



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
REPÚBLICA ARGENTINA

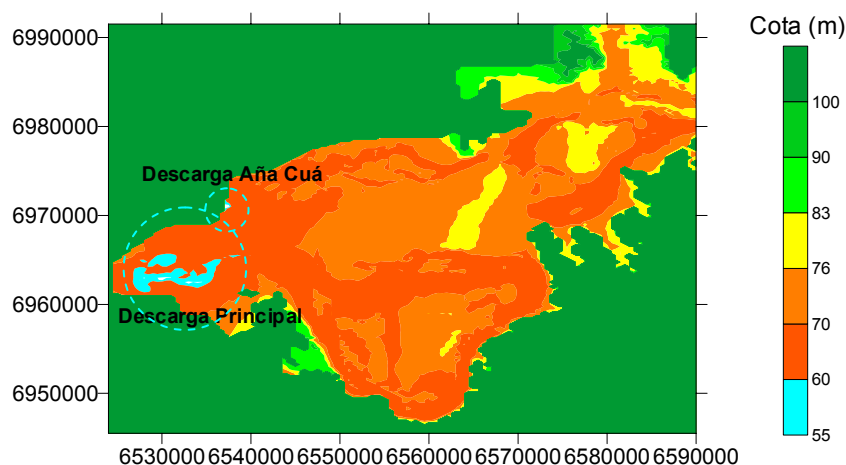


EBY

PROYECTOS

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

ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS EXISTENTES SOBRE LOS ESTADOS TÉRMICOS ACTUAL Y FUTURO DEL EMBALSE DE YACYRETÁ



Proyecto LHA 1.131
Informe LHA 03-1.131-02
Ezeiza, Agosto de 2002

LABORATORIO DE HIDRÁULICA

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

Dr. Pablo A. TARELA
Dr. Ángel N. MENÉNDEZ
Sr. Julio A. TORCHIO

INFORME PRODUCIDO POR

Dr. Pablo A. TARELA

RESUMEN

El presente trabajo recopila los estudios de modelación matemática referidos al futuro estado térmico del embalse de Yacyretá (Argentina - Paraguay), realizados durante los años 90 por el CERIDE (Centro Regional de Investigación y Desarrollo de Santa Fé) y aquellos más recientes desarrollados en el INA. Se realiza una descripción de los mismos y se comparan sus alcances y limitaciones.

Además, se resume el resultado de las campañas de medición de perfiles verticales de temperatura del agua del lago. Se analiza la información de campo en relación con las predicciones de los modelos matemáticos.

La información disponible al presente, incluyendo los resultados de los estudios de modelación, permiten concluir que en la situación actual (cota de embalse a 76 msnm) el reservorio se mantendrá con buena mezcla vertical y, por lo tanto, básicamente homogéneo en lo que respecta a la distribución de temperaturas.

La elevación de la cota de embalse propiciará la formación de termoclinas estacionales. En superficie, se prevé un aumento moderado de temperaturas, mientras que alrededor de cota 57 msnm tendría lugar la formación de una termoclina estival bien definida.

La interpretación de los resultados de las modelaciones está acotada por el carácter unidimensional de los mismos. Así, se sugiere profundizar los estudios para minimizar el impacto de esta restricción. Además, se propone continuar con las campañas de monitoreo, perfeccionar el sistema de adquisición de datos y comenzar a registrar nuevos parámetros.

DESCRIPTORES

Descriptores Temáticos: Modelación matemática, modelación hidrotérmica, simulación numérica, embalse, lago.

Descriptores Institucionales: Entidad Binacional Yacyretá

Descriptores Geográficos: Misiones, Posadas, Encarnación, República Argentina, República del Paraguay, Río Paraná.

INDICE

Capítulo 1: ESTUDIOS DE MODELACIÓN Y MONITOREO

1.1 MODELOS DEL CERIDE	6
1.1.1 Modelos utilizados	6
1.1.2 Base de datos	6
1.1.3 Calibración	7
1.1.4 Análisis de sensibilidad	7
1.1.5 Principales resultados	8
1.1.6 Principales conclusiones	9
1.1.7 Recomendaciones	9
1.2 DATOS DE CAMPO	10
1.2.1 Campañas de medición	10
1.2.2 Otros registros	10
1.2.3 Análisis de las campañas de medición de perfiles verticales de temperatura	11
1.3 MODELACIÓN EN EL INA	11
1.3.1 Modelo utilizado	11
1.3.2 Base de datos	12
1.3.3 Calibración	12
1.3.4 Análisis de sensibilidad	12
1.3.5 Principales resultados	12
1.3.6 Principales conclusiones	13
1.3.7 Recomendaciones	14

Capítulo 2: COMPARACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE MODELACIÓN

2.1 HIPÓTESIS DE UNIDIMENSIONALIDAD	15
2.2 BASE DE DATOS	16
2.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	16
2.4 ESCENARIO DE BASE	17
2.5 PREDICCIONES	17

Capítulo 3: CONCLUSIONES

3.1 PRINCIPALES CONCLUSIONES	18
3.2 RECOMENDACIONES GENERALES	19

REFERENCIAS	20
--------------------	-----------

Capítulo 1

ESTUDIOS DE MODELACIÓN Y MONITOREO

1.1 MODELOS DEL CERIDE

1.1.1 Modelos utilizados

El CERIDE implementó dos modelos matemáticos unidimensionales para estudiar los probables procesos de estratificación térmica del embalse de Yacyretá (Trento y otros, 1994):

- **Modelo de balance:** inspirado en el modelo clásico de Thompson (1975), plantea el balance entre la energía entregada por el viento, capaz de generar mezcla vertical, y la energía potencial de la columna de agua, asociada al grado de estabilidad de la estratificación,
- **Modelo de difusión turbulenta:** basado en la versión 1D de la ecuación de transferencia de calor, la cual se resuelve en forma numérica.

Todos los análisis y resultados del trabajo del CERIDE fueron repetidos utilizando ambos modelos.

1.1.2 Base de datos

La base de datos meteorológica estuvo compuesta por los valores promedio diarios, en el período 1980-1983, de los siguientes parámetros:

- Temperatura del aire
- Intensidad y dirección del viento
- Heliofanía relativa
- Nubosidad
- Presión atmosférica
- Humedad relativa
- Punto de rocío

La radiación global incidente se calculó en base a fórmulas.

La base de datos del embalse se conformó con un único dato mensual, en el período agosto 1993 a marzo 1994, en 13 estaciones y para los siguientes parámetros (Trento y otros, 1994):

- Temperatura del agua
- Temperatura del aire
- Profundidad del disco de Secchi

Los autores informaron que "*no resultó posible hacer una correlación confiable de esas variables*". No obstante, se utilizaron los registros de la profundidad del disco de Secchi para obtener sendos valores del coeficiente de extinción de la luz y el coeficiente de absorción.

1.1.3 Calibración

En función de la ausencia de datos de campo, los modelos implementados por el CERIDE no fueron calibrados ni validados. No obstante, los autores indican que los mimos presentaron "*un correcto funcionamiento en las pruebas y análisis de sensibilidad*" llevados a cabo.

1.1.4 Análisis de sensibilidad

Los valores meteorológicos fueron utilizados para ajustar series regulares (del tipo seno/coseno) y luego empleados en las simulaciones.

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad consistente en modificar los datos alrededor de sus valores medios (en general, en +/- 10% o 20%). Para ambos modelos, se determinó que los resultados eran sensibles frente a variaciones de las siguientes variables:

- Radiación global
- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Coeficiente de extinción

En el caso del viento, se observó una influencia importante únicamente en el epilimnio, con influencia de hasta 5 m de profundidad en el caso del modelo de difusión turbulenta y 10 m de profundidad en el caso del modelo de balance térmico.

Se consignó como variable fundamental el coeficiente de extinción, presentándose variaciones de hasta 10° C en los resultados frente a la adopción de distintos valores posibles en este parámetro. Se señalaron también la radiación global y la temperatura del aire dentro de los parámetros más importantes de los modelos.

1.1.5 Principales resultados

Se presentaron simulaciones en 3 verticales, asociadas a zonas de baja velocidad de flujo, y ubicadas en:

1. Isla Modesto
2. Isla Talavera (sur)
3. Isla Pucu

Aunque no se dispuso de datos de perfiles verticales de temperatura, corrientes o batimetría, los autores supusieron que en estos lugares se podían desarrollar procesos de estratificación.

Se analizaron tres cotas de embalse, de forma tal que las profundidades en cada estación simulada fueron:

Tabla 1.1 - Profundidas (m) en las estaciones de simulación

Estación	Cota (m)		
	76	78	82
1	5	7	11
2	10	12	16
3	22	24	28

El modelo de difusión turbulenta (recomendado por los autores) arrojó los siguientes resultados, para cada estación y cota simuladas:

Tabla 1.2 - Principales resultados del modelo de difusión turbulenta

Estación	Cota (m)		
	76	78	82
1	Mezclado	Leve estratificación	Estratificación estival (h=6m)
2	Leve estratificación	Estratificación estival (h=7m)	Fuerte estratificación estival (h=7m)
3	Fuerte estratificación estival (h=8m)	Fuerte estratificación estival (h=8m)	Fuerte estratificación estival (h=8m)

Según estos resultados, a cota 76 coexisten zonas de buena mezcla, termoclina definida y situaciones intermedias. A cota 78 existe una mayor tendencia a la estratificación térmica, mientras que a cota 82 aparece una estratificación anual bien definida con hepilimnios de distinta profundidad, dependiendo del lugar del embalse.

1.1.6 Principales conclusiones

Los resultados de la aplicación de los modelos del CERIDE llevaron a concluir que "el embalse presenta un carácter monomíctico", con las siguientes características principales:

- Un solo período de recirculación completa
- Formación de termoclina en el período noviembre-abril
- Temperatura superficial del lago de entre 17° C y 36° C

Como resultado del análisis de sensibilidad surgió que:

- Los resultados son altamente sensibles a las variaciones en el coeficiente de atenuación, sugiriéndose utilizar este parámetro para calibrar los modelos
- Las variables meteorológicas predominantes son la radiación, la temperatura del aire, el viento y la humedad relativa
- Resulta necesario medir el perfil vertical de temperaturas, con el doble objetivo de:
 - i) calibrar los modelos,
 - ii) estimar los errores inherentes a no tener en cuenta el carácter tridimensional del fenómeno

De la simulación a distintas cotas surgió que "*podrán producirse zonas con termoclina y otras con recirculación completa, de acuerdo a la profundidad de cada zona y la política de operación del embalse*".

Respecto de los modelos implementados, se concluyó que:

- Funcionan correctamente en las pruebas y análisis de sensibilidad
- Necesitan una calibración completa en base a datos detallados
- Los resultados obtenidos a partir de los mismos deben interpretarse como una primera aproximación

Las conclusiones generales de los estudios del CERIDE fueron:

- *Se ha demostrado la ocurrencia de formación de termoclina en una época del año*
- *Se destaca la necesidad de profundizar los estudios*

1.1.7 Recomendaciones

Las recomendaciones principales del CERIDE fueron:

- *Instalar más de una estación meteorológica "cerca del embalse", para medir en forma horaria radiación, temperatura del aire, viento y humedad relativa.*
- *Generar un plan de monitoreo que incluya los siguientes parámetros: meteorología (de acuerdo a lo anterior), temperatura del agua, caudales, batimetría, corrientes, vegetación, profundidad del disco de Secchi, sedimentos en suspensión y oxígeno disuelto*

1.2 DATOS DE CAMPO

1.2.1 Campañas de medición

La EBY implementó un campaña de monitoreo de largo plazo, consistente básicamente en el relevamiento, con frecuencia mensual y en distintas estaciones fijas, de los siguientes parámetros:

- Perfil vertical de temperatura del agua
- Temperatura del aire
- Perfil vertical de oxígeno disuelto
- Perfil vertical de ph
- Perfil vertical de conductividad
- Perfil vertical de turbidez

Los registros disponibles al momento de realización de este informe abarcan el período abril-98 a febrero-02.

Adicionalmente, se cuenta con algunos registros, con frecuencia variable, de

- Turbidez
- Transparencia
- Sólidos en suspensión
- Granulometría de fondo en algunas estaciones (discriminando únicamente arena, limo y arcilla)

1.2.2 Otros registros

Para las variables hidráulicas, se cuenta con los siguientes registros diarios, incompletos, en el período 1993-2001:

- Caudal afluente
- Caudales erogados (brazo principal y AñaCua)
- Cota de embalse
- Nivel del río Paraná a la altura de Posadas

La información meteorológica abarca el período feb-01 a feb-02, con valores horarios, registrados en el Aeropuerto de Posadas, para las siguientes variables:

- Cobertura nubosa
- Visibilidad
- Temperatura del aire
- Humedad
- Dirección (8) e intensidad del viento
- Presión atmosférica

a los que se agrega la lluvia diaria acumulada en dos estaciones.

Se dispone de una batimetría del embalse, caracterizada por información relevada con densidad no uniforme.

1.2.3 Análisis de las campañas de medición de perfiles verticales de temperatura

Las mediciones se realizaron hasta una profundidad máxima de 20m. Los comentarios que siguen están referidos únicamente a los datos obtenidos hasta esa profundidad.

La conclusión más categórica del análisis de las campañas de medición de perfiles de temperatura es que en la situación actual el embalse se encuentra básicamente bien mezclado en la vertical. En algunas estaciones y para ciertos registros en el tiempo, se detectaron tendencias relativamente débiles hacia la estratificación local. Así, las diferencias térmicas verticales no han superado los 3° C entre superficie y fondo.

En estas condiciones, el lago presenta un ciclo térmico anual bien definido, que sigue las condiciones climáticas medias estacionales. La temperatura del agua osciló durante el período febrero 2001 a febrero 2002 entre los 16° C y 31° C, aproximadamente. Esto es, una amplitud térmica anual de unos 15° C.

Se han detectado gradientes horizontales moderados a débiles, con diferencias de temperatura entre estaciones de entre 1° C y 3° C. Tales diferencias no parecen ser sistemáticas entre zonas del lago, por lo cual se especula que están determinadas por las condiciones hidrodinámicas y meteorológicas particulares del momento de medición. Incluso, algunas diferencias podrían estar ocasionadas por la hora del día en que se tomaron los registros (con diferencias de algunas horas entre estaciones, por lo cual los resultados contienen implícitamente la variación térmica diaria).

1.3 MODELACIÓN EN EL INA

1.3.1 Modelo utilizado

Se utilizó el software Dyresm, desarrollado por la Universidad de Western Australia. Este software ha sido aplicado en anteriores trabajos a cargo del INA, y en un gran número de lagos y reservorios alrededor del mundo.

1.3.2 Base de datos

La base de datos físicos se generó a partir de:

- Registros cedidos por el EBY (la totalidad de los mencionados en el apartado **1.2**)
- Registros y estimaciones de radiación provistos por la CNEA
- Datos propios del INA

Para las simulaciones se trabajó en el período feb/01 a feb/02, especialmente en las etapas de calibración y validación.

1.3.3 Calibración

Como parámetro de calibración se utilizó la componente de radiación de onda corta, justamente uno de los parámetros de entrada que no han sido medidos directamente durante el período de estudio. Una vez calibrado, el modelo fue validado con los datos de las mediciones de perfiles verticales de temperatura, lográndose un muy buen acuerdo.

1.3.4 Análisis de sensibilidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, pudiéndose determinar que los parámetros fundamentales del sistema térmico bajo estudio son:

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

1.3.5 Principales resultados

Se presentaron resultados en una única vertical, globalmente representativa del embalse pero asociada, a través del proceso de calibración, a la estación EI-4MI (Pto. Valle).

Se informó que el sistema se encuentra actualmente (cota 76) en estado estable. Sin embargo, se menciona que variaciones de no demasiada envergadura en alguno de los parámetros enunciados en el análisis de sensibilidad podrían dar lugar a la aparición de procesos temporarios de estratificación superficial.

Las corridas en las condiciones actuales (cota 76) fueron consistentes con las mediciones que indican buena mezcla vertical. Se estudió el comportamiento del reservorio para un período prolongado de tiempo, realizándose una simulación de 3 años de duración. Se observó que, de acuerdo a lo esperado, la inercia térmica del sistema es baja, de modo que cíclicamente el embalse repite la misma variación estacional de temperatura (si se consideran condiciones ambientales cíclicas).

El aumento de la cota media en 3 m implicaría una variación en la estructura térmica al comenzar el período estival. La cota media de la termoclina se elevaría, reduciéndose el espesor del epilimnion. La estratificación persistiría durante más tiempo que en las condiciones actuales. También se incrementa la segunda termoclina a cota aproximada 57 m (zona de descargadores).

Una elevación adicional de la cota de embalse en 2 m mostraría la confirmación de las tendencias recién indicadas. La profundidad del epilimnion es menor en términos medios ($\cong 5$ m). Se aprecia también un calentamiento del agua superficial de aproximadamente 1°C

durante prácticamente todo el año estudiado. A cota 83 se definiría 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.

1.3.6 Principales conclusiones

Del análisis de datos se concluyó que:

- El aporte volumétrico está totalmente manejado por el río Paraná, observándose un tiempo de residencia inferior a 1 semana (6 días). De esta manera, el reservorio presenta un régimen hidrodinámico intermedio entre el puramente fluvial, aguas arriba de Posadas, y un hipotético régimen netamente lacustre.
- En cuanto al balance energético, las principales componentes involucradas son las de radiación (solar incidente, ambiental atmosférica y lacustre). No obstante, a diferencia de la mayoría de los lagos naturales, el embalse de Yacyretá presenta una fuerte dependencia térmica del río tributario (Paraná), siendo que energéticamente este último representa alrededor del 33% del suministro calórico total.
- En las condiciones actuales (cota 76), el embalse se presenta bien mezclado, al menos hasta las profundidades medidas (20 m). Ocasionalmente aparecen estratificaciones superficiales débiles. El lago muestra un comportamiento térmico anual con una marcada variabilidad estacional, siguiendo las condiciones ambientales.

En cuanto al resultados de las simulaciones, las principales conclusiones fueron:

- La elevación de la cota de embalse alentaría la formación de una estratificación superficial de amplitud moderada (alrededor de 3° C como máximo) durante la época estival, la cual se superpondría a un hepilimnio homogéneo. Esta tendencia se manifiesta para las distintas elevaciones de cota de embalse analizadas.
- Del mismo modo, aparecerá una estratificación profunda bien definida en el período cálido (primavera-verano), a la altura de las tomas.
- Durante el resto del año el lago permanecería relativamente bien mezclado.
- En cualquier situación, el hepilimnio sigue una evolución anual consistente con las variaciones ambientales estacionales.

1.3.7 Recomendaciones

Las recomendaciones principales del trabajo del INA fueron:

- Adquirir y emplazar una estación meteorológica en la zona del embalse propiamente dicho. El objeto es el de coleccionar datos atmosféricos representativos del cuerpo de agua, que servirán para mejorar los futuros estudios físicos y ambientales. La adquisición de datos deberá ser automática y con registro digital.
- Entre los parámetros a medir en forma directa, se destacan la radiación solar incidente y la intensidad y dirección de viento.
- Extender las mediciones de perfiles verticales de temperatura a profundidades mayores a los 20 metros. De acuerdo a las predicciones del modelo, a partir de esa profundidad podría tener lugar un proceso de estratificación profundo.
- Se podrían redefinir las posiciones de las estaciones EI-4MD y EI-9, de modo de representar más fielmente las condiciones de ingreso al reservorio.
- Durante las futuras campañas de medición de velocidades en el lago, se recomienda realizar una medición simultánea de temperaturas en los puntos/estaciones donde se releven las velocidades. Ambos parámetros (velocidad-temperatura) se deberían medir en la vertical, con pasos no mayores a 1 metro.
- Debido a la morfología compleja del reservorio, las limitaciones en el análisis unidimensional, y los potenciales eventos de estratificación predichos en los trabajos de modelado realizados, se recomienda la implementación de un modelo tridimensional (hidrotérmico) del embalse. El objeto es definir con mayor certeza las zonas de posible estratificación térmica. A su vez, resulta una herramienta interesante para el estudio del transporte de material sólido y contaminantes en el lago, en particular para aquellos elementos que se pueden sedimentar.

Capítulo 2

COMPARACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE MODELACIÓN

2.1 HIPÓTESIS DE UNIDIMENSIONALIDAD

Ambos trabajos de modelación se basaron en la aplicación de modelos unidimensionales (1D), por lo cual presentan una primer limitación desde su concepción, al simplificar un fenómeno en realidad tridimensional.

A menudo, la aplicación de modelos 1D para este tipo de estudios se justifica a través de la anisotropía de los gradientes térmicos. Así, en general las variaciones verticales son mucho mas importantes que las horizontales, razón por la cual tales modelos asumen homogeneidad horizontal, siendo suficiente resolver el perfil vertical de temperatura (el cual se asume representativo de todo el lago).

Esto es cierto a medias para el embalse de Yacyretá. Por un lado, las diferencias térmicas horizontales que se han detectado en las campañas de medición, raramente superan los 3° C entre estaciones, indicando una cierta homogeneidad en planta. Sin embargo, las variaciones verticales en una estación en particular tampoco presentan diferencias térmicas superiores a la cota mencionada.

Lo anterior no hace más que reflejar lo ya mencionado, respecto del carácter de cuerpo de agua bien mezclado que el lago presenta en la actualidad.

Ahora bien, los resultados de modelación hidrodinámica disponibles al presente indican que existe una fuerte zonificación del lago, asociada al patrón de corrientes. Esta propiedad se mantendrá a futuro. Así, el régimen hidrodinámico del embalse, gobernado por el corto tiempo de residencia y por su particular batimetría (sumamente irregular, en función del conjunto de islas inundadas con las sucesivas elevaciones de cota), indica que el sistema físico dista de uno caracterizado por la homogeneidad horizontal.

Las consideraciones recién mencionadas sugieren que los resultados de los modelos deben ser interpretados adecuadamente, sin olvidar que se trata de tendencias globales, y que podrían coexistir otros comportamientos en zonas localizadas.

2.2 BASE DE DATOS

Sin dudas, la base de datos disponible actualmente (utilizada en el trabajo del INA) es mucho más completa que la utilizada en ocasión de los estudios llevados a cabo por el CERIDE. De hecho, una de las conclusiones fundamentales de este último trabajo fue la necesidad de crear una base de datos del embalse a partir de campañas de medición.

En los trabajos anteriores la información más detallada fue la meteorológica, con registros medios diarios de la mayoría de las variables. Sin embargo, la radiación solar incidente, uno de los parámetros fundamentales del fenómeno bajo estudio, fue estimada en forma teórica.

Actualmente se cuenta con registros meteorológicos horarios e información de radiación que incluye datos de campo.

No obstante, la principal diferencia la marca la actual disponibilidad de una razonable base de datos de campo del propio embalse. Esto ha permitido definir parámetros característicos del lago, como el coeficiente de extinción de la luz (a través de la información sobre transparencia y turbidez).

Por supuesto, los resultados de las mediciones de perfiles verticales de temperatura en distintas estaciones y a lo largo de varios años resultan ser de primordial importancia para este tipo de estudios, lo cual marca una diferencia cualitativa entre la información disponible al momento de realización de los trabajos de modelación históricos y los recientes.

Cabe aclarar aquí que lo anterior no intenta ser una calificación respecto de la calidad de los modelos aplicados (lo cual requeriría de un análisis técnico profundo y bajo condiciones comparables), si no más bien una manifestación explícita de las condiciones bajo las cuales ambos estudios tuvieron lugar.

2.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

En función de lo mencionado anteriormente, los modelos del CERIDE no fueron validados. Incluso, la calibración fue reemplazada por un proceso de análisis de sensibilidad.

En el caso del modelo aplicado en el trabajo del INA, se realizó una calibración sobre la radiación solar incidente, uno de los parámetros fundamentales que no fue medido directamente en el lago durante el período de estudios de campo. Luego del proceso de calibración, se mostró una validación del modelo altamente satisfactoria.

2.4 ESCENARIO DE BASE

Se podría definir el *escenario de base* como aquel asociado al nivel actual de embalse (alrededor de cota 76), relacionado también a la climatología del presente.

La ausencia de calibración y validación en el trabajo del CERIDE implicó que, para el escenario de base, resulten predicciones que simultáneamente mostraban situaciones de mezcla total, leve estratificación y fuerte estratificación. Esto está en desacuerdo con las mediciones de perfiles verticales de temperatura, que indican que actualmente el lago se encuentra básicamente bien mezclado en toda su extensión.

Por el contrario, la información de las campañas ahora disponible permitió calibrar el modelo implementado por el INA, de modo que se reprodujo un año completo de mediciones con un acuerdo muy convincente entre datos y simulaciones. Así, para el escenario base el modelo resultó totalmente compatible con las mediciones y la propiedad de buena mezcla vertical.

2.5 PREDICCIONES

De acuerdo a los resultados de modelación del CERIDE, para cota de embalse de 78 m se producirán zonas de estratificación definida. Durante los meses de febrero 2001 y febrero 2002 la cota de embalse llegó a los 78 m. Si se analizan los perfiles de temperatura medidos en esos meses, por ejemplo en la estación Pto. Valle (zona de corrientes débiles y, entonces, mayor tendencia a la estratificación), se aprecia lo siguiente:

- En febrero de 2001 se observa una estratificación leve, de no más de 2° C de diferencia entre la capa superficial y la profunda.
- En febrero de 2002 el perfil es totalmente homogéneo

Es decir, la estratificación es leve o inexistente. Lo cual está en contradicción con los resultados de modelación del CERIDE, que prevén para esta zona estratificación moderada a fuerte.

De acuerdo a los resultados del modelo del INA, pero para cota 79 msnm, para ambos casos se tendría una estratificación leve superficial (acorde a los registros) y una estratificación definida pero en profundidad (donde actualmente no existen registros).

De acuerdo a lo mencionado, parece existir una tendencia exagerada en los modelos del CERIDE a predecir estratificación definida en los primeros metros de la columna de agua, mientras que el modelo del INA indica allí leves estratificaciones estivales, aunque una fuerte estructura profunda.

Capítulo 3

CONCLUSIONES

3.1 PRINCIPALES CONCLUSIONES

- El trabajo realizado por el CERIDE permitió avanzar en el estudio del comportamiento hidrotérmico del embalse de Yacyretá principalmente en dos frentes:
 - Se realizó una primera aproximación del futuro estado térmico del lago, asociado al incremento de la cota de embalse, que predijo la aparición de sucesivos estados definidos de estratificación,
 - Se sugirió la implementación de campañas de monitoreo y adquisición de datos físicos.
- A posteriori de estas tareas, la EBY generó una valiosa base de datos, producto del monitoreo sistemático de algunos parámetros físicos del lago. La información de tales campañas de monitoreo permite caracterizar al vaso hidráulico como de buena mezcla vertical y, por lo tanto, básicamente homogéneo en lo que respecta a la distribución de temperaturas.
- A través de la mencionada base de datos, se pudo avanzar en la calidad de los resultados que se pueden obtener mediante modelación matemática. Así, el modelo implementado en el INA pudo ser calibrado y validado, en este último caso lográndose un muy buen acuerdo entre simulaciones y datos de campo.
- Los resultados del trabajo de modelación realizados en el INA confirman el actual estado de homogeneidad térmica del lago. Como predicción, la elevación de la cota de embalse propiciará la formación de termoclinas estacionales. En superficie, se prevé un aumento moderado de temperaturas, mientras que alrededor de cota 57 msnm tendría lugar la formación de una termoclina estival bien definida.
- Estas predicciones difieren de las previas del CERIDE (con modelos sin calibrar y/o validar), las cuales sugerían procesos de estratificación definida ya en la situación actual

(en contradicción con los datos de campo), y estratificación superficial definida en los estados futuros.

3.2 RECOMENDACIONES GENERALES

- Se propone continuar con las campañas de monitoreo, modificando la posición de algunas estaciones, de acuerdo a lo señalado en el informe del INA.
- Se sugiere perfeccionar el sistema de adquisición de datos meteorológicos, emplazando al menos una estación automática de registro continuo en la zona del embalse.
- Se sugiere comenzar a registrar la radiación solar local de onda corta, uno de los parámetros fundamentales desde el punto de vista térmico del lago, ya que actualmente se carece de registros continuos in situ.
- La interpretación de los resultados de las modelaciones está acotada por el carácter unidimensional de los mismos. Debido a la geometría compleja del vaso hidráulico, los resultados no son directamente extrapolables a todos los puntos del mismo. Así, se sugiere profundizar los estudios para minimizar el impacto de esta restricción. En particular, implementando un modelo hidrodinámico tridimensional para estudiar la distribución espacial de temperaturas y la probable existencia de zonas estratificadas localizadas.

REFERENCIAS

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

Morillo, S. y Tarela, P.A., *Simulación numérica de la estratificación térmica en el embalse de Yacyretá*, Informe INA 1.131-002-02 (2002)

Thompson, R.O.R.Y., *Climatological Numerical Model of Surface Mixed Layer of the Ocean*, Journal of Physical Oceanography vol. 6, pp.201-210 (1975)

Tarela, P.A., Resumen Ejecutivo para la EBY sobre el Informe INA 1.131-002-02, *Simulación numérica de la estratificación térmica en el embalse de Yacyretá*, (2002)

Trento, A.E., Venturini, V., Alvarez, A.M., Kieffer, L.A., Lorenzatti, E.A., Salimson, A., Vinzón, S. y Pusineri, G., *Cálculo de la estratificación térmica del embalse de Yacyretá*, CERIDE, Informe de avance (1994)

Trento, A.E., Alvarez, A.M., Venturini, V., Kieffer, L.A., Lorenzatti, E.A., Salimson, A., Vinzón, S. y Pusineri, G., *Cálculo de la estratificación térmica del embalse de Yacyretá*, CERIDE, Informe final (1995)