

# Utilización Óptima de Embalse Hidroeléctrico: Una Visión Multiobjetiva Vía Dinámica de Sistemas.

Wilder M. Mereles D.<sup>1</sup>, Carlos M. Cardozo F.<sup>2</sup>  
Universidad Nacional del Este - Facultad Politécnica  
<sup>1</sup>wilderm2000@yahoo.es  
<sup>2</sup>florentinm@yahoo.es

**Resumen.** Prosiguiendo el estudio de las múltiples alternativas relacionadas con el aprovechamiento óptimo de un embalse de pequeño porte, desarrollado en un trabajo anterior, son expuestos en el presente material, los resultados conclusivos de dicha investigación. Las conclusiones ahora expuestas incluyen mayores detalles, en amplitud y profundidad, del tema abordado, resultantes del análisis de simulación del modelo global, utilizando distintos escenarios de operación aplicados como ejemplo al embalse Yguazú.

En este trabajo, al igual que en el anterior, persiste el objetivo de implementar un modelo metodológico a través de la elaboración de un modelo computacional, vía simulación de dinámica de sistemas, el cual es logrado mediante la presentación de los resultados logrados a lo largo del trabajo.

Debido a la complejidad del problema, en el presente material se incluyen solo los aspectos referentes a una de las utilidades del embalse, que es la generación hidroeléctrica.

Palabras clave: **dinámica de sistemas, multidimensional, modelo de lazo causal.**

**Abstract.** This work is about the study of the several alternatives related to the optimum advantage of a small dam, developed in an earlier work. In this work the results of this investigation are exposed. The conclusions now exposed include more details about amplitude and depth resulting from the analysis of the global model simulation, using different operation scenes, taking as an example the Yguazú dam.

The main goal of this work is implement a methodological model through the elaboration of a computational model via the simulation of system dynamics.

Because of the complexity of the work, in this paper is going to be included just the details referred to one of the utilities of the dam, which is the hydroelectric generation.

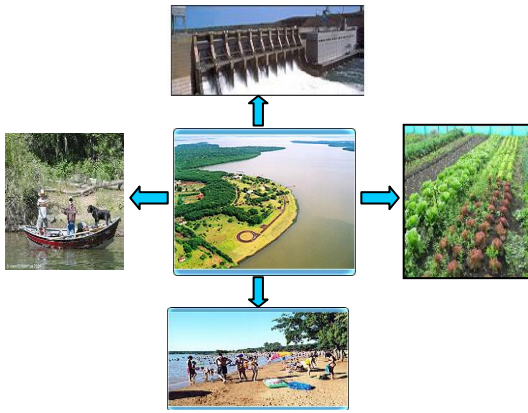
Keywords: **system dynamics, multidimensional, causal loop.**

## 1. Introducción

Actualmente, debido a una nueva visión multidimensional, los gestores de embalses deben considerar, además de la función de generación, los usos múltiples de las aguas, tales como: el abastecimiento de agua potable a comunidades aledañas, la producción de peces, la irrigación para producción de alimentos, la navegación y el turismo [9]. Los generadores de hidroelectricidad, como usuarios principales por la gestión de las aguas almacenadas, deberían desarrollar políticas de conservación de las nacientes afectadas y de las cuencas hidrográficas de influencia directa, a través del estímulo de uso óptimo y responsable.

## 2. El Problema

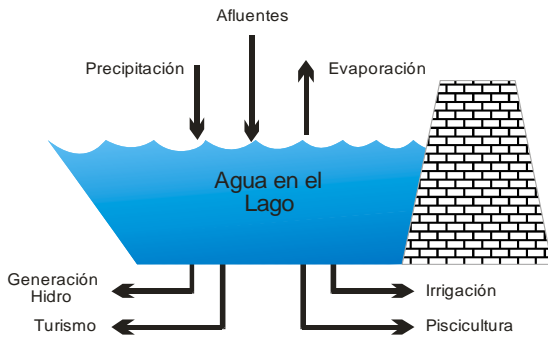
Salvo los grandes ríos, la disponibilidad del agua a lo largo de los periodos del planeamiento es irregular e incierta. La construcción de embalses minimiza estas dificultades [1,2,3,4,5]. El concepto tradicional de la construcción de una usina hidroeléctrica es el de utilizar las aguas de los embalses para la generación de energía eléctrica, sin mucha preocupación con otras aplicaciones asociadas, como la del consumo humano, agrícola y la recreativa [5,31]. Hoy, aspectos económicos y ambientales modifican este enfoque primal, agregan complejidad a la formulación, derivada de la interrelación existente con otras aplicaciones y disciplinas [9].



**Ilustración 1.** Una visión multiobjetiva de gestión de embalse.

### 3. Visión dinámica del problema

Para representar el comportamiento del embalse deberán ser observadas todas las variables que afectan la operación de la misma. En la Ilustración se puede apreciar los distintos factores que interactúan sobre el estado del embalse; se destaca que existen factores naturales y no naturales.



**Ilustración 2.** Esquema de referencia del modelo

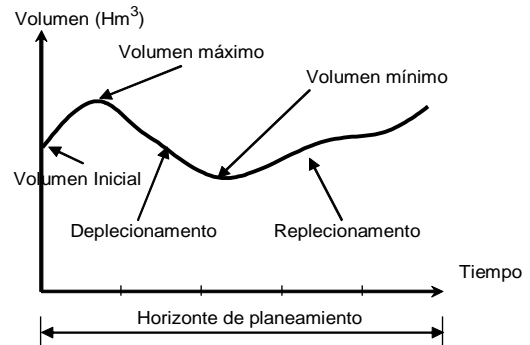
Todos estos factores [7,8,9] varían directamente en relación del tiempo. Un modelo que represente de una manera más detallada lo presentado en la ilustración 2, considerando que las variables son expresadas en forma de tasa o flujo ( $m^3/s$ ), se puede expresar mediante:

$$x(t) = x_{(0)} + (y + Pre - u - v - E - Ag) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Donde:

$X(t)$	Volumen de agua esperado en el instante de tiempo $t$ , en $m^3$
$y$	Caudal de agua afluente al embalse durante el intervalo de tiempo considerado, en $m^3/s$
$Pre$	tasa de agua afluente al embalse durante el intervalo de tiempo en forma de precipitación sobre el espejo de agua, en $m^3/s$ .
$E$	tasa de agua efluente del embalse durante el intervalo de tiempo, en forma de evaporación, en $m^3/s$
$x_0$	Almacenamiento de agua del embalse al inicio del periodo de estudio, en $m^3$
$u$	Flujo de agua a través de la turbina, durante el intervalo de tiempo
$v$	Flujo de agua a ser descargado por el vertedero en el intervalo de tiempo, en $m^3/s$
$Ag$	Flujo de agua demandado para utilización en la irrigación de cultivos en el intervalo de tiempo considerado, en $m^3/s$

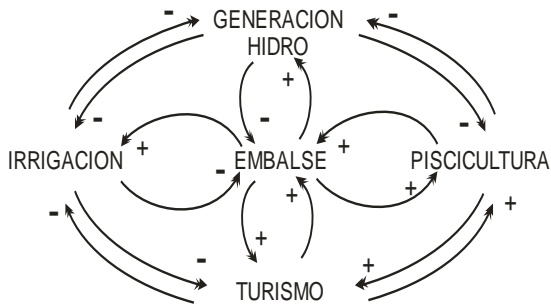
Considerando lo mencionado más arriba respecto al comportamiento de los distintos factores, el embalse se puede asociar a cambios de origen dinámico[1], tales como variación del nivel entre dos valores extremos; el valor de nivel máximo y el del nivel mínimo.



**Ilustración 3.** Comportamiento del embalse en función del tiempo.

En la Ilustración 3 se aprecia el comportamiento del embalse dentro del valor máximo y mínimo, al transcurrir el tiempo. Según [8], en el análisis de DS podemos representar la ecuación de balance hídrico a través del diagrama de lazo causal de la

Ilustración 4, donde se puede observar que el embalse o agua en el lago es el centro de todo el sistema. Es importante aclarar que este lazo representa de una manera global y sin mayores detalles los parámetros relacionados con el problema multi-objetivo.



**Ilustración 4.** Diagrama de lazo causal del sistema global

En los siguientes capítulos serán analizados los modelos matemáticos dinámicos de: Generación hidroeléctrica, Piscicultura, Irrigación, Turismo.

#### 4. La Generación Hidroeléctrica

La energía media producida por la planta [1,2,3,4] en un determinado instante puede ser matemáticamente representada por la expresión:

$$E_{gen} = 9,81 \cdot 10^3 \cdot R_{t-g} \cdot h_l \cdot Q_{tur} \quad (MW) \quad (2)$$

Donde:

$E_{gen}$  = energía media generada en el periodo (MW);

$R_{t-g}$  = rendimiento del conjunto turbina-generador (pu);

$h_l$  = Salto líquido (m);

$Q_{tur}$  = caudal turbinado ( $m^3/s$ );

#### 5. El lago Yguazú, un ejemplo de aplicación.

El Río Acaray es tributario por la margen derecha del Río Paraná y su cuenca hidrográfica, incluida totalmente en el territorio paraguayo, mide unos  $10.600 \text{ km}^2$ , y ocupa alrededor del 2,6% de la superficie del país.



**Ilustración 5.** Ubicación del Lago Yguazú (Microsoft Encarta 2008) y vista aérea de la presa (google Earth 2008)

La cuenca hidrográfica tiene la forma de un triángulo alargado en dirección Noroeste-Sureste, con el vértice en correspondencia del Paraná y la “base” formada por la serranía de Acarangú, donde están las nacientes del Acaray y del Yguazú. El desarrollo longitudinal de la cuenca mide unos 150 km y la “base”, aproximadamente 130 km. Sobre el Río Yguazú, a unos 6 km aguas arriba de la confluencia de los ríos Acaray e Yguazú se encuentra el embalse del Yguazú. De acuerdo a la tabla 1, este embalse, en condiciones normales, puede

contar con un volumen útil de  $6.600 \text{ hm}^3$  y un nivel del agua en la cota 223 metros. En este estudio son considerados estos valores de acuerdo al proyecto de utilización óptima del Río Acaray [6]. La ilustración 5, presenta un esquema de la ubicación del mencionado embalse.

N.A. en el embalse (M.S.N.M)	Hm <sup>3</sup>	Km <sup>2</sup>
202	500	105
205	800	150
210	1800	250
215	3400	350
220	5500	460
223	6600	550

Tabla 6. Datos referentes al embalse del Lago Yguazú.

## 6. Resultados

La producción energética de un sistema hidroeléctrico depende de los caudales afluentes provenientes de las diversas usinas y cuencas

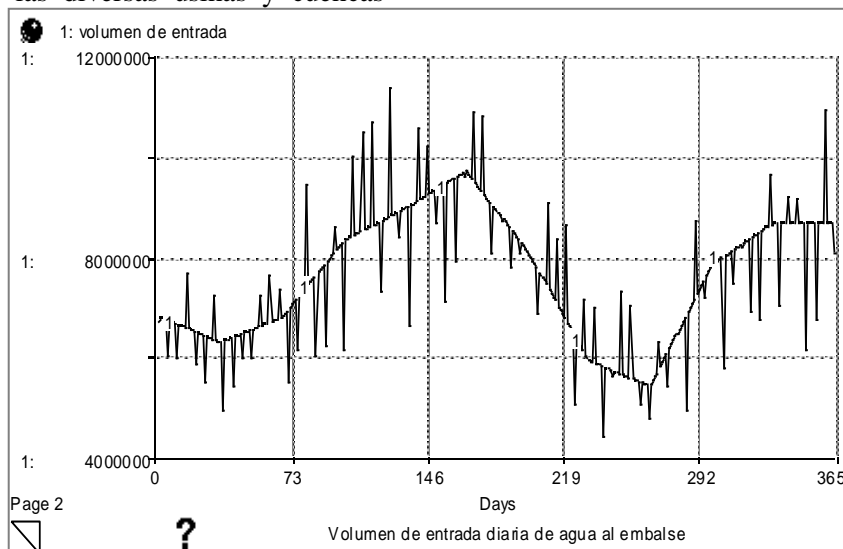


Ilustración 6. Stella. Volumen de entrada total en m<sup>3</sup>/día

Como en la ilustración 6, el periodo de punta de la afluencia parte desde 136 días aproximadamente y se extiende hasta próximo a 200 días, se puede notar en la ilustración 6 que como el nivel inicial del embalse es el máximo, y sumado a éste el periodo de punta de la afluencia, nuestro sistema de vertido es obligado a actuar prácticamente en el mismo periodo registrado de la afluencia de punta.

Para explicar el funcionamiento de la ilustración 8 es necesario considerar que la altura líquida puede ser representada por [1,2,3]:

$$H_l = h_{\text{lago}} - h_{\text{rio}} - h_{\text{perd}} \quad (3)$$

Donde

- ✓  $H_l$  : definido en el apartado 4
- ✓  $h_{\text{lago}}$  : representa el nivel del lago aguas arriba, dado por su polinomio cota volumen (en metros)

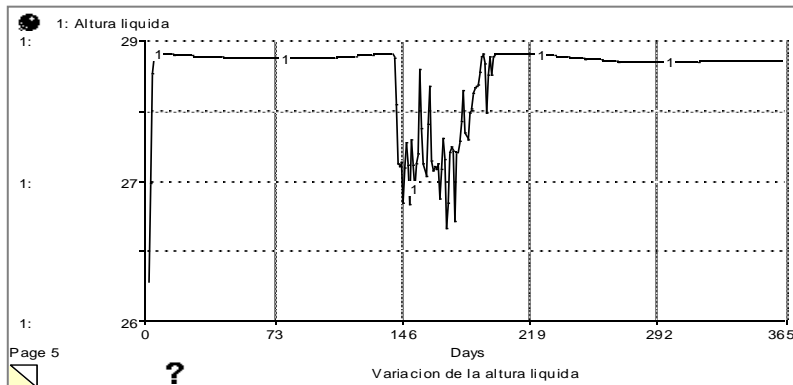
que componen el sistema, la ilustración 6 representa el comportamiento del caudal afluente expresado en volumen por día o sea  $m^3/\text{día}$ . Seguidamente se puede apreciar la ilustración 7, el comportamiento del embalse, para comprender mejor se presentan los valores iniciales del lago:

- ✓ *Volumen máximo* :  $6600 \text{ Hm}^3$
- ✓ *Volumen inicial* :  $6600 \text{ Hm}^3$
- ✓ *Tiempo de funcionamiento* : 2 horas por día
- ✓ *Capacidad de grupo generador*:  $2 \times 100 \text{ MW}$

- ✓  $h_{\text{rio}}$  : representa el nivel del río agua abajo, dado por su polinomio cota volumen (metros)
- ✓  $h_{\text{perd}}$  : representa las pérdidas debido a la rugosidad o rozamiento dentro de las paredes del conducto forzado (en metros)

A partir de aquí se puede asumir que, si se consideran las pérdidas de altura constantes, entonces se tienen dos variables que dependen exclusivamente del caudal turbinado y del caudal vertido. Para dicha situación encontramos que mientras el volumen del lago se encuentre al máximo, el valor de  $h_{\text{lago}}$  permanece constante a su valor máximo, pero mientras tanto el vertedero debe empezar a verter volúmenes diarios de agua en el canal de fuga o sea agua abajo, produciendo dicha acción una variación de  $h_{\text{rio}}$ , proporcional al volumen vertido. En resumen, se puede afirmar que debido al aumento del nivel agua abajo, dado por  $h_{\text{rio}}$  se tiene un comportamiento que tiende a disminuir la altura líquida de la planta, efecto

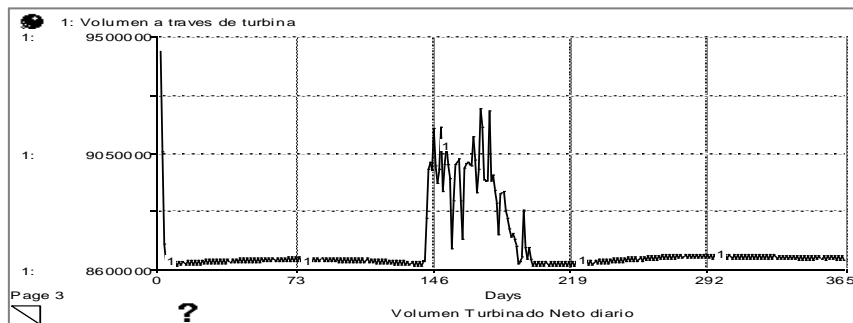
que es posible observar en la ilustración 8.



**Ilustración 6. Stella.** Comportamiento de la altura líquida ante el vertido

La variación de la altura líquida también está asociada a varias partes que componen el modelo de generación de la planta [1,2,3]. Una de las principales es el volumen de agua

turbinado o volumen a través de la turbina, estos valores son representados normalmente en flujo ( $m^3/s$ ), pero para fines de nuestro modelo es transformado en volumen diario.



**Ilustración 7. Stella.** Variación del volumen turbinado

La ilustración 9 representa el comportamiento del volumen turbinado de la planta, y en ella se puede observar la importancia de la altura líquida en el proceso de generación. De acuerdo a la ecuación 2, la energía generada está en función de la altura líquida y del caudal turbinado; entonces, para mantener el nivel de energía generada, ante la disminución de la altura líquida, es natural que el modelo deba ajustar automáticamente el flujo de agua a turbinar. En conclusión, se puede afirmar que el aumento en el volumen turbinado es debido a la disminución de la altura líquida y haciendo referencia a las ilustraciones anteriores, es posible verificar que todas estas variaciones ocurren en el mismo periodo de tiempo.

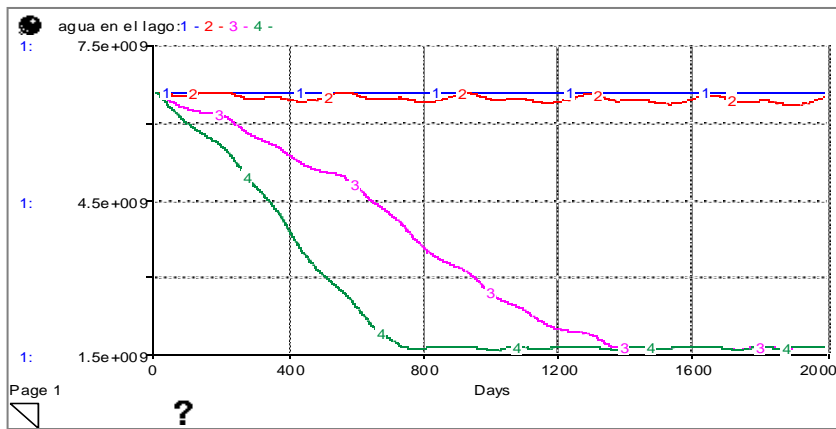
### 7. Comportamiento del modelo de embalse y de la hidroeléctrica

El objetivo de este análisis es mostrar la respuesta del sistema de embalse a la operación de la planta hidroeléctrica, de manera continua

en 2, 3, 4, y 5 horas de funcionamiento. Los valores iniciales para el presente análisis son:

- ✓ *Volumen inicial* :  $6600 \text{ Hm}^3$
- ✓ *Rendimiento grupo generador*: 0,9
- ✓ *Capacidad de grupo generador*:  $2 \times 100 \text{ MW}$
- ✓ *Duración del análisis*: 2000 días (aproximadamente 5,5 años a partir del inicio de funcionamiento)

La ilustración 10 presenta el comportamiento del embalse del Yguazú ante los distintos tiempos de funcionamiento de la planta hidroeléctrica; de acuerdo a los valores prefijados se puede entender que a medida que aumenta el tiempo de funcionamiento de las unidades generadoras, aumenta el volumen de agua turbinado, actuando de manera negativa sobre el volumen del embalse.



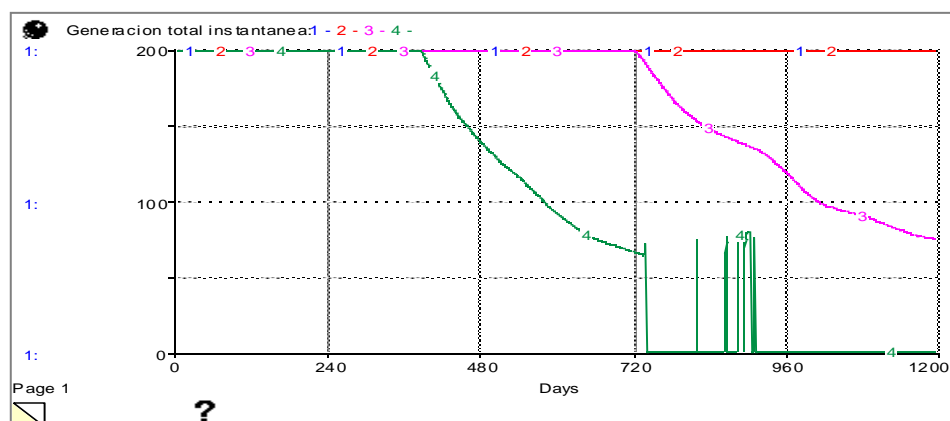
**Ilustración 10.** Stella, Respuesta del embalse al tiempo de funcionamiento de la planta. 2 horas (1), 3 horas (2), 4 horas (3), 5 horas (4).

Los resultados son claros; para un periodo de análisis de 2000 días (aproximadamente 5,45 años) se observan:

- ✓ 2 horas funcionando (Curva 1): el nivel del embalse es invariable, manteniéndose siempre igual al nivel inicial.
- ✓ 3 horas funcionando (Curva 2): el nivel del embalse presenta una pequeña variación respecto al nivel inicial, observándose pequeños valles, en los periodos secos.
- ✓ 4 horas funcionando (Curva 3): en este régimen de funcionamiento, los efectos negativos del depleccionamiento del embalse se acentúan rápidamente haciendo que el nivel del embalse pase de 6.600 hm<sup>3</sup> a 1.500 hm<sup>3</sup>, en aproximadamente 1400 días (3,83 años)
- ✓ 5 horas funcionando (Curva 4): así como el caso anterior, este régimen es aún más severo, acelerando el proceso de depleccionamiento, el

cual ocurre aproximadamente en 750 días (2,05 años).

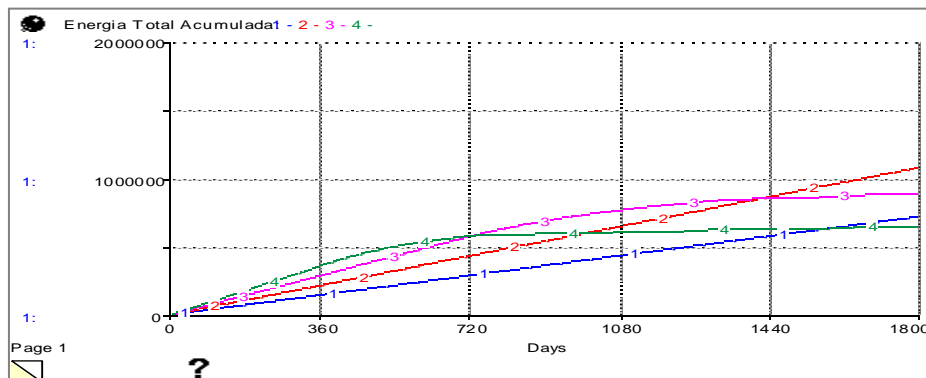
El comportamiento del embalse, ante los regímenes de operación, aparte de actuar negativamente en el nivel del embalse, tiene severos impactos en la generación de la planta; la ilustración 11 muestra que para 2 y 3 horas (Curva 1 y 2) la generación instantánea de la planta se mantiene en 200 MW de manera constante, mientras que para 4 horas (curva 3) apartir de 720 días de operación y bajo ese régimen la generación instantánea va disminuyendo rápidamente llegando a aproximadamente 50 % de la capacidad de generación, en un poco mas de 300 días. Ya en el régimen de 5 horas (Curva 4), visualizamos la peor situación, donde por poco más de 1 año mantiene el 100 % de la generación, precipitándose rápidamente y llega enseguida a aproximadamente 50 % del nominal en tan solo 600 días aproximadamente.



**Ilustración 8.**Stella-Impacto sobre la Generación total instantánea de la planta

Sobre el mismo tema, y desde otro punto de vista, podemos observar la ilustración 12, donde encontramos la generación acumulada y bajo los

mismos regímenes de funcionamiento ya analizados en el caso.



**Ilustración 9.** Análisis de la energía total acumulada. Para régimen de 2 hs (1), 3 hs (2), 4hs (3), 5 hs( 4).

## 8. Conclusiones

El estudio del Lago Yguazú, mediante la aplicación del modelo computacional en Stella, presenta las siguientes conclusiones: es factible la utilización del agua del embalse para todos los objetivos propuestos: generación hidroeléctrica, turismo, irrigación y piscicultura. El periodo de operación diaria de las unidades generadoras de la planta hidroeléctrica, que maximiza los beneficios económicos del sistema global, debe ser de 3 horas. Las condiciones máximas normales del embalse deben contar con un volumen útil de 6.600 hm<sup>3</sup> y un nivel del agua en la cota de 223 metros. La calidad del agua es un factor fundamental en el desarrollo de las actividades de turismo, irrigación y piscicultura. Las condiciones hidrológicas, aguas arriba de la planta, son muy importantes por su influencia directa en el comportamiento del salto útil disponible, así como también en la irrigación natural de los cultivos de la zona.

## 9. Referencias

1. CARDOZO C.M. Operação de Sistemas Hidroelétricos em Ambiente Competitivo: Uma Abordagem Da Gestão Empresarial Via Simulação Estocástica e Dinâmica de Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2000
2. ARCE S. A. Un Modelo de Otimização do Despacho de Máquinas em Usinas Hidrelétricas. Tesis de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 1999

3. FORTUNATO L. A., et al. Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, Centrais Elétricas Brasileiras. Universidade Federal Fluminense. 1990.
4. SOARES FILHO S., CARNEIRO A A.. O Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potencia a Medio e Longo Prazo. Universidade Estadual de Campinas. 1989
5. AMISIAL R. A., BARRIOS A. G.. Modelos de simulación de la Operación de un Embalse de usos Múltiples. Departamento de Desarrollo Regional de la Organización de los Estados Americanos (OEA). 1986
6. ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE ELECTRICIDAD (ANDE). Aprovechamiento Hidroeléctrico Integral del Río Acaray
7. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Partnership with The Environment. Hydropower. [www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/Library/WWVision/spWW02.pdf](http://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/Library/WWVision/spWW02.pdf)
8. Ford, A.; "Modeling the Environment"; Island Press; 1999.
9. Ford A.; Web page- <http://www.wsu.edu/~forda/AAIda.ht>
10. Sanchos M. F., et al. CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUA: ANALISIS DE IMPACTO ECONOMICO EN LA AGRICULTURA/ Universidad de Zaragoza
11. ANÁLISIS MULTICRITERIO DEL CAMBIO DE TECNOLOGÍA DE RIEGO EN

UNA COMUNIDAD DE REGANTES/M<sup>a</sup> José López Baldovín y Julio Berbel Vecino/Dpto. de Economía, Sociología y Política Agrarias. Universidad de Córdoba.

12. J.F. Ortega, Modelo de Optimización Económica del Manejo del Agua de Riego en Las Explotaciones Agrícolas: Aplicación a La Agricultura de Regadío de La Provincia De Toledo

13. ROSSELLÓ NADAL J., et al. UN MODELO DINÁMICO DE DEMANDA TURÍSTICA PARA LAS BALEARES. Universitat de les Illes Balears y Centre de Recerca Económica. Revista de Economía Aplicada EA Número 39 (vol. XIII), 2005, págs. 5 a 20

14. Manz H. D. Evaluación del Funcionamiento de Los Sistemas de Conducción de Agua para Riego, Usando Modelos de Simulación Dinámica..

15. FAO:AG21:Revista Enfoques: Mejorar la tecnología de riego- <http://www.fao.org>

16. Agua para todos, Agua para la vida. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo.

17. Joan Corominas Masip, EL VALOR DEL AGUA EN LA AGRICULTURA- Noviembre de 2000- [http://agua.rediris.es/conferencia\\_iberdrola\\_2000/conferencia/corominas.htm](http://agua.rediris.es/conferencia_iberdrola_2000/conferencia/corominas.htm)

18. 6<sup>a</sup> Conferencia Internacional "ECONOMÍA DEL AGUA" Hacia una mejor gestión de los recursos Hídricos: AGUA Y SEQUÍA EN ARAGÓN. INCIDENCIA EN EL SECTOR AGRARIO/José M. Cuadrat Prats. Departamento Geografía. Universidad de Zaragoza/ Joaquín Gómez Aparisi. Servicio Investigación Agraria. D.G.A. [http://agua.rediris.es/conferencia\\_iberdrola\\_2000/conferencia/cuadrat.htm](http://agua.rediris.es/conferencia_iberdrola_2000/conferencia/cuadrat.htm)

19. Grassi B., Un análisis del comportamiento de la precipitación en el Paraguay. Facultad Politécnica (UNA). 2006

20. Torloni EC., MANEJO PESQUERO DE EMBALSES EN EL ESTADO DE SÃO PAULO /Compañía Energética de São Paulo/CESP/ <http://www.fao.org>

21. LA PISCICULTURA COMO COMPLEMENTO DE LA ACTIVIDAD AGROPECUARIA INSTITUTO NACIONAL DE PESCA/Dpto. Biología Pesquera/Montevideo- 1999

22. Csirke, J., 1980 Introducción a la dinámica de poblaciones de peces. FAO, Doc. Téc. Pesca, (192):82 p.

23. Lopez Cruz, Introducción a La Simulación de Crecimiento y Desarrollo de Cultivos Usando Fortran Simulation Translator. Primer Congreso Nacional de Fenología Agrícola Y Modelos de Simulación Aplicados a La Agricultura. Universidad Autónoma Chapingo, México, Mayo 2004

24. Schaffernicht M., Indagación de situaciones dinámicas mediante la Dinámica de sistemas Tomo 1: fundamentos (Versión 17/11/2006)

25. Drew D. R., Dinámica de Sistemas Aplicada. Isdefe, Madrid 1995.

26. Alcântara Filho P, Manual sobre manejo de reservorios para a produção de peixes, <http://www.fao.org/docrep/field/003/AB486P/AB486P05.htm>

27. Thomann V. R., et al. Mathematical Modeling of Phytoplankton in Lake Ontario. Part 2. Simulations Using Lake 1 Model. Manhattan College Bronx, New York. 1976

28. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería Posgrado en Recursos Hidráulicos - Tesis de Maestría (2001)/ Modelos de lagos/ Presentado por: Ing. Julio Eduardo Cañón Barriga/ Director: Geol. Dr. César Rodríguez

29. A Dynamic Simulation Model of Tourism and Environment in the Yucatán Peninsula/ Patricia P.A.A.H. Kandelaars/ International Institute for Applied Systems Analysis • A-2361 Laxenburg • Austria

30. F. Javier Sánchez San Román/Dpto. Geología--Univ. Salamanca (España)(2004) <http://web.usal.es/javisan/hidro>

31. K.D.W. Nandalal and Slobodan Simonovic/ State-of-the-art, Report on systems Analysis Methods for Resolution of Conflicts in Water Resources Management, Unesco-IHP 127p

32. Hermosa J.L., Calidad del Agua del Embalse de Itaipu, Superintendencia de Medio Ambiente/Itaipu Binacional. Enero de 1999

33. Corral M. et al., SIMULACION NUMÉRICA DE PROCESOS DE TRANSPORTE Y DE CALIDAD DEL AGUA EN EL EMBALSE LOS MOLINOS/ Laboratorio de Hidráulica, FCEFYN, UN de Córdoba.

34. Salas, Henry J., METODOLOGÍAS SIMPLIFICADAS PARA LA EVALUACIÓN DE EUTROFICACION EN LAGOS CÁLIDOS



TROPICALES/Programa Regional  
CEPIS/HPE/OPS/ 1981-1990/ Organización  
Panamericana de la Salud (OPS) - División de  
Salud y Ambiente.

35.Ministerio de Agricultura y Ganadería  
(DGP/UEA)-“El Sector Agropecuario y Forestal  
en Cifras”Año 2007-

<http://www.mag.gov.py/Estadisticas/MAG%20DGP%20REVISTA2007.pdf>

36.Entidad Binacional Itaipú/Pagina  
Web/<http://www.itaipu.gov.py>

37.Entidad Binacional Yacyretá/Pagina  
Web/<http://www.eby.gov.py>

38. Administración Nacional de Electricidad  
(ANDE)/<http://www.ande.gov.py>