

## **UN NUEVO CONDICIONANTE DE CARÁCTER ECOLÓGICO AL DISEÑO HIDRÁULICO DE DISIPADORES A RESALTO**

*Julio C. De Lio*

Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente.  
Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Presidencia de la Nación.

### **Resumen**

El presente trabajo se refiere a la problemática desatada con motivo de la mortandad de peces ocurrida aguas abajo de la presa de Yacyretá en el año 1994. Se describe la evolución de los criterios de diseño de ingeniería para los aliviaderos de este tipo de obras, incluyendo la incorporación de soluciones novedosas tendientes a lograr la mayor seguridad y durabilidad de las mismas. Se analiza cómo el accidente con los peces plantea un conflicto entre los objetivos ingenieriles del diseño de los aliviaderos de crecida, vertederos y cuencos disipadores de energía a resalto, y la necesidad de garantizar la vida de los peces. Se plantea el desafío que significa desarrollar nuevos criterios de diseño para estas obras a fin de lograr una condición ambiental segura y sustentable.

### **Abstract**

The present paper deals with a problem of fish mortality occurred downstream Yacyreta dam in 1994. The evolution of the classical hydraulic design criteria for this type of dam spillway is described, including the incorporation of original solutions in order to improve the structure security and durability. The conflict between the classical objectives of the engineering design, and the necessity of guarantee fishes survival, is analyzed. The challenge to develop new design criteria for this kind of dams, in order to get a safe and sustainable environmental condition, is pointed out.

### **Introducción**

La Argentina con El Chocón, inicia la construcción de grandes presas en sus caudalosos ríos de llanura. La presa Binacional de

Salto Grande (realizada en la década de 1970) fue la primera construida de una serie de emprendimientos pensados durante décadas para los caudalosos ríos de la Mesopotamia argentina (Paraná y Uruguay).

Estas obras, por su magnitud, exigieron un cambio conceptual de escala para pensarlas y proyectarlas en condiciones óptimas, técnicas y económicas, y también en cuanto a su seguridad. En particular la problemática

*Acto realizado con motivo de la entrega del premio "José S. Gandolfo" en Ingeniería Hidráulica, el 21 de noviembre de 1997.*

sustancial se vincula al manejo de los formidables caudales que los dos ríos principales son capaces de transportar en épocas de crecida.

Tareas como el desvío y cierre del río en las sucesivas etapas constructivas, la evacuación de crecidas, la disipación de energía, plantearon un desafío a los proyectistas hidráulicos, a las empresas constructoras, y también a los laboratorios de ensayo que participaron activamente en la verificación y optimización de los diseños hidráulicos.

Salto Grande, Yacyretá, Corpus, Paraná Medio, fueron concebidas y proyectadas, por grandes consorcios de consultores internacionales que acreditaban vasta experiencia en obras similares realizadas en otros lugares del mundo.

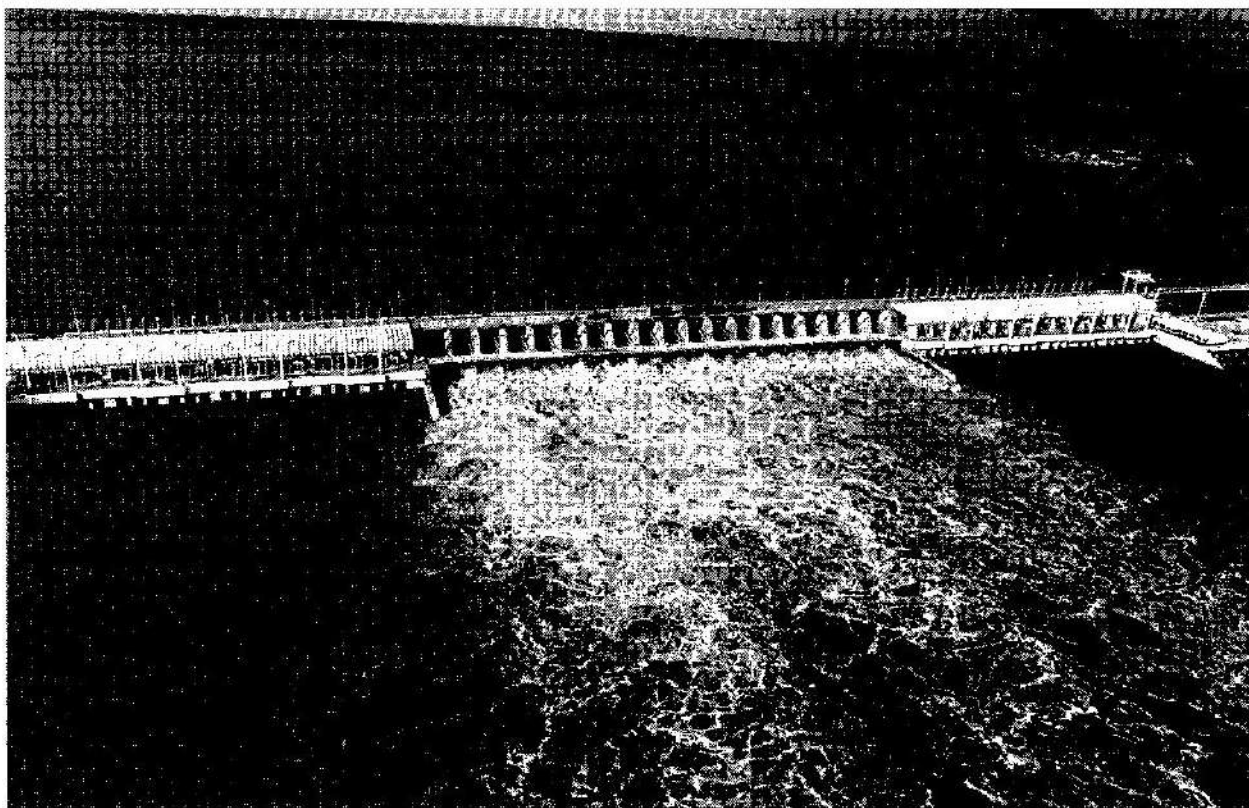
Dentro de esta problemática, este trabajo se refiere a un conflicto entre diseño hidráulico y ecología producido a partir de un accidente ambiental acaecido aguas abajo de la presa binacional de Yacyretá.

## Antecedentes

El Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente (LHA) del INA (ex INCYTH) en Ezeiza, y en conjunto con el Laboratorio de Hidráulica de la ANNP de Asunción Paraguay, a partir de 1979, con excepción de la esclusa de navegación, realizaron la totalidad de los estudios sobre modelo físico necesarios para la definición de las estructuras hidráulicas de la presa. En el LHA, con anterioridad (1972), se habían iniciado los estudios de la presa binacional de Salto Grande.

En ambos proyectos uno de los problemas más dificultosos y críticos por resolver, fue la disipación de la energía de las masas de agua que debían ser evacuadas a través de los aliviaderos de crecida de las presas (Fotografía 1).

En efecto, si bien estas presas son de bajo salto (desniveles menores de 25 m), durante las crecidas inmensos volúmenes de agua deben ser evacuados por sobre la presa.



Fotografía 1: Presa de Salto Grande. Evacuación de una crecida del Río Uruguay.

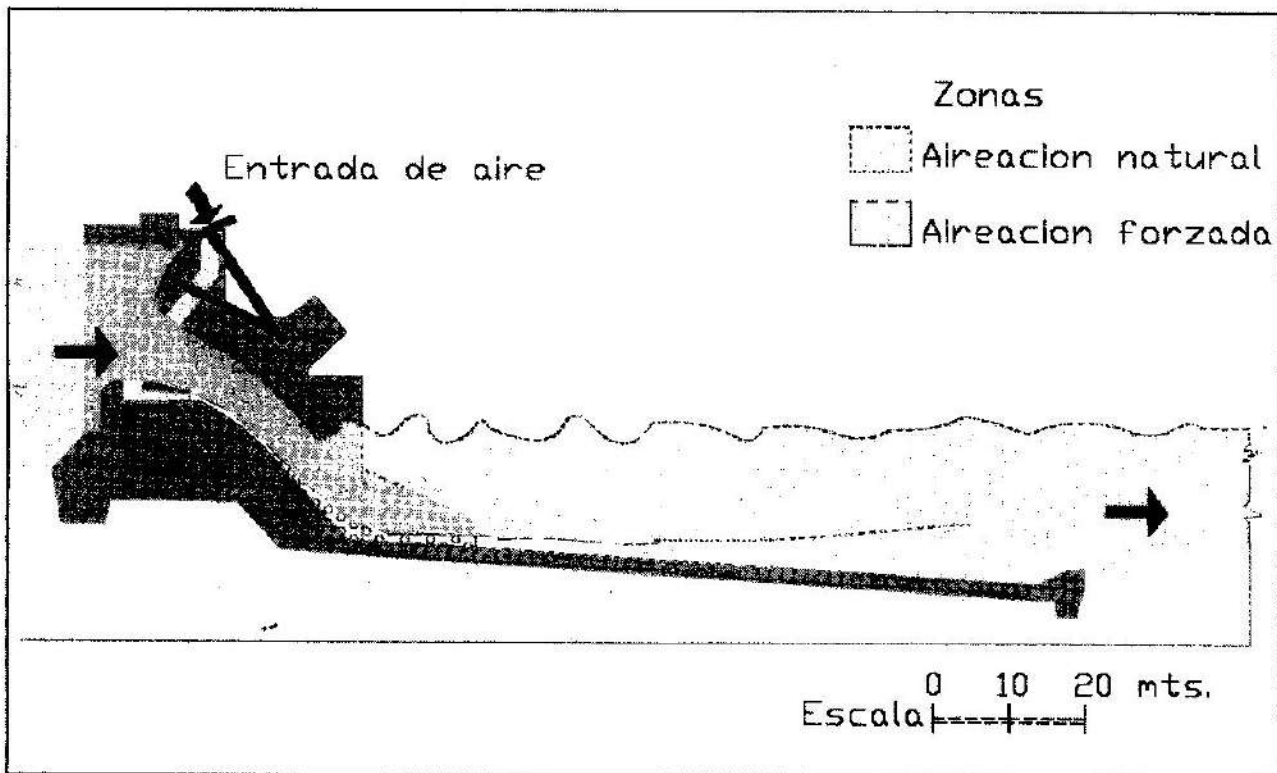


Fig. 1: Perfil del vertedero y dissipador de energía de Yacyretá (Brazo Principal).

Para ello deben disponerse obras de hormigón armado especialmente diseñadas (vertederos), capaces de permitir el sobrepaso del agua en condiciones de seguridad y estabilidad estructural, y sin producir elevaciones del embalse por encima de las cotas máximas admitidas para el resto de la presa.

Razones sustancialmente económicas indujeron a los proyectistas a diseñar vertederos estrechos, para la magnitud de los caudales líquidos a evacuar, con el resultado de que por cada metro de vertedero y a niveles normales de embalse, estas obras son capaces de evacuar más de 200 metros cúbicos por segundo de agua. No se tenían muchos antecedentes de obras semejantes, que hayan funcionado con grandes caudales de crecida.

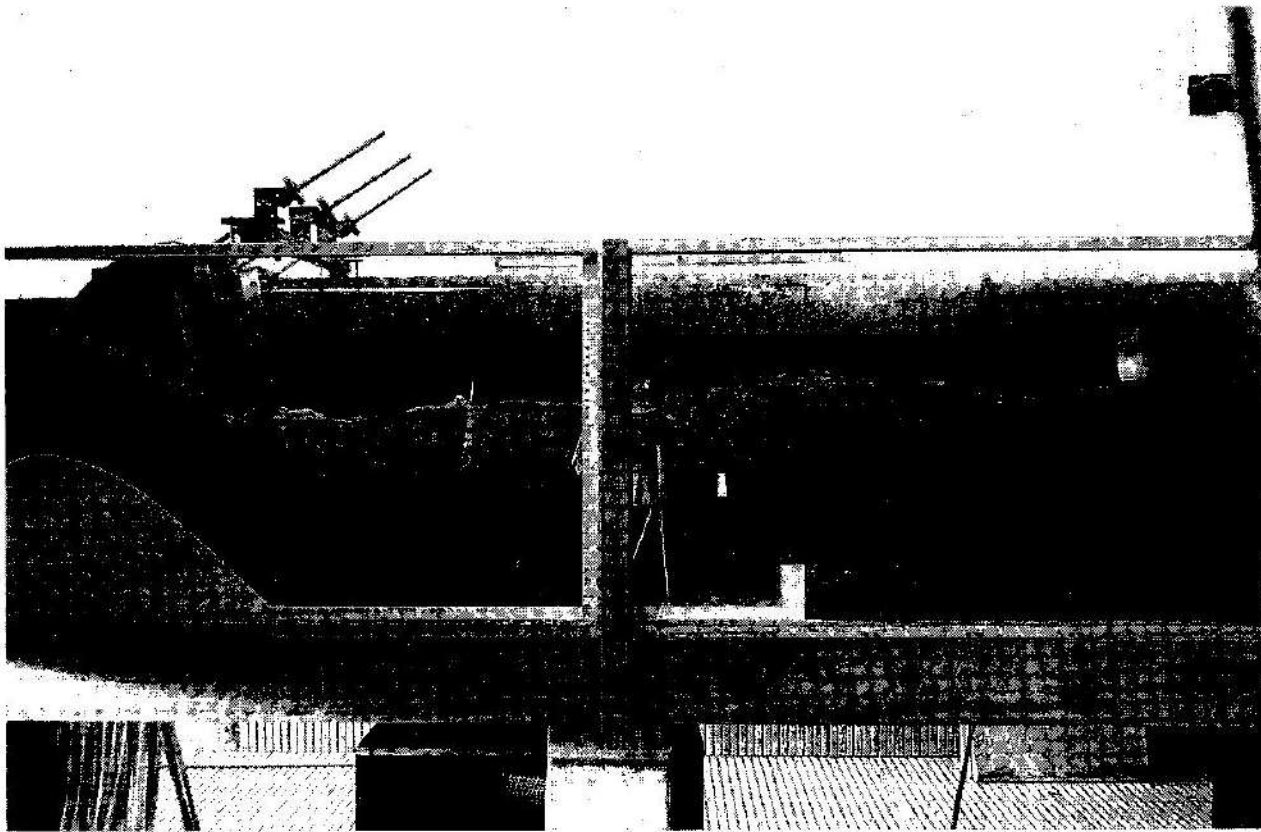
El problema planteado significaba la disipación de la energía cinética de láminas de agua de espesores cercanos a los siete metros, que se desplomaban hacia el pie del vertedero a velocidades del orden de 20 metros por segundo.

### Disipación de energía

La forma clásica de disipar esta energía es generar un colchón de agua al pie del vertedero, para que a ésta se produzca a partir del impacto de la lámina vertiente con el colchón de agua. De esta forma el agua puede ser restituida al río sin producir impactos que afecten la estabilidad de la obra misma, o la del lecho, más allá de una distancia razonable dentro de la zona de implantación de la obra. En Salto Grande y Yacyretá esto se logró mediante la construcción de cuencos planos, horizontal o ligeramente inclinado, de hormigón armado.

En estos cuencos dissipadores se logra una transición abrupta y violenta entre el escurrimiento veloz de la lámina que ingresa y el régimen fluvial mucho más lento que egresa aguas abajo (Figura 1).

El fenómeno hidráulico que se produce se denomina resalto, y está caracterizado por la existencia de grandes remolinos que



Fotografía 2: Cuenco disipador de Salto Grande. Modelo físico.

producen turbulencia a gran escala (macro-turbulencia), inestabilidad de la superficie del agua, y gran incorporación de aire a la masa líquida. La degradación de estos grandes remolinos, en lo que se denomina la cascada de energía, produce finalmente la disipación energética por fricción viscosa.

La naturaleza física del resalto es tan compleja, que la única forma, hasta el presente, de estudiar los aspectos relevantes que hacen al diseño, sólo puede lograrse mediante la hidráulica experimental. El estudio y la investigación mediante modelos físicos, constituyen las herramientas fundamentales a las que deben recurrir los diseñadores hidráulicos.

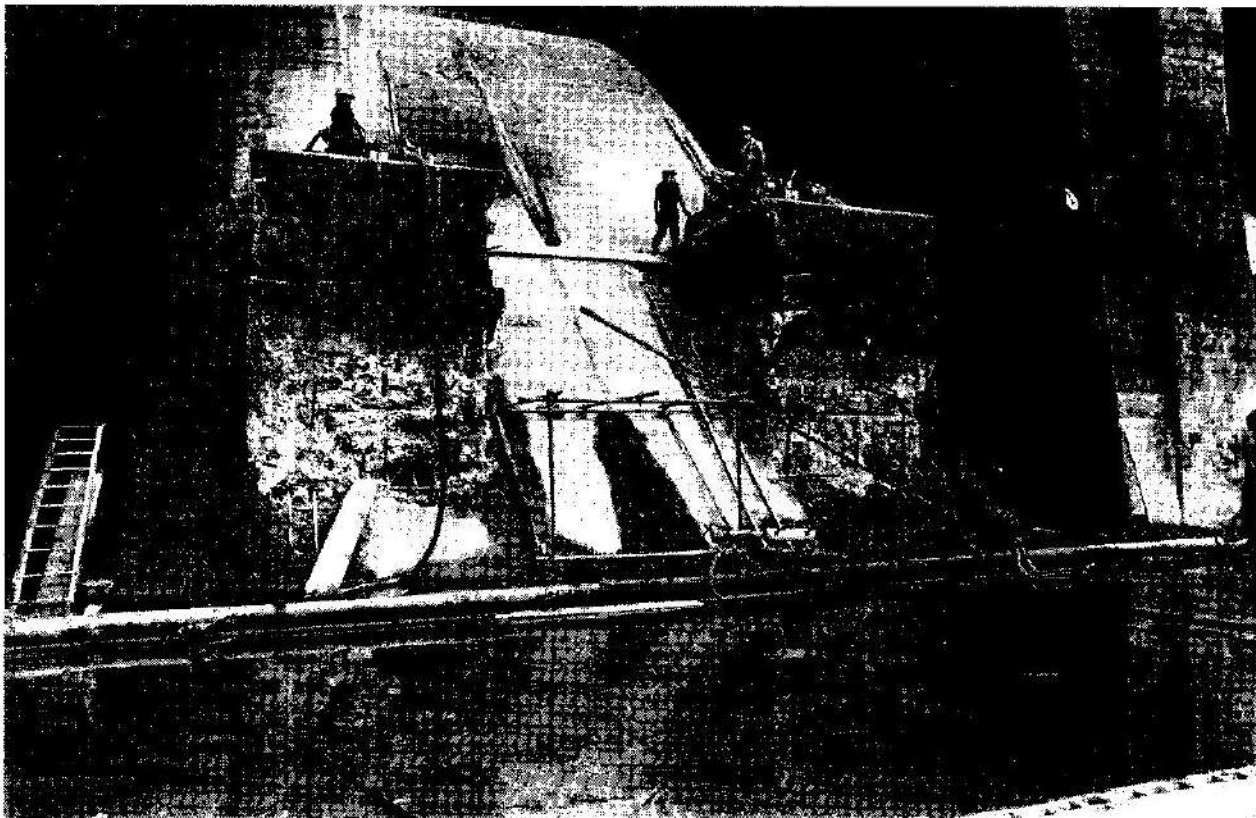
#### **Daños producidos por la cavitación**

En oportunidad de iniciarse el proyecto definitivo de los vertederos de la presa de Yacyretá, comenzaron a recibirse la primeras

y alarmantes noticias de daños estructurales producidos en el cuenco disipador del vertedero de la presa de Salto Grande. Estos daños si bien no afectaban la seguridad de la presa, si obligaron a costosas reparaciones.

El LHA (Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente) del INA, participó activamente en los estudios posteriores a estos hechos y fue uno de los primeros en identificar a la cavitación, un fenómeno conocido en la hidráulica de máquinas, como el origen de los daños. Todo este proceso fue acompañado por un acelerado desarrollo de las técnicas de medición, procesamiento estadístico e interpretación de datos provenientes del modelo, que al cabo de pocos años puso al LHA en un primer plano de la experticia en todo el mundo.

Este fenómeno, formación de burbujas de vapor de agua a temperatura ambiente, se produce en presencia de ciertas características del agua (presentes en condiciones normales) y a muy bajas presiones cercanas



Fotografía 3: Presa de Salto Grande. Bloques de caída erosionados por cavitación.

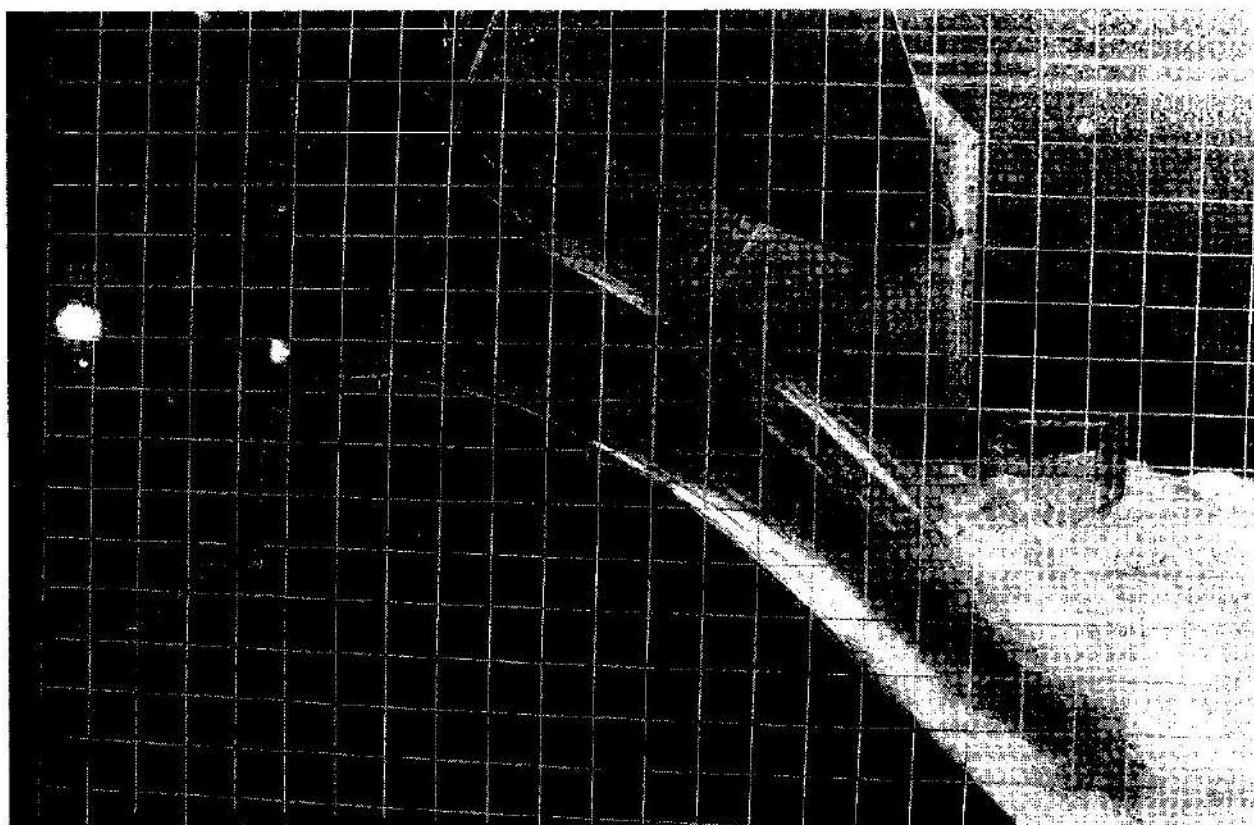
a la presión de vapor para esa temperatura. La destrucción de estas burbujas en lugares de mayor presión, si se localiza en el contacto con superficies sólidas, produce el arranque de partículas de dicha superficie y una rápida degradación de la misma.

Los cuencos amortiguadores a resalto plantean el riesgo de una cavitación de características singulares generada por los pulsos de presión que inducen los grandes remolinos (macroturbulencia). Allí, y sobre un punto de la superficie sólida, la presión puede alcanzar valores tan bajos y altos, rápida y sucesivamente, como para que se forme una burbuja de vapor y luego se destruya erosionando la superficie. Este riesgo es más intenso en el caso de recurrir a la inclusión de bloques de choque en el cuenco disipador que tienen la función de acelerar los procesos de disipación energética. En Salto Grande fueron demolidos grandes bloques disipadores erosionados por la cavitación (Fotografías 2 y 3).

### **El aire como medio de atenuar los daños por cavitación**

Por estos acontecimientos, para Yacyretá se realizaron extensos estudios de laboratorio en los distintos modelos físicos a fin de optimizar las formas de las estructuras y las condiciones de operación de la obra. Se definieron los perfiles estructurales de manera de minimizar la causas generadoras de excesos adicionales de macroturbulencia que pudieran agregarse a la natural del resalto, y pusieran en riesgo la integridad y durabilidad de las obras. De esta manera se llegó a definir la geometría básica de los vertederos y sus cuencos disipadores.

Simultáneamente se empezó a probar, en Salto Grande, la posibilidad y la eficiencia de la incorporación forzada de aire en vertederos de baja caída. Las burbujas de aire arrastradas por la corriente de agua se necesitan cerca de la superficie de las estructu-



Fotografía 4: Presa de Yacyretá. Dispositivos aireadores en el vertedero.

ras, especialmente contra el piso en las partes profundas del cuenco. Este recurso conocido para otras aplicaciones, era inédito para vertederos de baja caída con relativamente bajas velocidades de escurrimiento.

También en este tema el LHA encaró acelerados planes de desarrollo para implementar en los modelos físicos las técnicas necesarias para el estudio experimental del problema. En algunos años se contó con medios, instrumentos de medición especialmente diseñados por el LHA, y experiencia suficiente para recomendar al proyectista de la obra, la aplicación de esta técnica a los vertederos de Yacyretá. Las burbujas de aire cerca de la superficie sólida en concentraciones no demasiado elevadas, permiten controlar y aún eliminar los riesgos de daños por la cavitación.

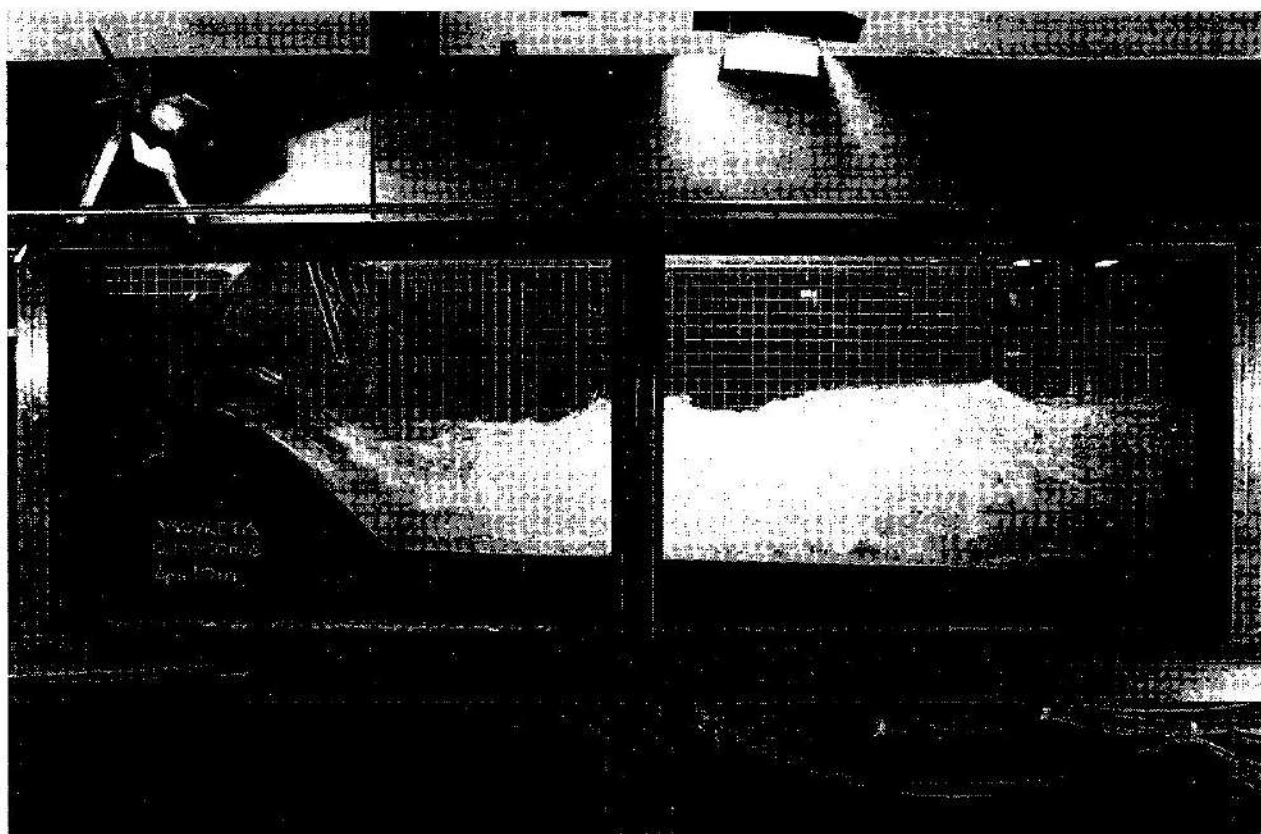
Así se llegaron a implementar, en los diseños definitivos de Yacyretá, rampas para la aireación forzada que permitían el ingreso de burbujas de aire que se desplazaban a lo

largo del piso en un tramo importante del dissipador. Estos dispositivos fueron considerados como elementos de seguridad adicional para las estructuras. De esta manera Yacyretá se convirtió en la primera obra donde este recurso fue adoptado en el proyecto original para su uso en forma continua y permanente (Fotografía 4 y 5).

#### **Mortandad de peces en Yacyretá**

Luego de varias etapas constructivas del vertedero del brazo principal del río en Yacyretá, a mediados de 1994 se alcanzó finalmente la condición de diseño donde el vertedero debe operar con aperturas uniformes de todas sus compuertas y los aireadores realizan su mejor aporte.

En el mes de octubre se dio esta condición de operación, y pudo observarse un óptimo funcionamiento del dissipador de energía. La macroturbulencia dentro del cuenco



Fotografía 5: Presa de Yacyretá. Cuenco disipador brazo principal. Modelo Físico.

era la mínima natural de un resalto ideal bidimensional en todo el ancho del disipador. El agua descargada desde el aliviadero hacia el río aguas abajo, presentaba un aspecto lechoso reflejando la intensa presencia de aire. Las condiciones de funcionamiento eran las ideales y las que intencionalmente se buscaron tan intensamente en los estudios experimentales, siguiendo los criterios de seguridad y durabilidad de la obra.

Unos pocos días después de que el vertedero comenzara a operar según las consignas establecidas, se empezaron a detectar abundantes peces muertos en el brazo principal del río aguas abajo de la obra. En pocos días más se confirmó el alarmante accidente ambiental producido con más de 120.000 peces muertos según la estimación que pudo hacer la EBY (Entidad Binacional Yacyretá) dadas las dificultades naturales de la zona afectada.

Luego del desconcierto inicial comen-

zaron a realizarse los estudios correspondientes, y expertos nacionales e internacionales determinaron que la causa de la muerte de los peces, que era conocida como "la enfermedad de la burbuja", se produjo por la formación de burbujas de nitrógeno dentro del caudal sanguíneo y en los tejidos conjuntivos de los peces. Esto necesariamente requiere que los peces se hallen sometidos a un ambiente sobresaturado de gases disueltos en el agua.

Las mediciones realizadas por la EBY confirmaron un alto grado de sobresaturación de gases y también de oxígeno en el agua, aguas abajo del vertedero, suficiente para producir el deceso de peces. Este fenómeno que en forma natural se disipa lentamente, y por consiguiente tiene una alta permanencia en el agua, se mantenía por muchos kilómetros aguas abajo de la presa.

Para producir la efectiva muerte de los peces, se conjugaron varios factores decisivos, la alta concentración de gases presen-

tes en el agua del río Paraná que ingresa al embalse luego de atravesar las cataratas (río Iguazú) y la presa de Itaipú (Alto Paraná), el masivo ingreso de aire que el vertedero proyectado induce, y las bajas profundidades de agua disponibles en el río que no proporcionan abrigo seguro a los peces contaminados con la sobresaturación de nitrógeno en sus cuerpos.

Los mecanismos de dilución de gases en el agua, que normalmente se realiza desde la superficie líquida, se intensifican severamente cuando se introducen burbujas de aire al agua y se las somete a altas presiones. Este es el caso de las burbujas que naturalmente introduce el resalto y los dispositivos aireadores, y que pueden alcanzar el fondo del cuenco por un cierto tiempo. En algunos sectores del fondo del cuenco de Yacyretá las presiones se incrementan a más de dos veces la presión atmosférica (más de 20 metros de profundidad).

### **Prioridad ambiental en el manejo de Yacyretá. Ecología y diseño**

Esta situación ambientalmente inadmisibles para el proyecto, motivó una rápida respuesta de la EBY que recurrió a una operación de emergencia del vertedero tal que el ingreso de aire fuera substancialmente disminuido. Esto se logró mediante aperturas totales de algunas compuertas, el cierre de otras, y la clausura de los ingresos de aire previstos para las rampas de aireación del vertedero.

Esta condición de operación del vertedero contradice los principios rectores de operación de un vertedero como el diseñado, y perjudica severamente las cuidadosas medidas que fueron largamente estudiadas en los modelos físicos.

Simultáneamente se iniciaron en el Laboratorio de la ANNP de Paraguay y en el LHA del INA, intensos estudios tendientes a lograr, mediante modificaciones del perfil de

los vertederos, una solución de compromiso para asegurar la calidad del agua, garantizar la vida de la fauna íctica, y minimizar los riesgos de daños a las estructuras.

Este grave problema resulta un fuerte condicionante al diseño de disipadores a resalto. Los escasos accidentes que se habían producido con anterioridad en el mundo, vinculados a las presas, no lograron trascender con suficiente fuerza a los foros científicos y tecnológicos donde se debaten las técnicas y metodologías constructivas de las obras hidráulicas. No hay ningún incidente similar reportado en el país, ni en países como el Brasil que tiene muchísimas presas construidas sobre ríos similares y principalmente sobre el Paraná.

En los Estados Unidos de Norteamérica, donde el mismo problema se produjo en presas sobre el río Columbia, se están realizando en el presente, estudios experimentales probando soluciones que significan modificaciones sobre los vertederos y cuencos disipadores ya existentes.

En la región, a partir del accidente de Yacyretá, deberán revisarse las condiciones de funcionamiento de los aliviaderos de las obras pensadas para el río Paraná como la presa de Corpus y de Paraná Medio, también la interacción entre las mismas, a efectos de verificar y garantizar la calidad de agua del río respecto de esta nueva problemática.

El conflicto desatado entre las soluciones óptimas tradicionales y también las novedosas, conducentes a un adecuado comportamiento de los aliviadores de crecidas desde el punto de vista estructural, y aquellas necesarias para minimizar los impactos negativos que producen las presas sobre la vida de los peces, deberá resolverse en el futuro recurriendo al ingenio y a la experimentación en laboratorios, armonizando los factores a fin de lograr una condición ambiental segura y sustentable.

*Manuscrito recibido en febrero de 1999.*