

Modelamiento de operación de embalses para el proyecto integral de riego en la cuenca del río Macul

Vicente Tinoco¹, Patrick Willems^{2,4}, Guido Wyseure³, Felipe Cisneros¹

¹ Universidad de Cuenca - PROMAS, Departamento de Ingeniería Civil, Av. 12 de Abril Cda. Universitaria, Cuenca, Ecuador.

² KU Leuven, Department of Civil Engineering, Hydraulics Division, Kasteelpark Arenberg 40, BE-3001 Lovaina, Bélgica.

³ KU Leuven, Department of Earth and Environmental Sciences, Celestijnenlaan 200E, 3001 Lovaina, Bélgica.

⁴ Vrije Universiteit Brussel, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Pleinlaan 2, 1050 Bruselas, Bélgica.

Autor para correspondencia: vicente.tinocoo@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

Un proyecto de riego se ha planeado en la cuenca del Río Macul, Provincia de los Ríos, para el desarrollo de actividades agrícolas, las cuales representan el principal ingreso económico en la Región. Este sistema integral de control de agua comprende tres embalses, ubicados en los Ríos Macul y Maculillo. Las estrategias de riego son investigadas en un manejo integral de la Cuenca Hidrográfica y de los embalses, mediante el modelamiento de estrategias alternativas de operación de embalses con el objetivo de buscar un balance sustentable entre riego y ecología de los ríos. El modelamiento fue realizado por un período de 42 años de datos hidro-meteorológicos históricos, lo cual permitió analizar estrategias de operación en condiciones climáticas extremas. Los resultados indicaron que los volúmenes de riego del Proyecto exceden los volúmenes de agua disponibles para un riego sustentable. Dos líneas de acción son propuestas para enfrentar los déficits y cubrir las demandas de riego a los beneficiarios: una solución es implementar un calendario de riego deficitario, o la segunda solución implica modificaciones en la altura de las presas.

Palabras clave: Operación de embalses, modelación de río/embalses, modelación hidrológica de lluvia escorrentía.

ABSTRACT

An irrigation project is planned in the Macul Basin Ecuador for developing the agriculture as the main income in the region. The proposed water system comprises three large reservoirs damming the rivers Macul and Maculillo. The river basin planning and operation was investigated by modelling alternative reservoir operation strategies aiming at a sustainable balance between irrigation and river ecology by integrated reservoir/river management. The model simulates the integrated water system for long term periods of data, covering also several historical extreme events. Results indicate that the planned irrigation volumes are higher than the available water for a sustainable irrigation. Two lines of action are suggested for reaching the target irrigation demands: one is to design a deficit irrigation schedule, and the second implies modification in the reservoir's spillway height.

Keywords: Reservoir operation, river/reservoir modelling, mathematical modelling, lumped rainfall runoff modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Los proyectos de riego son concebidos para dotar de agua a tierras agrícolas donde la precipitación no satisface los requerimientos de agua de los cultivos durante estaciones secas o incluso durante todo el año (Withers & Vipond 1980). El Gobierno Ecuatoriano ha invertido en un gran proyecto de riego en la cuenca del Río Macul (Fig. 1), ubicada en la provincia de los Ríos, donde la principal actividad económica es la agricultura. Sin embargo, la producción agrícola y estabilidad laboral se ve limitada a las condiciones climáticas. Pese a que la lluvia anual es alta, 80% ocurre entre enero y mayo.

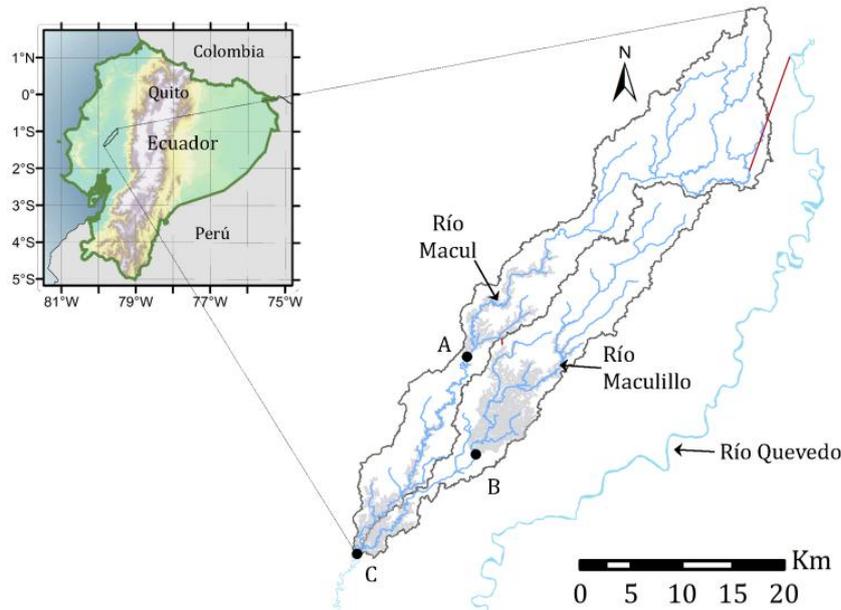


Figura 1. Mapa de la Cuenca del Río Macul. Principales componentes de la Cuenca y del Proyecto de Riego. Las sombras representan el área superficial de los embalses a capacidad máxima. Las líneas rojas representan los canales de trasvase.

Grandes proyectos de riego, a escala de cuencas hidrográficas, apuntan a producir impactos socio-económicos positivos. Esto se logra tan solo con la correcta planificación de estrategias durante la etapa de diseño, donde el objetivo es una adecuada relación entre el agua extraída para riego y el caudal ecológico de los ríos (Cai *et al.*, 2003). Las técnicas para planificar y/o evaluar estrategias de operación de embalses comprenden modelación matemática del sistema integrado río/embalse (Loucks *et al.*, 2005).

El mundo ha aprendido del caso del mar de Aral, donde una inadecuada relación entre riego y caudales ecológicos de los ríos causaron uno de los peores desastres medioambientales de la historia: Comenzando en los 1960's, una insustentable expansión de áreas de riego con ilimitadas extracciones de agua de Amu Dar'ya y Syr Dar'ya secaron los mencionados ríos, secaron el mar de Aral y produjeron severos impactos negativos en los alrededores que han afectado la salud de las personas y su economía (Micklin, 2010).

El presente estudio tiene por objetivo evaluar las estrategias de operación de embalses planificadas para el Proyecto de Riego en la Cuenca del Río Macul. Se desarrollarán alternativas de operación para lograr un balance sustentable entre riego, caudales trasvasados y caudales ecológicos de los ríos. Para lograr el objetivo, un modelo matemático es construido para tránsito y distribución de los flujos del Río a los diferentes usos del Proyecto de Riego. Además, un método es propuesto para optimizar la operación de los embalses mediante parametrización del sistema.

2. CASO DE ESTUDIO Y DATOS

2.1. Descripción del proyecto

El caso de estudio es un sistema integral de embalses para riego planeado en la cuenca del Río Macul. La cuenca del Río Macul está ubicada en la provincia de Los Ríos, Ecuador. El objetivo del Proyecto es regar treinta mil hectáreas dentro de la mencionada cuenca y sus alrededores.

La Cuenca del Río Macul tiene un área de 604 km². Su geomorfología está formada de pequeñas lomas y valles (PLR, 2013). La elevación del terreno varía de 100 m a 10 msnm. La región es una de más calientes en Ecuador, con temperaturas que varían entre 20 a 35°C a lo largo del año. Los recursos hídricos son abundantes durante el invierno, entre enero y mayo. 80% de la lluvia anual ocurre durante estos meses. La lluvia anual es aproximadamente 2000 mm. El sistema de drenaje está compuesto por dos ríos perennes y varios ríos de invierno. Los ríos perennes son Macul y Maculillo, los mismos que durante estaciones lluviosas extremas han alcanzado descargas de hasta 70 y 45 m³/s, respectivamente; mientras durante estaciones secas estos ríos pueden tener descargas menores a 1 m³/s. Existen aproximadamente 45000 habitantes en el sector de la cuenca del Macul (INEC, 2010). El 68% de las personas activamente económicas trabajan en agricultura, ganadería y pesca (PLR, 2013).

Las tierras potencialmente agrícolas comprenden fértiles clases de suelos Molisol e Inceptisol, donde múltiples cultivos son sembrados. Los cultivos son clasificados en: ciclo corto y perenne. Los cultivos planeados de ciclo corto son: maíz, soya, arroz, fréjol, maní, y melón. Los cultivos perennes son: cacao, banana, y palma. La producción actual es dependiente de la lluvia, esto limita la producción a una cosecha por año, y la hace más vulnerable a la variabilidad de condiciones climáticas.

El proyecto de riego Macul tiene por objetivo distribuir los recursos hídricos en tiempo y en espacio sobre las tierras potencialmente agrícolas para extender los períodos de cultivo. Para este propósito tres embalses (presas) se han diseñado: uno en la cuenca alta del Río Macul, otro en la cuenca del Río Maculillo, y el tercero en la union de los mencionados ríos (Fig. 1). De aquí en adelante se llamará a estos embalses A, B, y C respectivamente. Sus características son resumidas en la Tabla 1. La capacidad total del sistema es 250 millones de m³. PROMAS (2014) determinó que la contribución hídrica de las subcuencas no es suficiente para llenar los embalses durante una estación lluviosa. Por lo que, un canal de trasvase fue diseñado para derivar 10 m³/s desde el Río Quevedo al sistema durante esta estación. Los tres embalses son conectados mediante los cauces naturales o mediante un canal artificial (A-B) como se presenta en la Fig. 2.

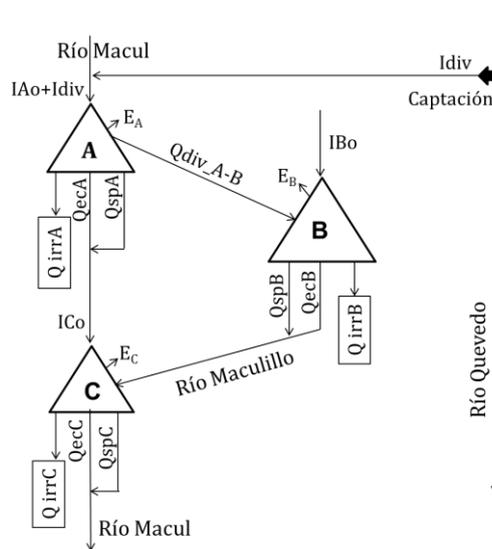


Figura 2. Sistema río/embalses Macul. Flujos de ingreso (I) y flujos de salida (Q).

Tabla 1. Características de los embalses.

Embalses	A	B	C
Área de subcuenca de aporte (km ²)	279.1	183.7	141.3
Altura de la presa (m)	18	18	13
Capacidad máxima de los embalses (x10 ⁶ m)	60.9	137	52.6
Área de riego (ha)	7150	16242	6074

El sistema planeado de riego es de aspersión con una eficiencia de aplicación del 80%. La eficiencia en la distribución entre los embalses y las áreas regadas es del 85%. Horarios de riego se establecieron en 16 horas por día y se agruparon en períodos de diez días. Las demandas se incrementan entre años dado que los cultivos perennes tienen un ciclo de crecimiento de tres años.

2.2. Identificación de variables

El primer paso para construir el modelo de operación de embalses es identificar los flujos de ingreso y de salida del sistema; los cuales están resumidos en la Fig. 2. Los flujos de ingreso corresponden a la escorrentía de las subcuencas, y caudales trasvasados. Los flujos de salida son: riego Q_{irr} , caudal ecológico de los ríos Q_{ec} , caudales de excesos Q_{sp} , flujos trasvasados de embalse A a B, y evaporación.

El caudal de ingreso al embalse A (I_A) está compuesto de la contribución de la subcuenca A (I_{Ao}) más el caudal trasvasado desde el Río Quevedo I_{div} . La descarga total al río Macul es $Q_{Ariver} = Q_{Asp} + Q_{Aec}$. Aplicando la misma nomenclatura; el caudal de ingreso al embalse B es $I_B = I_{Bo} + Q_{divA_B}$. Y a embalse C es $I_C = I_{Co} + Q_{Ariver} + Q_{Briver}$, la cual es igual a $I_C = I_{Co} + Q_{Asp} + Q_{Aec} + Q_{Bsp} + Q_{Bec}$.

2.3. Información geográfica

La información geográfica de los elementos involucrados en la investigación como: ríos, canales, embalses, áreas de riego, características del suelo, uso del terreno, estaciones meteorológicas, estaciones hidrográficas fueron copiladas en un archivo SIG base. Un modelo digital del terreno (MDT) con escala 1:10000 (IGM, 2011) y tamaño de celda de 5 metros fue utilizado.

2.4. Información hidro-meteorológica

La información descrita a continuación estuvo disponible en registros diarios por un periodo de tiempo entre los años 1965 y 2006. Sin embargo existen algunos intervalos de tiempo sin registros, así como algunos datos atípicos.

- **Caudales de río (Q):** Existe dos estaciones hidrológicas en la zona de estudio: estación Macul en Pte. Carretera (H352) y estación Hda. Brasilia (H353). Éstas se encuentran en la subcuenca del embalse A, y se utilizaron para completar las series históricas de datos de caudal, para calibrar el modelo lluvia-escorrentía, así como para analizar el tránsito del flujo en el Río Macul.
- **Información meteorológica:** Temperatura del aire (T_{max} , T_{min}), humedad relativa del aire (RH), velocidad del viento a 2 m de altura (u_2), y evaporación potencial (E_{pan}) fue recolectada de la estación meteorológica Pichilingue. Datos de temperatura estuvieron completos. Evapotranspiración de referencia fue calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para completar la serie de datos.
- **Precipitación (P):** Fue recolectada de dos estaciones pluviométricas ubicadas en las cercanías de la subcuenca del río Macul: Pichilingue (M006) y Río Congo. La precipitación se distribuyó en el área mediante el método de polígonos de Thiessen.

Un control de calidad de la información fue realizado para corregir datos erróneos. Los intervalos de información faltante fueron completados mediante generación estocástica de lluvia, y mediante modelación de lluvia-escorrentía; para este último fue empleado un modelo conceptual agregado, VHM (Willems, 2014).

3. MÉTODOS

3.1. Modelamiento de ríos/embalses

Literatura acerca de modelos río/embalses se ha publicado desde 1953¹ por universidades, organismos de recursos hídricos, y consultoras privadas. Estos modelos pueden ser clasificados en dos grupos: modelos de simulación y modelos de optimización, pese a que en muchos casos están combinados los dos aspectos (Wurbs, 2005). Las dos prácticas comparten el objetivo de ser una herramienta para el soporte de decisiones para desarrollar y evaluar reglas de operación de embalses. Estos modelos tienen por objeto la óptima distribución del agua desde el embalse a los diferentes usos y minimizar riesgos tales como: recortes de agua, inundaciones y/o aspectos medioambientales.

La ecuación que gobierna estos modelos es la del balance de agua. La diferencia entre modelos de simulación y de optimización de embalses es que en el primero se busca una óptima operación mediante modelamiento de escenarios de diferentes configuraciones de las estructuras de control del flujo (i.e. calibración de apertura de válvulas); mientras que los modelos de optimización buscan automáticamente la óptima operación mediante algoritmos computacionales predefinidos (Wurbs, 1993) (i.e. redes neuronales artificiales - ANN).

Destacadas revisiones del estado de arte en modelos de optimización han sido realizadas por (Rani & Moreira, 2009; Labadie, 2004); y acerca de modelos de simulación de embalses por (Wurbs 2012; Matrosov *et al.*, 2011; Wurbs, 1993; Wurbs, 2005). Yeh (1985) abarcó los dos aspectos en su revisión. Una observación basada en la revisión bibliográfica es que la academia ha desarrollado robustos modelos de optimización para resolver la operación de embalses, mientras que por otro lado, los organismos responsables de la planificación, construcción y operación de embalses todavía aplican mayormente modelos de simulación. Wurbs (1993) manifestó que existe una brecha entre investigación y práctica en la implementación de técnicas de optimización. Labadie (2004) argumentó que una de las razones por las que técnicas de optimización no han sido ampliamente aplicadas en la práctica se debe a la complejidad matemática de estos modelos.

Avances en el modelamiento de embalses se han enfocado principalmente en control de inundaciones, suministro de agua potable, y generación hidroeléctrica. Pocos estudios se han realizado en manejo de embalses para proyectos de riego; algunos estudios representativos en este tópico son: (Al-Ansari *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2006; Amir & Fisher 1999; Afshar *et al.*, 1991). Una posible razón es que el sector agrícola es más flexible que los otros sectores de consumo del agua; debido a que recortes en riego tienen un impacto menos drástico que recortes en la distribución de agua potable (Amir & Fisher, 1999). Además, los reembolsos económicos en riego son menores que en los otros sectores, la cual es otra de las razones por lo que este campo no ha recibido la atención requerida.

Además, en la revisión bibliográfica se identificó que los modelos río/embalse existentes para riego no modelan períodos largos de series de datos, lo cual limita sus resultados a específicas condiciones climáticas; omitiendo por ende un factor fundamental que es la variabilidad del clima y/o la operación de los embalses en eventos hidro-meteorológicos extremos.

3.2. Métodos para construir un modelo de río/embalse

Un esquema de la metodología es resumido en la Fig. 3, donde el componente central es el modelo río/embalse. Este modelo consiste en transitar el flujo de los ríos (I) a través del embalse hacia las diferentes salidas de la presa (Q) (Chow *et al.*, 1988). La ecuación que gobierna la dinámica de los embalses es la ecuación de la continuidad, Ec. 1, la misma que está expresada en términos de la variación de los niveles de agua del embalse (dH) en tiempo (t), y es dependiente del área superficial del embalse (A).

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t) - Q(t, H)}{A(H)} = f(t, H) \quad (1)$$

¹ Año atribuido al modelo matemático río/embalse pionero que fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de EE.UU. para la operación de un sistema integrado de seis embalses en el Río Missouri (Wurbs, 2005).

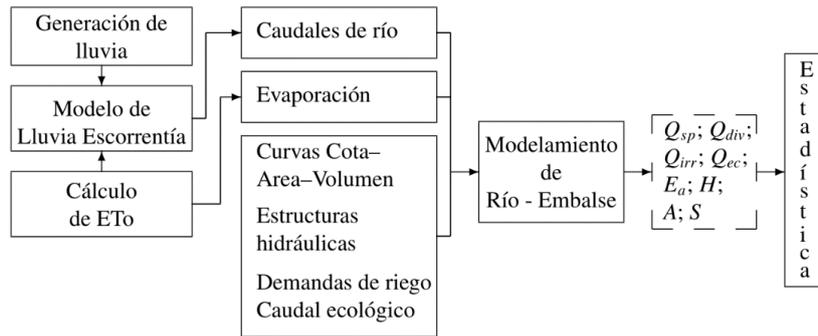


Figura 3. Metodología de la modelación río/embalse. El modelo de simulación río/embalses calcula las variables mostradas en línea entrecortada mediante el ingreso de los datos mostrados en la segunda columna. En subcuencas sin estaciones de aforo, o sí los datos hidrológicos recolectados tienen intervalos sin registros, ésta información es generada mediante modelos auxiliares presentados en la primera. Finalmente análisis estadísticos son realizados en los resultados para soporte en la toma de decisiones.

Una solución numérica de la ecuación diferencial ordinaria no lineal de primer orden, Ec. 1, fue aplicada para propósitos de modelamiento. Fenton (1992) y Fiorentini & Orlandini (2013) revisaron diferentes métodos para resolver las ecuaciones de tránsito de embalses. Fenton (1992) concluyó que el método tradicional de piscina nivelada falla en precisión. Fenton (1992) también comparó los métodos Runge-Kutta (RK) para resolver la Ec. 1 y encontró una precisión bastante aceptable aplicando RK de segundo orden en comparación con las soluciones de RK de mayores órdenes. RK es además un método numérico estable y robusto para fines de programación, por lo que fue implementado para construir el modelo de río/embalse en la presente investigación.

La descarga total del embalse Q está compuesta de: riego Q_{irr} , caudal ecológico Q_{ec} , caudal de excesos Q_{sp} . Evaporación del embalse E también fue agregada al grupo de descargas. El embalse A tiene una descarga adicional, que es el flujo trasvasado al embalse B, Q_{divA-B} . Consecuentemente, Q es expresado como:

$$Q = Q_{sp} + Q_{divA-B} + Q_{irr} + Q_{ec} + E \quad (2)$$

Los descargas de la presa dependen del nivel de agua del embalse H y de relaciones hidráulicas. Una rutina “if y else” fue desarrollada para simular las descargas de la presa como se muestra en la Tabla 2. Esta consiste en dividir los niveles del embalse en zonas definidas por el nivel de las estructuras efluentes de la presa. Tres niveles de la presa son fijos y uno variable definiendo así 5 zonas. Los niveles fijos de las estructuras de la presa son: i) H_{crest} : cresta del vertedero de excesos, ii) H_{bdiv} : fondo del canal de trasvase, y iii) H_{bo} : descarga de fondo. El nivel variable define cuándo la dotación de riego debe ser restringida para minimizar impactos ecológicos negativos aguas abajo de la presa, este límite es llamado $H_{irr/ec}$.

La zona 5, ubicada debajo de H_{bo} , es una zona inactiva destinada para acumulación de sedimentos S_{sedA} . La zona 4, limitada entre $H_{irr/ec}$ y H_{bo} , reserva un volumen de seguridad ecológica, S_{ecA} . La capacidad de almacenamiento de ésta zona es definida en Ec. 3.

$$S_{ecA} = \min(Q_{ecA}) * a * dt + S_{sedA} \quad (3)$$

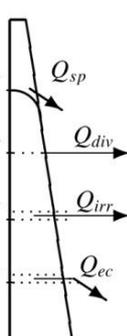
donde el subíndice A se refiere al embalse A.

Igual ecuación fue aplicada a los embalses B y C; dt es el paso de tiempo en segundos, que en el presente estudio es 86400 sec; a es un parámetro adimensional creado para optimizar la operación del embalse. El término $a*dt$ representa el periodo de tiempo durante el cual flujos mínimos extremos ocurren en la cuenca con magnitudes proporcionales al mínimo caudal ecológico del río $\min(Q_{ecA})$.

El límite $H_{irr/ec}$ es obtenido en función de S_{ec} aplicando las curvas cota-área-volumen de cada embalse. El caudal ecológico de los ríos fue determinado por el método hidrológico (Sánchez & Schmidt, 2012) como el 10% del caudal medio mensual.

Tabla 2. Reglas de operación para la determinación de descargas desde embalse A. Los embalses B y C presentan una estructura similar pero sin la zona 2, ésta zona está incluida dentro de la zona 3 en esos embalses.

	Q_{sp}	$Q_{divA.B}$	Q_{irr}	Q_{ec}	$\uparrow E$
Zona1 if $H_i \geq H_{crest}$	$Q_{sp}(S(H_i))$	$Q_{divA.B}(H_i - H_{bdiv})$	Q_{irrTg}	Q_{ec}	H_{crest}
Zona2 if $H_{bdiv} \leq H_i \leq H_{crest}$	0	$Q_{divA.B}(H_i - H_{bdiv})$	Q_{irrTg}	Q_{ec}	H_{bdiv}
Zona3 if $H_{irr/ec} \leq H_i \leq H_{bdiv}$	0	0	Q_{irrTg}	Q_{ec}	$H_{irr/ec}$
Zona4 if $H_{bo} \leq H_i \leq H_{irr/ec}$	0	0	0	$\min(Q_{ec})$	H_{bo}
Zona5 if $0 \leq H_i \leq H_{bo}$	0	0	0	0	



3.3. Optimización de operación de embalses

Los objetivos en la optimización de los embalses son: i) definir las reglas de operación de los caudales trasvasados para llenar los tres embalses durante el período lluvioso, ii) encontrar el límite $H_{irr/ec}$ óptimo en cada embalse para mantener un balance sustentable entre riego y medioambiente. La optimización consiste en un proceso de prueba y error con los siguientes pasos:

1. Modelamiento del sistema río/embalse para un periodo de condiciones hidro- meteorológicas históricas.
2. Análisis estadístico post-proceso de los descargas resultantes de cada embalse y de los niveles de agua.
3. Optimización de los valores de los parámetros presentados en la Tabla 3. Los dos primeros parámetros definen los límites de los caudales trasvasados de A a B. Los tres siguientes parámetros (a , b , c) son concebidos para definir el límite $H_{irr/ec}$.
- 3.a Enfocarse en la distribución de los caudales en el sistema. Optimización de las restricciones $Q_{divA.B}$ y $Q_{maxA.B}$, basado en el análisis de las variables H , Q_{sp} , Q_{div} , y Q_{irr} .
- 3.b Optimización de los parámetros a , b , c basado en las relaciones entre las variables H , Q_{ec} , Q_{irrTg} y Q_{irr} .
- 3.c Análisis estadístico de valores mínimos extremos de niveles de agua H en el embalse y optimización de $H_{irr/ec}$.

Tabla 3. Parámetros del modelo río/embalse.

Símbolo	Descripción	Unidades
$Q_{maxA.B}$	Máximo Q trasvasado de embalse A a B sí $H_A \geq H_{crest}$	m^3/s
$Q_{divA.B}$	Máx. Q trasvasado de embalse A a B sí $H_{crest} \geq H_A \geq H_{bdiv}$	m^3/s
a	Constante para definir S_{ecA} aplicando Ec. 3	-
b	Constante para definir S_{ecB} aplicando Ec. 3	-
c	Constante para definir S_{ecC} aplicando Ec. 3	-

4. RESULTADOS

4.1. Reglas de operación para el canal de trasvase

Las primeras simulaciones del sistema integrado de tres embalses determinaron la necesidad de controlar los caudales trasvasados de embalse A a embalse B. El propósito fue optimizar el uso del caudal adicional I_{div} de ingreso al sistema trasvasado desde el Río Quevedo durante la época lluviosa. I_{div} llega primero a embalse A. Por lo que los otros embalses pueden ser llenados durante el período de lluvia con una óptima operación en A. Caudales de excesos de A y B llenan C. Caudales trasvasados

mayores a $10\text{m}^3/\text{s}$ fueron insustentables para embalse A, dado que este no llegaba a capacidad máxima. La óptima operación del canal de trasvase fue determinada así:

- Mientras el nivel de agua de embalse A, H_A , es mayor que el nivel de la cresta del vertedero, H_{sp} , el máximo caudal trasvasado a B es limitado a $Q_{\text{maxA}_B} = 10\text{m}^3/\text{s}$.
- Mientras H_A esté sobre el nivel del fondo del canal de trasvase y debajo de la cresta del vertedero H_{sp} , los caudales trasvasados a B son menores o iguales a $Q_{\text{divA}_B} = 5\text{m}^3/\text{s}$.

4.2. Resultados de la simulación del sistema río/embalse

El sistema de río/embalse Macul fue modelado por un período de 42 años de información hidrometeorológica histórica diaria empezando desde 1965. Las series de datos de las variables resultantes fueron resumidas en valores medios diarios, mensuales y anuales para facilitar los análisis, obteniendo los siguientes resultados:

Composición del tránsito de los flujos

La Fig. 4 presenta los flujos medios diarios transitados a través de embalse A. Se observa que la contribución de la subcuenca del embalse A (I_{Ao}) no es suficiente para suplir las demandas del proyecto, por lo que se justifica la necesidad de trasvasar caudales desde el río Quevedo (I_{div}). Los caudales descargados al río Macul mediante el vertedero de excesos son altos durante la época lluviosa. La evaporación es significativa ya que cuando el embalse está a capacidad máxima puede llegar a ser hasta de $1\text{m}^3/\text{s}$.

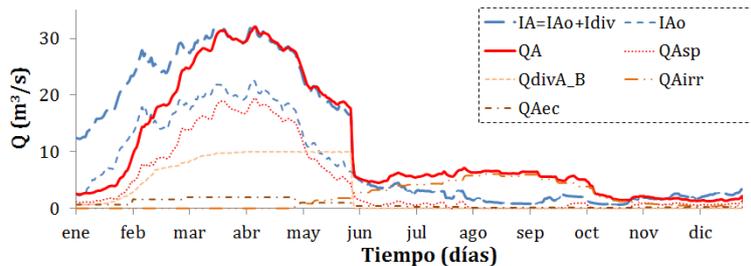


Figura 4. Composición de los flujos medios diarios transitados a través de embalse A.

Evaluación de la demanda de riego planificada

Las Figs. 5 y 6 presentan el agua disponible para riego de tal forma que se minimice el impacto ecológico negativo aguas abajo de las presas. Se observa un déficit en la demanda de riego disponible con referencia a la planeada en el proyecto, el mismo que empieza al final del mes de agosto. Varios valores de los parámetros a , b y c fueron probados para maximizar el riego. Los resultados muestran que la demanda planeada de riego es alta, dado que el volumen de riego anual planeado desde los embalses A, B y C es de 72.68, 178.43 y 66.72 millones de metros cúbicos respectivamente. Estos representan excedencias del 14%, 19% y 12% a los volúmenes disponibles para un riego sustentable.

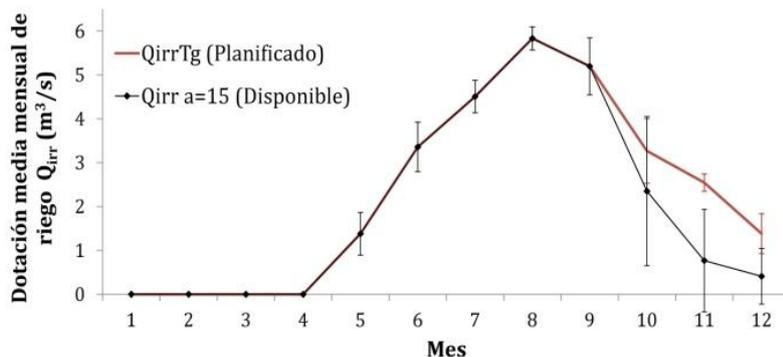


Figura 5. Demandas medias mensuales de riego desde embalse A, con sus respectivas variabilidades.

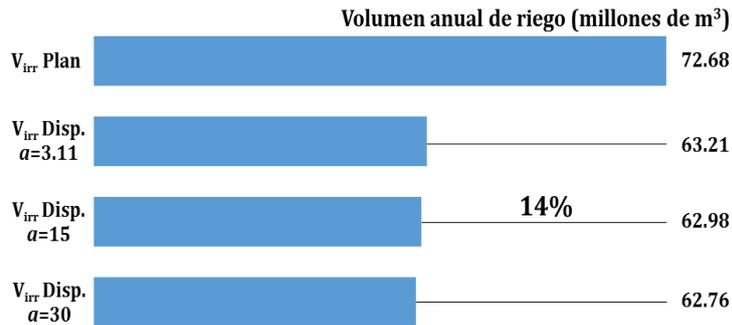


Figura 6. Volumen anual de riego desde embalse A. Primera barra es el volumen del proyecto. Posteriores barras representan volúmenes de disponibles para riego sustentable, simulados con diferentes valores del parámetro a .

Niveles de agua de embalses y períodos de retorno de niveles mínimos

La Fig. 7 presenta los niveles medios diarios de agua resultantes de la modelación del embalse A; además se presenta su variabilidad, la misma que condensa los niveles a lo largo de los 42 años simulados. Resultados similares presentan los otros dos embalses simulados, con las siguientes peculiaridades: el embalse A, en promedio, se llenó a capacidad máxima cada año en marzo. El embalse C, alcanzó capacidad máxima en la primera semana de abril con una mayor variabilidad que A. Mientras que en el embalse B se logró máxima capacidad entre abril y la segunda semana de mayo; sin embargo existieron algunos años simulados en los que no se llenó este embalse.

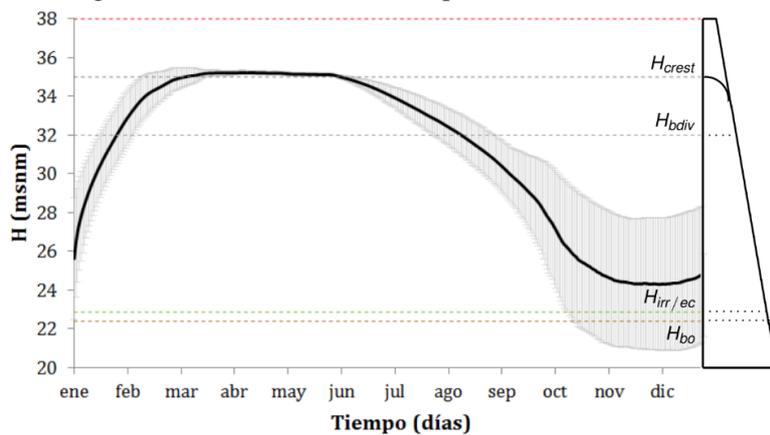


Figura 7. Niveles de medios diarios de agua en el embalse A y banda de variabilidad. También se presentan las cinco zonas del embalse.

El óptimo límite $H_{irr/ec}$ fue seleccionado del análisis del período de retorno de los mínimos niveles anuales del embalse. El nivel $H_{irr/ec}$ tiene un período de retorno corto, cada dos años el embalse alcanza éste nivel, lo cual representa restricciones temporales en riego. Se pudo observar que el mes más crítico de operación es en noviembre.

Los caudales ecológicos se pueden regular desde los embalses hasta que el nivel de agua iguale el nivel de la descarga de fondo H_{bo} . Las estrategias de operación de los embalses, resultantes de la modelación y del análisis de valores extremos, indican que el nivel del embalse A igualará el nivel de la descarga de fondo H_{bo} : una vez en 80 años; en el caso del embalse B esto sucederá una vez en 10 años, y en el embalse C: una vez en 120 años².

² Estos períodos de retorno corresponden a las modelaciones corridas con los valores de parámetros $a=15$, $b=60$ and $c=15$.

5. DISCUSIÓN

5.1. Análisis de los resultados de la simulación río/embalse

La importancia de simular la operación del embalse por un período largo de datos históricos hidrometeorológicos se aprecia en la Fig. 7, dado que si uno observa el nivel medio del embalse, éste siempre se encuentra sobre el nivel $H_{irr/ec}$, es decir se supondría una continua dotación de riego. Sin embargo la variabilidad de las condiciones climáticas en tiempo, indican que se deben tomar medidas ya que cada dos años el nivel de agua desciende del nivel $H_{irr/ec}$, significando restricciones temporales de riego.

La operación de los embalses fue optimizada, de tal forma que los límites de los caudales trasvasados permitieron llenar el embalse B sin afectar otros flujos descargados de A mientras H_A estuvo sobre el nivel del fondo del canal de trasvase pero debajo de la cresta del vertedero. Además, cuando H_A estuvo sobre la cresta del vertedero, se permitió el trasvase de mayores caudales a B, de ésta forma se optimizó el uso del agua dentro del sistema en lugar de evacuar los excesos a C. Los límites fijados de caudales, permitieron mantener niveles de agua correctamente operables en embalse A.

Los tres embalses logran su máxima capacidad de almacenamiento entre abril y mayo. Sin embargo, estos volúmenes no son suficientes para cubrir la demanda de riego durante la época seca. La operación de los embalses se optimizó con diferentes valores de los parámetros a , b y c en orden de maximizar el riego de una manera sustentable; pero no se logró igualar la demanda original del proyecto. Un déficit existió en promedio desde el comienzo de septiembre, siendo noviembre el mes más crítico para la operación (Fig. 5).

El límite $H_{irr/ec}$ aseguró las descargas de los caudales ecológicos de cada embalse durante la estación seca y acorde con los períodos de retorno mencionados en los resultados. Pese a que los niveles de agua de los embalses descendieron de $H_{irr/ec}$ casi cada año, esto sucedió pocos días a lo largo del año, usualmente durante el mes más crítico: Noviembre. Las curvas de duración de niveles de agua mostraron que los límites seleccionados $H_{irr/ec}$ fueron excedidos en un 80% del total días simulados en los 42 años.

Los volúmenes de riego anuales fueron sensitivos a los límites $H_{irr/ec}$ probados con los diferentes valores de los parámetros a , b y c . Sin embargo, las diferencias entre los volúmenes anuales resultantes fueron significativamente menores a la diferencia con respecto al volumen de riego del Proyecto (Fig. 6). Este último volumen excede con un 16% el óptimo volumen para riego sustentable del sistema en general. Se determinó que los volúmenes anuales de agua disponibles para riego desde los embalses A, B, y C son 62.9, 144.8, y 58.7 millones de metros cúbicos respectivamente.

5.2. Ventajas y limitaciones del modelo

La optimización de la operación de embalses desarrollada mediante parametrización del sistema con un parámetro por embalse y dos por canal de trasvase puede resultar más simple y práctica que los modelos de optimización descritos por Labadie (2004). El presente modelo fija zonas de almacenamiento para los usos de agua del embalse, en el presente caso riego, y determina una zona de seguridad para la descarga de caudales ecológicos durante eventos de sequía. El modelamiento hidrológico está combinado con análisis estadísticos, por lo que se requiere simulaciones de periodos largos de datos y análisis de frecuencia de los niveles en condiciones climáticas extremas. La estructura del modelo permite realizar las largas simulaciones de series de datos en cortos tiempos computacionales.

La optimización de los valores de los parámetros se realizó en el presente estudio mediante un proceso de prueba y error. Este proceso de optimización se podría realizar con métodos más automatizados como algoritmos genéticos (Lerma *et al.*, 2013) o análisis Monte Carlo (Rossi *et al.*, 2011).

El modelo desarrollado puede ser generalizado para la operación de embalses de un sólo uso de agua (e.g. generación hidroeléctrica). Para la aplicación en proyectos multipropósito se debería tener cuidado con la sobre parametrización del modelo que impida su optimización.

Los tiempos de tránsito del flujo en el río y en los canales de trasvase fueron asignados después de un estudio de la respuesta del sistema. Un modelamiento del tránsito hidrodinámico del flujo no fue incorporado al modelo, i.e. resolviendo las ecuaciones de Saint-Venant, ya que esto incrementa drásticamente los tiempos de computación, no permitiendo modelar un periodo largo de datos como el que se realizó. Las asunciones del tiempo de tránsito de A a C, y desde B a C en los ríos Macul y Maculillo respectivamente se basaron en la diferencia del tiempo en la que el caudal pico ocurre entre la estación H352 y la estación H353 ubicadas en el río Macul. Se determinó que el tiempo de tránsito es un paso de tiempo = 1 día.

Los flujos trasvasados de embalse A a B fueron determinados mediante los perfiles del flujo gradualmente variado. Su tiempo de tránsito se asumió menor a un paso de tiempo, ya que la longitud total del canal es 1.5 km, la pendiente es moderada, y el material es concreto. Por lo que todos los flujos trasvasados, independiente de su magnitud, arribaran al embalse B en menos de un día.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación plantea estrategias de operación de embalses y cuantifica el volumen de agua disponible para riego en cada embalse mediante modelización del flujo a través de los embalses y optimización de la distribución del recurso hídrico. Los resultados indican que el volumen de riego anual del Proyecto excede en un 16% el volumen anual de agua disponible en los embalses para un riego sustentable.

Con la finalidad de recomendar soluciones para solventar el déficit en volumen almacenado para riego se plantean algunas alternativas: un recorte en el riego, es la primera solución; sin embargo no es la más deseada ya que esto generaría un impacto económico-social en los beneficiarios. Por lo que, dos prácticas líneas de acción son sugeridas para alcanzar las demandas aspiradas del proyecto:

- El déficit en los volúmenes de riego es solventado incrementando la elevación de la cresta del vertedero en 0.80 m, 1.27 m, y 0.50 m en los embalses A, B, y C respectivamente. Este representa un incremento de 730 ha de tierras inundadas. Es bueno recordar que el proyecto se encuentra todavía en una etapa de diseño. La factibilidad de ésta sugerencia dependerá de la viabilidad económica, y de un análisis del uso de las tierras a los alrededores del embalse.
- Una segunda solución es diseñar un calendario y normativas de riego deficitario. Riego deficitario significa someter a los cultivos a períodos de estrés de agua durante la etapa de crecimiento, de tal forma que por su tamaño desarrollado requerirán menor consumo de agua durante la etapa de florecimiento y maduración del fruto. La producción obtenida con esta técnica es ligeramente menor a la obtenida con riego completo, por lo que la eficiencia agua/producción es mayor. El diseño del calendario de riego deficitario puede ser asistido con el programa AquaCrop (Geerts *et al.*, 2010).

El modelo río/embalse construido puede ser generalizado para cualquier sistema de embalses de un sólo uso de agua. Además, la integración con los modelos auxiliares para el llenado de información hidro-meteorológica faltante; convierten al modelo en una herramienta de soporte para la planificación de proyectos integrales de manejo de agua.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias al soporte financiero de una beca VLIR para los estudios de postgrado y del SENESCYT para investigación. Los autores expresan su agradecimiento a PROMAS, Universidad de Cuenca, por haber dotado todas las facilidades para el desarrollo de la investigación; en especial gracias a P. Cisneros por su apoyo en el área agrícola, a E. Tacuri y B. Stoop por su apoyo con la información SIG. Gracias a V. Tobar y Dr. Arias Hidalgo por su apoyo brindado con la

información hidro-meteorológica; y gracias a G. Alvarado, y M. Celi, quienes contribuyeron activamente con la recolección de información.

BIBLIOGRAFÍA

- Afshar, A., M.A. Mariño, A. Abrishamchi, 1991. Reservoir planning for irrigation district. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 117(1), 74-85.
- Al-Ansari, N., M. Ezz-Aldeen, S. Knutsson, S. Zakaria, 2013. Water harvesting and reservoir optimization in selected areas of South Sinjar Mountain, Iraq. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(12), 1607-1616.
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.
- Amir, I., F. Fisher, 1999. Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model. *Agricultural Systems*, 61, 45-56.
- Cai, X., D.C. McKinney, M.W. Rosegrant, 2003. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. *Agricultural Systems*, 76(3), 1043-1066.
- Chow, V.T., D. Maidment, L. Mays, 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Fenton, J. D., 1992. Reservoir routing. *Hydrological Sciences Journal*, 37(3), 233-246.
- Fiorentini, M., S. Orlandini, 2013. Robust numerical solution of the reservoir routing equation. *Advances in Water Resources*, 59, 123-132.
- Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management*, 98(1), 213-216.
- IGM, 2011. Base escala 1:50000. Instituto Geográfico Militar. Disponible en <http://www.geoportaligm.gob.ec>.
- INEC, 2010. Resultados del censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador. Fascículo Provincia Los Ríos. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Quito, Ecuador. Disponible en <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>.
- Kumar, D.N., K.S. Raju, B. Ashok, 2006. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(2), 123-129.
- Labadie, J.W., 2004. Optimal operation of multi-reservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130, 93-111.
- Lerma, N., J. Paredes-Arquiola, J. Andreu, A. Solera, 2013. Development of operating rules for a complex multi-reservoir system by coupling genetic algorithms and network optimization. *Hydrological Sciences Journal*, 58(4), 797-812.
- Loucks, D.P., E. van Beek, J.R. Stedinger, J.P. Dijkman, M.T. Villars, 2005. Water resources systems planning and management an introduction to methods models and applications. Paris: UNESCO. Disponible en <http://hdl.handle.net/1813/2804>.
- Matrosov, E.S., J.J. Harou, D.P. Loucks, 2011. A computationally efficient open-source water resource system simulator - Application to London and the Thames Basin. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1599-1610.
- Micklin, P., 2010. The past, present, and future Aral Sea. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 15(3), 193-213.
- PLR, 2013. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial*. Reporte Técnico, Prefectura de los Ríos, Ecuador.
- PROMAS, 2014. *Plan de aprovechamiento y control del agua en la Provincia de los Ríos. (PACALORI) - Estudio de factibilidad*. Reporte Técnico, Universidad de Cuenca, Programa Para el Manejo del Agua y Suelo (PROMAS), No Publicado.

- Rani, D., M.M. Moreira, 2009. Simulation-Optimization Modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management*, 24(6), 1107-1138.
- Rossi, G., E. Caporali, L. Garrote, 2011. Definition of risk indicators for reservoirs management optimization. *Water Resources Management*, 26(4), 981-996.
- Willems, P., 2014. Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes. Part 1: Step-wise model-structure identification and calibration approach. *Journal of Hydrology*, 510, 578-590.
- Withers, B., S. Vipond, 1980. *Irrigation: design and practice* (2nd ed.). Cornell University Press, New York.
- Wurbs, R.A., 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *Water Resources Planning and Management*, 119(4), 455-472.
- Wurbs, R.A., 2005. *Comparative evaluation of generalized river/reservoir system models*. Technical Report 282, Texas Water Resources Institute, TX.
- Wurbs, R.A., 2012. Reservoir/river system management models. *Texas Water Journal*, 3(1), 26-41.
- Yeh, W., 1985. Reservoir management and operations models: A state of the art review. *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.