

# **Hydro-BID: Nuevas Funcionalidades (Módulos de Simulación de Embalses, Transporte de Sedimentos y de Aguas Subterráneas)**

Fekadu Moreda  
Señor Benjamin  
Mauro Nalesso  
Pedro Coli Valdes Dausa  
Juliana Corrales

**División Agua y  
Saneamiento**

NOTA TÉCNICA N°  
IDB-TN-1126

**Noviembre 2016**

# **Hydro-BID: Nuevas Funcionalidades (Módulos de Simulación de Embalses, Transporte de Sedimentos y de Aguas Subterráneas)**

Fekadu Moreda  
Señor Benjamin  
Mauro Nalesso  
Pedro Coli Valdes Dausa  
Juliana Corrales

**Noviembre 2016**

Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo

Hydro-BID: nuevas funcionalidades (módulos de simulación de embalses, transporte de sedimentos y de aguas subterráneas) / Fedaku Moreda, Benjamin Lord, Mauro Nalesso, Pedro Coli Valdes Dausa, Juliana Corrales.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1126)  
Incluye referencias bibliográficas.

1. Water resources development-Databases. 2. Water-supply-Management. 3. Reservoirs-Computer simulation. 4. Groundwater flow-Computer simulation. I. Moreda, Fekadu. II. Lord, Benjamin. III. Nalesso, Mauro. IV. Coli Valdes Dausa, Pedro. V. Corrales, Juliana. VI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. VII. Serie.

IDB-TN-1126

Palabras clave: agua, recursos hídricos, agua subterránea, reservorio, sedimentos, hidrología.

Códigos JEL: Q25, Q28, Q20, Q54, Q44, O18, O19.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2016 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

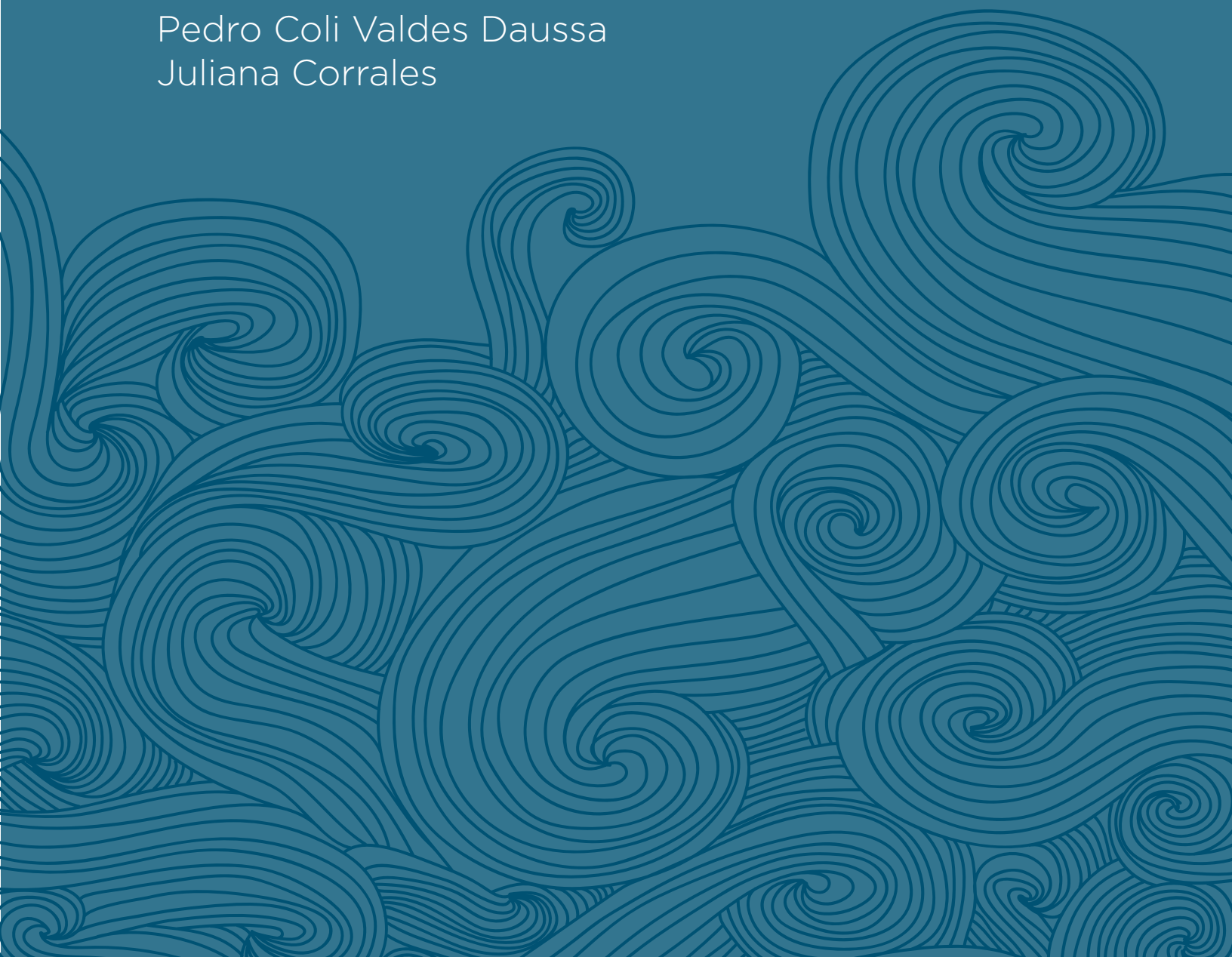
Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

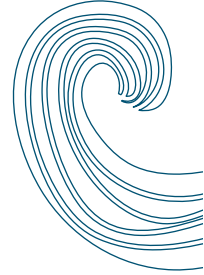
Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa .



# Hydro-BID: Nuevas Funcionalidades (Módulos de Simulación de Embalses, Transporte de Sedimentos y de Aguas Subterráneas)

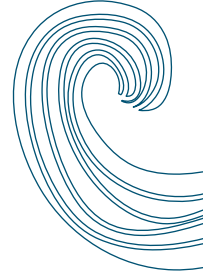
Fekadu Moreda  
Señor Benjamin  
Mauro Nalesso  
Pedro Coli Valdes Daussa  
Juliana Corrales





# Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>13</b>
1.1 Organización de la Nota Técnica.....	15
<b>2. La funcionalidad del sistema hYdro-BID .....</b>	<b>16</b>
2.1 Carga de sedimentos.....	17
2.1.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada.....	17
2.1.2 Parámetros de Sedimentos de MUSLE.....	20
2.1.3 Método Gavrilovic de Cargas de Sedimento .....	23
2.1.4 Parámetros de Sedimentos Gavrilovic .....	25
2.2 Simulaciones de Embalses .....	27
2.2.1 Parametrización del Módulo del Embalse.....	29
2.3 Modelaje de aguas subterráneas.....	33
2.3.1 Parametrización de las aguas subterráneas.....	41
<b>3. LA FUNCIONALIDAD Y EL USO DEL SISTEMA hydro-bid.....</b>	<b>42</b>
3.1. Registro de Hydro-BID.....	43
3.2 Salidas/Outputs del Modelo .....	45
3.3 Parámetros y Opciones de Modelaje en Hydro-BID .....	46
3.1.1 Archivo de Configuración (setting).....	51
3.4 Embalses .....	52
3.5 Modelaje de Sedimentos.....	55
3.6 Modelaje de Aguas Subterráneas .....	57
<b>Referencias.....</b>	<b>61</b>
<b>Apéndice A: Herramienta de navegación AHD - Guía del usuario .....</b>	<b>64</b>
A.1. Introducción a la AHD y las Herramientas de la AHD.....	65
A.2. Uso de la AHD en QGIS .....	65



A.3. La Instalacion y Uso de las Herramientas AHD en QGis (versión 0.03) en QGIS (versión 2.8) .....	67
Creación de un Subconjunto de AHD .....	72
Capas de símbolo.....	73
Herramienta de Preparación de los Datos de Aguas Subterráneas ..	73
<b>Apéndice B: Estadísticas de Calibración de Hydro-BID .....</b>	<b>77</b>
Supuestos.....	78
<b>Apéndice C: Formato para Cuencas Interrumpidas (Cut-off) .....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1	Diagrama de Flujo de Hydro-BID .....	14
Figura 2-1.	Ejemplo de Cuenca para el Embalse Pao de Acucar.....	28
Figura 2-2.	Zonas de Almacenamiento del Embalse .....	30
Figura 2-3.	Procedimiento de Operación Estándar, Resaltado en Rojo.....	31
Figura 2-4.	Representación del Ciclo del Agua dentro del Modelo Integrado de Disponibilidad de Aguas Subterráneas y Aguas Superficiales .....	36
Figura 2-5.	Ilustración de un MODFLOW con cinco capas de cuadrícula.....	37
Figura 2-6.	Modelo de Disponibilidad de Aguas Superficiales y Subterráneas Integrado, Esquema de Simulación y Flujo de Datos.....	38
Figura 2-7.	Ejemplo de la Cuadrícula MODFLOW (negro) sobrepuesto en Cuencas AHD (naranja) .....	40
Figura 3-1:	Formulario de Información del Usuario Hydro-BID .....	43
Figura 3-2.	Validación de Licencias de Hydro-BID .....	44
Figura 3-3.	Herramienta de Registro de Hydro-BID.....	44
Figura 3-4.	Ficha de Salida (Output) en el Modelo Central de Hydro-BID ...	45
Figura 3-5.	Hidrograma con Flujos Observados y Simulados.....	46
Figura 3-6.	Interfaz Hydro-BID - Ficha de Configuración.....	47
Figura 3-7.	Opciones de Archivo de Salida/Output .....	48
Figura 3-8.	Ejemplo de Cuenca COMID cutoff.....	50
Figura 3-9.	Archivo de Configuración .....	52

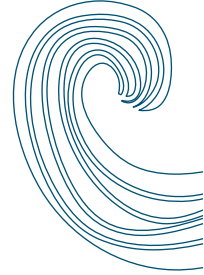
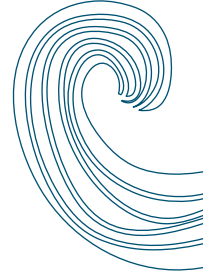


Figura 3-10. Interfaz de Modelaje de Embalses.....	54
Figura 3-11. Parámetros Mensuales de Embalses.....	54
Figura 3-12. Parámetros de Sedimentos .....	56
Figura 3-13. Interfaz del Modelo Hydro-BID de Aguas Subterráneas y Superficiales Integradas.....	58

## LISTA DE TABLAS

### Número Página

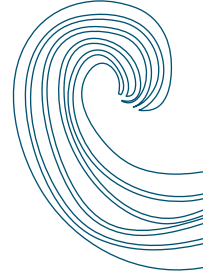
Tabla 2-1. Variables y parámetros de los Sedimentos .....	21
Tabla 2-2. Estimación inicial del Factor de Cobertura y Gestión (CUSLE), y Factor de Prácticas de Apoyo (P) .....	21
Tabla 2-3. Textura de suelos de la FAO.....	22
Tabla 2-4. Datos de Material Orgánico de la FAO.....	23
Tabla 2-5a. Los Valores del Parámetro X por Categoría de Uso de la Tierra .....	25
Tabla 2-5b. Los valores del Parámetro Y por Categoría de Suelo .....	26
Tabla 2-5c. Los Valores del Parámetro $\phi$ por Categoría de Cuenca .....	26
Tabla 2-6. Los Componentes, Entradas/inputs y Salidas/outputs del Modelo Integrado .....	39
Tabla 3-1. Parámetros de configuración.....	48
Tabla 3-2. Los parámetros del modelo hidrológico .....	49
Tabla 3-3. Parámetros de Embalses (escala de tiempo anual).....	53
Tabla 3-4. Parámetros Mensuales de Embalse.....	55
Tabla 3-5. Salida/Output del Método de Sedimentos Predeterminado.....	56
Tabla 3-6. Salida/Output del Método Gavrilovic y Zemljic .....	57
Tabla 3-7a. Encabezados de la Tabla de Ajuste RCH .....	58
Tabla 3-7b. Encabezados de la Tabla de la Cuadrícula CSV .....	59



## Abreviaturas y Acrónimos

AHD	Conjunto de Datos de Hidrografía Analítica
AWC	Capacidad disponible de retención de agua del suelo
ET	Evapotranspiración
GIS	Sistema de información geográfica (SIG)
GUI	Interfaz gráfica de usuario
GWLF	Factor de Carga de Cuencas Generalizado
HSG	Grupos Hidrológicos de Suelos
HWSD	Base de Datos Armonizada Mundial de Suelos
IDB	Banco Interamericano de Desarrollo
JRE	Java Runtime Environment
LAC	América Latina y el Caribe
MUSLE	Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada
NHDPlus	Conjunto de Datos de Hidrografía Nacional de EE.UU.
OVE	Error de Volumen General
PET	Evapotranspiración potencial
PRMS	Sistema de Modelaje Precipitación - Escorrentía
SCS	Servicio de Conservación de Suelos
SLOP	Procedimiento de Operación Lineal Standard
SWAT	Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua
TN	Nota Técnica
USDA	Departamento de Agricultura de los EE.UU.
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
USLE	Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo
WaterFALL®	Watershed Flow and ALlocation model





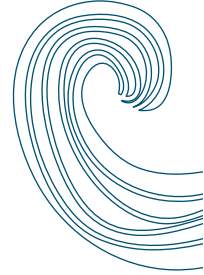
## Reconocimientos

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a los individuos y organizaciones que hicieron contribuciones importantes al desarrollo del sistema de modelaje Hydro-BID.

Agradecemos al equipo del Banco Interamericano de Desarrollo que concibió, dirigió y apoyó este esfuerzo. El Dr. Fernando Miralles-Wilhelm identificó en el Banco la necesidad del Hydro-BID y aportó la orientación técnica y la inspiración durante el proyecto. El Dr. Mauro Nalesso, Sr. Pedro Coli y la Dra. Juliana Corrales trabajaron incansablemente para identificar los socios potenciales para el proyecto entre los departamentos operacionales del BID y las agencias de gestión de los recursos hídricos de los Estados miembros del BID. El Sr. Sergio Campos aportó al proyecto el liderazgo y el apoyo gerencial dentro de la estructura organizacional del BID.

El desarrollo de Hydro-BID se ha beneficiado de trabajos previos realizados por mis colegas de RTI en el sistema Watershed Flow y ALLocation (WaterFALL™). Deseo reconocer las contribuciones de Michele Eddy y James Rineer en desarrollar WaterFALL; Aaron Park, Matthew Scruggs y Adam Shelton por el apoyo en la programación de Hydro-BID; Jimmy Bisese por la programación de la herramienta de navegación de Hydro-BID; y a Brandon Bergenroth y John Buckley por indexar la data de uso de tierras, suelos y clima para las aplicaciones y pruebas de Hydro-BID. Jessi Allen ha contribuido en la evaluación y pruebas de los nuevos módulos.

Este trabajo no hubiese sido posible sin las contribuciones gerenciales, administrativas y editoriales de mis colegas en RTI, por lo que agradecemos a Debra Ackerman, Gene Brantly y Robert Dykes.

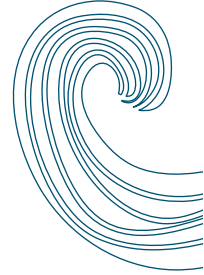


## Prólogo

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ofrece asistencia financiera y técnica para proyectos de infraestructura en agua y saneamiento, irrigación, control de inundaciones, transporte y energía, así como para el desarrollo de proyectos de agricultura, sistemas urbanos y recursos naturales. Muchos de estos proyectos dependen de los recursos hídricos y pueden verse afectados negativamente por el cambio climático y otros eventos que alteren la disponibilidad de agua, tal como el crecimiento demográfico y cambios en el uso de los suelos asociados con la urbanización, crecimiento industrial y la agricultura. Evaluar el potencial de cambio futuro en la disponibilidad de agua es un paso importante para garantizar que los proyectos de infraestructura cumplan con sus metas operacionales, financieras y económicas. Es importante también examinar las implicaciones de tales proyectos en la distribución de los recursos hídricos disponibles entre los usuarios y los usos del agua que compiten entre sí, con el fin de mitigar potenciales conflictos y asegurar que dichos proyectos puedan satisfacer los planes de desarrollo regional de largo plazo y la preservación de los servicios esenciales de los ecosistemas.

Como parte de su compromiso de ayudar a los países miembros en la adaptación al cambio climático, el BID patrocina trabajos para desarrollar y aplicar el Modelo de Simulación de Recursos Hídricos Regionales para América Latina y el Caribe, una suite integrada de herramientas de simulación de cuencas conocidas como Hydro-BID. Hydro-BID es un sistema de modelaje de alta escala que incluye módulos de análisis hidrológico y Climático para estimar la disponibilidad de agua superficial (caudales) a escalas regional, de cuenca y de sub-cuenca. El sistema incluye módulos para incorporar los efectos de las aguas superficiales y los embalses en los caudales de las aguas superficiales y para estimar las cargas de sedimentos. Los datos producidos por Hydro-BID son útiles para el análisis de balances hídricos, decisiones respecto a la asignación de los recursos hídricos, y análisis económicos y las herramientas de soporte de decisiones para ayudar a los responsables de tomar decisiones a escoger de manera bien informada entre las alternativas para diseños de proyectos de infraestructura así como entre las alternativas de políticas de gestión de recursos hídricos.

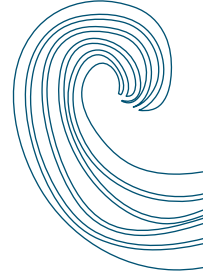
El BID auspició el desarrollo de Hydro-BID y proporciona -de forma gratuita- el software y el adiestramiento básico a los usuarios autorizados; véase [hydrobidlac.org](http://hydrobidlac.org). El sistema fue desarrollado por RTI International como una adaptación del software de modelaje propiedad de RTI WaterFALL®, el cual se basa en más de 30 años de experiencia de desarrollo y uso de la base de datos del U.S. National Hydrography (NHDPlus dataset) para apoyar al U.S. Geological Survey y la U.S. Environmental Protection Agency.



La Fase I de este trabajo produjo una versión operacional del Hydro-BID que incluye: (1) Una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) para la región de América Latina y el Caribe (LAC AHD) una representación digital de 229,300 cuencas en Centroamérica, América del Sur y el Caribe, con sus correspondientes topografía y segmentos de río y arroyos; (2) un sistema de información geográfica (basado en SIG), como herramienta de navegación para explorar las cuencas y ríos de AHD con la capacidad de navegar aguas arriba y aguas abajo; (3) Una interfaz de usuario para determinar específicamente el área y el período de tiempo a ser simulado y la ubicación de la localidad donde la disponibilidad de agua será simulada; (4) Una interfaz de datos climáticos para generar las entradas/inputs de precipitación y temperatura para el área y el período de interés; (5) Un modelo de precipitación - escorrentía basado en el Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF, por sus siglas en inglés); y (6) Un esquema de cálculo hidráulico (routing) para cuantificar el tiempo de tránsito y los estimados de flujo acumulados a través de las cuencas aguas abajo. Hydro-BID genera una salida/output en forma de series de tiempo diarias de estimaciones de flujo para la ubicación y el periodo seleccionado. La salida/output se puede resumir como una serie de tiempo mensual a discreción del usuario.

En la fase II de este trabajo, RTI ha preparado una versión actualizada de Hydro-BID que incluye (1) mejoras en la interfaz de usuario; (2) un módulo para simular el efecto de los reservorios en los caudales aguas abajo; (3) un módulo de enlace de Hydro-BID y los modelos de aguas subterráneas desarrollados con MODFLOW e incorporar los intercambios de agua entre las aguas subterráneas y los compartimientos de aguas superficiales dentro de la simulación de la disponibilidad de agua superficial; y (4) una aplicación para el modelaje de cargas de sedimento utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada y la Ecuación de Gavrilovic en ubicaciones específicas en una red de agua superficial, con parámetros pre-calculados, incluyendo el factor de erosionabilidad del suelo y el factor topográfico, con entradas/inputs del usuario para cubrir los factores de gestión y apoyo basados en el uso de la tierra.

RTI ha realizado el análisis de casos de estudio utilizando Hydro-BID en asociación con instituciones clientes del BID, del sector de agua, en varios países. Esta nota técnica (TN3) proporciona una descripción general de los nuevos módulos de Hydro-BID y guías del usuario para su implementación. La siguiente tabla proporciona una descripción de la serie de Notas Técnicas de Hydro-BID.



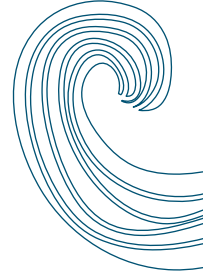
**Notas técnicas en la Series Hydro-BID<sup>1</sup>**

No.	Título	Resumen
NT 1	Una Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe	La NT1 provee una visión general de la LAC AHD, una base de datos de información geoespacial que proporciona una representación digital de 229.000 cuencas en América Central, América del Sur y el Caribe. La LAC AHD está diseñada siguiendo la NHDPlus y funciona como “capa básica” para el Sistema de modelaje Hydro-BID.
NT 2	Hydro-BID: Un Sistema Integrado de Simulación de Impactos de Cambio Climático en los Recursos Hídricos	La NT2 provee una visión general del Sistema de modelaje Hydro-BID, incluyendo la LAC AHD; datos de clima, datos de cobertura de la tierra y suelos; y el modelo de escorrentía GWLF para crear una herramienta de simulación de recursos hídricos y usarlo a nivel de cuenca y sub-cuenca. Los modelos de cuencas desarrollados con Hydro-BID proporcionan proyecciones de caudales fluviales basados en las entradas de datos/inputs del usuario.
NT 3	<b>Hydro-BID: Nuevas Funcionalidades (Módulos de Simulación de Reservorios, de Transporte de Sedimentos y de Aguas Subterráneas)</b>	<b>La NT3 proporciona una descripción general de los nuevos módulos y de las mejoras adicionales incluidos en la nueva versión de Hydro-BID tales como la simulación de reservorios, simulación del transporte y carga de sedimentos, y la interacción entre el modelaje de las aguas subterráneas y superficiales. La interfaz gráfica de usuario (GUI) de Hydro-BID es mejorada para facilitar la configuración y la calibración del modelo y ofrece gráficos adicionales para evaluar el desempeño del modelo. Los datos de salida/output del modelo incluyen también un resumen de los componentes del balance hídrico a escala de captación (de cuenca) que puedan ser reproducidos.</b>

<sup>1</sup> Para ver la lista completa y descargas de las Notas Técnicas Hydro-BID visite <http://www.iadb.org/en/sector/water-and-sanitation/overview,18357.html>

# 1. Introducción

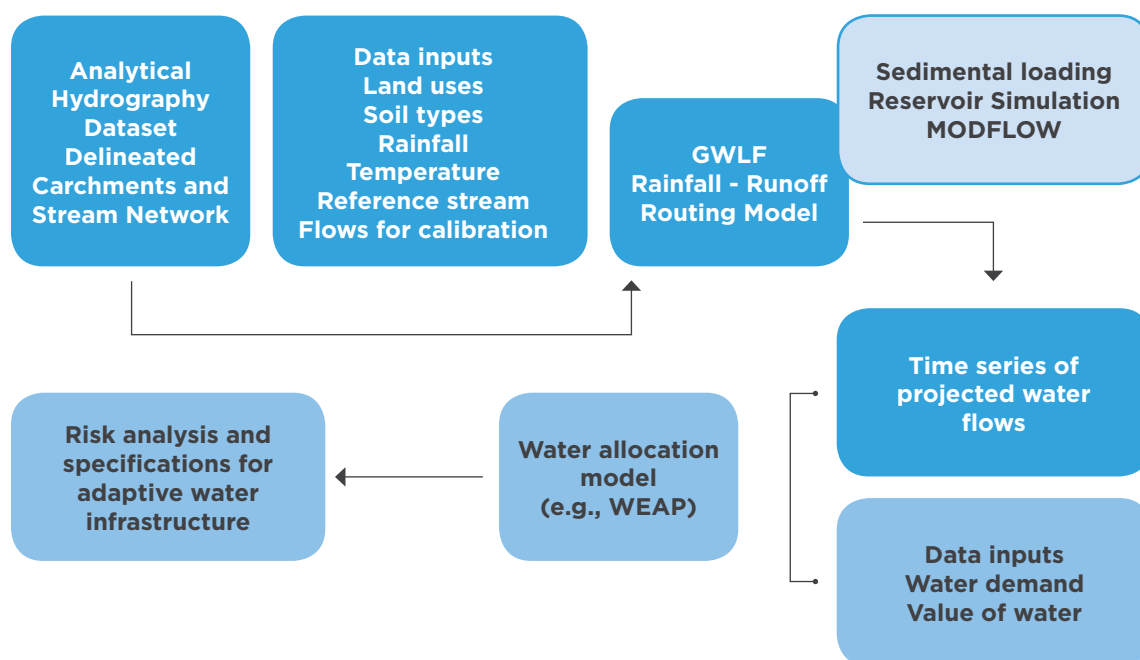


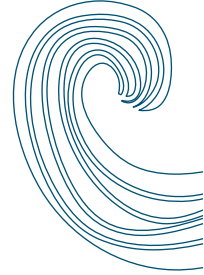


El sistema Hydro-BID tiene tres componentes principales: la Base de Datos de Hidrografía Analítica (AHD), la base de datos y el modelo de hidrología. **La Figura 1-1** muestra una representación esquemática del Sistema integrado Hydro-BID para una simulación cuantitativa de hidrología y cambio climático. El Sistema se construye sobre la base de datos de Hidrografía Analítica (Analytical Hydrographic Dataset, AHD) para las regiones de América Latina y el Caribe. La AHD se describe en detalle en la Nota Técnica 1 de esta serie.

Hydro-BID utiliza la estructura de datos y las topologías de red de cuencas y corrientes de la AHD. La base de datos incorpora las cuencas AHD y sus propiedades tales como áreas de drenaje, longitud de ríos, pendiente, uso de tierras, tipos de suelos, precipitaciones y temperatura dentro del área de estudio. La versión actual de la base de datos está organizada en SQLITE. El modelo hidrológico -conocido como Hydro-BID- se basa en una mejora del Factor de Carga de Cauces Generalizados - (GWLF, por sus siglas en inglés) en conjunto con una metodología nueva de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing) desarrollada por RTI, la cual se describe en detalle en la Nota Técnica 2. Hydro-BID también incluye una interfaz de pre-procesador para interpolar la data de las series de tiempo diarias de temperatura y precipitación de las estaciones en cuencas de captación, siendo ésta la forma requerida para la entrada de datos climáticos.

**Figura 1-1 Diagrama de Flujo de Hydro-BID**





En la versión actual de Hydro-BID, se han implementado módulos adicionales. Una vez que los módulos son seleccionados para ser incluidos en la simulación, estos módulos funcionan a la perfección con el modelo original de lluvia-escoorrentía. Los tres módulos son: 1) la simulación de reservorios, 2) el transporte de sedimentos y 3) la interacción de aguas superficiales y subterráneas usando MODFLOW. Mientras los dos primeros módulos están integrados dentro del modelo Hydro-BID, el módulo de interacción de las aguas superficiales y subterráneas requiere de un modelo externo de aguas subterráneas, MODFLOW. El vínculo entre Hydro-BID y MODFLOW se logra corriendo los dos modelos de manera secuencial y compartiendo los archivos de datos de entrada (input)/salida (output).

Además de los nuevos módulos, la interfaz gráfica de usuario (GUI) de Hydro-BID se ha mejorado significativamente. La mejora incluye agrupar tareas en pestañas de configuración de modelo, ahorros en los parámetros de calibración, y herramientas especiales, así como la visualización gráfica extensa de los resultados/outputs. Hemos añadido más demostraciones gráficas y estadísticas de las salidas/outputs para habilitar la calibración y validación de las simulaciones del modelo.

Los resultados/output del modelo se generan como una serie de tiempo de los caudales de agua proyectados, en una escala diaria o mensual. El sistema tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) para aceptar la entrada/input al modelo, así como para mostrar un resumen de resultados gráficos y tabulares.

Hydro-BID ha sido desarrollado para servir de herramienta clave de planificación para:

- Agencias de planificación y gestión de recursos hídricos;
- Autoridades de control de drenaje/inundación;
- Autoridades de irrigación;
- Productores de energía hidroeléctrica
- Servicios de suministro de agua y saneamiento; y
- Usuarios industriales de agua.

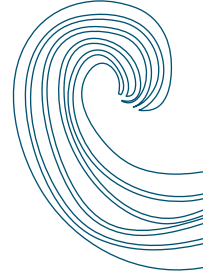
## 1.1 Organización de la Nota Técnica

Tras esta introducción, el Capítulo 2 describe la base de los nuevos módulos de Hydro-BID proporcionando información sobre las ecuaciones y las estimaciones de parámetros que los rigen. El capítulo 3 presenta el método de organización de datos de Hydro-BID. El capítulo 4 presenta una guía del usuario para Hydro-BID mostrando primero una versión sucinta de la instalación y corrida del modelo y posteriormente describiendo el funcionamiento en detalle paso a paso del modelo.

## 2. La funcionalidad del sistema Hydro-BID







Este capítulo describe las ecuaciones básicas que gobiernan la simulación de reservorios, las funciones de cargas de sedimento y la interacción de aguas superficiales y subterráneas; y los requerimientos de data y parámetros. La información acerca del Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF), la metodología de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing) de RTI y los requerimientos generales de data y parámetros se puede encontrar en la Nota Técnica 2.

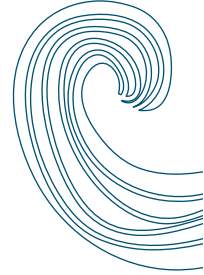
## 2.1 Carga de sedimentos

En esta nueva versión de Hydro-BID, se implementaron dos metodologías para determinar las cargas de sedimentos desde las cuencas de captación. El primer método se basa en la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE) y la segunda se basa en la ecuación de Garrilovic (1959) modificada por Zemljic (1971). Ambos métodos están perfectamente vinculados a la simulación de GWLF. Mientras que MUSLE se implementa para generar cargas de sedimento diarias para cuencas de captación, el método Garrilovic se desarrolla sólo para cargas de sedimentos anuales. Las siguientes secciones describen las dos metodologías y sus parámetros.

### 2.1.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada

Las ecuaciones de transporte de carga de sedimento comúnmente utilizadas se basan en las cargas totales anuales de sedimento en cuencas hidrográficas. Empleando estas ecuaciones en conjunción con Hydro-BID por un paso de tiempo diario, nos enfocamos en desarrollar una función de la dinámica de carga de sedimentos que represente las condiciones meteorológicas diarias y estacionales predominantes. Además, las cargas de sedimentos calculadas son inherentemente dependientes de los diferentes usos de la tierra en una cuenca hidrográfica. En virtud que Hydro-BID está diseñada para generar diariamente la escorrentía para cada uso de la tierra por separado (i.e., una cuenca de captación), la escorrentía específica-a-uso-de-la-tierra calculada diariamente fue utilizada para generar las cargas de sedimentos correspondientes, las cuales pueden sumarse en una carga total para la cuenca. Las cargas de sedimentos también están sujetas al esquema de retardo-enrutamiento (lag-routing) hidrológico de RTI descrito en la Nota Técnica 2.

La erosión causada por la lluvia se calcula con MUSLE (Williams, 1975), e implementada siguiendo de cerca la aplicación MUSLE en la ampliamente utilizada Herramienta de Evaluación del Suelo y Agua (SWAT, por sus siglas en inglés) (Neitsch et al., 2009). MUSLE es una modificación de la USLE original, que calcula la erosión anual promedio. MUSLE calcula las tasas diarias de erosión como una función de la escorrentía diaria y de los parámetros USLE, mientras que USLE predice la erosión bruta anual como una función de la energía generada



a través de lluvias. Para MUSLE, la energía de la lluvia está representada por el uso del caudal pico sumada a la escorrentía superficial. Las variables diarias necesarias para calcular la tasa diaria de sedimentación son proporcionadas por el componente hidrológico.

De Williams (1975):

$$Sed_t = 11.8(Q_t Q_{peak})^{0.56} K_{USLE} C_{USLE} P_{USLE} LS_{USLE} CFRG \quad (E.1)$$

Donde  $Sed_t$  es la producción de sedimento en el día t (tonelada métrica, es decir, toneladas)

$Q_t$  es el volumen de escorrentía superficial para ese día ( $m^3$ ), esta es un resultado/output diario del modelo hidrológico

$Q_{peak}$  es el pico de caudal diario ( $m^3/s$ ), calculado como se describe más abajo

$LS_{USLE}$  es el factor topográfico, calculado como se describe más abajo

$K_{USLE}$  es el factor de la erosionabilidad del suelo, que es una entrada/input del usuario

$C_{USLE}$  es el factor de gestión de la cobertura, que es la entrada del usuario

$P_{USLE}$  es el factor de prácticas de apoyo, que es una entrada/input del usuario

$CFRG$  es el factor de fragmentos gruesos, que es una entrada/input del usuario.

Los parámetros MUSLE calculados internamente se explican más abajo.

$Q_{peak}$  es el caudal máximo para el día t y se calcula mediante la fórmula racional modificada:

$$Q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} Q_t Area}{3.6 t_{con}} \quad (E.2)$$

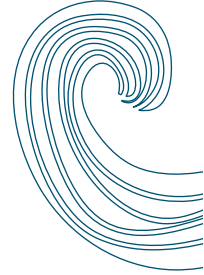
Donde Área es la superficie del área de interés ( $km^2$ ).

$t_{con}$  es el tiempo de concentración (hr)

3.6 es un factor de conversión de unidades

$\alpha_{tc}$  es la fracción de la lluvia caída durante la  $t_{con}$ , calculado utilizando E.21:

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp[2t_{con} \ln(1 - \alpha_{0.5})] \quad (E.3)$$



Donde  $\alpha_{0.5}$  es la fracción de la lluvia diaria que cae en la media hora de mayor intensidad. El cálculo de  $\alpha_{0.5}$  requiere de una serie de análisis de datos históricos para generar medias-horas de lluvia mínima, media y máxima mensual. Además, la aleatoriedad del cómputo de la fracción de media hora de lluvia puede producir valores que no son coherentes en el tiempo. Por lo tanto, el enfoque que hemos adoptado también requerirá menos datos, que es el siguiente:

- A partir de los datos sobre precipitaciones diarias para cada día, calcular la fracción **máxima** permitida,  $\alpha_{0.5u}$ , como E.4.

$$\alpha_{0.5u} = 1 - \exp\left(\frac{-125}{R_{day} + 5}\right) \quad (E.4)$$

donde  $R_{day}$  es la profundidad de lluvia (mm) durante el día.

- De acuerdo a documentación de SWAT, siempre asumir que la  $\alpha_{0.5min}$  **mínima** permitida es 0.02083.
- Si  $\alpha_{0.5u}$  es menor o igual que  $\alpha_{0.5min}$  usar  $\alpha_{0.5} = \alpha_{0.5u}$ .
- Si  $\alpha_{0.5u}$  supera  $\alpha_{0.5min}$  entonces usar  $\alpha_{0.5} = (2\alpha_{0.5u} + \alpha_{0.5min})/3$ .

El tiempo de concentración,  $t^{con}$  es el tiempo necesario para que el caudal llegue a la salida o desagüe desde el segmento fluvial más largo en la cuenca de captación. Existen varias fórmulas empíricas desarrolladas para diferentes tipos de uso de la tierra. Hemos aplicado la Ecuación de Retardo del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés), E.5. La ecuación SCS para la estimación del tiempo de retardo en la cuenca calcula el tiempo de viaje en horas desde el centro de la masa de precipitación excesiva hasta el tiempo del caudal pico.

$$T_c = \frac{L^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{1140S^{0.5}} \quad (E.5)$$

Donde  $T_c$  es el tiempo de concentración (hr)

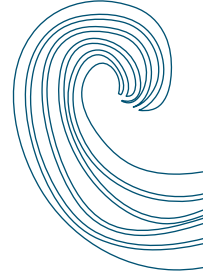
$L$  es la longitud del cauce (ft)

$CN$  es el número de curva

$S$  es la pendiente promedio (%)

$L$  es la longitud del cauce, que se puede calcular utilizando la siguiente ecuación de Mockus (USDA, 1972):

$$L = 209A^{0.6} \quad (E.6)$$



Donde L es la longitud de cauce (ft)

A es el área de drenaje (acres).

El enfoque principal para calcular la carga de sedimentos con Hydro-BID sigue estos cinco pasos:

1. Para cada tipo de uso de la tierra, calculamos la escorrentía y el caudal pico
2. Para cada tipo de uso de la tierra, calculamos la carga de sedimento usando MUSLE y utilizando el área del uso de la tierra
3. Sumar todos los sedimentos provenientes de los usos de la tierra y obtener la carga de sedimentos de la cuenca de captación (toneladas métricas/día).
4. Realizar el enrutamiento de todas las cuencas aguas arriba de una cuenca dada (de captación) y sumar todas las cargas de sedimentos (toneladas métricas/día).
5. Calcular la concentración de sedimentos después del enrutamiento mediante la división del total de la carga de sedimentos (local más la enrutada) (en toneladas) por el flujo de salida desde la cuenca de captación.

Los resultados del modelo son el total de cargas de sedimentos (toneladas/día) y la concentración de sedimentos (mg/L). La concentración de sedimentos en la salida de cada cuenca de captación se calcula dividiendo el caudal enrutado por el sedimento enrutado:

$$SedCON_t = \frac{F_t}{Sed_t} * Unit\_conversion\_factor \quad (E.7)$$

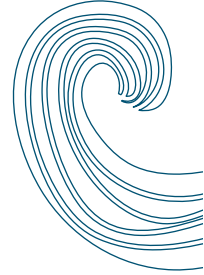
Donde  $SedCON_t$  es la concentración de sedimento (mg/L),  $F_t$  es el caudal total (m<sup>3</sup>/s), y  $Sed_t$  (toneladas/día) y el factor de conversión de unidades =10<sup>6</sup>

## 2.1.2 Parámetros de Sedimentos de MUSLE

En esta sección los parámetros utilizados en MUSLE están enumerados y, también, se hace una descripción de un intento para estimar los parámetros iniciales. **La Tabla 2-1** presenta las variables y parámetros MUSLE y las fuentes de los estimados de parámetros iniciales.

**Factor de Cobertura y Gestión**,  $C_{USLE}$ , y Factor **de Prácticas de Apoyo**,  $P_{USLE}$

Los Factores de Cobertura y Gestión para USLE presentados en la **Tabla 2-2** se basan en el asignaciones de clasificación de uso de la tierra utilizados en los modelos de evaluación de la Exposición de US EPA, 3MRA (US EPA, 2003).



**Tabla 2-1. Variables y parámetros de los Sedimentos**

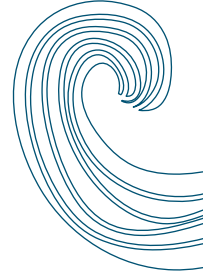
Variables	Descripción	Fuentes
Sedimentos [día]	Sedimentos (toneladas/día).	Calculado
Área	Área de uso de tierras individual (ha)	landUseArea
Escorrentía[día]	Escorrentía proveniente del uso de la tierra (cm)	landUseRunoff (calculada utilizando GWLF)
$K_{USLE}$	Factor de la erosionabilidad del suelo	Estimado a partir de las propiedades del suelo
$C_{USLE}$	Factor de Cobertura y Gestión	Se asigna usando la cobertura de la tierra y los factores de práctica y gestión de USLE
$P_{USLE}$	Factor de prácticas de apoyo	Se asignan usando los factores de gestión de prácticas y de cobertura de USLE
$LS_{USLE}$	Factor topográfico	Estimado a partir de las características de la cuenca de captación
CFRG	Factor de fragmentos gruesos	Se asume = 1

**Tabla 2-2. Estimación inicial del Factor de Cobertura y Gestión (CUSLE), y Factor de Prácticas de Apoyo (P)**

LU01_ID	C_Factor	P_Factor
10	0	1
21	0.01	1
22	0.01	1
23	0.01	1
24	0.01	1
31	1	1
32	1	1
40	0.005	1
50	0.01	1
70	0.01	1
81	0.01	1
82	0.08	0.5
90	0	1
95	0	1

**Factor de la Erosionabilidad del Suelo,  $K_{USLE}$**

La erosionabilidad del suelo se calcula sobre la base de las texturas de suelos de la FAO. Para calcular la erosión, son necesarias cuatro características de los suelos: porcentaje de arena ( $m_s$ ), porcentaje de arcilla ( $m_c$ ), porcentaje de limo ( $m_{silt}$ ), y el porcentaje de materia orgánica (orgC). Estas características se detallan en **las Tablas 2-3 y 2-4**. La ecuación empírica utilizada para estimar  $K_{USLE}$  (Williams, 1995) es:



$$K_{USLE} = f_{csand} * f_{c\ s} * f_{orgc} * f_{hissand} \quad (E.8)$$

Donde,

$$f_{csand} = \left( .2 + .3 \exp \left( -0.256 * m_s * \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right) \right) \quad (E.9)$$

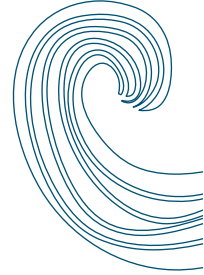
$$f_{ci-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (E.10)$$

$$f_{orgc} = \left( 1 - \frac{0.0256 * orgC}{orgC + \exp \left( -5.51 + 2.29 * \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right)} \right) \quad (E.11)$$

$$f_{hissand} = \left( 1 - \frac{0.7 * \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left( -5.51 + 22.9 * \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right)} \right) \quad (E.12)$$

**Tabla 2-3. Textura de suelos de la FAO**

FAO-textura	% Arcilla ( $m_c$ )	% Arena ( $m_s$ )	% Limo ( $m_{silt}$ )
C - Arcilla	50	30	20
CL - Franco Arcilloso	34	33	33
L - Franco	18	42	40
LS - Franco Arenoso	6	82	12
Sa -Arena	5	92	3
SC - Arcillo Arenoso	42	52	6
SCL - franco arcillo arenoso	28	60	12
SL - Franco arenoso	10	65	25
Si - Limo	6	7	87
SiC - arcillo limoso	47	7	46
SiCL - Franco arcillo limoso	34	10	56
SiL - franco limoso	20	20	60



**Tabla 2-4. Datos de Material Orgánico de la FAO**

Código FAO-OM	Carbono orgánico (orgC)	
	Por ciento WSeight	Utilizado en Hydro-BID
A	0-0.6	0.3
AB	0-2	1.0
B	0.6-0.2	1.3
C	2-3	2.5
D	3-8	5.5
E	8 y más	8.0
Faltan datos	N/A	0.1

**Factor Topográfico,  $LS_{USLE}$**

El factor topográfico, de longitud-pendiente, es la proporción esperada de pérdida de suelo por unidad de área desde el área de interés hasta aquella de una pendiente experimental de 22.1 m de una pendiente uniforme de 9% bajo si no idénticas condiciones.  $LS_{USLE}$  para cada tipo de uso de la tierra dentro de una cuenca de captación puede calcularse como sigue:

$$LS = (0.045 X_k)^b (65.41 \sin^2 \theta_k + 4.56 \sin \theta_k + 0.065) \tag{E.13}$$

$$\theta_k = \tan^{-1}(ps_k / 100) \tag{E.14}$$

En la cual  $X_k$  es la longitud de la pendiente (m) y  $PS_k$  es el porcentaje de la pendiente. El exponente en la Ecuación E.13 está dado por  $b = 0.5$  para  $PS_k \geq 5$ ,  $b = 5 < 0.4$  para  $PS_k < 3$ ,  $b = 0.3$  por  $3 \leq PS_k \leq 1$  y  $b = 0.2$  para  $PS_k < 1$  (Wischmeier y Smith, 1978).

**2.1.3 Método Gavrilovic de Cargas de Sedimento**

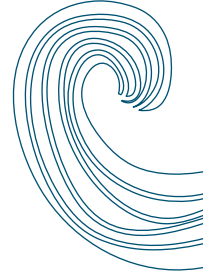
Un segundo cálculo de carga de sedimentos sobre la base de ecuaciones de Gavrilovic (1959) y modificado por Zemljic (1971) se utilizó para evaluar la carga de sedimentos. Las ecuaciones de Gavrilovic y Zemljic son como sigue:

$$G = W R \tag{E.15}$$

Donde G es el volumen de sedimentos anuales (m<sup>3</sup>/año)

W es el promedio potencial anual de producción de sedimentos por la erosión superficial (m<sup>3</sup>/año) (dado por la Ecuación E.16)

R es el coeficiente de redeposición o de retención de sedimentos (dado por la Ecuación E.19)



$$W = T \times H \times \pi \times Z^{1.5} \times F \tag{E.16}$$

Donde T es el coeficiente de temperatura (dado por E.17)

$$T = (t/10 + 0.1)^{0.5} \tag{E.17}$$

Donde t es la media anual de temperatura (°C)

H es la precipitación media anual (mm/año)

F es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

Z es el coeficiente de erosión (dado por E.18).

$$Z = X \times Y \times [\Phi + J^{0.5}] \tag{E.18}$$

Donde X es el coeficiente de uso de la tierra

Y es el coeficiente de resistencia del suelo

Φ es el coeficiente de erosión observada

$$R = \frac{(O \times D)^{0.5} (L + L_i)}{(L + 10) \times F} \tag{E.19}$$

Donde S es el perímetro de la cuenca (km)

D es la diferencia de elevación entre la elevación media y mínima (km)

L es la longitud del cauce principal (km)

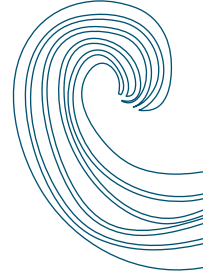
Li es la longitud de afluentes secundarios (km)

F es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

El volumen de sedimentos se multiplica por la densidad de arena humedecida apretada (2,7 toneladas/m<sup>3</sup>) para producir la carga de sedimento. Estas ecuaciones difieren de MUSLE por cálculo de cargas sobre una base anual, y no se basan en datos de escorrentía diaria. Los datos de entrada/input incluyen datos climáticos, así como el uso de suelo y de la tierra y las características de la gestión de tierras. Estas ecuaciones también difieren del método MUSLE por la contabilidad de la porción de la carga que es re-depositada dentro de la cuenca, a través de una función de retención de sedimentos. El procedimiento para calcular la carga de sedimentos utilizando el método Gavrilovic es como sigue:

- Calcular el coeficiente de erosión (Z) basado en el tipo entradas/inputs del usuario - agregar estos valores a la tabla de cuencas de captación





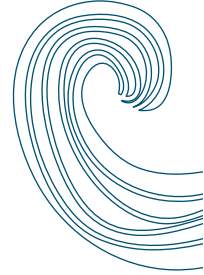
- Calcular variables anuales por año para cada cuenca de captación en una corrida: el coeficiente de temperatura (T) y la precipitación media anual (h) para producir la carga potencial de sedimento de cada cuenca de captación por año (W)
- Multiplicar W y el coeficiente de re-deposición (R) para obtener la carga de sedimento anual real de cada cuenca de captación, G
- Sumar los valores de G de cada cuenca de captación en la corrida para obtener una carga total en la salida o desagüe de la cuenca de captación
- El resultado del cálculo de sedimentos es la carga anual de sedimento (toneladas/año)

## 2.1.4 Parámetros de Sedimentos Gavrilovic

El coeficiente de uso de la tierra (X) describe la capacidad del uso de la tierra para resistir la erosión a través de la vegetación o de la cobertura artificial. El coeficiente de resistencia del suelo (Y) representa la capacidad del suelo para representar la erosión proveniente de la precipitación y generalmente se calcula a través de experimentos de laboratorio o mediciones de campo.  $\Phi$  representa el grado en que procesos activos de erosión están presentes. Los valores de X, Y así como  $\phi$  pueden apreciarse en las **Tablas 2-5a hasta 2-5c**, respectivamente (adaptado de Gavrilovic, 1988).

**Tabla 2-5a. Los Valores del Parámetro X por Categoría de Uso de la Tierra**

Categoría	Subcategoría	Valor de X
Las áreas sin cobertura vegetal	Tierras baldías que no se pueden arar (tierras malas/badlands)	1.00
	Campos arados arriba/abajo de la colina	0.90
	Los huertos o viñedos sin vegetación baja	0.70
Pastizales dañados y tierras cultivadas	Campo de contorno cultivado	0.63
	Arbustos forestales degradados sobre el suelo erosionado	0.60
	Pastos de montaña seca	0.60
Bosques y arbustos dañados, pastizales.	Prados y cultivos perennes similares	0.40
Bosque de coníferas con poca arboleda, escasos arbustos, praderas de arbustos	Pastizales de pasto crecido y drenado	0.30
Bosques mixtos y malezas densas, bosques dispersos con arbustos bajo arboles más grandes (underwood)	Buen bosque en laderas empinadas	0.20
	Buen bosque en laderas suaves	0.05

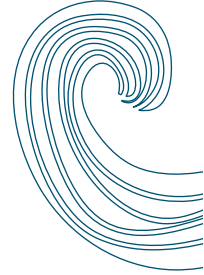


**Tabla 2-5b. Los valores del Parámetro Y por Categoría de Suelo**

Categoría	Subcategoría	Valor Y.
Sedimentos finos y suelos poco resistentes a la erosión	Arena y grava y suelo suelto	2.00
Sedimentos, morrenas, arcillas y otras rocas débiles	Loes, toba, suelos salinos, suelos de estepa y similares	1.60
	Meteorización de piedras calizas y margas	1.20
Rocas blandas, estabilizada (pendiente de talud, esquistos, arcillas rígidas)	Serpentina, piedra arenisca roja, depósitos de flysch	1.10
	Parapodzol, podzol, esquisto desintegrado, maschist, gneis, esquisto arcilloso, etc.	1.00
Rocas parcialmente resistentes a la erosión	Caliza compacta y schistose, suelos tierra-roja y fumose-silicatos	0.90
	Suelo forestal marrón y suelos de montaña	0.80
	Suelos smonitsa, valle y húmedos (back bog)	0.60
Rocas duras resistentes a la erosión	Chernozem y depósitos aluviales de buena textura	0.50
	Rocas ígneas compactas desnudas	0.25

**Tabla 2-5c. Los Valores del Parámetro  $\phi$  por Categoría de Cuenca**

Categoría	Subcategoría	Valor $\phi$
Cuenca completamente erosionada con barrancos y deslizamientos de tierra	La cuenca o zona completamente conectada por barrancos y procesos de erosión profundos	1.00
	Alrededor del 80% del área está bajo arroyuelos y barrancos	0.90
50-80% de las cuencas con erosión en arroyuelos y deslizamientos	Alrededor del 50% del área está bajo arroyuelos y barrancos	0.80
	Toda el área está conectada por la erosión de la superficie, detritus y escombros, algunos arroyuelos y barrancos (erosión profunda) y fuerte erosión kárstica	0.70
Erosión laminar, talud de escombros, pendiente con arroyuelos y barrancos, erosión kárstica	Toda el área está conectada por la erosión, pero sin efectos visibles profundos (arroyuelos, barrancos, desprendimientos de rocas, etc.).	0.60
	El 50% del área está conectada por la erosión de la superficie, mientras que el resto de la cuenca está desconectada	0.50
Erosión laminar en un 20-50% de las cuencas	El 20% del área está conectada por la erosión de la superficie y el 80% esta desconectada	0.30
	La superficie de la tierra sin efecto visible de erosión, desprendimientos o deslizamientos menores de rocas en canales fluviales	0.20
Signos menores de erosión en las cuencas	La superficie de la tierra sin efecto visible de la erosión, la mayoría son campos de cultivo	0.15
	La superficie de la tierra sin efecto visible de erosión, principalmente plantas creciendo bajo arboles más grandes o cultivos perennes (prados, pastizales, etc.).	0.10



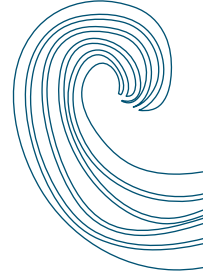
## 2.2 Simulaciones de Embalses

Los embalses se modelan como objetos discretos situados a la salida de una cuenca. Hydro-BID dirige el caudal a la cuenca que contiene el embalse y calcula las descargas del embalse de acuerdo a un conjunto de algoritmos.

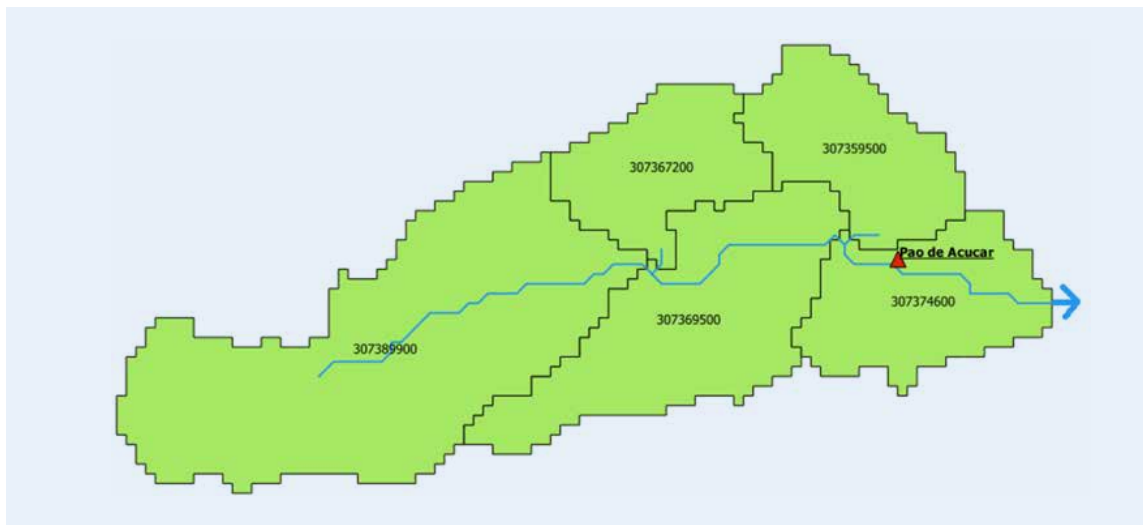
El procedimiento general utilizado en Hydro-BID consiste de:

- Un embalse es identificado por las cuencas (COMID) ubicadas en la salida del embalse.
- Hydro-BID se corre y se generan las series de tiempo del caudal en la salida del COMID.
- Las series de tiempo generadas se usarán como entradas (**inputs**) al módulo del embalse.
- Se corre la subrutina del modelo de embalse con las entradas (**inputs**): series de tiempo del flujo del caudal entrante, la demanda, la evaporación y la filtración y producirá el caudal saliente modificado (descargas del embalse) y el volumen del embalse para el COMID.
- Hydro-BID continúa corriendo para las corrientes de aguas abajo asumiendo al COMID como una estructura de control y utiliza el caudal saliente modificado del embalse como caudal entrante a la cuenca inmediatamente aguas abajo.
- La configuración (**set-up**) trabajará para uno o varios embalses dentro de la cuenca.
- Las series de tiempo de volumen de almacenamiento del embalse serán utilizadas para generar la confiabilidad del embalse.

Considere el siguiente ejemplo de cuenca para el embalse Pao de Acucar en la cuenca del río Ipojuca de Brasil (**Figura 2-1**).



**Figura 2-1. Ejemplo de Cuenca para el Embalse Pao de Acucar**



Nota: Las cuencas de captación son etiquetadas con COMID.

La ubicación del embalse está especificada por el COMID de la salida del embalse (en este ejemplo es 307374600). El caudal se dirige dentro de esta cuenca de captación utilizando el modelo de precipitación-escorrentía en Hydro-BID. El módulo del embalse en Hydro-BID calculará la descarga y el volumen de almacenamiento para cada paso (**de tiempo**), según la opción de descarga del embalse especificada en la configuración.

El balance hídrico en el embalse se calcula de la manera siguiente:

$$S_{t+1} = S_t - I_t - R_t - D_t - E_t - L_t \quad (\text{E.20})$$

Donde  $S_t$  es el almacenamiento en el tiempo  $t$ , calculado en el paso de tiempo previo

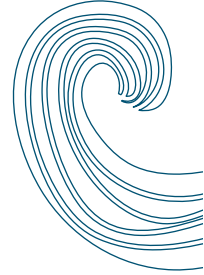
$I_t$  es el caudal entrante en el tiempo  $t$ , calculado como el afluente al COMID especificado

$R_t$  es la descarga del embalse (caudal saliente) en el tiempo  $t$ , calculado por la opción de descarga

$D_t$  es la demanda del embalse (extraída directamente del embalse) en el tiempo  $t$

$E_t$  es la pérdida de evaporación en el tiempo  $t$

$L_t$  es la pérdida por infiltración en el tiempo  $t$



## 2.2.1 Parametrización del Módulo del Embalse

Todos los embalses requieren de los siguientes parámetros a ser definidos en la interfaz de la Base de Datos del Embalse principal:

### **Etiquetas**

El COMID es la Identificación (ID) de la cuenca AHD para la cuenca de captación que contiene la salida del embalse. Hydro-BID simula todas las operaciones del embalse, incluyendo la infiltración de aguas subterráneas y la evaporación, en esta cuenca de captación. Esto se puede encontrar utilizando una herramienta de QSIG. Además, se le debe dar un **Nombre** al embalse para la organización de los datos.

### **Parámetros físicos**

**Los Parámetros** de forma (**shape**) son utilizados para determinar la relación entre el volumen del embalse y el área de superficie, que a su vez se utiliza para estimar las pérdidas por evaporación. Se requiere de dos parámetros, **a** y **b**, para establecer la relación, tal como se muestra en la Ecuación E.21:

$$\text{Área de superficie} = \mathbf{b} * (\text{Volumen})^{\mathbf{a}} \quad (\text{E.21})$$

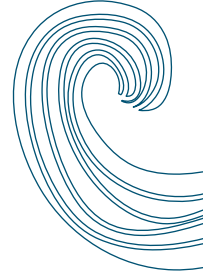
Si se desconocen estos valores, se sugiere utilizar por defecto los valores de -1 para **a** y -2 para **b**.

El Coeficiente de Evaporación se utiliza para modificar la escala de la evaporación potencial para todo un embalse. La evaporación potencial se determina a partir de una función empírica de variables meteorológicas en un paso de tiempo diario. Si se desconoce un coeficiente de evaporación, se sugiere un valor predefinido de 1.2.

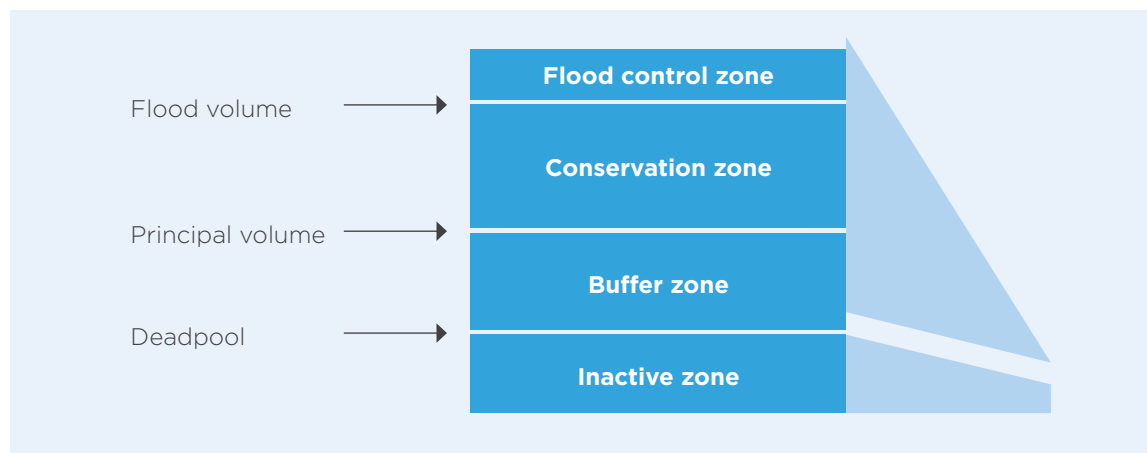
**La Conductividad Hidráulica** representa la facilidad con la cual el agua fluye a través del suelo debajo del embalse y se utiliza para calcular las pérdidas por filtración del embalse. Éste valor es una propiedad intrínseca del suelo.

### **La Capacidad de Almacenamiento**

En Hydro-BID, el almacenamiento del embalse se clasifica en dos categorías: **Volumen Principal** y **Volumen de Inundación**. Se puede decir que el **Volumen Principal** es el volumen accesible en un embalse; generalmente es el volumen de agua correspondiente cuando el nivel de agua está en el fondo del vertedero principal. El **Volumen de Inundación** puede ser considerado como el volumen máximo de almacenamiento normal en un embalse. Este es típicamente el volumen cuando el nivel de agua está en el fondo del vertedero. Los dos volúmenes y su relación con la zona de almacenamiento del embalse se ilustran en la **Figura 2-2**.



**Figura 2-2. Zonas de Almacenamiento del Embalse**



### **Definición de Descargas**

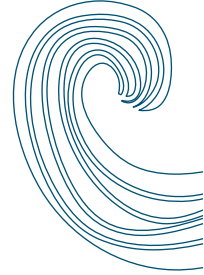
Hydro-BID tiene dos modalidades para simular las operaciones del embalse, conocidos como “opciones” en la interfaz de usuario. Cada opción tiene un conjunto único de parámetros utilizados para modelar las operaciones deseadas. Antes de la implementación de un embalse de Hydro-BID, se debe decidir cuáles son las metas operacionales. Las siguientes secciones describen las dos opciones disponibles.

### **Opción 0- Procedimientos de Operación Lineal Estándar**

El Procedimiento de Operación Lineal Estándar (SLOP, **por sus siglas en inglés**) es una técnica flexible usada comúnmente, para modelar las operaciones del embalse. SLOP se utiliza mejor para operaciones que involucren satisfacer una demanda aguas abajo, manteniendo un mínimo de flujo aguas abajo, o manteniendo los niveles de almacenamiento del embalse por debajo de un valor máximo admisible.

La implementación del SLOP requiere de los siguientes parámetros, los cuales se definen en la Base de Datos de Embalses Hydro-BID:

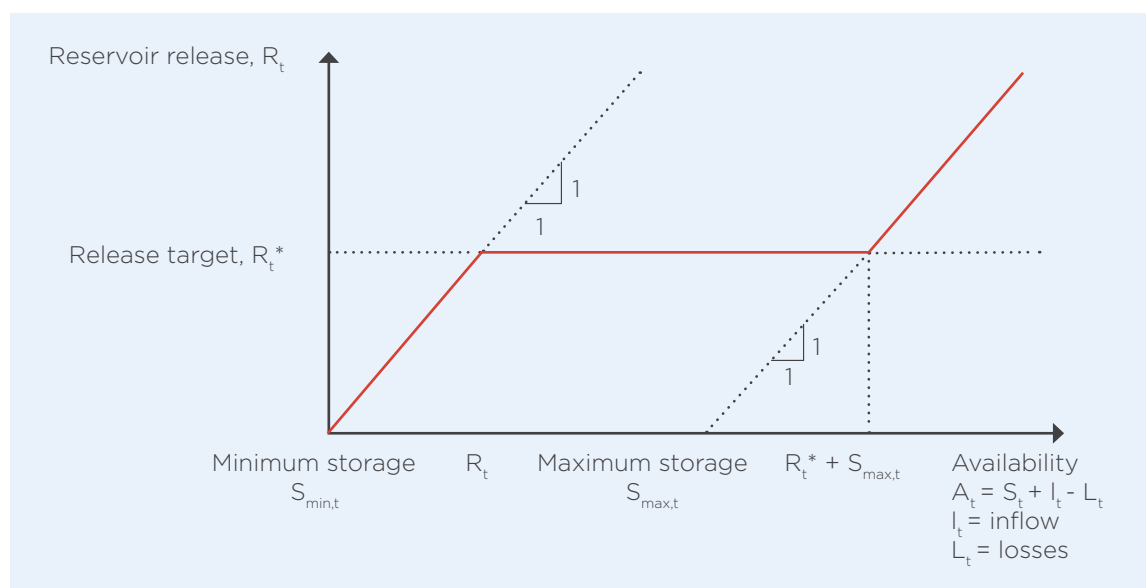
- **Meta de Flujo de Salida/Descarga (m<sup>3</sup>/día):** La cantidad deseada de agua que se descarga diariamente en un día dado, definido por mes. En Hydro-BID, este es mostrado como **min daily\_flow** en la interfaz de base de datos de Embalses por Mes. Esta podría ser la demanda de aguas abajo para ser satisfecha o un requerimiento de caudal mínimo.
- **Almacenamiento máximo (millones m<sup>3</sup>):** El mayor volumen de agua permitido en un embalse, definido por mes. En Hydro-BID, este es mostrado como **target\_storage** en interfaz de base de datos de Embalses por Mes. Con frecuencia este valor es igual al volumen de almacenamiento máximo para el cual puede utilizarse el vertedero principal sin el vertedero de inundación.



- **Almacenamiento mínimo (millones m<sup>3</sup>):** El menor volumen de agua permitido en un embalse. En Hydro-BID, esto se conoce como **principal\_vol** y se encuentra en la interfaz de base de datos de Embalses por Año.

Estos parámetros están implementados usando un algoritmo lineal que garantiza que las metas de flujo de salida sean descargadas en todas las situaciones donde hay suficiente almacenamiento disponible, y al mismo tiempo conservando los excedentes de almacenamiento para garantizar que las demandas futuras puedan ser satisfechas. La regla de operación, definida en términos de almacenamiento y flujo de entrada, se representan gráficamente en la **Figura 2-3**.

**Figura 2-3. Procedimiento de Operación Estándar, Resaltado en Rojo**

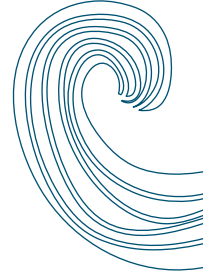


### **Opción 2-Mantener la Meta de Almacenamiento**

Esta opción de embalse mantiene una meta de volumen de almacenamiento específica para cada mes para un embalse. Esta opción es la mejor para mantener una constante de carga para la energía hidroeléctrica y la recreación. Esta opción también proporciona un modelo eficaz en ausencia de una meta de descarga diaria conocida.

Esta regla de descargas del embalse requiere de los parámetros siguientes que se definen en la Base de Datos de Embalses de Hydro-BID:

- **Meta de Almacenamiento (millones de m<sup>3</sup>):** El volumen de agua permitido en un embalse, definido por mes. En Hydro-BID, este es mostrado como **target\_storage** en la interfaz de base de datos de los Embalses por Mes. Con frecuencia este valor es igual al volumen de almacenamiento máximo para el cual puede utilizarse el vertedero principal sin el vertedero de inundación.



- **Tiempo para alcanzar la meta de almacenamiento:** el número de días tras el comienzo del mes antes que un embalse de almacenamiento deba llegar a la meta de almacenamiento. En el modelo, esto se conoce como **num\_days\_target**. Por ejemplo, si el parámetro es 4 y un embalse tiene 1.000 m<sup>3</sup> de almacenamiento por encima de la meta de almacenamiento, entonces 250 m<sup>3</sup> se descargarán cada día durante los primeros 4 días del mes para llegar a los niveles de la meta de almacenamiento.

Observe que la Opción 0, SLOP, se simplifica a la Opción 2 cuando la meta de la demanda se establece en cero.

Los métodos específicos para la implementación de embalses en Hydro-BID se pueden encontrar en la sección 3.4.

### **Datos de Salida/Output del Embalse**

Una vez que el embalse se implementa en Hydro-BID, el desempeño en la satisfacción de la demanda puede ser evaluado con estadísticas. Las siguientes estadísticas se exhiben en la ventana de salida/output bajo “Reservoir Statistics (Estadísticas de Embalses):”

**Confiabilidad de Tiempo (mensual y anual)** es una medida de la frecuencia con la cual un embalse alcanza o no alcanza la meta de la demanda. Los valores cercanos a uno indican que un embalse satisface las metas de la demanda de manera confiable. El valor es provisto para ambas escalas de tiempo, mensual y anual. Se calcula como:

$$\text{Time Reliability} = \frac{\text{Number of time periods in which demand was met}}{\text{Total number of time periods}} \quad (\text{E.22})$$

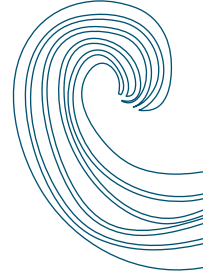
**La Confiabilidad de Volumen** representa la proporción total de la demanda que no es satisfecha en todos los períodos de tiempo. Un valor de uno indica que toda la demanda es satisfecha. El valor sólo será menor de uno si la Confiabilidad de Tiempo es menor que uno. La confiabilidad de volumen se calcula como:

$$\text{Volume Reliability} = 1 - \frac{\text{Total target demand} - \text{Total demand met}}{\text{Total target demand}} \quad (\text{E.23})$$

**La resiliencia** representa cuán rápido un embalse se recupera de fallas. Se calcula a lo largo de todo el período de tiempo como sigue:

$$\text{Resilience} = \frac{\text{Number of time periods in which demand was met}}{\text{Total number of time periods}} \quad (\text{E.24})$$





**La vulnerabilidad** es una medida de sensibilidad de un embalse con relación a fallas. Los valores cercanos a cero indican baja vulnerabilidad. El valor se calcula a lo largo de todo el período de tiempo simulado como sigue:

$$\text{Vulnerability} = \frac{\text{Sum of maximum shortfall during each failure period}}{\text{Number of continuous sequences of failure}} \quad (\text{E.25})$$

## 2.3 Modelaje de aguas subterráneas

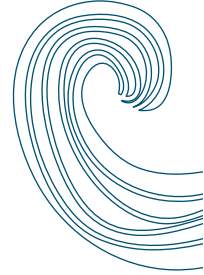
Esta sección resume el enfoque de RTI para el modelaje de la disponibilidad de aguas subterráneas y aguas superficiales integradas en Hydro-BID. El modelaje integrado permite la evaluación de los escenarios de disponibilidad de agua actuales y futuros que reflejen todo el presupuesto de agua (p. ej., ¿Qué impactos a corto o a largo plazo sobre la disponibilidad de aguas superficiales pueden resultar de un aumento o disminución en la dependencia de las aguas subterráneas?).

El enfoque del modelaje integrado se basa en una caracterización suficiente de la simulación del sistema de aguas subterráneas, incluyendo el marco geológico, los datos de elevación de las aguas subterráneas, los datos de bombeo de las aguas subterráneas y las propiedades hidrogeológicas. Para el proyecto piloto de este aspecto de Hydro-BID, se utilizó un modelo existente de la cuenca del Piura. Este modelo fue desarrollado por Ricardo Turkowsky Castagnola,<sup>2</sup> un consultor del Instituto Nacional de Recursos Naturales e Intendencia de Recursos Hídricos. El modelo fue desarrollado utilizando el modelo de USGS de flujo de aguas subterráneas MODFLOW (Harbough et al., 2000). Este modelo formó la base de las simulaciones de aguas subterráneas con algunas modificaciones al modelo que se documentan a continuación.

### **Antecedentes**

Una comprensión básica del ciclo del agua indica que las aguas subterráneas y las aguas superficiales se conectan entre sí y representan un recurso hídrico combinado. Sin embargo, tradicionalmente las evaluaciones de recursos hídricos han considerado las aguas subterráneas y las superficiales de manera independiente. Cuando había abundancia de recursos, esta división a menudo no importaba. Sin embargo, frente a la expansión de la población y el desarrollo, las presiones sobre el suministro de agua están aumentando incluso en muchas áreas tradicionalmente consideradas como ricas en agua. Una evaluación independiente de las aguas subterráneas y superficiales puede conducir a problemas tales como la doble contabilidad y la sobreasignación de recursos hídricos. Una gestión adecuada de recursos hídricos bajo estrés debe considerar la combinación de los recursos de agua y deben representar las aguas subterráneas y las aguas

<sup>2</sup> Ricardo Turkowsky Castagnola, Abril 2006, Modelamiento Matemático del acuífero del Valle Alto Piura para la Evaluación de la oferta de Aguas Subterráneas y su asignación para la formalización de Derechos de uso de agua.



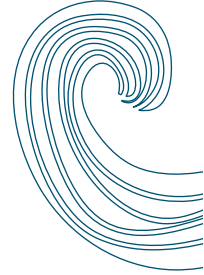
superficiales y su interacción. Los modelos hidrológicos integrados de procesos superficiales y subterráneos integrados (el presupuesto de agua completo) se debe desarrollar para cuantificar los impactos de este estrés y también para evaluar las interacciones entre los sistemas de aguas superficiales y subterráneas.

Típicamente los modelos de aguas superficiales incluyen representaciones simplificadas del flujo del agua subterránea local tales como uno o varios compartimientos que describan el almacenamiento subterráneo (por ejemplo, SAC-SMA, GWLF) o una representación idealizada del flujo subterráneo (p. ej., TOPMODEL). Los modelos de agua superficial generalmente tienen una representación más detallada de los procesos superficiales y subterráneos poco profundos como la escorrentía, infiltración y evapotranspiración. En contraste, los modelos de aguas subterráneas (por ejemplo, MODFLOW) suelen destacar las condiciones subsuperficiales tridimensionales en detalle así como las características hidráulicas heterogéneas; sin embargo, típicamente los modelos de aguas subterráneas se basan en descripciones simplificadas de la hidrología de superficie con procesos superficiales que a menudo se caracterizan sólo por tasas de recarga a largo plazo.

El modelaje independiente de las aguas superficiales y las aguas subterráneas puede tener ventajas si uno de los dos recursos es dominante. Por ejemplo, en las zonas donde sólo se utilizan las aguas superficiales, el modelaje de las aguas superficiales para dar cuenta de una variación con frecuencia alta de precipitación y de generación de la escorrentía correspondiente, se hace esencial. En las áreas donde el uso del agua está dominado por el bombeo de los sistemas de aguas freáticas profundas, una representación amplia de la geología subsuperficial y de la recarga regional por un modelo de aguas subterráneas se hace apropiada.

Sin embargo, el desarrollo de los recursos hídricos es cada vez más dependiente de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos. La dependencia simultánea entre ambos recursos puede dar lugar a interacciones entre los dos sistemas que no pueden ser representados adecuadamente en los modelos independientes de aguas superficiales y subterráneas. Por lo tanto, un modelo integrado de las aguas superficiales y subterráneas es necesario para dar cuenta de 1) la abstracción de aguas tanto superficiales como subterráneas, y 2) las interacciones dinámicas (retroalimentación) entre los regímenes de aguas superficiales y subterráneas.

Los métodos existentes para simular la dinámica de las aguas subterráneas y las interacciones de aguas superficiales se pueden categorizar como 1) el enfoque completamente integrado o 2) el enfoque de regiones-acopladas (Markstrom et al., 2005). El enfoque completamente integrado representa la dinámicas de flujo el aguas superficiales y subterráneas a través de ecuaciones diferenciales acopladas completamente que se resuelven simultáneamente (Panday y Huyakorn, 2004). Este enfoque requiere de una caracterización muy detallada y una resolución espacial y temporal de pequeña escala, limitando así su aplicabilidad potencial en muchos casos. El enfoque de regiones-acopladas implica el uso de un modelo de aguas superficiales para simular el dominio de la superficie y el uso de un modelo de aguas subterráneas para simular el dominio de las aguas subterráneas, mientras que acopla los modelos a través de términos comunes (por ejemplo, superficie de la infiltración del agua es igual a la recarga de las aguas subterráneas).

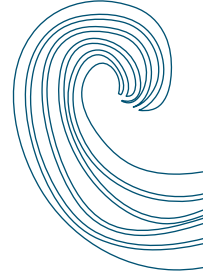


El enfoque de regiones-acopladas fue utilizado para desarrollar el modelo USGS GSFLOW (Markstrom et al., 2005). GSFLOW está basado en el acoplamiento de los dos modelos existentes, el sistema de modelaje Precipitación-Escorrentía (PRMS, por sus siglas en inglés) modelo de aguas superficiales (modelo Leavesley et al., 2005) y el MODFLOW modelo de aguas subterráneas (Harbaugh et al., 2000). GSFLOW simula el flujo dentro de y entre las tres regiones. La primera región está delimitada en la parte superior por el follaje de plantas y en la parte inferior por el límite inferior de la zona del suelo; la segunda región consiste de todos los arroyos y lagos; y la tercera región es la zona subsuperficial debajo de la zona del suelo. El PRM simula las respuestas hidrológicas en la primera región y MODFLOW-2005 simula los procesos hidrológicos en las regiones segunda y tercera. El acoplamiento entre modelos se logra corriendo las simulaciones iterativamente hasta que los resultados convergen.

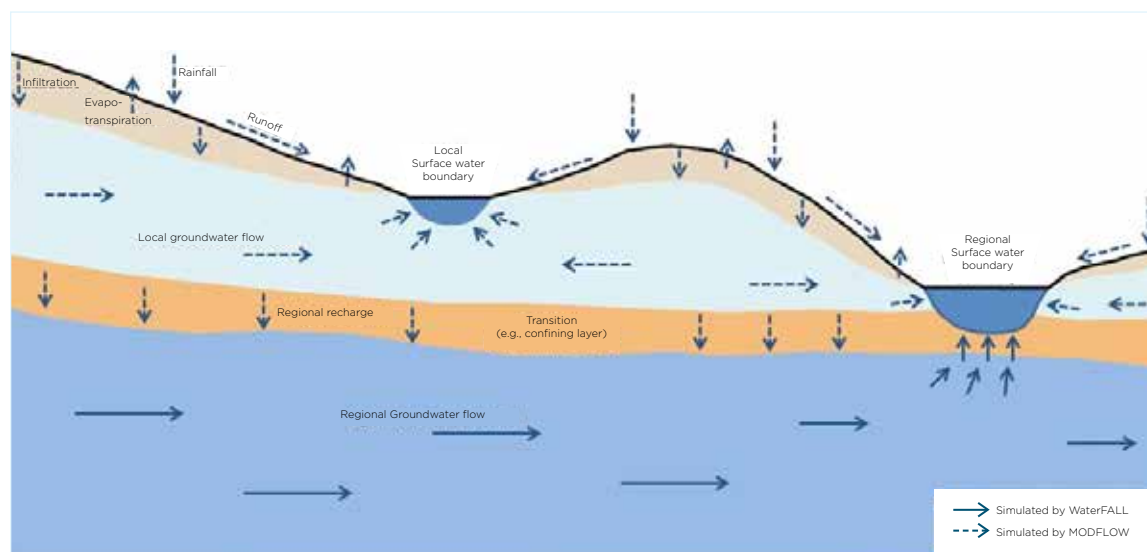
Nuestro enfoque es similar a GSFLOW pero con diferencias importantes. Vinculamos el modelo de aguas superficiales de Hydro-BID con el modelo de aguas subterráneas MODFLOW. Hydro-BID representa la superficie de la cuenca y el flujo de la sub-superficie local (no-saturada y saturada) en un nivel pequeño de captación mientras MODFLOW representa el flujo de las aguas subterráneas regional. Hemos supuesto de simplificación que hacen que el enfoque sea de más fácil aplicación para sistemas de gran escala en comparación con GSFLOW y métodos similares. Por ejemplo, se requiere de información menos detallada para caracterizar los sistemas de aguas subterráneas a escala local. Además, la matemática de nuestro enfoque ofrece una solución más robusta y eficiente cuando se compara con otros modelos integrados, que a menudo tienen una importante estabilidad numérica y problemas con el tiempo de corrida. A pesar que nuestro enfoque no va a resolver detalles a escala local como otros métodos (por ejemplo, los niveles de las aguas subterráneas poco profundas), sí caracteriza a escala regional la dinámica de la disponibilidad de agua basada en la interacción de los sistemas de aguas subterráneas y superficiales.

### ***El enfoque de Modelaje Integrado***

La metodología para la evaluación de la disponibilidad de agua superficial y agua subterránea implica la vinculación de Hydro-BID con MODFLOW. **La Figura 2-4** ilustra los componentes del ciclo del agua, simulados por Hydro-BID y MODFLOW, respectivamente. Hydro-BID representa las precipitaciones, la escorrentía, infiltración y los flujos de agua subterránea locales, mientras que MODFLOW representa los flujos de aguas subterráneas regionales y las descargas. En consecuencia, los límites de las aguas superficiales que no interactúan significativamente con el sistema de flujo de aguas subterráneas regionales no se incluirán en el modelo MODFLOW. Más bien, MODFLOW simulará cuerpos de agua superficiales relativamente más grandes que son límites importantes de recarga/descarga para el flujo regional de las aguas subterráneas. Este debate comienza con una descripción resumida de los modelos Hydro-BID y MODFLOW, seguido por una descripción del enfoque para integrarlos.

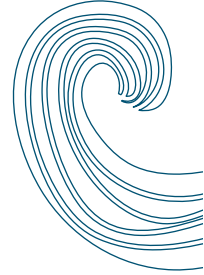


**Figura 2-4. Representación del Ciclo del Agua dentro del Modelo Integrado de Disponibilidad de Aguas Subterráneas y Aguas Superficiales**

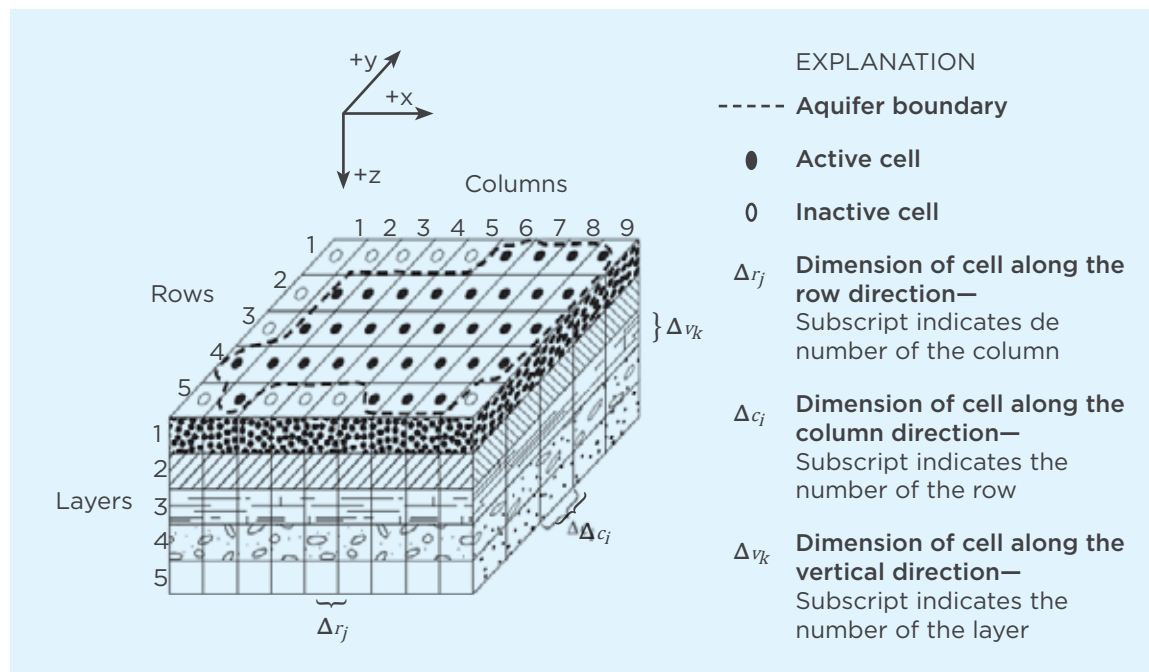


### **Descripción general de MODFLOW**

MODFLOW es un modelo tridimensional de flujo de aguas subterráneas elaborado por el USGS y publicado por primera vez en 1984. El modelo tiene una estructura modular que permite ampliaciones y adaptaciones para una amplia gama de condiciones de aguas subterráneas; muchas funciones han sido añadidas al modelo original. MODFLOW simula el estado estacionario o transitorio del flujo de las aguas subterráneas. El dominio del modelo puede ser de capas de acuíferos de forma irregular que puede ser confinadas o no confinadas. Factores de estrés externos sobre el acuífero pueden incluir el bombeo o inyección hacia o desde pozos, área de recarga, evapotranspiración, flujo a drenajes, y el flujo hacia o desde ríos. La conductividad hidráulica y otros parámetros (por ejemplo, almacenamiento específico) pueden variar espacialmente dentro del dominio del modelo. El método de diferencias finitas se utiliza para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas, por lo cual el dominio del modelo se subdivide en celdas de la cuadrícula dentro de las cuales se presumen propiedades que son uniformes. El tamaño de las celdas de la cuadrícula puede ser de escala pequeña o grande (por ejemplo, para representar flujos de escala local a regional y las heterogeneidades). Una cuadrícula MODFLOW consta de líneas perpendiculares entre sí que pueden ser espaciadas de forma variable. Las capas del modelo pueden tener diferentes grosores. **La Figura 2-5** ilustra un modelo de cuadrícula con células activas e inactivas y cinco capas. El enfoque de diferencias finitas implica el desarrollo de ecuaciones de flujo acoplado (una para cada celda de la cuadrícula) y resolver la matriz resultante de la representación del problema de flujo. MODFLOW proporciona varias alternativas para resolver, ofreciendo diferentes métodos numéricos para resolver las ecuaciones de matriz. La distribución de cabezales hidráulicos, caudales, y los balances de masa se resuelven para cada paso del tiempo.



**Figura 2-5. Ilustración de un MODFLOW con cinco capas de cuadrícula**

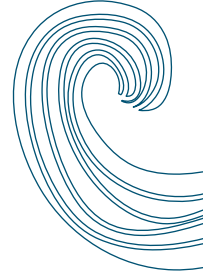


Fuente: Markstrom et al., 2005).

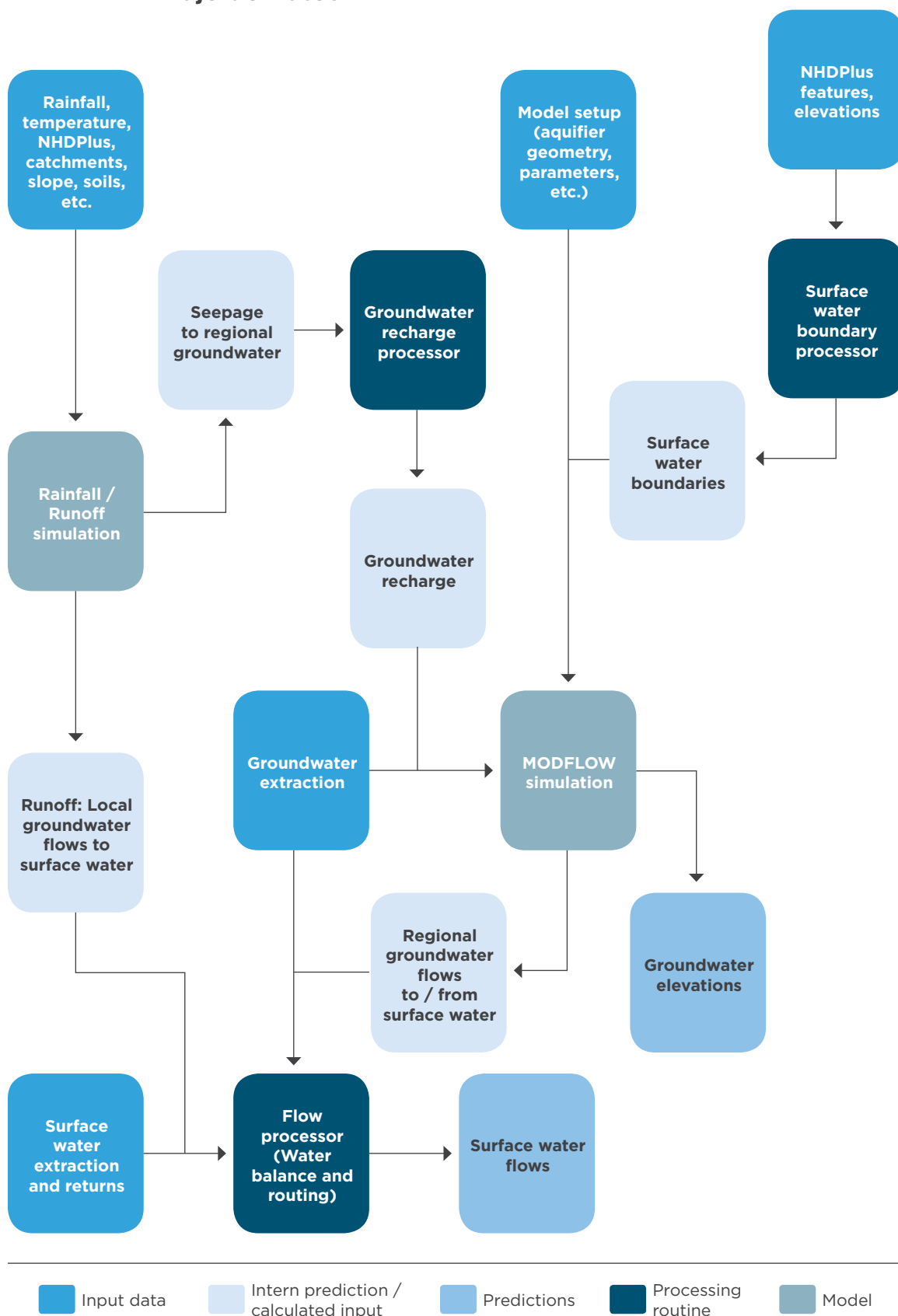
### El Enfoque de Modelaje Integrado

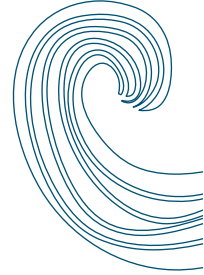
La **Figura 2-6** ilustra los componentes del modelo integrado junto con los flujos de datos, el procesamiento de rutinas, y las predicciones del modelo. La **Tabla 2-6** resume los componentes del modelo integrado y las entradas/input y salidas/output asociadas. La explicación que sigue considera cada uno de los componentes del modelo.

El modelo Hydro-BID de aguas superficiales predice la escorrentía diaria y el flujo del agua subterránea local al agua superficial para cada cuenca AHD dentro de las cuencas simuladas. Los datos de entrada/input claves para Hydro-BID incluyen las precipitaciones, la temperatura, las cuencas de captación AHD, la pendiente del terreno, y las características del suelo. También Hydro-BID calculará diariamente la infiltración descendente a las aguas subterráneas regionales para cada cuenca AHD. El flujo del agua subterránea regional incluye el agua que no descarga a la masa de agua superficial dentro de la cuenca local; por el contrario, los caudales regionales ocurren dentro de sistemas más grandes de flujo de aguas subterráneas y, en última instancia, puede ser extraído o puede descargar a otros cuerpos de agua superficiales.



**Figura 2-6. Modelo de Disponibilidad de Aguas Superficiales y Subterráneas Integrado, Esquema de Simulación y Flujo de Datos**

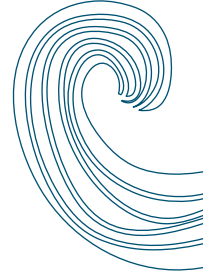




**Tabla 2-6. Los Componentes, Entradas/inputs y Salidas/outputs del Modelo Integrado**

Componentes del modelo integrado	Entradas	Salidas
Hydro-BID	Lluvia, temperatura, las cuencas de captación de AHD, pendiente, suelos, etc.	Resultados diarios para cada cuenca AHD: escorrentía, flujo de agua subterránea local al agua superficial, filtración profunda
Procesador de recarga de aguas subterráneas	Filtración profunda	Series de Tiempo de recarga de las aguas subterráneas para cada celda de la cuadrícula (formato MODFLOW)
Procesador de límite de las aguas superficiales	Características y elevaciones de AHD	Ubicaciones y especificaciones del límite de aguas superficiales (formato MODFLOW)
MODFLOW	Configuración del modelo (geometría del acuífero, parámetros, extracción, etc.), recarga, límites del agua superficial	Elevaciones de las aguas subterráneas El flujo de las aguas subterráneas regionales a/desde las aguas superficiales
Procesador de flujo	Escorrentía, flujo de agua subterránea local al agua superficial, extracción de agua superficial y los retornos, extracción de aguas subterráneas, flujos de aguas subterráneas regionales hacia/desde las aguas superficiales	Flujos de agua superficiales

El procesador de La recarga de las aguas subterráneas convierte la infiltración profunda (predicha por Hydro-BID) en la recarga de las aguas subterráneas para el modelo de aguas subterráneas. Esta herramienta desarrolla las tasas de recarga para cada celda de cuadrícula de aguas subterráneas del modelo basado en las tasas de filtración profunda específicas de cuenca. **La Figura 2-7** es un ejemplo de sobreposición de las cuencas de captación AHD (ilustrada en naranja) con una cuadrícula del modelo de aguas subterráneas (ilustrada en negro).



**Figura 2-7. Ejemplo de la Cuadrícula MODFLOW (negro) sobrepuesto en Cuencas AHD (naranja).**



El procesador de recarga calcula la recarga para cada celda de la cuadrícula del modelo a través de promedios ponderados por área de las tasas específicas de filtración profunda. La herramienta crea un archivo de entrada del paquete de recarga MODFLOW para el modelo de flujo de aguas subterráneas. La recarga total se calcula para el paso de tiempo del modelaje de aguas subterráneas dentro de una cuenca y luego distribuida a las cuadrículas de la cuenca de acuerdo a la siguiente fórmula:

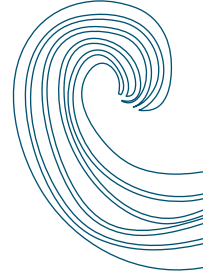
$$\text{Recharge} = \sum_t L_t \quad (\text{E.26})$$

La recarga sirve como una entrada/input directa a MODFLOW.

El procesador de límite de las aguas superficiales utiliza las características de aguas superficiales de AHD (líneas de flujo y áreas) y las elevaciones asociadas para crear los límites de aguas superficiales para el modelo de aguas subterráneas. Esta herramienta crea un archivo de entrada/input de la frontera fluvial MODFLOW que contiene las especificaciones de los límites de las aguas superficiales.

La simulación MODFLOW predice las elevaciones de las aguas subterráneas, así como las tasas de flujo de aguas subterráneas regionales desde y hacia los cuerpos de agua superficiales. Así como se explica anteriormente, la recarga y los límites de aguas superficiales se proporcionan desde el modelo integrado. La





configuración restante del modelo de aguas subterráneas (por ejemplo, la geometría del acuífero, conductividad hidráulica, almacenamiento específico, las tasas de extracción) se desarrolla de manera independiente.

El procesador de flujo predice los flujos de agua superficial basados en cálculos de enrutamiento de las aguas superficiales y los siguientes resultados de flujos: 1) Las extracciones de agua superficial y los retornos, 2) las predicciones de Hydro-BID de flujos de escorrentía y del agua subterránea local hacia las aguas superficiales, 3) las tasas de extracción de agua subterránea (convertida a retornos de agua superficial), y los flujos de aguas subterráneas regionales hacia y desde las aguas superficiales. Esta información es recopilada y procesada para predecir los flujos de agua superficial que reflejen el rango de flujos de entradas y de salidas predichos por el modelo integrado.

### 2.3.1 Parametrización de las aguas subterráneas

Para vincular Hydro-BID y MODFLOW, es necesario especificar los siguientes parámetros:

#### ***Multiplicador de Conductividad Hidráulica***

Este parámetro ajusta la escala de todos los valores de conductividad hidráulica en la cuadrícula MODFLOW por el valor especificado. Se recomienda un valor predeterminado de 1.

#### ***Multiplicador de Nivel***

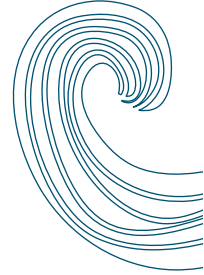
El multiplicador de nivel ajusta la escala del nivel de aguas superficiales por el valor especificado. Se recomienda un valor predeterminado de 1.

#### ***Multiplicador de Conductancia Fluvial***

Este parámetro ajusta la escala de conductancia (conectividad) en la interfaz de aguas superficiales-subterráneas. Los valores altos acelerarán la conductancia y los valores bajos harán más lento el proceso. Se recomienda un valor predeterminado de 1.

### 3. La funcionalidad y el uso del sistema Hydro-BID





El Sistema Hydro-BID incluye las base de datos AHD (Analytical Hydrographic Dataset), el modelo combinado de Función de Carga de Cuenca Generalizada (GWLF / Tiempo de Retardo-Enrutamiento de RTI (lag-routing) y la interfaz gráfica de usuario (GUI), los cuales se proveen como archivos ejecutables. La AHD se describe en el Apéndice A y, con mayor detalle, en la Nota Técnica 1 de esta serie.

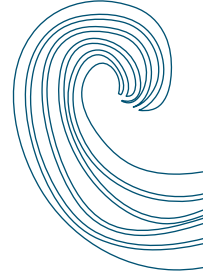
En esta sección, se describe como instalar el modelo, usar el GUI, ejecutar el modelo y visualizar los resultados. También se describen los pasos y las opciones disponibles para conducir simulaciones hidrológicas bajo múltiples escenarios.

### 3.1. Registro de Hydro-BID

Al instalar Hydro-BID, ejecutando el archivo installer.jar, la herramienta de instalación se va a conducir por una serie de pasos para configurar Hydro-BID en el directorio deseado. Cuando el usuario abre Hydro-BID por primera vez, se le pedirá que llene el formulario de información del usuario, que se muestra en la **Figura 3-1**.

**Figura 3-1: Formulario de Información del Usuario Hydro-BID**

Esto generará una clave hash y dará instrucciones de ponerse en contacto con el centro de apoyo y enviar el archivo “user.info” (la carpeta de este archivo se abre después de pulsar ACEPTAR (OK) en el mensaje de instrucción). El personal de apoyo utilizará el programa de validación de licencias Hydro-BID, que se muestra a continuación en la Figura 3-2 para entrar la fecha de vencimiento (o hacer clic en la casilla de verificación para una licencia permanente) y la clave hash proporcionada en el archivo user.info para generar una clave de licencia cifrada. Esta será enviada de vuelta al usuario con instrucciones sobre cómo registrarse.



**Figura 3-2. Validación de Licencias de Hydro-BID**

Hydro-BID Security

Enter expiration date:   Permanent License

Enter hash string:

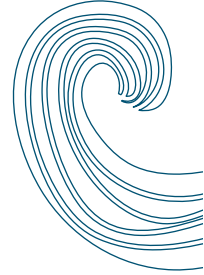
License Key:

Los usuarios tendrán la opción de registrarse en cualquier momento siguiendo a Ayuda -> Registrar Licencia y utilizar el campo que se muestra a continuación en la Figura 3-3.

**Figura 3-3. Herramienta de Registro de Hydro-BID**

Registration

Please copy and paste the license key provided into the field below:



También se le pedirá al usuario que haga el registro si no lo ha hecho durante 10 días después de usar el programa la primera vez. Después de los 10 días, el usuario no podrá utilizar el programa hasta que se haya registrado. También se les notificará 2 semanas antes de vencer su licencia y se pide que actualice su información de usuario y se ponga en contacto con su representante de Hydro-BID. Luego, se puede registrar de nuevo o conseguir la última versión de Hydro-BID.

## 3.2 Salidas/Outputs del Modelo

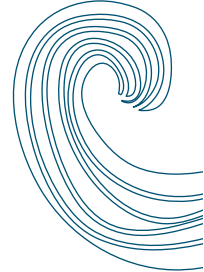
Hydro-BID genera series de tiempo de características hidrológicas múltiples, incluyendo precipitación, flujo base, flujo total enrutado, almacenamiento de la humedad del suelo y la evaporación. Estas series de tiempo son guardadas en archivos de valores fácilmente utilizables separados por coma (.csv) en un directorio de salidas/outputs especificado durante la configuración del modelo.

En base a la salida/output anterior y a las series de tiempo de flujo observadas, Hydro-BID puede producir visualizaciones para la mejor comprensión de los resultados. Para generar estos gráficos y ver el resumen de estadísticas, se debe navegar a la ficha de salida (Output) en la ventana Hydro-BID después de correr con éxito el modelo y hacer clic en Ver Estadísticas y Gráficos, como se muestra en la **Figura 3-4**.

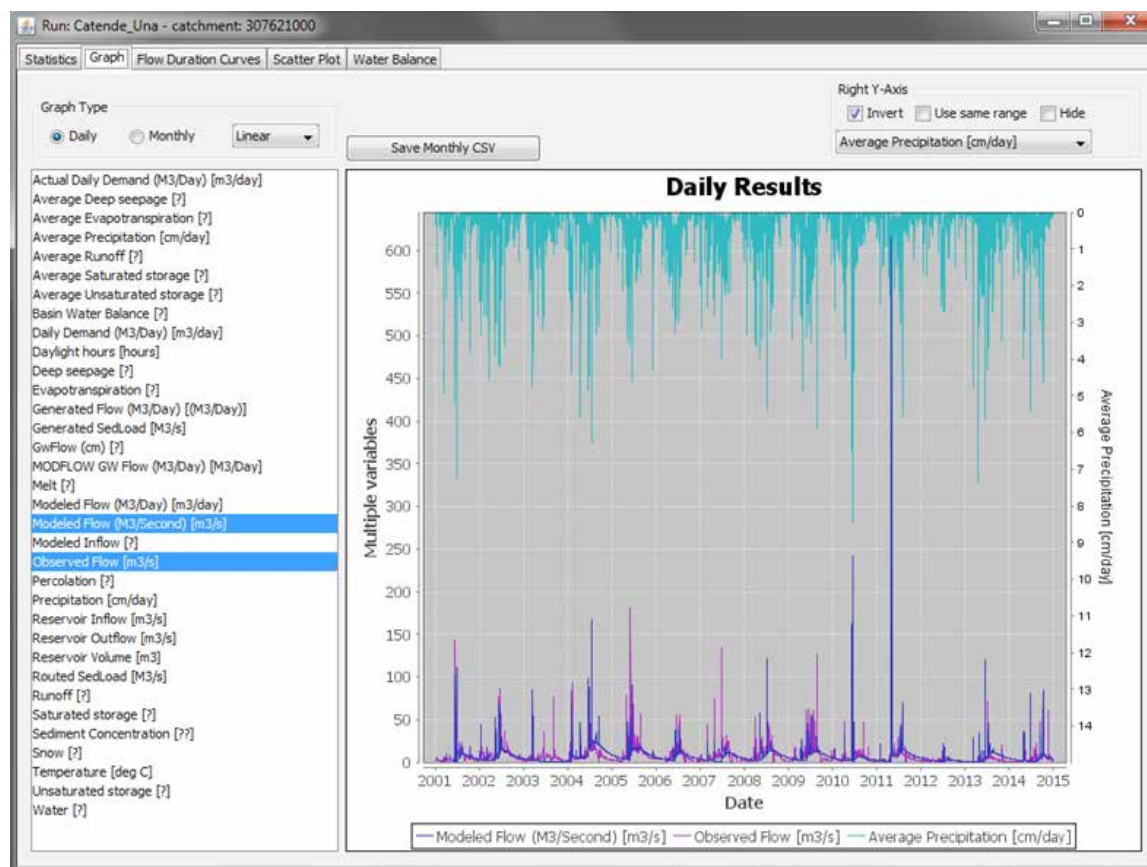
**Figura 3-4. Ficha de Salida (Output) en el Modelo Central de Hydro-BID**



Las visualizaciones de salidas del modelo pueden verse en la ficha Visor de Datos (Data Viewer). La ficha de Grafico (Graph) muestra un hidrograma (**Figura 3-5**) y permite otras series temporales que se van a representar en escala mensual con registro o escala normal. Junto con los nuevos módulos, se desarrollaron nuevas opciones de visualización para incluir nuevas variables de salida tales como flujo de agua subterránea, concentración de sedimentos y flujos de entrada, salida y volumen de embalses.

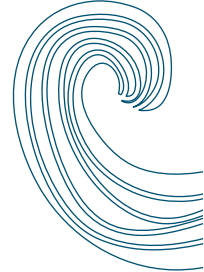


**Figura 3-5. Hidrograma con Flujos Observados y Simulados**

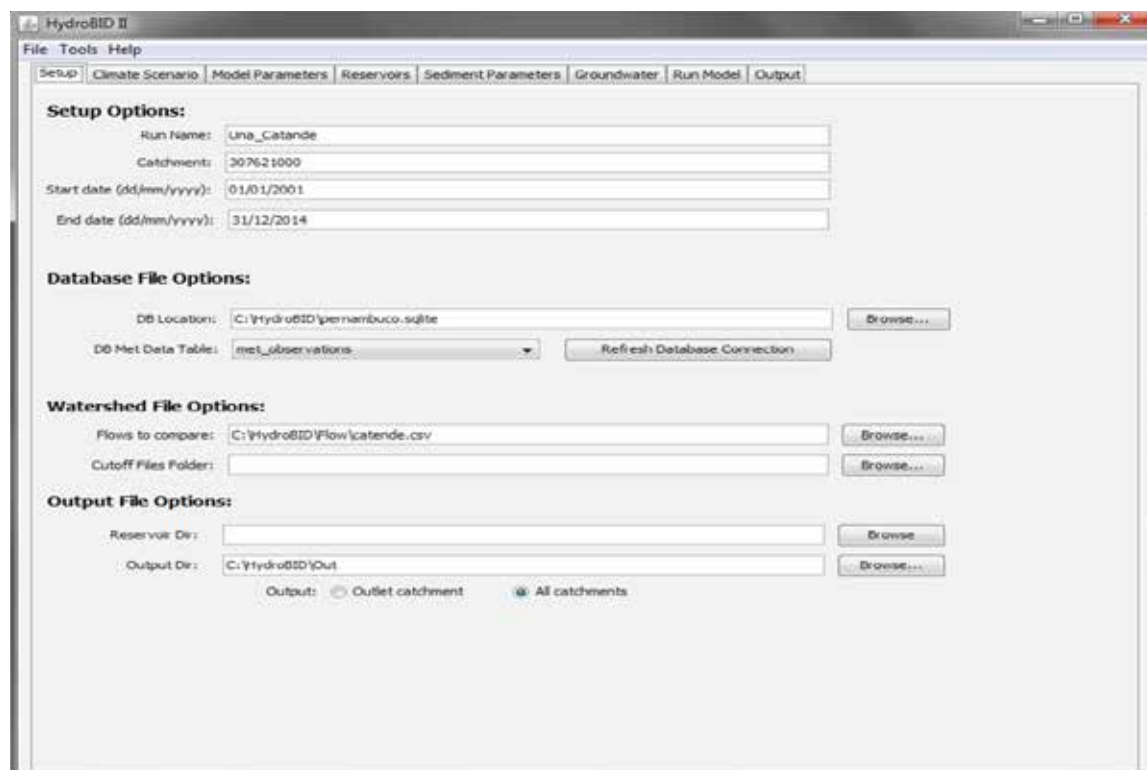


### 3.3 Parámetros y Opciones de Modelaje en Hydro-BID

En esta sección se describen en detalle los parámetros de las entradas/input de los nuevos módulos de Hydro-BID y se presentan varias opciones disponibles para el modelaje de una cuenca. Considere nuevamente la ficha de Configuración (set-up) que se muestra en la **Figura 3-6**, que ahora incluye fichas para las nuevas características (Embalses y Aguas Subterráneas).



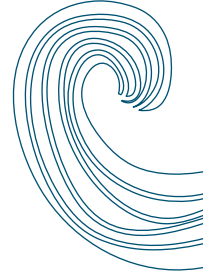
**Figura 3-6. Interfaz Hydro-BID - Ficha de Configuración**



Aunque Hydro-BID está diseñada principalmente para representar procesos hidrológicos naturales, hemos mejorado el sistema para ser utilizado en áreas donde hay cuencas con alteración antropogénica significativa. Dicha alteración incluye embalses. Por ejemplo, si la cuenca de captación superior de un río grande contiene un embalse grande y se conoce la descarga del embalse, el sistema puede simular las cuencas de captación aguas abajo del embalse. Esto se logra al proveer unas series de tiempo de flujos (descargas) desde el embalse. El formato del archivo se proporciona en el **Apéndice C**.

Cabe destacar que de existir embalses en varias ramificaciones de la cuenca, múltiples interrupciones (cutoffs) pueden ser provistos guardando las series de tiempo de las descargas. Esta mejora permite aplicar el modelo en cuencas grandes con embalses. Mas aun, si se requieren los flujos de entrada a los embalses las cuencas aguas arriba de los embalses se pueden simular como cuencas separadas.

Hydro-BID genera dos conjuntos de archivos de salida: de series temporales de cuencas y de rendimiento de embalses. Los archivos de embalse se generan en el directorio especificado como "Reservoir Dir" ("Embalse Dir"), mientras que el resto de los resultados de salida del modelo son colocados en el "Output Dir". Tenga en cuenta que la información de salida/output de embalses sólo ocurre si los embalses están activos.



El sistema permite opciones para guardar los flujos en todas las salidas de las cuencas o sólo en la cuencas más aguas abajo (es decir, el punto de fluidez). En el ejemplo mostrado en la **Figura 3-8**, el resultado de la simulación de únicamente el punto de salida aguas abajo se proporciona al final de la simulación. Esta opción es la deseada, si la cuenca abarca un gran número de cuencas de captación, así como cuando se realiza la calibración inicial. En circunstancias cuando se necesitan análisis de los flujos para cada cuenca de captación simulada (por ejemplo, los puntos de desvío del suministro de agua), Hydro-BID debe correrse con la opción “Todas las Cuencas” (“All Catchments”) especificadas. Esto hará que el modelo de resultados de todas las cuencas de captación de la hoya hidrográfica.

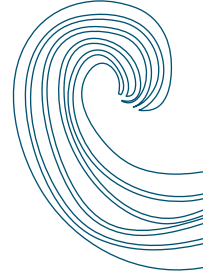
**Figura 3-7. Opciones de Archivo de Salida/Output**

Los parámetros de configuración que se muestran en la interfaz anterior (**Figura 3-6**) se resumen para referencia rápida en la **Tabla 3-1**.

**Tabla 3-1. Parámetros de configuración**

Configuración y Opciones de Archivo	Descripción
Nombre de Corrida (Run Name)	Un identificador de corrida (run)
Cuenca de captación	ID del punto de salida de la cuenca que corresponde con la especificación de la AHD
Fecha de inicio mes/día/año	Fecha de inicio de la simulación
Fecha de finalización mes/día/año	Fecha de finalización de la simulación
Localización DB	Localización de la base de datos (proveer camino completo). Ejemplo: C:/projects/ca.sqlite
Tabla Meta Data DB	Nombre de la Tabla en la base de datos anterior que contiene los datos climáticos interpolados
Actualizar Conexión con la Base de datos	Hacer clic para confirmar que Hydro-BID está conectada a la base de datos del proyecto
Flujos a comparar	Archivo de entrada para las series de tiempo de flujos observados. Se usa para comparar con los flujos simulados. Ver archivos de ejemplo para los formatos.
Reservoir Dir (Embalse)	Localización de los archivos de salida/output de embalses
Output Dir	Localización de los archivos de salida/output, ejemplo: C:/projects/out



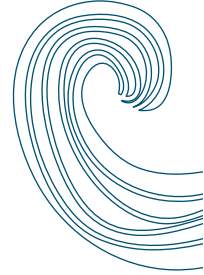


Los parámetros del modelo hidrológico se describen en la **Tabla 3-2**.

**Tabla 3-2. Los parámetros del modelo hidrológico**

Configuración y Opciones de Archivo	Descripción	Valor Sugerido
Velocidad fluvial	Velocidad promedio estimada de la corriente.	0.5 m/s
Latitud	Ubicación del centroide de la cuenca. Este valor puede obtenerse de la tabla AHD.	
Inicio de estación de cultivo	Fecha juliana del día de inicio de la estación de cultivo.	
Fin de la estación de cultivo	Fecha juliana del último día de la estación de cultivo de la región.	
AWC	Contenido de Agua Disponible (AWC, por sus siglas en inglés): Este parámetro puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas (Los valores de las cuencas están disponibles)*	10 cm
Coeficiente R	Coeficiente de Recesión: Este parámetro puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas. (Los valores de las cuencas no están disponibles). *	0.01
Filtración	Coeficiente de filtración para determinar la infiltración profunda desde la capa saturada. Este parámetro puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas. (Los valores de las cuencas no están disponibles).*	0.005
Factor de ET de la estación de cultivo	Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo. Este parámetro puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas. (Los valores de las cuencas no están disponibles).*	1.0
Factor de ET de la estación de latencia.	Factor de evapotranspiración durante la estación de latencia (cuando no se está cultivando). Este parámetro puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas. (Los valores de las cuencas no están disponibles).*	1.0
Porcentaje de la cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca en %. Este parámetro puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas. (Los valores de las cuencas no están disponibles).*	2%

\* Para estos parámetros, los valores individuales de las cuencas no se obtienen directamente y se pueden estimar a partir de otras propiedades de la cuenca. Una vez hayan sido estimadas e indexadas, se puede utilizar la opción del multiplicador.

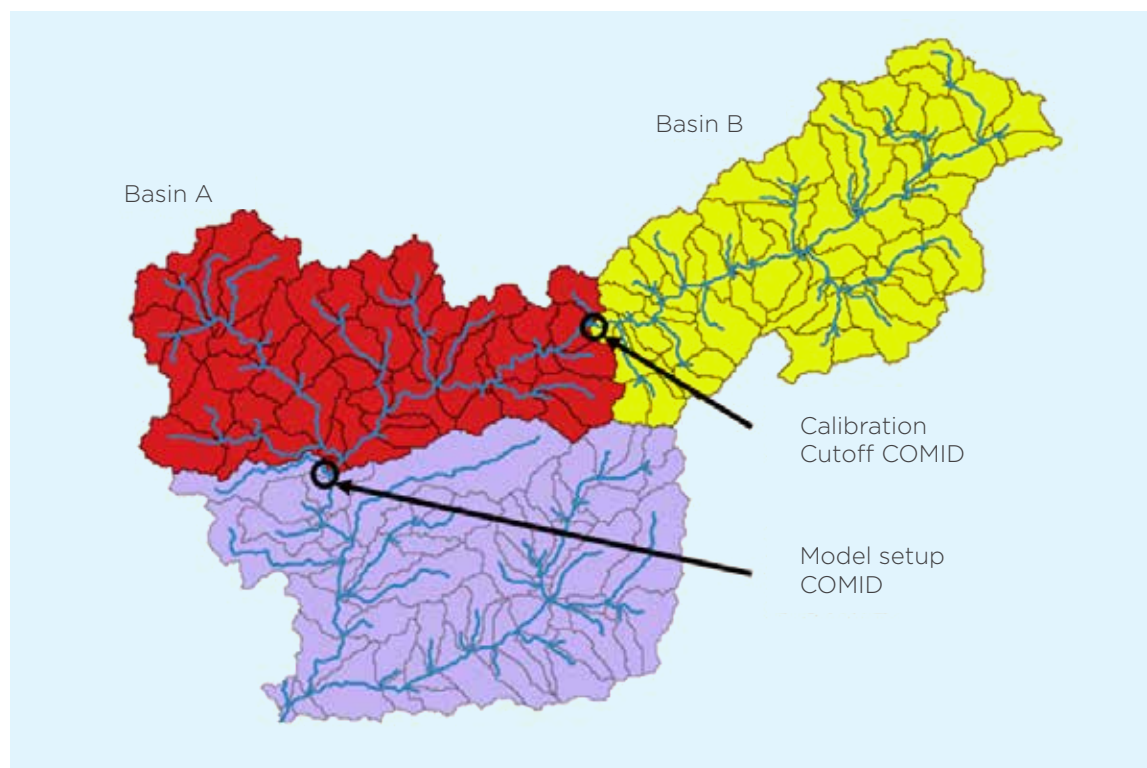


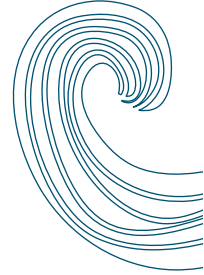
### Calibración COMID Cutoff (Cuenca Interrumpida)

La página de parámetros del Modelo permite un control preciso sobre la extensión espacial de una calibración usando la modalidad de COMID Cutoff (cuenca interrumpida) en la pestaña de Parámetros de Modelo. De manera predeterminada, Hydro-BID aplica los parámetros para todas las cuencas aguas arriba de la cuenca especificado en la pestaña de configuración (la cuenca completa que se está modelando). Sin embargo, puede ser que esto no sea deseado siempre, por ejemplo, en cuencas con una topografía diversa drenando varios tipos de ecosistemas y cobertura de tierra.

La calibración de COMID Cutoff define una cuenca que sirve como el límite aguas arriba para reemplazar los valores de los parámetros. Si se selecciona “Reemplazar todos” (“Replace All”) y se entra un valor para el “cutoff”, los parámetros sólo se sobrescriben en cuencas aguas arriba de la COMID de configuración y aguas abajo de la COMID Cutoff. Considere la cuenca que se muestra en la **Figura 3-9**.

**Figura 3-8. Ejemplo de Cuenca COMID cutoff**





Durante la configuración de Hydro-BID, la cuenca en la salida de la hoya hidrográfica se especifica como la COMID de configuración del modelo. Ambas cuencas A y B drenan a este punto. Sin embargo, B está aguas arriba de A. Si la COMID cutoff de calibración se deja en blanco, los valores calibrados se aplican para ambas cuencas A y B. Sin embargo, si la COMID cutoff de calibración se especifica como la salida de cuenca B, los valores calibrados sólo aplicarían a la cuenca A.

Esta función también es útil para calibrar las cuencas aguas abajo de los puntos que ya cuentan con una calibración correcta. Simplemente se entra la COMID que está más aguas abajo de la cuenca calibrada correctamente como la COMID Cutoff, evitando así sobrescribir los parámetros.

El campo de COMID Cutoff de calibración tiene la capacidad de tener múltiples puntos de interrupción (cutoff). Las COMIDs para cada cuenca cutoff deben estar separadas por comas.

### 3.3.1 Archivo de Configuración (setting)

Hydro-BID guarda automáticamente todas las configuraciones y parámetros de la interfaz como un archivo de texto en el directorio de salida/output (**Figura 3-10**) denominada como Runname\_Setting.txt. El archivo de configuración permite repetir idénticamente la corrida del modelo en cualquier momento en el futuro. Para abrir un archivo de configuración anterior, se debe navegar hasta Archivo (File) luego Abrir (Open) ... y seleccionar el archivo Runname\_settings.txt deseado.

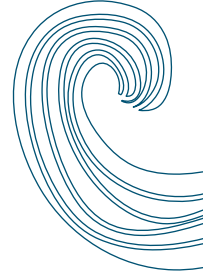


Figura 3-9. Archivo de Configuración

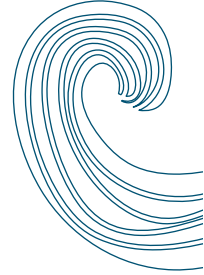
```
Tes313678200-settings.txt - WordPad
File Edit View Insert Format Help

mavel=.5
awc=0.9
cutoffFilesFolder=
temperatureadjustment=0
catchment=313951000
imperviousCover=2
endofgrowingseason=210
dblocation=C:\Projects\LAC-LatinAmerica\Iwrn_ver1\SA.sqlite
rcoefficient=.005
seepage=0.05
growSeasonETCoverFactor=1
precipitationadjustment=0
flowComparisonData=C:\Projects\LAC-LatinAmerica\Iwrn_ver1\San_f
startofgrowingseason=115
startdate=1/1/2000
climatedata=C:\Projects\LAC-LatinAmerica\Iwrn_ver1\Ref_climate
dormatSeasonETFactor=1
precipitationmultiplier=0.8
latitude=-30
enddate=31/12/2010
runname=Tes313678200
outputdir=out
awcmultiplier_radio=true
outletcatchment_radio=true
rcoefficientsinglevalue_radio=true
allcatchments_radio=false
useprecipitationadjustments=false
useprecipitationmultipliers=true

For Help, press F1
```

### 3.4 Embalses

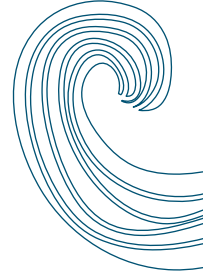
En Hydro-BID los embalses se implementan a través de una interfaz de base de datos. En esta interfaz, los usuarios deben especificar parámetros para la geometría del embalse, las características físicas y reglas de descargas. Para el acceso a la interfaz de modelaje del embalse, se va a la pestaña de Embalses en Hydro-BID y se hace clic en la casilla de verificación “Incluir Embalses” (“Include Reservoirs”) tal como se ilustra en la **Figura 3-11**.



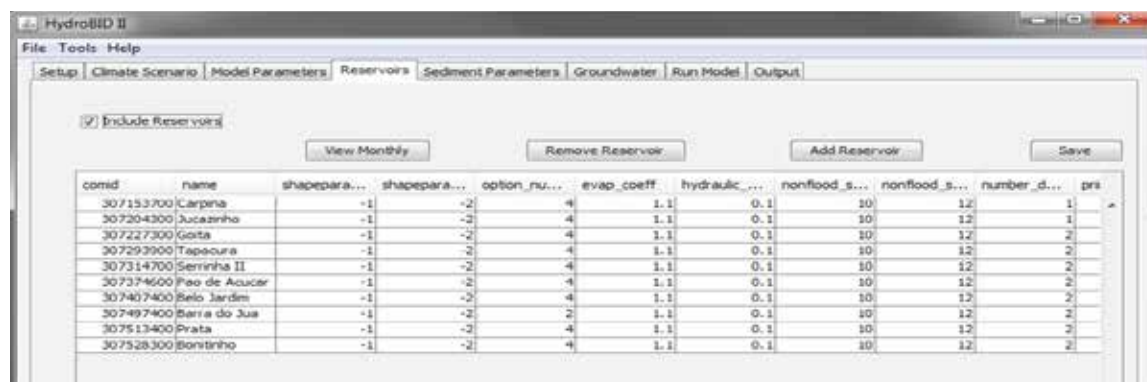
Si los embalses no aparecen cuando el módulo es activado, el usuario tendrá que agregarlos manualmente en la interfaz. La **Tabla 3-3** describe cada parámetro con los valores necesarios subrayados. Tenga en cuenta que los parámetros de la **Tabla 3-3** son valores anuales. Después que un embalse ha sido añadido o eliminado, o que se han modificado los valores, haga clic en Guardar (Save) en la parte superior derecha de la interfaz para escribir los cambios en la base de datos.

**Tabla 3-3. Parámetros de Embalses (escala de tiempo anual)**

Nombre del Campo	Alias/Descripción (unidades)	Descripción	Valor Predeterminado Recomendado
comid	COMID	ID de la cuenca de salida	N/A
name	Nombre del embalse	Etiqueta para los resultados del embalse	N/A
shapeparameter_a	Parámetro Shape a	Define la relación volumen-área de superficie	-1
shapeparameter_b	Parámetro Shape b	Define la relación volumen-área de superficie	-2
option_number	Numero de opción	Especifica el conjunto de reglas que gobiernan las tasas de descargas	2
evap_coeff	Coefficiente de Evaporación	Coefficiente de evaporación empírico	1.1
hydraulic_conductivity	Conductividad Hidráulica (cm/día)	Define las pérdidas de aguas subterráneas	0.1
nonflood_season_bein	Inicio de la temporada sin inundación	Número del mes del Inicio de la temporada sin inundación	10
nonflood_season_end	Fin de la temporada sin inundación	Número del mes del fin de la temporada sin inundación	12
number_day_target	Numero de días para alcanzar la meta	Numero de días disponibles para que el embalse alcance la meta de almacenamiento mensual	15
principal_vol	Volumen principal (millón m <sup>3</sup> )	Volumen mínimo utilizable del embalse	N/A
flood_vol	Volumen de inundación (millón m <sup>3</sup> )	Volumen máximo del embalse	N/A
max_surface_area	Extensión máxima de superficie (km <sup>2</sup> )	Área de superficie del embalse en volumen de inundación	N/A
avg_daily_release	Descarga promedio diaria (m <sup>3</sup> /día)	Promedio anual de descarga diaria	N/A
initial_vol	Volumen inicial (m <sup>3</sup> )	Volumen al inicio de la Simulación de Hydro-BID	N/A
type	Variable del tipo de embalse	Variable interna utilizada por Hydro-BID	2

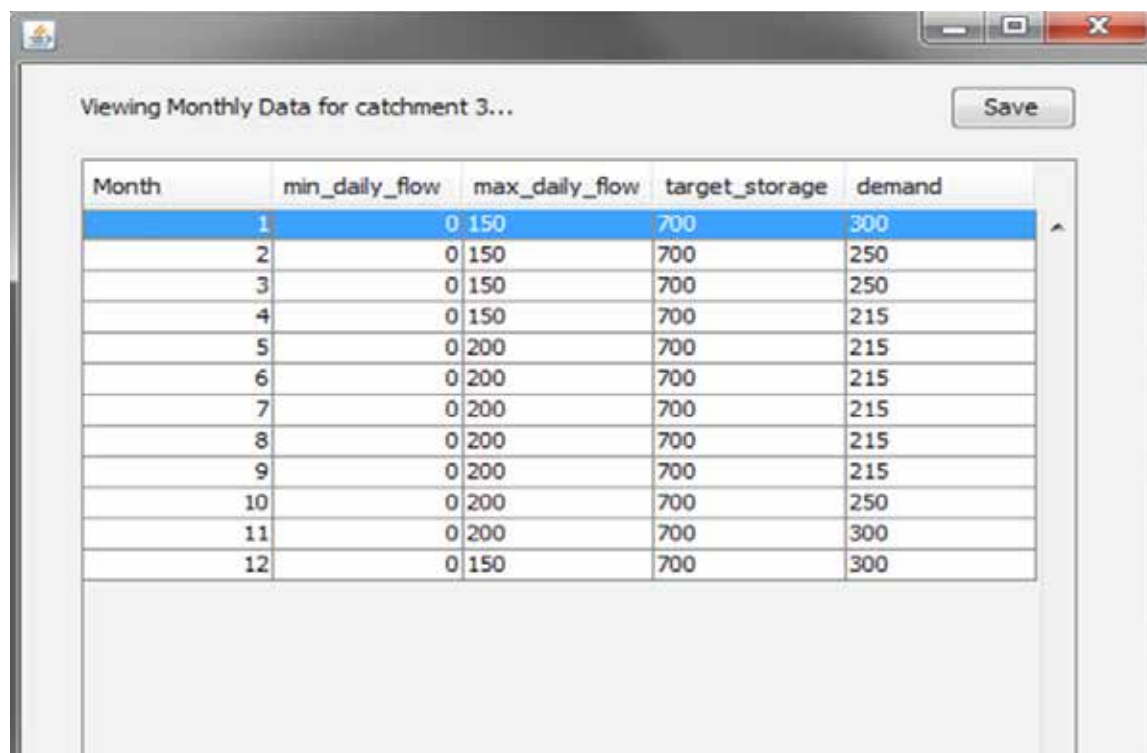


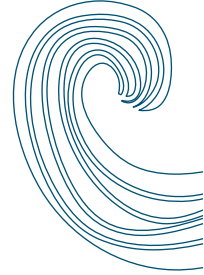
**Figura 3-10. Interfaz de Modelaje de Embalses**



Para una mayor precisión en el modelaje, se pueden aplicar valores mensuales. Para establecer parámetros mensuales para un embalse, seleccione la fila correspondiente en la interfaz del embalse y haga clic en Ver mes (View Monthly). Una tabla se va a cargar y permitir la modificación de los parámetros como se muestra en la **Figura 3 12.**

**Figura 3-11. Parámetros Mensuales de Embalses**





Las columnas en la tabla de parámetros mensuales están definidos en la **Tabla 3-4**. Se puede encontrar más información sobre estos parámetros en el Capítulo 2.

**Tabla 3-4. Parámetros Mensuales de Embalse**

Nombre del Campo	Alias/Descripción (unidades)	Descripción
Month	Valor numérico de cada mes	Valor numérico de cada mes
min_daily_flow	Caudal diario mínimo (m <sup>3</sup> /día)	Descarga mínima necesaria. Puede ser utilizado para especificar la demanda aguas abajo o los requerimientos ambientales.
max_daily_flow	Caudal diario máximo (m <sup>3</sup> /día)	Descarga máxima necesaria. Se usa generalmente para prevenir inundación accidental.
target_storage	Meta de almacenamiento (millón m <sup>3</sup> )	Almacenamiento óptimo deseado del embalse.
demand	Uso para Consumo	Demanda total para extracciones desde el embalse con fines de consumo.

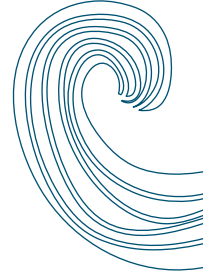
### **Salida del Embalse**

Unas series de tiempo de las descargas del embalse, almacenamiento, y demanda están disponible en la carpeta especificada como “Reservoir Dir” en la página de configuración de Hydro-BID. Si la cuenca COMID especificada en la pestaña de configuración contiene un embalse, una pestaña de visualización de datos será capaz de producir gráficos de almacenamiento, caudal de entrada, y descargas.

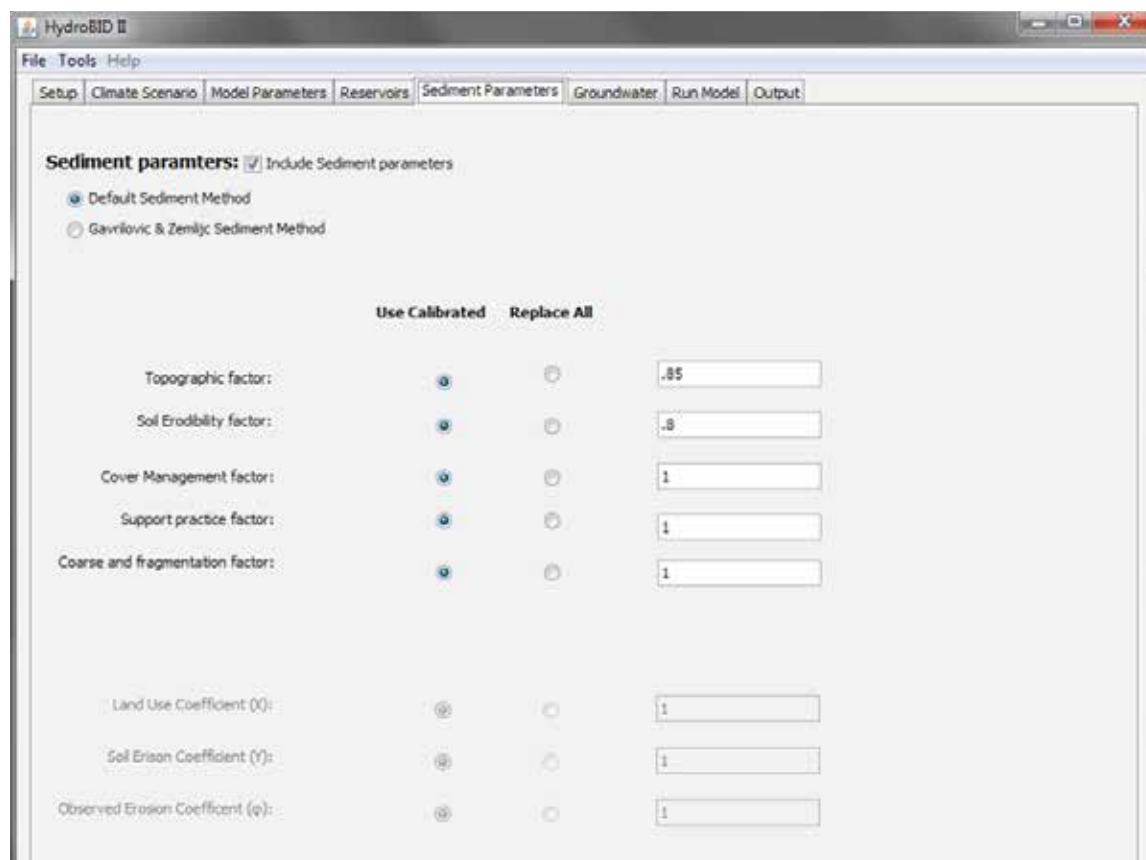
## **3.5 Modelaje de Sedimentos**

El modelaje de sedimentos se implementa bajo la pestaña Parámetros de Sedimentos. Para activar el módulo, se hace clic en el botón “Incluir Parámetros de Sedimentos” (“Include Sediment parameters”) como se muestra en la Figura 3-13.

Están presentes dos métodos de cálculo de sedimentos. Para activar un método, seleccione la opción correspondiente bajo el botón “Incluir Parámetros de Sedimentos”.



**Figura 3-12. Parámetros de Sedimentos**



### ***Método de Sedimentos Predeterminado***

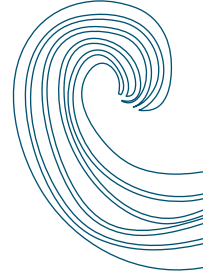
El método de sedimentos predeterminado se basa en la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE, por sus siglas en inglés) y proporciona salidas diarias de producción de masa de sedimentos por cuenca. Los parámetros utilizados son los coeficientes empíricos como aproximaciones de las propiedades del suelo. Más información sobre estos parámetros se encuentra en el Capítulo 2.

La salida/output del Método Predeterminado de Sedimento se incluye en el archivo “-Outlet.csv” como una serie de tiempo diario. La **Tabla 3-5** describe las columnas de salida MUSLE.

**Tabla 3-5. Salida/Output del Método de Sedimentos Predeterminado**

Nombre de Campos (unidades)	Descripción
Generated SedLoad [tonnes/day]	Contribución de sedimentos desde la salida de la cuenca
Routed SedLoad (tonnes/day)	Carga total de sedimentos existente en la cuenca de salida, incluyendo las contribuciones de aguas arriba
Sediment Concentration (tonnes/m <sup>3</sup> )	Concentración de sedimento en el caudal de salida/output





### **Método Gavrilovic y Zemljic**

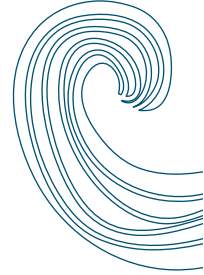
El Método de Sedimento Gavrilovic y Zemljic proporciona estimaciones anuales de producción de sedimentos como volumen. En el Capítulo 2 se proporcionan más detalles sobre los parámetros. La salida/output de este método se encuentra en la carpeta de salida en un archivo llamado “annual\_sed\_COMID\_OUTLET.csv” donde COMID corresponde a la cuenca especificada en la configuración del modelo. La **Tabla 3-6** describe las columnas en el archivo de salida.

**Tabla 3-6. Salida/Output del Método Gavrilovic y Zemljic**

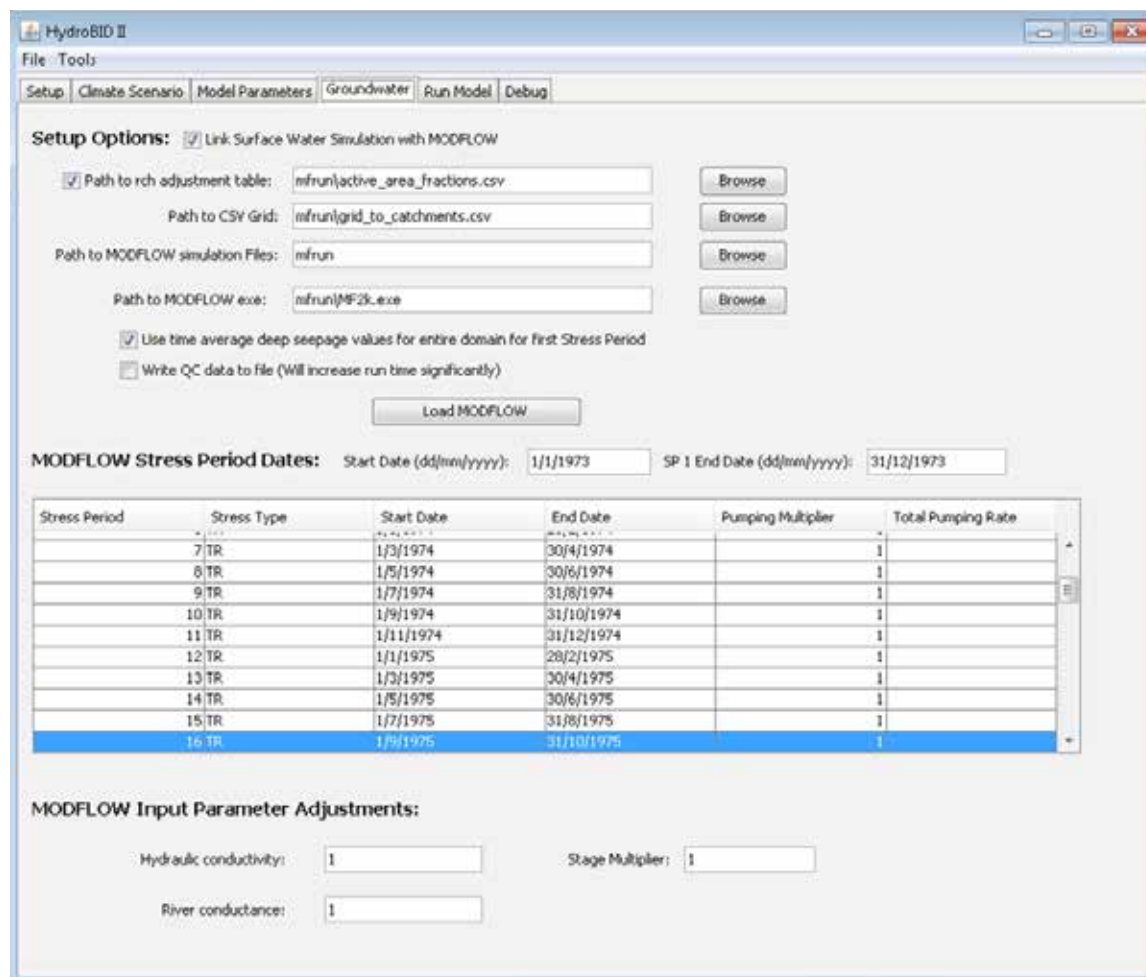
Nombre de Campos (unidades)	Descripción
SedimentLoad G (m <sup>3</sup> /year)	Volumen de sedimento Total sedimento saliendo de la cuenca anualmente
Potential Sediment Load W (m <sup>3</sup> /year)	Paso de cálculo intermedio. Véase el Capítulo 2.
R Coefficient	Paso de cálculo intermedio. Véase el Capítulo 2.

## **3.6 Modelaje de Aguas Subterráneas**

El sistema integrado de las aguas subterráneas y de superficie modelo disponible a través de hidro-licitación exige un trabajo modelo MODFLOW. La figura 3-14 muestra la ficha de aguas subterráneas para el Hydro-BID interfaz.



**Figura 3-13. Interfaz del Modelo Hydro-BID de Aguas Subterráneas y Superficiales Integradas**



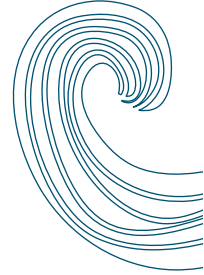
Cada uno de los datos de entrada/input requeridos se describen a continuación.

### **Tabla de Ajuste RCH**

Una tabla delimitada por comas que contiene información de la geografía de la cuenca y factores de ajuste para recargas. Cada columna de la tabla se describe en la **Tabla 3-7a**.

**Tabla 3-7a. Encabezados de la Tabla de Ajuste RCH**

Etiqueta de la Columna	Descripción
COMID	Etiqueta AHD COMID para cada cuenca
area_m2	Área total de la cuenca en metros cuadrados
act_area	Área total de la cuenca en acres
rch_adjust	Factor de ajuste para recargas



### **Cuadrícula de CSV**

Una tabla delimitada por comas que hace mapas de las COMIDs sobrepuestas a cada nodo de la cuadrícula de MODFLOW. Cada columna de la Tabla se describe en la **Tabla 3-7b**.

**Tabla 3-7b. Encabezados de la Tabla de la Cuadrícula CSV**

Etiqueta de la Columna	Descripción
row	Número de la fila del punto de cuadrícula MODFLOW
column	Número de la columna del punto de cuadrícula MODFLOW
COMID	AHD COMID correspondiente al punto de cuadrícula especificado para la fila y columna anteriores

### **Camino a los archivos de simulación MODFLOW**

El camino de acceso a todos los archivos necesarios para ejecutar una simulación MODFLOW independiente debe estar contenida en la carpeta especificada aquí.

#### **Camino a MODFLOW.exe.**

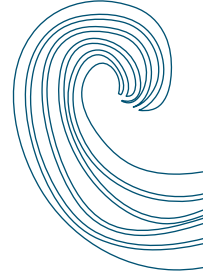
El camino de acceso al MODFLOW ejecutable debe especificarse. Hydro-BID es compatible tanto con las versiones de MODFLOW MF2k.exe y MFNWT64.exe.

### **Fechas del periodo de estrés MODFLOW**

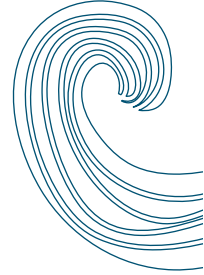
Esta tabla indica el período de estrés, el tipo, las fechas de inicio y fin, tal como se describe en los archivos de simulación MODFLOW. El multiplicador de bombeo para cada período de estrés puede ser ajustado en la tabla.

Para ejecutar una simulación integrada:

- Marcar “Vincular la Simulación de aguas superficiales con MODFLOW” (“Link Surface Water Simulation with MODFLOW”)
- Marcar “Camino a la tabla de ajuste rch” (“Path to rch adjustment table”) y entre el camino a este archivo. La tabla debe estar delimitada por comas. Debe producir una lista de cada COMID, seguida por el área de las cuencas cubiertas por el modelo de aguas subterráneas en metros cuadrados y acres. En algunos casos, el modelo de aguas subterráneas sólo incluye una parte de la cuenca, y estos factores de ajuste sirven para tomar en cuenta las diferencias.
- Especifique el camino a la cuadrícula CSV.
- Entrar el camino a los archivos de simulación MODFLOW. Este directorio debe tener todos los archivos de entrada/input MODFLOW necesarios.

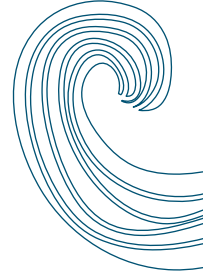


- Entrar el camino al MODFLOW ejecutable.
- Entrar la fecha de inicio del primer período de estrés.
- Hacer clic en “Cargar MODFLOW” (“Load MODFLOW”). Esto va a leer la configuración MODFLOW asociada y rellenar la tabla en la interfaz Hydro-BID con la información del período de estrés y rango de fechas.
- Las entradas/input de los ajustes de los parámetros están disponibles para MODFLOW para la conductividad hidráulica, la conductancia de los límites de ríos y el nivel de ríos. Estos multiplicadores se aplicarán a todas las entradas MODFLOW correspondientes. Se deben utilizar valores de 1 dejar las entradas/inputs en los valores originales.
- En la pestaña Hydro-BID Hydro-BID Run, pulse Continuar (Go).
- Una vez que el modelo se ha completado, hacer clic en Ver Estadísticas y Gráficos (View Stats and Graphs) para abrir la interfaz de resultados de Hydro-BID.

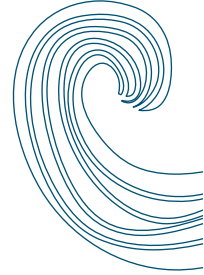


## Referencias

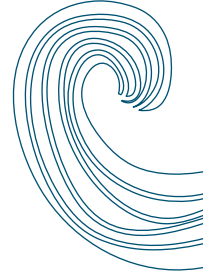
- Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T., and Witmer, R.E. (1976). A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data / **Un Sistema de Clasificación del Uso de la Tierra y de la Cubierto para su uso con datos de sensores remotos. Geological Survey Professional Paper 964** <http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf>
- Bosen, J.F. (1960). A formula for approximation of saturation vapor pressure over water **Una fórmula de aproximación de la presión de vapor de saturación sobre el agua / Monthly Weather Reviews 88**(8):275-276.
- Comision Regional del Río Bermejo (COREBE). (2013). Plan de aprovechamiento múltiple de los Vanessa hídricos de la Alta Cuenca del Río Bermejo en la Republica Argentina.
- Forsythe, W.C., Rykiel, S.J., Stahl, R.S. Wu, H.I., y Schoolfield, R.M. (1995). A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year / **Un modelo de comparación para la duración del día como función de la latitud y el día del año. Ecological Modeling 80:87-95.**
- Z. Gavrilovic (1959). Method for classification of stream basins and new equations for the calculation of high water flood and sediment load. Vadoprievreda, Belgrade. **Método para la clasificación de cuencas fluviales y nuevas ecuaciones para el cálculo de inundaciones de agua alta y carga de sedimentos. Vadoprievreda, Belgrado.**
- Haan, C.T. (1972). A water yield model for small watersheds / **Un modelo de producción de agua para cuencas pequeñas. Water Resources Research 8**(1): 58-69.
- Haith, D.A. (1985). An event-based procedure for estimating monthly sediment yields / **Un Procedimiento basado en un evento para estimar la producción mensual de sedimento. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 28**(6): 1916-1920.
- Haith, D.A., Mandel, R. y **Wu, R.S. (1996). Generalized Watershed Loading Functions / Funciones** de carga de la cuenca generalizadas. Versión 2.0 Manual del usuario.
- Hamon, W.R. (1961). Estimating potential evapotranspiration / **La estimación de la evapotranspiración potencial. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Hydraulics Division 87**(HY3): 107-120.



- Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill, y M.G. McDonald. (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model—User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process / **MODFLOW-2000, el modelo modular de agua subterránea del USGS - Guía del usuario de conceptos de modularización y procesos de Flujo de Agua Subterránea**. USGS Open-File Report 00-92. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Hawkins, R.H. (1978). Runoff curve numbers with varying site moisture / **Números de curva de escorrentía con variación de humedad del sitio. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Irrigation and Drainage Division 104**(1R4): 389-398.
- Hong, Y., Adler, R.F., Hossain, F., Curtis, S., y Huffman, G.J. (2007). A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation / **Una primera aproximación a la simulación de escorrentía global mediante satélites de la estimación de la precipitación. Water Resources Research, 43**, W08502, doi:10.1029/2006WR005739
- Jobson, S.E. (1996) Prediction of traveltime and longitudinal dispersion in rivers and streams / **Predicción de tiempo de viaje y dispersión longitudinal en ríos y arroyos. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report**. 96-4013, 69 p.
- Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., and Barlow, P.M. (2005). GSFLOW—Coupled Ground-Water and Surface-Water Flow Model Based on the Integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model / GSFLOW Modelo de Flujo de Agua Subterránea y Agua Superficial basado en la integración del sistema de modelaje de Precipitación-Escorrentía (PMR) y el Modelo de Flujo de Agua Subterránea Modular.
- McCuen, R.H. and Snyder, W.M. (1975). A proposed index for comparing hydrographs / **Una propuesta de índice para comparar hidrogramas**. Water Resources. Res 11(6): 1021-1024.
- Mockus, V. (1972). Estimation of direct runoff from storm rainfall” / Estimación de la escorrentía directa de las lluvias, National Engineering Handbook, Ch. 10, Soil Conservation Service, USDA, 21 pp.
- Panday, S., Huyakorn, P.D. (2004). A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow / **Un modelo completamente acoplado de base física y distribuido espacialmente para evaluar el flujo superficial/ subterráneo**. Advances in Water Resources. Volume 27, Issue 4, Abril 2004, páginas 361-382.
- Schneiderman, E.M., Steenhuis, T.S., Chanclas, D.J., Easton, Z.M., Zion, M.S., Neal, A.L., Mendoza, G.F., y Walter, M.T. (2007). Incorporating variable source area hydrology into a curve-number-based watershed model / Incorporar hidrología del área de fuentes variables en un modelo de cuenca basado en un número de curva. . **Hydrological Processes 21**, 3420-3430.



- Sha, J. M., Liu, Wang, D., Swaney, D.P., y Wang, Y. (2013). Application of the ReNuMa model in the Sha He river watershed: Tools for watershed environmental management / Aplicación del modelo ReNuMa en la cuenca del río Sha He: Herramientas para la gestión ambiental de Cuencas. **Journal of Environmental Management** **124**, 4050.
- Rinner, J. y Bruhn, M. (2013) "Technical Note 1. An Analytical Hydrology Dataset for Latin American and the Caribbean." RTI International. **Nota técnica 1. Un Conjunto de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe.** RTI International.
- U.S. Department of Agriculture (USDA). (1986). **Urban hydrology for small watershed** / Hidrología urbana de cuenca pequeña. 210-VI-TR-55, Segunda edición, junio 1986
- US EPA, 2003. . Exposure Assessment Models: 3MRA System / **Modelos de evaluación de la exposición: Sistema 3ARM Sistema.** www.epa.gov/ceampubl/mmedia/3mra/
- Williams, J. R. (1975) "Sediment Routing for Agricultural Watersheds." Journal of the American Water Resources Association. **11** (5). p. 965-974. **Enrutamiento de sedimentos en las cuencas agrícolas. Revista de la Asociación Americana de los Recursos Hídricos. 11** (5), págs. 965-974
- Williams, J. R. (1995). Chapter 25: The EPIC model. P.909-1000 In V. P. Singh (ed.) Computer models of watershed Hydrology / Capítulo 25: Modelo EPIC. P.909-1000 en V. P. Singh (ed.) Modelos informáticos de Hidrología de Cuenca. Water Resources Publications.
- Wischmeier, Walter H., y Dwight David Smith. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning." Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning / Predecir pérdidas por erosión por lluvias-Una guía para la planificación de la conservación. (1978)
- Zemljic, M. (1971). Calculation of sediment load, evaluation of vegetation as anti-erosive factor. Paper presented at the International Symposium Interpraevent, Villach (Australia). **Cálculo de la producción de sedimentos, la evaluación de la vegetación como factor anti-erosivo. Ponencia presentada en el Simposio Internacional Interpraevent Villach (Australia)**



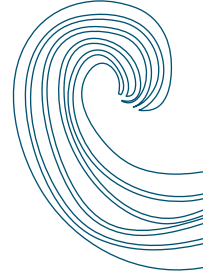
(Módulos de Simulación de Embalses, Transporte de Sedimentos y de Aguas Subterráneas)

## **Apéndice A:** Herramienta de navegación AHD - Guía del usuario<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Este texto está extraído de la Nota Técnica 1 (NT1): Un Dataset Hidrología analítica (AHD) para América Latina y el Caribe, preparado por RTI International para el Banco Interamericano de Desarrollo, de enero de 2012.





## A.1. Introducción a la AHD y las Herramientas de la AHD

La Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) es una base de datos espacialmente explícita (i.e., basada en un sistema de información geográfica (GIS)) de aguas superficiales. Sirve como una plataforma espacial regional para integrar data dispersa que se necesita para apoyar los modelos de hidrografía regional. Provee un marco para la parametrización de modelos en una manera consistente, que provee la conectividad del flujo aguas arriba/aguas abajo necesaria para dichos modelos, y provee la data necesaria para mostrar los resultados en forma gráfica.

La AHD tiene cuatro características claves que permiten el desarrollo y la implementación de herramientas de análisis de recursos hídricos en el contexto de su dinámica en una red hidrográfica:

- una estructura de cuencas de polígono anidado con un esquema único de identificación de cuencas;
- una estructura derivada correspondiente para los segmentos fluviales contenidos dentro de las cuencas;
- atributos descriptivos que crean un sistema interconectado de segmentos fluviales aguas arriba y aguas abajo y entre cuencas;
- una estructura de base de datos para poblar y adjuntar atributos adicionales específicos al modelo.

Las herramientas AHD están diseñadas para ayudar a los usuarios con la visualización y navegación en las líneas de flujo y cuencas de la AHD en la aplicación de escritorio Quantum GIS (QGis). Las herramientas cuentan con menús simples que permiten a los usuarios escoger cuáles características quieren navegar y luego mostrar la información de los resultados de la navegación. Estas herramientas también contienen símbolos diseñados especialmente para mejorar la exhibición de las geometrías de la AHD y los resultados de navegación.

## A.2. Uso de la AHD en QGIS

El software QGis puede ser descargado desde <http://hub.qgis.org/projects/quantum-gis/wiki/Download>. Está disponible para Windows, Linux, Mac, Android, y otros sistemas operativos. La versión más reciente de QGis es la 1.7.4. Las herramientas AHD (AHDTools) se han probado en esta versión de QGis en las plataformas de Windows XP y Windows 7.

Una vez instalado QGis, los usuarios pudieran desear instalar el plugin QGis “OpenLayers” si quieren usar Google, OpenStreetMap, Yahoo, o Bing maps como

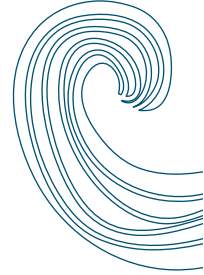


imagen de fondo. Las instrucciones para la instalación y uso de OpenLayers están disponibles en Spatial Galaxy en <http://spatialgalaxy.net/2012/01/14/qgis-plugin-of-the-week-openlayers>.

La AHD para América Latina y el Caribe (LAC) fue desarrollada en dos partes: América Central (**Figura A-1**) y América del Sur (**Figura A-2**). El Caribe está incluido principalmente en América Central. La AHD de América Central consiste de aproximadamente 37.000 cuencas y segmentos de corrientes. El área promedio de una cuenca es de aproximadamente 83 kilómetros cuadrados, y la longitud promedio de los segmentos de corrientes es de aproximadamente 10 kilómetros. La AHD de América del Sur consiste en aproximadamente 193.000 cuencas y segmentos de corrientes; el área promedio de las cuencas es de 92 kilómetros cuadrados; la longitud promedio de los segmentos de corrientes es de aproximadamente 11 kilómetros.

**Figura A-1. Hidrografía de la AHD de América Central**

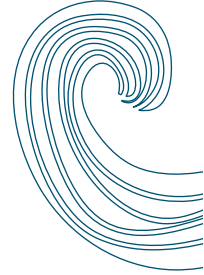


**Figura A-2. Hidrografía de la AHD de América del Sur**



La AHD para cada región está disponible en el formato shapefile ESRI (Environmental Systems Research Institute) y otros formatos. Cada región incluye shapefiles múltiples, cada una contiene un conjunto particular de líneas, puntos o polígonos. Los dos shapefiles más importantes para navegación son las líneas de flujo (hydrography/AHDFlowline.shp) y cuencas (Drainage/Catchment.shp). Además de estos dos shapefiles, la navegación con las herramientas AHD requiere del uso de una tabla que contiene la relación aguas arriba/aguas abajo entre cada corriente o cada cuenca. La tabla con esta información es la tabla de flujo AHD (AHDFlow.dbf). Los detalles completos acerca de los datos de la AHD se encuentran en la Nota Técnica 1, **Una Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe**; la Nota Técnica 1 incluye una descripción de estos dos shapefiles y la tabla AHDFlow.

Las líneas de flujos, cuencas y la tabla de flujos pueden agregarse a QGIS usando el menú “Add Vector”.



### A.3. La Instalacion y Uso de las Herramientas AHD en QGis (versión 0.03) en QGIS (versión 2.8)

Las herramientas AHD (AHD Tools) se instalan con el plugin AHDTools QGis, que está escrito en python. Para instalar el plugin, debe obtener el archivo “AHD-Tools.zip” el cual contiene todo el software. Poner una copia del archivo zip en su archivo personal QGis plugin. En Windows, este archivo es creado usualmente como parte del proceso de instalación en C:\Documents and Settings\{sunombreaqui}\.qgis\python\plugins.

Extraer (extract) el contenido del archivo zip en dicho archivo. Debe crearse una sub carpeta “AHD Tools” que contiene varios archivos. Si con extraer no se crean las subcarpetas, entonces crear la carpeta de AHD Tools manualmente y mover todos los archivos extraídos a la sub carpeta. Nota: Si ya existe una subcarpeta “AHD Tools” antes de abrir le archivo zip, entonces debe moverlo o eliminarlo antes de extraer la nueva version.

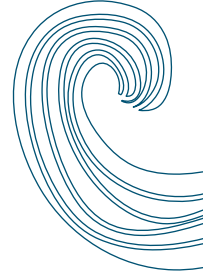
Una vez que el contenido del archivo .zip es extraído a la carpeta AHD Tools, iniciar QGis y agregar las líneas de flujo de AHD, cuencas, y la tabla de flujos al canvas. Hacer zoom en su área de interés y entonces guardar el proyecto QGis para facilitar poder devolverse a esta localidad particular.

Desde la ventana de exhibición (display window) de QGis, seleccionar el menú “Plugins” y seguir con “Manage Plugins.” Desde la ventana QGis Plugin Manager, encontrar “AHD Tools Menu (0.02)” y poner un visto (ffl) al cuadro para habilitarlo. Entonces cerrar el menú de manejo (manager) y haga clic en el botón de “OK”.

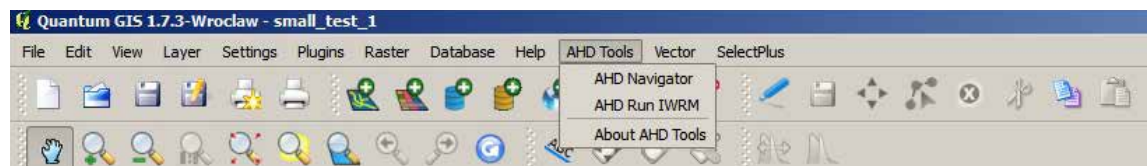
**Figura A-3. Menu QGis Plugin Manager. Poner un visto (✓) en el cuadro al lado de AHD Tools Menu para habilitar el Menú**



Una vez habilitado AHD Tools Menu, aparece una opción de menú arriba de la barra de QGis que dice “AHD Tools” (Figura A-4).



**Figura A-4. AHD Tools Menu. El navegador AHD permite la navegación en las líneas de flujo y cuencas de la AHD.**



Hacer clic en dicho menú para ver el sub-menú con tres opciones AHD Navigator,” “AHD Run IWRM,” y “About AHD Tools.” (El menú AHD Run IWRM es un menú especializado para correr un modelo hidrológico particular. Puede no estar incluido en todas las versiones de AHD Tools y no es necesario para la navegación).

Seleccione la opción AHD Navigator para abrir el menú “RTI Analytical Hydrology Dataset Navigator” **(Figura A-5)**.

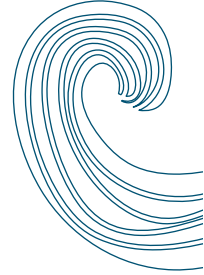
En el menú, marcar con un vistoso (ffl) la caja “actívate (activar)”. Luego seleccione “Downstream (aguas abajo)” en la opción Navigation Direction (Dirección de Navegación); entonces hacer clic en algún lugar de la capa de Flowline (línea de flujo).

Usted debe ver la corriente seleccionada aguas abajo desde el lugar donde hizo clic. También se verá en el menú, la información acerca de las líneas de flujos navegadas incluyendo el número de líneas de flujo navegadas, la longitud de todas las líneas de flujo, la elevación máxima y mínima de todas las líneas de flujo y la pendiente promedio.

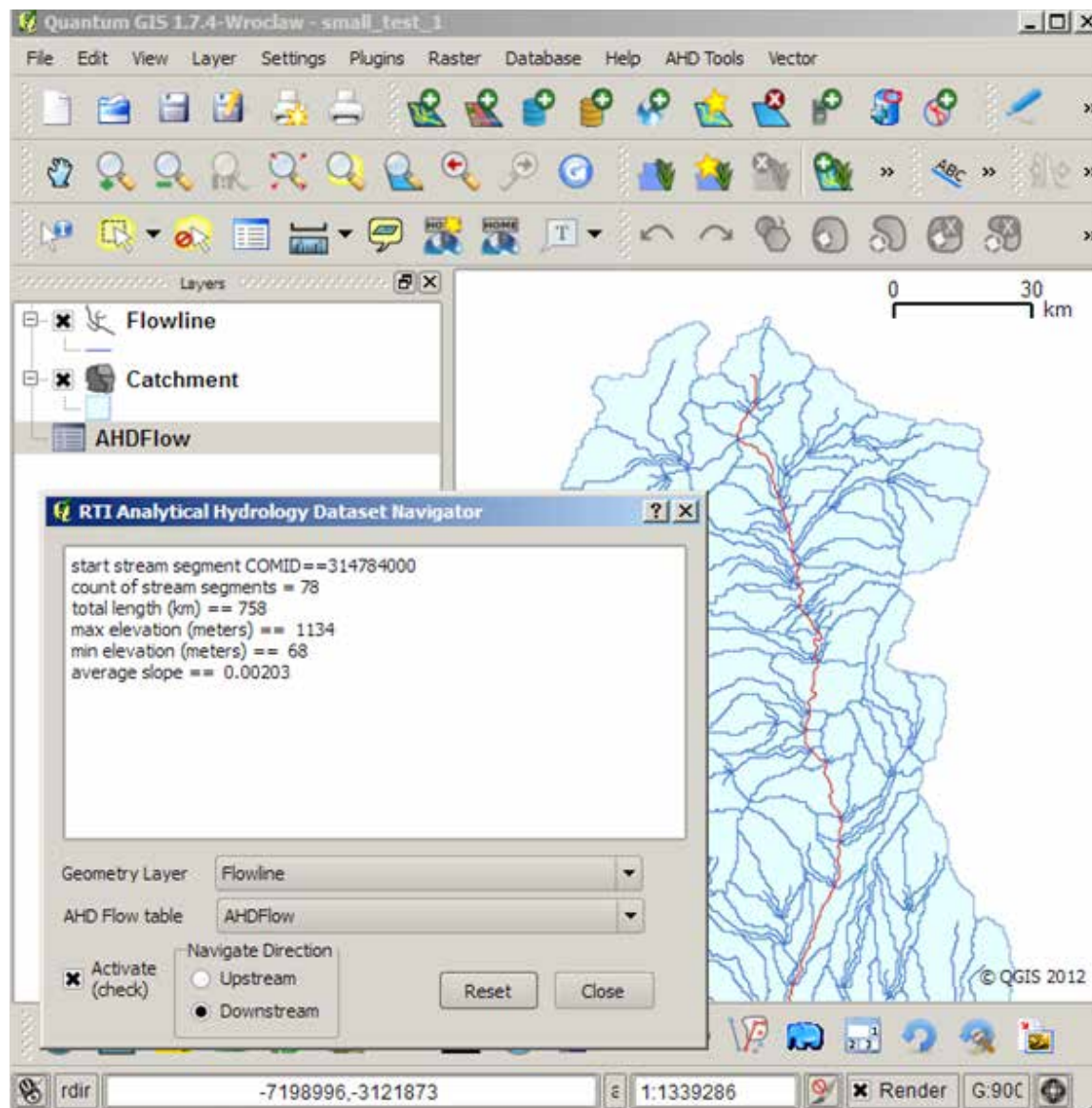
Use el botón de “Reset” para des-seleccionar cualquiera de las líneas de flujo seleccionadas. Use la selección de “Geometry Layer (capa de geometría)” para cambiar la capa de navegación a “Catchment (cuenca),” y cambiar la dirección a “Upstream (aguas arriba)”. Luego haga clic en algún lugar de la capa Catchment (cuenca). La misma seleccionara todas las cuencas desde la cuenca donde hizo clic y todas aquellas cuencas aguas arriba **(Figura A-6)**.

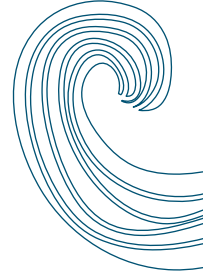
El menú AHD Navigator mostrará el número de cuencas navegadas y el área total en kilómetros cuadrados.

Internamente, el AHD Navigator (Navegador AHD) utiliza la tabla AHDFlow para navegar aguas arriba y aguas abajo. Para ver cuales filas en esa tabla se usan para navegación, debe abrir la tabla “AHDFlow” en el menú de Layers (capas). (Haga clic a la derecha y seleccione del menú “Open attribute table (abrir los atributos de la tabla)”.

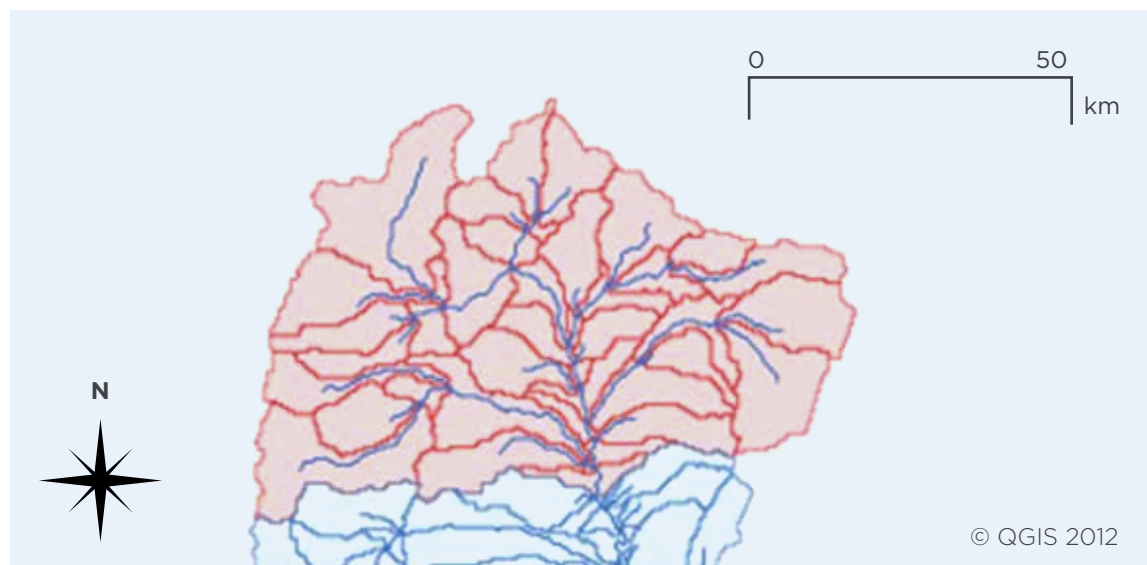


**Figura A-5. El Navegador RTI Base de datos de Hidrología Analítica (Analytical Hydrology Dataset) mostrando la navegación aguas abajo de la línea de flujo**





**Figura A-6. Navegación aguas arriba de la capa de captación**



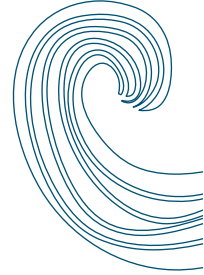
En la ventana de la tabla Attributes (de Atributos), poner un visto (ffl) en la casilla inferior izquierda que dice “Show selected only (mostrar solo los seleccionados)”.

En la medida que navegue aguas arriba o aguas abajo en la capa de la línea de flujo o de la cuenca, las filas que aparecen en la tabla AHDFlow cambiarán a solo aquellas que están tomando parte en la navegación.

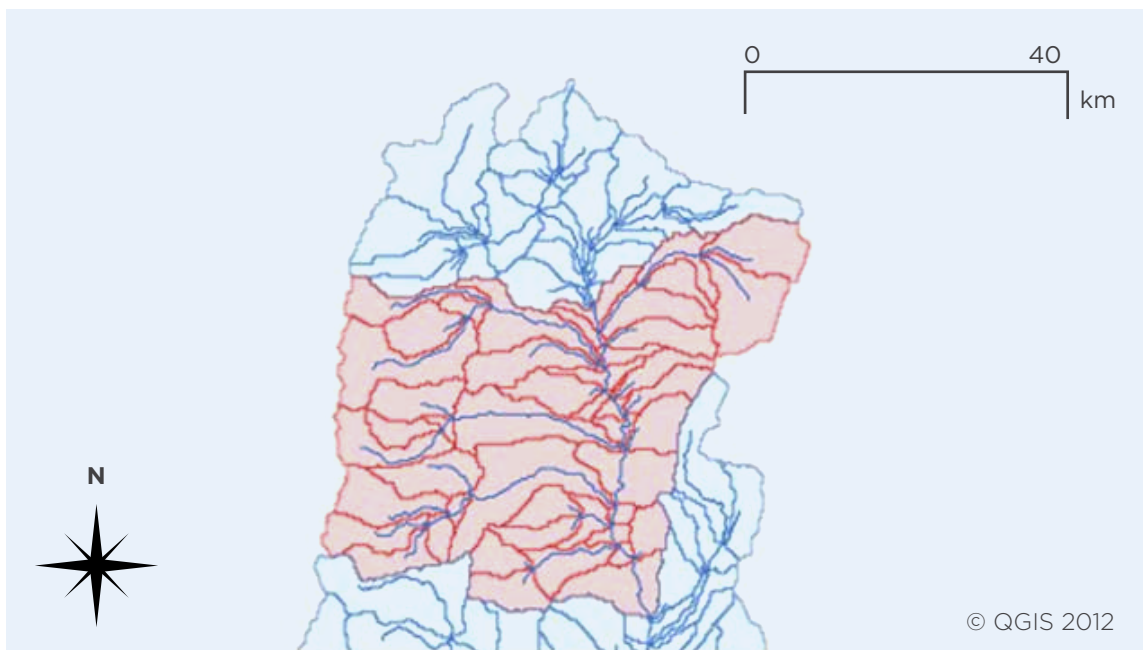
### **Teclas Modificadoras Shift y Control**

Para algunas aplicaciones de modelaje, es importante eliminar de la navegación algunas partes de la cuenca. Por ejemplo, cuando una cuenca contiene un embalse, puede ser importante simular solo la parte de la cuenca debajo del embalse y usar el flujo de salida del embalse medido como parte de la calibración de la parte aguas abajo de la cuenca. Para que esta remoción sea posible, el AHD Navigator le permite mantener presionado la tecla Shift mientras va haciendo clic en el canvas de QGIS y eliminar los resultados de la navegación de entre el conjunto de características seleccionadas (**Figura A-7**).

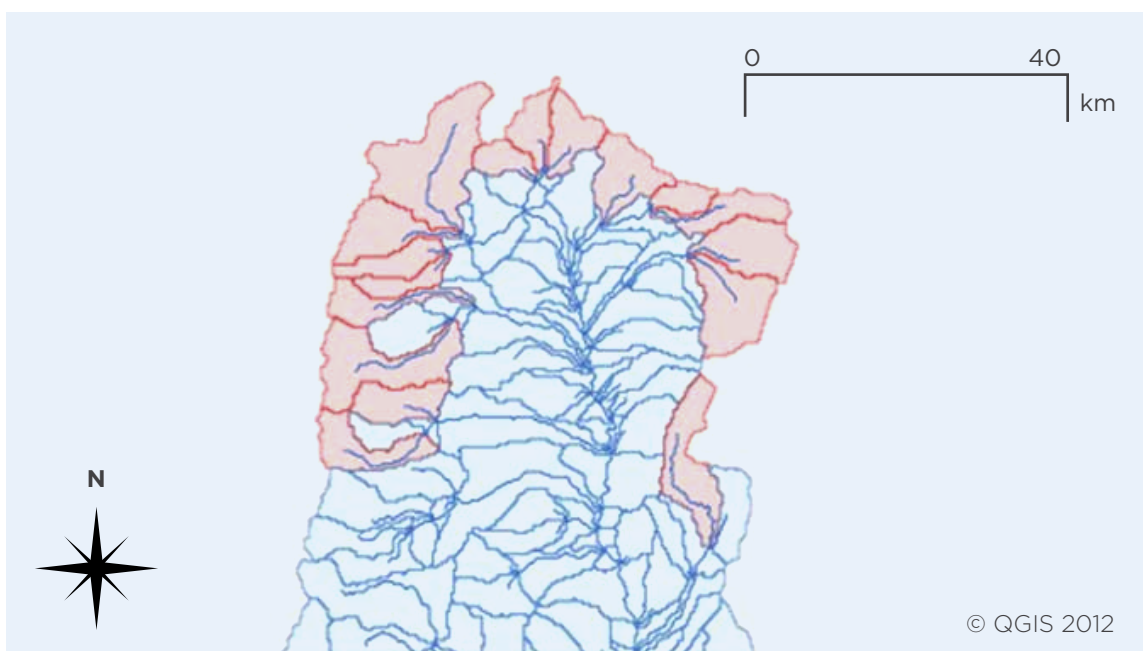
Otras aplicaciones requieren la selección de múltiples partes de una cuenca que pueden no estar conectadas necesariamente a través de la navegación normal aguas arriba o aguas abajo. Este tipo de selección puede hacerse manteniendo presionada la tecla Control mientras se hace clic en el canvas de QGIS. La tecla Control evita que el AHD Navigator comience un nuevo conjunto de navegación con cada clic que haga del canvas (**Figura A-8**).

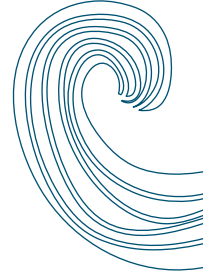


**Figura A-7. La parte aguas arriba de la cuenca ha sido eliminada de la navegación manteniendo presionada la tecla Shift mientras hace clic en las cuencas dentro de la cuenca seleccionada previamente**



**Figura A-8. Las cuencas más aguas arriba a lo largo del contorno de la cuenca se han seleccionado manteniendo pulsada la tecla Control y haciendo clic con el mouse en cada cuenca**





Con las teclas Shift y Control es posible crear cualquier selección arbitraria de cuencas de líneas de flujo en la AHD. Es posible mezclar navegación aguas arriba y aguas abajo cuando se intercambia la dirección de navegación y se presiona la tecla Control durante todos los clics del mouse.

Cuando la ventana de navegación está abierta y si hace clic en cualquier ítem del menú QGIS (como el magnificador zoom), puede darle al botón “Reset” en la ventana de navegación para así reanudar el uso del navegador. Esto desactivará cualquier característica seleccionada.

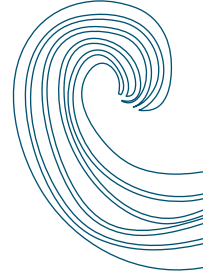
También puede usar la casilla “Activate” para reiniciar el AHD Navigator sin desactivar la selección. Solo debe eliminar el visto (ffl) y volverlo a poner en la casilla Activate. Esto activa el navegador pero no reinicia (reset) el AHD Navigator. El reinicio (reset) solo desactiva la selección de la capa seleccionada en la casilla combo “Navigation Layer de manera tal que pueda tener características seleccionadas tanto en la cuenca como en las líneas de flujo.

### **Creación de un Subconjunto de AHD**

Mostrar todas las tuberías y colectores en América Latina simultáneamente puede causar QGIS para tomar un largo tiempo para actualizar la pantalla. Si un proyecto sólo necesita datos para una cuenca en particular o un área rectangular, es útil para crear un subconjunto de la AHD que incluye tanto la geometría de las capas y la AHDFlow tabla. Esto puede realizarse mediante cualquier método de selección para seleccionar las características de cualquiera de la geometría de las capas y, a continuación, seleccionando al menos uno en la captación de las características seleccionadas utilizando el navegador AHD mientras mantiene pulsada la tecla Control. Esto hace que el navegador AHD seleccionar todas las filas de la tabla AHDFlow que están de alguna manera relacionados con las funciones seleccionadas. En QGIS, las funciones seleccionadas y las filas de la tabla AHDFlow seleccionadas pueden guardarse en nuevos formatos de archivo haciendo clic con el botón derecho del ratón la función en el menú capas y seleccionando la opción “Guardar como...” del menú de selección.

El mostrar simultáneamente todas las líneas de flujo y cuencas de América Latina puede provocar que QGIS tome un tiempo largo en refrescar la pantalla. Si un proyecto solo necesita datos para una cuenca en particular o un área rectangular, es útil crear un subconjunto de la AHD que incluya tanto las capas de geometría y la tabla AHDFlow. Esto se puede lograr usando cualquier método de selección para escoger características en cualquiera de la capas de geometría y luego seleccionando al menos una cuenca en las características seleccionadas usando el AHD Navigator mientras se presiona la tecla Control. Estos pasos hacen que el AHD Navigator seleccione todas las filas de la tabla AHDFlow que están relacionadas de alguna manera con las características seleccionadas. En QGIS, las características escogidas y las filas de la tabla AHDFlow seleccionada pueden ser guardadas en nuevos archivos shapefiles haciendo clic a la derecha en la característica en el menú de Layers (capas) y seleccionando del menú “Save selection as...”





Las características seleccionadas de la capa de geometría y la tabla AHDFlow pueden ser guardadas en un nuevo archivo shapefile con un nuevo nombre. El AHD Navigator busca campos particulares en cualquier capa para determinar si es una “geometría” AHD o una capa AHDFlow; debido a que no utiliza el nombre de la capa, entonces se les puede dar cualquier nombre a las capas. Es conveniente nombrar las cuencas seleccionadas usando la navegación aguas arriba con el COMID de la característica más aguas abajo, por ejemplo “Flowline.314927700.” Esto ayuda a organizar el conjunto de líneas de flujo, cuencas y filas de la tabla AHDFlow.

### **Capas de símbolo**

De forma predeterminada, QGIS establece el color de las líneas y polígonos mediante una asignación aleatoria. Las características seleccionadas se muestran en amarillo vívido. Esto significa que con los datos de AHD, las corrientes seleccionadas en una cuenca que también está seleccionada no van a estar visibles, porque el amarillo de la corriente seleccionada va a coincidir con el color amarillo de la cuenca seleccionada.

Para mejorar la exhibición de las líneas de flujo y cuencas de AHD, se crearon capas de símbolos adaptables. Las capas de símbolos adaptables son “AHD Custom Catchment” y “AHD Custom Flowline.”

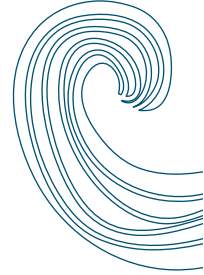
Los usuarios pueden cambiar la forma de mostrar las líneas de flujo y cuencas haciendo clic a la derecha en la capa del menú Layers (capas) en QGIS y seleccionando el menú de “Properties” (propiedades). Entonces se selecciona “AHD Custom Catchment” o “AHD Custom Flowline” de la lista del menú Symbol Layer Type (tipo de símbolo de capa). Estos tipos de símbolos solo están disponibles si el menú AHD Tools plugin ha sido habilitado.

### **Herramienta de Preparación de los Datos de Aguas Subterráneas**

Esta herramienta ayuda a crear una tabla (.dbf), shapefile (.shp) o archivo .csv para usar como entrada/input junto con los procesos de modelaje de aguas subterráneas. Las salidas/output se crean uniendo valores de la cuenca COMID en cada punto que cae dentro de ellas. Los puntos que no caen en ellas tendrán un COMID en blanco.

Seleccione la opción “Groundwater Data Prep” (“Datos de Preparación de Aguas Subterráneas”) en el menú AHDTools” para abrir el menú “RTI Analytical Hydrology Dataset Groundwater Data Preparation” (“Conjunto de Datos RTI de Hidrología Analítica para la preparación de datos de las aguas subterráneas “ (Figura A-9).

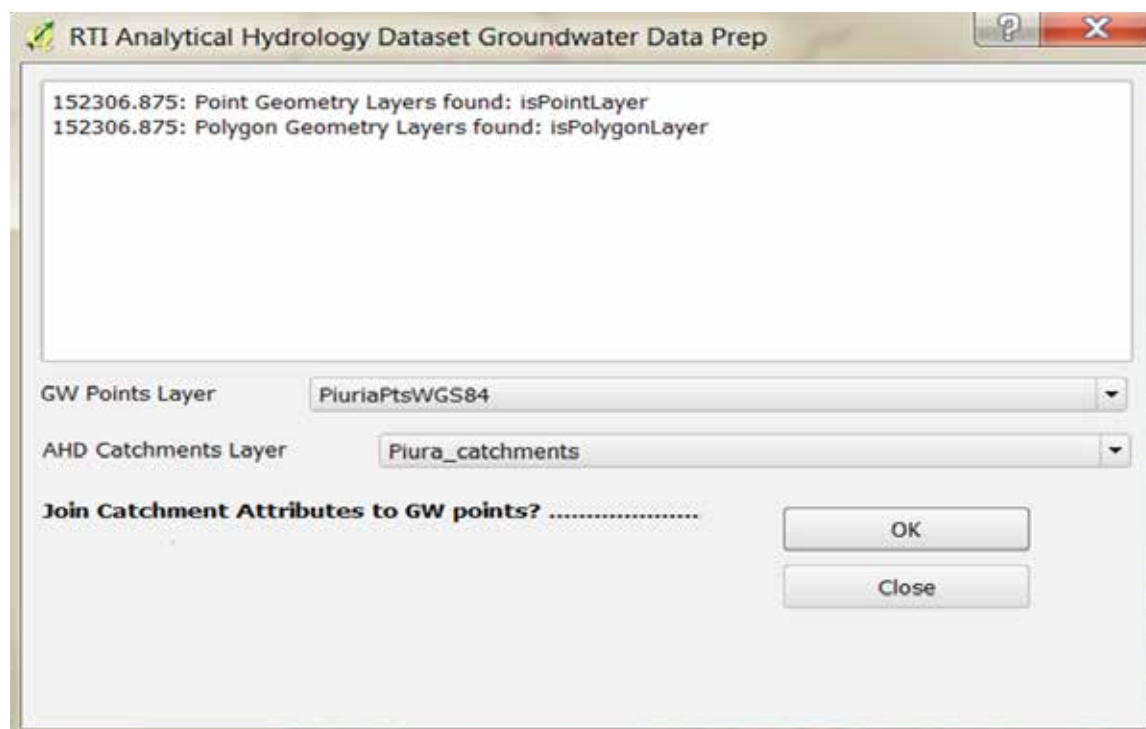
Los puntos de aguas subterráneas de los puntos que usted usar de atributo y los polígonos de cuencas con los que desea atribuir a los puntos deben cargarse en QGIS como capas de vectores antes de intentar utilizar la herramienta. Una vez que los puntos de las aguas subterráneas y las cuencas han sido cargados como capas puede seleccionarlos de la lista desplegable llamada “GW Points Layer”

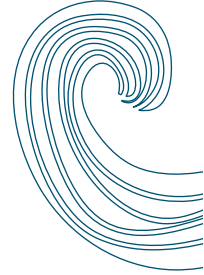


“ (“Capa de puntos GW “) y “AHD Catchments Layer” (“Capa AHD Cuencas”) respectivamente. También, de ser posible, las dos capas deben estar en el mismo sistema de coordenadas.

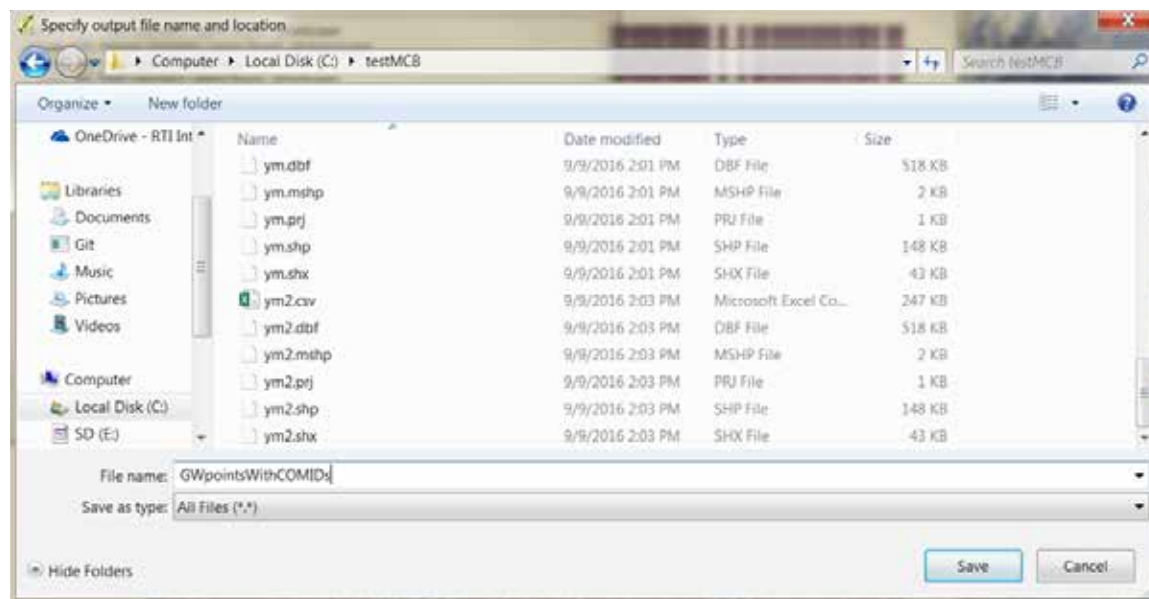
Después de realizar sus selecciones puede pulsar el botón “OK” para realizar la unión de las cuencas COMIDs a los puntos. Aparecerá una ventana de diálogo preguntando dónde desea guardar los archivos de salida/output y cuál debe ser el nombre base de los archivos (Figura A-10). Después de navegar a la ubicación e introduciendo un nombre pulsar el botón “Save” (“Guardar”) en la ventana de diálogo que aparece. En este momento la aplicación va a realizar la unión y guarda los resultados en la ubicación indicada. La ventana de texto del menú debe contener una línea que dice “The.csv file has been successfully exported” (“El archivo.csv ha sido exportado correctamente”) si todo ha salido bien. Para evitar problemas de bloqueos en los resultados, estos no se cargan automáticamente en la lista de capas QGIS, pero pueden ser cargados manualmente y/o se utilizan como entrada/input por otros procesos de modelaje de aguas subterráneas. Véase la Figura A-11 para obtener una muestra de los resultados. Por último, pulse el botón “Close” (“Cerrar”) para cerrar el menú.

**Figura A-9. Conjunto de Datos RTI de Hidrología Analítica para la Preparación de Datos de las Aguas Subterráneas**



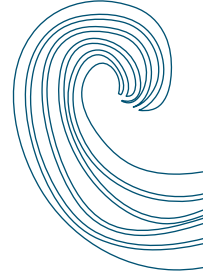


**Figura A-10. Ubicación y nombre Base del Archivo Guardar de Preparación de Datos de Aguas Subterráneas**



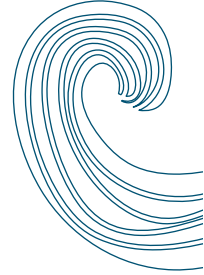
**Figura A-11. CSV (visto desde dentro de Excel) que resultó de las aguas subterráneas mediante la herramienta de preparación de datos.**

LAYER	ROW	COLUMN	TOP	BOTTOM	CELLZ	THICKNES	COMID
1	1	1	65.307	-5.06	30.1235	70.367	305438600
3	1	1	64.626	-1.1011	31.76245	65.7271	305456000
4	1	1	63.013	6.0701	34.54155	56.9429	305456000
5	1	1	62.589	11.878	37.2335	50.711	305456000
6	1	1	67.672	23.594	45.633	44.078	305456000
7	1	1	75.336	38.256	56.796	37.08	305451800
8	1	1	77.703	45.173	61.438	32.53	305451800
9	1	1	80.011	52.814	66.4125	27.197	305451800
10	1	1	80.011	52.814	66.4125	27.197	305451800
11	1	1	82.258	57.767	70.0125	24.491	305464900
12	1	1	83.936	58.081	71.0085	25.855	305464900
13	1	1	85.642	58.978	72.31	26.664	305464900
14	1	1	87.484	57.457	72.4705	30.027	305464900
15	1	1	88.982	56.257	72.6195	32.725	305464900
16	1	1	90.112	55.941	73.0265	34.171	305464900
17	1	1	91.658	54.337	72.9975	37.321	305464900
18	1	1	93.292	51.03	72.161	42.262	305464900
19	1	1	95.213	47.202	71.2075	48.011	305421400
20	1	1	97.284	47.933	72.6085	49.351	305421400
21	1	1	99.243	49.069	74.156	50.174	305421400
22	1	1	102.32	50.463	76.3915	51.857	305421400

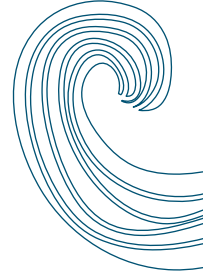


## Referencias

- ESRI. 2010. ArcGIS Desktop: Release 10.0 Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. Disponible en <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis10>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. Hydrological basins in South America (Derived from HydroSHEDS). Disponible en <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>. Acceso en septiembre, 2011.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. Hydrological basins in Central America (derived from HydroSHEDS). Disponible en <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>. Acceso en septiembre, 2011.
- Conservation Science Program of the World Wildlife Fund (WWF). n.d. HydroSHEDS. Disponible en <http://www.worldwildlife.org/science/projects/freshwater/item1991.html>. Acceso en agosto, 2011.
- Gavrilovic Z. (1988). The use of empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams / El uso del metodo empirico (Metodo de Potencial de Erosion) para calcular la produccion y transporte de sedimentos en flujos torrenciales o no estudiados. Conferencia Internacional de Regimen Fluvial, Inglaterra: Wallingford; 411-422.
- Neitsch, Susan L., et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation / Documentación teórica de la herramienta de evaluación del suelo y del agua. Versión 2009. Texas Water Resources Institute, 2009.
- NHDPlus User Guide (version July 1, 2007). U.S. Geological Survey and U.S. Environmental Protection Agency. Disponible en [www.horizon-systems.com/NHDPlus/data/NHDPLUS\\_UserGuide.pdf](http://www.horizon-systems.com/NHDPlus/data/NHDPLUS_UserGuide.pdf). Acceso en agosto, 2011.
- USGS (U.S. Geological Survey). 2011. HydroSHEDS 15 arc-second DEMs for SA and CA regions (SRTM elevation DEM, Hydro-DEM, flow direction DEM, flow accumulation DEM). Disponible en <http://hydrosheds.cr.usgs.gov>. Acceso en septiembre, 2011.
- USGS (U.S. Geological Survey). 2011. National Hydrography Dataset (NHD) Data Distribution. Disponible en <http://viewer.nationalmap.gov/viewer/nhd.html?p=nhd>. Acceso en agosto 2011.
- USGS (U.S. Geological Survey). 2011. An overview of the National Hydrography Dataset. Disponible en <http://nhd.usgs.gov>. Acceso en diciembre 13, 2011.
- Wischmeier, Walter H., y Dwight David Smith. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning / Predicción de perdidas por erosion por lluvias - Una guía para la planificación de la conservación. (1978).



## **Apéndice B:** Estadísticas de Calibración de Hydro-BID



Hydro-BID produce series de tiempo de flujo de corrientes a nivel de cuenca. Esta salida (output) se puede adaptar a una aplicación específica del modelo. Por ejemplo, para fines de calibración, las series de tiempo de flujo simuladas se generan para comparar con aquellas series de tiempo de flujos observadas en las estaciones de aforo. Los siguientes resultados estadísticos se basan en el flujo simulado y observado de series de tiempo de flujo.

### Supuestos

- Se supone que la serie de flujo observada que no tiene ningún valor faltante para el período de simulación
- Tanto los flujos observados y simulados están en metros cúbicos por segundo (cms)
- Ambas series de tiempo están en un intervalo de tiempo diario
- Para evitar el impacto de la condición inicial de la simulación del modelo, el primer año del período de simulación no será considerado en los cálculos de las estadísticas de rendimiento
- $O_t$  = Flujo observado en el día t
- $S_t$  = Flujo simulado del modelo en el día t

A continuación están los cálculos de estadísticas después de cada corrida del modelo:

#### 1. Generar el flujo promedio mensual

Para ambos flujos observado y simulado, los flujos mensuales promedios  $O_{(m,y)}$  y  $S_{(m,y)}$  se calculan

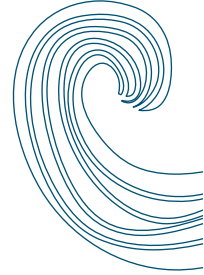
$$O_{(m,y)} = \frac{\sum_{t=1}^{NDAYS} O_t}{NDAYS_{my}} \quad (E.B.1)$$

$$S_{(m,y)} = \frac{\sum_{t=1}^{NDAYS} S_t}{NDAYS_{my}} \quad (E.B.2)$$

donde **m** es el mes **y** es el año, y NDAYS es el número de días en el mes.

#### 2. Error de volumen general (Overall volume error) (ove)

$$ove = \frac{\sum_{t=1}^N S_t - \sum_{t=1}^N O_t}{\sum_{t=1}^N O_t} * 100 \quad (E.B.3)$$



Donde  $N$  es el número de días de la simulación sin el primer año. Tal como se describió antes, el  $t=1$  comienza el primer día del segundo año de la simulación.

3. Error de Volumen Anual (Annual volume error) (ave)

El error de volumen anual utiliza la misma ecuación (E.B.3), pero calcula para cada año por separado.

4. Error de Volumen Mensual (Monthly volume error) (mve)

Para cada uno de los 12 meses, se calcula el error de volumen mensual mediante la ecuación 3. Por ejemplo, para el mes de enero, todos los flujos en enero de todos los años se suman juntos.

5. Correlación  $r$

$$r = \frac{N \sum_{t=1}^N O_t S_t - \sum_{t=1}^N O_t \sum_{t=1}^N S_t}{\sqrt{\left[ N \sum_{t=1}^N S_t^2 - \left( \sum_{t=1}^N S_t \right)^2 \right] \left[ N \sum_{t=1}^N O_t^2 - \left( \sum_{t=1}^N O_t \right)^2 \right]}} \quad (\text{E.B.4})$$

6. Coeficiente de correlación modificado (Modified correlation coefficient),  $r_{mod}$  (McCuen and Snyder, 1975)

$$r_{mod} = r \frac{\min(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})}{\max(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})} \quad (\text{E.B.5})$$

Donde  $\sigma_{obs}$  y  $\sigma_{sim}$  son desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, respectivamente. Ver la Ecuación 8 para calcular las desviaciones estándar.

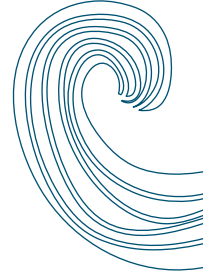
7. Índice de Eficiencia de Nash- Sutcliffe,  $R^2$

$$r^2 = 1.0 - \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2} \quad (\text{E.B.6})$$

Donde  $Q_o$  es la media (promedio) del flujo observado.

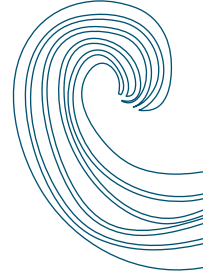
$$\mu_o = \frac{\sum_{t=1}^N O_t}{N} \quad (\text{E.B.7})$$

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2}{N-1}} \quad (\text{E.B.8})$$



## **Apéndice C:** Formato para Cuencas Interrumpidas (Cut-off)





Nombre del archivo (Filename): comid.csv

Se proveen tres columnas: COMID, Fecha (día/mes/año), flujo (m<sup>3</sup>/s)

COMID es un Identificador de Cuencas único (Catchment Identifier) donde la Cuenca interrumpida, tal como un embalse, está localizada.

Ejemplo del formato:

COMID	Date	Flow (m <sup>3</sup> /Second)
314239700	1/1/2001	100
314239700	1/2/2001	100
314239700	1/3/2001	100
314239700	1/4/2001	100.3538551
314239700	1/5/2001	100.4935238
314239700	1/6/2001	100.0128607
314239700	1/7/2001	100.1432795
314239700	1/8/2001	116.5543028
314239700	1/9/2001	100.459333
314239700	1/10/2001	103.9216366
314239700	1/11/2001	100.0557632
314239700	1/12/2001	101.1451565
314239700	1/13/2001	119.5850988
314239700	1/14/2001	132.9346077
314239700	1/15/2001	135.98004
314239700	1/16/2001	100.3058625
314239700	1/17/2001	100.2916757
314239700	1/18/2001	100.5907081
314239700	1/19/2001	101.1154081

