



HAL
open science

Herramientas hidroinformáticas y consideraciones para modelar procesos superficiales y subterráneos acoplados mediante WEAP-MODFLOW

P. Sanzana, J. Gironas, Isabelle Braud, N. Hitschfeld, X. Vargas, S. Vicuna, J.F. Munoz, R. Villegas, E. Rubio, R. Herrera

► To cite this version:

P. Sanzana, J. Gironas, Isabelle Braud, N. Hitschfeld, X. Vargas, et al.. Herramientas hidroinformáticas y consideraciones para modelar procesos superficiales y subterráneos acoplados mediante WEAP-MODFLOW. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sep 2018, Buenos Aires, Argentina. pp.1221-1236. hal-02023789

HAL Id: hal-02023789

<https://hal.science/hal-02023789v1>

Submitted on 18 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**HERRAMIENTAS HIDROINFORMÁTICAS Y CONSIDERACIONES PARA
MODELAR PROCESOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS
ACOPLADOS MEDIANTE WEAP-MODFLOW**

***P. Sanzana^{1,2,3}, J. Gironás^{1,2,4}, I. Braud³, N. Hitschfeld⁵, X. Vargas⁶, S. Vicuña^{1,7}, J-F. Muñoz¹,
R. Villegas⁸, E. Rubio⁸, R. Herrera⁹***

¹DIHA-UC, Chile, psanzana@uc.cl, jgironas@uc.cl, jfmunoz@uc.cl, ²CEDEUS, Chile, ³IRSTEA, Francia, isabelle.braud@irstea.fr, ⁴CIGIDEN, ⁵DCC- UCH, Chile, nancy@dcc.uchile.cl, ⁶DIC-UCH, Chile, xvargas@ing.uchile.cl, ⁷Centro Cambio Global-UC svicuna@uc.cl, ⁸ERIDANUS erubio@eridanus.cl, rdgo.villegas@gmail.com, ⁹ARCADIS rodrigo.herrera@arcadis.com

RESUMEN:

El uso de herramientas hidroinformáticas en problemas de ingeniería permite manejar un volumen mucho mayor de información, ampliar las capacidades de programas actuales y obtener resultados más realistas en problemas complejos. En el presente trabajo se describen herramientas integradas de modelación superficial-subterránea y se profundiza en cómo pueden ser mejoradas mediante el uso de herramientas informáticas. También se presenta una introducción del estado del arte del uso conjunto de recursos superficiales-subterráneos y actuales enfoques de modelos acoplados que se han aplicado para la gestión integrada del recurso. Finalmente, se resumen las ventajas/desventajas de utilizar enfoques de modelación superficial/subterránea integrada y las principales consideraciones para resolver problemas de ingeniería o gestión del recurso hídrico.

ABSTRACT:

The use of hydroinformatics tools in engineering problems allows to manage a much larger volume of information, expands the capabilities of current software programs and allows to get more realistic results in complex problems. This work describes integrated surface-groundwater models and explores how they can be improved through the use of computer tools. Moreover, it introduces the state of the art of integrated use of surface and groundwater resources and current coupled model approaches that have been applied to carry out integrated resource management. Finally, it summarized advantages/disadvantages of using integrated surface/ground modeling approaches and the main considerations for solving engineering or water resource management problems.

PALABRAS CLAVES: *modelación integrada, WEAP, MODFLOW, hidroinformática*

INTRODUCCIÓN

En las décadas recientes la automatización de las rutinas y la informatización de las actividades y los cálculos de laboratorio, cada vez más complejos, han aumentado considerablemente el poder de los experimentadores, de los observadores y de los teóricos dedicados a la construcción de modelos (Hobsbawn, 2012). De esta manera, conocimientos de programación orientados al uso de recursos hídricos permiten potenciar las actuales capacidades en el área de ciencias de la computación y ciencias de la tierra. En esta línea diversas instituciones y programas educacionales han optado cada vez más por incluir conocimientos de hidroinformática como una ciencia interdisciplinaria (Abbott, 1999; Price, 2011). La utilización de este tipo de herramientas permite facilitar las tareas necesarias para el manejo sustentable del medio ambiente en todas sus etapas, principalmente en las de pre-procesamiento, modelación, y post-procesamiento. Estas labores pueden llegar a ser muy complejas dependiendo del problema y la cuenca o acuífero que se desee modelar. Hoy en día, ambientes físicos altamente intervenidos por elementos artificiales, como cuencas peri-urbanas (Braud et al., 2013), son cada vez más comunes en los proyectos de ingeniería. Asimismo, en aquellas zonas en las que la interacción de aguas superficiales y subterráneas es importante la modelación explícita de la relación río-acuífero toma un peso gravitante en los flujos bases (Sahuquillo et al., 2010; Barron et al., 2013; Bhaskar et al., 2016).

En el presente trabajo se describen herramientas de modelación integrada del recurso superficial-subterráneo y se profundiza en cómo pueden ser mejoradas mediante el uso de herramientas informáticas. También se describe una introducción del estado del arte del uso conjunto de recursos superficiales-subterráneos y actuales enfoques de modelos acoplados que se han aplicado para llevar a cabo la gestión integrada del recurso. Los acápites descritos en este trabajo permite entregar un material de gran valor a ingenieros y científicos con el interés de desarrollar proyectos de ingeniería hidráulica en los que sea necesario acoplar más de un modelo de flujos, específicamente los modelos WEAP (Yates et al., 2005a; Yates et al., 2005b) y MODFLOW (Harbaugh, et al., 2000). Finalmente, se resumen las ventajas/desventajas de utilizar enfoques de modelación superficial/subterránea integrada y las principales consideraciones para resolver problemas de ingeniería o gestión del recurso hídrico.

PROBLEMÁTICA ACTUAL EN LA INTEGRACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS Y OPORTUNIDAD DEL USO DE HERRAMIENTAS HIDROINFORMATICAS

La elección, desarrollo y aplicación de modelos hidrológicos distribuidos no es una tarea sencilla. La selección más apropiada de la estrategia de modelación debe considerar un compromiso entre las simplificaciones de los procesos físicos y la representación espacial de los dominios que se deseen representar (Branger et al, 2010). Es imposible encontrar el enfoque perfecto y único de modelación dentro de un amplio rango de posibilidades (Branger et al., 2010), y tal como plantean Leavesley et al. (2002), existe un cambio actual de paradigma en el que se requiere replantear la pregunta *“¿cuál es el modelo más apropiado para un conjunto de criterios?”* por *“¿qué combinación de conceptualización de procesos es la más apropiada?”*.

En la Figura 1 se muestra un esquema simplificado de distintos dominios espaciales y la respectiva topología de los elementos involucrados, (D_j, τ_j) . Cada dominio puede ser representado mediante diferentes enfoques de modelación según sea el esquema más adecuado para el problema que se desea modelar (e.g. para un dominio se puede aplicar un modelo semi-distribuido y para otro dominio se puede aplicar un modelo completamente distribuido). Un modelo hidrológico superficial puede estar compuesto, por ejemplo, de los siguientes elementos: subcuencas, bandas de elevación, Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) (Flügel, 1995) o Elementos Hidrológicos Urbanos (EHU) (Rodríguez et al., 2008). Estos elementos pueden estar representados por geometría regular (polígonos simples regulares: grillas, triángulos) o geometrías irregulares (polígonos simples irregulares). Al interior del dominio del modelo superficial, D_1 , los elementos se encuentran conectados entre sí y conectados a una red de drenaje con una topología previamente definida, τ_1 . Por

otro lado, el dominio de un modelo hidrogeológico, D_2 , puede estar dado mediante pequeños segmentos del acuífero, que puede estar representado por grillas, triangulaciones, diagramas de Voronoi o grillas anidadas (Quadratree en inglés). Estos elementos se conectan entre sí y además se conectan con condiciones de borde en las que se puede considerar intercambio flujo nulo (celdas o bordes inactivos) o condiciones de altura de flujo constante o variable en el tiempo mediante una topología previamente definida, τ_2 . Al integrar ambos modelos hidrológicos (superficiales y subterráneos) se deben conectar los diferentes elementos de cada dominio espacial, D_1 y D_2 (Fig. 2 a). Esta nueva conexión genera la aparición de una nueva topología, $\tau_{1'2'}$, que debe conectar los elementos de los distintos modelos. Esta problemática puede no ser trivial dependiente de la cantidad de elementos que se deban vincular. Una forma flexible y eficiente para abordar este problema ha sido el uso de archivos geospaciales que contienen información georreferenciada de la ubicación y los límites de cada elemento. Un ejemplo muy utilizado corresponde a los archivos tipo shapefile. Este tipo de archivos, mediante una adecuada codificación alfanumérica, permiten identificar cómo se conectan y cómo se realiza el intercambio de flujo de cada elemento para cada paso de tiempo (Fig.2 b).

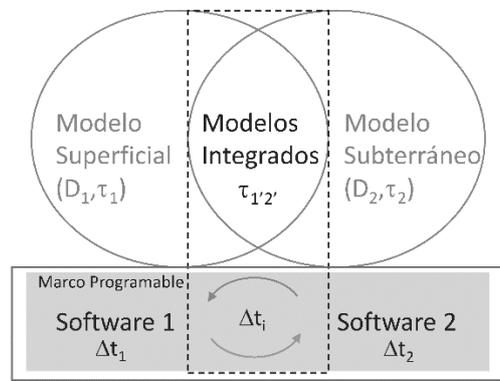


Figura 1.- Esquema de marco programable entre modelos acoplados a paso de tiempo Δt_i . Cada modelo tiene un dominio espacial, una discretización y una topología propia (D_j, τ_j) con su respectivo paso tiempo Δt_j ($j=1,2$). En la integración de ambos modelos aparece una nueva topología, $\tau_{1'2'}$

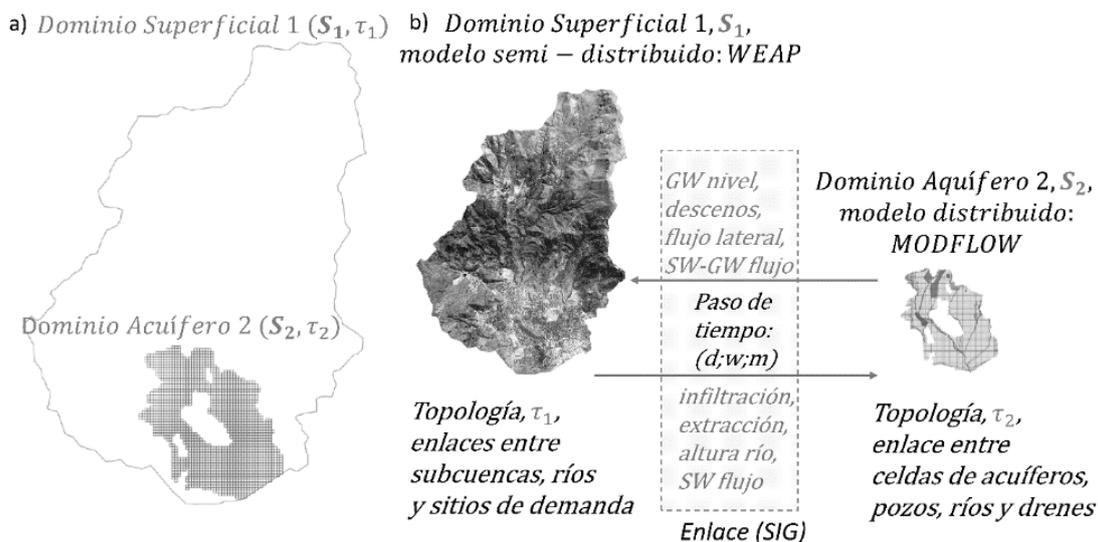


Figura 2.- Topología entre modelos WEAP-MODFLOW y flujos de intercambio para cada paso de tiempo (Sanzana et al., 2018)

Por otro lado, cada vez es más común que los modelos cuenten con una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) o librerías que permiten su uso independiente de su Interfaz Gráfica de Usuario (GIU), por lo que existe una gran flexibilidad en el manejo y complementación de diferentes enfoques. En los casos que el software cuenta con una Interfaz Gráfica de Usuario (GIU

en inglés), no necesariamente esta interfaz considera el manejo de todas las variables para las que se desea realizar un control y/o un seguimiento (e.g. error en el balance de masa en cada paso de tiempo y error de intercambio de flujos de entrada y salida entre los distintos modelos). Es por ello que las herramientas informáticas permiten llevar un control y generar gráficos más allá de los que vienen programados en forma previa en la plataforma GIU. El uso de lenguajes de programación presenta una oportunidad que aumenta el manejo de modelos acoplados. En la Figura 3 se muestra un esquema explicativo, donde se ilustra la gran cantidad de científicos que utilizan herramientas de programación y se mueve en el campo de programación funcional y programación orientada a objetos, donde hay una gran gama de lenguajes que permite llevar a cabo las labores de modelación. En el caso de programadores de las ciencias de la computación, es común que utilicen lenguajes más abstractos pero que tienen la ventaja de comunicarse de manera más eficiente con el lenguaje máquina de los ordenadores, y por ende optimiza el tiempo de procesamiento, este tipo de lenguajes generalmente son clasificados como de bajo nivel (debido a que son difícil entendimiento humano). No existe un lenguaje óptimo para cada labor, y la selección final dependerá del modelador. Actualmente la popularidad de Python (python.org) y R (R-project.org) es innegable en el ámbito de las ciencias de la tierra y la ingeniería. Esto se debe mayormente a que son lenguajes de uso libre, de alto nivel, de una fácil comprensión para científicos o ingenieros no muy familiarizados con el área de la programación, y con una comunidad virtual muy activa en cuanto a resolución de problemas e intercambio de nuevos paquetes.

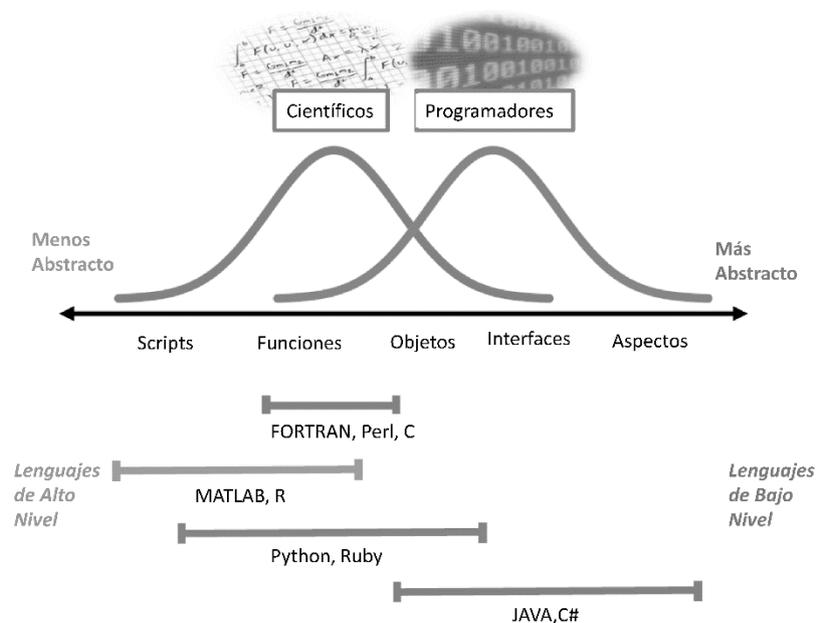


Figura 3.- Esquema uso de lenguajes de programación en ejemplos aplicados a la geociencias (adaptado a partir de Baart 2013)

PERTINENCIA DE MODELACIÓN SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEA INTEGRADA

Orphanópoulos y Dumoulin (2015) desarrollaron una metodología de análisis visual de resultados que permite tener una mirada sistemática, integradora y global del sistema modelado, mediante la extracción y organización de la gran cantidad de información de salida, y la reunión de variables afines en forma gráfica. Esta metodología para exploración y explotación de resultados facilita la comprensión y el control de los procesos involucrados en modelos integrados. Orphanópoulos y Dumoulin (2015) llevaron a cabo el control de variables en modelos con enfoques semi-distribuidos, sin embargo la metodología puede ser extrapolada a modelos completamente distribuidos, como es el caso de MODFLOW.

En forma previa se debe tener clara la razón de utilizar enfoques acoplados y no enfoques más simplificados que puedan dar una respuesta satisfactoria. Esta reflexión se debe realizar cuidadosamente previo a la aplicación de cualquier proyecto. Existen ciertos criterios guías simples a considerar en lo referido al acople de modelos superficial y subterráneo, dentro de los cuales destacan los siguientes:

1. Tipo de problemas en que es recomendable un enfoque acoplado superficial-subterráneo:
 - Cuando se requiere de estimaciones precisas de flujo base en cuencas con interacción río-acuífero, o entre pozos debido a sobre-extracción.
 - Cuando se requiera buenas estimaciones de flujos subterráneos y niveles piezométricos, particularmente en acuíferos fuertemente influenciados por recarga laterales (e.g. acuíferos de cabecera en climas de alta cordillera con acumulación y derretimiento nival).
2. Tipo de problemas donde no es recomendable un modelo acoplado:
 - Cuando se requiere modelar crecidas o flujos altos a escala mensual
 - Cuando el acuífero no posee un gran desarrollo vertical y puede ser fácilmente representado por un elemento conceptual como un estanque lineal.

Para acoplar un modelo superficial y subterráneo, se recomienda contar con el modelo subterráneo previamente calibrado con extracciones y niveles históricos, tanto en régimen permanente como en régimen transiente. Es posible que en el proceso de integración sea necesario llevar a cabo una re-calibración de los parámetros del modelo subterráneo, aunque se recomienda que los cambios sean menores. Sin embargo, estos cambios dependerán de la calidad del modelo numérico subterráneo inicial. Normalmente aquellas zonas con un alto grado de actividad sobre el acuífero cuentan con un modelo hidrogeológico numérico previamente desarrollado; en caso contrario se debe considerar una etapa de desarrollo de este. En el caso de los modelos superficiales existentes, tienden su mayoría a representar la zona de almacenamiento inferior con un enfoque conceptual, que es necesario eliminar en el paso de acoplamiento. Por lo tanto, es necesario recalibrar los parámetros del modelo y volver a ajustar los parámetros para reproducir los caudales en aquellos puntos de control para la calibración. Finalmente, es importante cualquier información relacionada con cambios geomorfológicos que pueden existir en la cuenca a nivel superficial y que puedan afectar el proceso de producción de escorrentía directa y el flujo base.

En el caso de contar con ambos modelos y su correcta integración, una gran ventaja es la simulación de distintos escenarios. En particular, el modelo acoplado queda alimentado principalmente por forzantes climáticas en forma directa, lo que permite simular escenarios futuros en forma más rápida. En el caso de modelos desacoplados para simular distintos escenarios siempre se debe considerar correr el modelo superficial en forma inicial y posteriormente introducir las nuevas recargas en el modelo hidrogeológico, llevando a un proceso iterativo que muchas veces puede consumir gran parte del tiempo de los proyectos de ingeniería de actualización de modelos.

Si bien la falta de monitoreo de variables hidroclimáticas es conocida, en el caso de las aguas subterráneas este es un problema más frecuente. Por ejemplo, es muy común la falta de un registro de consumos y extracciones, por lo que se deben hacer supuestos que aumentan el grado de incertidumbre. Asimismo, los niveles de pozos no se observan en forma continua, sino a nivel mensual, a diferencia de los niveles en cauces que son monitoreados más continuamente. Por lo tanto, todo proyecto de ingeniería debería considerar una campaña de medición que ayude a disminuir las fuentes de incertidumbre en proyectos de modelación integrada. Por último en la selección del modelo superficial se recomienda el uso de herramientas parsimoniosas, lo que facilita el proceso de calibración.

MODELO WEAP Y ALTERNATIVAS DE REPRESENTACIÓN RÍO-ACUÍFERO

El modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation And Planning system) (weap21.org/), desarrollado por el SEI (Stockholm Environment Institute) en 1989, ha sido aplicado con bastante

popularidad y buenos resultados, tanto en estudios de disponibilidad como de planificación del recurso hídrico (CCG-UC, 2016; Sanzana et al., 2018). Este modelo posee una interfaz gráfica amigable y provee un enfoque integral, que permite su aplicación con diferentes objetivos.

Alternativas de representación río-acuífero

La representación del acuífero en el modelo WEAP puede ser abordada con tres enfoques, los que implican distintos niveles de complejidad según la información requerida de los niveles freáticos y del comportamiento del acuífero en general. Estos enfoques son:

- Enfoque de Estanque: este modelo se basa en el supuesto que el acuífero se comporta como un estanque de volumen prismático, con propiedades de volumen, y flujos de ingresos y egresos.
- Enfoque de Cuña (Río-Acuífero): esta representación permite modelar la interacción río acuífero mediante una cuña prismática que se conecta con el río, ambos con características geométricas y propiedades físicas, como volumen, espesor y conductividad.
- Enlace con MODFLOW: esta representación permite integrar directamente los flujos superficiales con los flujos subterráneos, donde en cada paso de tiempo se ejecutan dos modelos numéricos, uno distribuido y el otro agregado.

El enfoque de estanque o baldes permite simular recarga y bombeo de agua subterránea, sólo a nivel agregado espacialmente. No considera en forma directa la interacción río-acuífero, y solo es capaz de generar un flujo base desde el estanque inferior al río. Finalmente, no se considera una posible conexión entre los estanques subterráneos, ocurriendo la interacción entre distintos estanques solo a nivel del río. En la Figura 4 se muestra el esquema de modelación de estanques donde aparece la zona superficial (no saturada) y la zona profunda (saturada), representada por dos estanques interconectados.

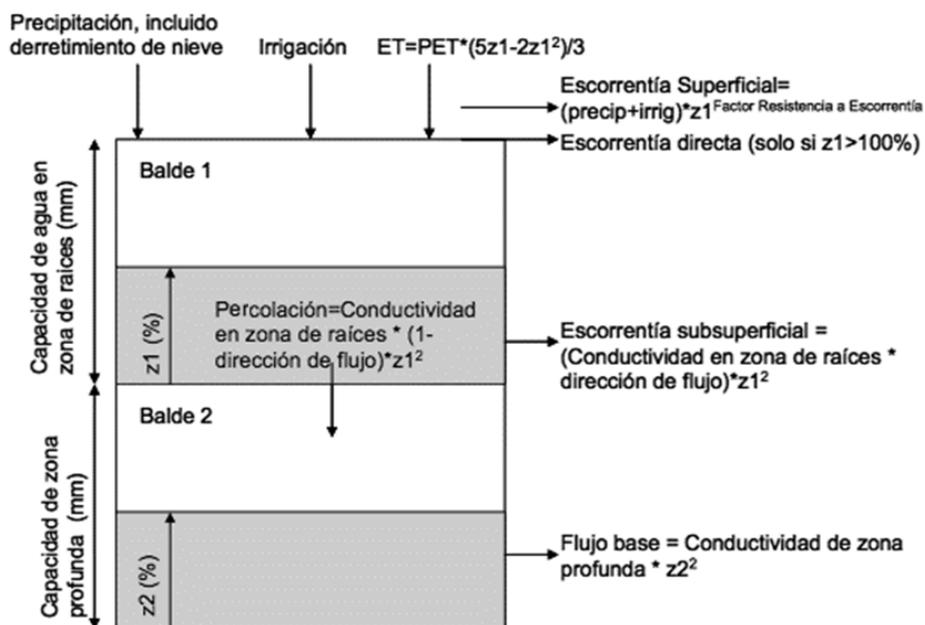


Figura 4.- Esquema simplificado del modelo WEAP (elaborado a partir de weap21.org/)

El enfoque de cuña Río-Acuífero mantiene en la zona superficial el esquema del enfoque de embalse, pero considera un almacenamiento subterráneo tipo cuña, tal que sobre cierto nivel el acuífero puede recibir o entregar aportes a los tramos de río definidos previamente. En la Figura 5 se muestra el esquema de cuña implementado en WEAP, donde se considera recarga, evaporación, coeficientes de almacenamiento y conductividad.

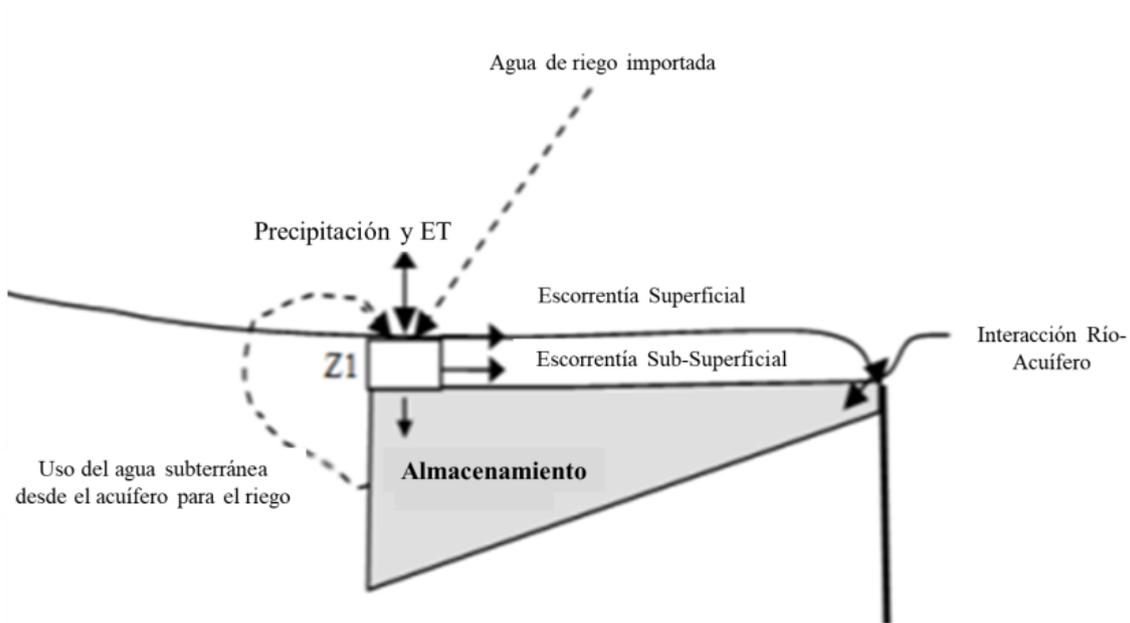


Figura 5.- Esquema de Modelación de Cuña WEAP (elaborado a partir de weap21.org/)

Finalmente, el enlace con MODFLOW proporciona una representación de la dinámica de flujos subterráneos que considera la interacción tanto entre río y acuífero como con otros elementos según se definan. El enfoque requiere la preparación previa de capas con información espacial (e.g. topografía, conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento) en plataformas SIG (Sistemas de Información Geográfica) que permitan identificar y conectar de manera correcta cada elemento de la modelación superficial, y sirvan entonces como condiciones de borde de la modelación subterránea. La Figura 6 muestra la interfaz WEAP-MODFLOW que se utiliza para cada paso de tiempo de modelación.

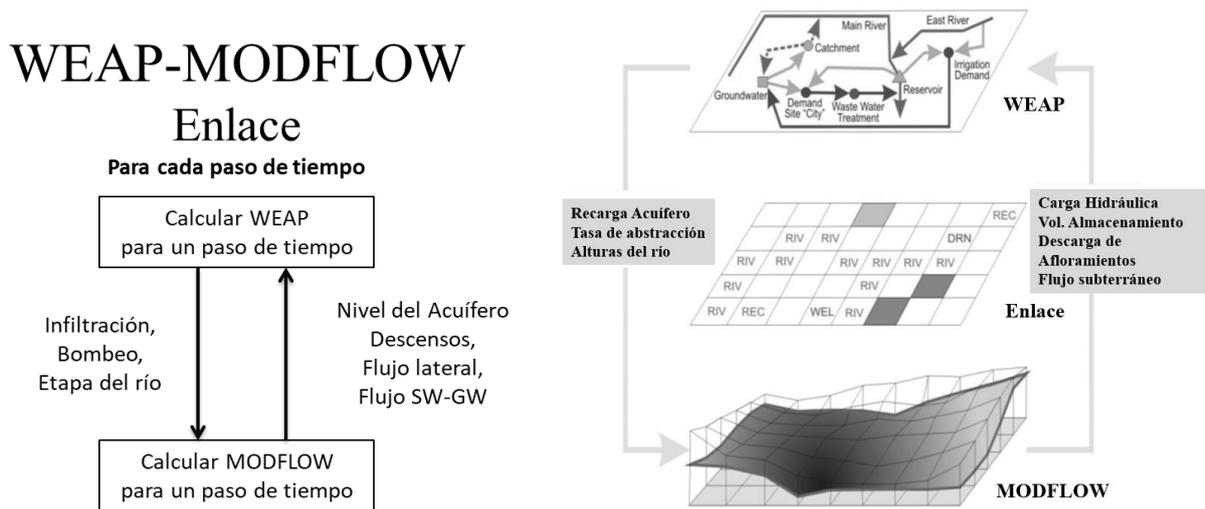


Figura 6.- Esquema de Modelación de Cuña WEAP (elaborado a partir de weap21.org/)

CONSIDERACIONES GENERALES DE INTEGRACIÓN WEAP & MOFLOW

La mayoría de los modelos de escorrentía superficial realizan simplificaciones en la modelación de flujos subterráneos y acuíferos, reduciéndolos típicamente a elementos conceptuales o estanques, los que tienen una cierta capacidad de almacenamiento y contribución al flujo base diferente a la del escurrimiento superficial y subsuperficial. Ejemplos de estas herramientas son el

modelo VIC (Liang et al., 1994), el modelo HBV (Bergstrom, 1976), modelo MOS (DGA-AC, 2000) o MAGIC (Zambrano et al, 2005). Generalmente la recarga obtenida a través de estos enfoques desconectado del modelo subterráneo implica una serie de iteraciones entre ambos modelos (superficial y subterráneo) hasta que convergen o cumplen cierto criterios impuestos por el modelador. En el caso de acoplar con modelos subterráneos, el estanque inferior asociado al almacenamiento más profundo es remplazado por el modelo subterráneo. Para esto se debe tener en cuenta la información que requiere cada modelo:

- a) Modelo subterráneo: geometría 3D del área del modelo como una malla apropiada (relieve, capas, superficies superior e inferior), permeabilidad de las respectivas células y capas (anisotropía opcional en 3D), altura piezométrica en la salida del acuífero (para fijas condiciones de borde aguas abajo) o condiciones de borde aguas arriba en caso que no se modele el acuífero desde su inicio en cabecera, extracciones e inyecciones artificiales (introducidas en forma de recarga artificial, o como excedentes del riego (agrícola o urbano), etc.), condiciones límites en los márgenes del modelo, Propiedades y geometría del acuífero (elevación del fondo, almacenamiento, porosidad, conductividad entre otras), Propiedades y atributos del río (elevación del fondo, conductividad si se modelará la interacción entre las aguas subterráneas y el río).
- b) Modelo superficial: esquema del funcionamiento de la cuenca (diagrama unifilar para comprender el funcionamiento de la cuenca), captaciones superficiales y subterráneas, demandas y caudal en el río, segmentación espacial más apropiado (sub-cuencas, bandas de elevación, uso de suelo, etc.), forzantes climáticas (precipitación, evaporación, temperatura, isoterma 0°, entre otros), parámetros de suelo (coeficiente de cultivo y capacidad de infiltración), esquema de riego y tasas de riego, caudales de retorno, pérdidas de transmisión, y otros temas relevantes como importación de caudal desde otra cuenca, canales de desvío, etc.).

Respecto de la segmentación del modelo hidrológico superficial, esta debe ser compatible con el modelo hidrogeológico. Por lo tanto se recomienda la modificación del modelo superficial de forma tal que la integración sea más flexible y ajustable a las condiciones de borde del modelo subterráneo. En el caso de WEAP y MODFLOW es normal que los modelos presenten los siguientes esquemas de segmentación espacial:

WEAP: Modelo Concentrado o Semi-disturbido. Segmentación espacial realizada en base a: subcuencas, bandas de elevación, Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) o Elementos Hidrológicos Urbanos (EHU). Estos elementos pueden estar representados por geometría regular (polígonos simples regulares: grillas, triángulos) o geometrías irregulares (polígonos simples irregulares).

MODFLOW: Modelo espacialmente distribuido. Segmentación espacial realizada en mediante pequeños segmentos del acuífero, que puede estar representado por grillas, triangulaciones, diagramas de Voronoi o grillas anidadas (Quadratree en inglés).

Por otro lado también se debe tener en cuenta que los tiempos internos de procesamiento de ambos modelos podrían perfectamente no coincidir, sin embargo el tiempo en el que se comunican ambos modelos debe coincidir. En el caso del modelo MODFLOW, el stress-period debe coincidir con el paso de tiempo seleccionado en WEAP (diario, semanal, mensual u otro), pero el time-step interno de MODFLOW puede aumentar considerablemente para aquellos casos en los que la solución no converge. Por ello se recomienda que el modelo sea pre-calibrado previo al acople.

RUTINAS DESARROLLADAS COMO SOPORTE A LA VINCULACIÓN WEAP-MODFLOW

En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de rutinas desarrolladas como apoyo para el análisis y control de salidas que no están programadas en la interfaz actual de WEAP-MODFLOW. En la Figura 12 se muestra un ejemplo grafico de los resultados obtenidos. En la Tabla 2 se muestra un resumen con los parámetros sensibles para la estimación de la recarga en el enlace WEAP-MODFLOW.

Tabla 1.- Rutinas Implementadas

Descripción	Lenguaje
<i>1.- Analisis_Sensibilidad_KeyAssumptions.py</i>	Python, R
<i>2.- Analisis_Sensibilidad_Propiedades_MODFLOW.py</i>	Python, R

Nota: Rutinas disponibles en maipoadaptacion.cl o correo al autor.

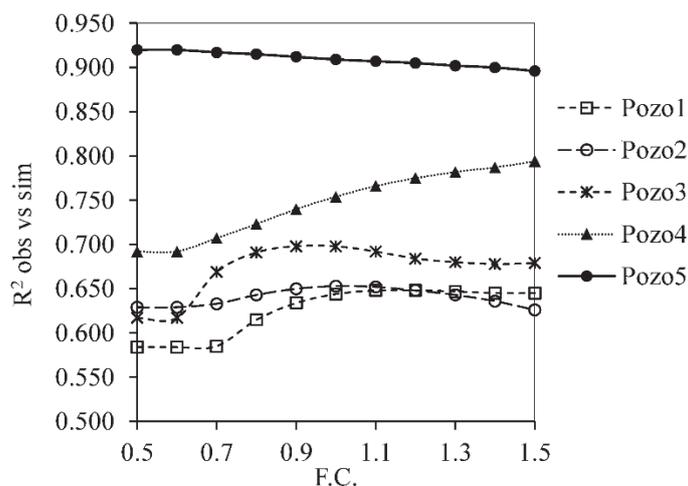


Figura 12.- Ejemplo de variación coeficiente de ajuste versus factor de corrección de parámetros óptimos

Tabla 2.- Parámetros Sensibles para estimación de recarga en enlace WEAP-MODFLOW

Parámetro	Descripción	Sensibilidad para estimar Recargas Subterráneas
Capacidad de almacenamiento del suelo	Capacidad de retención de agua de la primera capa de suelo	Sensible
Capacidad de Zona Profunda	Capacidad de retención de agua de la capa de suelo profunda	No Corresponde*
Conductividad Zona Profunda	Conductividad hidráulica de la capa de suelo profunda	No Corresponde*
Conductividad en Zona de Raíces	Conductividad hidráulica de la primera capa de suelo	Sensible
Temperatura Deshielo	Temperatura umbral para el derretimiento de la nieve	Poco Sensible
Temperatura de Congelamiento	Temperatura umbral para la acumulación de la nieve	Poco Sensible
Factor de corrección de gradientes de precipitación	Factor que multiplica a los gradientes de precipitación observados en la zona del valle, y que permite generar las series de precipitación en altura donde no existen estaciones.	Muy Sensible
Gradiente de Temperatura invierno-otoño	Variación de la temperatura respecto de la altitud	Sensible
Gradiente de Temperatura primavera	Variación de la temperatura respecto de la altitud	Sensible
Gradiente de Temperatura verano	Variación de la temperatura respecto de la altitud	Sensible
Factor de resistencia de escorrentía	Relacionado con la superficie del suelo, controla la magnitud de la escorrentía directa	Sensible
Dirección preferente de flujo	Factor que divide el flujo que va desde la primera capa de suelo hacia la profunda	Sensible

ESTUDIOS APLICADOS EN ZONAS ARIDAS Y SEMI-ARIDAS

En zonas con escasez hídrica el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas es una necesidad evidente. Normalmente este uso tiende a darse en forma natural, especialmente en periodos de sequía, generando alteraciones importantes en zonas con fuerte interconexión superficie-subsuperficie. En forma racional se tiende a utilizar el recurso subterráneo en caso de falta del recurso superficial, pero el concepto de gestión integrada (superficial-subterráneo) no se encuentra plenamente asumido por los planificadores y responsables de las toma de decisiones (Sahuquillo et al., 2010). En efecto, el uso conjunto de ambas fuentes puede tener consecuencias funcionales y ambientales importantes. Por ejemplo, un río puede pasar de recibir a perder agua, o viceversa, o se puede ocasionar o aliviar un problema de drenaje o salinidad del agua (Sahuquillo et al., 2010). Así entonces, la modelación integrada se presenta como una excelente herramienta para la gestión y planificación. A continuación se describen algunos trabajos recientes que han utilizado el acople WEAP-MODFLOW en zonas áridas y semiáridas.

ACUÍFERO DE COPIAPÓ (CHILE) (Hunter et al., 2015)

En esta investigación se propuso una técnica de evaluación de sustentabilidad, multivariada y robusta, además del indicador de rendimiento denominado Medida de Sustentabilidad (MOS) para la gestión de recursos frente a escenarios de variabilidad futura. El caso de estudio fue la Cuenca de Copiapó, 18.538 km². Se hace énfasis en la actual situación de la cuenca de Copiapó, que cuenta con un estrés hídrico extremo. Se estima que los derechos de agua otorgados (al 2015) representan cerca del 500 % de la tasa de recarga de agua subterránea, siendo un 17 % de los derechos del sector minero y el 56 % del agrícola. En cuencas áridas, el concepto de sustentabilidad no es tan simple de definir. Dado que los acuíferos tienden a explotarse sin que la recarga superficial supla el déficit, un escenario sustentable se puede definir como uno donde se mantiene una tasa de descenso del acuífero “baja”.

Se prefirió utilizar el modelo WEAP debido a su aumento en popularidad en la literatura técnica, además de su capacidad de acoplarse integradamente con un modelo MODFLOW existente. El modelo generado se dividió en subcuencas, incorporando demandas de minería y extracciones de agua potable. Se consideró información hidrometeorológica en un periodo entre 1993-2012, para el cual se calibró el modelo. La demanda agrícola fue calculada directamente con WEAP, con el método del coeficiente de cultivo y la extensión de los terrenos dedicados al rubro. Posteriormente se consideró un periodo de 30 años para estimar variaciones climáticas: series de temperatura con clara tendencia al aumento (aumento del 9 %) y precipitación con tendencia a disminuir (descenso del 9 %). El modelo WEAP-MODFLOW (Figura 7) resultó exitoso en 9 de 10 sectores del río. La complicación se le atribuye a extracciones indocumentadas (ilegales o no-controladas). La Figura 7 muestra un esquema del modelo elaborado y una imagen del acuífero encajonado en el río Copiapó.

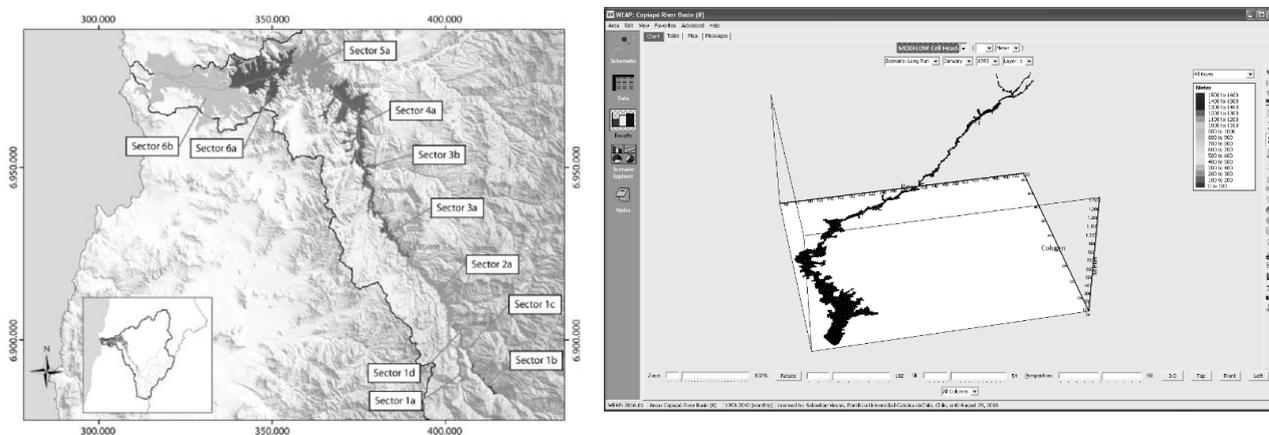


Figura 7.- Modelación integrada WEAP-MODFLOW Copiapó, Visualización 3D MODFLOW (elaborado a partir de Hunter et al., 2015)

El modelo generado en esta publicación (WEAP-MODFLOW) puede ser mejorado en varios aspectos, en cuanto a la extensión de la modelación y otros parámetros (forma de representar los pozos, recarga y condiciones de borde). No se debe perder de vista que este modelo fue construido con fines de investigación más que ingeniería aplicada. Este modelo puede ser considerado como un producto inicial que permite modernizar las herramientas de gestión considerando los desafíos actuales de la gestión integrada de recursos hídricos.

ACUÍFERO DE MAPOCHO ALTO, ESTERO LAS HUALTATAS (CHILE) (Sanzana et al., 2018)

Otro ejemplo de aplicación en una zona semiárida es el trabajo realizado en la cuenca del Estero Las Hualtatas, subcuenca del Mapocho-Alto, Santiago (Chile) por Sanzana et al (2018) (Figura 8). La cuenca tiene como punto de desembocadura la junta del Estero las Hualtatas con el Río Mapocho. Drena un área de 136 km² con variaciones de alturas que van desde 785 hasta los 2.882 msnm aproximadamente. La zona de crecimiento urbano se puede aproximar a la faja localizada entre los 785 y los 1.000 msnm (aprox. 3200 ha) excluyéndose zonas de protección ambiental. En 2017 la zona urbanizada corresponde aproximadamente a 2300 ha (71%) y actualmente coincide en gran parte con los límites del acuífero (Fig.8, d). En la Figura 9 se presenta un diagrama unifilar con las subcuencas conectadas a los elementos del acuífero.

En el trabajo de Sanzana et al. (2018) la modificación y alteración del modelo hidrológico existente fue primordial para lograr un correcto enlace. Dado que el acuífero modelado es un acuífero de cabecera, una de las condiciones de borde corresponde al ingreso de la recarga proveniente de las cuencas laterales de la zona cordillerana. El modelo hidrológico, inicialmente generado en bandas de elevación se modificó a una nueva segmentación de URH que fuera compatible con el modelo numérico del acuífero. De esta forma 10 sub-cuencas laterales fueron subdivididas en 44 URH que se acoplaron con el ingreso distribuido por todo el contorno del acuífero.

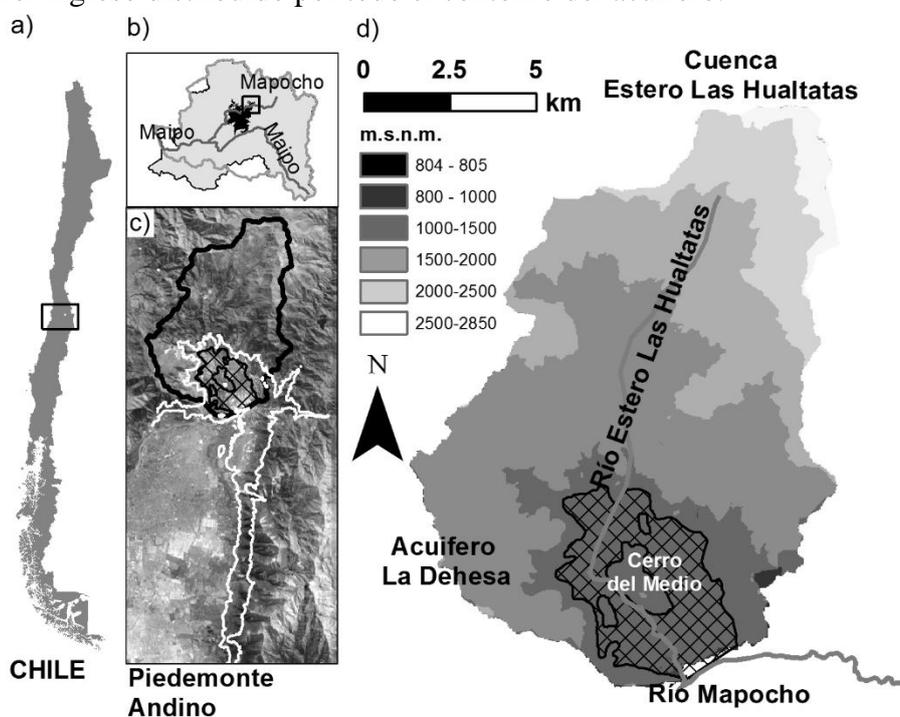


Figura 8.- Ubicación general de cuenca Estero Las Hualtatas (a,b,c). Sector del Acuífero La Dehesa (d) (elaborado a partir de Sanzana et al., 2018).

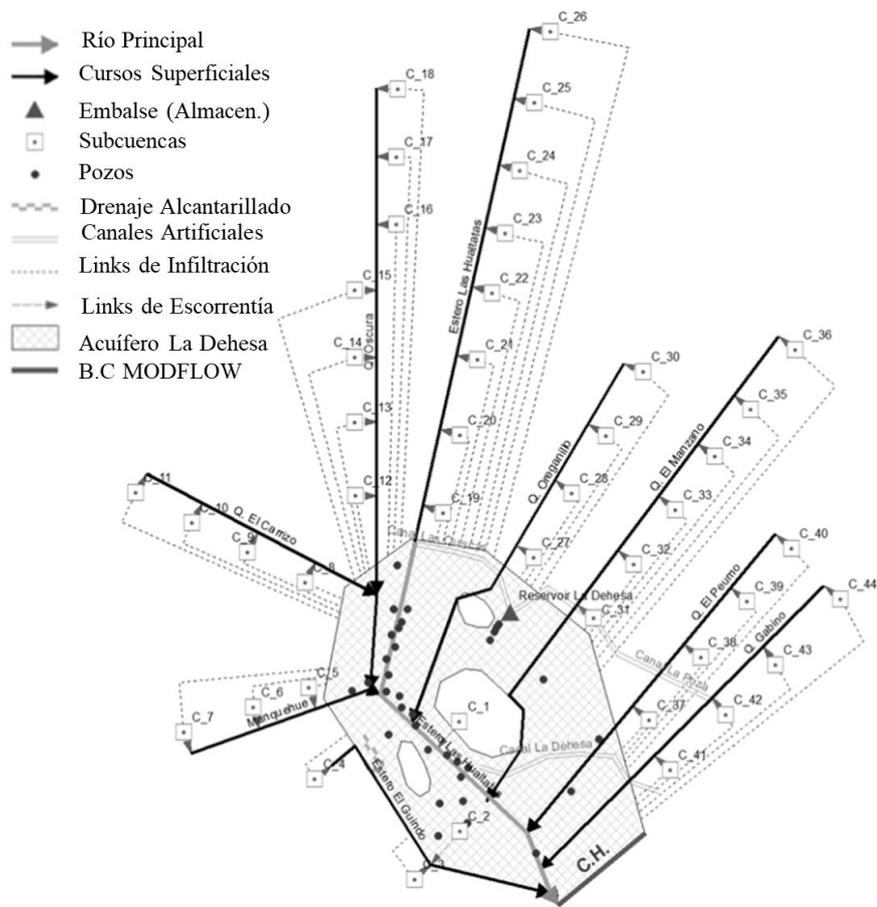


Figura 9.- Diagrama Unifilar Estero Las Hualtatas y vínculo con modelo superficial & subterráneo WEAP-MODFLOW (elaborado a partir de Sanzana et al., 2018).

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de cómo se adaptó el modelo superficial para la construcción de un modelo superficial-subterráneo integrado. Como paso inicial de la preparación del modelo superficial las cuencas se sub-dividieron en más unidades considerando los siguientes límites: Límites Administrativos, Geología, Tipo de suelo, Uso de suelo, Tipo de cultivo, Técnica de riego, Pendiente, y/o Áreas de especial interés. Esta subdivisión permitió un acople mucho más limpio y rápido. En este paso se debe tener cuidado con el número final de elementos segmentados ya que podría aumentar el costo computacional en forma importante y generar problemas de procesamiento interno del modelo. En este paso es recomendable utilizar herramientas SIG.

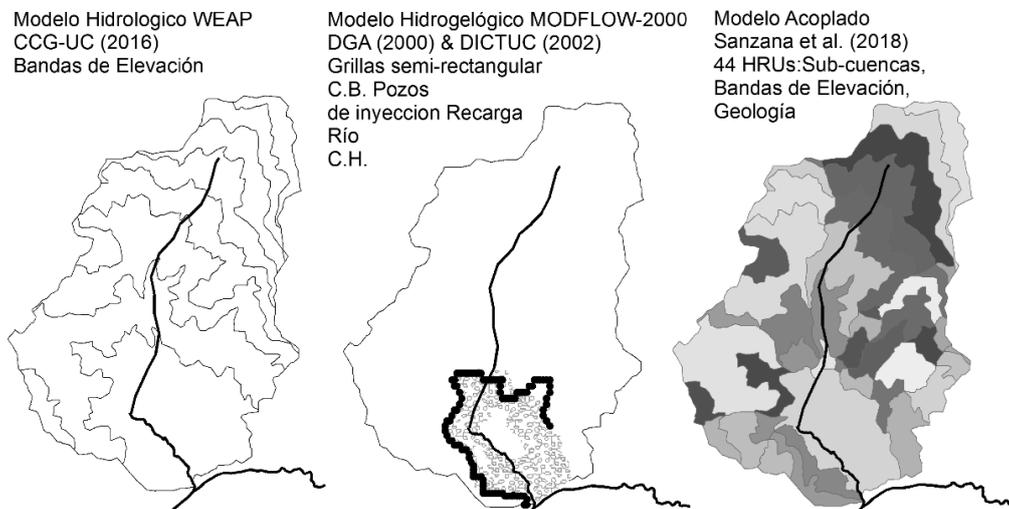


Figura 10.- Ejemplo de un esquema de preparación de segmentación espacial para el acople superficial y subterráneo

DESARROLLO DE UN SISTEMAS DE SOPORTE A LA DECISIÓN (SSD) EN LA CUENCA DE ZABADANI (SYRIA) Y BERRECHID (MARRUECOS) (Droubi et al., 2008)

El SSD consiste en tres componentes principales: una base de datos de proyectos, un modelo de flujo integrado y un software de evaluación y planificación de agua fácil de usar. Los componentes de modelización MODFLOW y WEAP se enlazaron en forma dinámica para cada paso de tiempo. MODFLOW calcula la altura del agua subterránea, el almacenamiento y el flujo, mientras que WEAP calcula la recarga de agua subterránea, la altura de agua en el río, la demanda de riego y los componentes restantes del balance hídrico. A través de la interfaz WEAP el usuario puede manipular las entradas y evaluar y comparar los resultados de varios escenarios actuales y futuros en el área objetivo, tales como: actividades humanas (crecimiento demográfico, urbanización, demanda interna), actividades agrícolas (uso de la tierra, tipos de cultivos, prácticas de riego), impactos climáticos (modelos de cambio climático, ciclos climáticos regionales), características de la red (pérdidas y límites del enlace de transmisión, características del campo de pozos y profundidades de los pozos), así como escenarios con recursos adicionales disponibles (i.e. recarga artificial, reutilización de aguas residuales). Los resultados se visualizan en forma de gráficos, mapas y tablas con información de carga hidráulica, balance de agua, etc., y apoyan el proceso de toma de decisiones considerando todas las partes interesadas. Este estudio fue aplicado para generación de archivos de enlace (linkage shape) y se utilizó el software ModflowToShape y el software GMS-6 como pre-procesador de MODFLOW 2000. En la Figura 11 se muestra un esquema del área de estudio y el sistema implementado.

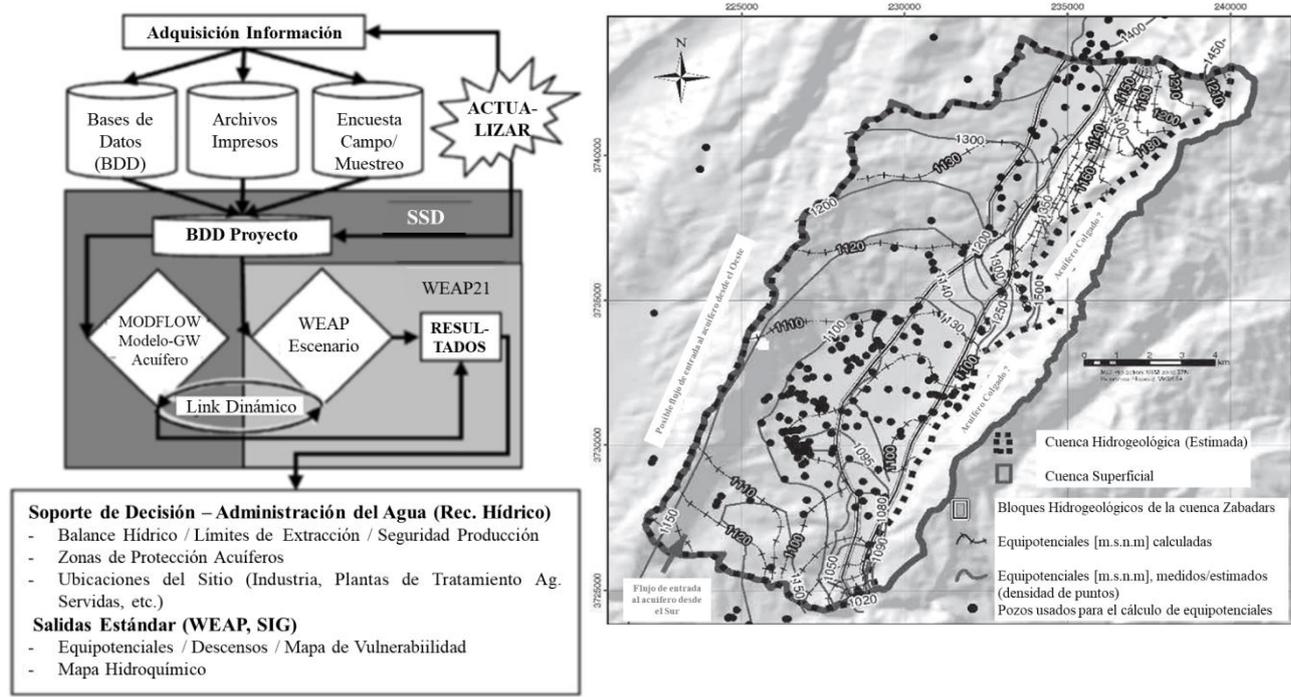


Figura 11.- Esquema del Sistemas de Soporte a la Decisión (SSD) implementado en la cuenca de Zabadani (Syria) (modificado a partir de Droubi et al., 2008).

CONCLUSIONES

El uso de herramientas hidroinformáticas en problemas complejos de ingeniería permite manejar un volumen mucho mayor de información, ampliar las capacidades de programas actuales y obtener resultados más realistas. Sin embargo se debe tener cuidado en los resultados a obtener de este tipo de modelos, ya que la cantidad de información que es procesada no es menor y se requiere

especial cuidado con el control de las variables, tal como se recomienda en el trabajo presentado por Orphanópoulos y Dumoulin (2015). Para el desarrollo del presente trabajo se tomó el caso específico del acople de modelos superficial y subterráneos con los modelos WEAP y MODFLOW. En el caso de la integración de estos modelos se requiere de modelos previamente pre-calibrados y se aconseja que al momento de acoplar ambos modelos, la cantidad de modificaciones sea la menor posible (dependiendo de la calidad de los modelos previamente disponibles). Los intercambios de flujo en cada paso de tiempo son del siguiente tipo:

- WEAP=>MODFLOW: las recargas del acuífero, tasa de abstracción y alturas del río
- MODFLOW=>WEAP: Altura de nivel acuífero, volumen de almacenamiento, afloramientos o infiltración en tramos del río.

Normalmente los límites superficiales de cuencas no coinciden con los límites de acuíferos, por lo que desde el punto de vista de la segmentación espacial se recomienda proceder tal como se realizó en el caso del Estero Las Hualtatas (Sanzana et al., 2018). En este caso compatibilizaron los dominios espaciales del modelo superficial y subterráneo para generar un acople flexible. Una vez que se cuenta con la segmentación apropiada de ambos modelos se debe proceder a generar el enlace y el archivo georreferenciado (shape). Para llevar a cabo el Enlace SIG entre WEAP y MODFLOW se encuentra una variada gama de opciones, sin embargo la más recomendable corresponde la herramienta SIG especialmente desarrollada para esta tarea: LinkKitchen (bgr.bund.de).

En la actual implementación del modelo WEAP y MODFLOW existen limitaciones propias de la interfaz que permite vincularlos. Es por ello, que se pueden adoptar enfoques alternativos mediante el uso de librerías de programación que permitan dar solución a una gama más amplia de problemas. Como fue el caso del desarrollo de las rutinas de *Analisis_Sensibilidad_KeyAssumptions.py* y *Analisis_Sensibilidad_Propiedades_MODFLOW.py*.

Finalmente, una de las principales limitaciones por mucho tiempo fue la posibilidad de sólo acoplar modelos subterráneos con la plataforma MODFLOW-2000, sin embargo en la actual versión de WEAP (disponible recién a partir de mayo 2018) es posible acoplar modelos mediante las plataformas WEAP-MODFLOW-2005 y WEAP-MODFLOW-NWT (weap21.org), lo que facilitará más aún el uso de modelos completamente integrados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto MAPA (IDRC 107081-001) y del Proyecto ECOS-CONICYT C14U02. El trabajo presentado formó parte de la Tesis Doctoral financiada por las becas CONICYT PCHA/2014-21140685 y "Estadías en el Extranjeros para Alumnos de Doctorado" VRI-UC. También se reconoce el financiamiento de los Proyectos FONDECYT N°1131131 y 1181506, FONDAP 15110020, FONDECYT 1181506 e IRSTEALyon. Finalmente, Jorge Gironás también reconoce a FONDAP 15110017.

REFERENCIAS

- Abbott, M. B.** (1999). Journal of Hydroinformatics: overview of this first issue. *Journal of Hydroinformatics*, 1(1), 1-1.
- Barron, O.V., Barr, A.D. and Donn, M.J.,** (2013). Effect of urbanisation on the water balance of a catchment with shallow groundwater. *Journal of Hydrology*, 485(Supplement C): 162-176.
- Bergstrom, S.** (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrkoping.
- Bhaskar, A.S., L. Beesley, M.J. Burns, T.D. Fletcher, P. Hamel, C.E. Oldham, y A.H. Roy** (2016). Will it rise or will it fall? Managing the diverse effects of urbanization on base flow, *Freshwater Science*, 35(1), 293-310.
- Branger, F., Braud, I., Debionne, S., Viallet, P., Dehotin, J., Henine, H., Nedelec, Y. and Anquetin, S.,** (2010). Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID® framework. Overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), pp.1672-1681.
- Braud, I., Fletcher, T.D., and Andrieu, H.,** (2013). Hydrology of peri-urban catchments: Processes and modelling. *Journal of Hydrology*. 485, 1-4.
- CCG-UC,** (2016). Maipo Adaptation Plan. Project developed by Pontifical Catholic University of Chile (PUC) with funding from Canadian's IDRC (N° IDRC 107081-001).
- DGA-AC,** (2000). Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación, Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores Ltda.
- Droubi, A., Al-Sibai, M., Abdallah, A., Zahra, S., Obeissi, M., Wolfer, J. and Schelkes, K.** (2008). A Decision Support System (DSS) for Water Resources Management,–Design and Results from a Pilot Study in Syria. In *Climatic changes and water resources in the Middle East and North Africa* (pp. 199-225). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Flügel, W.A.,** (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*. 9(3-4), 423-436.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C. and McDonald, M.G.,** (2000). MODFLOW-2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Open-file Report. U. S. Geological Survey, (92), p.134.
- Hobsbawn, E.** (2012). *Historia del Siglo XX. Historia del Mundo Contemporáneo*. Editorial Crítica, Barcelona, pp. 516-550.
- Hunter, Ch. , Gironás, J. , Bolster, D. , Karavitis, Ch.** (2015). A Dynamic, Multivariate Sustainability Measure for Robust Analysis of Water Management under Climate and Demand Uncertainty in an Arid Environment. *Water*. 7. 5928-5958.
- Leavesley, G., Markstrom, S., Restrepo, P., Viger, R.,** (2002). A modular approach to addressing model design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modelling. *Hydrological Processes* 16, 173-187.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges,** (1994). A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14,415-14,428.
- Orphanópoulos D. y Dumoulin P.,** (2015). Metodología para exploración y explotación de resultados en modelos hidrológicos integrados. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.
- Price, R. K.** (2011). *Urban hydroinformatics: data, models, and decision support for integrated urban water management*. IWA publishing.
- Rodriguez, F., Andrieu, H. & Morena, F.** (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas – model development and application to case studies, *Journal of Hydrology*, 351, pp. 268–287.
- Sahuquillo A., Cassiraga E., Solera A. y Murillo J.M.** (2010). Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España y Universidad Politécnica de Valencia. 328 pp.

Sanzana P., (2018). Caracterización y Modelación de Procesos Hidrológicos en Cuencas Periurbanas del Piedemonte en la Ciudad de Santiago (Chile). Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Chile.

Sanzana, P., Gironás, Braud, I., J., Muñoz, J-F., Vicuña, S., Reyes-Paecke, S., De la Barrera, F., Branger, F., Rodríguez, F., Hitschfeld and N., Hormazabal, S. (2018). Impact of urban growth and high residential irrigation on streamflow and groundwater levels in a peri-urban semi-arid catchment. JAWRA (en revisión).

Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., and Galbraith, H., (2005a). "WEAP21-A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation." *Water Int.* 30(4), 501-512.

Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Le, (2005b). "WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics." *Water International* 30, no. 4: 487-500.

Zambrano, M., Pagliero, L., Rojas, R. and Gangas. A. M. (2005). Modelación analítica, genérica e integrada de cuencas. Dirección General de Aguas. Reporte Técnico S.I.T. No 107, pp 178, Santiago, Chile, Agosto 2005.