

# Seguimiento y simulación de las actividades y la generación de residuos disueltos del cultivo piscícola de la especie cobia en la costa de Cartagena, Colombia

## *Monitoring and simulating the operations and dissolved waste production of cobia fish farm off the coast of Cartagena, Colombia*

DOI: 10.26640/22159045.450

Fecha de recepción: 2018-08-08 / Fecha de aceptación: 2018-10-30

Mabel Mendoza-Rivera\* y Dale A. Kiefer\*\*

Mendoza-Rivera, M. y Kiefer, D. (2018). Seguimiento y simulación de las actividades y la generación de residuos disueltos del cultivo piscícola de la especie cobia en la costa de Cartagena, Colombia. Bol. Cient. CIOH (37):75-94. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.450

### RESUMEN

En 2008 se construyó la primer granja piscícola en Colombia en la isla de Tierrabomba cerca de Cartagena de Indias (10.3601 – 75.5966 NW). En el cultivo se sembró cobia (*Rachycentron canadum*). Esta especie crece muy rápidamente, tiene un alto valor en el mercado, y ha sido cultivada exitosamente en el Caribe. Tres años después de iniciar el cultivo, comenzó un estudio para determinar el impacto del cultivo sobre el ambiente circundante. Mensualmente, durante ocho meses se midieron las variables físicas y los nutrientes en la columna de agua en tres estaciones localizadas cerca de las jaulas (5, 30, 100 m) y un punto control (1000 m). En cada estación se colectaron muestras a las profundidades de 7, 15 y 30 m. Adicionalmente, se instaló un perfilador de corrientes Doppler cerca al cultivo y se colectaron los datos continuamente. Esta información fue ingresada y analizada con el Programa de Simulación para Cultivos Marinos AquaModel ([www.aquamodel.org](http://www.aquamodel.org)). Este programa comprende un sistema de submodelos para la fisiología del pez, la hidrodinámica, la calidad del agua, la dispersión de desechos disueltos y particulados, producidos por el cultivo, y las transformaciones ecológicas de estos desechos en la columna de agua. La simulación 4-D del AquaModel de la operación de la granja y el impacto ambiental es conducido por las corrientes que mide el perfilador Doppler así como por las mediciones en campo como son la temperatura del agua, y las concentraciones de oxígeno, nutrientes y clorofila a. Las tasas de crecimiento simuladas para el pez concordaron con los cambios temporales en el tamaño de los peces colectados en el campo. La simulación también indicó que el impacto ambiental del cultivo no fue significativo. Tanto las mediciones en campo como la simulación muestran que hay una rápida dilución del nitrógeno total disuelto en el gradiente horizontal, y que la concentración de oxígeno en las jaulas y en las aguas circundantes está por encima de los 5 mg/L, suficiente para sustentar el rápido crecimiento del pez.

**PALABRAS CLAVE:** modelación, maricultura, *Rachycentron canadum*.

### ABSTRACT

In 2008 the first fish farm in Colombia was constructed off Tierrabomba Island near Cartagena de Indias (10.3601 – 75.5966 NW). The farm was stocked with cobia, *Rachycentron canadum*. This species grows very rapidly, has high market value, and has been successfully cultured in the Caribbean. Three years after initial stocking of the cages, a study was begun to determine the farm's effect on the surrounding environment. Monthly physical variables and nutrients in the water column were measured for eight months at three stations located in proximity of the cages (5, 30, 100 m) and a control point (1000 m). At each station, samples were collected and measurements were made at depths of 7, 15 and 30 m. Additionally, a current Doppler profiler was installed near the site and data were collected continuously. This information was input and analyzed with the AquaModel fish farm simulation software ([www.aquamodel.org](http://www.aquamodel.org)). This software consists of a system of coupled sub-models of fish physiology, hydrodynamics, water quality, dispersion of dissolved and particulate wastes produced by the farm, and the ecological transformations of these wastes within the water column. AquaModel's 4-D simulation of farm operation and environmental impact is driven by the currents measured with the Doppler profiler as well as other field measurements such as water temperature, and the concentrations of oxygen, nutrients, and chlorophyll-a. The simulation indicated that the environmental impact of the farm was insignificant. Both the field measurements and simulation results show that there is rapid dilution of the total dissolved nitrogen downstream from the farm, and that the concentration of oxygen in the cages and in the ambient waters is above the 5 mg / L, more than sufficient to support rapid growth of the fish.

**KEYWORDS:** Modeling, mariculture, *Rachycentron canadum*.

\* Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena. Correo: mabel.mendoza@escuelanaval.edu.co

\*\* University of Southern California. Los Angeles. Correo: kiefer@dornsife.usc.edu

## INTRODUCCIÓN

La cobia (*Rachycentron canadum*) es uno de los candidatos más recientes para la maricultura, por lo que el conocimiento de su biología ha aumentado en los últimos años. El crecimiento isométrico de la especie ha sido descrito en la naturaleza (Franks, Warren y Buchanan, 1999) y en condiciones de cultivo (Benetti, O'Hanlon, Rivera, Welch, Maxey y Orhun, 2010). Otros estudios se han centrado en su bioenergética en condiciones estáticas y de nado rápido durante la fase de crecimiento, y con variaciones de la temperatura del agua (Sun y Chen, 2014) (Rensel, Kiefer, O'Brien, Rust, Scott y Carter, 2010). Sin embargo, el impacto ambiental de la piscicultura en alta mar sigue siendo un tema de discusión a nivel mundial. Los efectos ambientales para la acuicultura en alta mar se han estimado por muestreo *in situ* y, más recientemente, mediante la aplicación de diversos modelos. En particular, con el desarrollo de la maricultura, muchos modelos se han enfocado en integrar las ecuaciones de modelo de masa con el sitio hidrodinámico en cultivo, con el objetivo de predecir la dispersión particulada y disuelta, así como la sedimentación de desechos provenientes de las granjas piscícolas (San Diego-McGlone, Avanza, Villanoy y Jacinto, 2008) (Corner, Brooker, Teffer y Ross, 2006) (Cromney, Nickell y Black, 2002).

En Colombia, el primer proyecto de maricultura de la especie cobia comenzó en 2008. Como esta fue la primera operación de este tipo, fue importante garantizar la sostenibilidad ambiental del proyecto. Para esquematizar la concentración prevista de nutrientes, oxígeno y clorofila en sentido descendente fuera de las jaulas, realizamos simulaciones con el AquaModel® (Inc, Los Ángeles, CA, EE. UU.), un modelo avanzado de operaciones acuícolas e impacto ambiental que ha sido aprobado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos. Este *software* se ha utilizado con éxito para analizar los criaderos propuestos y operativos de ostras en los Estados Unidos, lubina en Italia y salmón en Chile, entre otros países. Este modelo es una simulación de 4 dimensiones (latitud, longitud, profundidad y tiempo) de las actividades de la granja, el cual es ejecutado dentro del sistema

de información geográfica EASy del System Science Applications. Este simula el crecimiento y la actividad metabólica de los peces en jaulas, la producción asociada de desechos disueltos y particulados que se transportan desde el cultivo y las transformaciones bioquímicas de los desechos a través de las poblaciones planctónicas y bentónicas en la columna de agua y los sedimentos circundantes. Específicamente, el modelo rastrea la producción, transporte y el destino ecológico del carbono, oxígeno y el nitrógeno.

## MATERIALES Y MÉTODO

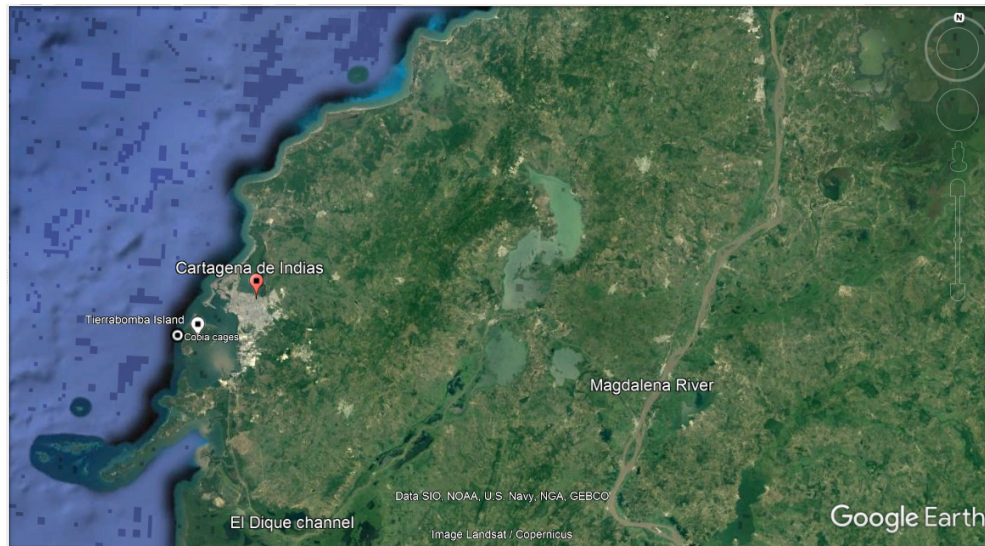
### Sitio de cultivo

El sitio de cultivo con una extensión total de 4 ha comprendía cuatro jaulas flotantes de precría de 8 m de diámetro y 9 m de profundidad, con una capacidad de 11 000 alevines por jaula; y cinco jaulas flotantes de engorde a talla comercial de 21 m de diámetro y 9 m de profundidad, con una capacidad de 8800 peces por jaula. Las jaulas se ubicaron a 500 metros de la costa, en el lado noroeste de la isla Tierrabomba (10.3601 - 75.5966 NW), cerca de la ciudad de Cartagena de Indias (Figura 1). En el sitio elegido la profundidad media era de 35 m, considerando que el valor mínimo a establecer corresponde a tres veces la altura de la jaula. Este sitio está fuertemente influenciado por el canal El Dique, que drena el agua del río Magdalena hacia la Bahía de Cartagena. El canal tiene una tasa de flujo volumétrico que oscila entre 55 m<sup>3</sup>/s y 250 m<sup>3</sup>/s y lleva una carga de sedimentos estimada de 822 m<sup>3</sup>/día (Olivero, *et al.*, 1997; Tuchkovenko, Lonin y Calero, 2002). El tipo de fondo es fangoso porque la composición del lecho marino en el sitio de cultivo es principalmente arcillosa (86 %).

Las aguas costeras colombianas están influenciadas por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y el clima está determinado en gran medida por la presencia o ausencia de los vientos alisios. En esta área se dan dos regímenes climáticos, denominados temporada seca y lluviosa, con un período de transición entre ambas. Durante la estación seca (diciembre-marzo) los vientos alisios del Norte y del Noreste son fuertes, regulares y continuos; la estación

de transición (abril-julio), se caracteriza por una alta variabilidad en la dirección de los vientos, girando de norte a sur; mientras que en la estación lluviosa (agosto - noviembre) los vientos Este-Sureste y Sureste son débiles (Centro de

Investigación Hidrográfica y Oceanográfica-CIOH, 2005). La temperatura media en la región es de 27.7 °C, con un valor máximo de 31.9 °C en agosto y un valor mínimo de 26.5 °C en enero.



**Figura 1.** Lugar de localización de la cultura en la costa noroeste de la Isla Tierrabomba, mar Caribe (Modificado de Google Earth, 2018).

### Procedimientos de muestreo

Para evaluar el efecto ambiental del cultivo, se recolectaron datos de campo para las siguientes variables durante ocho meses, de mayo a diciembre de 2011.

- La concentración y distribución espacial del Nitrógeno Inorgánico Disuelto (en inglés, Dissolved Inorganic Nitrogen-DIN).
- La concentración vertical del perfil de oxígeno en la columna de agua.
- Velocidades de corrientes de la superficie y del fondo.

La posición de los centros de cada jaula fue registrada con un GPS (Garmin, Kansas City MO, EE.UU.), y la velocidad de la corriente fue medida usando un perfilador de corriente Doppler acústico (ADCP) (Nortek, San Marcos CA, EE.UU.), instalado en el lecho marino

25 m al sur del cultivo. La base de datos fue extraída usando el *software* Surge (Nortek AS, Rud, Noruega) y se visualizó con el *software* WRPLOT View™ (Lakes Environmental Software, Waterloo ON, Canadá). En la dirección de la corriente dominante adelante de las jaulas se establecieron tres puntos de muestreo en la distancia horizontal de 5, 30 y 100 m, a tres profundidades en la columna de agua de 7, 15 y 30 m referidas como superficie, media y fondo, y se estableció una estación control a 1 km de distancia al norte del módulo de cultivo para un total de doce puntos de muestreo. Se obtuvieron cartas electrónicas de información náutica y batimétrica de la isla de Tierrabomba del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras -Invemar. Los valores de precipitación durante 2011 se obtuvieron de la estación meteorológica del Centro de Investigaciones Hidrográficas y Oceanográficas (CIOH).

Las muestras de agua en cada estación se recogieron una vez al mes con una botella Niskin de 5 L, se colocaron en refrigeradores portátiles

y se llevaron al laboratorio donde se mantuvieron congeladas a  $-20^{\circ}\text{C}$ . La transparencia del agua se midió utilizando un disco Sechii. El oxígeno disuelto (OD) se midió con un medidor digital de oxígeno (Modelo 556, YSI Incorporated, YSI Springs OH, EE.UU.), y la salinidad se midió con un refractómetro y se expresó como Unidades Prácticas de Salinidad (en inglés Practical Salinity Units - PSU).

Los datos mensuales de las jaulas incluían la biomasa de peces, la cantidad y frecuencia de alimento y los valores de oxígeno dentro de las jaulas. Había 3 tipos de jaulas según la fase de crecimiento:

1) Una precría que contenía peces que pesaban entre 2 g y 200 g, 2) una jaula de engorde intermedia que contenía peces que pesaban entre 200 g y 1 kg, y 3) una jaula de engorde final que contenía peces que pesaban entre 1 kg y 4 kg. Las cobias fueron alimentadas con alimento peletizado de Nicovita Peces (40 - 45 % Proteína, 7 - 15 % Grasa) (Alicorp S.A.S., Callao, Perú). Los *pellets* para cada una de las tres jaulas tenían un diámetro de 4, 12 y 16 mm respectivamente. La ración alimentaria diaria consistió en cuatro comidas con una tasa de alimentación del 10 % de biomasa para los peces de vivero, dos comidas con una tasa de alimentación del 4 % de biomasa para los peces de tamaño intermedio, y una comida con una tasa de alimentación del 1-2 % de biomasa para los peces grandes. Para cada jaula se muestreó el peso de 100 peces cada 2 semanas a fin de ajustar la ración de alimentación. Se utilizaron alimentadores manuales y esta operación fue monitoreada por buzos para minimizar las pérdidas.

#### **Determinación de nutrientes**

Las concentraciones de nutrientes en las muestras de agua se midieron de acuerdo con los métodos estándar. El fósforo reactivo disuelto fue medido por el método de digestión de persulfato y cuantificado por el método de molibdato de vanadato, el amonio fue medido colorimétricamente por el método de fenato, el nitrato fue medido en un espectrofotómetro UV (Thermo Electron Corporation, Madison WI, EE. UU.) Los sólidos suspendidos totales (SST)

se midieron filtrando 2 L de agua a través de un filtro de fibra de vidrio GF/F Whatman prepesado y presecado ( $110^{\circ}\text{C}$  durante 24 h). El filtro se secó en el horno a  $120^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas y se registraron los pesos inicial y final. La concentración de clorofila-a se midió filtrando 2 L de agua de mar superficial a través de un filtro Whatman GF/F de  $1.2\ \mu\text{m}$ , y los filtros se congelaron inmediatamente a  $4^{\circ}\text{C}$  y se almacenaron en la oscuridad. Las muestras fueron maceradas con acetona 90 %, centrifugadas, y los extractos fueron leídos en un espectrofotómetro como se describe en el método tricromático (Eaton *et al.*, 1995).

#### **Análisis estadísticos**

La similitud entre los puntos de muestreo en el tiempo y el espacio se calculó aplicando distancia euclidiana en análisis Cluster y Escalamiento Multidimensional (en inglés, Multidimensional Staging-MDS). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando Primer 5 (PML- Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research, Ivybridge, Reino Unido) y Statgraphics Plus para Windows (Statistical Graphics Corp, Princeton NJ, EE.UU.) Las variaciones en las concentraciones de nutrientes en función de la distancia entre las estaciones de muestreo y la estación de control, así como las variaciones en las concentraciones de nutrientes entre las muestras de superficie y el fondo, se calcularon utilizando ANOVA a dos vías.

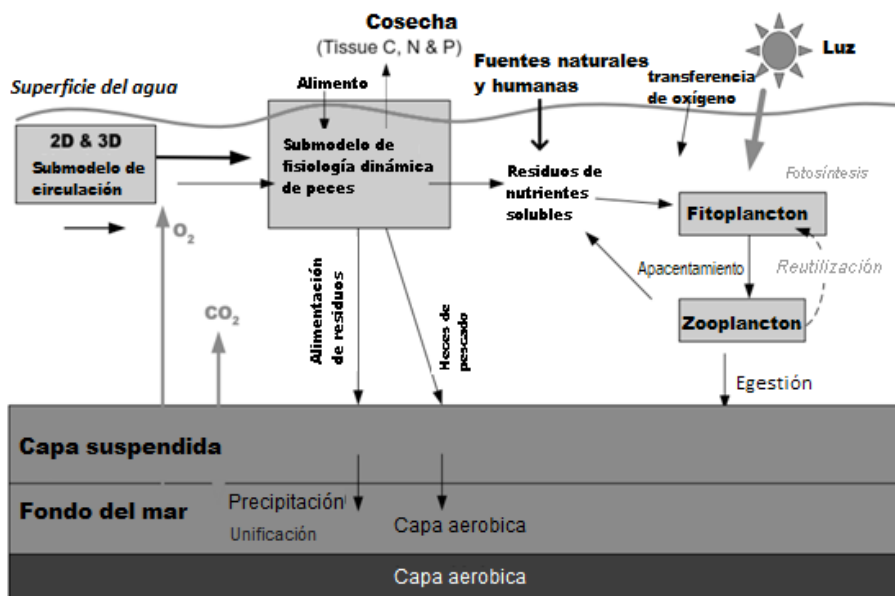
#### **Simulaciones de operaciones acuícolas e impacto en la calidad del agua del ambiente**

El *software* AquaModel es un programa de simulación utilizado para describir y analizar tanto las operaciones del cultivo como su impacto ambiental en aguas costeras o marítimas (Figura 2). El modelo comprende cinco submodelos: 1) circulación, 2) operaciones del cultivo, 3) metabolismo de peces, 4) plancton y 5) bentos.

Cada uno de los submodelos requería entradas específicas como datos de campo, datos oceánicos almacenados e imágenes satelitales, para calcular y generar una variedad de salidas como modelos 4D, gráficos y tablas de parámetros claves incluyendo oxígeno, residuos orgánicos particulados, residuos de nutrientes disueltos, tasa de crecimiento de

peces, biomasa, entre otros. La Tabla 1 resume las entradas y salidas de cada uno de los submodelos. En el *software* AquaModel fueron tabuladas e introducidas las mediciones de la velocidad de la corriente, la temperatura, el oxígeno, los nutrientes nitrogenados, fosfato y clorofila para producir un modelo de simulación de las operaciones y el impacto del cultivo de cobia. Nuestro modelo del cultivo proporcionó

una serie cronológica de mapas de la distribución calculada de las variables de calidad del agua que fueron perturbadas por el cultivo de cobia. Además, también se introdujeron en este modelo de simulación parámetros como la densidad de población, el tamaño de los *pellets*, la tasa de alimentación y la tasa de supervivencia para cada jaula.



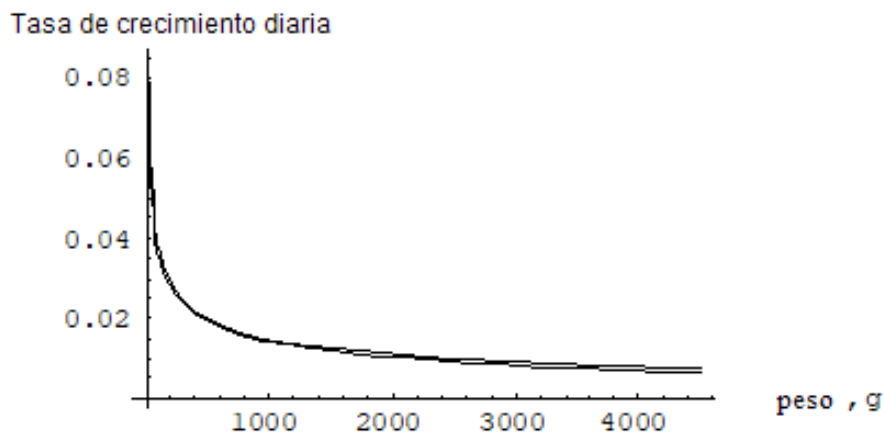
**Figura 2.** Los procesos simulados con el *software* AquaModel de La Granja de cobias de la isla Tierrabomba.

La información sobre el metabolismo de *R. canadum* que se utilizó para calcular o estimar los valores de los coeficientes encontrados en las ecuaciones de la subrutina, provino de dos fuentes. Específicamente, la información sobre el crecimiento se obtuvo de peces silvestres de *Fishbase* <http://www.fishbase.org/search.php>. Los resultados de ajustar nuestro modelo metabólico a la ecuación de crecimiento de Von Bertalanffy mostraron que simplemente ajustando 3 coeficientes en nuestras ecuaciones se podían obtener excelentes ajustes. Por ejemplo, la Figura 3 muestra las tasas de crecimiento específicas máximas de cobia (aumento fraccionario de peso por día) en función del tamaño predicho a partir de la ecuación de Von Bertalanffy presentada en *Fishbase*, que también se predice a partir de la subrutina metabólica de AquaModel.

Para aumentar la precisión de la predicción, se hicieron ajustes al submodelo de crecimiento de cobia y actividad metabólica. Fue posible ajustar las ecuaciones con los datos obtenidos en el cultivo. Las funciones modificadas incluyen la tasa de crecimiento específico/día, el crecimiento específico ambiental y el límite de peso del crecimiento específico. El peso máximo de la cobia se fijó en 6 kg. La tasa específica de crecimiento diario se expresó en términos de peso del pescado, que oscila entre más del 7 % por día en los primeros meses de vida y sólo el 0.5 % por día al final del primer año. La tasa de crecimiento específica de la cobia también varió con la temperatura, oscilando entre un umbral mínimo de crecimiento de 16 °C y un umbral máximo de crecimiento de 33 °C. El crecimiento máximo se fijó a una temperatura de 27 °C.

**Tabla 1.** Resumen de las entradas y salidas de cada uno de los submodelos del AquaModel.

Submodelos					
	Circulación	Operaciones agrícolas	Metabolismo de peces	Plancton	Bentos
Inputs	Velocidad de la corriente Batimetría Condiciones fronteras	<b>Configuración de la granja</b> Especie Ubicación de la jaula (latitud, longitud) Tamaño de la jaula (m <sup>3</sup> ) Densidad de población (número de peces/jaula) Peso medio del pescado en cultivo (kg/pescado) <b>Operaciones acuícolas</b> Tasa de alimentación (kg/día/peso húmedo) Calendario de cosecha (fecha de cosecha) Biomasa en cosecha Porcentaje estimado de pérdida de alimento no consumido de las jaulas	Temperatura del agua Concentración de oxígeno en el ambiente Velocidad de la corriente ambiente	Concentración de oxígeno, nitrógeno inorgánico, clorofila-a	Velocidad de la corriente
Outputs	Series temporales de distribución 3D de la velocidad de la corriente Velocidad de flujo superficial y de fondo	Series temporales de peso, crecimiento, tasa y número de peces dentro de cada jaula	Tasa de crecimiento específico Crecimiento diario específico Tasa de Egestión	Series cronológicas de las concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto y oxígeno, fitoplancton y zooplancton	Seguimiento de partículas y residuos disueltos



**Figura 3.** Tasas específicas de crecimiento de la cobia en función del tamaño individual, calculadas a partir de la ecuación de crecimiento de von Bertalanffy y la subrutina metabólica.

Ensayos previos de laboratorio con la especie cobia son incorporados como hipótesis en esta subrutina, los cuales incluyen ecuaciones para el metabolismo limitado por el oxígeno, una característica clave por su importancia en los cultivos donde los peces se cultivan a densidades relativamente altas y en aguas de concentración moderada o más baja de oxígeno disuelto. El oxígeno disuelto es un factor limitante primario para la capacidad de carga neta de la jaula y, por lo tanto, tiene una consideración de simulación considerable. Los datos sobre la tasa de respiración a diferentes velocidades de natación provinieron de O'Brien, Kiefer y Rensel (2011). Este informe provee una descripción detallada no solo de la subrutina

metabólica de los peces, sino también de todas las subrutinas del *AquaModel*.

## RESULTADOS

### Parámetros de cultivo

Durante el transcurso del estudio, se introdujeron 162 353 peces en las jaulas y consumieron 314 toneladas métricas de alimento. La biomasa inicial fue de 3 toneladas métricas, alcanzando una biomasa total durante el período de estudio de 307 toneladas métricas. Hubo cinco grupos de producción comercial con diferentes tamaños (Tabla 2). La tasa de supervivencia osciló entre el 88 y el 90 %. En la cosecha, el peso promedio fue de  $4.4 \pm 0.3$  kg y la longitud total fue de  $758 \pm 26$  mm.

**Tabla 2.** Producción comercial e ingesta de alimentos de mayo a diciembre de 2011.

Grupo Comercial	Fecha de almacenamiento	Total de alevines	Consumo total de alimento (Kg)	Etapas de cultivo
A	Julio de 2010	32600	101 006	Engorde 2 y cosecha
B	Diciembre 2010	22275	124 250	Engorde 2
C	Abril de 2011	17793	49 326	Engorde 1 y 2
D	Junio de 2011	33014	27 011	Precría y engorde 1
E	Agosto 2011	56671	12 612	Precría y engorde 1

### Corrientes oceánicas en el sitio de la jaula

En total se registraron 12247 datos con el correntómetro en el periodo de muestreo de mayo a diciembre de 2011. En general, la velocidad de corriente promedio fue mayor en el fondo ( $11.4 \pm 7.2$  cm/s) que en la superficie del agua ( $7.9 \pm 4.8$  cm/s) ( $p < 0.05$ ). En mayo se registraron los valores más altos de 82 cm/s en la superficie y 59 cm/s en la parte inferior. El 56 % de las lecturas correspondió a valores de 0 – 10 cm/s, 42 % a partir de 10 – 30 cm/s y solo el 1.6 % de los valores fue superior a 30 cm/s. De mayo a noviembre, se observó una tendencia bidireccional en la superficie, mientras que en la parte inferior fue principalmente unidireccional. De mayo a agosto, las tendencias fueron *NE* tanto en la superficie como en la parte inferior,

y de septiembre a noviembre, las tendencias en la superficie fueron *SO*, mientras que en la parte inferior fueron *E* y *SE*. En diciembre se observó un cambio abrupto en la dirección en la superficie *S*, *NNO*, *SO*, y para la parte inferior *S*, *ONO*, *NO* (Tabla 3). La marea no tuvo influencia en las corrientes de esta región y la variación promedio en el nivel del mar fue de solo 0.5 m, según el pronóstico de la marea alta y baja (CIOH, 2011).

### Variables fisicoquímicas

La temperatura de la superficie varió de 27.4°C a 32.4°C, con valores más altos de junio a noviembre. La temperatura del fondo registrada con el medidor de corriente aumentó de mayo a noviembre,  $27.6 \pm 0.4$  °C a  $29 \pm 0.2$  °C y luego volvió a disminuir (Tabla 4).

**Tabla 3.** Velocidades medias y dirección de la corriente de fondo y de superficie en el cultivo de cobias de mayo a diciembre de 2011.

		Superficie		Fondo	
		Velocidad (cm/s)	Dirección	Velocidad (cm/s)	Dirección
<b>MAY</b>	Promedio	8.6±5.9		9.8±7.2	
	Min	0.0	NW	0.0	NE
	Max	82.0		59.0	
<b>JUN</b>	Promedio	7.1±4.8		9.0±6.1	
	Min	1.0	N	1.0	NE
	Max	21.0		33.0	
<b>JUL</b>	Promedio	6.9±4.6		11.8±8.2	
	Min	0.0	N	0.0	NE
	Max	37.0		59.0	
<b>AGO</b>	Promedio	7.9±4.2		10.9±5.6	
	Min	1.6	E	1.2	E
	Max	23.8		33.8	
<b>SEP</b>	Promedio	8.7±4.9		11.7±7.2	
	Min	1.7	S	1.7	E – SE
	Max	29.2		49.5	
<b>OCT</b>	Promedio	7.6±4.6		12.1±7.9	
	Min	0.0	S -SW	0.0	E – NE
	Max	29.0		43.0	
<b>NOV</b>	Promedio	8.6±4.9		14.3±9.0	
	Min	2.0	S	0.0	E – SE
	Max	33.0		51.0	
<b>DIC</b>	Promedio	8.3±4.9		11.9±6.6	
	Min	1.7	SW	2.3	NW
	Max	36.7		37.8	

El rango de salinidad fue de 23 a 37 PSU, con un promedio de  $3.1 \pm 3.2$  PSU. El valor promedio más bajo en superficie,  $28.3 \pm 4.6$  PSU ocurrió en octubre y noviembre, correspondiente al pico de la temporada de lluvias.

Para los puntos de muestreos verticales, el valor promedio fue de  $30.0 \pm 1.84$ ,  $31.9 \pm 3.3$  en el centro y en la parte inferior  $32.8 \pm 1.8$  UPS en el fondo. Los valores de pH variaron de 7.8 – 8.5 sin variabilidad durante el periodo de muestreo y no fueron afectados por los ciclos estacionales. El valor promedio más bajo  $7.99 \pm 0.11$  se registró en los puntos de muestreo más profundos (valor

de  $p < 0.05$ ), mientras que en el medio fue de  $8.20 \pm 0.12$  y en superficie de  $8.23 \pm 0.11$ .

Los valores de oxígeno disuelto variaron de 4.32 a 6.79 mg/L, el promedio más bajo de  $5.2 \pm 0.4$  se encontró durante la temporada de lluvias, principalmente en octubre y noviembre. Los valores de OD también variaron según su distribución vertical con los valores más bajos en la parte inferior,  $5.0 \pm 0.52$  mg/L, y los más altos en la superficie,  $5.8 \pm 0.4$  mg/L. Los niveles de OD dentro de las jaulas promediaron  $5.6 \pm 0.3$  mg/L en la mañana (08:00) y  $5.7 \pm 0.2$  en la noche (17:00).



**Tabla 4.** Variables fisicoquímicas (temperatura, salinidad, nutrientes y sólidos suspendidos) reportadas en el área de estudio.

Variable	Variación vertical (valor-p <0.05)	Variación horizontal (valor-p <0.05)	Variación estacional y mensual (valor-p <0.05)	Max	Min	Temporada	Alcance
Transparencia (m)		z	** Lluvias Oct - Nov	15.0	3.0	Transición	10.42 ± 1.52
						Lluvias	5.63 ± 2.51
						Seca	14.88 ± 0.25
pH	** Fondo	** EP1-B	** Seca Diciembre	8.46	7.81	Transición	8.06 ± 0.1
		EP2-B				Lluvias	8.16 ± 0.17
		EP3-B				Seca	8.30 ± 0.04
		EP4-B					
Salinidad (UPS)	** Superficie	** EP1-S	** Lluvias Oct - Nov	37	23	Transición	32.29 ± 1.54
		EP2-S				Lluvias	30.46 ± 4.08
		EP3-S				Seca	32.09 ± 1.16
		EP4-S					
Temperatura (°C)	** Fondo	** EP1-B	** Transición Mayo	32.4	26.4	Transición	29.35 ± 1.38
		EP2-B				Lluvias	29.49 ± 0.72
		EP3-B				Seco	28.58 ± 0.20
		EP4-B					
O.D. (mg/L)	** Fondo		** Lluvias Oct - Nov	6.79	4.32	Transición	5.70 ± 0.53
						Lluvias	5.31 ± 0.58
						Seca	5.57 ± 0.64
TSS (mg/L)			** Lluvias Oct - Nov	33.0	7.5	Transición	17.0 ± 4.8
						Lluvioso	21.7 ± 6.4
						Seca	9.7 ± 1.5
Nitrato (µg at N /L)	** Fondo		** Lluvias Sep - Nov	5.09	0.25	Transición	0.91 ± 0.47
						Lluvioso	2.24 ± 0.99
						Seca	0.78 ± 0.48
Nitrito (µg at N/L)			** Transición Agosto	0.19	0.04	Transición	0.09 ± 0.02
						Lluvias	0.11 ± 0.04
						Seca	0.11 ± 0.01
Amonio (µg at N/L)			** Lluvias Oct - Nov	33.21	5.81	Transición	8.91 ± 1.40
						Lluvas	18.62 ± 9.85
						Seca	11.82 ± 0.91
DIN (µg at N /L)		**EP1	** Lluvias Oct - Nov	37.16	6.22	Transición	9.91 ± 1.62
		EP2				Lluvias	20.97 ± 10.61
		EP3 EP4				Seca	12.71 ± 1.01
Reactivo Fósforo (µg at P/L)	** Superficie	** EP1-S	** Lluvias Sep - Nov	1.55	0.04	Transición	0.62 ± 0.24
		EP2-S				Lluvias	0.79 ± 0.44
		EP3-S EP4-S				Seca	0.43 ± 0.23
Clorofila-A (mg/m <sup>3</sup> )			** Seca Diciembre	1.3	0.2	Transición	0.58 ± 0.12
						Lluvioso	0.34 ± 0.09
						Seca	0.94 ± 0.24

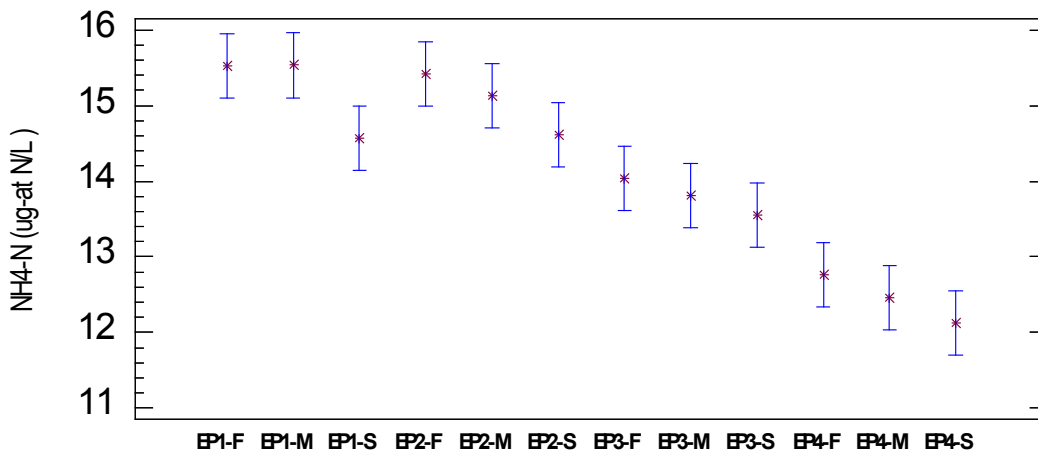
### Sólidos suspendidos

No se encontraron diferencias significativas en la distribución vertical y horizontal de sólidos suspendidos totales (SST), pero hay cambios temporales. Los valores fueron afectados fuertemente por las descargas del canal El Dique en octubre y noviembre en las cuatro estaciones. Durante la temporada de lluvias los SST tuvieron un promedio de  $21.7 \pm 6.4$  mg/L, mientras que en la transición y en la estación seca, los valores promedio de SST fueron  $17.0 \pm 4.8$  y  $9.7 \pm 1.5$  mg/L, respectivamente (Tabla 4).

### Nutrientes y productividad primaria

Los niveles de amonio variaron de 5.8–33.2  $\mu\text{g-at N/L}$ , los niveles de nitrato de 0.2–5.1  $\mu\text{g-at N/L}$  y nitrito de 0.04 – 0.19  $\mu\text{g-at N/L}$ . Estos rangos son particularmente altos y reflejan

el efecto de las aguas residuales y el drenaje de las distintas actividades industriales en la ciudad de Cartagena. Para los tres compuestos, las concentraciones variaron significativamente con los ciclos estacionales y las estaciones de muestreo. En términos de la distribución horizontal de los puntos de muestreo, los compuestos de nitrógeno fueron significativamente más altos en los puntos más cercanos a las jaulas (valor de  $p < 0.05$ ) particularmente a una profundidad de 5 y 30 m. La fracción de nitrato varió significativamente en la profundidad con un promedio más bajo en el fondo. El Nitrógeno Inorgánico Disuelto (en inglés, Dissolved Inorganic Nitrogen-DIN) fue en gran parte fracción de amonio, generalmente del 70 %, y fue mayor durante la temporada de lluvias con un valor promedio de  $21 \pm 11$   $\mu\text{g-at N/L}$ . Se encontró una tendencia horizontal para el amonio, con valores más bajos en las estaciones EP3 y punto de control EP4 (valor de  $p < 0.05$ ) (Figura 4).

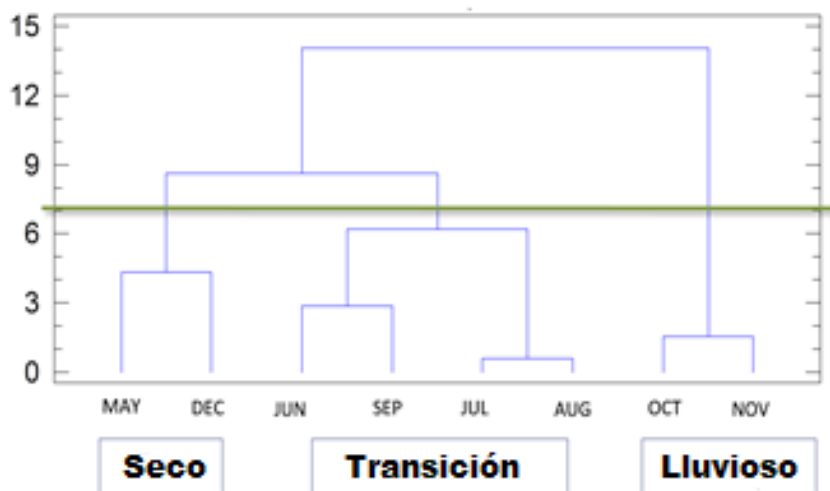


**Figura 4.** Variación del amonio con valores más altos en EP1 y EP2 más cercanos al cultivo. B= Inferior, M= Medio, S= Superficie.

El fósforo osciló 0.04 – 1.55  $\mu\text{g-at P/L}$  con un promedio de  $0.68 \pm 0.37$   $\mu\text{g-at P/L}$ . Los valores más altos ocurrieron durante la transición  $0.6 \pm 0.2$  y la temporada de lluvias  $0.8 \pm 0.4$ , y los valores más bajos ocurrieron durante la temporada seca  $0.4 \pm 0.2$   $\mu\text{g-at P/L}$ . En términos de distribución vertical, el promedio más bajo fue en aguas superficiales  $0.44 \pm 0.24$ , mientras que los valores más altos se encontraron en profundidades intermedias  $0.69 \pm 0.30$  y en la

parte inferior de  $0.92 \pm 0.40$   $\mu\text{g-at P/L}$ .

Los valores de concentración de clorofila-a oscilaron entre 0.2 – 1.3  $\text{mg/m}^3$ . Durante octubre y noviembre, la concentración de clorofila-a fue menor  $0.3 \pm 0.1$   $\text{mg/m}^3$ , coincidiendo con los altos valores de SST y el aumento de las descargas desde el canal El Dique. La clasificación temporal de los parámetros mostró la formación de tres grupos (Figura 5).



**Figura 5.** Dendrograma de análisis temporal para nitrógeno inorgánico disuelto (DIN) y fósforo aplicando distancia euclidiana.

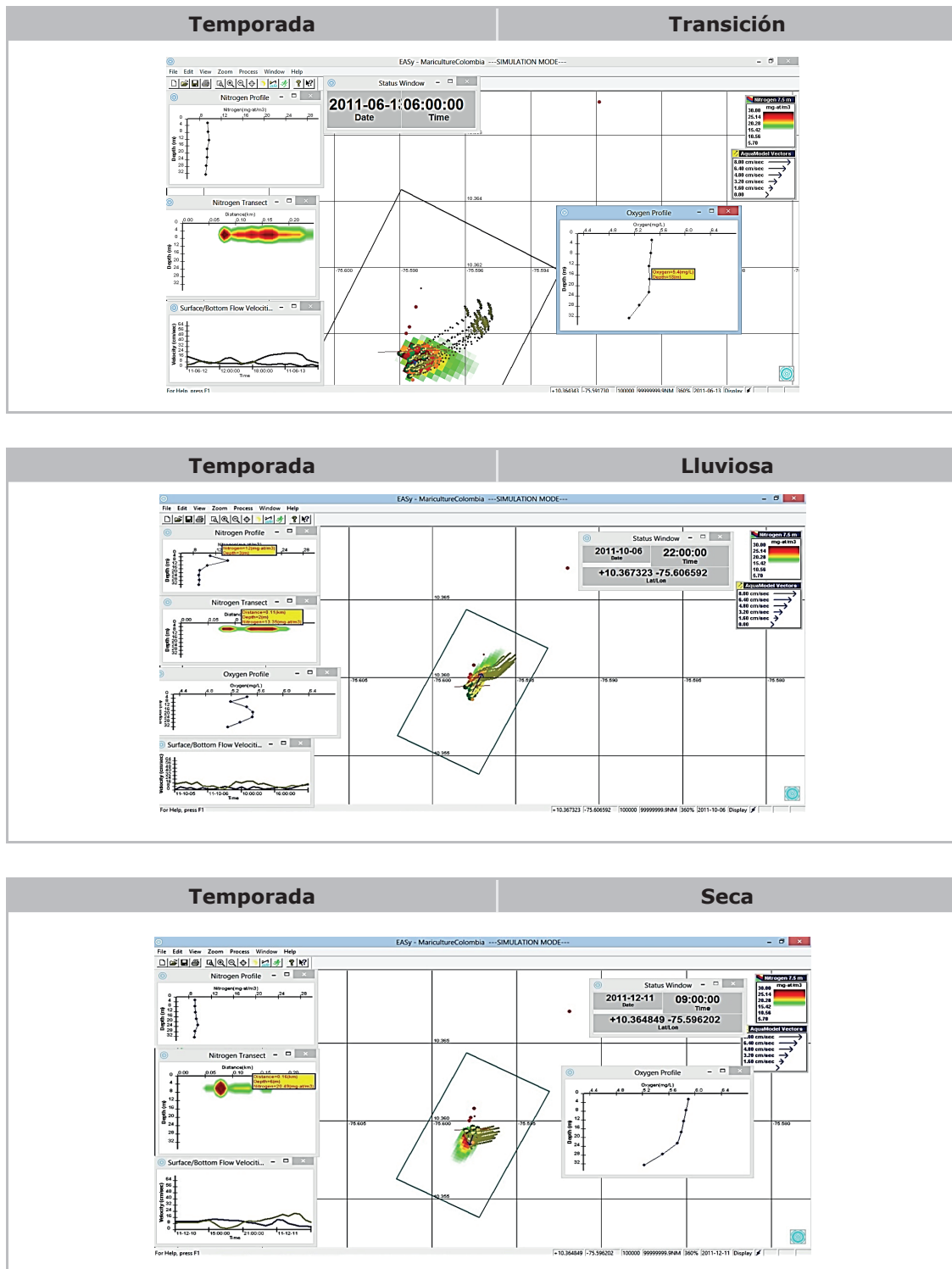
1. En octubre y noviembre, los valores de NID,  $30.8 \pm 4.3 \mu\text{g-at N/L}$ , fueron los más altos originados por la mayor descarga del canal El Dique, impulsada por las fuertes precipitaciones.
2. Mayo, que se considera el periodo de transición, mostró valores más bajos de fósforo de  $0.56 \pm 0.2 \mu\text{g-at P/L}$ . Situación similar se presentó en diciembre respecto a este parámetro.
3. De junio a septiembre las concentraciones de NID y fósforo aumentaron moderadamente. De nuevo, se esperaba un aumento debido a la dinámica e interacción del canal El Dique y la bahía de Cartagena. La variación espacial también mostró diferencias significativas (valor de  $p < 0.05$ ) entre las estaciones de muestreo, con valores más altos en EP1 y EP2 que estaban más cerca de las jaulas, y una disminución progresiva en estaciones más alejadas de las jaulas (Figura 4).

#### Modelo

El modelo de simulación del cultivo de cobia requirió de 3 horas para completar sus

cálculos, pero los resultados de estos cálculos se almacenaron en un archivo binario que luego se ejecutó en menos de 10 minutos.

En la Figura 6 se muestran tres instantáneas de las simulaciones, una para cada una de las 3 estaciones climáticas. En estas figuras se ve un mapa base, 2 leyendas, 4 gráficos y una ventana de estado con la hora, fecha y las coordenadas del centro del mapa. El mapa base contiene un rectángulo que marca el límite de la matriz computacional de la simulación. Dentro de este rectángulo, se pueden ver puntos rojos, los cuales son las estaciones de muestreo. Un punto rojo adicional está fuera del rectángulo y corresponde a la estación de control. La imagen de trama de falso color muestra la distribución de nitrógeno inorgánico disuelto a una profundidad de 5 metros que se produce por la excreción de amoníaco y urea de los peces cultivados en los tres puntos de muestreo. El código de color de NID se encuentra en la esquina superior derecha de la imagen. La línea roja transecta la columna de NID, y la distribución de NID a lo largo de esta línea se muestra en el gráfico de la izquierda que es el segundo desde el gráfico superior.



**Figura 6.** Capturas instantáneas de pasos temporales seleccionados en la simulación AquaModel del cultivo en Tierrabomba. Las fechas y la hora de estos pasos de tiempo se muestran en la ventana de estado en la esquina superior derecha. Los 3 pasos ocurren dentro de las estaciones de transición, lluviosa y seca. Ver el texto para una descripción del mapa base, los gráficos y la leyenda.

La línea de puntos verdes muestra la trayectoria de las heces producidas por los peces enjaulados a medida que se transportan a los sedimentos; la línea de puntos amarillos muestra la trayectoria de los alimentos no consumidos desde las jaulas hasta los sedimentos. El alimento no consumido tiene una tasa de hundimiento mucho mayor que las heces y, por lo tanto, se deposita más cerca de las jaulas. Tanto el alimento no consumido como las heces proporcionan alimento a la comunidad bentónica en las cercanías del cultivo. Estos materiales de desecho también pueden transportarse más lejos del cultivo si las corrientes de fondo exceden un valor de umbral.

La flecha azul en el centro del mapa base es un vector cuya longitud y dirección están determinadas por la velocidad de las corrientes de superficie, medidas por el correntómetro acústico Doppler utilizado durante el período de muestreo. La gráfica en la esquina inferior izquierda de la figura muestra las series de tiempo de la velocidad en la superficie y en el fondo. Finalmente, el gráfico en la esquina superior izquierda de la figura es un perfil de la distribución vertical de NID en la ubicación indicada por el punto naranja, y el gráfico a la izquierda de la figura es un perfil de la distribución vertical de oxígeno en la ubicación indicada por el puntero.

A medida que los desechos disueltos producidos por los peces se transportan fuera de la granja, son asimilados por el plancton, y los desechos particulados que consisten en heces y alimentos no consumidos se hunden a medida que las corrientes se alejan de la granja. Estos desechos se depositarán en el sedimento, se resuspenden y se transfieren más allá del cultivo y finalmente se asimilan y remineralizan por organismos bentónicos y otros.

El modelo describe estos procesos para tres elementos trazadores, oxígeno, nitrógeno y carbono. El oxígeno es el más importante ya que la alta densidad de peces dentro de la granja puede reducir significativamente su concentración tanto dentro del cultivo como en la columna de agua por los residuos disueltos que se forman en la medida que se aleja de este. La concentración de oxígeno dentro del cultivo puede afectar el crecimiento y la actividad metabólica de los peces y variará de acuerdo con las concentraciones

ambientales, el tamaño y la densidad de población de cobia en el cultivo, la actividad de los peces y la velocidad del flujo de agua a través de la granja. La concentración de oxígeno dentro de la columna de residuos disueltos se restaurará a la concentración ambiental a una velocidad determinada mediante la mezcla turbulenta, la tasa de fotosíntesis por el fitoplancton, y en la superficie por la tasa de intercambio de gases. Como se analiza a continuación, el oxígeno también es muy importante para la salud de la comunidad bentónica debajo del cultivo.

El nitrógeno también es importante ya que en muchos ambientes tropicales o semitropicales, y en algunas estaciones en mares templados, puede limitar el crecimiento de fitoplancton en aguas costeras. La carga de nutrientes de la columna de agua puede causar la proliferación de algas y posiblemente la proliferación de algas dañinas. La concentración de nitrógeno dentro de la granja variará con las concentraciones ambientales, el tamaño y la densidad de población de la granja, la actividad metabólica de los peces y la velocidad del flujo de agua a través de la granja. La concentración de nitrógeno dentro de la columna de residuos disueltos se restaurará a la concentración ambiental a una velocidad que se determinará mediante la mezcla turbulenta y la tasa de absorción de nitrógeno de la fotosíntesis por fitoplancton.

El carbono es el tercer componente importante porque el suministro de carbono particulado de las heces y los alimentos no ingeridos a los sedimentos se respira en los organismos béticos y puede provocar el agotamiento del oxígeno de los sedimentos intersticiales. Si la carga de carbono de los sedimentos crea una demanda de oxígeno que excede su suministro de las aguas que lo recubren, los sedimentos pueden volverse anaeróbicos, causando cambios dramáticos en la comunidad bentónica, así como la producción de sulfuro de hidrógeno y otros compuestos reducidos que se mezclarán con las aguas superpuestas.

## DISCUSIÓN

La acuicultura intensiva de peces se ha asociado con la producción de altas cargas de nutrientes disueltos y materia orgánica particulada, que afectan el medioambiente circundante, causando

la proliferación de algas nocivas y la deposición de sedimentos en el fondo marino debajo de las jaulas. Incluso pueden causar pérdida de biodiversidad en las comunidades bentónicas, como se ha documentado en Tolo Harbor o Bolinao en Asia, (San Diego *et al.*, 2008) (Lee y Wong, 1997). Desde la perspectiva del acuicultor, la producción de desechos resulta importante ya que la rentabilidad del cultivo depende en parte de si los peces se alimentan adecuadamente sin desperdiciar alimentos caros y ricos en nutrientes. Tanto los muestreos *in situ* como los modelos de simulación, han identificado que los principales efectos negativos son la deposición de sedimentos en el lecho marino y el incremento de amonio y fósforo por la continua descarga de desechos durante todo el año particularmente en áreas que concentran una alta producción con miles de toneladas por año (Naylor y Burke, 2005; Seymour y Bergheim, 1991).

Antes de establecerse el cultivo un análisis global de las condiciones generales del sitio revelaba la presencia de altas cargas de nutrientes en el medio, de hecho los datos históricos (Tabla 5) reportados por Lonin, Parra, Andrade y Thomas, 2004 y Tuchkovenko y Lonin, 2003. De esos estudios, fue evidente que el sitio recibe tanto la influencia del agua de la bahía de Cartagena como la descarga del canal El Dique, particularmente durante la temporada de lluvias. La información histórica disponible mostró una descarga de nitrato total promedio desde el canal El Dique de  $12.0 \times 10^3$  ton / año y fosfato total  $3.0 \times 10^3$  ton / año. Tal eutrofización en las áreas costeras por el aumento de las actividades humanas es, de hecho, una situación que se ha registrado en todo el mundo. Tales procesos también conducen a desequilibrios de flujo de nitrógeno y fósforo (Islam y Tamaka, 2004). Este fenómeno a lo largo de la costa de Cartagena muestra un aumento sostenido en las últimas décadas, alcanzando valores de nitrato en  $\sim 8$  mg / L y nitrógeno total de 20 a 30 mg -en / L (Cloern, 2001).

Las variaciones en los niveles de nutrientes en el cultivo de cobia y en la estación de control se explicaron principalmente por cambios estacionales en el medioambiente y no por las actividades de la piscicultura. Las concentraciones de nitrato, amonio y fósforo fueron significativamente más altas durante la temporada de lluvias. Una fase de frío atmosférico durante 2011 provocó un aumento

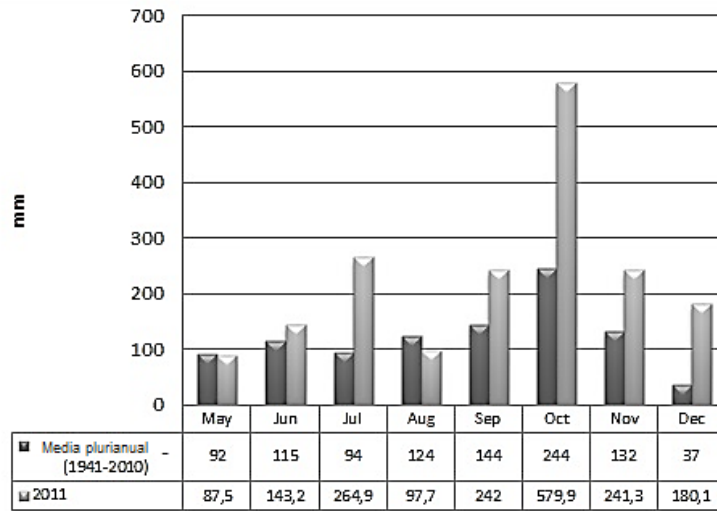
significativo de las precipitaciones tanto en el interior como en la costa (Figura 7) y, por lo tanto, las descargas desde el canal El Dique aumentaron significativamente. En contraste, los valores de clorofila-a aumentaron durante la estación seca  $0.94 \pm 0.24$  mg / m<sup>3</sup>. La relevancia de las estaciones climáticas en la carga de nutrientes para piscifactorías también ha sido reportada por Ruiz *et al.*, (2001) y Maldonado *et al.*, (2005).

En términos del efecto neto del sitio de cultivo, el análisis de nutrientes de las diferentes estaciones de muestreo reflejó un aumento de las cargas de nitrógeno y fósforo hasta 100 metros de la jaula, y ninguna influencia más allá de ese punto. El perfil de nitrógeno para un punto situado a 300 m de la granja mostró valores que oscilaban entre 8 y 14  $\mu\text{g} - \text{at N/L}$ . Hay varias razones por las que la producción de NID por el cultivo no causa florecimientos de fitoplancton. En primer lugar, la pluma de nutrientes es demasiado pequeña y demasiado transitoria para conducir a un afloramiento. En segundo lugar, la concentración de NID en las aguas ambientales ya supera el umbral de las tasas de crecimiento saturadas de fitoplancton. Tercero, el fosfato en lugar de NID parece ser el nutriente limitante para el crecimiento del fitoplancton, no el nitrógeno. La mayor parte del fosfato producido por el cultivo de cobia se pierde como alimento no consumido y heces, por lo tanto se transporta a los sedimentos o aguas profundas donde el crecimiento de fitoplancton se ve limitado por la luz. La alta carga de sedimentos por el canal de El Dique durante la estación lluviosa interfiere con la incidencia de la luz solar en la columna de agua.

De acuerdo con las simulaciones, a pesar de la variabilidad estacional, el flujo de agua enriquecida con NID en la corriente predominante del cultivo nunca llegó a más de 300 metros durante un largo período de tiempo. Además, esta pluma nunca llegó a más de 12 metros de profundidad. Aunque el modelo predijo aumentos significativos de NID dentro del cultivo, la concentración de NID disminuyó rápidamente y los residuos disueltos fueron transportados lejos del cultivo. La simulación también indica que bajo la densidad de población de los peces y las condiciones ambientales de la velocidad de la corriente y las concentraciones de oxígeno, las tasas de crecimiento de la cobia nunca estuvieron limitadas por los niveles de oxígeno dentro de las jaulas.

**Tabla 5.** Información previa sobre nutrientes y otras variables en la columna de agua y en las condiciones físicas cerca del sitio de cultivo (Sampling Station Invemar 10.3623505 / -75.5999069).

	<b>Variable</b>	<b>Valores</b>
<b>Calidad del agua</b>	Nitratos (NO <sub>3</sub> )	Seca 1.19 µg-at/L
		Lluvias 0.78 µg-at/L
	Amonio (NH <sub>4</sub> )	Seca 4.18 µg-at N/L
		Lluvias 17.34 µg-atN/L
	NID	Seca 5.88 µg-at/L
		Lluvias 27.41 µg-at/L
	Fósforo reactivo	Seca 0.66 µg-at/L
		Lluvias 1.07 µg-at/L 1
	TSS	Seca 30.1 mg/L
Lluvias 40.7 mg/L		
Oxígeno disuelto (OD)	Seca 7.2 mg/L	
	Lluvias 6.8 mg/L	
Transparencia	Seca 20-25 m	
	Lluvias 15 - 18 m	
Salinidad	Seca 35 ‰	
	Lluvias 32 ‰	
	22-33 ‰ Superficie 35 ‰ Abajo	
<b>Fondos marinos</b>	Composición	Arcilla 86 %
<b>Condiciones físicas y meteorológicas</b>	Dirección de la corriente	Seca N - NE
		Lluvias E-SE
	Velocidad media actual (6m de profundidad)	11.5 cm/s
	Profundidad	30-45 m
	Velocidad media del viento	8 Nudos



**Figura 7.** Gráfico comparativo de las precipitaciones de 2011 frente al promedio plurianual de la región (CIOH, 2011).

A partir de la experiencia de la acuicultura en otros países, la presencia de corrientes permanentes con velocidades medias de un nudo (~50 cm/s) ha sido un parámetro clave para la selección del emplazamiento; estos caudales proporcionan un suministro adecuado de oxígeno y garantizan la dilución de los nutrientes producidos por la explotación. Se observó que en condiciones extremas, cuando la velocidad de la corriente supera los 30 cm/s hacia el noreste, el rastro de heces llega a la estación de control a 1 km de distancia del sitio de cultivo. Bajo condiciones extremas, cuando la velocidad de la corriente era baja y la jaula de engorde estaba cerca del pico máximo de biomasa y de cosecha, la concentración de oxígeno dentro de la jaula era de 4.4 mg/L. Este valor está por encima del umbral que comienza a limitar la tasa de crecimiento de la cobia.

El modelo de simulación de cobia produjo cálculos que tenían un alto grado de concordancia con los datos del muestreo. Las jaulas generaban material orgánico particulado compuesto principalmente de heces y alimentos no consumidos. A partir del modelo se calculó una pérdida del 5 % de los alimentos suministrados diariamente. En la simulación fue posible trazar la trayectoria de los residuos de alimentos y las heces en la dirección de la corriente predominante. Un estudio realizado en piscifactorías del Mediterráneo demostró que hasta un 80 % del material particulado que escapaba de las jaulas era consumido por peces salvajes antes de llegar al fondo (Vita *et al.*, 2004). En nuestro

estudio, también encontramos un aumento en las comunidades de peces alrededor de las jaulas, desde que se estableció el cultivo. Puede deberse a la atracción por estructuras de anclaje y/o a la utilización de los residuos generados. Sin embargo, la comprensión de la dinámica de la interacción entre la vida silvestre y la cultura es objeto de otro estudio y tales procesos no se incluyeron en la simulación.

El modelo de cobia también predijo que las concentraciones de oxígeno se mantendrían por encima de 5.2 mg / L durante todo el período de muestreo. Los registros tomados por el productor dentro de la jaula estaban de acuerdo con el modelo. Sin embargo, observamos que durante el período de alta influencia del canal El Dique, se detectó una ligera disminución en el oxígeno debido a una disminución en la producción de fitoplancton (Cañón, Tous, López y Orozco, 2007). Tal proceso no fue simulado en nuestros ciclos.

Mientras que el modelo calculaba un peso máximo de 6 kg de crecimiento después de un año, las mediciones de campo indicaban que la población general tenía un peso medio de 4.4 kg después de un año. Sin embargo, esta diferencia podría explicarse por el dimorfismo sexual encontrado en la población, siendo las hembras significativamente mayores que los machos. En este sentido, el modelo sería ideal para explicar el crecimiento en una población monosexual femenina, la cual alcanzará su ecuación de peso potencial objetivo en su primer año.



En este estudio se encontró que del 60 al 70 % de esta fracción corresponde al amonio, lo que es consistente con la información biológica de la cobia. Esta especie crece muy rápido y por lo tanto excreta la urea a un ritmo alto. Los estudios indican que la urea se degrada rápidamente a amonio (Sun y Chen, 2009). A pesar de la alta tasa de producción de NID en las jaulas, las velocidades actuales en la granja oscilaban entre los 7 y los 50 cm/s. Los cálculos indican que dicho flujo reemplazaba continuamente el volumen total de la jaula a un ritmo de 13-327 veces por minuto, respectivamente.

Hemos comparado los resultados encontrados durante nuestra investigación con granjas con niveles similares de producción, como las reportadas para Grecia y las granjas españolas (Tabla 6). Según los informes del Mediterráneo Occidental, el fitoplancton en las aguas ambientales de las piscifactorías está limitado por el fósforo en lugar del nitrógeno, y las algas y las bacterias asimilan rápidamente los nutrientes disueltos de las jaulas. Cabe destacar que estas granjas cultivan principalmente lubina y dorada, especies que crecen hasta alcanzar un peso de 0.5 a 1.5 kg en un año, significativamente inferior al de la cobia.

**Tabla 6.** Resultados comparativos de nutrientes en diferentes experiencias de acuicultura de peces marinos en alta mar.

Autor	Especie	Nombre común	Sitio	Característica trófica	Condiciones oceanográficas	Número de jaulas y producción anual	Nutrientes en el agua de columna	
Estudio actual	<i>Rachycentron canadum</i>	Cobia	Isla Tierrabomba Colombia Mar Caribe	Eutrófica	A 500 m de la costa	8 jaulas	Nitrato 0,25-5,09 µg aN/L	
					Profundidad 35 m		400 toneladas/año	Amonio 5.81-33.21 µg aN/L
Mantzavarakos y otros, 2007.	<i>Sparus aurata</i>	Besugo	Isla Plateia	Gradiente de clorofila de sur a norte	150 m de la costa	350-400 toneladas/año	Amonio 0.4-2.2 µg-atN/L	
	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Lubina	Grecia		Profundidad 40 m		Fósforo reactivo 0.04-1.55 µg-atP/L	
Mejía, 2005	<i>Rachycentron canadum</i>	Cobia	Isla Culebra	Oligotrófico	3 km de la costa	2 jaulas	Amonio 0.21-2.29 µg-atN/L	
	<i>Lutjanus analis</i>	Huachinango	Puerto Rico		Profundidad 28 m		40 ton/año	Fosfato total 0.06-0.45 µg-atP/L
					Mar Caribe			
Maldonado y otros, 2005	<i>Sparus aurata</i>	Besugo	Costa Este	P-limitado	Profundidad 21-37 m	8-18 jaulas	Nitrato 0.5-4 µg/atN/L	
	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Lubina	España				Mar Mediterráneo	40-549 toneladas/año

En referencia al cultivo de la cobia, hay un reporte de crecimiento de cobia en 2 jaulas sumergidas en aguas abiertas de la isla Culebra, Puerto Rico. Durante el período 2002-2003, Mejía (2005) registró corrientes superficiales en esta finca de 20 a 30 cm/s. También encontró que los valores para la concentración de amoníaco variaban de 0.21 - 2.29  $\mu\text{g} \cdot \text{at N/L}$ , y los valores para el fósforo variaban de 0.06 a 0.45  $\mu\text{g} \cdot \text{at P/L}$ . Estos valores son significativamente más bajos que los que medimos. Esta diferencia puede explicarse por el hecho de que la granja de cobias de Puerto Rico estaba ubicada en aguas oligotróficas, cerca de arrecifes de coral, y sin contribuciones significativas de aguas continentales durante la mayor parte del año. Por el contrario, como se ha descrito anteriormente, el cultivo cobia estudiado en la presente investigación está fuertemente influenciado por el canal El Dique y la bahía de Cartagena, por lo que puede considerarse un sistema eutrófico.

## CONCLUSIONES

Durante el período de ocho meses de este estudio, se cultivaron 307 toneladas métricas de cobia. Esta producción es impresionante, y se explica mejor por un programa de alimentación adecuado para los peces y el suministro continuo de oxígeno a la jaula por las corrientes continuas pero moderadas que se encuentran en las aguas costeras de Tierrabomba. Las tasas de crecimiento fueron altas a pesar de que la velocidad media mensual actual nunca fue superior a 8 cm/s.

La información recogida en el campo y los mapas tridimensionales de las variables de calidad del agua calculadas con el modelo de simulación de cobia permitieron visualizar en detalle la dinámica espacial y temporal del metabolismo de los peces y la producción de residuos en la granja. Tanto las mediciones de campo como la simulación del modelo revelaron una rápida dilución de nutrientes en la parte inferior de las jaulas, y no se produjo hipoxia dentro de las jaulas.

Las fuertes precipitaciones debidas a la fase de frío atmosférico durante el año 2011 provocaron grandes aumentos en las descargas por el canal de El Dique. Este aumento en la descarga condujo a un aumento tanto de la turbidez como

de las concentraciones de nutrientes en las aguas receptoras; sin embargo, tales aumentos no tuvieron ningún impacto en la finca.

Los cálculos con la simulación del cultivo de cobia en términos de oxígeno, nutrientes y concentraciones de clorofila-a fueron consistentes con los encontrados durante el estudio de campo. Este acuerdo indica que a pesar de la naturaleza dinámica del cultivo y de las condiciones de las aguas costeras, el modelo de simulación proporciona una buena descripción del crecimiento y metabolismo del cultivo de peces, así como de la concentración de nutrientes y oxígeno a medida que se aleja del cultivo. El *software* AquaModel, el cual proporciona una descripción espacial y temporal completa y detallada, parece estar muy avanzado respecto a los modelos de simulación anteriores de producción de residuos por parte de las piscifactorías. Parece ser una herramienta atractiva para gestionar la concesión de licencias y el seguimiento de los cultivos de peces marinos.

## RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por Colciencias con el proyecto No 6507-403-20577 y el Centro de Investigaciones Acuícolas de Colombia - Ceniagua. Extendemos nuestro especial agradecimiento al personal y la tripulación de Antillana. Con Invemar, por la base de datos de RedCam, y del mismo instituto, a Daniel Rozo y su equipo por curso de formación en SIG. Reconocimiento especial a Fernando Marimón que colaboró con el monitoreo de campo y el análisis estadístico y a la doctora Marcela Salazar por las contribuciones a la estructura de este artículo.

## REFERENCES

- Alongi, D. M., Chong, V. C., Dixon, P., Sasekumar, A., y Tirendi, F. (2003). The influence of fish cage aquaculture on pelagic carbon flow and water chemistry in tidally dominated mangrove estuaries of peninsula Malaysia. *Marine Environmental Research*(55), 313-33.
- Benetti, D. D., O'Hanlon, B., Rivera, J. A., Welch, W. A., Maxey, C. y Orhun, M. R. (2010). Growth rates of cobia (*Rachycentron canadum*) cultured in open ocean submerged cages in the Caribbean. *Aquaculture*, 195-201.

- Cañón, M. L., Tous, G., Lopez, K. y Orozco, F. (2007). Variación espacio temporal de los componentes fisicoquímicos, zooplanctónico y microbiológico en la Bahía de Cartagena. *Boletín Científico CIOH*(25), 120-134
- CIOH. (2011). Enero a Diciembre. *Boletín Meteorológico Mensual del Caribe colombiano*(187 - 197), 1-25.
- CIOH. (2005). Régimen de vientos y corrientes. Bahía de Cartagena. Cartagena: Central de Pronósticos Meteorológicos y Oceanográficos.
- Cloern, J. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223-253.
- Corner, R. A., Brooker, A. J., Telfer, T. C., y Ross, L. G. (2006). A fully integrated GIS-based model of particulate waste distribution from marine fish-cage sites. *Aquaculture*, 299-311.
- Cromey, C.J., T.D., Nickell y Black K.D. (2002). DEPOMOD-modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture*, 214(1-4), 211-239.
- Eaton, A., Clesceri, L. y Greenberg, A. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, United States of America: APHA-AWWA-WEF.
- Feeley M., D. B. (2007). Elevated oxygen uptake and high rates of nitrogen excretion in early stages of the cobia *Rachycentron canadum* (L.), a fast-growing subtropical fish. *Journal of Fish Biology*(71), 1662-1678.
- Franks J.S., J.R., Warren y Buchanan M.V. (1999). Age and growth of cobia, *Rachycentron canadum*, from the northeastern Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin*, 97(3), 459-471.
- Islam, M. y Tamaka, M. (2004). Impacts of pollution on coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*(48), 624-649.
- Lee, J. W. y Wong, P. S. (1997). Water quality model for mariculture management. *Journal of Environmental Engineering*, 1136-1141.
- Lonin, S., Parra, C., Andrade, C., y Thomas, Y. (2004). Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. *Boletín Científico CIOH*(22), 77-89.
- Maldonado, M., Carmona, M. C., Echeverri, Y., y Riesgo, A. (2005). The environmental impact of Mediterranean cage fish farms at semi-exposed location: does it not need a re-assessment? *Helgoland Marine Research*, 59: 121-135.
- Mantzavrakos, E., Kornaros, M., Lyberatos, G., y Kaspriisa, P. (2007). Impacts of a marine fish farm in Argolikos Gulf (Greece) on the water column and the sediment., 210, págs. 110-124.
- O'Brien, F., D. Kiefer and J.E. Jack Rensel (2011). *Aquamodel: Software for Sustainable Development of Open Ocean Fish Farms*. (Island of Hawaii, moi and cobia physiology). U.S. Department of Agriculture: Small Business Innovation Research Final Report Prepared by System Science Applications, Inc. Irvine, CA.
- Olivero, J., Navas, V., Perez, A., Solano, B., Acosta, I., Arguello, E., *et al.*, (1997). Mercury levels in muscle of some fish species from the Dique Channel, Colombia. *Bull. Environm. Contam. Toxicol.*(58), 865-870.
- Rensel, J., D., Kiefer, F., O'Brien, M., Rust, T., Scott, y. Carter, C. (2010). *Bioenergetics of cobia and moi: Applications to offshore culture and modeling*. World Aquaculture Society. Aquaculture 2010. San Diego.
- Rodrigues, R. V., Schwarz, M. H., Delbos, B. C. y Sampaio, L. A. (2007). Acute toxicity and sublethal effects of ammonia and nitrite for juvenile cobia *Rachycentron canadum*. *Aquaculture*(271), 553-557.
- San Diego-McGlone, M. L., Azanza, R. V., Villanoy, C. L. y Jacinto, C. S. (2008). Eutrophic waters, algal bloom and fish kill in fish farming aereas in Bolinao, Pangasinan, Phillipines. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 295-301.
- Seymour, E. A. y Bergheim, A. (1991). Towards a reduction of pollution from intensive farming

- of salmonids in Norway. *Aquacultural Engineering*, 10(2):73-88.
- Sun, L. y Chen, H. (2014). Effects of water temperature and fish size on growth and bioenergetics of cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquaculture*, (426-427): 172-180.
- Sun, L. y Chen, H. (2009). Effects of ration and temperature on growth, fecal production, nitrogenous, excretion and energy budget of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquaculture*, 292:197-206.
- Tuchkovenko, Y. y Lonin, S. (2003). Mathematical model of the oxygen regime of Cartagena Bay. *Ecological Modelling*(165), 91-10.
- Tuchkovenko, Y., Lonin, S. y Calero, L. (2002). Modelo de eutroficación de la Bahía de Cartagena y su aplicación práctica. *Boletín Científico CIOH*(20), 28-44.
- Universidad del Norte, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales de la Universidad del Norte – IDEHA. (2003). Caracterización hidrológica del Canal del Dique – Ideha – E – 063-014 – 03.
- Vita, R., Marin, A., Madrid, J. A., Jimenez, B., Cesar, A. y Marin, L. (2004). Effects of wild fishes on waste exportation from a Mediterranean fish farm. *Marine Ecology Progress Series*(277), 253-261.
- Yu, S. L. y Ueng, P. S. (2005). Effects of flow velocity on growth of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). *The Israeli Journal of Aquaculture*, 57(4), 241-249.