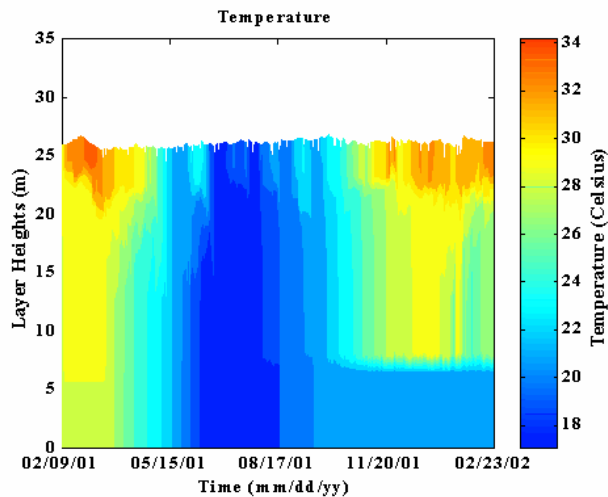
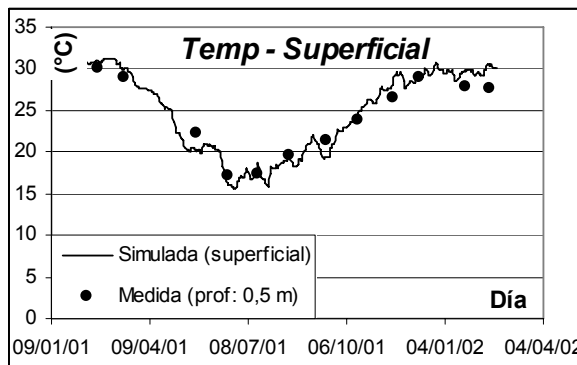




PROYECTOS

“BALANCE DE CONTAMINANTES EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ  
MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA”

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA  
ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA EN EL  
EMBALSE DE YACYRETÁ**



## **AUTORIDADES DEL INA**

### **PRESIDENTE:**

Ing. Oscar V. LICO

### **GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS:**

Dr. Raúl A. LOPARDO

### **DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA:**

Ing. Julio C. DE LÍO

### **JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL:**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

### **EQUIPO DE TRABAJO**

Ing. Sebastián MORILLO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Dr. Pablo A. TARELA

Sr. Julio A. TORCHIO

### **INFORME PRODUCIDO POR**

Ing. Sebastián MORILLO

Dr. Pablo A. TARELA

## **RECONOCIMIENTOS**

El trabajo de modelación numérica fue posible gracias a la labor del Ing. Sebastián Morillo, becario del CIRSA (INA, Córdoba), centro que colaboró cediéndolo al LHA (INA, Ezeiza) durante la etapa de simulación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer especialmente la colaboración del Dr. Julio Durán, de la División Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), quien proveyó información estadística sobre radiación solar incidente utilizada en el presente estudio.

Asimismo, se desea reconocer la cordial colaboración del Dr. Hugo Grossi Gallegos, Coordinador de la Red Iberoamericana de Solarimetría (RISOL) y perteneciente al Observatorio de San Miguel, quien también contribuyó aportando datos estadísticos.

En ambos casos se agradecen las fructíferas discusiones técnicas llevadas a cabo en torno a la problemática de la radiación solar incidente en la zona de estudio.

# RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar un primer estudio hidrotérmico del embalse de Yacyretá (Argentina - Paraguay), que incluye la predicción del futuro estado de estratificación frente a la elevación de cota prevista.

Para ello se cuenta con registros de datos físicos, entre los que se destaca la medición de perfiles verticales de temperatura en distintos puntos del embalse. Los mismos se realizaron durante unos cuatro años, con frecuencias del orden del mes. Actualmente, el embalse presenta una buena mezcla térmica en la vertical durante prácticamente todo el año, al menos hasta las profundidades relevadas.

Se presenta la implementación y calibración de un modelo hidrotérmico unidimensional del embalse. Se lo valida con los datos recién mencionados, lográndose un muy buen acuerdo. El modelo es luego utilizado en la etapa de predicción.

En primer lugar, se concluye que en la situación actual, y de no presentarse cambios climáticos significativos, no se presentarían cambios de importancia en la estructura térmica del embalse. Es decir, no habría tendencias de calentamiento o enfriamiento progresivo, continuándose la variabilidad estacional observada.

La elevación de la cota de embalse traería aparejada la reducción del espesor del epilimnio estival, pero el mismo será más persistente y algo más cálido. Aparecerá una estratificación profunda marcada, a la altura de las obras de toma, con una diferencia térmica entre capas que irá desde los 5° C actuales hasta máximos probables de 10° C.

Finalmente, se debe mencionar que el comportamiento hidrotérmico del embalse resulta complejo, debiéndose considerar a futuro la interacción con las corrientes y la geometría del vaso hidráulico. En este sentido, se recomienda proseguir los estudios a través de la simulación con modelos tridimensionales.

**Descriptor Temático:** Modelación matemática, modelación hidrodinámica, simulación numérica, embalse, lago.

**Descriptor Institucional:** Entidad Binacional Yacyretá

**Nota:** En este trabajo se utilizó como referencia vertical una cota "local", equivalente a la altura sobre el nivel del mar menos 50 metros. Así, cuando en los resultados se muestran figuras en función de cotas, la cota 0 corresponde a 50 msnm, salvo mención expresa en contrario.

# INDICE

## **Capítulo 1: DESCRIPCIÓN DEL EMBALSE YACYRETÁ**

<b>1.1 OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>1.2 UBICACIÓN</b>	<b>7</b>
<b>1.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPALES</b>	<b>7</b>

## **Capítulo 2: DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

<b>2.1 EL MODELO <i>DYRESM</i></b>	<b>9</b>
------------------------------------	----------

## **Capítulo 3: PROCESAMIENTO DE VARIABLES**

<b>3.1 GENERALIDADES</b>	<b>12</b>
<b>3.2 POSICIONAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO</b>	<b>12</b>
<b>3.3 VARIABLES METEOROLÓGICAS</b>	<b>13</b>
<b>3.3.1 Análisis de Radiación</b>	<b>16</b>
<b>3.4 CAUDALES Y NIVELES</b>	<b>18</b>
<b>3.5 ASPECTOS MORFOMÉTRICOS</b>	<b>19</b>
<b>3.6 TEMPERATURA DEL AGUA DE LOS TRIBUTARIOS</b>	<b>21</b>
<b>3.7 ENERGÍA CALÓRICA ENTREGADA AL EMBALSE</b>	<b>22</b>
<b>3.8 COEFICIENTE DE EXTINCIÓN DE LA LUZ</b>	<b>24</b>

## **Capítulo 4: VALIDACIÓN DEL MODELO**

<b>4.1 ESTACION DE COMPARACION</b>	<b>26</b>
<b>4.2 CALIBRACION Y VALIDACION</b>	<b>29</b>
<b>4.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD</b>	<b>32</b>
<b>4.3.1 Efecto de la variación del rango del espesor de las capas de simulación</b>	<b>32</b>
<b>4.3.2 Efecto de la radiación de onda corta</b>	<b>33</b>
<b>4.3.3 Efecto de la radiación de onda larga</b>	<b>35</b>
<b>4.3.4 Efecto de la temperatura del agua del tributario</b>	<b>35</b>
<b>4.3.5 Efecto de la intensidad del viento</b>	<b>36</b>
<b>4.3.6 Efecto del coeficiente de extinción de la luz vertical</b>	<b>37</b>
<b>4.3.7 Efecto de la altura de extracción de agua</b>	<b>38</b>
<b>4.4 Conclusiones del análisis de sensibilidad</b>	<b>38</b>

**Capítulo 5: PREDICCIONES DEL MODELO**

<b>5.1 Simulación para un período de tres años</b>	<b>39</b>
<b>5.2 Elevación de la cota de embalse, simulaciones de 1 año de extensión</b>	<b>40</b>
<b>5.3 Elevación de la cota de embalse, única simulación de 4 años de duración</b>	<b>42</b>

**Capítulo 6: CONCLUSIONES**

<b>6.1 PRINCIPALES CONCLUSIONES</b>	<b>45</b>
-------------------------------------	-----------

<b>REFERENCIAS</b>	<b>47</b>
--------------------	-----------

# Capítulo 1

## DESCRIPCIÓN DEL EMBALSE YACYRETÁ

### 1.1 OBJETIVOS

Fue proyectado para desarrollar el potencial hidroeléctrico del Río Paraná en la zona de las islas Yacyretá y Apipé. Un segundo buscado fue mejorar la navegabilidad del Paraná en la región, y un tercero controlar crecidas mediante la implementación de un sistema complementario de monitoreo. Pero no solo fueron estos los factores, sino que también a raíz de ellos se pensó aprovechar y promover el desarrollo de la región con parques industriales y posibilitar la irrigación de los campos, etc.

El beneficio internacional fue también contemplado al momento de tomar la decisión de su construcción ya que esta obra afianzaría las relaciones entre los países vecinos de Argentina y Paraguay.

### 1.2 UBICACIÓN

La presa se encuentra situada a aproximadamente 2 kilómetros aguas abajo de los rápidos de Apipé, 70 km al oeste de Posadas (Argentina) y aproximadamente a la misma distancia de Encarnación (Paraguay).

### 1.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPALES

La obra consta, en esencia, de una serie de presas de gravedad de material suelto con una extensión de aproximadamente 65 km. Su obra principal de hormigón reforzado se localiza sobre el brazo principal del Río Paraná. Trabaja en conjunto con las otras y posee una extensión de 808 m.

Las presas de material suelto varían a lo largo de su sección transversal de acuerdo con la topografía del terreno, material disponible y requerimientos de fundación. Dos secciones típicas fueron diseñadas. Una de ellas es de material homogéneo mientras que la segunda es zonificada, con núcleo impermeable.

La obra sobre el brazo principal está equipada con 20 turbinas, un vertedero con 18 compuertas radiales de 15 m de diámetro y 19,5 m de altura y una esclusa para navegación. Sobre el brazo Aña-Cuá del mismo río, existe otro vertedero con 16 compuertas (similares a las anteriores). En conjunto ambos vertederos son capaces de evacuar un máximo de 95000 m<sup>3</sup>/s.

Cada generador cuenta con una turbina tipo Kaplan con eje vertical de 9,5 m de diámetro. Poseen una altura de carga de 21,3 m y una velocidad rotacional de 71,4 rpm. Cada una de las turbinas es capaz de entregar 1725,5 MW con un coeficiente de potencia de 0,9, logrando en conjunto (20 turbinas) hasta 3200 MW con una potencia de 20000 GW/h.

Sobre ambos extremos del cierre del brazo principal se encuentran ubicadas dos compuertas para peces con el objetivo de permitir la migración a ambos lados del dique.

Con el nivel de agua a cota 76 (metros sobre el nivel del mar), el reservorio posee una superficie de 1144 Km<sup>2</sup> y un volumen de 7,89 Km<sup>3</sup>.

## Capítulo 2

# DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 2.1 EL MODELO *DYRESM*

El modelo utilizado en este trabajo se denomina “*Dynamic Reservoir Simulation Model*”, *DYRESM* presentado en primera oportunidad en el año 1990 por Imberger & Patterson.

*DYRESM* fue desarrollado por la Universidad del Oeste de Australia (UWA) y ha sido aplicado con resultados satisfactorios en más de 42 lagos de todo el mundo. Tiene la posibilidad de acoplar una componente ecológica (“*Computacional Aquatic Ecosystem Dynamic Model*”, CAEDYM) a la herramienta de modelación hidrodinámica. En base a algoritmos matemáticos simula los procesos físicos de calor entregado al lago en la superficie, intercambio de masas y transferencia de momentum, dinámica de las mezclas en los diferentes estratos, mezcla en el hipolimnion e intercambio de agua a través de la entrada de agua por tributarios y evacuaciones por descargadores. El modelo se encuentra disponible para su utilización y puede ser obtenido gratuitamente en la página web: <http://www.cwr.uwa.au>.

El modelo opera con una estructura Lagrangiana, la cual resuelve la estratificación vertical de densidad con series de hasta 100 capas horizontales. Considera que las propiedades de temperatura, densidad y salinidad son homogéneas dentro de cada capa, pero las capas pueden expandirse o contraerse para simular la evolución de los ingresos y egresos de volumen de agua. Las condiciones entre capas sucesivas se redistribuyen de acuerdo a las leyes de conservación de masa y energía. La discretización temporal de los datos de entrada depende de la precisión que se desee y de la capacidad de almacenamiento de los mismos, pudiendo variar desde intervalos menores de una hora, hasta semanal.

A su vez, el modelo es unidimensional y utiliza una suposición de homogeneidad horizontal, basado en que las variaciones de densidad laterales o longitudinales son disipadas rápidamente, comparadas con las variaciones causadas por la advección vertical. Esta suposición fue adoptada en base a observaciones en prototipos, en las que se determinó que la estratificación de densidad usualmente encontrada en lagos inhibe los movimientos verticales, mientras que las variaciones horizontales son dispersadas rápidamente por la convección y advección horizontal.

La validez de esta hipótesis fue corroborada con el número adimensional *Número de Lago*,  $L_N$  (Imberger y Patterson, 1990) en numerosos lagos. El  $L_N$  se define en términos de la estabilidad de la estratificación y de la influencia del viento o plumas de agua generadas por el ingreso de afluentes al cuerpo de agua como fuerzas perturbadoras. Si se considera únicamente la influencia del viento se lo puede definir como:

$$L_N = \frac{(z_g - z_o)M \cdot g(1 - \frac{z_T}{z})}{A^{3/2}(1 - \frac{z_T}{z})\rho_o u_*^2} \quad (2.1)$$

donde, tomando como punto de referencia el fondo del lago,  $z_o$  es la distancia en vertical al centro de gravedad de la masa de agua con una densidad  $\rho(\zeta)$ ,  $z_g$  es la altura del centro volumétrico de todo el lago,  $z_T$  es la altura hasta el centro de gravedad del metalímnion (zona de fuerte variación del gradiente de temperatura o “termoclina”),  $z$  la altura de la superficie del agua,  $M$  es la masa total de agua,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\rho_o$  es la densidad del agua en la superficie,  $u_*$  la velocidad de corte generada por el viento en la superficie del lago  $A$ .

Básicamente este número adimensional representa un cociente entre dos *momentos*, el numerador es el producido por la fuerza perturbadora (viento en este caso) que debe ser equilibrado mediante el denominador siendo este el momento generado por el esfuerzo boyante. Si el  $L_N \gg 1$ , entonces la fuerza recuperadora es mucho mayor que la perturbadora y la deflexión de  $z_o$  será pequeña. Esto implica que la estructura de la densidad será aproximadamente horizontal y la suposición unidimensional será válida. Físicamente significa que la estratificación será severa.

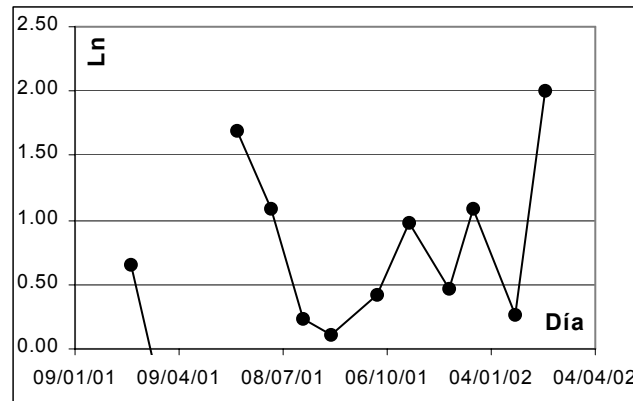
Si la acción que ejerce la mezcla está dada por el caudal de ingreso de los tributarios, el Número de Lago se define de la siguiente manera:

$$L_{N,i} = \frac{(z_g - z_o)M \cdot g(1 - \frac{z_T}{z})}{uQA^{1/2}(1 - \frac{z_T}{z})\rho} \quad (2.2)$$

donde  $u$  es la velocidad de ingreso del agua del tributario,  $Q$  el caudal ingresante y  $\rho$  la densidad del agua del río. Las demás variables responden a la nomenclatura anteriormente presentada.

Ambos números ( $L_N$  y  $L_{N,i}$ ) pueden ser combinados para obtener un parámetro global del sistema.

Se corroboró este parámetro adimensional en el Embalse Yacretá, utilizando para su cálculo la velocidad media del viento en la superficie del lago según el apartado 3.3 y la temperatura media mensual del aire. Perfiles térmicos relevados in-situ permitieron obtener el  $L_N$  cuya evolución anual presentó la siguiente distribución:



*Figura 2.1: Evolución del Número de Lago ante la acción perturbadora del viento en superficie*

De la figura 2.1 surge que  $L_N \sim 1$ , lo cual implica que el sistema presenta una relativamente buena mezcla vertical, tal cual se desprende de las mediciones actuales realizadas en el embalse.

Esto no invalida la aplicación del modelo, en el sentido de que uno de los objetivos del estudio es determinar si con mayores cotas de embalse el sistema se encontrará efectivamente estratificado. Para tales situaciones, se espera un incremento de las fuerzas estabilizadoras y una disminución de las perturbadoras (a expensas del aumento de las profundidades). Es decir, valores de  $L_N$  más cercanos a la hipótesis de unidimensionalidad.

Sin embargo, se advierte que la estratificación podría no ser severa a nivel global. Además, actualmente la hipótesis de unidimensionalidad no se cumple abiertamente, lo cual, teniendo en cuenta la geometría compleja del reservorio, indica que el modelo utilizado en este informe debería utilizarse como una herramienta preliminar de estudio, recomendándose a futuro la aplicación de modelos más complejos.

## Capítulo 3

# PROCESAMIENTO DE VARIABLES

### 3.1 GENERALIDADES

La operación de *DYRESM* requirió para su funcionamiento la confección de una base de datos mediante el ordenamiento de información que se encontraba dispersa. A su vez se procesaron variables meteorológicas, datos morfométricos del embalse y del tributario principal, además de la determinación de algunos parámetros característicos y coeficientes.

### 3.2 POSICIONAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

El Ente Binacional Yacyretá (EBY) realiza mensualmente un seguimiento del comportamiento de las distintas variables características del agua medidas en el lago, tributarios y efluentes, útiles para el presente estudio. Tal es el caso de la temperatura de la columna de agua en diferentes puntos de muestreo. La figura 3.1 presenta la localización de las estaciones de monitoreo:



Figura 3.1: Embalse Yacyretá y sus estaciones de monitoreo.

### 3.3 VARIABLES METEOROLÓGICAS

Se utilizaron los registros meteorológicos de la base de datos que el EBY posee para la localidad de Posadas. Los mismos fueron registrados por sensores pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional en el aeropuerto de la mencionada localidad, adoptados como representativos de las condiciones en la totalidad del embalse. Para el estudio se utilizaron los correspondientes al período enero de 2001 – febrero de 2002 de las siguientes variables: intensidad del viento (*wind speed*) y dirección, temperatura del aire (*T air*), humedad relativa ambiente, precipitación (*Rainfall*) y porcentaje de cobertura nubosa o “cloud cover”. Todos los datos fueron llevados a valores diarios partiendo de registros horarios. A continuación las figuras 3.2, 3.3, 3.5, 3.6 y 3.7 muestran los valores medios diarios utilizados en cada caso y la figura 3.4 la precipitación diaria acumulada. La presión de vapor (*Vap pr*) se determinó con una expresión que la relaciona con la humedad relativa ambiente y la temperatura del aire.

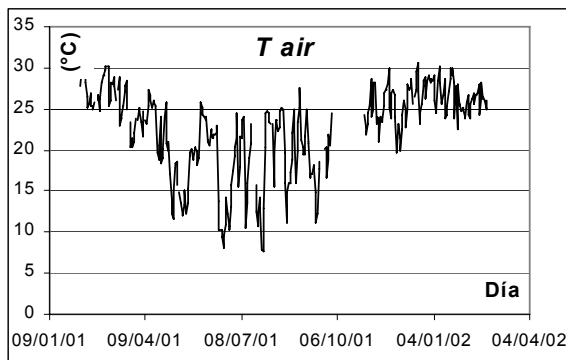


Figura 3.2: Temperatura media diaria del aire en Posadas

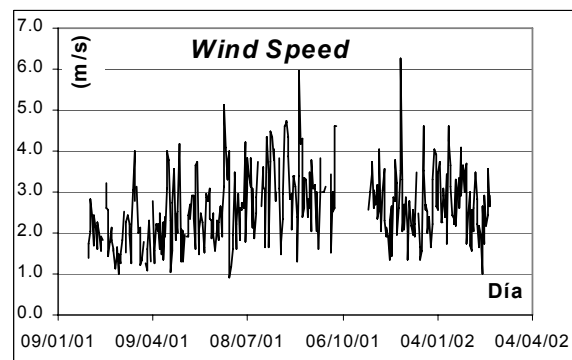


Figura 3.3: Intensidad del viento media diaria en Posadas

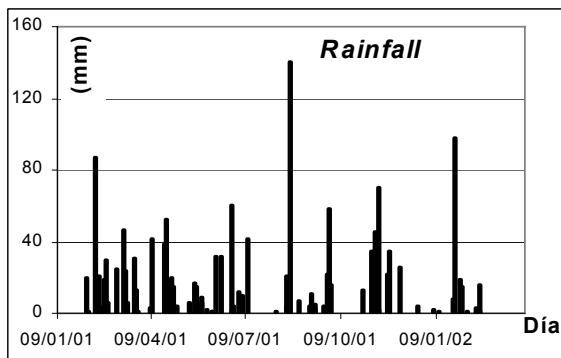


Figura 3.4: Precipitación diaria en Posadas

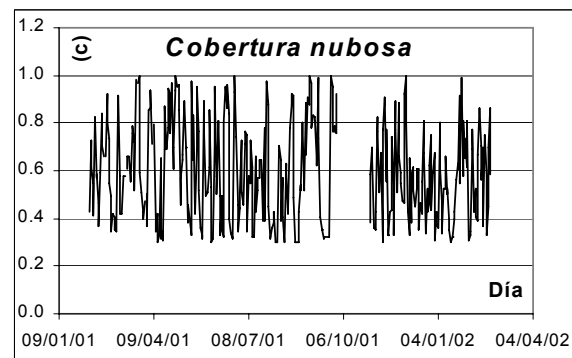


Figura 3.5: Porcentaje de cobertura nubosa medio diario para la localidad de Posadas

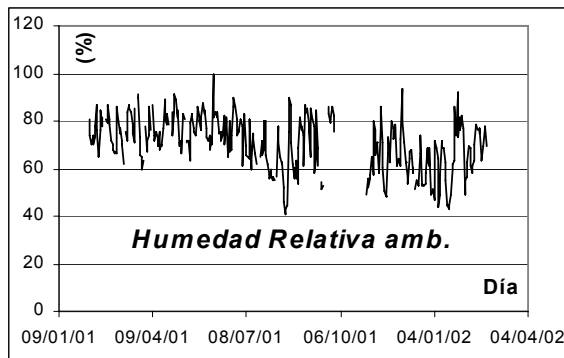


Figura 3.6: Humedad relativa ambiente media diaria en Posadas

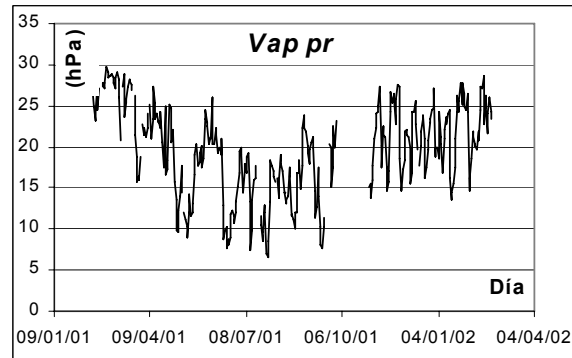


Figura 3.7: Presión de vapor estimada.

La figura 3.8 presenta los valores medios mensuales de la temperatura del aire junto con el conjunto de valores máximos diarios promediados a nivel mensual, al igual que los mínimos promediados para cada mes. Se puede apreciar que el período más cálido involucra los meses de octubre a abril, con temperaturas medias mensuales mayores a los 22° C. El clima es subtropical, observándose que en ningún caso las medias mensuales son inferiores a los 17° C.

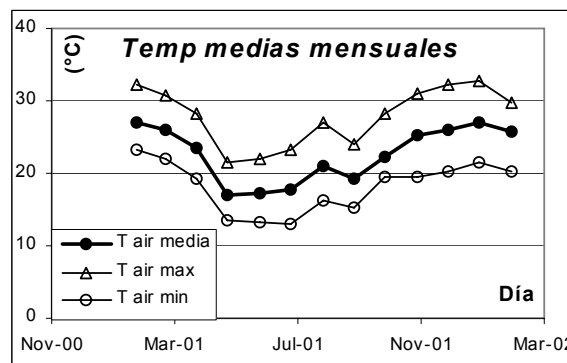


Figura 3.8: **T air media:** Temperatura media mensual;  
**T air max:** Temperatura media mensual de los valores máximos diarios;  
**T air min:** Temperatura media mensual de los registros mínimos diarios

La tabla de la figura 3.9 presenta los valores medios mensuales de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias (apreciables gráficamente en la figura 3.8). También se indican los valores extremos, mostrando que la temperatura mínima minimorum para el período analizado se presentó en el mes de julio, no coincidiendo con el mes más frío en términos de temperatura media mensual (siendo éste el mes de mayo). La columna 4 indica que el mes de julio tuvo la más baja media mensual de los valores mínimos, con 12,9° C. Con respecto a las máximas, el análisis se planteó de similar manera, habiéndose registrado el máximo absoluto

los días 20 y 21 de diciembre de 2001, con 38° C. En general el rango de temperaturas diarias promedia los 9,8°, habiendo alcanzado sólo en una oportunidad los 16,6° y en otro extremo los 2,2° C, el 18 de agosto de 2001.

Columna 1	2	3	4	5	6
	Valores <b>medios</b> mensuales de:			Valores <b>extremos</b> de:	
	media diaria	max diaria	min diaria	max	min
Febrero del 01	26.95	32.37	23.25	35.30	20.90
Marzo	25.93	30.75	22.04	35.30	15.60
Abril	23.42	28.35	19.26	34.20	14.60
Mayo	16.97	21.61	13.52	30.40	5.40
Junio	17.16	22.08	13.31	30.40	2.40
Julio	17.74	23.19	12.94	31.40	1.10
Agosto	21.06	27.02	16.27	31.70	9.30
Septiembre	19.17	24.09	15.31	34.00	4.20
Octubre	22.22	28.20	19.40	28.20	19.40
Noviembre	25.14	30.98	19.61	36.30	15.60
Diciembre	25.94	32.18	20.37	38.00	13.20
Enero	26.89	32.65	21.56	37.60	17.60
Febrero del 02	25.84	29.75	20.25	30.40	18.60

*Figura 3.9: Valores característicos de la temperatura del aire en °C para cada mes. Consideraciones en términos medios mensuales y extremos máximos y mínimos*

La evolución de la intensidad del viento (medias mensuales) se presenta en la figura 3.10, la que permite apreciar que los meses más ventosos corresponden al período julio – octubre. Para el estudio de la dirección del viento se utilizaron las ocho direcciones principales de la rosa de los vientos. Como se mencionó con anterioridad, los datos son registrados de forma horaria durante el período 06/febrero/2001 – 22/febrero/2002. Cabe mencionar que, de los 8376 datos horarios correspondientes a ese período, solamente se cuenta con 8077 registros efectivos (96.4%), siendo que el resto fue estimado.

La figura 3.11 presenta la frecuencia que tuvo la dirección del viento (en % del total de 8077 registros) según la rosa de los vientos. Es notoria la preponderancia que adquiere la dirección Este, representando una frecuencia del 26,7%, seguida por las direcciones Sur (19,1%) y Sudeste (18,4%), en tanto que la Nordeste tampoco es despreciable (14,3%). La condición de calma se presentó en solo el 1,1% de los registros. También se analizó la distribución de frecuencias de los vientos con intensidades mayores a 3 m/s (figura 3.12) en términos medios diarios. Estos valores adquieren importancia dentro de la simulación ya que valores más bajos no son tomados como fuerzas perturbadoras por el modelo numérico. Se tuvieron 3274 registros con  $U_{10} \geq 3m/s$ , siendo  $U_{10}$  la velocidad del viento a 10 metros de la superficie del agua, supuesta igual a la registrada en el sensor de la localidad de Posadas. En general la distribución fue similar a la de la figura 3.11, distribuyéndose más equitativamente entre las direcciones Noreste con un 20,3%, Este (17,9%), Sudeste (16,1%) y Sur (20%).

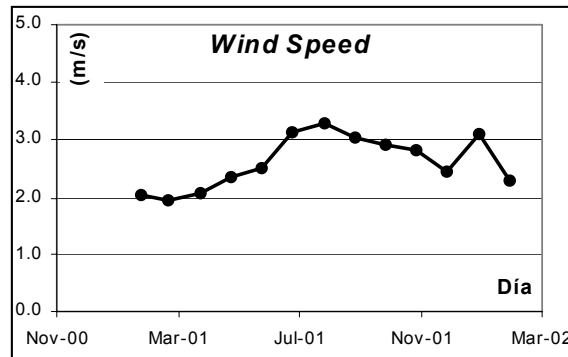


Figura 3.10: Intensidad media mensual del viento

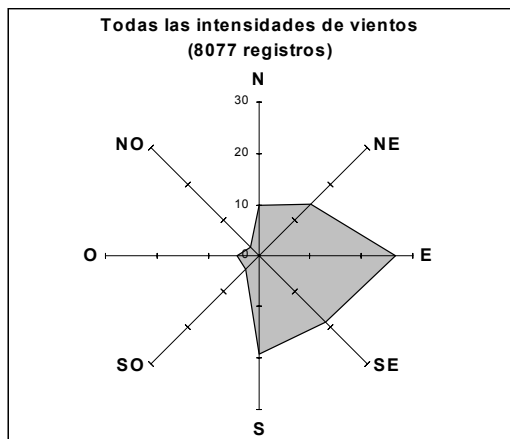


Figura 3.11: Frecuencia de las direcciones de los vientos (en % del total) para todos los eventos de viento entre el 06/feb/01 y el 22/feb/02 en Posadas.

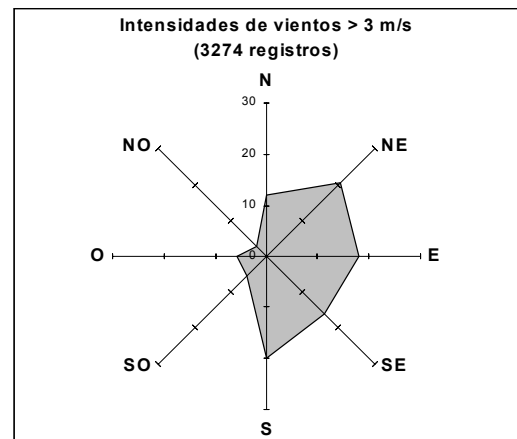


Figura 3.12: Frecuencia de las direcciones de los vientos (en % del total) para los eventos de viento con intensidades mayores a 3 m/s para el período 06/feb/01-22/feb/02.

De esta manera, la longitud del cuerpo de agua en la dirección predominante del viento (comúnmente denominada “fetch”) sin influencia de perturbaciones en elevación (como islas, etc.) es del orden de los 30 km aproximadamente.

### 3.3.1 Análisis de Radiación

La radiación puede clasificarse de diversas formas, una de ellas es a través de su longitud de onda. Así, puede decirse que la radiación comprendida entre 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$  cubre el rango visible, siendo parte del espectro de onda corta (*SW*, cubriendo el rango entre 0,28 y 2,8  $\mu\text{m}$ ), mientras que la infrarroja tiene un valor medio de longitud de onda de 10  $\mu\text{m}$ , siendo parte del espectro de onda larga (*LW*, por encima de 3  $\mu\text{m}$  y hasta el rango de microondas).

La división Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha colaborado en este estudio, proveyendo una estimación para los valores de radiación sobre la superficie terrestre. Ésta contempla el concepto teórico que sugiere que la radiación ideal en el límite con la atmósfera, afectada por un coeficiente de transmisividad, permite determinar los valores correspondientes a la *radiación incidente* sobre cualquier superficie en La Tierra, en  $[W/m^2]$ . Parte de la información proviene de instrumental de medición directa ("piranómetros", sensibles a la radiación en el rango 0,3 y 3  $\mu m$ ).

La radiación incidente sobre el lago comprende las componentes de onda corta y de onda larga, de modo que

$$RT = SW + LW \quad (3.1)$$

donde  $RT$  es la radiación incidente suma de ambos rangos de longitudes de onda, siendo  $SW$  la componente de onda corta y  $LW$  la de onda larga.

Una de las formas que permite estimar la radiación  $LW$  atmosférica es a través de expresiones en función del porcentaje de cobertura nubosa ("c"). Se determinó este porcentaje partiendo de las condiciones del tiempo relevadas diariamente a intervalos horarios por un observador con valores subjetivos (ver figura 3.5). El criterio utilizado fué tomar valor 0 para un día totalmente despejado y valor 1 para un día nublado completamente, en tanto que los valores intermedios se definieron en función de las condiciones del tiempo. Los valores horarios promediados definieron el porcentaje de cobertura nubosa para cada día.

A los efectos de determinar la influencia de la radiación de onda larga atmosférica en el porcentaje total de radiación diaria, se las aproximó mediante diversas expresiones utilizadas comunmente en la bibliografía (Fischer, *et al.* 1979; Wüest, *et al.* 1999). Básicamente, todas ellas utilizan la ecuación de Stefan-Boltzman para radiación de cuerpo negro. Así, se puede presentar una expresión general para la radiación emitida por las partículas suspendidas en la atmósfera, de la siguiente manera:

$$LW = \phi(c).E_a(T_a).(1 - r_a).\sigma.T_a^4 = B.(1 - r_a).\sigma.T_a^4 \quad (3.2)$$

donde  $LW$  es la radiación de onda larga en  $[W/m^2]$ ,  $\phi(c)$  es un coeficiente función de la cobertura nubosa,  $E_a(T_a)$  es la emisividad de la atmósfera función de la temperatura del aire,  $r_a$  es la reflexión de onda larga del aire,  $\sigma$  es la constante de Stefan – Boltzman =  $5,67 \cdot 10^{-8} [W/(m^2 \cdot ^\circ K^4)]$  y  $T_a$  es la temperatura absoluta del aire  $[^\circ K]$ .

Los factores  $\phi$  y  $E_a$  se encuentran entre los siguientes valores:

$$\phi(c) = \begin{cases} 1 & \text{Wuest} \\ 1 + 0.17c^2 & \text{Fischer et al.} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$E_a(T_a) = \begin{cases} 0.6 - 0.9 \\ C_e T_a^2 \end{cases} \quad C_e = 9.37 \cdot 10^{-6} K^{-2} \quad \begin{matrix} \text{Wuest} \\ \text{Swinbank} \end{matrix} \quad (3.4)$$

El ajuste más satisfactorio de las condiciones en el embalse surgió para un factor promedio  $B = \phi(c)E_a(T_a) \cong 0.88$  en la expresión de  $LW$  atmosférica, siendo el rango de variación de 0.75 a 0.97. El factor  $B$  se obtuvo a partir del proceso de calibración del modelo utilizando la expresión de Fisher *et al* (1979):  $LW = (1 + 0,17c^2) \cdot (C_e T_a^2) \cdot (1 - r_a) \cdot \sigma \cdot T_a^4$ . El resultado es el mostrado en la figura 3.13 para el período estudiado. En la misma figura se presenta la componente de radiación de onda larga emitida desde el cuerpo de agua, determinada a partir de consideraciones similares a las presentadas para la componente atmosférica. Se observa un cierto balance entre ambas, siendo que aparece una tendencia a la pérdida de energía desde el cuerpo de agua (si únicamente se consideran las componentes de onda larga).

En la figura 3.14 se presenta la componente de onda corta. El modelo *DYRESM* toma esta componente como dato, estimando internamente las componentes de onda larga.

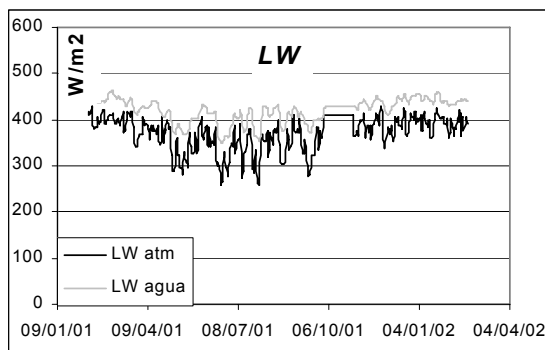


Figura 3.13: Componentes de radiación de onda larga atmosférica y del agua del lago.

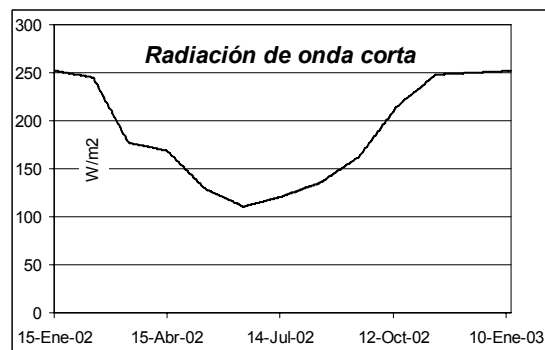


Figura 3.14: Radiación solar de onda corta

### 3.4 CAUDALES Y NIVELES

Los caudales ingresantes fueron estimados a partir de aforos y aproximaciones teóricas aguas arriba de Posadas. Esta información, junto con los caudales evacuados del reservorio y los niveles del embalse, fueron cedidos por el EBY, para el mismo período, con una discretización diaria (ver figura 3.15).

Los caudales son erogados del embalse mediante compuertas en arco, con apertura vertical, que originan un flujo saliente a presión tipo orificio. A partir de los detalles técnicos de la obra civil y la información disponible al momento de realizar este estudio, se fijó la cota de extracción media en 57 msnm. Este valor adquiere mayor influencia cuando son mayores los

caudales erogados, ya que la salida de masa a una cierta altura con su correspondiente temperatura, colabora en la regulación de las condiciones térmicas dentro del embalse.

La figura 3.16 presenta los niveles de embalse durante el período de estudio.

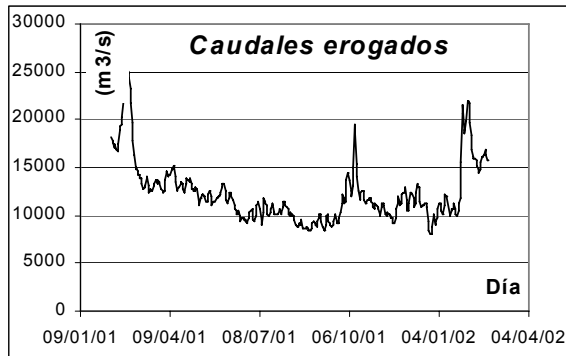


Figura 3.15: Caudales erogados del embalse.

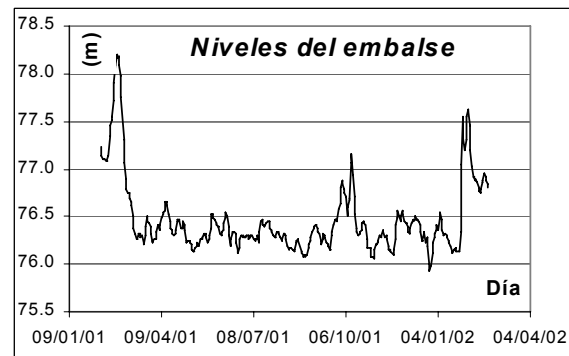


Figura 3.16: Niveles en el embalse en el período estudiado

### 3.5 ASPECTOS MORFOMÉTRICOS

En la simulación se definió como vaso hidráulico aquel correspondiente a la zona lacustre del embalse. El mismo se muestra en la figura 3.1: va desde el corte A-A hasta ambos cierres sobre los brazos Aña Cuá y principal. La sección de corte A-A se definió a partir de los resultados del modelo hidrodinámico bidimensional (que se desarrolla en forma paralela al presente estudio), que indican que en esa región comienza el remanso que determina la transición entre los regímenes de flujo fluvial y flujo lacustre.

Se utilizó la misma batimetría empleada en la modelación hidrodinámica bidimensional del embalse. A partir de esta digitalización, se confeccionaron las curvas altura-área y altura-volumen. Ambas relaciones se presentan en las figuras 3.17 y 3.18.

También resulta necesario ingresar algunos parámetros de la morfometría de los ríos (geometría del paleocauce dentro del reservorio), a partir de los cuales el modelo calcula las condiciones de mezcla en el ingreso al reservorio. Para ello se utiliza la batimetría comentada en el análisis del párrafo anterior.

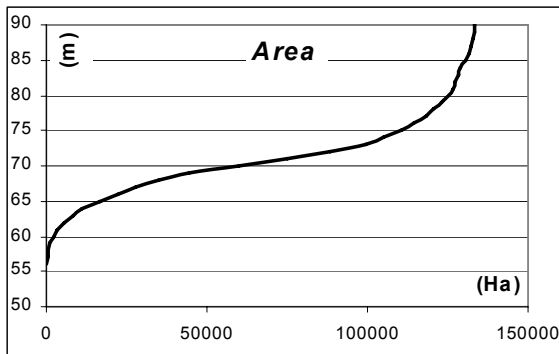


Figura 3.17: Relación altura – área para el embalse Yacyretá

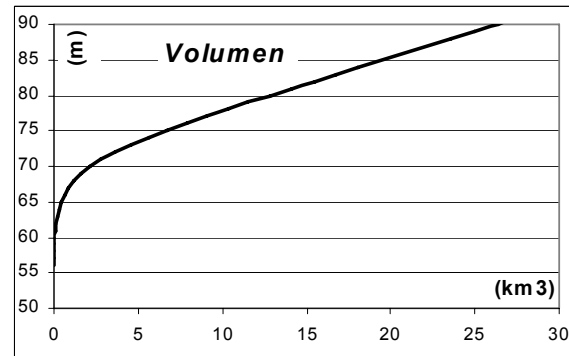


Figura 3.18: Relación altura – volumen para el embalse Yacyretá

Como puede apreciarse en la figura 3.1, la sección A-A se encuentra ubicada sobre un sector de la isla Yacyretá. Esto define dos secciones de río como tributarios de la zona modelada, pero cuya acción conjunta corresponde al único afluente simulado (el río Paraná).

DYRESM simplifica la sección de ingreso de los ríos a los embalses en forma triangular. Se plantearon dos hipótesis para la simulación, la primera fue suponer como afluente un solo río de *medio ángulo* de la sección hipotética de  $\alpha = 80^\circ$  con un ancho de 8 km y una profundidad máxima de 8 m, y la segunda consistió en adoptar dos ríos como se indica en la figura 3.19:

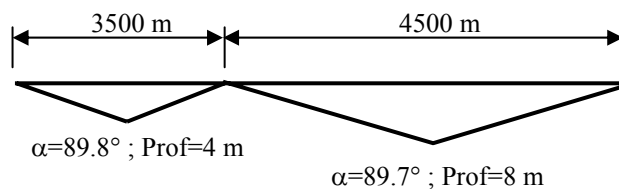


Figura 3.19: Sección simplificada del Río Paraná en la Sección A – A (ver figura 3.1)

Ya que la adopción de una u otra hipótesis no reviste mayores esfuerzos, y el porcentaje de caudal en una y otra sección es conocido a partir de los resultados del modelo bidimensional, se adoptó la simulación mediante dos secciones, por considerarse que representa más fielmente la situación real.

Ambos brazos poseen una pendiente de  $0,057^\circ$ . Para el Brazo Aña Cua ( $\cong 5\%$  del total del caudal entrante) el ancho máximo es de 3500 m a la entrada, que junto con la profundidad máxima definen una sección esquemática triangular con medio ángulo  $\alpha > 89^\circ$ , adoptándose a los fines prácticos  $\alpha = 89^\circ$ . Un análisis similar fija para el Brazo Principal ( $\cong 95\%$  del total del caudal entrante) el mismo ángulo. Para ambos se adoptó un “drag coefficient”  $C_D = 0,016$ ,

el cual se fijó basándose en experiencias según simulaciones de Alexander (2000) para ríos con características similares.

Para completar la información de la morfometría del cuerpo de agua y el efecto que producen las intrusiones de agua por tributarios, es necesario agregar la cota a la cual ingresan los mismos (esta variable resulta indispensable si se cuenta con ingresos de agua sumergidos). Se fijó la cota como *superficial*, por lo que el modelo simula el ingreso de agua de río en función del pelo de agua del reservorio simulado en cada paso de cálculo.

Adicionalmente, el modelo requiere la información asociada a las descargas. En este trabajo se utilizó una cota máxima para vertederos de 100 msnm (no alcanzable en ningún momento) y una cota uniforme para los descargadores de 57 msnm.

### **3.6 TEMPERATURA DEL AGUA DE LOS TRIBUTARIOS**

Debido al elevado caudal que aporta el Río Paraná, se lo asumió como único tributario.

Se compararon dos metodologías para estimar la temperatura del agua del tributario. La primera de ellas surge a partir de los perfiles de temperatura de las estaciones EI-4MD y EI-9, relevados en campo con una distribución temporal de una campaña por mes calendario. Ambas estaciones se asumen representativas de la temperatura del Paraná a la entrada del embalse, justificada mediante las corridas del modelo numérico bidimensional *Hidrobid*. Con esta herramienta complementaria se definió el nivel piezométrico aguas arriba de la presa, encontrándose una zona con características de régimen lacustre y otra con régimen fluvial (de acuerdo a la definición de vaso hidráulico modelado, detallada anteriormente). Tanto EI-4MD como EI-9 se encuentran localizadas dentro del segundo régimen, perteneciendo ambas a la zona de influencia de la curva de remanso. Bajo esta condición, la temperatura en tales estaciones puede ser tomada como representativa de la temperatura del río. A su vez, las dos verifican una distribución de temperaturas prácticamente uniforme en profundidad (lo que indica buena mezcla y régimen básicamente fluvial). Se determinó, entonces, la temperatura media del agua entre las dos estaciones correspondientes al día de muestreo que, a su vez, fue tomado como representativo del mes en que fue realizado. El valor medio entre ambas estaciones (que nunca difirió en más de 1 °C) se utilizó para suponer una distribución lineal entre dos muestreos sucesivos.

La segunda hipótesis se realizó aproximando la temperatura diaria del tributario con la temperatura media móvil del aire para los últimos cuatro días, hipótesis que fue de utilidad para ajustar satisfactoriamente los perfiles térmicos de otros cuerpos de agua (Lago Parque Sur, Santa Fe y Embalse San Roque, Córdoba, entre otros) y que es recomendada por la bibliografía y por los autores del modelo numérico utilizado (Antenucci 2000).

La comparación de ambas hipótesis se puede apreciar en la figura 3.20. Ambas metodologías mantienen una distribución anual semejante, arrojando valores de temperatura del agua menores aquella que corresponde a la aproximación mediante la temperatura del aire. Nótese

que esta metodología ajusta mejor los datos durante la temporada estival, en contraste con una dispersión mayor durante la época invernal.

Se entendió que la primer hipótesis representa las condiciones reales con mayor fidelidad, al haberse estimado en función de registros de temperatura del agua reales y no de suposiciones ambientales.

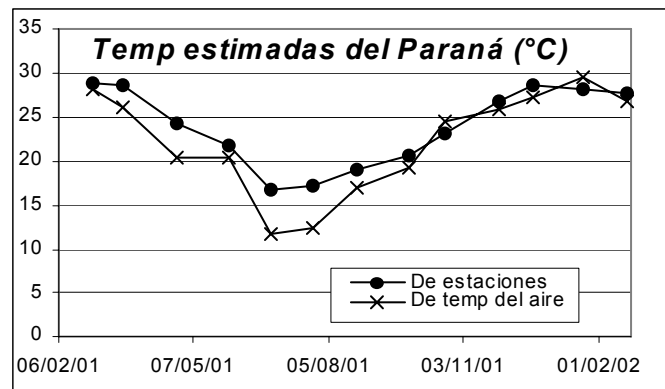


Figura 3.20: Comparación de metodologías para la determinación de la temperatura media mensual del río Paraná en el ingreso al lago.

### 3.7 ENERGÍA CALÓRICA ENTREGADA AL EMBALSE

El módulo del Río Paraná es de unos 15500 m<sup>3</sup>/s, mientras que el volumen del embalse a cota 76 m ronda los 7,9 Km<sup>3</sup>. Por consiguiente, el *tiempo de residencia* del agua en Yacyreta se reduce a menos de una semana ( $t_{76m} \cong 6$  días, en términos generales). Por ello, la energía que entrega el río adquiere gran importancia no solo en la capacidad de mezcla, sino también al afectar las fluctuaciones térmicas del agua dentro del reservorio.

El intercambio neto de calor entre agua y atmósfera,  $H_{net}$  [W/m<sup>2</sup>], contiene 7 componentes principales, a saber:

$$H_{net} = H_s + H_a + H_w + H_e + H_c + H_p + H_i \quad (3.5)$$

En (3.5), los términos son definidos positivos cuando el flujo de energía es entrante al cuerpo de agua. El término  $H_s$  se debe a la radiación solar (onda corta y visible  $\cong 0,4 - 0,7 \mu m$ ),  $H_a$  a la radiación infrarroja (onda larga  $\cong 10 \mu m$ ) emitida desde las partículas de polvo y agua suspendidas en el cielo,  $H_w$  es la radiación infrarroja emitida desde el agua, mientras que los términos no radiativos son el debido a la evaporación/condensación ( $H_e$ ), a la convección ( $H_c$ )

y a la precipitación ( $H_p$ ), y por último  $H_i$  que se debe a las entradas de agua y salidas del reservorio.

En condiciones normales los tres términos radiativos son los que adquieren mayor importancia, siendo los restantes despreciables. Sin embargo, para el caso particular de Yacyretá, un término que adquiere relevancia en el balance energético es aquel debido a la energía calórica  $H_i$  ingresada por el río y extraída por las salidas (debido al corto tiempo de residencia de agua en el embalse).

Básicamente la energía suministrada por un río es función de la masa de agua transportada y su temperatura ( $H_i = f(M_w, T_w)$ ), pudiéndose expresar como:

$$H_i = K \frac{\rho \cdot C_p \cdot Q T_w}{A} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.6)$$

siendo  $C_p$  el calor específico del agua ( $C_p = 1 \text{ cal/m}^2$ ),  $\rho$  la densidad del agua [ $\text{kg/m}^3$ ],  $Q$  el caudal entrante [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $T_w$  la temperatura absoluta del agua del río [ $^\circ\text{K}$ ],  $A$  el área del embalse y  $K$  un coeficiente que incluye las constantes para la compatibilidad de unidades ( $K= 250,92$ ).

Se comparó, de esta manera, la energía calórica entregada a través de radiación solar y aquella que aporta el tributario principal. Esto permite, además, evaluar la importancia que adquiere la determinación de la temperatura del tributario (ver ítem 4.3.4). Como puede apreciarse en las figuras 3.21 y 3.22, la energía que brinda el río es del mismo orden de magnitud que la solar (con promedio del 51%) por lo que fue adoptada como variable de calibración.

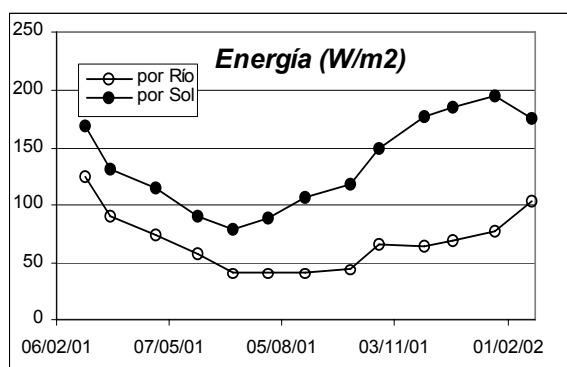


Figura 3.21: Comparación entre energía solar y entregada por el río

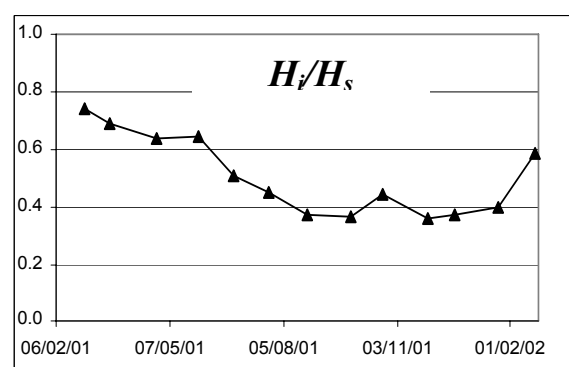


Figura 3.22: Relación entre la energía entregada por el río y por el sol (onda corta)

### 3.8 COEFICIENTE DE EXTINCIÓN DE LA LUZ

El coeficiente de extinción de la luz,  $k$ , requirió un análisis detallado. Este parámetro externo que utiliza el modelo, conceptualmente representa las diversas pérdidas que experimenta la radiación al atravesar el cuerpo de agua, y puede ser tomado proporcional a la profundidad del disco de Secchi.

Se contó con datos recopilados in-situ de transparencia y turbidez para 13 campañas en el período analizado y en 4 estaciones (Itá Ibaté/Panchito López, Efluente/Toma Ituzaingó, Candelaria/Campichuelo y Puerto Libertad) con tres subestaciones en cada una de ellas, representando un total de 156 grupos de valores de *turbidez vs transparencia*, de acuerdo a lo mostrado en la figura 3.23.

La transparencia se asume igual a la profundidad del disco de Secchi. Las estaciones en el embalse solo cuentan con registros de turbidez, que deben ser utilizados para estimar la transparencia. A partir de esta información se realizó un análisis de regresión simple, cuyo mejor ajuste logrado responde a la siguiente expresión potencial:

$$D = 290,14T^{-0,4191} \quad R^2=0,6991 \quad (3.7)$$

donde  $D$  es la transparencia [cm] y  $T$  la turbidez [NTU=unidades nefelométricas de turbidez].

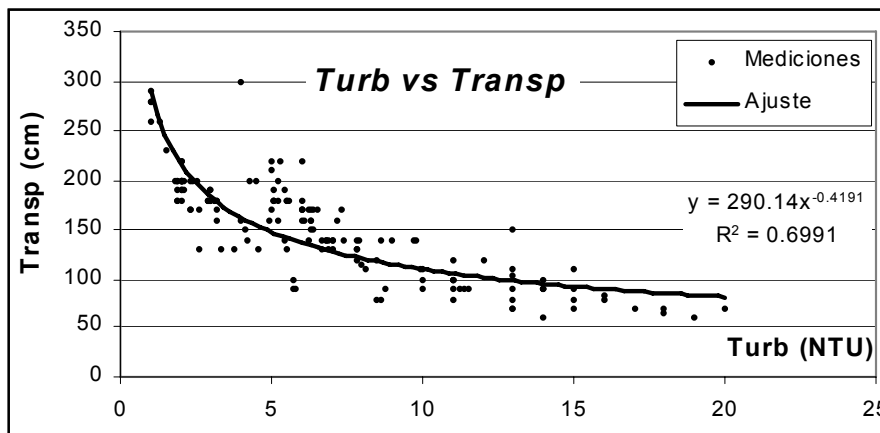


Figura 3.23: Regresión entre turbidez y transparencia

Luego de fijada la expresión que relaciona ambas variables, se puede calcular el coeficiente de extinción de la luz  $k$  mediante (Margalef, 1983):

$$k = \frac{C}{D} \quad (3.8)$$

donde  $C$  es una constante con valores entre 0,61 y 1,90 y  $D$  está expresada en m.

La forma operativa de cálculo fue determinar en primer lugar un valor medio de turbidez para cada perfil medido en EI-4C y EI-4MI, luego obtener la transparencia correspondiente a través de (3.7), y finalmente calcular el valor de  $k$  usando (3.8). Se fijó  $C=1,70$ .

## Capítulo 4

# VALIDACIÓN DEL MODELO

### 4.1 ESTACION DE COMPARACION

Como se comentó con anterioridad, *DYRESM* simula comportamientos en reservorios y lagos los cuales tienen normalmente tiempos de residencia mayores al del embalse Yacyretá. No todas las estaciones de muestreo en este último pueden suponerse bajo condiciones usuales de comportamiento lacustre, presentando velocidades de flujo dentro del reservorio más altas que en embalses convencionales. Tal es el caso que se aprecia en las estaciones EI-4MD y EI-9 adoptadas como representativas del Río Paraná, y en las estaciones EI-10MD y EI-10MI, cercanas a las obras de cierre del embalse e influenciadas por el gran caudal que es descargado por el reservorio.

Utilizando la herramienta numérica fueron comparados los perfiles de temperatura simulados por el modelo con los relevados en muestreos mensuales en 3 estaciones. Dos de ellas, EI-4C y EI-4MI, corresponden a la zona central del embalse y disponen de datos de todos los muestreos realizados durante el año 2001. La tercera, EI-10MD, se ubica en la región aguas abajo, cercana a las obras de descarga.

No se comparó con las estaciones EI-4MD y EI-9 por asumirse éstas como de comportamiento lótico. La comparación fue complementada con los resultados arrojados por el modelo *Hidrobid*, el cual presenta el campo de velocidades medias horizontales dentro del embalse.

Se utilizó como *perfil inicial de temperatura* el correspondiente a la estación EI-4MI del día 26 de febrero de 2001, aunque la corrida comienza el 09 de febrero del mismo año en correspondencia con la disponibilidad de datos meteorológicos. De todos modos, en función del corto tiempo de residencia la condición inicial se pierde relativamente rápido. Se asumió un *coeficiente de extinción de la luz*  $k = 1,13$  constante para todo el período. Además, el *rango de variación de las capas de simulación* se estableció entre 1 y 4 m. La figura 4.1 presenta el resultado de la simulación numérica bajo estas condiciones, recalcando que el modelo no se encontraba calibrado.

Los resultados de las simulaciones se pueden extraer del programa en forma gráfica (figura 4.1). Para ello *DYRESM* utiliza como soporte el programa *Matlab 5.3*. El contorno gráfico de resultados es presentado en dos ejes cartesianos. En ordenadas se ubica la cota relativa al punto más bajo del embalse (cota 50 msnm equivalente al cero relativo) en metros. En abscisas se ubica el tiempo de simulación, en el formato *mes / día / año*. Para representar las variaciones de temperatura en el tiempo y en profundidad se utiliza un campo de colores. Se puede apreciar una escala de referencia a la derecha de los gráficos, la cual no se mantiene constante para dos corridas independientes. Esto significa que los campos de colores entre dos gráficos independientes no son comparables entre sí. Las variaciones de temperatura representadas con colores se obtienen mediante una interpolación lineal que realiza internamente el modelo.

El contorno gráfico no es la única manera de presentar los resultados, pero por su sencillez de interpretación resulta con frecuencia una de las más utilizadas. En ella se puede abarcar la totalidad del período en estudio siendo posible la visualización de las épocas del año con estratificación, períodos fríos o cálidos, ocurrencia de eventos de viento extremos o entrada de agua desde tributarios a temperaturas marcadamente distintas de las del reservorio, etc.

Una segunda forma de presentar los resultados es mediante gráficos cartesianos (figura 4.2), en este caso uno por cada día elegido para la comparación. En ellos se ubica en ordenadas la cota relativa al fondo en metros y en abscisas la temperatura en °C. La comparación se realiza ubicando ambos perfiles, el simulado y el medido, superpuestos para la misma fecha. Para realizar la comparación entre los valores tomados in-situ y los modelados se elaboró un programa sencillo en Matlab que extrae los resultados del programa desde la matriz de referencia, siendo esta la que integran los resultados de la modelación.

En la figura 4.2 a, b y c se expone la comparación entre los perfiles térmicos relevado in situ y los simulados por *DYRESM* para las tres estaciones mencionadas, y para cuatro fechas asumidas como representativas del mes calendario al que pertenecen.

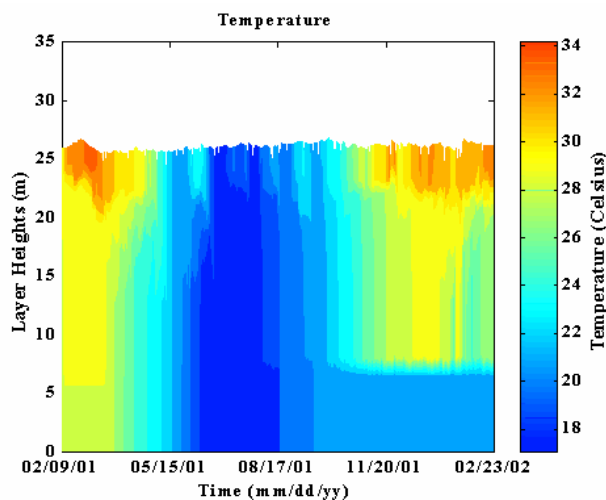


Figura 4.1: Simulación numérica no calibrada.

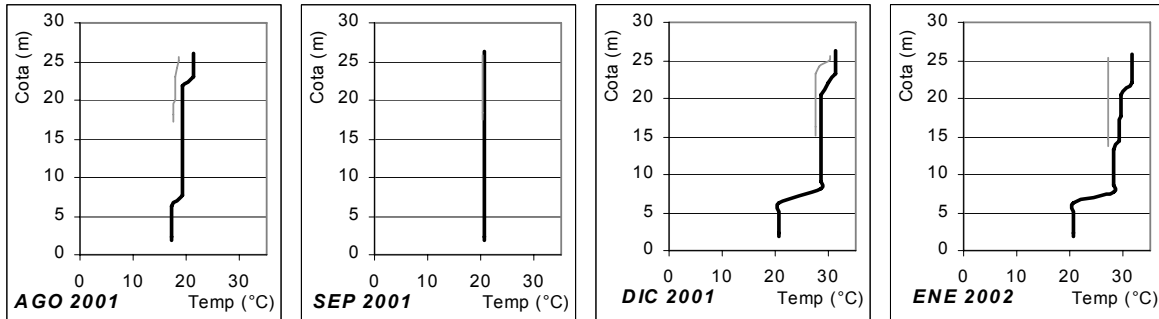


Figura 4.2. (a): Perfiles simulados no calibrados (negro) vs perfiles medidos in-situ (gris). Estación EI – 10 MD.

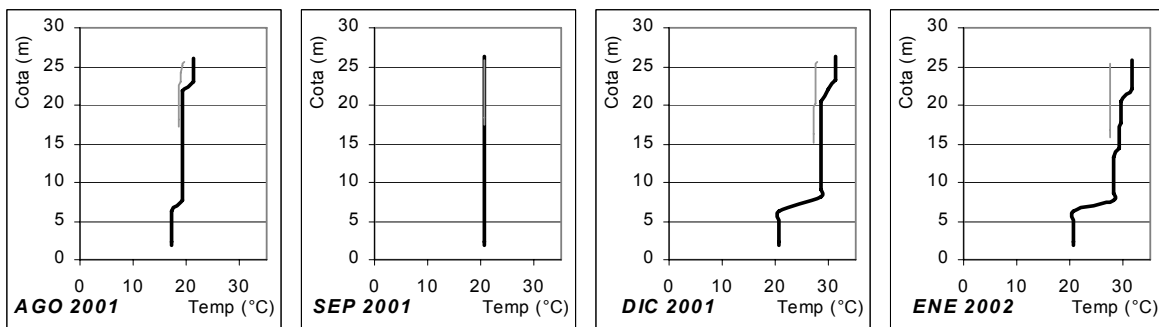


Figura 4.2. (b): Perfiles simulados no calibrados (negro) vs perfiles medidos in-situ (gris). Estación EI – 4C

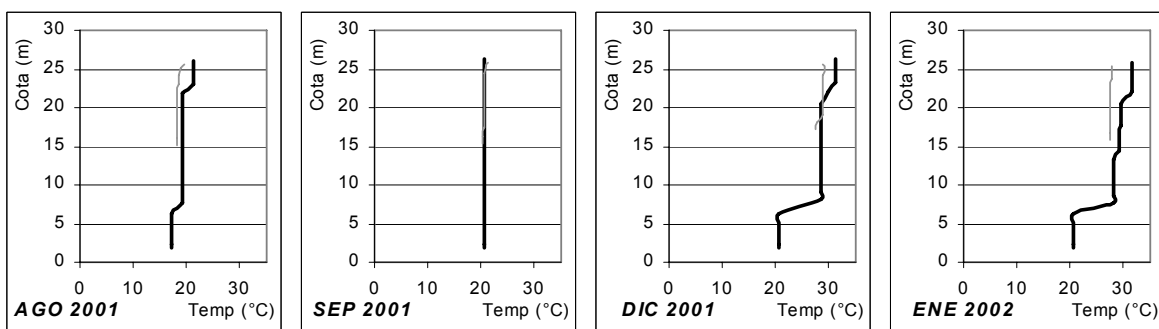


Figura 4.2. (c): Perfiles simulados no calibrados (negro) vs perfiles medidos in-situ (gris). Estación EI – 4 MI

A partir de los campos de flujo obtenidos con el modelo hidrodinámico bidimensional se deduce que, de las tres estaciones de comparación, EI-4MI es la que presenta condiciones semejantes a las lacustres. Consistentemente, en términos medios es en ésta estación donde el modelo ajusta mejor los perfiles de temperatura relevados in-situ sin ser estos resultados valores calibrados (figura 4.2 (c)). De esta forma, la estación **EI-4MI** se tomó como representativa para calibrar y validar el modelo numérico.

## 4.2 CALIBRACION Y VALIDACION

Los resultados de las simulaciones fueron comparados con registros de temperaturas medidos en el propio embalse durante el período modelado.

Si se realiza tal comparación a partir de la base de datos de entrada presentada en el Capítulo anterior, se obtienen campos térmicos que regularmente sobreestiman los valores medidos. Por ello se realizó un proceso de calibración, de modo de ajustar los resultados numéricos a las mediciones.

Se llegó a la conclusión de que uno de los parámetros de control de este sistema es la componente de radiación de onda corta, principal factor de calentamiento del lago. Ya que los valores disponibles no corresponden a mediciones directas durante el período de estudio, se los corrigió globalmente. Para ello se introdujo un coeficiente de calibración,  $\alpha$ , de modo tal que la expresión (3.1) calibrada resulta:

$$RT' = \alpha \cdot SW + LW \quad (4.1)$$

Donde  $RT'$  es la radiación total calibrada, utilizándose un valor constante para el coeficiente de calibración,  $\alpha = 0,9$ .

Se presenta a continuación (figura 4.3) la comparación entre los perfiles simulados y los relevados in-situ en la estación EI-4MI, considerando el embalse a cota 76 msnm. Nótese que las mediciones abarcan unos 10 m de profundidad (definidos por la batimetría en la estación EI-4MI), mientras que las simulaciones lo hacen hasta una profundidad máxima en el reservorio del orden de los 25 m, correspondiendo este punto a la máxima profundidad hipotética  $h^1$ .

El ajuste obtenido es, en forma global, muy bueno. En la mayoría de los casos mostrados (12 perfiles relevados en el período feb-2001 a feb-2002) las distribuciones verticales simuladas prácticamente se superponen sobre las medidas. Los perfiles medidos indican una relativamente buena mezcla vertical, situación característica del embalse en la actualidad. Los perfiles simulados reproducen esta propiedad en la gran mayoría de los casos presentando una leve estratificación superficial en el período estival (noviembre 2001 a febrero de 2002) que puede ser despreciada a los fines prácticos de interpretar cualitativamente la mezcla en el embalse.

También indican una segunda estratificación muy leve en profundidad para algunos meses a cota 57 msnm aproximadamente.

---

<sup>1</sup> La máxima profundidad hipotética está dada por la cota del embalse el día analizado y la cota del fondo en la presa, asumida igual a 50 msnm,  $\Rightarrow h \cong Cota - 50 \cong 25m$  para nivel medio de Yacyretá = 76 m.

Las distribuciones verticales medidas presentan suaves gradientes térmicos en algunos meses, los cuales son representados con buena precisión por el modelo en varios casos (meses de febrero, marzo, agosto, octubre, noviembre y diciembre 2001)

La figura 4.4 presenta el resultado de la simulación para el mismo período pero según el contorno gráfico. A lo largo del año la distribución de temperaturas medias muestra buena mezcla vertical, con indicios de estratificación superficial durante algunos períodos de primavera-verano. La amplitud térmica anual es del orden de los 12° C.

La figura 4.5 muestra la evolución anual de la diferencia entre la temperatura media del perfil de temperatura simulado y la del medido. De este modo se reafirma que el ajuste es satisfactorio, observándose que, en general, el error cometido es menor a  $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$ .

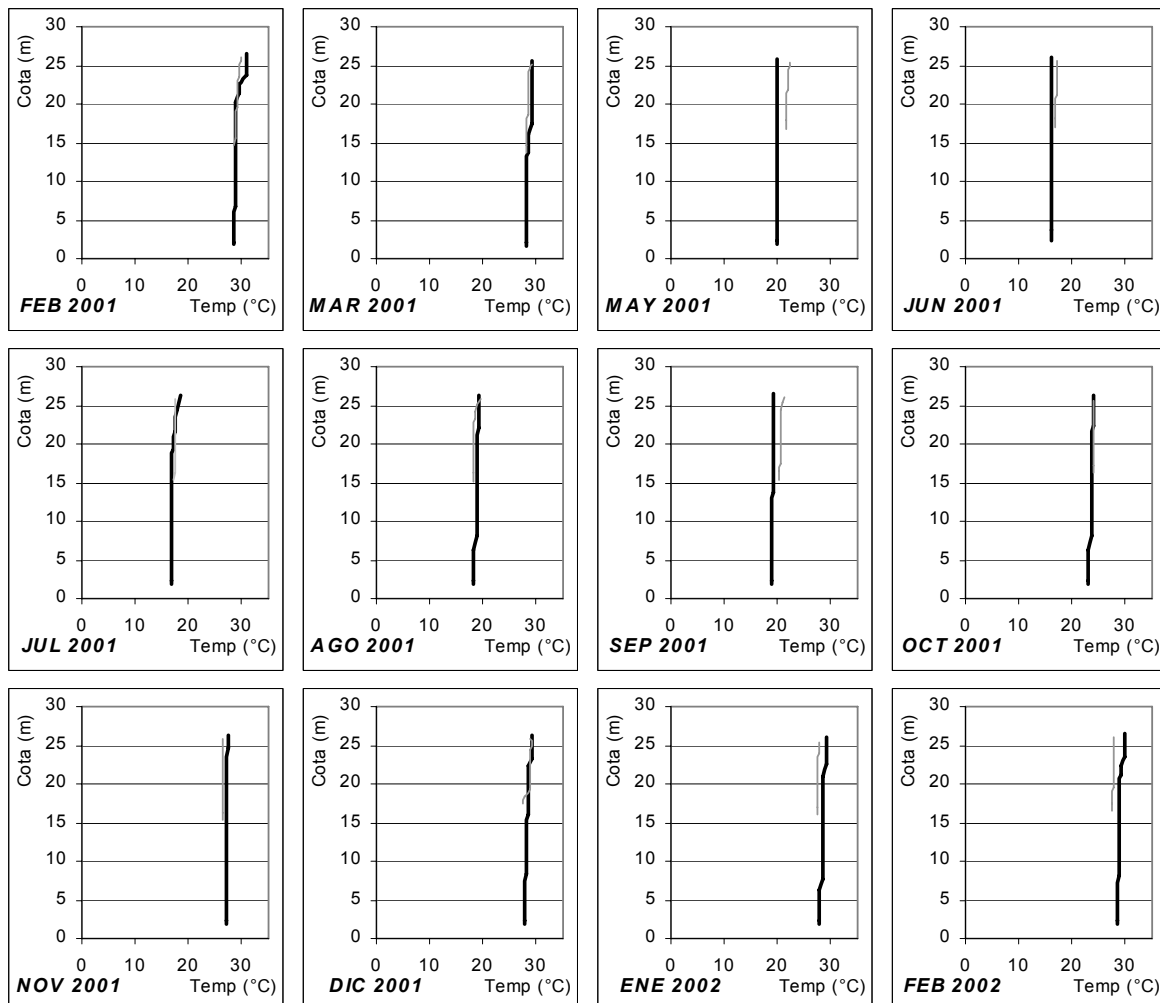


Figura 4.3: Comparación entre los perfiles simulados (líneas negras) y los medidos (líneas grises) en la estación **E I - 4 M I**.

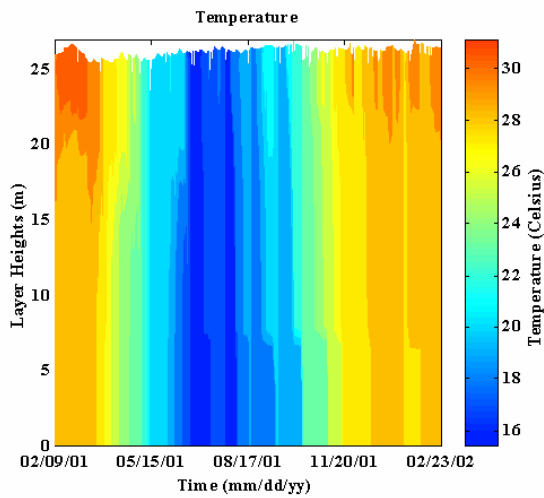


Figura 4.4: Resultado de la simulación

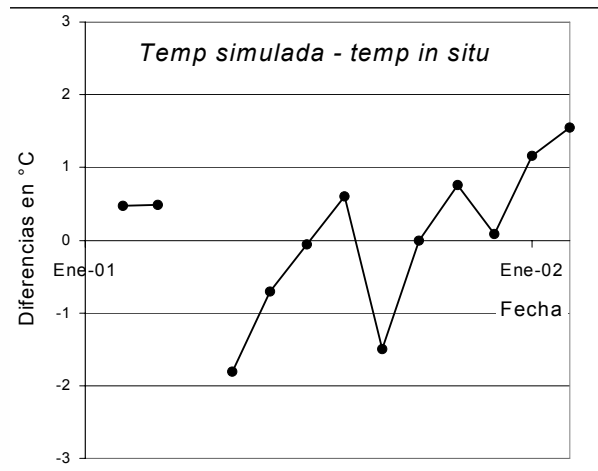


Figura 4.5: Evolución anual de la diferencia de temperaturas simuladas y medidas.

En la figura 4.6 se pone de manifiesto la capacidad del modelo de seguir la evolución estacional anual de la temperatura del lago, en este caso su valor superficial. En la misma se comparan las predicciones (diarias) de la simulación calibrada con los 12 valores medidos durante las campañas regularmente realizadas en el lago, mostrando un acuerdo altamente satisfactorio. Nótese que la amplitud térmica estacional supera los 15° C.

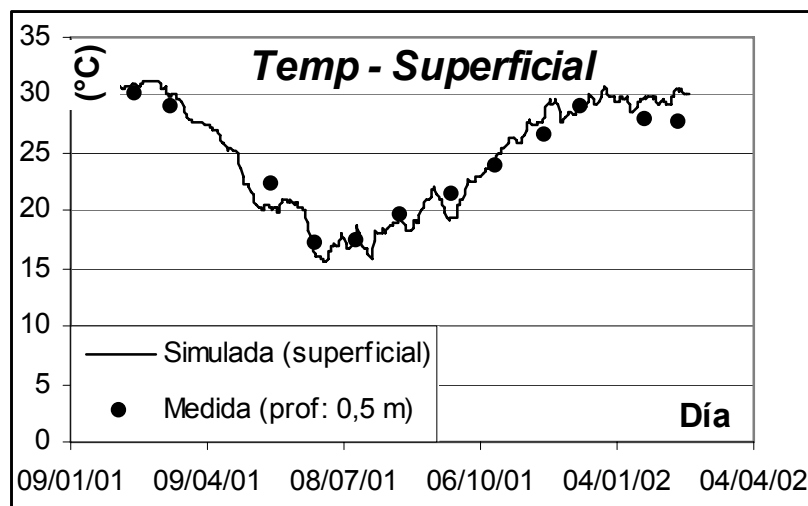


Figura 4.6: Evolución anual de la temperatura superficial del lago: comparación entre simulación y mediciones.

### 4.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Para analizar la sensibilidad del modelo frente a distintos parámetros de entrada, se realizaron simulaciones en diversos escenarios, con distintos valores de:

- Rango del espesor de las capas de simulación
- Radiación de onda corta
- Radiación de onda larga
- Temperatura del agua del tributario
- Intensidad del viento
- Coeficiente de extinción de la luz vertical
- Altura de extracción de agua

Los resultados obtenidos se compararon:

- Entre sí
- Con los registros de temperatura del agua in-situ en diferentes estaciones

#### **4.3.1 Efecto de la variación del rango del espesor de las capas de simulación**

La estructura Lagrangiana con la que opera el modelo permite simular la estratificación vertical de densidad hasta con 100 capas horizontales de espesor variable. Considera que las propiedades de temperatura, densidad y salinidad son homogéneas dentro de cada capa, pero las capas pueden expandirse o contraerse para simular la evolución de los ingresos y egresos de volumen de agua. Las condiciones entre capas sucesivas se redistribuyen de acuerdo a las leyes de conservación de masa y energía. *DYRESM* permite fijar el rango de variación de esos espesores, determinando la precisión que se obtendrá en los resultados. Cuanto más pequeño sea el límite inferior del rango seleccionado, más precisión se logrará durante épocas de estratificaciones severas con gradientes de densidad importantes, utilizando una mayor cantidad de capas para modelar el perfil de la columna de agua. En contra partida, cuanto más pequeño sea este límite, más cantidad de cálculos deberá realizar el modelo para poder determinar las propiedades en cada uno de los estratos, incrementando el tiempo de simulación.

En cambio, el límite superior permite tener en cuenta las escasas variaciones de temperatura, de modo de minimizar la cantidad de estratos y, entonces, aumentar la velocidad de cálculo.

Diversas corridas del modelo permitieron definir este rango entre 1 y 2 m.

#### **4.3.2 Efecto de la radiación de onda corta**

---

En base a la experiencia y a la bibliografía consultada, todos los aspectos que tengan que ver con la energía calórica que es entregada al sistema deben ser estudiados en detalle. De esta manera, en primer lugar se determinó la sensibilidad del cuerpo de agua a las variaciones en la radiación de onda corta.

Ya que los datos disponibles corresponden a promedios diarios mensuales calculados utilizando estadísticas meteorológicas y algunas mediciones directas, es de suponer que los valores de un año particular pueden presentar diferencias de relevancia respecto de los promedios mencionados.

Se consideraron así dos posibles escenarios, definidos por:

$$H_s(r) = H_s(0)(1 \pm r) \quad (4.1)$$

donde  $H_s(0)$  es el valor ya utilizado a partir de los datos disponibles, y  $r$  es un coeficiente de modulación. Se ensayó para el caso  $r = 0,15$ , es decir, dos situaciones donde se aumenta o disminuye el 15% de la radiación de onda corta antes considerada.

La figura 4.6 (a) presenta los resultados cuando  $r = +0,15$ , evidenciando una marcada estratificación térmica en ambos períodos estivales (verano de 2001 y verano de 2002) con cambios apreciables cualitativamente en la estratificación del embalse. La temperatura superficial alcanzó los 32° C superando en algunos casos 3° a la temperatura medida in-situ. Más aún, se presentaría bajo estas condiciones hipotéticas una estratificación en profundidad (a cota 57) muy severa que no era simulada con esta magnitud cuando  $r = 0$ . La figura 4.6 (b) muestra la comparación del perfil simulado y medido para el 25 de enero de 2002, fecha correspondiente al período estival 2002. La diferencia de las temperaturas medias entre ambos perfiles superó los 2,15° C, evidenciando una marcada estratificación en superficie que podría ser alcanzada de presentarse esta condición en la radiación de onda corta.

La figura 4.7 (a) es el resultado de la simulación para la condición de  $r = -0,15$ . En esta oportunidad no se evidencian estratificaciones significativas en el cuerpo de agua, inclusive durante el período estival donde se puede considerar al embalse relativamente bien mezclado. La temperatura en general descendió respecto a la condición de  $r = +0,15$ , en algunos casos, hasta 2° C. La figura 4.7 (b) afirma la idea de que reduciendo la energía que es entregada al reservorio, se mejora el ajuste en el perfil de temperaturas, incluso lográndose una mezcla completa (condición que se presenta en la actualidad en prototipo).

A partir de estos ensayos se concluye que esta variable debe ser ajustada con precisión. En particular, se sugiere medirla in situ.

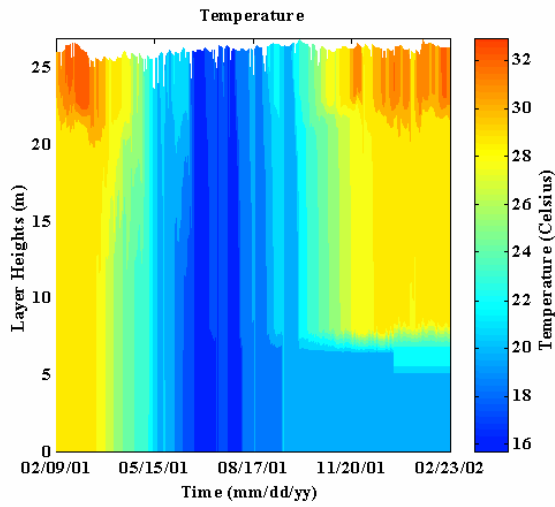


Figura 4.6 (a): Resultado de la simulación para  $r = +0,15$

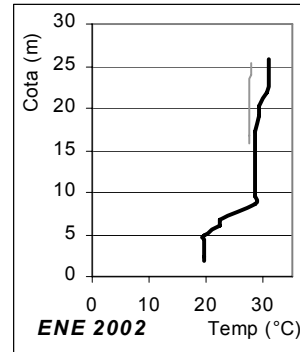


Figura 4.6 (b): Perfiles de temperatura para la condición  $r = +0,15$ . La diferencia de las temperaturas medias de ambos perfiles es de  $2,18^{\circ} C$

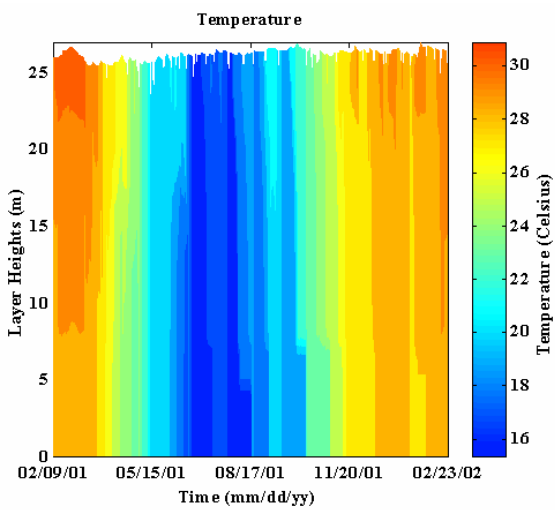


Figura 4.7 (a): Resultado de la simulación para  $r = -0,15$

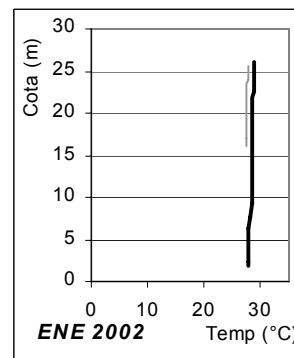


Figura 4.7 (b): Perfiles de temperatura para la condición  $r = -0,15$ . La diferencia de las temperaturas medias de ambos perfiles es de  $1,03^{\circ} C$

### 4.3.3 Efecto de la radiación de onda larga

La sensibilidad de la simulación a este parámetro se estudió, en forma indirecta, para dos casos extremos, el primero para la totalidad del período con cielo despejado ( $c=0$ ) y el segundo para todo el período con cielo totalmente cubierto ( $c=1$ ).

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran la componente de radiación de onda corta resultante para ambos casos, respectivamente, asumiendo que la energía incidente se ha mantenido constante. Ya que las variaciones son significativas, un error grosero en la determinación del porcentaje de cobertura nubosa podría traer aparejada una diferencia considerable en el valor final de las temperaturas en el cuerpo de agua (de acuerdo a lo señalado en 4.3.2).

Afortunadamente, los valores de cobertura nubosa corresponden a registros directos (a intervalos horarios, para la localidad de Posadas), por lo cual resultan confiables. Luego, esta variable no requiere ajuste.

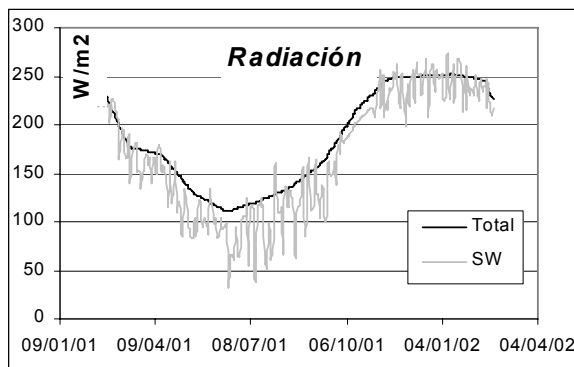


Figura 4.8: Radiación de onda corta cuando la cobertura nubosa es nula para todo el período de estudio.

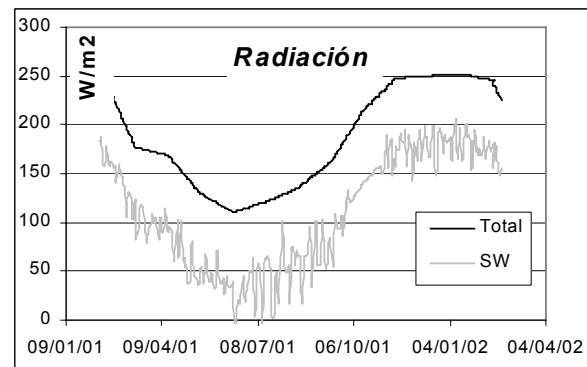


Figura 4.9: Radiación de onda corta cuando la cobertura nubosa es total para todo el período de estudio.

### 4.3.4 Efecto de la temperatura del agua del tributario

Según el apartado 3.7, la variación de la temperatura del agua del tributario genera cambios en la estructura térmica del embalse. Las dos hipótesis para la determinación de la temperatura fueron comparadas en las figuras 4.10 y 4.11. Cabe destacar, nuevamente, que ambas figuras poseen colores diferentes para valores iguales de temperaturas, lo que puede llevar a una equivocada interpretación de los resultados.

La figura 4.10, correspondiente al uso de los registros de temperatura del tributario, presenta una estratificación más marcada que la figura 4.11, asociada al uso de la media móvil de 4 días. Esto se evidencia en la profundización de la termoclina, especialmente en el verano del 2002, y en general en ambos períodos estivales como así también en los meses de abril y mayo de 2001. También la temperatura superficial se ve afectada, disminuyendo su valor en 1° C aproximadamente con respecto a la de la figura 4.10. Además, la estratificación profunda (a cota 57 msnm) desaparece en la figura 4.11. Es decir, el estado de estratificación del embalse resulta sensible a este parámetro.

Como se mencionó anteriormente, en el embalse de Yacyretá el aporte de energía térmica por parte del río Paraná resulta crucial. En consecuencia, la correcta determinación de esta variable es de gran importancia a los efectos de la predicción del estado térmico del reservorio, por lo que se recomienda realizar un seguimiento preciso del mismo.

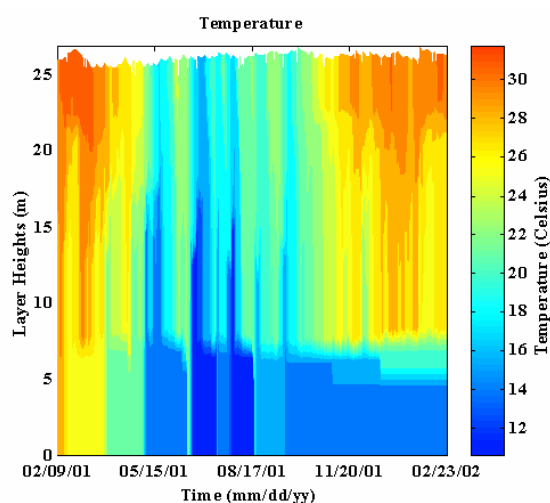


Figura 4.10: Simulación con aproximación de la temperatura del tributario mediante los registros en las estaciones EI-4MD y EI-9.

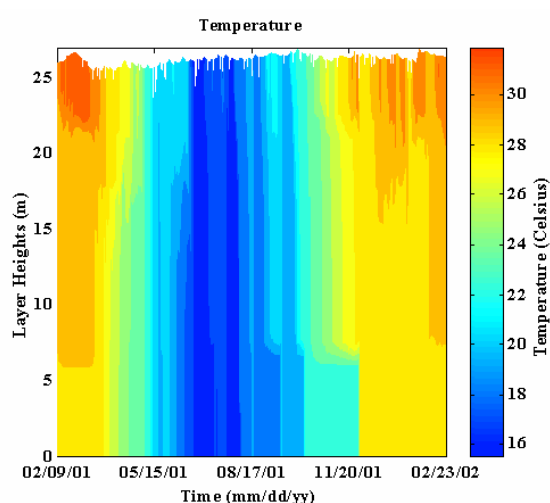


Figura 4.11: Simulación con aproximación de la temperatura del tributario mediante la temperatura del aire media móvil de los últimos cuatro días.

#### 4.3.5 Efecto de la intensidad del viento

Se utilizó la intensidad del viento correspondiente a la localidad de Posadas como representativa de la que acontece sobre la superficie del embalse. Sin embargo, debido a las dimensiones del reservorio, es de esperar que ésta varíe a lo largo de la distancia libre de obstáculos.

El análisis de sensibilidad se realizó de similar manera al de la variable “radiación de onda corta”, considerándose dos posibles escenarios definidos por:

$$W_s(r) = W_s(0)(1 \pm r) \quad (4.2)$$

donde  $W_s(0)$  es el valor de la intensidad del viento en Posadas, y  $r$  es un coeficiente de modulación. Se ensayó para el caso  $r = 0,15$ , presentado en las figuras 4.12 y 4.13.

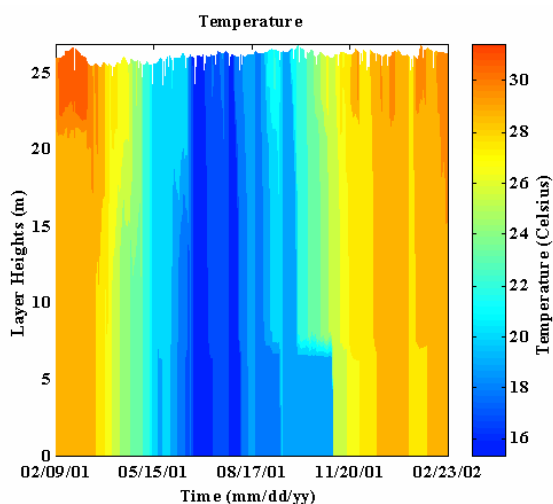


Figura 4.12: Resultado de la simulación para aumento del viento del 15%

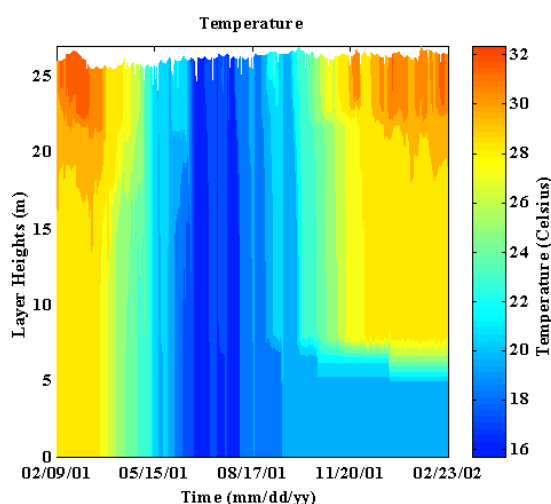


Figura 4.13: Resultado de la simulación Para disminución del viento del 15%

La temperatura del agua superficial aumenta cuando la intensidad del viento es menor. Además, en tal situación la mezcla vertical es menos notoria (figura 4.13), y la estratificación se alcanza a escasos metros de la superficie del agua. Estos efectos no suceden si el viento es aumentado un 15% (figura 4.12).

De estos resultados se deduce una sensibilidad moderada del patrón térmico respecto de la intensidad del viento, por lo que ésta es una variable que podría ser tomada en cuenta en la etapa de calibración. De otra forma, debería ser medida de forma tal que sea representativa del área del embalse (por ejemplo en las cercanías del centro del reservorio).

#### 4.3.6 Efecto del coeficiente de extinción de la luz vertical

*DYRESM* adopta un valor del coeficiente de extinción vertical de la luz constante para todo el período simulado. Se analizó la influencia de este coeficiente en los resultados finales. Para ello se realizaron corridas con valores constantes durante períodos cuatrimestrales o constante durante todo el período de longitud anual. La discretización en períodos sub-anales y anual permitió fijar un rango de variación de  $k$  entre 0,9 y 1,15.

A partir del análisis de sensibilidad se concluyó que la discretización del año en tres sub períodos no arroja cambios significativos en los resultados. Para que el cambio en las

propiedades simuladas del agua (temperatura y densidad) sea significativo, este coeficiente debe modificarse en gran medida, no ocurriendo lo mismo cuando varía en alrededor de  $\pm 10\%$ .

Es de esperar que al aumentar la cota del embalse de 76 a 83 msnm, la turbidez del embalse disminuya (debido a un mayor proceso de depositación de partículas en suspensión) y por consiguiente así lo haga el coeficiente de extinción de la luz. Si tal disminución fuera del orden del 10% (hipótesis que debería analizarse con mayor detalle), el rango de variaciones de las simulaciones podría considerarse despreciable.

#### **4.3.7 Efecto de la altura de extracción de agua**

Este parámetro es relevante en los resultados. Sin embargo, debido a que no se prevee modificarlo en prototipo, se lo asume igual al existente y constante para todas las simulaciones.

### **4.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Luego del análisis de sensibilidad, las diferentes corridas del modelo permitieron dejar constancia de que los parámetros fundamentales del sistema bajo estudio son:

- La radiación solar incidente
- La temperatura del agua del río
- La intensidad del viento

# Capítulo 5

## PREDICCIONES DEL MODELO

### 5.1 Simulación para un período de tres años

Con el objetivo de visualizar el comportamiento del reservorio para un período prolongado de tiempo se realizó una corrida con duración de 3 años. La información de entrada utilizada responde a las consideraciones del capítulo 3, repitiéndose el año dato de tal manera de completar el período deseado. Una corrida con estas características facilita la comprobación de la veracidad de los datos básicos y permite visualizar tendencias térmicas más prolongadas que la variación estacional. La figura 5.1 presenta el resultado de dicha simulación, con el nivel medio de agua a cota 76 msnm.

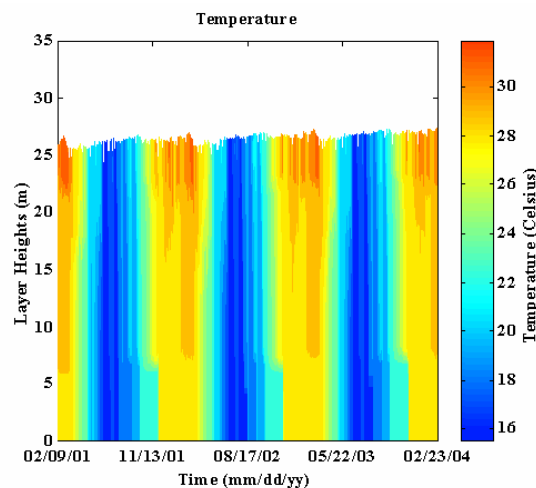


Figura 5.1: Simulación para un período de tres años

Durante el primer bimestre de la simulación (febrero y marzo de 2001) se puede observar un relativo calentamiento respecto del mismo período en los años subsiguientes. Esta condición se debe a la influencia de las condiciones iniciales, prolongándose casi dos meses.

Por otra parte, se observa que la evolución térmica anual del embalse tiene características cíclicas, repitiendo sus temperaturas para las mismas épocas sucesivamente cada año. Es decir, no existe inercia térmica anual, lo cual está totalmente de acuerdo con el corto tiempo de residencia del agua en el sistema.

La figura 5.1 permite inferir que de presentarse durante los próximos dos años las mismas condiciones meteorológicas e hidráulicas que las acontecidas durante el año 2001, no se presentarían cambios de importancia en la estructura térmica del embalse, es decir, no habría tendencias de calentamiento o enfriamiento progresivo.

## **5.2 Elevación de la cota de embalse, simulaciones de 1 año de extensión**

Se encuentra previsto en el proyecto inicial de Yacyretá la operación del reservorio a cota 83 msnm. Para ello se debe elevar el nivel de agua unos 7 m por encima del nivel actual, modificación que transformaría la región en un nuevo escenario con características distintas. Entre estas características se encuentra la variación del volumen del embalse, llevándose el mismo a 17 Km<sup>3</sup> ( $\approx 10$  Km<sup>3</sup> más que en la actualidad) implicando un tiempo de residencia del agua dentro del reservorio que duplicará el actual ( $t_{83m} \cong 13$  días).

Con el objeto de analizar la estructura térmica del reservorio ante estos cambios, se corrió el modelo para las cotas 79, 81 y 83 msnm. En cada caso, debido a la débil influencia de las condiciones iniciales, se estudiaron períodos anuales, empleándose la misma base de datos que en el caso de la validación del modelo (Capítulos 3 y 4). Cada cota intermedia analizada se mantuvo constante, en términos medios, durante el período de análisis. La figura 5.2 reproduce la simulación bajo las condiciones actuales, en tanto que las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 presentan los resultados de las simulaciones para las cotas citadas.

En primera instancia se observa una variación en la estructura térmica al aumentar la cota media 3 m, al comenzar el período estival 2001–2002. Aquí la termoclina que anteriormente se encontraba a una profundidad de entre 5 y 8 m se translada hacia arriba y reduce el volumen del epilímnion. Hacia el final de la corrida, en el mes de febrero de 2002 se puede ver que la estratificación persiste durante más tiempo que en la figura 5.2 (correspondiente a la situación actual). Un cambio similar, aunque de menor intensidad, se observa en el mes de junio de 2001. También se incrementa la segunda termoclina a cota aproximada 57 m (zona de descargadores).

La figura 5.4 presenta la confirmación de las tendencias que se observaron en la figura 5.3. Así, la estratificación durante el verano 2001–2002 persiste hasta el final de la corrida, infiriéndose que esta se extendería más allá del mes de febrero. A su vez la profundidad del epilímnion es menor en términos medios ( $\cong 5$  m). Se aprecia también un calentamiento del agua superficial de aproximadamente 1° C (ver escala de colores) durante prácticamente todo el año estudiado. Una diferencia adicional se puede observar al comienzo de la simulación,

presentándose estratificación durante el primer bimestre, período donde en la simulación a cota 76 predice mezcla homogénea (ver figura 5.2).

Por último, la figura 5.5 define un cuerpo de agua con características monomíticas y con marcados gradientes térmicos durante el verano.

En todos los casos, la estratificación profunda (a cota 57 msnm aproximadamente) está asociada a la posición de las obras de toma.

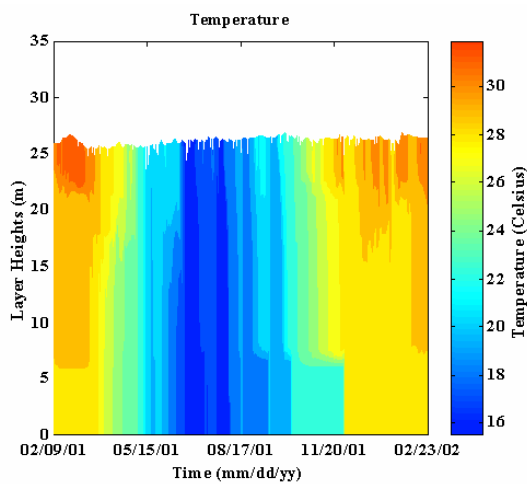


Figura 5.2: Simulación a cota 76. Estado actual.

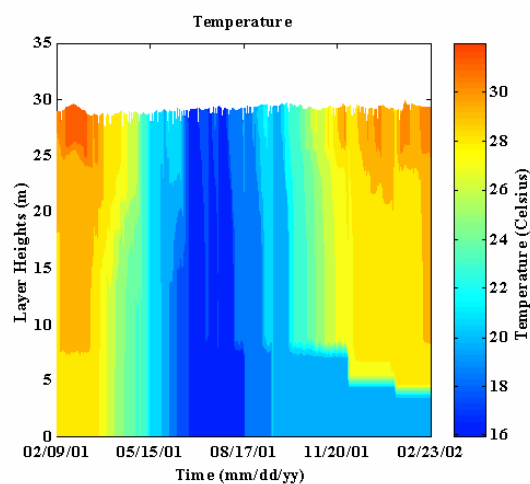


Figura 5.3: Simulación a cota 79.

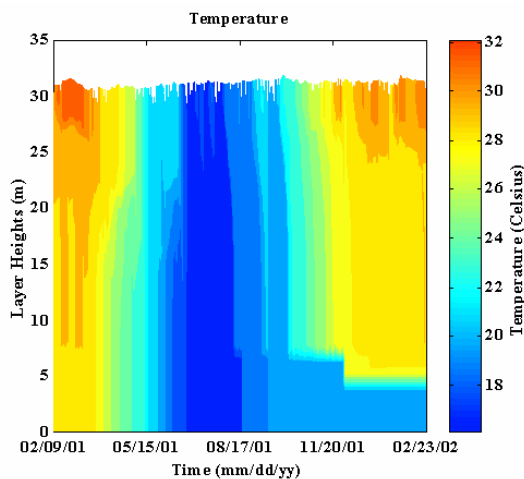


Figura 5.4: Simulación a cota 81.

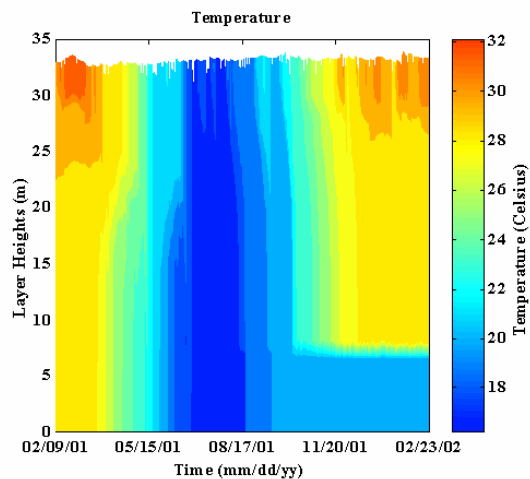


Figura 5.5: Simulación a cota 83. Estado final.

### 5.3 Elevación de la cota de embalse, única simulación de 4 años de duración

En el apartado 5.2 se realizaron las corridas tomando los períodos como estacionarios y sin considerar las influencias de las condiciones del año inmediato anterior. En esta oportunidad se pretende visualizar la evolución del reservorio durante 4 años con elevación paulatina del nivel del embalse. Para ello se realizaron 4 corridas diferentes a cotas 76, 79, 81 y 83 msnm, todas ellas bajo las mismas condiciones meteorológicas e hidráulicas anuales originales, pero difiriendo entre sí en que el perfil inicial de temperaturas es el correspondiente al del último día de la corrida con cota menor. El esquema es el siguiente:

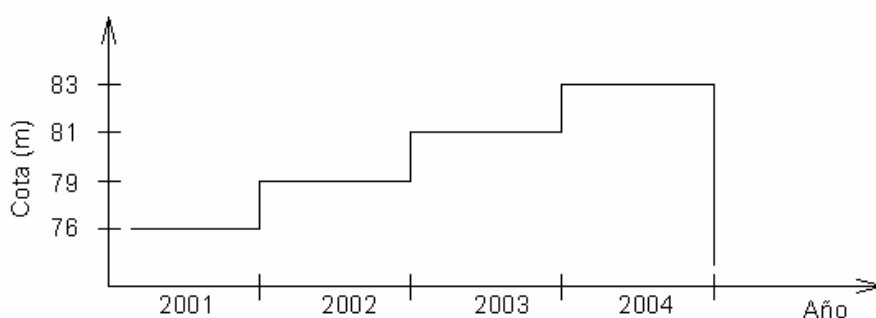
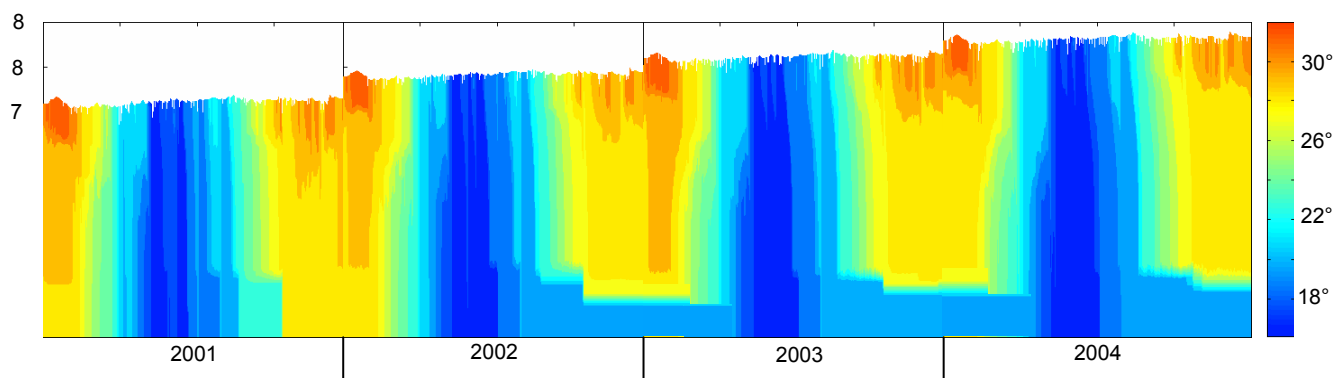


Figura 5.6: Esquemización de la evolución del nivel del embalse desde la cota actual hasta la media máxima proyectada.

En esta situación de elevación fraccionada de la cota de embalse, la respuesta térmica del sistema para el período completo es la mostrada en la figura 5.7. Como era de esperar, debido al reducido tiempo de retención del sistema, se observa el mismo comportamiento que en las simulaciones anteriores (elevación de cota independiente).

Asimismo, para esta simulación se presentan las figuras 5.8 a 5.11, donde se aprecian los perfiles verticales de temperatura típicos durante la época estival de cada año. En líneas generales se mantiene la estructura del epilimnio, presentando una subcapa superficial de unos 5 m de espesor, con temperaturas hasta 3 grados superiores al resto. La evolución anual de la temperatura del epilimnio es similar a la actual.

Entre las niveles 55 y 60 msnm, aproximadamente, se desarrolla un metalimnio bien definido, marcando un salto térmico entre las capas superior e inferior que crece en función de la elevación de la cota de embalse. Para la situación actual ronda los 5° C, llegando a 10° C para la cota máxima prevista. Nótese que la interfase se sitúa a la altura de las obras de toma de la presa.



*Figura 5.7: Evolución térmica del embalse para evolución de 4 años analizada. La zona profunda (debajo de cota 57 msnm) fue modificada manualmente durante el primer trimestre de 2003 y 2004, debido a que las condiciones iniciales admitidas por el modelo no permitían reproducir fielmente esa zona.*

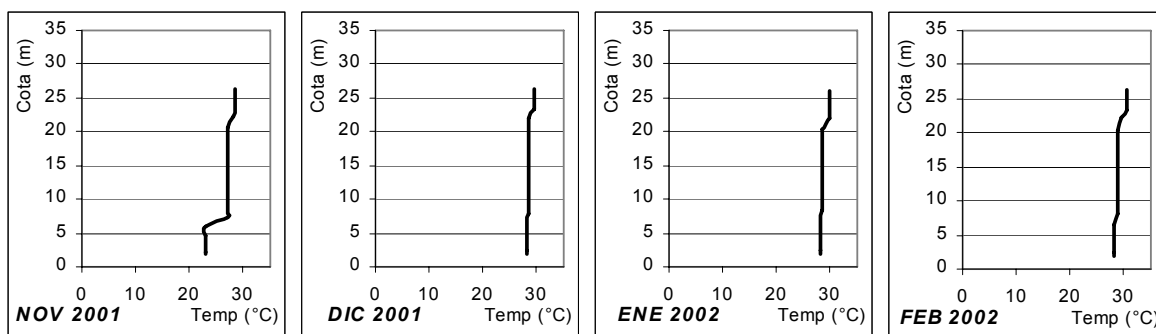


Figura 5.8: Período estival 2001 - 2002

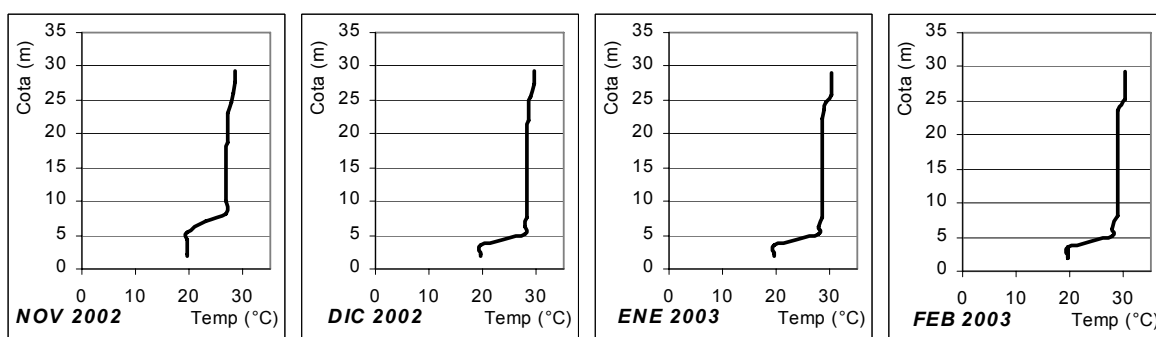


Figura 5.9: Período estival 2002 - 2003

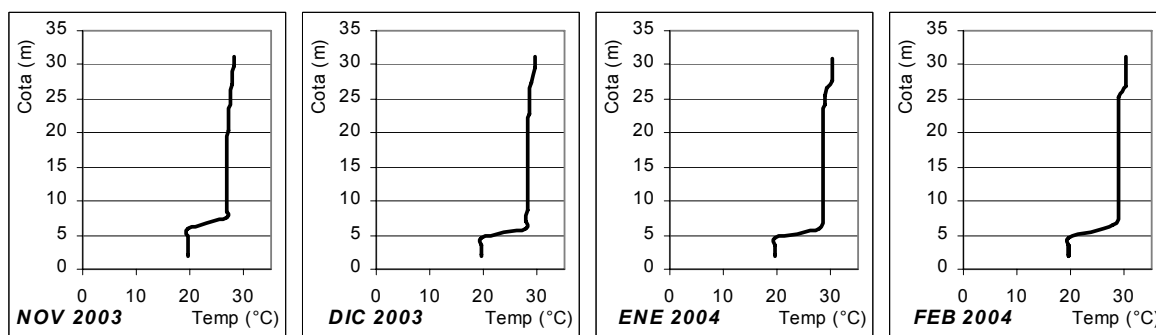


Figura 5.10: Período estival 2003 - 2004

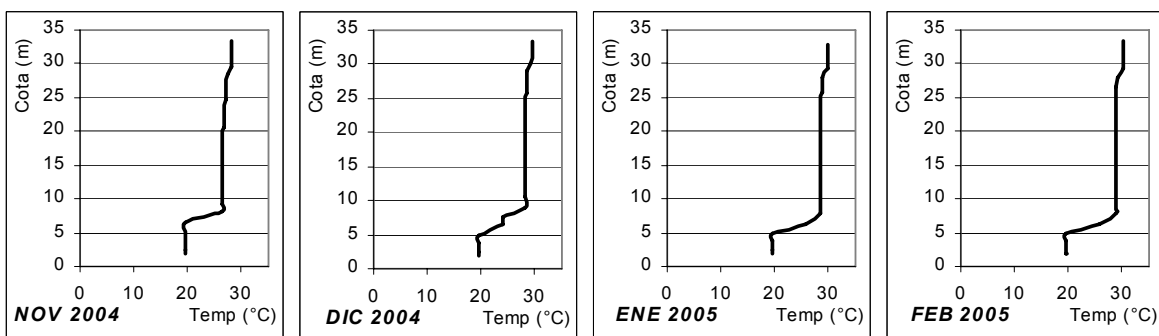


Figura 5.11: Período estival 2004 - 2005

# Capítulo 6

## CONCLUSIONES

### 6.2 PRINCIPALES CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones que surgen del trabajo presentado:

- i. La información de campo existente al momento de realización de este trabajo permite describir térmicamente al embalse de Yacyretá como un cuerpo de agua bien mezclado durante prácticamente todo el año, al menos hasta las profundidades relevadas.
- ii. La temperatura del lago sigue una variación estacional marcada, mostrando una amplitud térmica media del orden de los 15° C.
- iii. El modelo hidrotérmico unidimensional Dyresm pudo ser implementado y calibrado. En la etapa de validación se logró un acuerdo altamente aceptable.
- iv. La utilización de este software permite inferir que, de persistir las condiciones hidrológicas y climatológicas actuales, no se presentarán cambios de importancia en la estructura térmica del embalse. Es decir, no habría tendencias de calentamiento o enfriamiento progresivo, continuándose la variabilidad estacional mencionada.
- v. La elevación de la cota de embalse traería aparejada la reducción del espesor del epilimnio estival a unos 5 m. El mismo será más duradero y alrededor de 1° C más cálido que el actual. La temperatura de esta capa superficial estará unos 3° C por encima de la temperatura de la columna de agua subyacente.
- vi. Aparecerá una estratificación profunda bien definida, a la altura de las obras de toma, con una diferencia térmica entre capas que irá desde los 5° C actuales hasta máximos probables de 10° C. La capa inferior se mantendrá relativamente fría durante todo el año.
- vii. Los estudios hidrodinámicos que se desarrollan en forma paralela a este trabajo (Informe INA 1.131 - 001 - 02) permiten identificar corredores de flujo bien definidos, donde las velocidades medias son muy diferentes entre sí. Esto, sumado al hecho de

que el vaso hidráulico presenta fuertes variaciones batimétricas, permite inferir que el comportamiento térmico del embalse no sería homogéneo. Es decir, los resultados de modelación obtenidos en este trabajo deben ser complementados con estudios de detalle que consideren la geometría compleja del reservorio. En este sentido, se recomienda la simulación utilizando herramientas tridimensionales.

- viii. Además, se destaca que la herramienta de cálculo utilizada contiene un módulo de calidad de agua que permitiría simular el comportamiento de las variables biológicas y químicas para futuros estudios ecológicos del embalse.

## REFERENCIAS

**Alexander, R. and Imberger, J.** (2000) "Laboratory determination of the entrainment coefficient in a bubbler plume" ED 1652 RA, Center for Water Research (CWR), UWA, Australia.

**Antenucci, J. and Imerito, A.** (2000) "The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model, Science Manual" WP 1573 JA, Center for Water Research (CWR), UWA, Australia.

**Antenucci, J.** (2000) "The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model, User Manual" WP 1571 JA, Center for Water Research (CWR), UWA, Australia.

**Custodio, E. y Llamas, M. R.** (1976) *Hidrología Subterránea*, Tomo I, Ediciones Omega, Barcelona, España.

**Fischer, H. B.; List, E. G.; Koh, R. C. Y.; Imberger, J. and Brooks, N. H.** (1979) "Mixing in Inland and Coastal Waters", Academic Press.

**Hamilton, D. P.** (1999) "Numerical Modelling and Reservoir Management: Applications of the DYRESM Model", Theoretical Reservoir Ecology and its Applications, pp. 153 – 173.

**Helmbrecht, J. y López, F.** (2000) "Predictores físicos de la calidad del recurso en el lago San Roque (Córdoba, Argentina)", XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina, Tomo I, pp. 75 – 84.

**Hondzo, M. and Stefan, H. G.** (1996) "Long-Term Lake Water Quality Predictors", Water Resources, Vol 30, N° 12, pp. 2835-2852

**Imberger J. and Patterson J. C.** (1990) "Physical Limnology" Advances in Applied Mechanics 27, pp 303-455.

**Imboden, D.M. and Wuest, A.** (1995) *Mixing Mechanisms in Lakes*, Environmental Physics, EAWAG/ETH, Dübendorf, Switzerland.

**López, F.; Niño, Y.; Caballero, R.; Buscaglia, G.; Helmbrecht, J. y Morillo, S.** (2000) "Mecánica del metalímnion en cuerpos estratificados", XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba 2000, Tomo 1 pp. 197-207.

**Margalef, R.** (1983) "*Limnología*", Omega, Barcelona.

**Morillo, S.** (2001) “*Modelación unidimensional de la limnología física del embalse San Roque, Córdoba*”. Trabajo Final de Grado. Escuela de Ingeniería Civil, F.C.E.F.y N, U.N. de Córdoba.

**Niño, Y.; López, F.; Pirard, C.; Hillmer, I y García, M** (2000) “*Modelación numérica de procesos de mezcla turbulentos inducidos por el viento en cuerpos de agua estratificados*”, Ingeniería Hidráulica en México, Vol XV, Núm 1, págs 13-25.

**Swinbank, W.C.** (1963) *Long-wave radiation from clear skies*, Q.J.R. Meteorological Society **89**, pp. 339-348.

**Wiesner, C. J.** (1970) *Hydrometeorology*, Chapman and Hall LTD, Londres.

**Wuest, A.** (1999), *Technical Notes: Course on Environmental Fluid Mechanics*, University Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.