

Modelo de Simulación de Embalses para Análisis de Riesgo (Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación WICC-2006)

Silvina E. San Miguel

Facultad de Ciencias de la Alimentación, Universidad Nacional de Entre Ríos
Concordia, 3200, Argentina

and

Carlos E. Alvez

Facultad de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional de Entre Ríos
Concordia, 3200, Argentina

and

Eduardo A. Zamanillo

Facultad de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional de Entre Ríos
Concordia, 3200, Argentina

RESUMEN

Se presenta un modelo de simulación de embalses para realizar análisis de riesgo en la atención de la demanda para riego. Este modelo simula las operaciones de cada embalse en base a series de aporte observadas y sintéticas; considera en cada embalse la evaporación, la infiltración y las demandas de riego y medio ambiente. El modelo relaciona mediante simulación, la capacidad del embalse con la demanda de riego y la probabilidad de falla en la atención de la demanda. Este trabajo se está desarrollando en el marco del proyecto PID-UNER 2098: “Evaluación agrohidrológica de represas de almacenamiento con destino a riego en Entre Ríos”[1].

Palabras Clave: Simulación, Análisis de Riesgo, Embalses, Irrigación.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio económico financiero de cualquier aprovechamiento hidráulico, se basa en los recursos hidrológicos disponibles. La provincia de Entre Ríos cuenta con una importante red hídrica interna que ha modelado su relieve confiriéndole gran potencial de crecimiento en el aprovechamiento de aguas superficiales para riego del cultivo de arroz.

Desde mediados de la década de los ochenta se ha comenzado a desarrollar la construcción de embalses para almacenar los excedentes de escorrentía superficial para irrigar arroz, sin embargo, las técnicas de diseño de embalses en la zona habitualmente no incluyen un modelo matemático hidrológico para extender las series de caudal de aporte que incluyan situaciones suficientemente críticas de alto impacto ambiental y económico. De esta forma el riesgo hídrico de las explotaciones arroceras irrigadas a partir del recurso hídrico superficial no está adecuadamente evaluado.

El modelo de simulación que se presenta en este trabajo, permite realizar análisis de riesgo en la atención de la demanda para riego. Esta simulación la hará en base a series de aporte de caudal, a la evaporación, la infiltración y a las demandas de riego y medio ambiente.

Para la utilización adecuada de este modelo se requieren series de aporte de caudal extensas. Sin embargo, dado que las series históricas disponibles son de una extensión reducida, el período que representan puede abarcar sólo años húmedos o años secos, lo que puede ocasionar una toma de decisiones erróneas en cuanto a la determinación del tamaño del embalse o de la superficie a sembrar.

Por lo antes expuesto, en este trabajo se utiliza, además de una serie histórica, una serie sintetizada por un modelo hidrológico de simulación [2] que permite la extensión de series de caudales líquidos de cursos de agua a partir de series de precipitación; dado que, en general, las series históricas disponibles de caudales líquidos medidos en los distintos cursos de agua son de corta longitud, pero se dispone de registros extensos de precipitación en sus cuencas.

El modelo de simulación para la extensión de series de caudal, ya ha sido desarrollado en una etapa anterior del proyecto citado y una breve descripción del mismo con una aplicación en la cuenca del río Gualeguaychú se describe en la sección 2.

En la sección 3 se presenta una descripción sintética de la metodología de la simulación del embalse para el análisis de riesgo.

En la sección 4 se plantea la determinación de la demanda para riego de arroz.

En la sección 5 se describe brevemente la implementación del modelo de análisis de riesgo y la forma de visualización de resultados.

En la sección 6 se detallan las referencias bibliográficas.

2. DETERMINACIÓN DE LA SERIE DE CAUDALES

La serie de caudales que se utilizará en la aplicación del modelo tienen una parte observada, complementada con la obtenida a partir de las series de precipitaciones observadas mediante el software SIMHUNER [2].

SIMHUNER es un modelo matemático hidrológico concentrado de simulación continua orientado a extender series de caudales semanales a partir de la precipitación media diaria observada sobre una cuenca. Incluye un algoritmo de optimización indirecta restringida (minimización de Función Objetivo) basado en el método de rotación de coordenadas presentado por Rosenbrock [3] para la optimización automática de los parámetros del modelo.

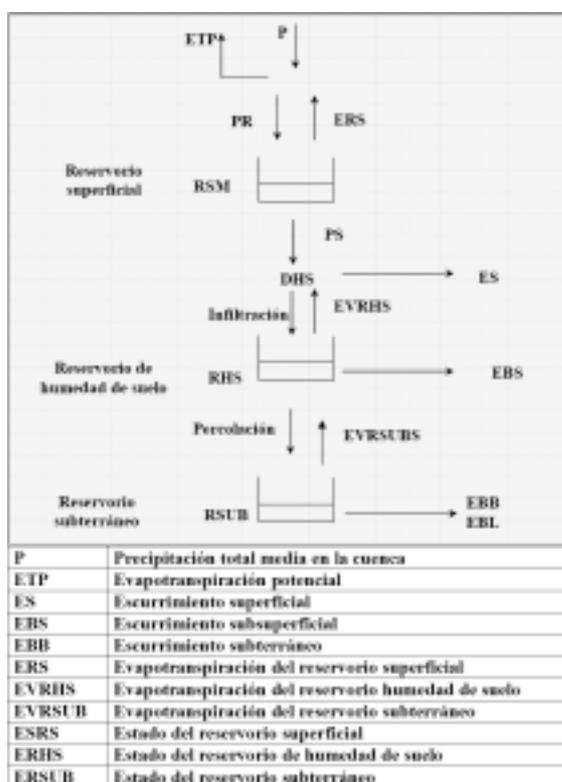


Figura 1: Esquema conceptual del modelo.

El modelo de transformación lluvia-caudal se basa en un esquema conceptual que representa los almacenamientos en la cuenca a través de tres reservorios ficticios, el reservorio superficial (agua que se almacena superficialmente), el reservorio de humedad de suelo o subsuperficial y el reservorio subterráneo [4] (Figura 1).

Las salidas de agua de la cuenca ocurren por la evaporación directa de la lluvia, por la evaporación o evapotranspiración de los reservorios superficial, de humedad de suelo y subterráneo y por el escurrimiento efluente de la cuenca constituido por los escurrimientos superficial, subsuperficial y subterráneo.

Los datos de entrada al modelo son la precipitación diaria y la evapotranspiración diaria, semanal o mensual. Si no se dispone de lecturas de evapotranspiración, ésta puede estimarse ingresando temperaturas medias diarias, semanales o mensuales. El intervalo de tiempo de cálculo del modelo es diario, mientras que el intervalo de tiempo para ajuste y calibración es semanal.

El balance hídrico se realiza en cada intervalo de tiempo, calculando los caudales efluentes de la cuenca y la evapotranspiración real.

El sistema permite al usuario crear proyectos para cada curso de agua con el que desee trabajar. Posibilita la realización de las siguientes operaciones: Ajuste de parámetros, Verificación y Extensión de series de caudal.

Para la *Extensión de series de caudal*, el usuario puede utilizar los parámetros verificados para obtener series de caudal en períodos en los que no se cuentan con caudales observados. Para ello es necesario disponer de registros de precipitación y evapotranspiración correspondientes al período de cálculo [5].

El modelo fue aplicado a la cuenca superior del río Gualeguaychú, de 470,3 km² de superficie, localizada en la zona centro-este de la Provincia de Entre Ríos (Figura 2). [6]. El ajuste de parámetros se realizó en el período 16/10/2002 - 23/11/2004. Para la verificación, se consideraron dos etapas, desde el 10/10/2001 al 15/10/2002 verificación con existencia de registros continuos de caudal y, desde el 05/01/1994 al 09/10/2001, sin registros continuos de caudal. Los resultados de las verificaciones efectuadas permitieron validar el modelo para la extensión de series de caudal a partir de series de precipitación y evaporación. De este modo fue posible la generación de la serie de caudales correspondiente al período 01/06/1983 - 04/01/1994. Considerando los datos observados y sintetizados por el modelo, se cuenta con la serie 1983 - 2005.

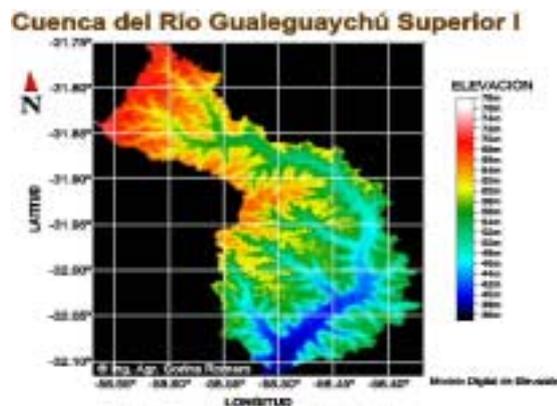


Figura 2: Mapa de la cuenca de la aplicación.

3. METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN

La determinación de la cota de represamiento y la capacidad de embalse necesaria para satisfacer la demanda del área a regar, se realiza con base en la estimación de la probabilidad de falla en la atención de la demanda.

Para obtener la referida probabilidad, se utiliza una serie de caudales semanales. Esta serie se obtiene a partir de datos observados y de la extensión de series de caudal según lo detallado en 2.

La simulación de las condiciones del embalse se realiza por la siguiente ecuación fundamental de continuidad:

$$X - D = \Delta V \quad (1)$$

donde:

X : volumen de entrada en el intervalo Δt .

D : volumen de salida en Δt .

ΔV : cambio en el volumen almacenado en Δt .

Δt : Intervalo de tiempo de cálculo.

La entrada al embalse se compone de:

$$X = E_{cp} + E_t + E_{ii} \quad (2)$$

donde:

E_{cp} : aporte propio de la cuenca.

E_t : transferencia de otras cuencas.

E_{ii} : lluvia directa sobre el embalse.

La salida del embalse esta conformada por:

$$D = S_d + S_e + S_i + S_{de} \quad (3)$$

donde:

S_d : demanda para riego + caudal ecológico.

S_e : evaporación.

S_i : infiltración en el embalse.

S_{de} : volumen derramado por vertedero.

Por lo tanto, el cálculo del volumen en el período $t+1$ esta dado por la siguiente ecuación.

$$V_{t+1} = V_t + E_{cp} + E_t + E_{ii} - (S_d + S_e + S_i + S_{de}) \quad (4)$$

donde:

V_{t+1} : volumen retenido en el embalse al final del intervalo de tiempo.

V_t : volumen retenido en el embalse al comienzo del intervalo de tiempo.

Esta ecuación se utiliza para toda la serie de caudales, iniciando la simulación con la capacidad máxima en el embalse V_{max} .

Cuando en la simulación la ecuación (4) da que V_{t+1} supera la capacidad máxima del embalse (V_{max}), entonces $V_{t+1} = V_{max}$ y el excedente se derrama por vertedero (S_{de}).

Cuando en la ecuación (4) V_{t+1} es menor al volumen mínimo (V_{min}), el embalse se vacía ($V_{t+1}=0$) y la demanda no puede ser atendida, por lo que ocurre una falla [7] en el atendimento de la demanda.

El concepto de falla se utiliza habitualmente en el dimensionamiento de embalses, a pesar de que no siempre es claro para los usuarios de los mismos [8].

Generalmente una falla se interpreta como la no-atención de la demanda durante un cierto período de tiempo. Las fallas deben ser independientes entre sí.

En primera instancia, el cálculo de la probabilidad de falla (P_f) a partir de los resultados de la simulación puede efectuarse como:

$$P_f = N_f / N_s \quad (5)$$

donde:

N_f : número de períodos de simulación en que el embalse quedo vacío sin satisfacer la demanda.

N_s : número total de períodos de simulación.

En los sistemas donde la finalidad principal del embalse es el suministro de agua para riego la forma de cálculo de la probabilidad de falla indicada por la ecuación (5) puede conducir a la sub-estimación del riesgo.

Por lo tanto, en los sistemas de riego las fallas deben asociarse a los períodos de riego (no a todo el año). En este caso, el período sobre el cual se debe calcular P_f depende del tipo de cultivo, su ciclo biológico y la época del año en que el agua es utilizada para riego.

4. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA

En este trabajo, la demanda que se considera es la necesaria para el riego de arroz y para la satisfacción del caudal ecológico aguas abajo.

La necesidad de agua para el riego de arroz fue estimada en base a la experiencia arroceras en la Provincia de Entre Ríos.

A efectos del análisis se adoptaron dos dotaciones de riego: una máxima inicial de 1.45 l/s/ha, y una mínima de 1.33 l/s/ha. Estas reflejan una media razonable para 100 días de riego considerando adecuadas las eficiencias de conducción y aplicación. La diferencia entre ambas corresponde al aumento en la eficiencia global del riego compatible con el desarrollo tecnológico esperable del mismo.

El caudal ecológico es el caudal mínimo que el embalse deberá erogar aguas abajo para garantizar la biodiversidad y los usos domésticos y sanitarios del agua.

Distribución del área regable

Para cubrir las necesidades de agua de los 100 días que dura el ciclo biológico del arroz que requiere riego y considerando que no todos los productores

siembran en el mismo momento, para la simulación y el análisis se adoptó una distribución del área regable de cada mes del período de cultivo siguiendo las pautas de las reglas de arte y la experiencia sobre esta materia. La distribución referida se presenta en la Tabla 1.

| Meses | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| % del área | 10 | 60 | 100 | 100 | 70 | 15 |

Tabla 1: distribución de superficie de riego.

Si bien, se cuenta con esta distribución, la implementación del modelo, brinda la posibilidad de modificar la misma para realizar análisis de sensibilidad. Por otro lado, a partir de esta distribución mensual, en el modelo se aplica una distribución semanal.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Actualmente, se encuentra en etapa de desarrollo el sistema computacional que implementa este modelo de simulación. El software tiene como objetivos:

- Administrar los datos de los distintos cursos de agua de manera simple y eficiente.
- Determinar la demanda en base a distintos parámetros.
- Calcular las probabilidades de falla para distintos tamaños de embalse y superficies de riego.
- Presentar resultados en forma gráfica y tabular de manera que permitan el análisis de riesgo para las distintas condiciones planteadas.

Administración de los datos

Para realizar una correcta administración de los datos, el sistema permite a los usuarios crear proyectos para las distintas cuencas a analizar. Esto posibilita no sólo una correcta administración de los datos de caudales, precipitaciones, evaporación, etc., sino que también permite guardar de manera ordenada los resultados de las distintas corridas del modelo. También, para cada proyecto se permite guardar distintos juegos de parámetros utilizados. De esta manera se podrán reproducir las distintas corridas y comparar resultados.

Determinar la demanda con distintos parámetros

Para determinar la demanda para riego se consideran las dotaciones para riego seleccionadas en 4 y la distribución del área a sembrar en el tiempo (Tabla 1). El sistema permite cambiar los parámetros de demanda para analizar la sensibilidad en los resultados.

Calcular las probabilidades de falla

Para calcular las probabilidades de falla se utilizan dos opciones:

- Porcentaje de fallas por períodos riego.
- Probabilidad de fallas por total de períodos.

En ambos casos el sistema permite variar la capacidad de embalse y la superficie bajo riego, de manera de poder realizar diagramas de riesgo.

Presentación de resultados

Para facilitar el análisis, el sistema presenta salidas gráficas y tabulares, que representan resúmenes analógicos y numéricos que relacionan las principales variables y parámetros del problema. Entre las salidas gráficas, que se pueden seleccionar, a modo de ejemplo, se presentan:

- **Diagramas de comportamiento:** permiten observar la evolución del estado del embalse en el tiempo para una capacidad de embalse y superficie de riego determinada (Figura 3). Permite detectar claramente los períodos críticos donde ocurren las fallas, como también los períodos en que ocurren excesos no-aprovechables que se derraman por vertedero.
- **Diagramas de riesgo:** relacionan las principales variables y parámetros del problema. Permiten visualizar la relación existente entre la capacidad de embalse (V_{max}), la probabilidad de falla (P_f) y la superficie a sembrar (Figura 4). Este diagrama es especialmente útil para tomar decisiones como: determinación del área de siembra para distintas capacidades de embalse para un riesgo dado, determinación de la capacidad necesaria del embalse a construir, etc.

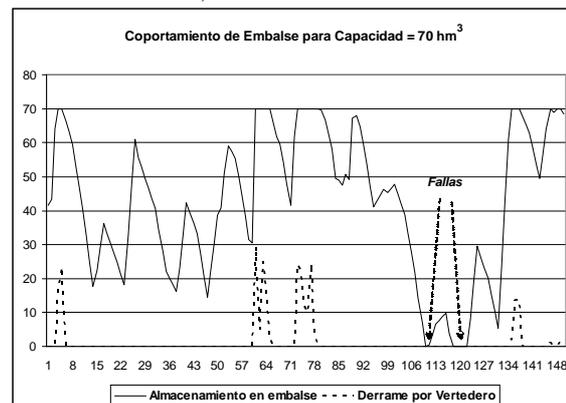


Figura 3: diagrama de comportamiento

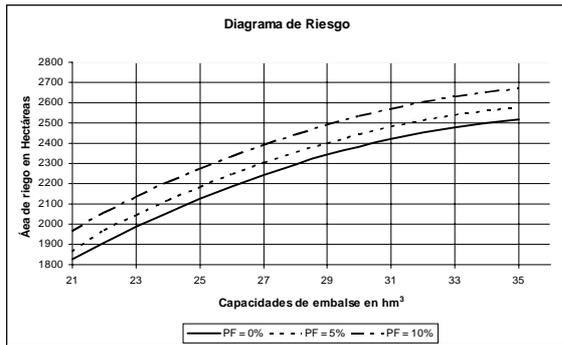


Figura 4 diagrama de riesgo

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eduardo Díaz et al; Primer informe de avance proyecto PID UNER 2098, “Evaluación agrohidrológica de represas de almacenamiento con destino a riego en Entre Ríos”, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias de la Administración, Facultad de Ciencias de la Alimentación, UNER; Marzo de 2005.
- [2] Silvina Ester San Miguel, Carlos E. Alvez, Eduardo A. Zamanillo, “Implementación de un modelo hidrológico de balance diario para simular la transformación lluvia-caudal en áreas irrigadas”. XI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2005). Concordia – Entre Ríos. ISBN 950-698-166-3
- [3] H. Rosenbrock., (1960). An automatic method for finding the greatest or best value of a function, Computer Journal 3 (1960)
- [4] E. Zamanillo; N. Caamaño,.; C. Dasso; A. Da Porta; 1991, Modelo matemático hidrológico para extensión de series de caudales, Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídrica, Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida asociado al CONICET, Villa Carlos Paz, mayo de 1991
- [5] Silvina E. San Miguel, Modelación hidrológica de represas con destino a riego en la provincia de Entre Ríos, tesis Licenciatura en ciencias aplicadas, UTN, 2005.
- [6] R. A. Pedraza., 1991, Estudio hidrológico rural cuenca río Gualaguaychú, Defensa contra inundaciones ciudad de Gualaguaychú, Informe final, Convenio Consejo Federal de Inversiones Provincia de Entre Ríos.
- [7] E. Zamanillo, M. Irigoyen, J. Iturburu; Estudio hidrológico-hidráulico del aprovechamiento del arroyo Guerrero, Determinación del área regable; 1995
- [8] E. Zamanillo, A. Villanueva, C. Tucci; Previsao de vazao para irrigacao. VII congresso Brasileiro de Hidrología e Recursos Hídricos. Salvador (BA); 1987.