

APROXIMACIÓN A LA MODELACIÓN DEL OXIGENO DISUELTO EN UNA ZONA COSTERA: APLICACIÓN A LA BAHIA DE CONCEPCION

José Vargas B¹, Ricardo Osorio A¹., Ramón Ahumada B². y Wernher Brevis V¹.

¹ Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Concepción

² Facultad de Ciencias. Universidad Católica de la Santísima Concepción

e-mail: jvargas@udec.cl

Fono 56-41-204764/204336

RESUMEN

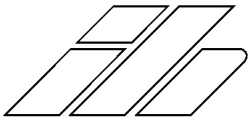
El presente trabajo presenta una primera aproximación para el desarrollo de un modelo de calidad de aguas para la determinación de las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en la bahía de Concepción, Octava Región. El modelo está basado en el balance de masas de volúmenes, definidos según características estratigráficas y químicas de las aguas, para los períodos de estiaje e invierno. Los procesos fueron descritos por medio de un sistema de ecuaciones diferenciales resueltos mediante el uso de una rutina programada en Matlab. La importancia relativa de los parámetros que intervienen en la descripción del fenómeno fue obtenido por medio de un análisis de sensibilidad.

En base a los resultados se puede concluir que el sector con mejor condición para una futura alternativa de descarga es el de Tomé. Se identificó además, que la mayor fuente de demanda de OD es la producida por los residuos de la industria pesquera y que la variable con mayor influencia en el balance de oxígeno disuelto es la reaeración.

ABSTRACT

This work presents a first approximation to the development of a water quality model for the determination of dissolved oxygen concentration in the Concepción bay, 8th region. The model is based on the volume mass balance, defined according the layers structure and chemical characteristics for the summer and winter season. The processes were described by using a differential equation system, solved in a program developed in Matlab. The relative importance of the parameters describing the processes was obtained by using a sensibility analysis.

Based on the results it is possible to assert that the sector with the best condition for a further discharge alternative is Tomé. The main source of dissolved oxygen demand were the residues of the fishing industries and the variable with the major influence on the dissolved oxygen balance was the reaeration.



APROXIMACIÓN A LA MODELACIÓN DEL OXIGENO DISUELTO EN UNA ZONA COSTERA: APLICACIÓN A LA BAHÍA DE CONCEPCIÓN

1. Motivación

En nuestro país, un porcentaje importante de las descargas de residuos líquidos se realiza directamente hacia la costa. Estas descargas se componen principalmente de material orgánico proveniente de aguas servidas urbanas y de actividades industriales, como por ejemplo la pesquera.

Debido a lo anterior la construcción de modelos matemáticos de simulación, especialmente los que modelan oxígeno disuelto, permitirán mejorar la gestión y conocer el comportamiento las condiciones ambientales de nuestro litoral en distintos escenarios de descarga.

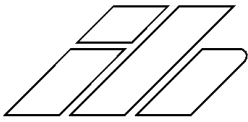
El objetivo del presente trabajo es dar una primera aproximación a la modelación del comportamiento del oxígeno disuelto en la bahía de Concepción basado en el balance de masa para los períodos de verano e invierno.

2. Descripción del área de estudio

La Bahía de Concepción está ubicada en la región del Bio-Bío, octava región, específicamente en los 36°40' de latitud Sur y 73°02' de longitud Oeste. Con un área superficial de aproximadamente 167,4 Km², presenta una orientación de forma abierta hacia el norte, figura 1, y límites en la zona demarcada entre el "Morro la Lobería", y la punta de la "Península Tumbes". En los alrededores de la Bahía se desarrolla una gran actividad tanto industrial como urbana; debido principalmente a la cercanía de ciudades como Concepción, Talcahuano, Tomé, Penco y Lirquén. En el interior de la bahía se encuentra la isla "Quiriquina", la cual divide el sector de entrada a la bahía en dos sectores: "Boca Chica" (entre Península Tumbes y la isla) y "Boca Grande" (entre la isla y el Morro la Lobería). La Boca Chica tiene un ancho aproximado de 1,6 km. y la Boca Grande tiene un ancho de 4,8 km. aproximadamente.

Dentro de las características principales de la bahía se puede señalar que esta posee un tiempo de residencia de 3,2 días (Ahumada y Chuecas, 1979) durante el período de verano, y un tiempo de residencia de 22 días durante el período de invierno (Arcos et al, 1995). Las condiciones ambientales de la bahía están íntimamente relacionadas con el crecimiento urbano e industrial, los cuales han repercutido directamente en la calidad de las aguas. Actualmente la bahía es el cuerpo receptor de los residuos de las pesqueras localizadas en las ciudades de Tomé y Talcahuano, además de los residuos domiciliarios de alcantarillado de las ciudades de Penco y de Tomé.

Dentro de la Bahía de Concepción desemboca el río Andalién, que nace en la Cordillera de la Costa a los 36° 47' 30" de latitud sur y 72°49' de longitud oeste. Este río se caracteriza por poseer un régimen pluvial con un máximo promedio anual de 28 m³/s



durante el período de invierno (Julio y Agosto) y un mínimo promedio anual de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el verano (Enero y Febrero) (Hernández, 1999). Este río es el colector de los residuos líquidos provenientes de diversos centros poblados, lo que ha repercutido considerablemente en la calidad de sus aguas. De esta forma, el río se ha convertido en un emisario natural una concentración de $20 \text{ mg O}_2/\text{l}$ para la demanda bioquímica de oxígeno en su desembocadura.

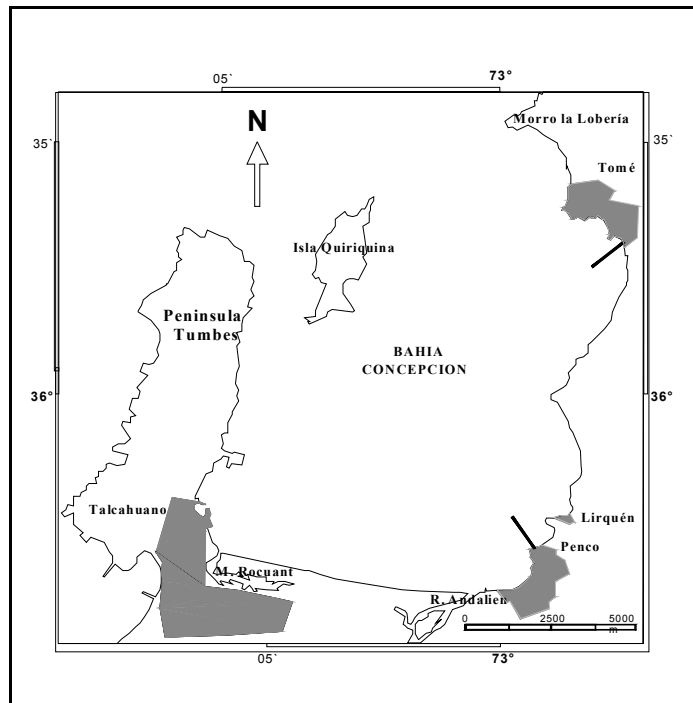
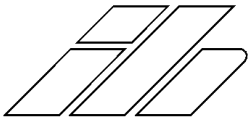


Figura 1: Mapa de la Bahía Concepción.

3. Antecedentes previos

Un estudio detallado de los procesos en la bahía fue entregado por Ahumada y Chuecas (1979), quienes concluyen que el efecto de las corrientes marinas en las concentraciones de oxígeno disuelto producida en verano, se debe principalmente a la intrusión de las aguas ecuatoriales subsuperficiales (AESS), las cuales son bajas en concentraciones de OD, por lo cual, se produce un descenso considerable en las temperaturas promedio debido a la intrusión de aguas más frías; lo cual, se detecta a partir de Septiembre a Octubre, y permanece durante todo el verano e incluso hasta Abril- Mayo.

De acuerdo a lo señalado por Ahumada y Chuecas (1979), a mediados y fines de otoño no aparece una clara estratificación, debido principalmente a un proceso de mezcla. En invierno se presenta aumento de la temperatura con la profundidad (hasta los 15 m), lo que se denomina termoclina negativa. En primavera, verano y comienzos de otoño se muestra un gradiente de temperatura que permite diferenciar la capa de mezcla superficial, la termoclina y una capa homotérmica. Esto se origina por el desarrollo de la termoclina estacional, por procesos de mezcla o por calentamiento de la



capa superficial. La termoclina presenta fluctuaciones estacionales entre los 10 y 30 m. Se comienza a formar a principios de primavera a los 10 m de profundidad, luego en Noviembre ocupa entre los 10 y 20 m de profundidad y -en Diciembre y Enero- de 20 m a 30 m, para posteriormente desaparecer a mediados de Abril-Mayo. Durante el invierno se forma una débil termoclina negativa que no alcanza los 15 m de profundidad. De esta forma, se observa que durante el invierno las temperaturas de fondo son mayores que en la superficie; lo cual indicaría la presencia de agua subantártica (ASAA). De manera contraria, durante la primavera, verano y principios de otoño, la temperatura de fondo es menor que la temperatura de superficie, lo que indicaría la presencia de las AESS.

En relación a la salinidad, la variación promedio en la Bahía de Concepción es frecuentemente entre los 34.5‰ y los 32.7‰. Se aprecia una dilución superficial invernal y un aumento anormal de la salinidad en la época estival; esto se debe principalmente al efecto de dilución provocada por el aumento de las precipitaciones. La dilución invernal provoca un fuerte gradiente de salinidad, lo que implica una pronunciada estratificación que ocupa la capa de los 0-30 m en ambas bocas de la bahía, y sobre los 20 m en las estaciones interiores. A mediados de primavera este gradiente vertical se reduce hasta desaparecer a fines de este período, lo que implica que la columna de agua presente una distribución homogénea de salinidad en verano y hasta principios de otoño. A mediados y fines de otoño aparece la haloclina y comienza su desarrollo para llegar a su máxima expresión en invierno.

En cuanto a la circulación en la bahía durante el verano -según lo señalado por Mesías y Salinas (1984) en las bocas de la bahía se presenta una estructura de dos capas de agua, con un ingreso por el fondo y otra de salida por la superficie.

4. Modelación del oxígeno disuelto

La modelación del oxígeno en la bahía se realizó mediante una aplicación de la ley de conservación de masas. Para esto, se consideró una serie de volúmenes interconectados entre sí mediante procesos advectivos (4 en invierno, 5 en verano), los cuales fueron definidos en base a las características tanto físicas como químicas. Para la división de la bahía en sectores, se consideró los monitoreos realizados en la bahía durante los años 1991 y 1995. Se observó que para el periodo de verano se produce una estratificación en el sector de Tomé, debido principalmente a la entrada de aguas provenientes de mar abierto, las cuales contienen una baja concentración de oxígeno disuelto, denominadas AESS; por esta razón, para el periodo de verano, el sector de Tomé se separó en dos volúmenes, ver figura 2, los cuales se combinan en invierno para formar solo un volumen.

A modo de ejemplo se presenta la formulación de las ecuaciones para el mes de verano:

De acuerdo a la transferencia entre cada uno de los volúmenes las ecuaciones, figura 3, las ecuaciones usadas para la modelación quedan dadas por :

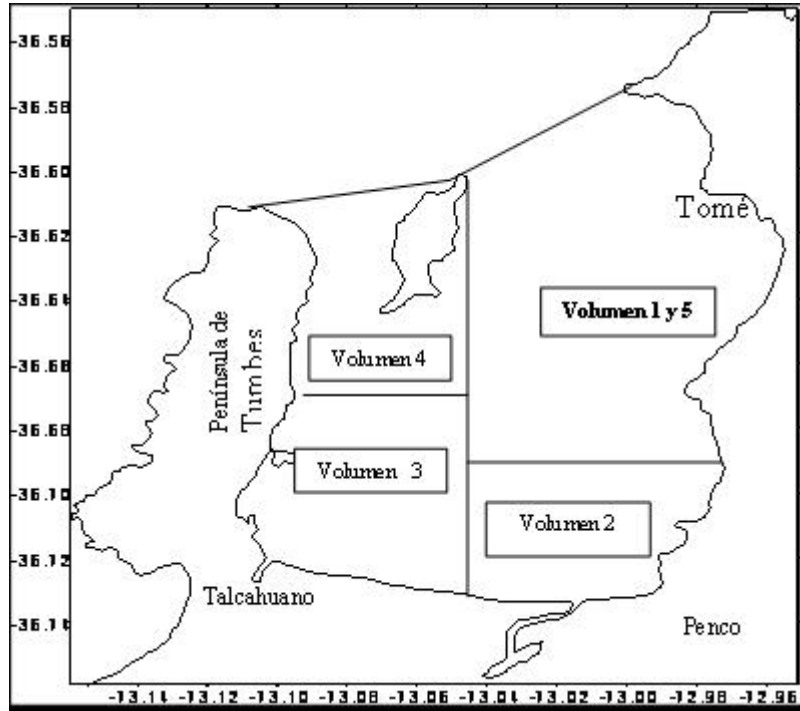
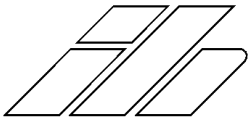


Figura 2: Distribución espacial de los volúmenes en la bahía para el periodo estival

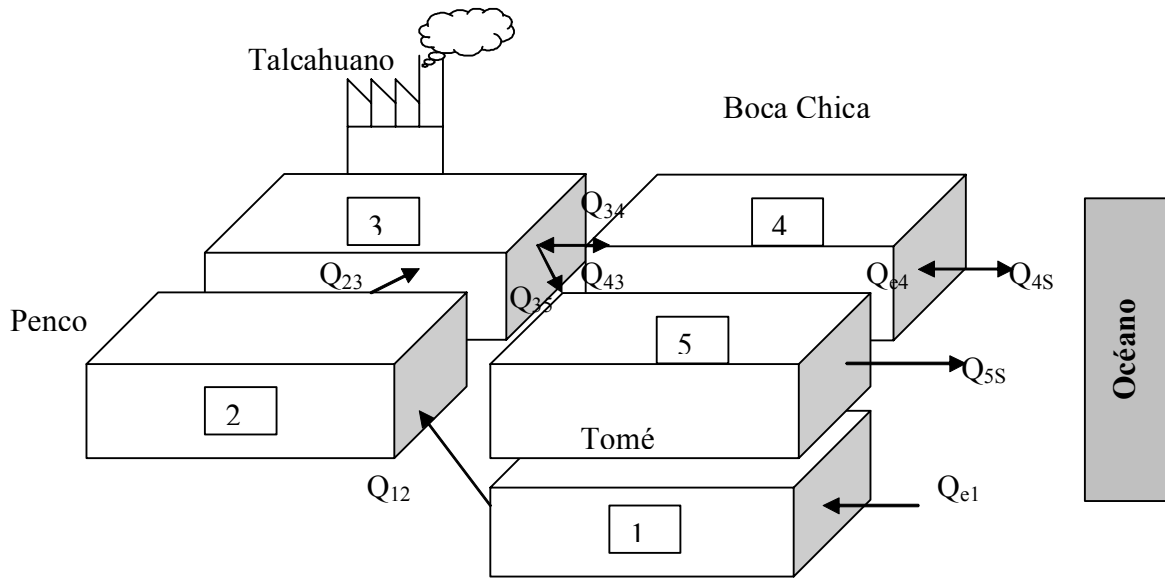
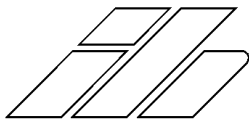


Figura 3: Flujos de intercambio entre cada sector de la bahía, período de verano

- **Volumen 1:**

$$V_1 * \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_1 = C_{e1} \cdot Q_{e1} - C_1 \cdot Q_{1-2} \pm R_1 \quad (1)$$



Donde R_1 representa, en este caso, las demandas de oxígeno de los sedimentos depositados en el fondo:

$$R_1 = -SB_1 * A1 \quad (2)$$

Donde: $SB_1 = 0,0105 \text{ (mg*s}^{-1}\text{*m}^{-2}\text{)}$
 $A1 = 79,1975 \text{ (km}^2\text{)}$

Y, además, C_{e1} y C_1 corresponden a las concentraciones de entrada desde el océano y la concentración en el elemento 1 del oxígeno disuelto respectivamente.

• **Volumen 2:**

$$V_2 * \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_2 = C_1 \cdot Q_{1-2} - C_2 \cdot Q_{2-3} \pm R_2 \quad (3)$$

Donde:

$$R_2 = \left(\frac{0,728 \cdot \sqrt{U_w} - 0.317 \cdot U_w + 0.0372 \cdot U_w^2}{86400} \right) * A_2 * (Cs2 - C2) - \underbrace{SB_2 * A_2}_{\text{DOS}} - \dots \dots$$

K_a : coeficiente de reaeración

$$\dots \dots - \underbrace{DBOemip * (1 - e^{-K1*t})}_{\text{DBO del emisario de Penco}} - \underbrace{DBOra * (1 - e^{-K1*t})}_{\text{DBO del río Andalién}} \quad (4)$$

La reaeración es calculada mediante la ecuación de Banks & Herrera (1977). La demanda de oxígeno producida por la descarga de desechos a través del emisario de Penco, y el transporte de desechos hacia la bahía por parte del río Andalién, están representados mediante el termino (DOS)

Donde: U_w : Velocidad del viento en la bahía (m/s)
 $DBOemip$: Demanda bioquímica del emisario de Penco

• **Volumen 3**

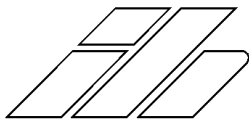
$$V_3 * \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_3 = C_2 \cdot Q_{2-3} + C_4 \cdot Q_{4-3} - C_3 \cdot Q_{3-4} - C_3 \cdot Q_{3-5} \pm R_3 \quad (5)$$

Donde:

$$R_3 = \left(\frac{0,728 \cdot \sqrt{U_w} - 0.317 \cdot U_w + 0.0372 \cdot U_w^2}{86400} \right) * A_3 * (Cs3 - C3) - \underbrace{SB_3 * A_3}_{\text{DOS}} - \dots \dots$$

K_a : coeficiente de reaeración

$$\dots \dots - \underbrace{DBOcm * (1 - e^{-K1*t})}_{\text{DBO del Canal del Morro}} - \underbrace{DBOip * (1 - e^{-K1*t})}_{\text{DBO del puerto de Talcahuano}} \quad (6)$$



• **Volumen 4**

$$V_4 \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_4 = C_3 \cdot Q_{3-4} + C_{e4} \cdot Q_{e4} - C_4 \cdot Q_{4-3} - C_4 \cdot Q_{4S} \pm R_4 \quad (7)$$

Donde:

$$R_4 = \underbrace{\left(\frac{0,728 \cdot \sqrt{U_w} - 0.317 \cdot U_w + 0.0372 \cdot U_w^2}{86400} \right)}_{K_a : \text{coeficiente de reaeración}} \cdot A_4 \cdot (C_{s4} - C_4) \quad (8)$$

• **Volumen 5**

$$V_5 \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_5 = C_3 \cdot Q_{3-5} + C_5 \cdot Q_{5S} \pm R_5 \quad (9)$$

Donde:

$$R_5 = \underbrace{\left(\frac{0,728 \cdot \sqrt{U_w} - 0.317 \cdot U_w + 0.0372 \cdot U_w^2}{86400} \right)}_{K_a : \text{Coeficiente de Reaeración}} \cdot A_5 \cdot (C_{s5} - C_5) - \underbrace{DBO_{emit} \cdot (1 - e^{-K_1 \cdot t})}_{\text{Emisario de Tomé}} \dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots - \underbrace{DBO_{iptom} \cdot (1 - e^{-K_1 \cdot t})}_{\text{Pesqueras de Tomé}} \quad (10)$$

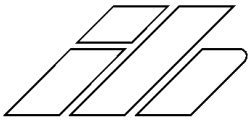
Es decir:

$$V_i \cdot \dot{C}_i = Q \cdot C_i \pm P_i \quad (11)$$

o para el caso del período estival :

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} V_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{C}_1 \\ \dot{C}_2 \\ \dot{C}_3 \\ \dot{C}_4 \\ \dot{C}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Q_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & -Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{23} & -Q_{34} - Q_{35} & Q_{43} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{34} & -Q_{43} - Q_{4S} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{35} & 0 & -Q_{5S} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Las ecuaciones anteriores son linealmente dependientes y pueden ser resueltas usando una aproximación por diferencia central, Basado en esto, se puede definir la siguiente aproximación:



$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{C_{t-\Delta t} - C_t}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\Rightarrow C_{t+\Delta t} = C_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\dot{C}_t + \dot{C}_{t+\Delta t} \right) \quad (14)$$

$$C_{t+\Delta t} = C_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \dot{C}_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \dot{C}_{t+\Delta t} \quad (15)$$

5. Resultados

Los resultados obtenidos de la modelación se muestran en la figura 4, y son concordantes con la tendencia que se alcanza en la bahía durante los dos periodos de estudio, Para estimar el comportamiento del sistema ante la modificación de las magnitudes de variables introducidas en el modelo de estudio, se realizó un análisis de sensibilidad, el cual como resultado demuestra que la variable que más influye la concentración de oxígeno disuelto en la bahía es la reaeración. Por otra parte se simulo el caso de una ausencia total de vientos en el periodo de verano, el cual es un evento extremo que puede conducir a concentraciones muy bajas, incluso riesgosas para la existencia de vida acuática.

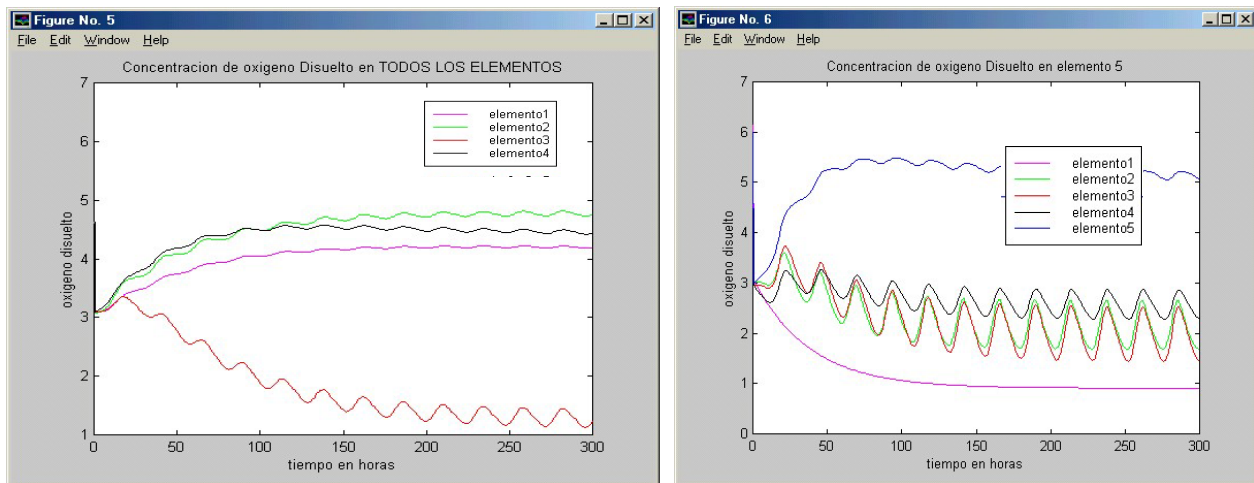


Figura 4: Resultados de la modelación en los 2 períodos considerados. A) Invierno, B) Verano.

El modelar el oxígeno disuelto cobra una gran importancia al momento de evaluar la calidad del agua, por esta razón, los resultados obtenidos dan una base cuantitativa de cómo se comporta la bahía en los dos periodos de estudio, siendo la



condición más crítica la presentada en el verano en el sector cercano al puerto de Talcahuano.

6. Discusión y Conclusiones

A partir del modelo realizado, donde se considera que el fenómeno de transporte de masas de agua (advección) es predominante en la bahía, se observa que la concentración de OD es influenciada notablemente por las masas de agua costeras predominantes en el sector, lo que queda representado por el modelo en ambas épocas de estudio, en comparación con los antecedentes que existen de la bahía.

La concentración de OD en el sector de Talcahuano se debe principalmente, en el período de verano, a la disminución de concentración de OD de las masas de agua; y en invierno se debe netamente a las descargas de residuos del sector pesquero.

La reaereación de las aguas es un factor primordial para la oxigenación de las aguas; por tanto, cabe señalar que al momento de realizar un modelo más detallado del comportamiento del OD en la bahía se debe buscar la forma de calibrar un modelo de reaereación para la bahía.

El sector menos afectado ambientalmente en ambos períodos de estudio ($OD > 3$ ml O_2/l) es el sector de la Boca grande o Tomé. Por esta razón, se concluye que al momento de evaluar una alternativa de ubicación para descargar residuos de la industria pesquera o residuos de tipo orgánico, este sector sería el más adecuado para dicho efecto, debido a que posee las mayores concentraciones de OD en ambos períodos del estudio.

Para establecer un modelo con mayor exactitud, se debe precisar la correntimetría de la Bahía, ya que como se mencionó anteriormente, el fenómeno advectivo es un factor preponderante en el transporte de oxígeno a través de ella.

En el período de invierno la condición de estabilidad se alcanza en un tiempo mayor, debido principalmente a las velocidades de las corrientes.

7. Referencias

Ahumada, R, L. Chuecas.: 1979. Algunas características hidrográficas de la Bahía de Concepción ($36^{\circ}40'S$; $73^{\circ}02'W$) y áreas adyacentes, Chile. Gayana, Miscelánea 8: 1-58.



Ahumada, R. y Rudolph, A., 1989: Residuos líquidos de la industria pesquera: alteraciones ambientales y estrategias de eliminación. Ambiente y Desarrollo, Volumen N°1: 147-161.

Arcos, D., L. Furet., F. Carrasco., S. Nuñez., F. Vargas.: 1995. Eutrofización en el ambiente marino de Chile Central: Efectos inducidos por la evacuación de residuos industriales líquidos. Invest. Mar.: 18:5-12.

Hernández, T.. 1999: Caracterización Hidrológica y Geomorfológica del Río Andalien. Informe de habilitación profesional para optar al título de Ingeniero Civil. Depto. Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción.

Mesías, J., S. Salinas.: 1986. Corrientes en Bahía Concepción. Biología Pesquera 15: 55-62.