelo hidrodinámico tridimensional que puede acoplarse con modelos IBM que describen la dinámica del fitoplancton, zooplancton, y flujos resultantes.	-	Regional a local (anidado)	Columna de agua	Forzamiento atmosférico, variabilidad en campos de densidad.	Estructura espacial (horizontal y vertical) de la corriente, variabilidad temporal en los flujos a distintas profundidades.				Pedersen <i>et al.</i> (2006)
Modelo de Balance de Oxígeno de Findlay y Watling (1997)	Canadá	Predicción del impacto bentónico, producto del consumo de oxígeno del sedimento en función del flujo de carbono.	Salmón	Centro de cultivo	Bentos	Demanda de oxígeno del sedimento, disponibilidad y difusión de oxígeno en el sedimento y flujo de carbono procedente de centros de cultivo, con diferentes velocidades de corriente y biomasa productivas.	Consumo de oxígeno del sedimento en función del flujo de carbono ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).	Findlay & Watling (1997)	Gargiulo (2007)		
OPENSED	Escocia	Modelo que predice tasas de deposición de carbono en el sedimento bajo las jaulas a partir de tasas de pérdida de alimento y producción de fecas. Utilizado en conjunto con el MDL CNST 1.	Salmón, halibut	Fiordo/estuario o sub-cuencas	Bentos	Velocidad de corrientes, velocidad de hundimiento de pellets y fecas, batimetría, dimensiones del centro de cultivo, biomasa cultivada durante un año.	Dispersión de partículas en dos dimensiones, área impactada por la acumulación de materia orgánica sobre el fondo.				Gillibrand <i>et al.</i> (2002)
MDL CNST 1	Escocia	Modelo de caja que evalúa el enriquecimiento de amonio, por sobre niveles ambientales, dentro de una cuenca semi-cerrada debido a la excreción de los peces en cultivo.	Salmón, halibut	Fiordo/estuario o sub-cuencas	Columna de agua	Dimensiones de la cuenca, tiempos de residencia, biomasa y especie de peces en cultivo, tasas de excreción.	Aumento en la concentración de amonio en el equilibrio.				Gillibrand & Turrell (1997)
OPENDISP	Escocia	Modelo para evaluar dispersión de desechos solubles y particulados en áreas abiertas, utilizado en la evaluación de concentraciones ambientales de fármacos administrados durante en el tratamiento contra el piojo de mar. Puede ser utilizado en conjunto con modelos hidrodinámicos bidimensionales (e.g. Pachang <i>et al.</i> 1997).	Salmón	Cuencas semi-cerradas	Columna de agua	Corrientes residuales y de marea sobre el área de estudio, número, dimensiones y ubicación de centros de cultivo, tipo de fármaco y dosis administradas, concentraciones ambientales permitidas.	Cantidad de fármaco requerida para tratar cada centro de cultivo, tasa de decaimiento en la concentración ambiental.				Gillibrand & Turrell (1999)
Modelo RTM acoplado con DEPOMOD	Escocia	Modelo diagenético unidimensional que simula impacto de la acumulación de materia orgánica sobre la dinámica redox en los sedimentos. Se acopla al modelo DEPOMOD.	Salmón	Centro de cultivo	Bentos	Flujo de materia orgánica el bentos predicho por modelo DEPOMOD, composición del alimento y las fecas, porosidad del sedimento, constantes cinéticas y concentraciones límite para oxígeno y otros aceptores de electrones en el sedimento.	Tasas de mineralización de carbono orgánico, perfil y flujos de oxígeno en el sedimento.				Brigolin <i>et al.</i> (2009)

CONCLUSIONES

La selección de un modelo o aproximación a desarrollar y aplicar en los fiordos de Chile debe cumplir con dos criterios fundamentales: (1) El modelo debe incluir los principales compartimentos y procesos que reflejan el rol de la salmonicultura como agente en los flujos químicos (carbono orgánico particulado, oxígeno disuelto y desechos nitrogenados) que se registran a la escala de un centro de cultivo, y (2) debe permitir el escalamiento y representación de dichos impactos dentro de un modelo hidrodinámico que abarque toda una cuenca. Esto, con el fin de establecer niveles máximos de producción a la escala de un fiordo que permitan mantener la calidad de agua y la condición del bentos por sobre niveles aceptables para la conservación de los ecosistemas naturales, además de identificar potenciales interferencias entre centros que puedan afectar la producción.

A escala local se requiere combinar modelos basados en una aproximación modular del tipo MOM (*Modelling - Ongoing Fish Farm – Monitoring*, Stigebrandt *et al.* 2004) o DEPOMOD (Cromey *et al.* 2002), y que predigan patrones de depositación de materia orgánica en función de las tasas de producción de partículas por los peces, batimetría y régimen de corrientes, con un modelo que determine los cambios en el balance de oxígeno bentónico y sus efectos sobre la fauna producidos por la carga de materia orgánica (e.g. Findlay & Watling 1997, Brigolin *et al.* 2009). En cuanto a la modelación de calidad de agua a escala de la cuenca, la aplicación del modelo hidrodinámico de Marín y Campuzano (2008) al estudio de dispersión y acumulación de partículas sobre un área de ca. 150 km² en el fiordo Aysén constituye una opción atractiva en términos de la transición que logra entre procesos a escala local – dentro de y entre cultivos – y aquellas variables ambientales que es necesario modelar a mayor escala, tales como la concentración de oxígeno, amonio y otros nutrientes inorgánicos.

Un modelo que integrara todas las escalas arriba mencionadas proporcionaría información de alto valor tanto para el manejo de los ecosistemas de fiordos como para la optimización de la actividad productiva, permitiendo establecer, por ejemplo, el efecto que ajustes en las biomásas o tiempos de alimentación/cosecha podrían tener sobre la condición de los peces. En términos prácticos, sin embargo, el modelo debe ser lo suficientemente simple como para que sus parámetros sean factibles de estimar utilizando observaciones oceanográficas y químicas estándar, además de la información productiva disponible. Conjuntamente, es necesario que las predicciones del modelo puedan ser validadas por observaciones de las condiciones del fondo y de la columna de agua.

RECOMENDACIONES

Debido a la necesidad de aplicar modelos para estimar la capacidad de carga de fiordos y canales en la zona sur de Chile, es esencial que tanto gobierno como sector privado colaboren en el desarrollo de planes de monitoreo y protocolos de observación de variabilidad ambiental que proporcionen información utilizable para implementar dicho modelo. Este plan debe contener al menos el registro de los siguientes parámetros:

Registro de corrientes

Cualquiera sea el modelo, o mezcla de ellos, que se adopte como estándar para la evaluación de capacidad de carga en Chile, es esencial contar con una caracterización del régimen de corrientes y su variabilidad espacial y temporal en un fiordo. Numerosos estudios publicados en las últimas décadas indican que los patrones espaciales y temporales de circulación al interior de un fiordo constituyen el principal factor a considerar al momento de (1) determinar el sitio de instalación de un centro de cultivo, (2) establecer distancias mínimas entre centros, (3) adecuar los niveles de

producción o la disposición espacial del centro de cultivo respecto a las corrientes durante épocas de baja ventilación.

Las implicancias ambientales y sanitarias de contar con una disposición espacial de centros de cultivo que hasta ahora no ha considerado el régimen de corrientes a escalas relevantes (entre centros y a lo largo del fiordo, cambios estacionales en la dirección y magnitud de las corrientes) ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la calidad de las mediciones de correntometría actualmente requeridas previo a la instalación de un nuevo centro de cultivo. Los registros de corrientes informados en caracterizaciones preliminares de sitio (CPS) y declaraciones de impacto ambiental (DIA) a menudo cubren períodos menores de 1 semana, y que pueden ser tan cortos como 1 día, con resoluciones temporales que a menudo no son informadas. Además de la corta duración de los registros, la mayoría de los estudios sólo considera un período de medición, en una estación del año en particular. Cambios estacionales en el forzamiento físico de la circulación en un fiordo u otra cuenca semi-cerrada pueden alterar drásticamente los patrones de corrientes y flujos residuales en un área determinada. Por ello es recomendable aumentar el nivel de exigencia en cuanto a la cobertura temporal y resolución de las mediciones de corrientes realizadas antes de instalar un centro de cultivo, así como en la calidad del análisis de los datos y presentación de informes de correntometría.

Monitoreo de aportes de ríos

Los aportes de agua dulce son el principal factor forzante de la circulación en un fiordo. Además de un monitoreo continuo del caudal de ríos que desembocan en el fiordo estudiado, se requiere monitorear el aporte de nutrientes inorgánicos y materia orgánica disuelta en el agua de río. Dicha información es vital para la formulación de modelos que permitan discriminar entre cambios causados por los cultivos de peces y aquellos debidos a fluctuaciones naturales.

Batimetría

En la implementación de modelos de circulación y de dispersión de partículas, es imprescindible disponer de información detallada, idealmente con alta resolución (≤ 100 m), de la batimetría a lo largo y ancho de la cuenca. La resolución espacial debe ser aún mayor al interior de subcuencas en que se estudien patrones de dispersión de partículas y depositación de materia orgánica sobre el fondo.

Producción primaria y niveles ambientales de nutrientes y oxígeno disuelto

Con el fin de incorporar los ciclos naturales de transformación de nutrientes y materia orgánica en la columna de agua, es necesario implementar un sistema de monitoreo de niveles ambientales de los principales nutrientes inorgánicos y del oxígeno disuelto en la columna de agua, junto con estimaciones de tasas de producción primaria y flujos de carbono asociados durante el ciclo anual.

Información productiva de los centros de cultivo

Finalmente, en la implementación de un modelo de capacidad de carga se requiere disponer de información productiva actualizada en cada centro, con estadísticas mensuales de biomasa viva en el agua, mortalidad, cosecha, tipo de alimento, dimensión de los pellets, frecuencia de alimentación y factor de conversión.

REFERENCIAS

- Brigolin, D., R. Pastres, T. D. Nickell, C. J. Cromei, D. R. Aguilera, & P. Regnier. 2009. Modelling the impact of aquaculture on early diagenetic processes in sea loch sediments. *Marine Ecology Progress Series* 388:63-80.
- Chamberlain, J., Stucchi, D., 2007. Simulating the effects of parameter uncertainty on waste model predictions of marine finfish aquaculture. *Aquaculture* 272, 296-311.
- Cromei, C. J., K. D. Nickell, & K. D. Black. 2002. DEPOMOD - Modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture* 214:211-239.
- Findlay, R. H., & L. Watling. 1997. Prediction of benthic impact for salmon net-pens based on the balance of benthic oxygen supply and demand. *Marine Ecology Progress Series* 155:147-157.
- Gargiulo, M.E., 2007. Evaluación de la capacidad de carga en centros de cultivo mediante la combinación de un modelo de dispersión (DEPOMOD) con un modelo basado en el balance de oxígeno en sedimento. *Salmociencia* 2, 83-87.
- Gillibrand, P. A., M. J. Gubbins, C. Greathead, & I. M. Davies. 2002. Scottish executive locational guidelines for fish farming: predicted levels of nutrient enhancement and benthic impact. Scottish Fisheries Research Report 63/2002, Aberdeen, Scotland.
- Gillibrand, P. A., & W. R. Turrell. 1997. The use of simple models in the regulation of the impact of fish farms on water quality in Scottish sea lochs. *Aquaculture* 159:33-46.
- Gillibrand, P. A., & W. R. Turrell. 1999. A management model to predict the dispersion of soluble pesticides from marine fish farms. FRS ML Report 2/99: Aberdeen, 31 pp.
- Marin, V. H., & F. Campuzano. 2008. Un modelo hidrodinámico-barotrópico para los fiordos australes de Chile entre los 41 °S y los 46 °S. *Ciencia y Tecnología del Mar* 31:125-136.
- Pedersen, O.P., Nilssen, E.M., Jorgensen, L.L., Slagstad, D., 2006. Advection of the Red King Crab larvae on the coast of North Norway—A Lagrangian model study. *Fisheries Research* 79, 325-336.
- Portilla, E., P. Tett, P. A. Gillibrand, & M. Inall. 2009. Description and sensitivity analysis for the LESV model: Water quality variables and the balance of organisms in a fjordic region of restricted exchange. *Ecological Modelling* 220:2187-2205.
- Stigebrandt, A., J. Aure, A. Ervik, & P. K. Hansen. 2004. Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming III. A model for estimation of the holding capacity in the Modelling—Ongrowing fish farm—Monitoring system. *Aquaculture* 234:239-261.