

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

P. Sanzana<sup>1,2,3</sup>, J. Gironas<sup>1,2,4,7</sup>, I. Braud<sup>3</sup>, N. Hitschfeld<sup>5</sup>, X. Vargas<sup>6</sup>, S. Vicuña<sup>1,7</sup>, J-F. Muñoz<sup>1</sup>, R. Villegas<sup>8</sup>, E. Rubio<sup>8</sup>, R. Herrera<sup>9</sup>

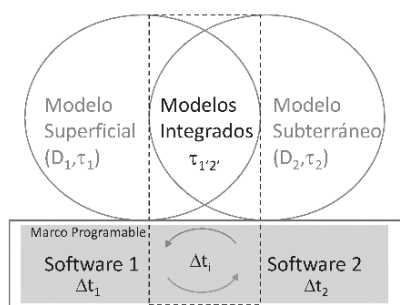
<sup>1</sup> DIHA-UC psanzana@uc.cl, jgironas@ing.puc.cl, jfmunoz@ing.puc.cl, <sup>2</sup>CEDEUS, <sup>3</sup>IRSTEA isabelle.braud@irstea.fr, <sup>4</sup>CIGIDEN, <sup>5</sup>DCC-UCH nancy@dcc.uchile.cl, <sup>6</sup>DIC-UCH xvargas@ing.uchile.cl, <sup>7</sup>Centro Cambio Global-UC svicuna@ing.puc.cl,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

## 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 de profesionales e investigadores 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 el ambiente físico que se desea modelar. Hoy en día ambientes físicos, altamente intervenidos por elementos artificiales, como cuencas peri-urbanas (Braud et al., 2013), en las que la relación río-acuífero toma un peso gravitante en los flujos bases (Barron et al., 2013; Bhaskar et al., 2016) son cada vez más común en desafíos actuales de proyectos de ingeniería.

## Problemática actual en la integración de modelos hidrológicos

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 de modelación dentro de un amplio rango de posibilidades (Branger et al., 2010), y tal como plantea 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?".



**Figura 1.-** Esquema de marco programable entre modelos acoplados a paso de tiempo  $\Delta t_i$ . Cada modelo tiene un dominio espacial y una topología propia  $(D_j, \tau_j)$  con su respectivo paso tiempo  $\Delta t_j$ . ( $j=1,2$ ).

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 la Figura 1 se muestra un esquema simplificado de distintos dominios espaciales y la respectiva topología de los elementos involucrados,  $(D_j, \tau_j)$ . Cada dominio puede ser representado mediante diferentes enfoques (e.j. uno puede ser semi-distribuido y otro distribuido completamente). El acople de diferentes enfoques implica la creación de una nueva topología  $\tau_{1-2}$  que permite comunicar cada elemento de los diferentes modelos en cada paso de tiempo  $\Delta t_j$ .

## Pertinencia de modelación superficial-subterránea integrada

Se debe tener claro en forma previa el porqué de utilizar enfoques acoplados y no enfoques más simplificados que puedan dar una respuesta satisfactoria. Esta reflexión debe ser realizada cuidadosamente previo a la aplicación de cualquier proyecto. A continuación se describe en forma simplificada ciertos criterios guías de los principales en lo referido al acople de modelos superficial y subterráneo.

¿Para qué tipo de problemas es recomendable un enfoque acoplado superficial-subterráneo?

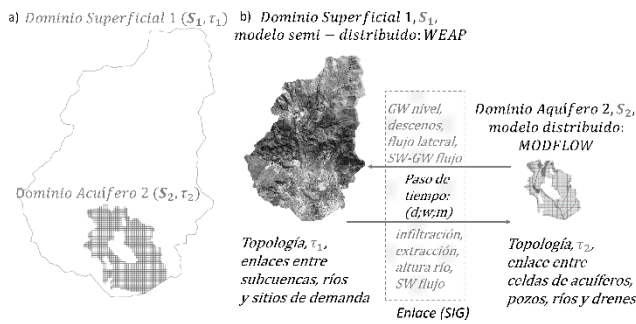
- Estimaciones precisas de flujo base en cuencas con interacción río-acuífero; Interacción entre pozos debido a sobre-extracción; Mejor estimaciones de flujos subterráneos; Estimación de niveles de agua subterránea en acuíferos fuertemente influenciados por recarga laterales (ej. acuíferos de cabecera y procesos inherentes a climas de alta cordillera (deshielo, acumulación nival, etc.)).

¿Para qué tipo de problemas no es recomendable llevar a cabo un modelo acoplado?

- Modelación de crecidas o flujos altos a escala mensual; Zonas en las que el acuífero no posee un gran desarrollo vertical y puede ser fácilmente representado por un elemento conceptual como un estanque lineal.

## Modelos WEAP- MODFLOW: consideraciones y limitaciones

Para el análisis de la potencialidad de rutinas hidroinformáticas se seleccionó el modelo superficial WEAP (weap21.org) y el modelo de aguas subterráneas MODFLOW (water.usgs.gov). En la Figura 2a se muestra un ejemplo de dominios espaciales que pueden considerar los modelos superficiales y subterráneos, los que no tienen porque necesariamente coincidir, debido a que acuífero puede ser considerado con un desarrollo espacial mucho menor que las cuencas que alimentan dicho sistema. En la Figura 2b se muestra los diferentes componentes que se intercambian en cada paso de tiempo. Para llevar a cabo el Enlace SIG, indicado en la Figura 2b, 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).



**Figura 2.-** Relación entre dominios espaciales e intercambios de flujos.

En la actual implementación del modelo WEAP y MODFLOW existen limitaciones propias de la interfaz que permite vincularlos. Sin embargo no es de esperar que dicho software satisfaga un sinnúmero de problemas. Es por ello, que se pueden adoptar enfoques alternativos, que mediante el uso de librerías de programación permitan dar solución a una gama más amplia de problemas. Una de las principales limitaciones corresponde a la posibilidad de sólo acoplar modelos subterráneos con la plataforma MODFLOW-2000, sin embargo no es excluyente al momento de resolver problemas de ingeniería. Prontamente está anunciada una versión de WEAP-MODFLOW-2005 y WEAP-MODFLOW-NWT ([www.weap21.org](http://www.weap21.org)).

## Resultados y salidas

En la Tabla 1 se muestran las rutinas escritas en Python ([python.org](http://python.org)) y en R ([r-project.org](http://r-project.org)) para un caso específico de aplicación (Sanzana, 2018), pero que pueden ser utilizadas/modificadas en otros tipos de estudios similares. Actualmente la variación de parámetros internos en WEAP puede realizarse en forma interna mediante *KeyAssumptions*, que además permite determinar las salidas o gráficos más útiles para evaluar el comportamiento del modelo, sin embargo esta herramienta no puede modificar las variables internas del modelo de aguas subterráneas, por lo que se desarrollaron las rutinas descritas en la Tabla 1. Dichas rutinas permiten realizar un análisis de sensibilidad de modelos hidrológicos acoplados mediante WEAP-MODFLOW, considerando la modificación de una gama de parámetros más amplias que las disponibles mediante *KeyAssumptions* (ej. conductividad hidráulica, almacenamiento, porosidad, etc).

**Tabla 1.-** Rutinas Implementadas

Descripción	Lenguaje
1.-Análisis_Sensibilidad_KeyAssumptions.py	Python, R
2.-Análisis_Sensibilidad_Propiedades_MODFLOW.py	Python, R

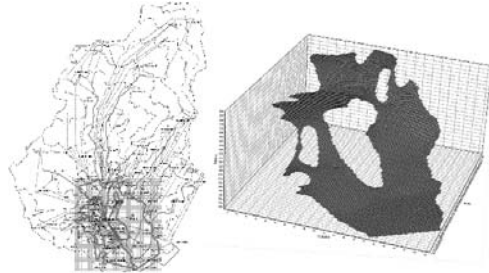
Nota: Rutinas disponibles en [maipoadaptacion.cl](http://maipoadaptacion.cl)

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de aplicación de modelo acoplados (Sanzana, 2018) y en la Figura 4 se muestra un tipo de salida de la rutina 2 que permite modificar parámetros como la conductividad hidráulica. Se muestra la variación del coeficiente de ajuste ( $R^2$ ) de 5 series temporales para 5 pozos de observación versus el factor de corrección aplicado en todo el acuífero en forma pareja (i.e. F.C.=0.5  $\Rightarrow$  todo el campo de conductividad hidráulica se disminuye al 50%). De la Figura 4 se observa que para un F.C. de 1, se encuentra el óptimo global, donde la mayoría de los pozos maximiza el coeficiente de ajuste ( $R^2$ ), salvo los pozos P4 y P5.

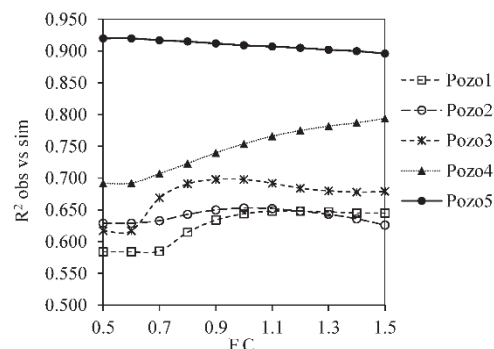
## Comentarios y conclusiones

El uso de herramientas hidroinformáticas en problemas de ingeniería avanzada 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 el tipo de información que se puede obtener de este tipo de modelos. En el caso de la integración de modelos subterráneos-superficiales, 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.



**Figura 3.-** Ejemplo WEAP-MODFLOW Integrado (Sanzana, 2018).



**Figura 4.-** Variación  $R^2$  versus F.C. de parámetros óptimos.

## Agradecimientos

Proyecto MAPA (IDRC 107081-001), ECOS-CONICYT C14U02 y fondos proporcionados por IRSTEA-Lyon, así como la participación por CEDEUS (FONDAP 15110020) y Becas Doctorado Nacional CONICYT.

## Referencias

- Abbott, M. B. (1999). Journal of Hydroinformatics: overview of this first issue. *Journal of Hydroinformatics*, 1(1), 1-1.
- Hobsbawn, E. (2012). Historia del Siglo XX. Historia del Mundo Contemporáneo. *Editorial Crítica*, Barcelona, pp. 516-550.
- Price, R. K. (2011). Urban hydroinformatics: data, models, and decision support for integrated urban water management. *IWA publishing*.
- Braud, I., Fletcher, T.D., Andrieu, H., (2013). Hydrology of peri-urban catchments: Processes and modelling. *Journal of Hydrology*. 485, 1-4.
- 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.
- 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.
- Bhaskar, A.S., L. Beesley, M.J. Burns, T.D. Fletcher, P. Hamel, C.E. Oldham, and 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.
- 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.
- 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 (borrador).