

# ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE TIEMPO Y DEMANDA A NIVEL DIARIO PARA LA SIMULACIÓN DEL EMBALSE HUACATA, APLICANDO HEC RESSIM

## SCENARIO ANALYSIS ABOUT TIME AND DEMAND ON A DAILY BASIS FOR THE SIMULATION OF HUACATA RESERVOIR, IMPLEMENTING HEC RESSIM

Sánchez Flores Karina Mariela<sup>1</sup> y Perales Avilés Moisés<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Investigadora Junior, <sup>2</sup>Docente – Investigador, <sup>3</sup>Laboratorio de Hidráulica e Hidrología. Centro de Investigación del Agua – Facultad de Ciencias y Tecnología. Estudiante del Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” – Tarija – Bolivia.

**Dirección de Correspondencia:** Laboratorio de Hidráulica e Hidrología. Centro de Investigación del Agua – Facultad de Ciencias y Tecnología. Zona El Tejar.

**Correo Electrónico:** moisesperales@uajms.edu.bo

### RESUMEN

El embalse Huacata prevé suministrar agua potable a las ciudades de Tarija y San Lorenzo y algunas poblaciones menores del norte del Valle Central de Tarija, además generar energía eléctrica y permitir el riego de importantes áreas agrícolas de las comunidades de Corana, Canasmoro y Carachimayo. Actualmente solo está funcionando el componente riego de forma parcial, los componentes de agua potable y energía hidroeléctrica están en la etapa de preinversión.

Es por este motivo importante realizar un análisis de simulación del embalse a paso de tiempo diario para diferentes escenarios de tiempo y demanda que nos permita generar una adecuada gestión del agua, considerando la incorporación de los otros dos componentes de la demanda.

Se analizaron 3 tipos de demanda:

1. Agua Potable (260 l/s), central hidroeléctrica (1400 l/s) y Riego (600 l/s)
2. Riego y agua potable (860 l/s)
3. Riego (600 l/s)

Para cada una de las demandas se analizaron 3 escenarios de oferta: Año seco, año normal y año húmedo, generando caudales diarios con el método de Thornthwaite y Matter.

Concluyéndose que el caudal requerido para el componente hidroeléctrico genera un vaciado del embalse en 3 meses satisfaciendo la demanda solo un 65%, en el caso de la demanda de riego y abastecimiento de agua potable (860 l/s) se satisface la demanda al 100% para los 3 escenarios planteados, aunque al presentarse un año seco el embalse tiene dificultades para volverse a llenar, finalmente al considerar solo la demanda de riego (600 l/s) también se cubre la demanda en su totalidad para los tres escenarios.

### PALABRAS CLAVE

Embalse multipropósito, operación, modelo de simulación, balance hídrico, gestión óptima.

### ABSTRACT

Huacata reservoir was built to supply drinking water to the cities of Tarija and San Lorenzo and some smaller towns in the northern Central Valley of Tarija, as well as generating electricity and allowing the irrigation of important agricultural areas of Corana, Canasmoro, and Carachimayo communities. However, at present, only the irrigation component is working partially, the components of drinking water and hydroelectric energy are in the preinvestment stage.

Therefore, it is important to carry out a reservoir simulation analysis on a daily basis for different time and demand scenarios. It will enable us to generate an adequate water resources management, considering the incorporation of the other two components of the demand.

Three types of demand were analyzed:

1. Drinking Water (260 L / S), hydroelectric power station (1400 L / S) and Irrigation (600 L/S)
2. Irrigation and drinking water (860 L/S)
3. Irrigation (600 L/S)

For each demand, three scenarios were analyzed: Dry year, normal year and wet year. Thus, it was generated daily flow rate by using the Throthwaite and Matter method.

It concluded that the flow rate required for the hydroelectric component generates a discharge of the reservoir in 3 months satisfying the demand only 65%. In the case of irrigation and drinking water supply demand (860 L / S) the 100% is satisfied for the 3 proposed scenarios; although at the time of a dry year the reservoir has difficulties to be refilled. Finally considering only the irrigation demand (600 L / S), it is also covered entirely for the three scenarios.

## KEYWORDS

Multipurpose reservoir, operation, simulation model, water balance, optimal management

## INTRODUCCIÓN

La importancia de las presas en la economía boliviana es decisiva en la agricultura bajo riego, ya que proveen agua de un modo seguro, permitiendo la planificación de la producción. Las presas son también una importante fuente proveedora de los servicios de agua potable, un uso no menos importante, es el de generación de energía hidroeléctrica, aún poco aprovechado, y que representa un gran potencial para nuestro país.

Debido a la importancia del agua embalsada para el desarrollo regional está en ejecución por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Agua el Programa de "Monitoreo y Gestión Óptima de Embalses" donde se pretende implementar un sistema de monitoreo hídrico en 9 embalses del país de manera que sea posible optimizar el uso del agua con fines de riego. Este

programa está estructurado en dos fases diferenciadas: la primera fase de monitoreo hídrico de embalses y la segunda enfocada en una gestión óptima de embalses.

Mediante esta intervención en embalses piloto se pretende dar solución al problema identificado en el uso del agua de los embalses en la mayoría de los sistemas de riego con presas en Bolivia, ya que estos no responden a una tendencia hacia el uso óptimo, debido a que son operados sin criterios técnicos basados en mediciones que permita optimizar la gestión hídrica del embalse.

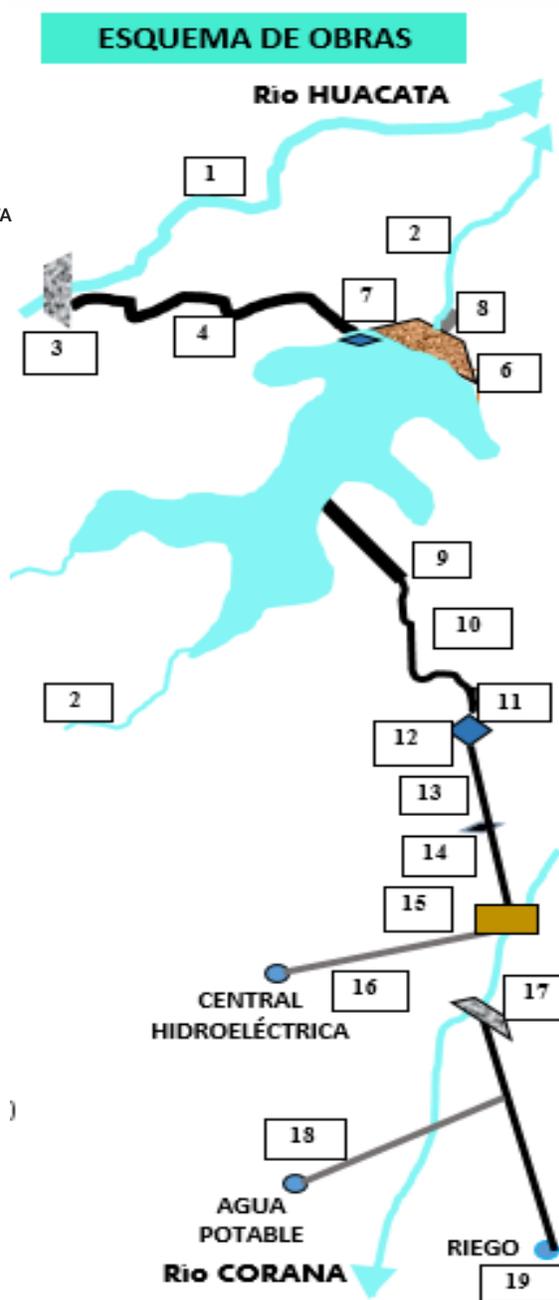
Actualmente, en un contexto donde el agua es un recurso hídrico limitado y muy requerido ante un escenario de cambio climático, el manejo que se viene realizando de los embalses en el país no es congruente con una política de aprovechamiento racional de los recursos hídricos. Dos de los nueve embalses monitoreados están ubicados en el departamento de Tarija, estos son la presa Caigua en el Municipio de Villamontes y la Presa Huacata en el Municipio de San Lorenzo, por lo tanto, a partir de abril del 2017 se cuenta con datos de los niveles del embalse Huacata a nivel diario.

El embalse Huacata es de uso múltiple, trasvasa las aguas de la cuenca del río Huacata perteneciente a la cuenca del río Pilcomayo a la cuenca alta del río Guadalquivir perteneciente a la cuenca del río Tarija, de allí la necesidad de desarrollar un buen plan de operación del embalse, para lo cual, se vuelve imprescindible realizar simulaciones con la operación de los componentes, bajo diferentes alternativas hidrológicas y de demanda, lo que permitirá una visualización más clara del comportamiento, efectos y decisiones a tomar a largo y corto plazo para el mejor aprovechamiento y uso de las aguas embalsadas.

La necesidad de una gestión adecuada de los recursos hídricos se hace cada vez más urgente ya que la disponibilidad está disminuyendo debido al crecimiento de la población, al cambio climático, a la contaminación, y al rápido incremento de la demanda para regadío, agua potable, recreación, energía eléctrica, entre otros.

Figura 1. Esquema hidráulico de los componentes del proyecto embalse Huacata

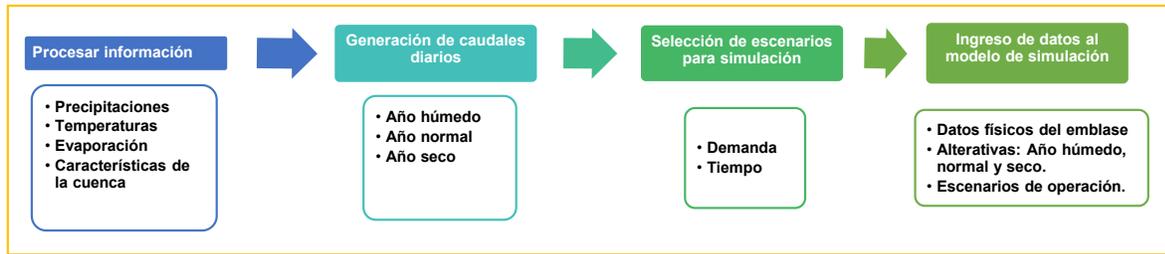
1. CUENCA DE APORTE INDIRECTO.
    - Río Huacata: Área: 48,80 km<sup>2</sup>
    - Avenida 100 años: 186 m<sup>3</sup>/s
  2. CUENCA DE APORTE DIRECTO.
    - Río Casa Cancha: Área: 13,1 km<sup>2</sup>
    - Avenida 100 años: 46,30 m<sup>3</sup>/s.
- OBRAS COMPONENTES DE LA PRESA HUACATA**
3. PRESA DE DERIVACIÓN RÍO HUACATA.
    - Tipo: Hormigón ciclópeo.
    - Caudal de derivación: 0,80 m<sup>3</sup>/s.
  4. CANAL DE DERIVACIÓN.
    - Caudal de vertido: 0,80 m<sup>3</sup>/s.
  5. EMBALSE: Área: 1,54km<sup>2</sup>
    - Volumen útil: 10,868,750 m<sup>3</sup>
  6. PRESA:
    - Tipo: Escollera con pantalla de hormigón.
    - Alto: 24m, Longitud: 415m
  7. ALIVIADERO:
    - Caudal de vertido: 16,69 m<sup>3</sup>/s.
  8. DESAGÜE DE FONDO:
    - Caudal medio con NAN: 16,29 m<sup>3</sup>/s.
  9. TÚNEL DE TRAVASE (TOMA).
    - Caudal de Diseño: 1,40 m<sup>3</sup>/s.
  10. CANAL DE ADUCCIÓN.
    - Caudal: 1,40 m<sup>3</sup>/s
  11. SIFÓN.
    - Caudal: 1,40 m<sup>3</sup>/s
  12. CÁMARA DE CARGA.
    - Caudal de vertido: 1,40 m<sup>3</sup>/s.
  13. TUBERÍA DE BAJA PRESIÓN.
    - Caudal: 1,40 m<sup>3</sup>/s.
  14. TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN.
    - Caudal: 1,40 m<sup>3</sup>/s
  15. CASA DE MÁQUINAS
- RED DE CONDUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN**
16. TUBERÍA FORZADA; Energía Eléctrica
    - Caudal: 1,40 m<sup>3</sup>/s
  17. PRESA DE DERIVACIÓN EN EL RÍO CORANA. (RIEGO)
    - Caudal: 0,86 m<sup>3</sup>/s.
  18. TUBERÍA PRFV (AGUA POTABLE)
    - Caudal: 0,26 m<sup>3</sup>/s.
  19. CANAL DE RIEGO.
    - Caudal de inicio: 0,86 m<sup>3</sup>/s.
    - Caudal final: 0,479 m<sup>3</sup>/s.



La situación actual de algunas regiones de Bolivia debido a la crisis por la disponibilidad de un recurso hídrico limitado y la necesidad de realizar un proceso de planificación frente a fenómenos extremos de variabilidad climática e implementar estrategias sostenibles del uso eficiente del agua se hace un tema cada vez más importante para planificar un buen uso del recurso en el país.

Así mismo para el caso del embalse Huacata que se analizó en el presente estudio, considerando que su función es múltiple, es necesario conocer el comportamiento de la disponibilidad hídrica tanto actual como para diferentes escenarios críticos, años de sequía extrema y años lluviosos, ya que para estos escenarios extremos es posible que los volúmenes de agua del embalse no sean los requeridos.

Figura 2. Esquema de trabajo



## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el análisis de diferentes escenarios de tiempo y de demanda, para la simulación de la operación del embalse Huacata a paso de tiempo diario, adicionalmente se realizó un estudio de la oferta de agua a nivel diario de la cuenca Casa Cancha para tres probabilidades de no excedencia (80%, 50% y 35%) utilizando el método de balance hídrico de Thornthwaite Mather, para analizar el comportamiento de los niveles del embalse tomando en cuenta diferentes alternativas de demanda considerando los componentes, riego, agua potable y generación hidroeléctrica.

Una herramienta de ayuda para el análisis del comportamiento de embalses son los modelos de simulación que se apoyan en el análisis de diferentes escenarios.

Hec ResSim es un modelo de simulación de embalses que ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, para ayudar a predecir el comportamiento de un embalse y de acuerdo a esto determinar las salidas de agua durante la operación del día a día del mismo. Es un modelo que representa el comportamiento físico de sistemas de almacenamientos grandes y pequeños.

Este software libre es una alternativa muy útil para el estudio de la operación de reservorios, tanto como una herramienta de investigación, operación y un soporte para la toma de decisiones a tiempo real.

### Nociones generales sobre embalses

La fuente superficial de agua en lo posible debe satisfacer la demanda a lo largo del año, pero existe una distribución no uniforme de los caudales lo que impide

satisfacer de manera segura demandas como ser la producción hidroeléctrica y prevención de inundaciones y/u otros, por esta razón para asegurar la dotación de agua es necesario generar una barrera artificial, llamada presa o dique. A la masa de agua retenida por la presa se le denomina embalse. Los embalses deben ser capaces de almacenar en la época de lluvia agua suficiente para compensar el déficit que se producen en épocas de sequía y adicionalmente almacenar agua de años de producción pluvial abundante.

### BALANCE HÍDRICO

El Balance Hidrológico relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento superficial y subterráneo y flujo de agua subterránea. Se aplica cuando se realiza una distribución de los recursos hidráulicos a nivel global, o en cuencas particulares. Es imprescindible en los estudios de regulación de embalses y en los proyectos de suministro de agua para consumo humano, riego y generación hidroeléctrica.

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad.

Ésta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Variación del almacenamiento}$$

A continuación se presentan las entradas y salidas de agua, para el balance hídrico de un embalse según Aparicio Mijares (1989):

## Entradas al embalse

### a) Entradas por cuenca propia (Ecp)

Son los volúmenes de escurrimiento superficial generados en la cuenca no controlada que descarga directamente al embalse, que está delimitada por el sitio de la boquilla (donde se localiza la cortina).

### b) Entradas por transferencia de otras cuencas (Et)

Estas entradas provienen de las descargas, libres o controladas, de presas situadas aguas arriba de la presa en cuestión o en otras cuencas.

### c) Entradas por lluvia directa sobre el embalse (EII)

Los aparatos que registran la cantidad de lluvia que cae lo hacen en forma de volumen por unidad de área; es decir como altura de precipitación. El volumen de lluvia que cae directamente sobre el embalse será entonces esa altura de precipitación  $h_p$  multiplicada por el área que tenga la superficie libre del vaso, en promedio, durante el  $\Delta t$  usado en el cálculo. El área se determina por medio de la curva elevaciones - áreas del embalse.

## Salidas del embalse

### 1. Volumen extraído para satisfacer la demanda (Sd)

Está constituido por las demandas bajo análisis; la cual depende, por un lado, del tipo de aprovechamiento de que se trate: agua potable, riego, generación de energía eléctrica, etc.

### 1. Volumen evaporado (Se)

De la misma manera que la precipitación, la evaporación se mide en lámina o altura (volumen/unidad de área). Si se tienen evaporímetros cerca del embalse, la evaporación registrada se corrige y, por lo tanto, el volumen de evaporación se calcula de manera similar al de lluvia directa sobre el vaso multiplicando la lámina promedio evaporación por el área media del vaso durante el  $\Delta t$ .

### 1. Volumen infiltrado en el embalse (Si)

Este volumen es difícil de medir. Afortunadamente, en general, es muy pequeño; si se estima lo contrario, entonces será necesario realizar un estudio geológico detallado del vaso que proporcione los elementos para su cálculo.

### 1. Volumen derramado (Sde)

El volumen de agua que sale por la obra de excedencias es resultado de la simulación y depende de los niveles característicos y de la política de operación de las compuertas que se defina para cada opción.

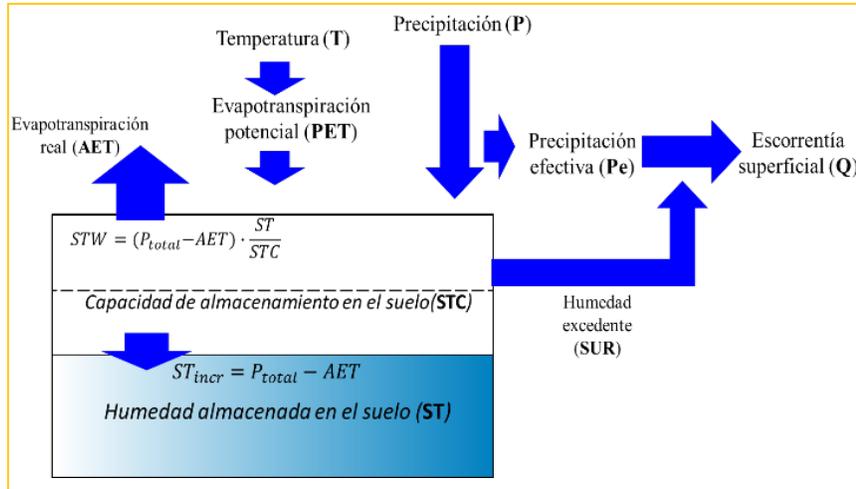
## ESTIMACIÓN DE CAUDALES CONTINUOS DE ENTRADA AL EMBALSE

### Modelo de balance hídrico

El modelo de balance hídrico a utilizarse es Thornthwaite - Mather (Thornthwaite, 1948; Mather, 1978, 1979; McCabe and Wolock, 1999; Wolock and McCabe, 1999). Este modelo consiste en una representación de la cuenca como un sistema agregado, que funciona bajo la interacción de la precipitación (P) como flujo de entrada, toma la temperatura (T) como parámetro representativo que puede estimar la evapotranspiración potencial (PET) y realiza el balance en el suelo considerando características de retención de humedad a través de una combinación entre el método de Numero de Curva (CN) de la NRCS (U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2015) y capacidad de almacenamiento de acuerdo a las características del tipo y cobertura de suelo.

Las variables de ingreso al modelo son: la capacidad de almacenamiento en el suelo (STC), las características de la cobertura y el tipo de suelo por medio del Número de Curva (CN), la precipitación (P) en el paso de tiempo a realizar el balance (diario o mensual, según la disponibilidad de información), temperatura media (T), y el área de la cuenca para estimar volúmenes totales en el balance (A).

Figura 3. Esquema de balance según modelo Thornthwaite



La precipitación P, una vez que llega a la superficie es dividida en dos cantidades, una infiltra (abstracción del suelo) y la otra escurre como precipitación efectiva Pe. El valor de Pe depende de CN, con el que se estima la capacidad de retención de humedad del suelo S, la NRCS, ha fijado que para que suceda escurrimiento efectivo, P tiene que exceder el 20% de S; caso contrario, toda el agua infiltra y se pierde como humedad en el suelo.

La humedad ganada con la precipitación es adicionada a la humedad de suelo antecedente ST. Una vez que se consolida la humedad total en el suelo, una parte de la misma es emitida a la atmósfera como evapotranspiración real (AET). Cuando la abstracción por el suelo es mayor a PET, AET es equivalente a PET, y el excedente es derivado al suelo (ST<sub>incr</sub>); caso contrario, es la suma de la abstracción más una cierta cantidad que puede ser extraída de la humedad antecedente denominada humedad disponible a enviar a la atmósfera (STW). STW varía de forma lineal con la cantidad de humedad como fracción de la relación entre ST en el periodo de evaluación y STC. Cuando se llega al caso en el que ST excede a STC, el exceso (SUR) es derivado a la superficie y eventualmente es convertido en escurrimiento superficial en una fracción (r) para el paso de tiempo evaluado, y lo restante es retenido para un paso de tiempo posterior.

### Calibración y validación del modelo

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y modelados, existe una serie de indicadores de carácter estadístico, dentro de los que se encuentra el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) ecuación 1 y el sesgo BIAS o desviación relativa de los caudales, ver ecuación 2.

$$Nash = 1 - \frac{\sum(Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum(Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $Q_{sim_i}$  es el caudal simulado en el mes  $i$ ,  $Q_{obs_i}$  es el caudal observado en  $i$ , y  $\bar{Q}_{obs}$  es el promedio de los caudales observados en el período de análisis. En lo referente al sesgo, se tiene:

$$Bias = 100 * \frac{\sum(Q_{sim_i} - Q_{obs_i})}{\sum(Q_{obs_i})} \quad \text{Ec. 2}$$

Es preciso señalar que el criterio general para interpretar los estadísticos presentados es el siguiente:

- Coeficiente de Nash-Sutcliffe: valores cercanos a 1 indican una correspondencia entre los datos observados y generados.
- BIAS: entre menor el porcentaje de BIAS, mejor la correspondencia entre los datos observados y generados. Un BIAS positivo indica la sobre estimación y un BIAS negativo indica la subestimación de los caudales.

## MODELOS DE SIMULACIÓN

La disponibilidad de los recursos hídricos no solo depende de las aportaciones que cede el ciclo hidrológico, la construcción de infraestructura hidráulica, su operación y la planificación de los recursos hídricos es un factor determinante en la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades humanas.

La modernización de las actividades productivas ya no se reduce únicamente a la implementación de nuevas infraestructuras, sino también al uso de herramientas de gestión que permitan mejorar el uso del agua y su planificación hacia futuro.

La simulación del proceso de distribución de agua es una actividad compleja, ya que busca la optimización del balance entre la oferta y demanda de agua. En los últimos años se ha utilizado métodos sofisticados como el uso de software, los cuales han supuesto un avance muy importante para el estudio y gestión de los recursos hídricos.

## Ventajas de la simulación

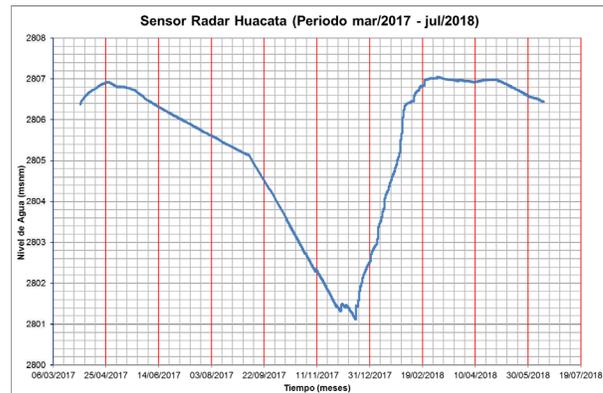
La simulación constituye una herramienta valiosa, es recomendable su uso en el planteamiento de la solución de problemas, por las siguientes ventajas que puede ofrecer:

- La simulación puede servir como una prueba de ensayo de nuevas políticas y reglas de decisión en la operación de un sistema, antes de tomar el riesgo de experimentar con el sistema real.
- No es posible acelerar o retardar un fenómeno natural, pero la simulación de dicho fenómeno si permite ejercer un control deseado del tiempo.
- La simulación permite conocer cuáles son las variables de mayor importancia cuando se trata de un sistema complejo, además de conocer el comportamiento de dicha variable en el sistema.
- La simulación puede emplearse en la experimentación de situaciones nuevas acerca de las cuales no se posee mucha información y de esa manera

nos permite estar preparados para alguna eventualidad.

- El proceso de simulación no tiene límite en cuanto a complejidad. Cuando la introducción de elementos estocásticos hace imposible un planteo analítico surge la modelización como único medio de enfrentar el problema. Todo sistema, por complejo que sea, puede ser modelado y sobre ese modelo es posible ensayar alternativas.

Figura 4. Datos medidos de los niveles del embalse Huacata.



## Principios del Software de simulación Hec ResSim

El HEC Reservoir System Simulation (HEC-ResSim) es un modelo de simulación de embalses que ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, para ayudar a predecir el comportamiento de un embalse y de acuerdo a esto determinar las salidas de agua durante la operación del día a día del mismo.

HEC-ResSim es único entre los modelos de simulación de embalses, pues ayuda a la toma de decisiones para un mejor funcionamiento de los reservorios (USACE, 2013). La naturaleza generalizada de HEC-ResSim, su esquema flexible para describir la operación de los embalses y sus nuevas y potentes características, hacen que sea aplicable para modelar casi cualquier sistema de almacenamiento de usos múltiples.

## ANÁLISIS DE SIMULACIÓN

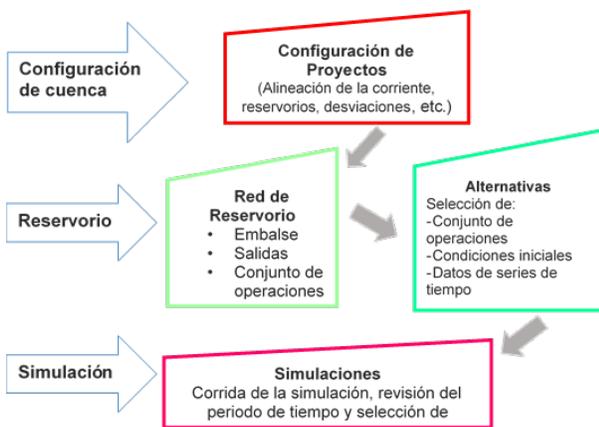
Los modelos de simulación usan entradas (hidrología), operaciones (reglas de decisión) y balance de masas

dentro de la cuenca (conectividad) para representar el comportamiento hidrológico de un sistema de embalses (Wondye, 2009).

El desarrollo del sistema implica seleccionar indicadores de flujo y/o almacenamiento, cuyos objetivos y características el modelador las considera importantes. Entre los indicadores se pueden incluir: niveles de almacenamiento del embalse, flujos de entrada a las corrientes, generación hidroeléctrica, riego, abastecimiento de agua, derivaciones.

Para una simulación, primero se ejecuta cálculos usando indicadores seleccionados para un caso base, representando así el comportamiento hidrológico existente del sistema. Posterior a ello, se desarrolla una serie de alternativas para analizar el comportamiento del sistema cambiando características del embalse como son: asignación de almacenamiento, reglas de operación, demandas, niveles, etc. y ejecuta cálculos para estas hipótesis. Por último, se compara los resultados de los casos base con los de las hipótesis planteadas. El objetivo del trabajo de simulación consiste en la formulación de varias alternativas que deber ser ejecutadas y sus resultados comparados y explicados.

Figura 5. Módulos que componen HEC-ResSim



Cada módulo tiene un propósito único y se encuentra asociado a un conjunto de funciones accesibles a través de menús y barras de herramientas. La figura 5 ilustra

los elementos básicos de modelamiento disponibles en cada módulo.

### Módulo Watershed Setup

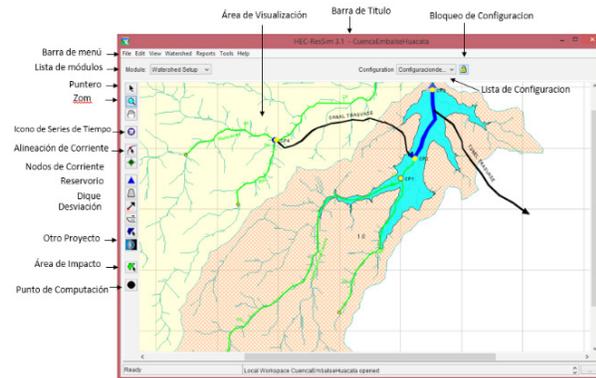
HEC-ResSim tiene tres conjuntos de funciones llamados módulos, los cuales proveen el acceso a directorios y datos específicos de la configuración en curso. Estos módulos son:

- Watershed Setup (Configuración de Cuencas)
- Reservoir Network (Red de Reservorios)
- Simulation (Simulación)

El objetivo del módulo de configuración de cuencas es proporcionar un marco común para la creación de las cuencas hidrográficas y la definición entre las diferentes aplicaciones de modelación.

En el módulo de configuración de cuencas, se configurará la disposición física de cuencas hidrográficas como: mapas de fondo, la corriente de alineación, proyectos y datos georreferenciados. Se define proyectos y puntos de computación asociados a configuraciones específicas en la cuenca, los proyectos pueden incluir embalses, diques, desvíos y otros proyectos. La ventana principal y los diferentes componentes para el módulo de configuración de cuencas se ilustran en la Figura 6.

Figura 6. Ventana principal del módulo de configuración de cuenca.



### Módulo Reservoir Network

El módulo de red de embalse representa una colección de elementos de cuencas conectadas por alcances de enrutamiento (ríos). Los elementos creados en el mó-

dulo de configuración de cuencas pertenecen a configuraciones específicas de las cuencas hidrográficas, y cuando se crea una red de embalse se hace referencia a una de esas configuraciones.

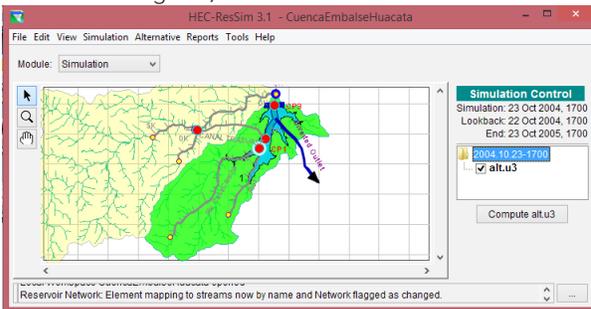
Los puntos de cálculo definidos en el módulo de configuración de cuencas se convierten automáticamente en los cruces en el módulo de la red de embalse. Su tarea principal en el desarrollo de una red de embalse es conectar los alcances de enrutamiento.

El módulo de la red de embalse proporciona las herramientas, como introducir y editar los datos físicos y de operaciones. A continuación, se presenta una breve descripción de los elementos más importantes del módulo Reservoir Network.

### Módulo Simulation

El módulo simulación (Figura 7) se ha diseñado para facilitar la fase de análisis del modelamiento del reservorio, en este se crean y corren simulaciones (USACE, Quick Start Guide Hec Res Sim, 2013). Por tanto, una vez que el modelo de embalse está completo y las alternativas han sido definidas, el módulo simulation se usa para configurar la simulación. Los cálculos son ejecutados y los resultados visualizados. En este módulo además de definir tiempos de simulación y condiciones iniciales, se seleccionan las alternativas e intervalos de cálculo.

Figura 7. Módulo Simulación



Para la simulación del funcionamiento se procesó información referente a precipitación media, temperatura de la cuenca, altura media, número de curva y se generó los caudales de aporte directo al embalse, los cuales fueron calibrados con datos de aforos de la cuenca vecina.

Las Figuras siguientes muestran los resultados de la información de la cuenca Casa Cancha.

Para el caso de la topografía en el área de estudio, se ha utilizado un modelo digital de elevación ALOS PAL-SAR con una resolución de 12.5 x 12.5 m. Para esta información se ha visto que el área de estudio tiene una variación altitudinal que va desde los 2814 msnm hasta los 3044 msnm. El modelo digital también ha sido utilizado para la delimitación de la cuenca (Figura 8), obteniendo un área de aporte de 13.116 km<sup>2</sup>, con el mismo se ha definido la red hídrica de la cuenca de aporte y la elevación media con ayuda del programa computacional ArcGis.

Figura 8. Delimitación de la cuenca de aporte al embalse Huacata.

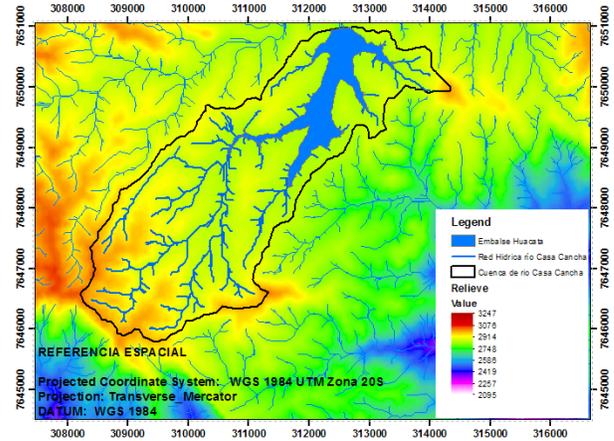
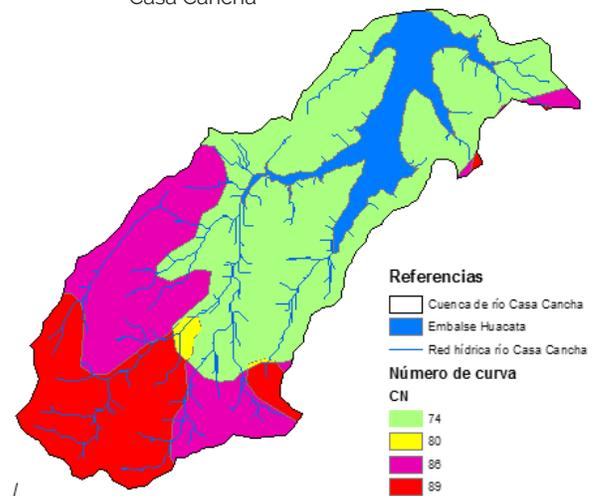
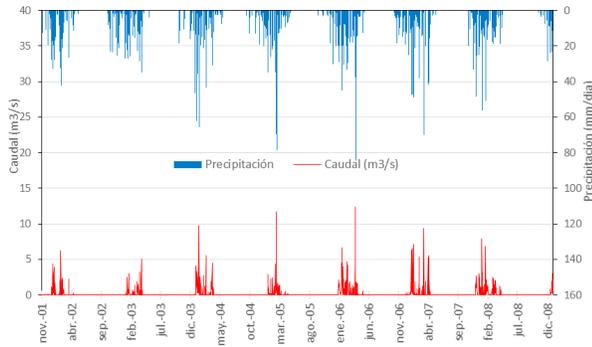


Figura 9. Distribución del número de curva en la cuenca Casa Cancha



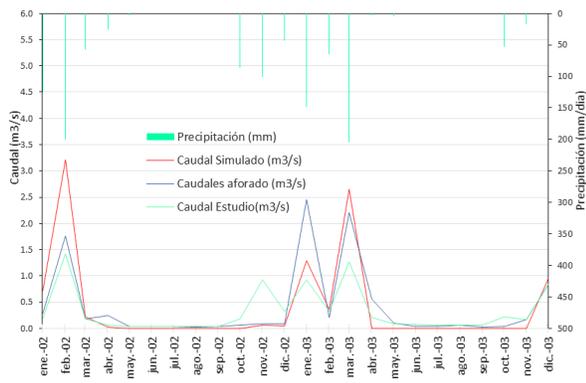
El modelo utilizado para la determinación de caudales fue calibrado con la cuenca del río Huacata, esta cuenta cuenta con aforos de 2 años (2002-2003), con lo cual se consiguió determinar los valores de los parámetros sujetos a ajuste del método, y con ello se determinaron los caudales en la cuenca Casa Cancha (Figura 10).

Figura 10. Precipitación y caudales diarios en la cuenca Casa Cancha 2001-2008.



Los indicadores estadísticos presentaron una buena correlación entre valores aforados y generados. Los resultados de los caudales también fueron comparados con los caudales del estudio del proyecto, lo cual se visualiza en la Figura 11.

Figura 11. Comparación de caudales y precipitación en la cuenca del río Huacata.



### Selección de escenarios de aporte

La simulación desde el periodo 2001 hasta el 2008, si bien no genera una muestra de los caudales de escurrimiento representativo, se decidió trabajar con estos valores, en este caso son resultado de trabajar con la estación más cercana al área de estudio, ya que las demás estaciones no presentaban las mismas características climáticas de la zona y estaban muy alejadas.

En base a esta información se realizó una clasificación de acuerdo a la probabilidad de no excedencia para caracterizar año húmedo, medio y seco (85, 50 y 30% de probabilidad de no excedencia), condiciones sobre las que se deberán generar escenarios para evaluar el funcionamiento del embalse en estudio. Una vez que la información fue procesada se procedió a la simulación del funcionamiento del embalse Huacata con los siguientes escenarios:

Tabla 1. Escenarios para simulación

Escenario	Demandas	Aporte directo al embalse	Características físicas del embalse
1	USO MÚLTIPLE Central Hidroeléctrica (1400 l/s) Agua Potable (260 l/s) Riego (600 l/s)	Año normal	Proyecto construido
2		Año húmedo	
3		Año seco	
4	USO RIEGO Y AGUA POTABLE (660 l/s)	Año normal	
5		Año húmedo	
6		Año seco	
7	SOLO USO PARA RIEGO (600 l/s)	Año normal	
8		Año húmedo	
9		Año seco	

## RESULTADOS

### Operación componente central hidroeléctrica, riego y agua potable

Tomando como referencia los datos de demandas del estudio a diseño final, para el componente de la central hidroeléctrica se definió una demanda constante de 1400 l/s a ser cubierta durante 5 meses, 153 días (1 de junio-31 de octubre), siendo en volumen requerido de 18.5 hm<sup>3</sup>.

Se procedió a simular el funcionamiento del embalse Huacata, para cada escenario (año normal, húmedo y seco). En la Figura 12 se representa el comportamiento del nivel, así mismo las entradas y salidas totales del embalse a lo largo del año; en la Figura 13 se presenta un desglose de las salidas tanto por descarga vía vertedero, caudal ecológico, demandas y pérdidas por evaporación.

### Escenario 1 - Año normal

Figura 12. Niveles - Entradas y salidas para el embalse Huacata - Escenario 1

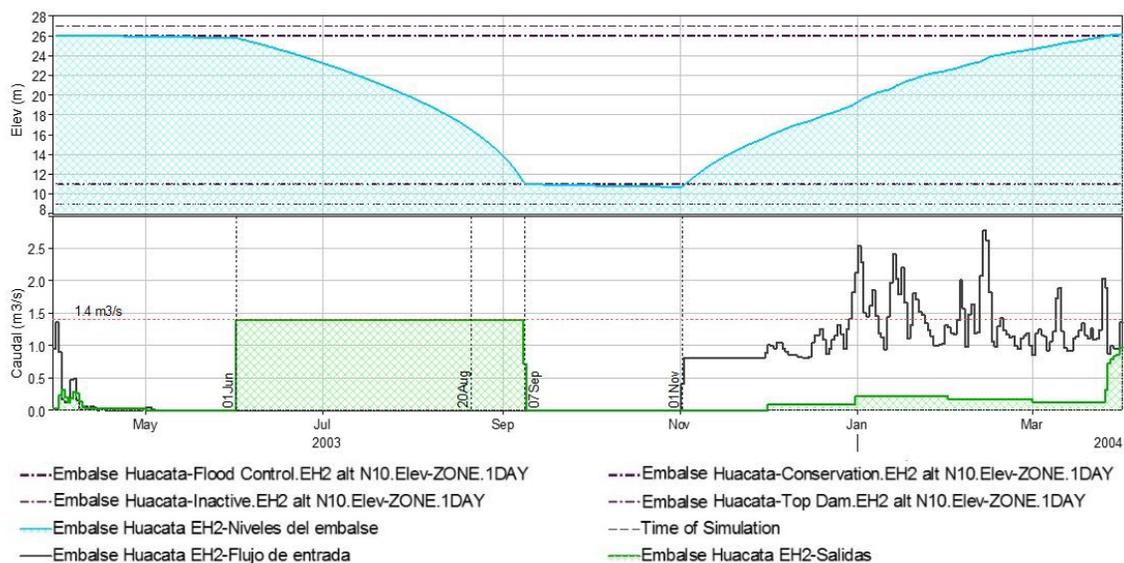
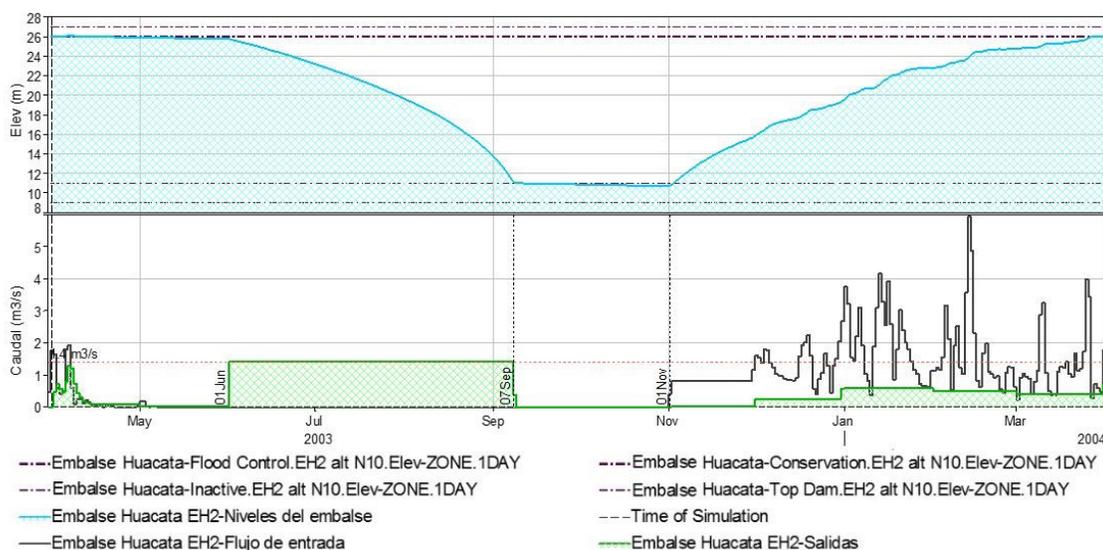


Figura 13. Salidas desde el embalse Huacata- Escenario 1



Analizando los resultados para el embalse construido se partió con una elevación de 26 m que es la altura de su nivel máximo de operación, en la figura 13 se puede observar que para este escenario se llega sólo a satisfacer la demanda hasta el 7 de septiembre siendo un volumen de 12.037 hm<sup>3</sup>, lo cual significa que se satisfará una potencia de 5,71 Mw, 1100 ha. de riego y se abastecerá de agua potable a 138,535 habitantes sólo durante 99 días, el 26 de marzo el embalse vuelve a llenarse, las descargas por el vertedero para este año suman un volumen total de 0.464 hm<sup>3</sup>.

En conclusión, para un año normal se satisface la demanda solo 3 meses y 7 días.

De esta manera y siguiendo los criterios antes mencionados se simuló la operación del embalse para los tres escenarios de oferta planteados (húmedo, promedio y seco), con diferentes demandas, un resumen se detalla a continuación:

### Resumen de los resultados de la simulación

En las Tablas 2 y 3 se muestran los resultados de las ca-

Tabla 2. Resumen de resultados de la simulación

Escenario	Demandas	Año	Demanda (l/s)	Demanda requerida (Hm3)	Volumenes anuales (Hm3)		Deficit de demanda (%)	Alcanza el nivel NAMO	Central	Agua potable	Riego	Días en que se cubre la demanda
					Demanda cubierta	Caudal excedente						
1	MULTIUSO Central Hidroeléctrica (1400 l/s) Agua Potable (260 l/s) Riego (600 l/s)	Año normal	1400	18.50	12.037	0.464	34.94	26-Mar	5.71	138535	1100	91
2		Año húmedo	1400	18.50	12.006	7.439	35.10	12-Feb	5.71	138535	1100	91
3		Año seco	1400	18.50	12.002	0.016	35.13	No se vuelve a llenar	5.71	138535	1100	91
4	USO RIEGO Y AGUA POTABLE (860 l/s)	Año normal	860	11.37	11.369	0.836	0.00	24-Mar		138535	1100	153 (5 meses)
5		Año húmedo	860	11.37	11.369	7.799	0.00	9-Feb		138535	1100	153 (5 meses)
6		Año seco	860	11.37	11.369	0.016	0.00	No se vuelve a llenar		138535	1100	153 (5 meses)
7	SÓLO USO PARA RIEGO (600 l/s)	Año normal	600	7.93	7.932	3.926	0.00	14-Feb			1100	153 (5 meses)
8		Año húmedo	600	7.93	7.932	10.934	0.00	20-Jan			1100	153 (5 meses)
9		Año seco	600	7.93	7.932	0.728	0.00	19-Mar			1100	153 (5 meses)

racterísticas del embalse Huacata durante la operación de cada escenario, considerando las demandas establecidas en el estudio a diseño final del proyecto.

El embalse no satisface la demanda cuando se trabaja con la central hidroeléctrica, pero cuando se deriva únicamente agua para agua potable y riego se cubre al 100% las 1100 ha. de riego y el abastecimiento para consumo de los 138.535 habitantes, solo al presentarse un año seco (escenario 6) el embalse no alcanza a llenarse al final del periodo simulado. Como último al considerar solamente la demanda de riego se satisface también la demanda al 100%, sin tener ningún problema en su llenado al final del año simulado.

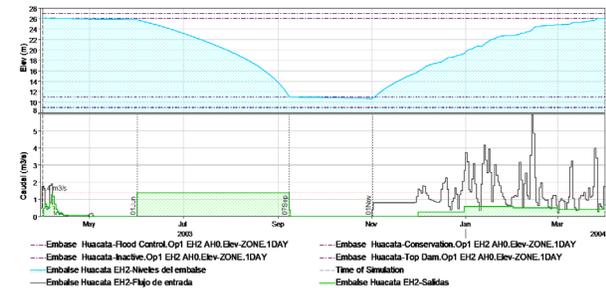
### Optimización de la entrada de caudal por el canal trasvase

En los escenarios anteriores se trabajó con un caudal constante de entrada por canal trasvase igual a 800 l/s durante 5 meses de la época lluviosa (152 días del 1 de noviembre al 31 marzo), adicionalmente se optimizó la operación del canal trasvase para los escenarios donde se producían mucho excedentes, evitando que se produzcan derrames en el embalse cuando se esté transfiriendo

caudal del aporte indirecto, lo cual como se vio anteriormente se presentaba en años normales y húmedos, ya que en los años secos el embalse no alcanzaba el nivel máximo de operación al recibir aportes del canal trasvase, excepto para el caso del escenario 9 donde se consideró sólo la demanda de riego.

### Escenario 1 Año húmedo - Central hidroeléctrica

Figura 14. Niveles - Entradas y salidas para el embalse Huacata- Escenario 1



Para el año húmedo es suficiente transferir caudal por el canal trasvase desde el 1 de noviembre hasta el 20 de

diciembre, que sería solo durante 50 días con esto se logra que el embalse se vuelva a llenar sin producir derrames por el vertedero, de descargar un volumen de 7.439 hm<sup>3</sup>, ahora se vierten 0.58 hm<sup>3</sup> (Figura 14) que es el caudal excedente que se presenta al inicio de la simulación.

Figura 15. Salidas desde el embalse Huacata - Escenario 1

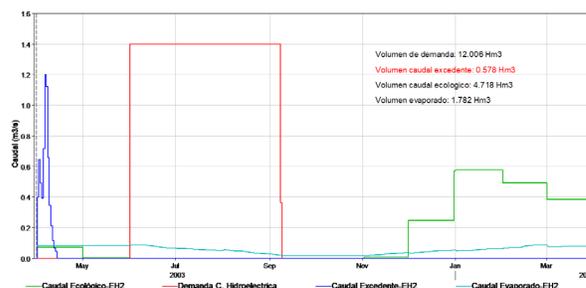


Tabla 3. Resultados de las salidas por canal trasvase para minimizar excedencias

Escenario	Año	Demanda (l/s)	Demanda requerida (Hm <sup>3</sup> )	Déficit de demanda (%)	Aporte por trasvase 800 l/s		Volumenes anuales (Hm <sup>3</sup> )			
					Fecha inicio	Fecha Final	Caudal Ecológico	Demanda	Caudal excedente	Caudal evaporado
1	Año normal	1400	18.50	34.94	1-Nov	24-Mar	1.648	12.037	0.105	1.694
2	Año húmedo	1400	18.50	35.10	1-Nov	20-Dec	4.716	12.006	0.578	1.713
3	Año seco	1400	18.50	35.13	1-Nov	31-Mar	0.209	12.002	0.016	1.611
4	Año normal	860	11.37	0.00	1-Nov	19-Mar	1.648	11.369	0.115	1.986
5	Año húmedo	860	11.37	0.00	1-Nov	17-Dec	4.717	11.369	0.652	1.988
6	Año seco	860	11.37	0.00	1-Nov	31-Mar	0.209	11.369	0.016	1.905
7	Año normal	600	7.93	0.00	1-Nov	3-Feb	1.648	7.932	0.106	2.330
8	Año húmedo	600	7.93	0.00	No requiere		4.717	7.932	0.696	2.200
9	Año seco	600	7.93	0.00	1-Nov	18-Mar	0.209	7.932	0.007	2.291

### Funcionamiento de la central hidroeléctrica durante toda la época de estiaje

Anteriormente se simuló el comportamiento con demandas del estudio del proyecto, en donde se vio que la central hidroeléctrica provocaba el vaciado del embalse en 3 meses, por lo que los sectores de riego y agua potable se quedaban sin agua antes de cubrirse toda la época de estiaje, lo que puede generar un conflicto social entre los beneficiarios. En este apartado se determina el caudal con el cual la central hidroeléctrica funciona durante los 5 meses del periodo de estiaje sin perjudicar a ninguno de los otros componentes, un resumen de

los tres escenarios se muestra a continuación, donde se observa que para un año normal con un caudal de 880 l/s para la central hidroeléctrica se satisfacen las demandas de los demás componentes (riego y agua potable):

Tabla 4. Alternativa para el funcionamiento de la central hidroeléctrica

Demanda	Año	Caudal (l/s)			Aporte por trasvase 800 l/s		Central	Agua potable	Riego	Tiempo en que se cubre la demanda
		Agua Potable	Riego	Central	Fecha inicio	Fecha Final	Potencia (Mw)	Población (hab.)	Área (ha.)	
<b>MULTIUSO Central hidroeléctrica Riego y Agua Potable</b>	<b>Año normal</b>	<b>260</b>	<b>600</b>	<b>880</b>	<b>1-Nov</b>	<b>23-Mar</b>	<b>3.26</b>	<b>138535</b>	<b>1100</b>	<b>153 (5 meses)</b>
	<b>Año húmedo</b>	<b>260</b>	<b>600</b>	<b>880</b>	<b>1-Nov</b>	<b>19-Nov</b>	<b>3.26</b>	<b>138535</b>	<b>1100</b>	<b>153 (5 meses)</b>
	<b>Año seco</b>	<b>260</b>	<b>420</b>	<b>680</b>	<b>1-Nov</b>	<b>31-Mar</b>	<b>2.77</b>	<b>138535</b>	<b>770</b>	<b>153 (5 meses)</b>

### CONCLUSIONES

Se procesó y recolectó información para realizar un balance hídrico en el embalse, se ha realizado el relleno de información en el periodo 2002 a 2008 de la estación Huacata tanto de precipitaciones como de temperaturas a nivel diario.

Se ha realizado una simulación hidrológica bajo el modelo Thornthwaite, de la cuenca de aporte directo para el embalse Huacata cuenca Casa Cancha, a nivel diario para un periodo de 7 años (2002-2008). Este modelo, considera tanto el caudal base como el escurrimiento efectivo. Con los resultados se han reportado caudales para condición de año húmedo, medio y seco. Esta información fue útil para realizar la simulación de la operación del embalse bajo diferentes condiciones de oferta, las cuales ayudaron a realizar la planificación de uso del embalse ante varias salidas por demanda.

Se ha calibrado el modelo Thornthwaite utilizado con datos de aforos de 2 años de la cuenca del río Huacata, con lo cual se obtuvo el coeficiente de Nash igual a 0.624 y un valor de sesgo de Bias igual a 0.62%, los cuales muestran una interpretación del modelo como satisfactorio, ya que indican una buena correlación entre valores generados y los observados. Esta calibración sirvió para ajustar los parámetros del modelo en la cuenca vecina Casa Cancha.

Se ha cuantificado la oferta de agua para la cuenca de Casa Cancha. El volumen al 85% de probabilidad de no excedencia es 16.74 Hm<sup>3</sup> (año húmedo), al 50% es de 6.13 Hm<sup>3</sup> (año normal) y al 35% es 1.09 Hm<sup>3</sup> (año seco).

Las salidas del sistema son: caudal ecológico aguas abajo de la presa, perdidas por evaporación del embalse y salida por el túnel trasvase, que debe satisfacer demandas tanto de riego, generación de energía hidroeléctrica y de abastecimiento de agua potable.

En este estudio se consideró la salida de caudal para demanda desde el 1 de junio y de entrada por canal trasvase desde el 1 de noviembre, ya que es un dato que se tiene del estudio a diseño final del proyecto, actualmente estos datos son inciertos, ya que, no existe ningún dispositivo de control que permita medir las salidas para demanda, ni los aportes por el canal trasvase. Adicionalmente no se consideró los 15 usuarios que son beneficiados con el canal de trasvase, lo que no permite que el caudal de aporte sea continuo como fue considerado en el presente análisis.

Se consideró que el embalse se alimenta únicamente durante el periodo lluvioso (noviembre-marzo) ya que en este periodo se trasvasa agua desde la cuenca del río Huacata, y los aportes directos de la propia cuenca se dan en mayor porcentaje en el mismo tiempo.

La implementación del programa HEC-ResSim permite simular el comportamiento operacional del embalse para las diferentes temporadas del año, y así poder regular el funcionamiento de todas las estructuras tanto de entradas y salidas de manera que permitan el máximo aprovechamiento del embalse y el adecuado funcionamiento de sus componentes.

Una de las limitaciones del presente estudio es que no se consiguió información sobre los datos de demandas actuales del proyecto, se realizaron solicitudes a la gobernación pero no se obtuvo respuestas positivas, por

lo cual se tuvo que realizar la simulación con datos de demandas constantes del estudio del proyecto realizado en 2004, siendo para la central hidroeléctrica 1400 l/s, riego 600 l/s y para abastecimiento de agua potable 260 l/s durante 5 meses desde el 1 de junio hasta el 31 de octubre.

De igual manera para el aporte por el canal trasvase río Huacata-embalse Huacata, se mencionaba que se realizaron algunos aforos en la zona, pero ningún dato fue proporcionado, así que se trabajó directamente con el caudal de diseño del canal que es 800 l/s, de aporte constante en época lluviosa desde el 1 de noviembre hasta el 31 de marzo.

Del estudio del proyecto se considera que es necesario la entrada de un caudal constante durante 5 meses por el canal trasvase para el llenado del embalse. En las simulaciones se observó que tanto para un escenario lluvioso como en un año normal hay rebose de agua en volúmenes bastante grandes, en el periodo en que se está trasvasando caudal, de manera que se presentó para cada escenario de tiempo y demanda una alternativa para minimizar este vertido, cuidando de que el embalse vuelva a llenarse, como resultado se llegó en un caso a no necesitar del aporte por el trasvase.

Para los tres escenarios (año húmedo, normal y seco) considerando los 3 componentes (riego, agua potable y generación de electricidad), para datos de embalse construido, se observó que no se satisface las demandas para los 5 meses de estiaje, ya que extrayendo un caudal de 1400 l/s el embalse termina vaciándose en menos de 3 meses, satisfaciendo solo un 65% de lo requerido, es decir que se abastece la demanda de riego para 1100 ha., agua potable a 138.535 habitantes y para la central hidroeléctrica con una potencia de 5.71 MW, tan sólo en un tiempo de 91 días.

En el caso de tomar en cuenta sólo el uso en demanda de riego y abastecimiento de agua potable, con un caudal de 860 l/s se satisface la demanda al 100%, beneficiando a 138,535 habitantes en el abastecimiento de agua potable y cubriendo 1,100 ha. de riego, en los tres escenarios planteados, aunque al presentarse un

año seco, el embalse tiene dificultades para volverse a llenar. Finalmente, al considerar como operación sólo la demanda de riego 600 l/s para cubrir 1,100 hectáreas durante 5 meses, también se satisface la demanda al 100% en los tres escenarios de tiempo, sin tener ningún problema en su llenado. Otra alternativa para asegurar el funcionamiento del componente hidroeléctrico es la construcción de un embalse de compensación para almacenar los 540 l/s que se estarían perdiendo debido a la generación eléctrica, inclusive se estuvo manejando la opción de generar dos embalses de compensación, lo cual estaría plenamente justificado en base a los resultados obtenidos en el presente análisis.

Otra alternativa para que funcione la central hidroeléctrica durante los 5 meses de estiaje, sin perjudicar a los demás componentes es la siguiente; para un año húmedo y normal, con un caudal extraído igual a 880 l/s se abastece a 138.535 habitantes y 1100 ha. de riego, produciendo una potencia de 3.26 Mw para la generación de energía hidroeléctrica. En un año seco se cubre 770 ha. de riego, se abastece de agua potable a 138.535 habitantes y se produce 2.77 Mw de potencia media.

El programa HEC-ResSim, si se dispone de todos los datos requeridos por el mismo, es una excelente herramienta para simular el comportamiento de embalses. Si se tiene definida la funcionalidad de un embalse o en su lugar un sistema de embalses, el programa permite conocer la operación del mismo de acuerdo a las restricciones que se impongan en la liberación de agua tanto a nivel horario como diario, y de esta manera a través del mismo optimizar el recurso hídrico.

Es necesario completar la información con respecto a infiltración, demandas actuales tanto de la central hidroeléctrica, de agua potable y riego, aforos de la cuenca de aporte directo, datos de aforos de aportes indirectos del río Huacata por el canal trasvase y características generales del río para obtener una simulación adecuada del funcionamiento del embalse, ya que los datos adoptados fueron valores constantes propuestos en el estudio a diseño final, si se tendría esta información actualizada y a nivel del detalle requerido (diario), se conseguirían resultados mucho más precisos.

Profundizar el análisis con datos medidos de demandas y ofertas para verificar si es realmente viable la inversión para una central hidroeléctrica en la zona, ya que con el caudal requerido del estudio 1400 lit/seg, el embalse se vaciaría en 3 meses, dejando en déficit la demanda tanto de agua potable como para riego por 2 meses. Por lo que es necesario realizar un análisis más a detalle de la posibilidad de implementar embalses de compensación para asegurar las demandas de los tres componentes.

El análisis realizado está en función de la variabilidad que existe en la demanda utilizada, pero específicamente el componente riego para abastecer las 1,100 hectáreas correspondientes a las 5 comunidades beneficiarias (zona del embalse, zona Corana Norte, zona Corana Sur, zona Canasmoro y zona Carachimayo) aún no está definida y se encuentra en proceso de validación, por lo que una vez se tenga validado este dato se puede generar resultados más precisos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aparicio Mijares, F. J. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie. Mexico: LIMUSA S. A.
- Celi Contreras, M. V., & Vélez Arcentales, M. (2013). Análisis de escenarios y estudio de un balance hídrico con aplicación al embalse Macul 1 empleando el programa - HEC-ResSim. Universidad de Cuenca Ecuador. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4652>.
- Chow, V. T. (1994). Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA.
- Gregory , B., Markstrom, S. L., & McCabe, J. (2007). A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface. U.S. Geological Survey Open-File report 2007 -1088. Obtenido de <http://pubs.usgs.gov>.
- Kannan, N., Santhi, C., Williams, J., & Arnold, J. (30 de junio de 2008). Development of a continuous soil moisture accounting procedure for curve number methodology and its behaviour with different evapotranspiration methods. Obtenido de: <https://www.researchgate.net/publication/227676213>.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2015). Evaluación de oferta de agua para el estudio TESA – Construcción Presa Tampinta. Villamontes.
- Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (Abril de 2011). Manual de diseño y construcción de pequeñas presas. Montevideo, Uruguay. Obtenido de: <http://www.mvotma.gub.uy/din-agua/manualdepequenaspresas>.
- Nasello, O. B., & De La Casa, A. C. (2015). Análisis periódico de las condiciones hidrológicas en Córdoba Argentina. Obtenido de: <http://www.scielo.org.ar>.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. Journal of hydrology. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com>.
- Oficina técnica nacional de los ríos Pilcomayo y Bermejo. (2004). Proyecto: HUACATA – Diseño Final. Tarija.
- USACE, User's Manual. (Mayo de 2013). HEC-ResSim Reservoir System Simulation. Obtenido de US Army Corps of Engineers: [www.hwc.usace.army.mil](http://www.hwc.usace.army.mil).
- Wondye , F. (Octubre de 2009). Abay basin water allocation modelling. Obtenido de bitstream: <http://etd.aau.edu.et/bitstream/123456789/4217/3/FA-NUEL%20WONDYE.pdf>.

## Artículo Científico

**Recibido:** 15 de mayo de 2018

**Aprobado:** 18 de junio de 2018