

## **SIMULACION NUMERICA DE LA ESTRATIFICACION EN UN RESERVORIO**

**Angel N. Menéndez, Pablo A. Tarela**  
*Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA –ex INCYTH)*  
*Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable*  
*Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza*

### **RESUMEN**

Se presenta un modelo hidrotérmico cero-dimensional de dos capas. Se lo formula para incluir los casos de un reservorio bajo la acción de la radiación incidente y de un cuenco de enfriamiento. El modelo se valida a través de su aplicación a la zona posterior del puerto de Buenos Aires, donde existe una estratificación debido a la circulación del agua de refrigeración de dos centrales térmicas. Se obtiene un buen acuerdo entre los resultados de la simulación y las magnitudes medidas. El modelo luego se aplica para predecir la estratificación en el futuro embalse de Potrerillos, en la Prov. de Mendoza.

### **ABSTRACT**

A hydro-thermal zero-dimensional two-layer model is presented. The formulation includes both a reservoir under incident radiation and a cooling pond. The model is validated through its application to the backward zone of Buenos Aires harbour, where a stratification exists due to the circulation of refrigeration water from two power stations. A good agreement is obtained between the results of the simulation and the measured quantities. The model is next applied to predict the stratification in the future Potrerillos reservoir, in Mendoza Province.

### **INTRODUCCION**

La estratificación térmica es un problema relacionado tanto a fenómenos naturales como a acciones inducidas por el hombre. Por ejemplo, un lago o un reservorio pueden estratificarse bajo la acción de la radiación solar. Por otro lado, la descarga del agua de refrigeración de una central de energía térmica en un cuenco de enfriamiento genera una estratificación bien definida.

La estratificación térmica es un fenómeno que resulta del balance de calor en un ambiente acuático dinámico. En este balance participan muchos mecanismos: advección, difusión molecular, mezcla turbulenta, radiación incidente, etc. En problemas relacionados al uso del agua, típicamente para uso doméstico o industrial, una vez que se ha establecido una estratificación, la cuestión crucial consiste en conocer la profundidad de la interfase, o termoclina, y las temperaturas de las dos capas.

En este trabajo se presenta un modelo hidrotérmico cero-dimensional, de dos capas e impermanente para predecir la estratificación térmica en un reservorio. Las dos configuraciones básicas estudiadas son un reservorio bajo la acción de la radiación incidente (figura 1) y un cuenco de enfriamiento (figura 2). Para cada capa se consideran las entradas y salidas de calor, incluyendo tanto las acciones externas como los intercambios mutuos. Específicamente, se tienen en cuenta los siguientes mecanismos:

- Entrada de agua y calor desde un tributario (reservorio)
- Entrada de agua y calor desde una obra de descarga (cuenco de enfriamiento)

- Salida de agua y calor por succión desde una obra de toma
- Salida de agua y calor hacia un cuenco de marea (cuenco de enfriamiento)
- Entrada de calor a través de la radiación solar y atmosférica
- Salida de calor por radiación inversa, convección forzada y vaporización
- Intercambio de calor entre capas por penetración ó "entrainment"

Figura 1 Reservorio estratificado por la acción de la radiación

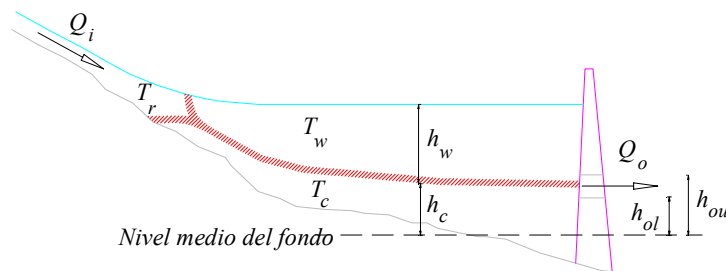
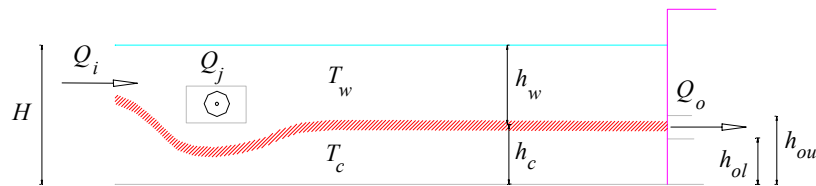


Figura 2 Cuenco de enfriamiento



El modelo es validado a través de la comparación de sus resultados con datos medidos para el cuenco de enfriamiento de una central térmica ubicada dentro del puerto de Buenos Aires.

### MODELO MATEMATICO

El modelo matemático es la formulación de los balances de masa y calor para cada una de las dos capas. Las siguientes son las ecuaciones para el balance de masa:

$$\frac{d\forall_w}{dt} = \alpha Q_i + \beta Q_j - \theta Q_o + e \quad (1)$$

$$\frac{d\forall_c}{dt} = (1 - \alpha) Q_i - (1 - \theta) Q_o - e \quad (2)$$

donde  $t$  es la coordenada temporal,  $\forall_w$  y  $\forall_c$  los volúmenes de las capas cálida y fría, respectivamente,  $Q_i$  la descarga desde el tributario (reservorio) o desde el cuenco de marea (cuenco de enfriamiento),  $Q_j$  el caudal del chorro de la obra de descarga (cuenco de enfriamiento),  $Q_o$  el caudal de succión de la toma de agua,  $\alpha$  un coeficiente de entrainment a la capa cálida para el flujo desde el tributario (reservorio) o desde el cuenco de marea (cuenco de enfriamiento),  $\beta$  un coeficiente de partición para el chorro (es decir, la proporción de agua que va hacia el interior del cuenco de enfriamiento),  $\theta$  un coeficiente de succión de la toma de agua y  $e$  el entrainment desde la capa fría a la cálida.

Los caudales de succión  $Q_o$  y del chorro  $Q_j$  son datos provistos. En el caso del cuenco de enfriamiento, la descarga entrante se calcula a partir del balance de masa global, conociendo la evolución del nivel de agua con el tiempo (marea):

$$Q_i = \frac{d}{dt}(AH) - \beta Q_j - Q_o \quad (3)$$

donde  $A$  es el área superficial del cuenco y  $H$  su profundidad total instantánea. En cambio, esa descarga es un dato de entrada para el caso del reservorio. El coeficiente de entrainment  $\alpha$  depende de la relación entre el flujo ingresante y el descargado por el chorro, en el caso del cuenco de enfriamiento, y de la relación entre las temperaturas del tributario y de las dos capas, para el reservorio. El coeficiente de partición del chorro depende de la relación entre el caudal ingresante y del chorro. El coeficiente de succión se calcula sólo en base a parámetros geométricos, a saber, las cotas superior e inferior de la obra de toma. Finalmente, el coeficiente de entrainment de la capa fría a la cálida depende de la diferencia de velocidades entre ambas capas (ver Menéndez y otros<sup>1,2,3</sup>).

Las ecuaciones para el balance de calor son las siguientes:

$$\frac{d\forall_w T_w}{dt} = \alpha Q_i T_i + \beta Q_j T_j - \theta Q_o T_w + e T_e + H_{fs}^* - H_e^* \quad (4)$$

$$\frac{d\forall_c T_c}{dt} = (1 - \alpha) Q_i T_i - (1 - \theta) Q_o T_c - e T_e + H_e^* \quad (5)$$

donde la temperatura de ingreso  $T_i$  coincide con la del tributario, para el caso del reservorio, y con la de la capa fría, para el cuenco de enfriamiento; la temperatura de intercambio  $T_e$  coincide con la de la capa fría si  $e > 0$  y con la de la cálida si  $e < 0$ ;  $H_{fs}^*$  representa el flujo neto entrante de calor, resultante de la radiación solar, la radiación atmosférica, la convección forzada, la evaporación y la radiación inversa, y  $H_e^*$  el flujo de calor irradiado desde la capa fría a la cálida. Todos estos flujos de calor pueden ser expresados en términos de datos sobre las condiciones atmosféricas ó de las variables del flujo. La radiación solar neta depende de la ubicación geográfica del lugar de estudio, la época del año y las condiciones meteorológicas, por lo que es conveniente recurrir a tablas específicas. La radiación atmosférica neta es función de la temperatura de la atmósfera, la nubosidad y el factor de emisividad atmosférico. El intercambio de calor sensible por convección tiene en cuenta la velocidad local del viento y las temperaturas de la atmósfera y el agua superficial. Por su parte, el intercambio de calor latente por evaporación depende de las presiones de vapor saturado y, también, de la velocidad del viento. La radiación inversa tiene en cuenta el hecho de que el propio cuerpo de agua es una fuente de radiación. En su determinación intervienen la temperatura de la capa cálida y el factor de emisividad del agua. Finalmente, el intercambio de radiación entre capas proviene del balance de la radiación inversa entre los estratos frío y cálido y, por lo tanto, es función del factor de emisividad del agua y de las temperaturas de ambas capas.

Resolviendo el sistema acoplado de ecuaciones se obtienen los espesores, velocidades y sobretemperaturas de cada capa.

## VALIDACION DEL MODELO

El modelo fue validado a través de su aplicación a un cuenco de enfriamiento, dentro del puerto de Buenos Aires, para la descarga de agua de refrigeración desde la central térmica Puerto Nuevo. El cuenco de enfriamiento es, en rigor, la parte posterior del puerto (figura 3). El puerto tiene dos bocas: la entrada principal, a través de la cual hacen su ingreso al puerto las naves de gran porte, y una boca "falsa", sólo utilizada por embarcaciones pequeñas. Estas comunicaciones con el Río de la Plata generan una corriente de agua a lo largo del canal de pasaje del puerto principal, cuya intensidad y dirección varía con la marea. El puerto posterior (figura 4), por su parte, tiene su propia circulación debido a las dos tomas de agua de las centrales térmicas y la descarga desde la Central Puerto Nuevo. En esa región posterior el flujo está térmicamente estratificado (figura 5). Esta estratificación se diluye rápidamente al pasar al puerto principal, debido al refresco producido por la corriente del canal de pasaje.

El modelo hidrotérmico de dos capas fue aplicado, entonces, al puerto posterior. La capa fría recibe agua desde el puerto principal y provee agua a las tomas de las centrales térmicas. A su vez, la capa cálida recibe agua desde la descarga de la Central Puerto Nuevo y entrega la mayor parte del agua al puerto principal, excepto por una pequeña fracción que va a las tomas de agua.

Figura 3 Puerto de Buenos Aires

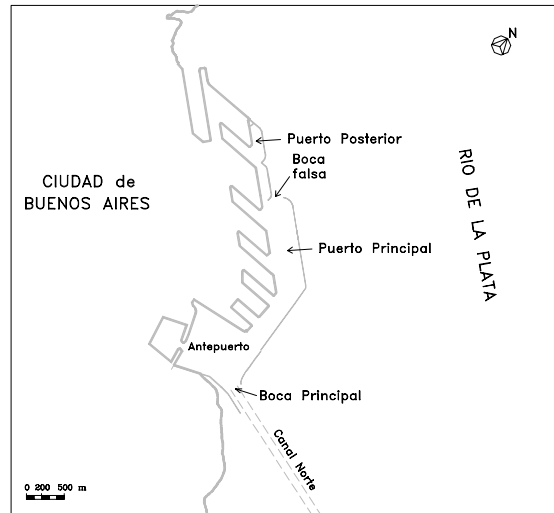


Figura 4 Parte posterior del puerto de Buenos Aires

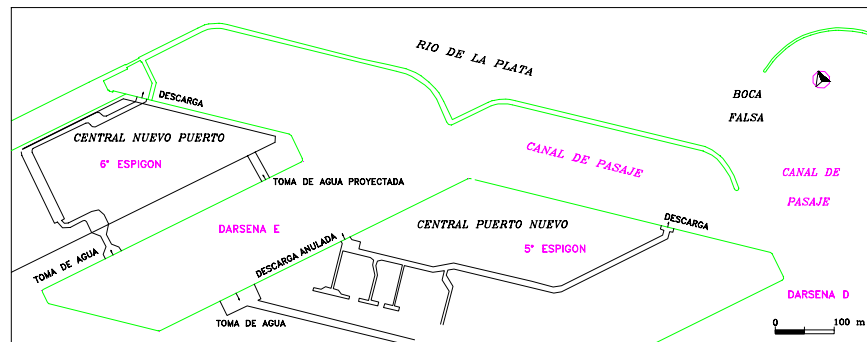
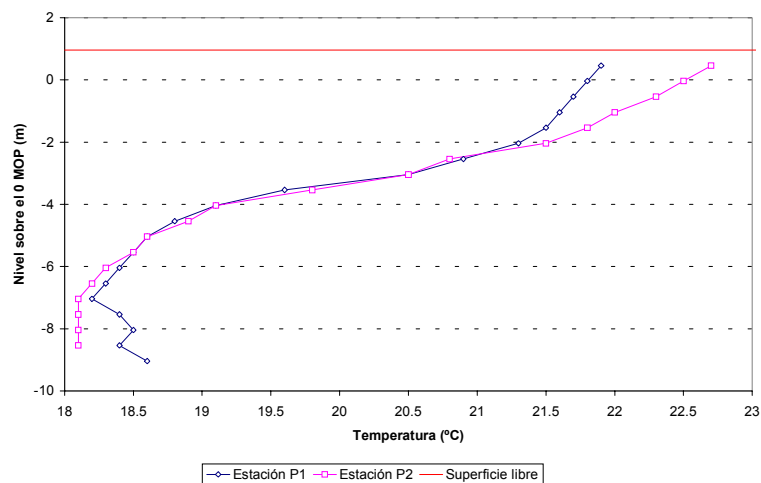


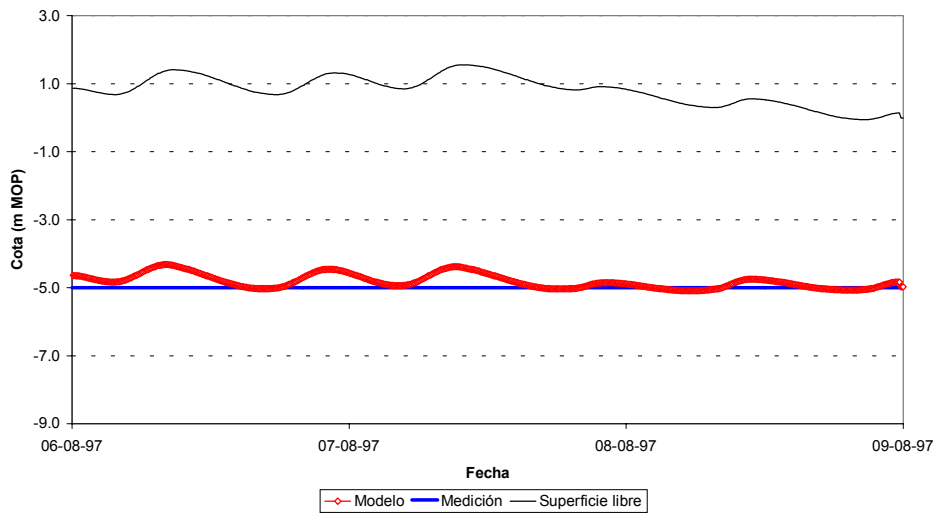
Figura 5 Mediciones de perfiles verticales de temperatura en el puerto posterior



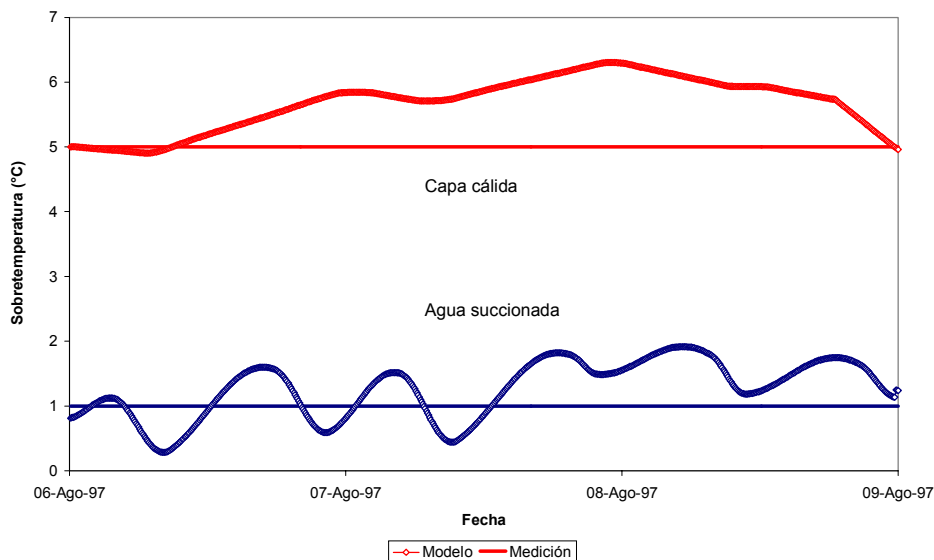
El modelo hidrotérmico fue validado y calibrado usando datos de dos campañas de mediciones especialmente efectuadas. La calibración consistió meramente en ajustar un parámetro en la expresión del coeficiente de partición  $\beta$ , al cual la solución resulta, de todos modos, poco sensible. El intercambio de calor a través de la superficie libre y de la interfase resultan despreciables en este caso, debido a la relativamente corta extensión.

En las figuras 6 y 7 se muestran las comparaciones para el nivel de la interfase y para las sobretemperaturas (de la capa cálida y en las tomas de agua), respectivamente, entre los valores medios espacio-temporales obtenidos de las mediciones y las evoluciones temporales calculadas con el modelo, correspondientes a una de las dos campañas. El acuerdo se considera muy satisfactorio. Resultados similares se obtuvieron para la segunda campaña.

*Figura 6 Comparación entre termoclinas medida y simulada*



*Figura 7 Comparación entre sobretemperaturas medidas y simuladas*



### APLICACIÓN DEL MODELO

El modelo fue utilizado para estudiar dos problemas:

- i. En la zona posterior del puerto de Buenos Aires se analizó la estabilidad térmica del sistema de refrigeración<sup>1</sup> y se predijo la estratificación en un escenario futuro con el puerto remodelado<sup>2,3</sup>.
- ii. En el río Mendoza, se predijo la estratificación que se producirá en el futuro embalse del dique de Potrerillos.

En este trabajo se presentan y discuten resultados de la segunda aplicación.

Se dispuso de información topográfica suficiente para caracterizar la geometría del embalse. El caudal de ingreso se tomó de la serie registrada de valores medios mensuales, de 80 años de duración. La cota de embalse en función del tiempo fue tomada de los resultados obtenidos con un modelo de operación de embalses, donde se introdujo la política de operación prevista. Para la temperatura atmosférica se emplearon los valores promedio entre los máximos y los mínimos mensuales registrados en Chacras de Coria en la década 1971-80, los cuales se repitieron cíclicamente año a año. Para la temperatura del agua del río que ingresa al lago se usaron datos medidos en el dique Cipolletti en el período Set/94 a Ago/95. Se emplearon valores medios mensuales de radiación solar neta para la zona. Para determinar la nubosidad promedio mensual se usaron los datos estadísticos en Chacras de Coria. Se determinaron valores medios mensuales como el promedio ponderado entre los correspondientes a cielo claro, nublado y semicubierto. Para representar el viento, también se utilizaron los valores promedio mensuales en Chacras de Coria para el mismo período.

Se utilizó un paso de discretización de 1 día.

En la figura 8 se presenta la evolución de la cota de la interfase entre las capas cálida y fría para el período comprendido entre los años 10 y 20 de la simulación, junto con la evolución establecida para la superficie libre. Se observa que la modulación básica del nivel de la termoclina está condicionada por la de la superficie libre. La limitante inferior para la termoclina está impuesta por la obra de toma. Sin embargo, la termoclina no sigue automáticamente a la superficie libre, lo cual queda evidenciado en la figura 9, donde se muestra la evolución del espesor de la capa cálida. Este varía en el rango aproximado de 10 a 50 m. Se observa que el espesor es mayor durante las épocas de aguas altas del embalse. También resulta notable la modulación estacional.

*Figura 8 Predicción de la termoclina en el embalse de Potrerillos*

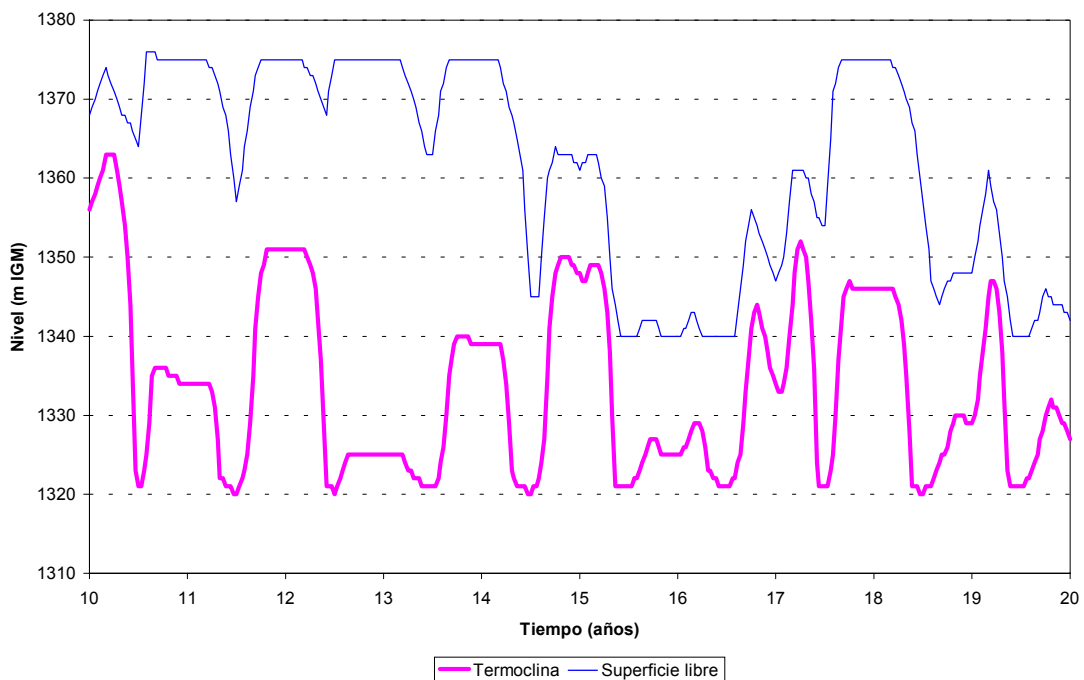
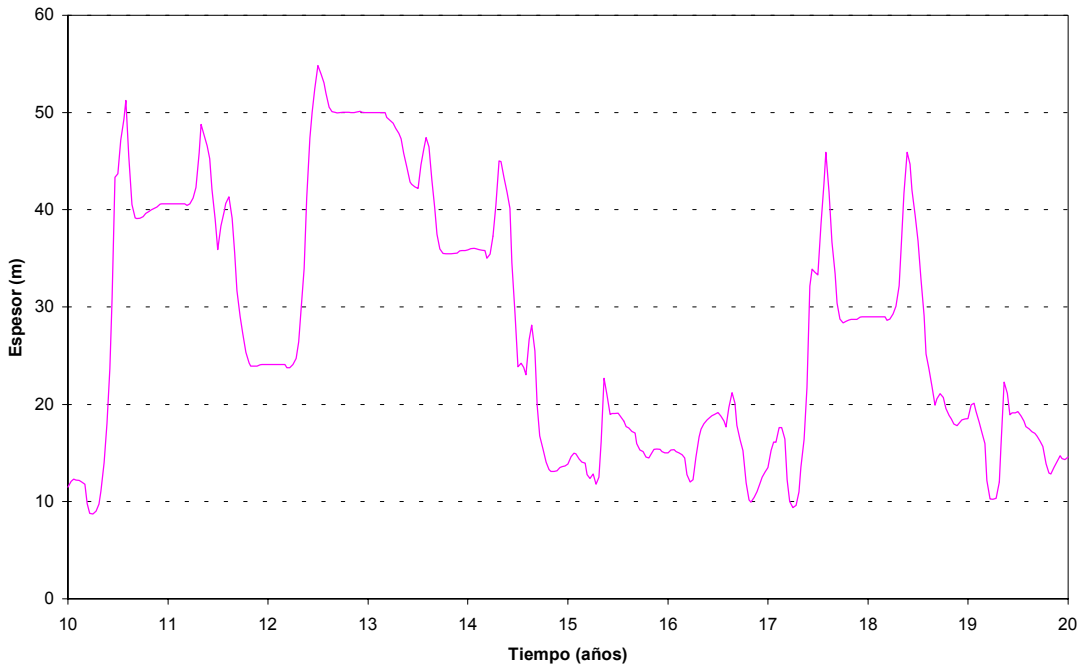


Figura 9 Predicción del espesor de la capa cálida



En la figura 10 se muestran los resultados obtenidos, para el mismo período de tiempo, para las temperaturas de las capas cálida y fría. Se los representa junto a las temperaturas atmosférica y del río. Se observa que las temperaturas de ambas capas están moduladas fuertemente por la estacionalidad. La de la capa cálida tiene un atraso de alrededor de 2 horas respecto de la evolución de la temperatura atmosférica, e igual atraso se observa para la temperatura de la capa fría respecto de la del río. Nótese que la temperatura de la capa cálida supera, en todo momento, a la atmosférica. Por otro lado, los picos máximos y mínimos de temperatura de la capa fría se atenúan respecto a los picos de la temperatura del río. La atenuación total pico a pico es de alrededor del 25%. La diferencia entre las temperaturas de las capas cálida y fría se muestra en la figura 11. Si bien se distingue claramente el ciclo estacional, se percibe la influencia de la variación del nivel del embalse.

Figura 10 Predicción de las temperaturas

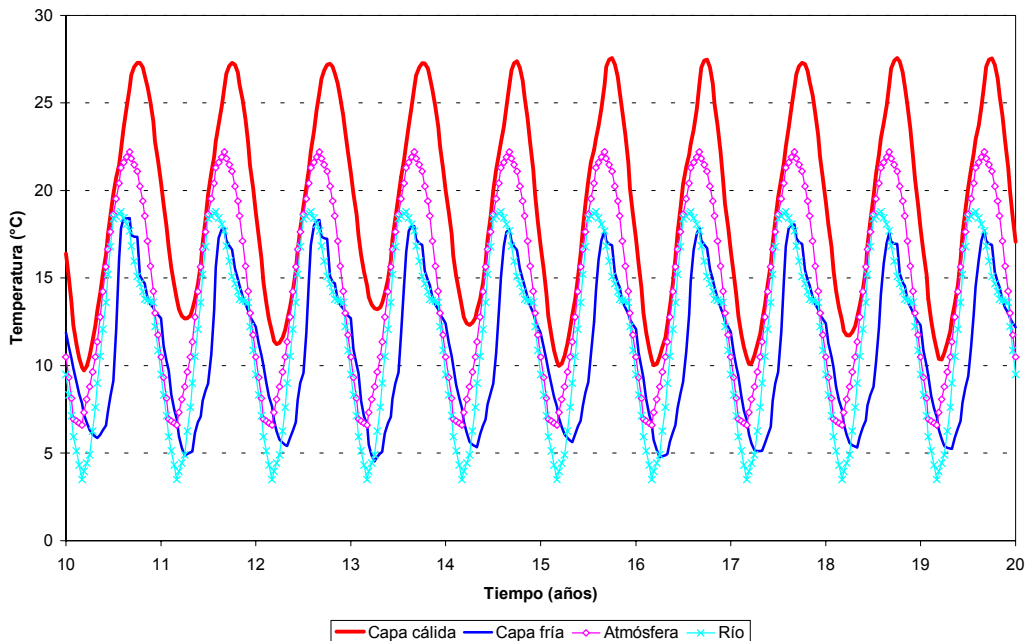
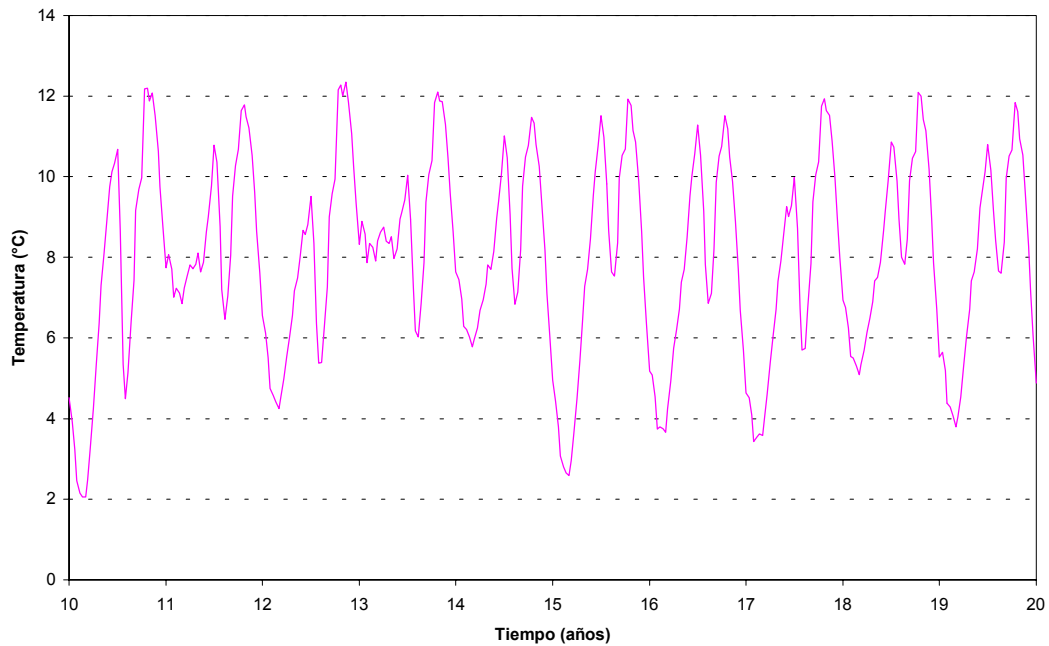


Figura 11 Diferencia de temperaturas entre capas



En la figura 12 se presenta el caudal de succión, junto con los porcentajes provenientes de la capa fría y la cálida. Se observa que, durante la mayor parte de cada año, la succión involucra sólo a la capa fría, pero que durante un corto período durante la primavera (25% del año) hay succión desde ambas capas, llegando a predominar la asociada a la capa cálida. Otra forma de ilustrar este efecto es suponiendo que en la obra de toma se produce una mezcla total de las aguas, con lo cual su temperatura sería la representada en la figura 13. Este resultado es de gran interés en relación al uso del agua de succión aguas abajo de la obra.

Figura 12 Predicción de la composición del caudal de succión

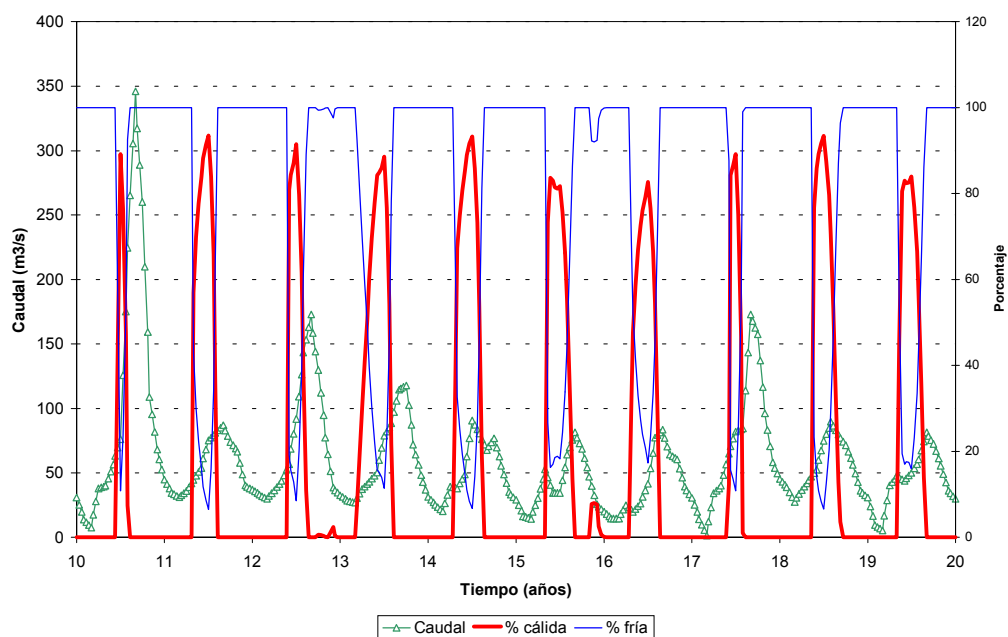
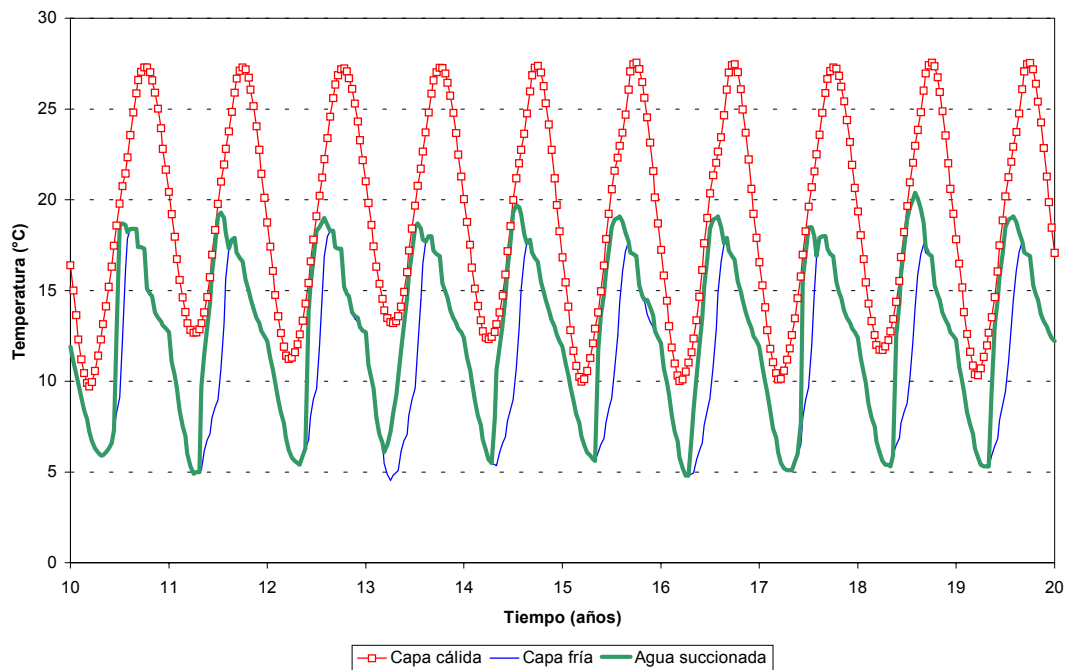




Figura 13 Predicción de la sobretemperatura del agua succionada



## CONCLUSIONES

El modelo hidrotérmico cero-dimensional de dos capas presentado ha mostrado dos cualidades importantes:

- Es preciso, a pesar de su relativa simplicidad.
- Provee directamente el tipo de resultados útiles para la toma de decisión ingenieril.

Su utilidad ha sido ilustrada a través de su aplicación al estudio de la estratificación térmica en el futuro embalse de Potrerillos.

## REFERENCIAS

- [1] Menéndez, A.N., Tarela, P.A., Bombardelli, F.A., *Estudio del transporte de agua de refrigeración de la Central Puerto*, Informe LHA-INA 161-01-97, Comitente: Central Puerto, octubre de 1997.
- [2] Menéndez, A.N., Bombardelli, F.A., Tarela, P.A., *Estudio de la afectación del régimen de sedimentación y del transporte de contaminantes y temperatura en el proyecto de profundización del puerto de Buenos Aires*, Informe LHA-INCYTH 162-01-97, Comitente: Administración General de Puertos, diciembre de 1997.
- [3] Menéndez, A.N., Tarela, P.A., Bombardelli, F.A., *A Study on the Hydraulic Impact of a Harbour Remodeling Project*, Fifth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Cape Town, South Africa, April 1999.