

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**HERRAMIENTAS PARA MODELOS SUPERFICIALES-SUBTERRÁNEOS  
DE ALTA COMPLEJIDAD. CASO ESTUDIO: MODELOS WEAP-MODFLOW**

**PEDRO SANZANA<sup>1</sup>, NANCY HITSCHFELD<sup>2</sup>  
ANTONIO TORGA<sup>3</sup>, FELIPE TRONCOSO<sup>4</sup>  
IGNACIO DÍAZ<sup>1</sup>, IGNACIO AGUIRRE<sup>5</sup>  
GIULIA DE PASQUALE<sup>1</sup>, JORGE GIRONÁS<sup>6</sup>  
EDUARDO RUBIO<sup>7</sup>, CLAUDIO LOBOS<sup>8</sup>**

**RESUMEN**

La modelación integrada superficial-subterránea es un apoyo importante en la toma de decisiones o evaluación del impacto de medidas de emergencia, especialmente en casos de sequía prolongada en los que el agua subterránea ha sido un soporte clave en demandas que no se pueden satisfacer superficialmente. La complejidad de los modelos numéricos ha ido creciendo y abarcando cada vez más cuencas y acuíferos, tanto a nivel internacional como nacional. El presente artículo plantea conceptos en base a los que se desarrollaron herramientas hidroeinformáticas: GeoLinkage-GeoChecker y un set de rutinas que permiten la correcta ejecución de modelos integrados mediante WEAP-MODFLOW. Se presenta la abstracción espacial, la implementación y su uso con un modelo desarrollado por el Instituto de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR) (784 km<sup>2</sup>), además de un modelo a escala regional cuenca del río Limarí (17.000 km<sup>2</sup>). GeoLinkage mediante su componente GeoChecker permitió identificar conexiones incorrectas entre cuencas o sitios de demanda y sus respectivos acuíferos. GeoChecker genera matrices y tablas que permiten al equipo de modelación priorizar y mejorar aquellos elementos mal conectados que distorsionan el balance hídrico de modelos integrados.

---

<sup>1</sup> Centro de Estudios Avanzados de Zonas Áridas, CEAZA. E-mail autor: pedro.sanzana@ceaza.cl.

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Computación, FCFM, Universidad de Chile.

<sup>3</sup> Ingeniero Civil en Computación - Apoyo Investigación Fondecyt Regular N° 1241596.

<sup>4</sup> Ingeniero Civil en Computación – Independiente, felipe.troncoso.u@gmail.com

<sup>5</sup> Schulich School of Engineering. University of Calgary.

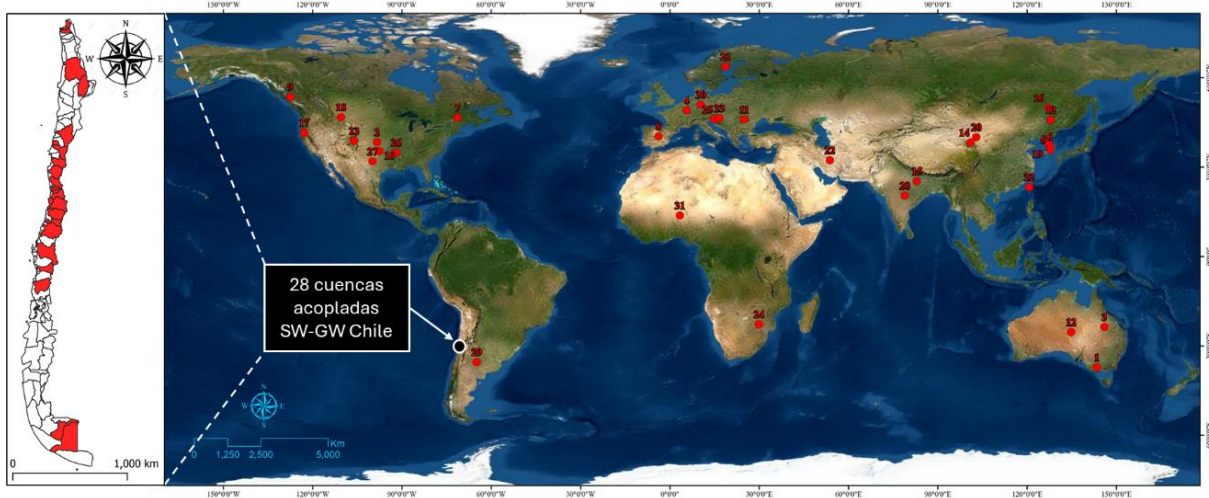
<sup>6</sup> DIHA, Pontificia Universidad Católica de Chile. CEDEUS, CIGIDEN.

<sup>7</sup> Ingeniero Civil Hidráulico, eduardo.rubio.a@gmail.com

<sup>8</sup> Departamento de Informática, Universidad Técnica Federico Santa María.

# 1. INTRODUCCIÓN

La modelación integrada superficial- subterránea es una herramienta de apoyo importante en la toma de decisiones o evaluación del impacto de medidas de emergencia, especialmente en casos de sequía prolongada en los que el agua subterránea ha sido un soporte clave en demandas que no han sido satisfechas superficialmente. Dado que en la mayoría de los casos ambos dominios tienen una directa dependencia uno del otro, es de toda lógica que modelos completamente acoplados sean cada vez más utilizados a nivel mundial. Ntona et al. (2022) reportó un total de 33 cuencas a nivel mundial con modelos completamente integrados<sup>9</sup> (Figura 1). A estos últimos se deben agregar al menos 28 cuencas (Curso CEAZA WEAP-MODFLOW, 2024) completamente integradas desarrolladas en el contexto de planificación de cuenca liderada por la División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas (DEP-DGA, MOP), lo que actualiza al menos a 61 modelos en total a nivel global. La interacción de flujos entre dominios superficiales y subterráneos ha tomado relevancia en la literatura científica por ser un tópico en desarrollo en el que hay que considerar una visión integrada de equipos de hidrólogos e hidrogeólogos (Barthel, 2006; Barthel y Banzhaf, 2016, Staudinger et al, 2019).



**Figura 1.-** Distribución espacial modelos completamente integrados superficial-subterráneo a nivel mundial, modificado a partir de Ntona et al (2022).

<sup>9</sup> Modelos recopilados por Ntona et al. (2022) para analizar el estado del arte y futuros desafíos de modelación integrada: SWAT-MODFLOW, GSFLOW, MIKESHE, FEFLOW –MIKE11, MODHMS, HYDROLOG-AQUIFEM-N, HELP-FEFLOW-CATHY, WetSpas-M-MODFLOW, HydroGeoSphere, WaSiM-ETH-I-MODFLOW

Dependiendo de la complejidad del modelo superficial o subterráneo se podría fácilmente tener que enlazar cientos de elementos superficiales con miles de celdas subterráneas. En este paso se pueden cometer errores manuales al distribuir incorrectamente flujos de entrada clave, por ejemplo, distribuir incorrectamente la recarga subterránea en las celdas de los modelos hidrogeológicos. Estos errores podrían ser de origen espacial (tener capas mal referenciadas) o de origen manual (distribuir y enlazar erróneamente celdas del modelo subterráneo con unidades hidrológicas). Es por ello que se presentan nuevas herramientas hidroinformáticas como apoyo a la implementación y revisión de modelos completamente integrados utilizando WEAP-MODFLOW.

## **2. ABSTRACCIÓN Y RESTRICCIONES ESPACIALES EN LA CONEXIÓN DE MODELOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS**

La abstracción espacial desarrollada tiene como fin el sintetizar los criterios que existen para segmentar el espacio a nivel superficial y subterráneo. Se adoptó la notación de GW (Groundwater) para referirse al dominio subterráneo y SW (Surface water) para referirse al dominio superficial con tal de mantener una coherencia con la literatura científica (Barthel, 2006; Barthel y Banzhaf, 2016; Staudinger et al, 2019; Ntona et al.,2022). El acople SW-GW que abordamos en el presente estudio corresponde al caso en el que SW es representado con un enfoque semi-distribuido (arco-nodo) y el dominio GW es representado con un enfoque completamente distribuido (grilla).

A continuación, se explica la notación general para definir la segmentación de dominios en unidades superficiales y subterráneas. El objetivo de cumplir estas restricciones ayuda a preservar el balance hídrico que ocurre en el intercambio de flujos y restringen traslapes de áreas que puedan producir errores en el balance hídrico.

En esta explicación, los dominios y las unidades hídricas están en mayúscula, mientras que los segmentos se presentan con letra cursiva. También se definen los índices auxiliares y la notación de cada una de las unidades (*i*: índice asignado a cualquier unidad hidrogeológica, *j*: índice asignado a cualquier unidad hidrológica):

- $UH_j$ : Unidades Hídricas,  $UH_j \subseteq SW$
- $UG_i$ : Unidades hidroGeológicas,  $UG_i \subseteq GW$
- $Arc_{j,m}^{SW}$  conexiones (simples o múltiples) entre Unidades Hídricas  $UH_j$  y  $UH_m$

- $E_{i,m}^{GW}$  conexiones (simples o múltiples) entre Unidades hidroGeológicas  $UG_i$  y  $UG_m$
- $Arc_{i,j}^{SW-GW}$  conexiones (simples o múltiples) entre elementos dominio SW y dominio GW.
- $a_{i,j}$ : cantidad de conexiones en esquema arco-nodo entre elementos  $UG_i$  y  $UH_j$  (matriz de conexión del esquema arco-nodo)
- $b_{i,j}$ : porción de área conectada en archivo de enlace (matriz de conexión del archivo de enlace)

### **2.3 Requerimientos específicos para los elementos de conexión superficial-subterráneo**

En el caso de la integración de dominios SW-GW, mediante el uso de modelos completamente acoplados, aparece una topología especial de conexión superficial y subterránea,  $Arc_{i,j}^{SW-GW}$ . Para describir la conexión entre el dominio SW, arco-nodo, y el dominio GW, completamente distribuido, se hace el supuesto que SW está representado por Unidades Hidrológicas (UH, 2D) y GW está representado por Unidades hidroGeológicas (UG, 3D). Cabe mencionar que cada uno de estos sistemas, SW-GW, y sus conectividades:  $Arc_{j,m}^{SW}$ ,  $E_{i,m}^{GW}$  y  $Arc_{i,j}^{SW-GW}$ , deben quedar bien representadas desde el punto de vista espacial y además también pueden tener restricciones ambientales o legales-administrativas (reglas de operación). Una vez que han sido correctamente segmentados y conectados ambos dominios se debe revisar la coherencia de los enlaces y su correspondencia espacial.

Para implementar el chequeo automático de conexiones se procedió a utilizar un enfoque similar de *matrices de conectividad* planteadas por Panday et al (2013) utilizadas para describir matricialmente las conexiones de mallas no estructuradas en MODFLOW USG.

#### **2.3.1 Matriz de conectividad en el domino arco-nodo:**

Se define como matriz de conectividad en el dominio arco-nodo como aquella matriz que identifica todas las conexiones entre Unidades Hídricas (nodos) y Unidades hidroGeológicas (nodos) unidas por un determinado número de conexiones:

$$\begin{array}{c}
 \text{UH}_1 \quad \text{UH}_2 \quad \text{UH}_3 \quad \dots \quad \text{UH}_j \\
 \text{UG}_1 \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \dots & a_{1,j} \\
 \text{UG}_2 \begin{bmatrix} a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \dots & a_{2,j} \\
 \text{UG}_3 \begin{bmatrix} a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & \dots & a_{3,j} \\
 \dots \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \text{UG}_i \begin{bmatrix} a_{i,1} & a_{i,2} & a_{i,3} & \dots & a_{i,j}
 \end{array}$$

Donde:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 \text{ ó } 2 & \text{conexión segmento } Arc_{j,i}^{SW} \text{ simple (1) o con retorno(2)} \\
 0 & \text{no existe conexión segmento } Arc_{HU_j, HG_i}^{SW-GW} \end{cases} \quad (5)$$

Las UH pueden ser Cuencas (con o sin riego) o Sitios de Demanda (agricultura, urbano, industrial u otro). En la Figura 2 se muestra un ejemplo simple arco-nodo y su respectiva matriz de conectividad.

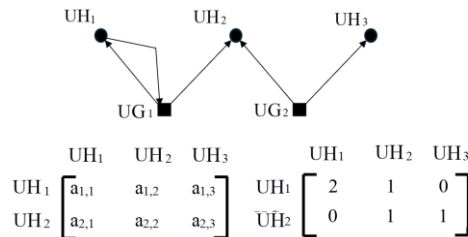


Figura 2.- Ejemplo de esquema arco-nodo con su respectiva matriz de conectividad

### 2.3.2 Matriz de conectividad en el domino GW (grilla):

En el archivo de enlace subterráneo, representado por una grilla en la que cada celda tiene atributos clave de las UG y las UH, se puede verificar la intersección espacial que existe entre las distintas unidades y verificar si existe o no una conexión (ver ejemplo Figura 4). La matriz de conectividad del archivo de enlace quedaría definida de la siguiente manera:

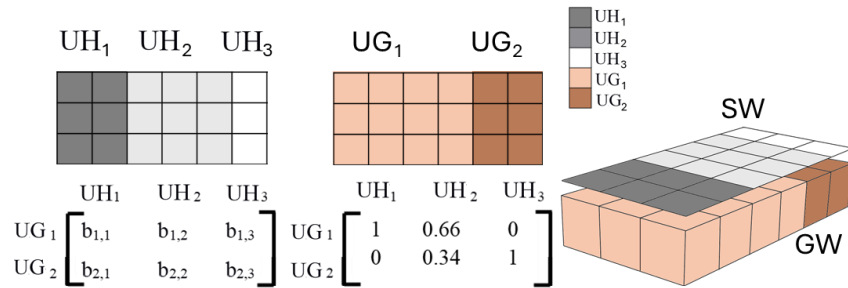
$$\begin{array}{c}
 \text{UH}_1 \quad \text{UH}_2 \quad \text{UH}_3 \quad \dots \quad \text{UH}_j \\
 \text{UG}_1 \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} & \dots & b_{1,j} \\
 \text{UG}_2 \begin{bmatrix} b_{2,1} & b_{2,2} & b_{2,3} & \dots & b_{2,j} \\
 \text{UG}_3 \begin{bmatrix} b_{3,1} & b_{3,2} & b_{3,3} & \dots & b_{3,j} \\
 \dots \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \text{UG}_i \begin{bmatrix} b_{i,1} & b_{i,2} & b_{i,3} & \dots & b_{i,j}
 \end{array}$$

Donde:

$b_{i,j}$  corresponde a la fracción de área que  $UH_j$  conecta con  $UG_i$  en el archivo de enlace (.shp):

$$\sum_i b_{i,j} = 1 \quad (6)$$

El archivo de enlace (ejemplo, linkage.shp) para cada celda almacenan distintos atributos de UH y su respectiva distribución espacial (representados por una distribución espacial 2D). Todas las capas que se distribuyen a nivel superficial se intersectan con la distribución espacial de cada acuífero (UG; representados por poliedros 3D). En la Figura 3 se muestra un ejemplo sencillo de distribución espacial en una matriz en la que se distribuyen espacialmente los elementos de la Figura 2.



**Figura 3.-** Matriz de Conectividad proveniente del cruce espacial entre capas de Unidades Hídricas y Unidades hidroGeológicas con su respectiva matriz de conectividad

Los segmentos bien conectados (well-connected) y mal conectados (bad-connected) en el sistema SW (arco-nodo) se definen como:

$$well - connected(a_{i,j}) = \{\forall_{i,j} \ a_{i,j} \geq 1 \Rightarrow b_{i,j} > 0\} \quad (7)$$

$$bad - connected(a_{i,j}) = \{\forall_{i,j} \ a_{i,j} \geq 1 \Rightarrow b_{i,j} = 0\} \quad (8)$$

El porcentaje de área bien enlazada (well-linked) y mal enlazada (bad-linked) en el sistema GW (grilla) se definen como:

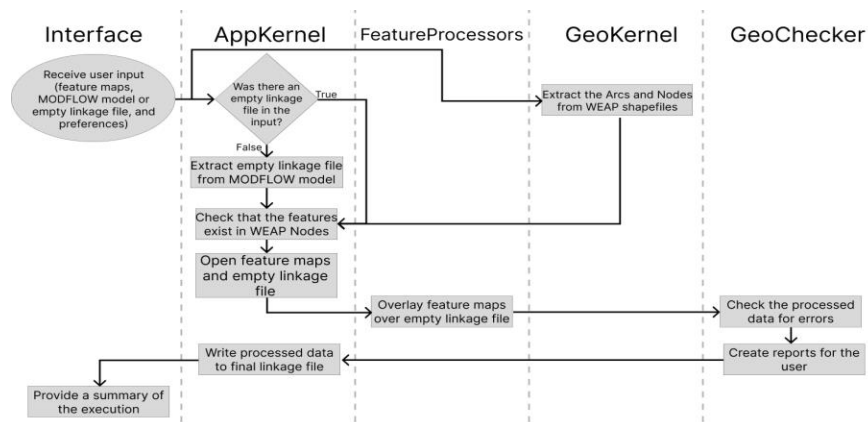
$$well - linked(b_{i,j}) = \{\forall_{i,j} \ b_{i,j} > 0 \Rightarrow a_{i,j} \geq 1\} \quad (9)$$

$$bad - linked(b_{i,j}) = \{\forall_{i,j} \ b_{i,j} > 0 \Rightarrow a_{i,j} = 0\} \quad (10)$$

Estas restricciones fueron utilizadas para programar la verificación geométrica de modelos integrados. Si bien GeoLinkage y GeoChecker se concibieron como una herramienta de apoyo para la correcta conexión e intercambio de flujos superficiales-subterráneos en modelos integrados WEAP-MODFLOW también podría ser útil para otros modelos, como SWAT-MODFLOW. Sin embargo, como trabajo futuro, habría que verificar en detalle la estructura de los archivos de enlace que este último acople utiliza.

### 3. IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS HIDROINFORMÁTICAS DE APOYO: GEOLINKAGE Y GEOCHECKER

Con el fin de facilitar la creación de modelos que integrados SW-GW se desarrolló la herramienta GeoLinkage (Troncoso, 2021) y su posterior actualización en la que se incluyó el GeoChecker (Torga, 2024) con la supervisión de un equipo interdisciplinario entre Ciencias de la Tierra y Ciencias de la Computación. En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo de procesamiento de GeoLinkage y GeoChecker.

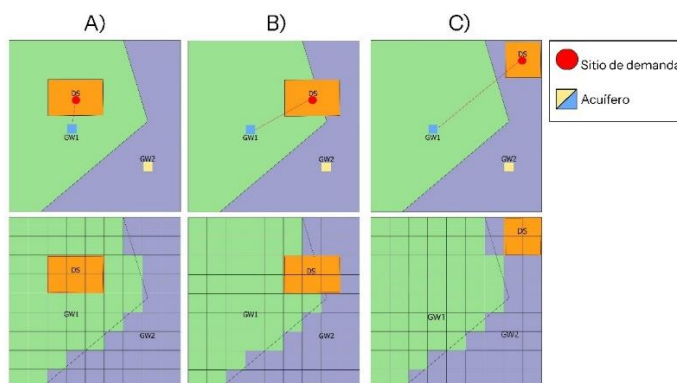


**Figura 3.-** Diagrama de flujo de procesamiento de GeoLinkage y GeoChecker.

GeoLinkage automatiza la creación del archivo de enlace SW-GW, que relaciona y conecta los elementos para modelos WEAP-MODFLOW. La herramienta, implementada en GRASS-GIS, recibe la estructura espacial del modelo WEAP que la superpone con la malla de MODFLOW.

La Figura 4 ilustra los errores de superposición que GeoChecker es capaz de diagnosticar. Por ejemplo, al modificar la ubicación espacial del sitio de demanda (DS), representado con un círculo, sobre los acuíferos GW1 y GW2, pueden generarse errores en el archivo de enlace resultante, como se muestra en la parte inferior de la figura. Dado que DS está conectado únicamente a GW1 en el modelo WEAP, cualquier superposición con GW2 se considera un error. En la Figura 4.A, DS se encuentra completamente superpuesto al acuífero GW1, con el cual mantiene una conexión en WEAP, por lo que no se produce ningún error. En la Figura 4.B, se observa que dos celdas de DS se superponen al acuífero GW2. Como no existe conexión entre DS y GW2 en WEAP, el flujo correspondiente a estas celdas se pierde.

Finalmente, En la Figura 4.C, DS está completamente superpuesto sobre GW2, con quien no tiene conexión en el modelo, resultando en una pérdida total del flujo entre ambos elementos.



**Figura 4.-** Tres ejemplos: A) Modelo bien conectado. B) Modelo con error parcial entre DS y GW2. C)

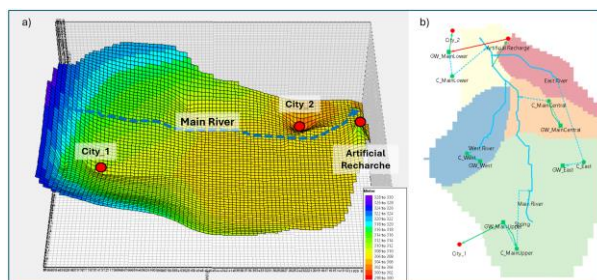
Modelo con error absoluto entre DS y GW2. En la parte superior de A), B) y C) se muestra la conceptualización arco-nodo de WEAP (parte superior) y su respectiva distribución espacial que da como resultado distintos archivos de enlace (parte inferior).

#### 4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN MODELOS: TUTORIAL WEAP-MODFLOW (BGR-ALEMANIA) Y RÍO LIMARÍ (COQUIMBO)

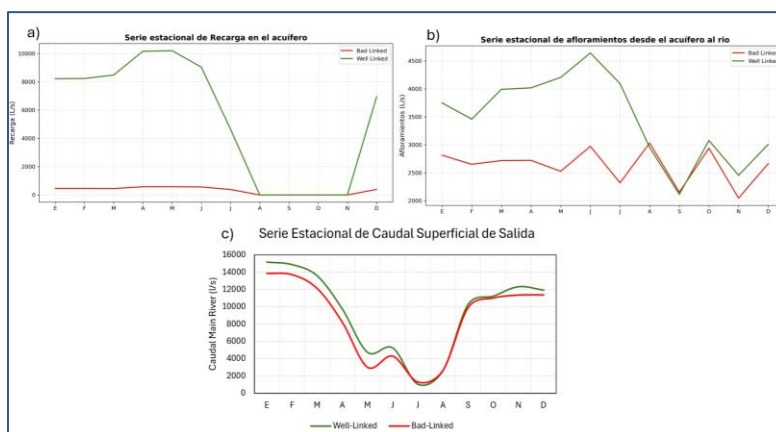
Para graficar el tipo de error que puede generar la mala conectividad en modelos integrados se utilizó el modelo WEAP-MODFLOW desarrollado por BGR-Alemania para demostrar su software LinkKitchen<sup>10</sup>. El modelo corresponde a una cuenca y acuífero ficticio (Figura 5) que intercambian flujo mediante pozos de bombeo (City\_1 y City\_2), pozos de recarga artificial (Artificial Recharge) e interacción dinámica río-acuífero (a través de Main River). Para testear la GeoLinkage, se indujo un error en la columna de atributos de acuífero (GW) y se omitieron todos los acuíferos salvo GW\_MainLower en el archivo de enlace. Esto genera que al no identificar conexión el modelo superficial (WEAP) no es capaz de traspasar la totalidad de la recarga al modelo subterráneo. Se utilizaron las herramientas de balance desarrolladas en curso CEAZA WEAP-MODFLOW, especialmente adaptadas para modelos integrados que permiten extraer series principales de flujos tanto del modelo subterráneo como del modelo superficial utilizando los archivos binarios de MODFLOW (Figura 6).

<sup>10</sup> [https://www.rinnen-workshop.de/EN/Themen/Wasser/Produkte/produkte\\_node\\_en.html?tab=Software](https://www.rinnen-workshop.de/EN/Themen/Wasser/Produkte/produkte_node_en.html?tab=Software)

Las series de flujo muestran que el error inducido en el archivo de enlace (i.e. linkag.shp): línea verde corresponde al archivo con errores de conexión y la línea roja corresponde al archivo sin errores. El archivo con errores de enlace impide la transmisión correcta de flujos entre el modelo superficial y subterráneo, lo que implica un menor afloramiento de caudal desde el acuífero hacia el río y, por consiguiente, un menor caudal a la salida de la cuenca. Estas diferencias se deben sólo a un mal enlace SW-GW, lo que enfatiza la importancia de rastrear errores y repararlos, ya sea por falta de conexión a nivel superficial en el SW o por una mala distribución espacial de celdas en el archivo de enlace.



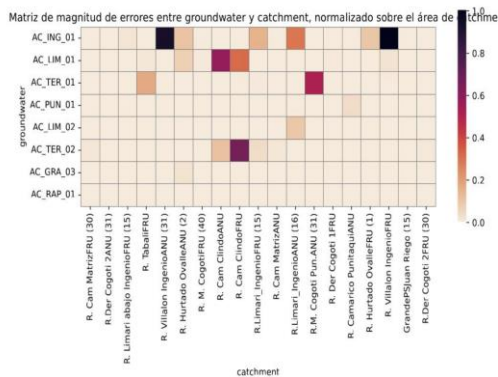
**Figura 5.-** Malla modelo subterráneo MODFLOW (a) y esquema arco-nodo WEAP (b)



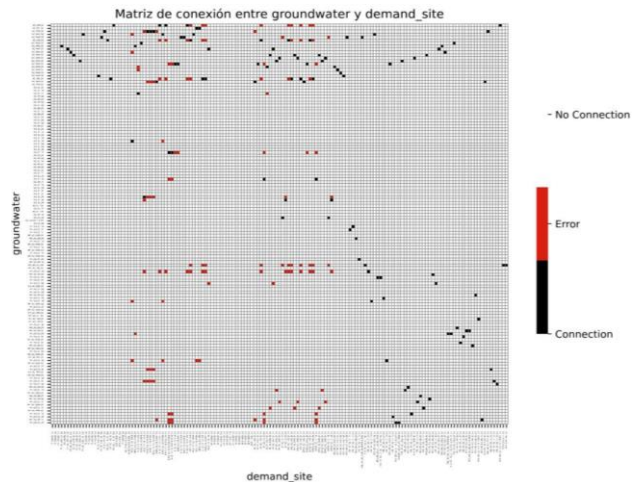
**Figura 6.-** Series de recarga (a) y afloramiento del acuífero completo (b). Serie de caudal superficial en la salida de la cuenca (c). Línea verde se asocia al modelo bien conectado y línea roja al modelo mal conectado.

Para finalizar se muestra el ejemplo de matrices de conectividad obtenidas a partir del modelo integrado del río Limarí (Figura 7) desarrollado por la Unidad de Hidrogeología del CEAZA (Sanzana et al, 2025). Actualmente dentro del marco del Fondecyt Regular N°1241596 y el Fondo para la Investigación, Innovación y Educación en Recursos Hídricos (FIIE-DGA) 2025 se podrá abordar en las mejoras del modelo mediante el uso de GeoLinkage y su complemento GeoChecker.

a) ejemplo fracción mal conectada entre cuencas (riego)-acuíferos



b) identificación de elementos mal conectados entre sitios de demanda (pozos)-acuíferos



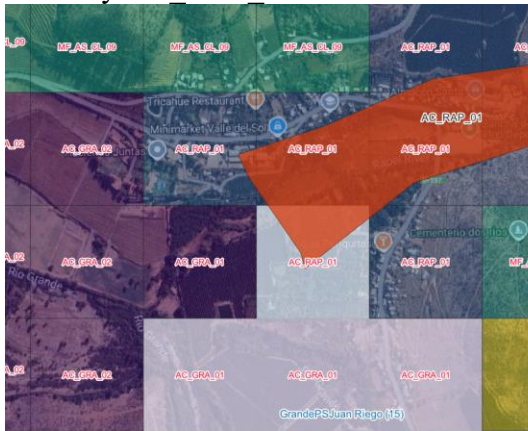
**Figura 7.-** Ejemplo de modelo elaboración en modelo integrado Limarí: fracción de área mal conectada entre cuencas con riego (19) versus acuíferos (8) (a) e identificación de enlaces bien y mal conectados entre sitios de demanda (158 elementos) y acuíferos (135 segmentaciones) (b)

Mediante el uso de Geolinkage fue posible estimar el porcentaje de error con respecto al área de los elementos acoplados (Catchment y Groundwater) del modelo del Limarí y cuantificar el flujo de agua que se pierde o no se enruta correctamente. Considerando el periodo completo de modelación se extrajo el valor promedio de flujo entre distintos elementos superficiales y subterráneos para luego ponderar dicho valor por el porcentaje de error. De esta manera, a partir del flujo calculado entre dos elementos se obtiene una estimación del flujo que no se estaría considerando para el acuífero mal enlazado.

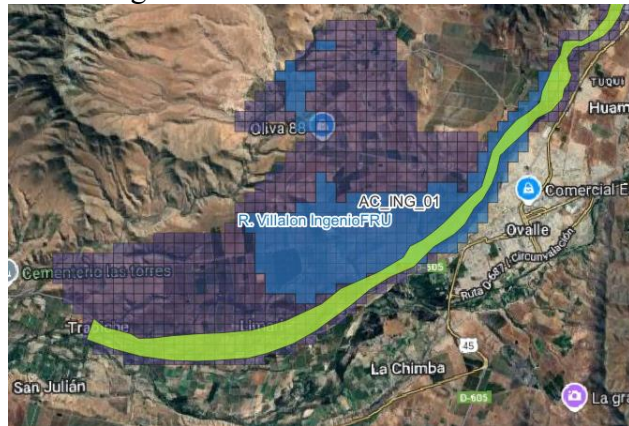
En base los resultados presentados se observa una alta variabilidad de porcentajes de errores, siendo los mayores asociados al Catchment R. Villalon IngenioANU y R. Villalon IngenioFRU, lo cual implicaría que, en promedio, 8,83 y 2,06 l/s deberían redirigirse al acuífero AC\_ING\_01, pero no está ocurriendo por errores en el proceso de acople. Por otro lado, el mayor flujo perdido corresponde al asociado entre al Catchment R. Cam ClindoANU con un valor de 19,41 l/s. Este tipo de errores es capaz de ser identificado por GeoLinkage-GeoChecker.

Gráficamente en la Figura 8 es posible observar ejemplos de las discrepancias espaciales en el acople para dos Catchment del modelo.

a) Situación de acople entre Catchment GrandePSJuan Riego y AC RAP 1.



b) Sobredimensionamiento de elemento AC\_ING\_01 en R. Villalon IngenioFRU



**Figura 8.-** Ejemplos de errores en acople. En la figura (a) corresponde a la asignación de una celda para un elemento que comparte borde entre dos acuíferos. En la figura (b) se observa la sobreasignación del elemento AC\_ING\_01 en la cuenca .Villalon IngenioFRU (en color verde el acuífero, en azul el elemento cuenca y en morado la representación del acuífero AC\_ING\_01 en la grilla de acople)

## 5. COMENTARIOS Y TRABAJO FUTURO

La recopilación de modelos a nivel internacional Ntona et al (2022) debe ser complementada con los modelos desarrollados a nivel nacional y con otros que los desarrolladores de QSWAT-MOD también han rastreado a nivel global. Se observa un gran interés y masificación de modelos integrados debido a la alta dependencia de usuarios para satisfacer sus consumos.

En el ejemplo del modelo de la BGR-Alemania se observó que debido a la mala representación del archivo de enlace en algunos meses se podrían perder aproximadamente  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 12, meses abril y mayo) que no se estarían inyectando como recarga al acuífero. Dicho error implica que altera el balance subterráneo afectando el afloramiento que llega al río de forma superficial (Fig. 12, en julio hasta  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  menos afloramiento). Todos esos errores atribuibles solo a la mala conexión SW-GW.

Para finalizar se muestra el ejemplo de matrices de conectividad obtenidas a partir del modelo integrado del río Limarí (Figura 13) desarrollado por la Unidad de Hidrogeología del CEAZA (Sanzana et al, 2025). Actualmente dentro del marco del Fondecyt Regular N°1241596 y el Fondo para la Investigación, Innovación y Educación en Recursos Hídricos (FIIIE-DGA)

2025 se podrá profundizar las mejoras del modelo mediante el uso de GeoLinkage y su complemento GeoChecker.

Si bien las herramientas se probaron con modelos WEAP-MODFLOW, los conceptos y los problemas de enlace son estándar para cualquier enfoque de modelación integrada que funcione de manera similar: por ejemplo, en modelos SWAT-MODFLOW o SWMM-MODFLOW, entre otros.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este estudio fue financiado por: FONDECYT REGULAR 2024 N°1241596, POLYHEDRAL MESH GENERATION. Proyecto Bienes Públicos CORFO CLIMA-L 23 BP-250956. FIIE DGA 2025 “IREC-LIMARÍ: INVESTIGACIÓN RECARGA ACTUALIZADA EN SHAC LIMARÍ PARA APLICACIÓN DE MEDIDAS QUE APORTEN SUSTENTABILIDAD DE ACUÍFERO”. GeoLinkage y GeoChecker, así como las rutinas de balance, se subirán al dominio <https://users.dcc.uchile.cl/~nancy/projects> para ser descargadas en su versión actual, aún no definitiva, ya que se está trabajando en tutoriales y en su respectiva publicación científica en el contexto del proyecto FONDECYT en desarrollo.

## **REFERENCIAS**

Ntona, M. M., Busico, G., Mastrocicco, M., & Kazakis, N. (2022). Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. *Science of the Total Environment*, 846, 157355.

Panday, S., Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, M. and Hughes, J.D., 2013. MODFLOW–USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation (No. 6-A45). US Geological Survey.

Sanzana, P., Torga, A., Hitschfeld, N., and Lobos, C.: GeoLinkage2.0 and GeoChecker: Hydroinformatics tools for large and complex hydrological-hydrogeological models using WEAP-MODFLOW. Case Study: Severe drought in the Limarí River Basin, Chile, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-20678, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-20678>, 2025.

Troncoso F. (2021). Herramienta v.geolinkage para automatización del pre procesamiento de modelos hidrológicos y evaluación de criterios de sustentabilidad de acuíferos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Computación. DCC-UCH. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181372>

Torga A. (2024). Requerimientos geométricos de modelos hidrogeológicos de cuencas afectadas por mega-sequía: caso de estudio cuenca del Limarí. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Computación. DCC-UCH. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/205352>