

# ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA EN TRAMOS DE RÍOS DEL SISTEMA LAJA-DIGUILLÍN EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

• José Luis Arumí-Ribera • Diego Andrés Rivera-Salazar •  
*Universidad de Concepción, Chile*

• Alfonso Rougier-Herrera •  
*Ministerio de Obras Públicas, Chile*

• Ricardo Díaz-Borquez •  
*Prisma Ingeniería, Chile*

## Resumen

Durante el verano del año 2008 se desarrolló un estudio para estimar las pérdidas de agua de riego del sistema Laja-Diguillín, Chile, que se producen por infiltración y evaporación en dos tramos de los ríos Polcura y Laja que son utilizados para conducir dichas aguas. Para evaluar las pérdidas por infiltración se utilizó un modelo de balance hídrico mensual que incluye, mediante ecuaciones específicas, los procesos de infiltración y evaporación en los tramos de río. Este modelo se parametrizó usando datos de velocidad de infiltración en el lecho del río, medidos durante una campaña de terreno, y se calibró usando datos históricos de caudales. Las pérdidas de conducción de las aguas de riego son del orden del 4.5 al 2.8% del caudal descargado al sistema.

**Palabras clave:** infiltración en cauces, evaporación en cauces, interacción de aguas superficiales subterráneas, canales de riego.

## Introducción

El Sistema de Riego Laja Diguillín (SRLD) es un proyecto que consiste en la construcción de una serie de canales matrices que conectan cauces naturales para conducir aguas desde la Laguna del Laja a un nuevo distrito de riego de aproximadamente 40 000 hectáreas, ubicado al sur de la ciudad de Chillán, Chile (figura 1). Sin embargo, el proyecto ha causado polémica debido a que trasvasa aguas de la cuenca del río Laja, que pertenece a la cuenca del río Biobío, para regar una zona que pertenece a la cuenca del río Itata. La población de la cuenca del Biobío se considera afectada, aduciendo que la construcción de este canal reducirá la disponibilidad de agua en la parte baja del río

Laja y del río Biobío, impactando directamente a la ciudad de Concepción. En respuesta a esto, la autoridad plantea que los derechos de agua usados por el canal provienen de la acumulación de aguas invernales en la laguna del Laja y que por ello no se afectará la disponibilidad de agua en el verano.

La gran sensibilidad de la comunidad frente a este proyecto ha motivado el desarrollo de estudios específicos para responder preguntas nunca antes planteadas en Chile. Este documento presenta los resultados de un estudio, realizado entre enero y mayo del 2008, para responder una de estas preguntas, que fue determinar cuánta agua de riego se pierde en la conducción del agua de riego que se lleva a cabo a través de los ríos Polcura y Laja.

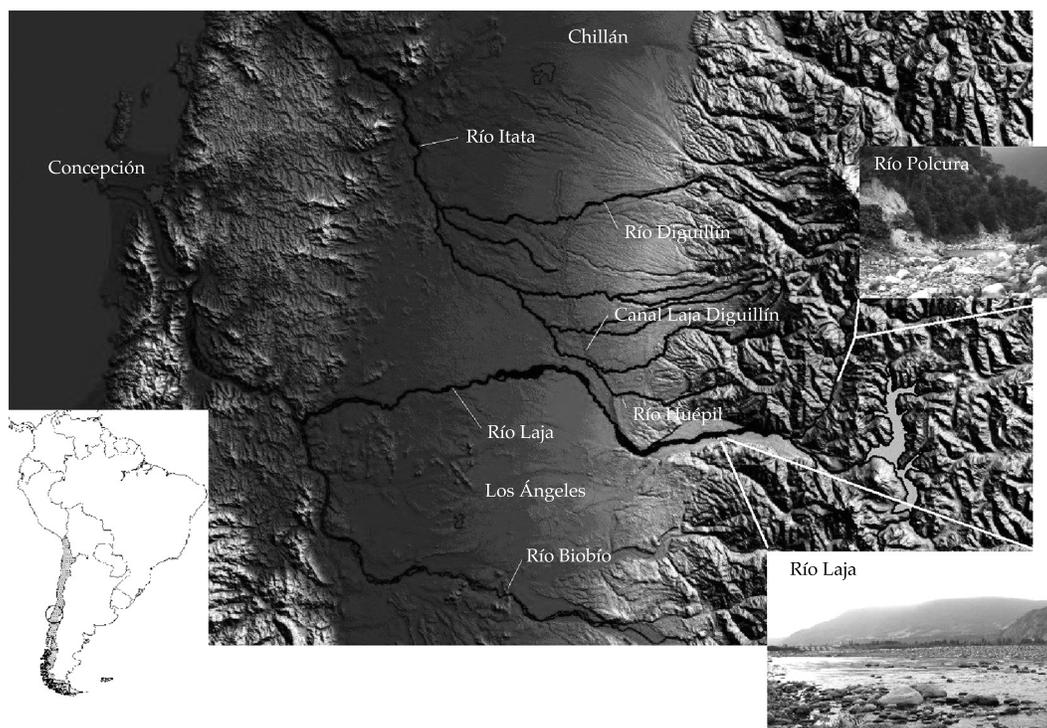


Figura 1. Ubicación geográfica del Sistema de Riego Laja Diguillín, Chile.

### Antecedentes generales

Las aguas del Sistema de Riego Laja-Diguillín provienen de la acumulación de excedentes invernales que son almacenados en la laguna del Laja, que es un lago natural operado como un sistema de regulación interanual desde el año 1958 (DOH, 2007). Las aguas acumuladas durante los meses de invierno (mayo-agosto) son descargadas al río Polcura a través de la Central Hidroeléctrica de El Toro y luego conducidas por dicho río en un tramo de 12 kilómetros hasta el río Laja, donde son conducidas por 42 kilómetros hasta la bocatoma Tucapel, donde son captadas hacia un canal matriz revestido en hormigón y conducidas otros 100 kilómetros hasta un distrito de riego de 40 000 hectáreas.

El río Polcura es el principal afluente del río Laja y nace en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes. El río se desarrolla en la dirección norte-sur, y posee un cauce de

alta pendiente, donde el material depositado es predominantemente roca transportada. El río Laja es el principal afluente del río Biobío y nace de las filtraciones que se producen a través de la barrera de material volcánico que cierra la laguna del Laja (Thiele *et al.*, 1998). En su curso superior, el río se desarrolla en una dirección este-oeste y posee un cauce ancho, donde predomina el material gravo-arenoso.

### Procedimiento de análisis

Al inicio del estudio se realizó un recorrido exhaustivo de los ríos Polcura y Laja desde la descarga de la Central Hidroeléctrica de El Toro, donde serán vaciadas las aguas del SRLD, hasta la bocatoma Tucapel. Este recorrido, más el análisis de la geología y entrevista a actores que conocen los ríos, como los operadores de los canales de riego, permitió establecer como principal hipótesis de trabajo que a lo largo de los 54 kilómetros

del estudio, los ríos infiltran aguas hacia el sistema de aguas subterráneas.

Para la determinación del balance hídrico se utilizó una metodología consistente en discretizar los cauces en diferentes tramos y resolver la ecuación de balance hídrico (ecuación (1)), considerando las pérdidas por infiltración como incógnitas para cada tramo y que los ingresos de agua se concentran al inicio de cada tramo, al igual que las pérdidas por infiltración y evaporación ocurren en forma distribuida. Así, el caudal a la salida del tramo  $j$  corresponde al caudal de ingreso en el tramo  $j + 1$ . Esta metodología es similar a la propuesta por Khepar *et al.* (2000), quienes evaluaron la magnitud de la infiltración que recarga los sistemas de aguas subterráneas. Las pérdidas por infiltración pueden modelarse mediante la aplicación de la Ley de Darcy al caso de un cauce que recarga un acuífero (Anderson y Woessner, 1991) bajo el supuesto de que las pérdidas por infiltración a través del lecho del cauce son dependientes de la conductividad hidráulica de éste y de la carga hidráulica sobre el lecho, la cual a su vez puede aproximarse o considerarse equivalente a la altura normal de escurrimiento (ecuación (2)).

$$\sum_j Qe_{ij} - Qs_i = Pinf_i + Pev_i \quad (1)$$

Donde:

$Qe_{ij}$ : caudal  $j$ -ésimo que ingresa en el nodo inicial del tramo  $i$ .

$Qs_i$ : caudal que sale del tramo  $i$ .

$Pinf_i$ : pérdidas por infiltración en el tramo  $i$ .

$Pev_i$ : pérdidas por evaporación en el tramo  $i$ .

$$P_{inf} = \frac{k}{e} A h \quad (2)$$

Donde:

$P_{inf}$ : pérdida por infiltración ( $m^3/s$ ).

$k$ : conductividad hidráulica del material a través del cual se produce el flujo entre el río y el acuífero ( $m/s$ ).

$e$ : espesor del lecho por donde se produce el flujo entre el río y el acuífero ( $m$ ).

$A$ : superficie por donde se produce el flujo entre el río y el acuífero ( $m^2$ ).

$h$ : altura hidráulica promedio del río en el tramo ( $m$ ).

Para disponer de estimaciones de los valores de conductividad hidráulica y espesor del material a través del cual se produce la infiltración, se ejecutaron diez pruebas de infiltración basadas en una adaptación del método propuesto por Rosenberry (2008). Este método se basa en el uso de un cilindro de infiltración hincado en el lecho del río, al cual se conecta una bolsa plástica rellena de agua. La estimación de la velocidad de infiltración se realiza mediante la medición del tiempo que toma vaciar un volumen conocido de agua.

Para cada tramo se calcula la altura hidráulica, suponiendo que se cumplen las condiciones de régimen uniforme, usando la ecuación de Chézy-Manning. La longitud, pendiente y ancho de cada tramo se obtuvieron usando las imágenes disponible en Google Earth (con resolución métrica en la zona) y modelos digitales de terreno SRTM (NASA, 2005). Considerando que el ancho de los cauces es dos órdenes de magnitud superior a la profundidad, se simplificó la ecuación de Manning, suponiendo que el radio hidráulico es igual a la altura hidráulica.

Se estimaron las pérdidas por evaporación a partir de registros de evaporación de bandeja, corregidos mediante la ecuación (3) (McKenzie y Craig, 2001). Las constantes adimensionales ( $K_e$ ) usadas son 1.26 para el caso de pozas (De Bruin, 1978; Tanny *et al.*, 2008) y 1.00 para vegetación ribereña (McKenzie y Craig, 2001). Se supone que la vegetación ribereña no tiene limitación de abastecimiento de agua y que el efecto del viento (*fetch*) en las pozas genera mayor evaporación. En la ecuación (3), la evaporación en el tramo es dependiente

del ancho de escurrimiento, el cual, a su vez, puede estimarse a partir de la ecuación de Chézy-Manning:

$$ME = \frac{E}{1\,000} \sum_i k_i A_i \quad (3)$$

Donde:

ME: mermas por evaporación ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ).

E: evaporación bandeja ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

$k_i$ : constante adimensional que relaciona la evaporación de bandeja con la evaporación de la fuente en el área  $A_i$ .

$A_i$ : área ( $\text{m}^2$ ).

Debido a que las aguas del canal Laja Diguillín son vaciadas al río Polcura a través de la descarga de El Toro y que éstas son conducidas por los ríos Polcura y Laja hasta la bocatoma Antuco, se analizaron ambos cauces en un solo modelo, que consideró tres tramos del río Polcura y cuatro tramos del río Laja (figura 2a). Se modeló el balance hídrico en cada tramo, considerando los ingresos y la salidas de agua por nodo que se indican en la figura 2a. Cada tramo presenta características similares en cuanto a radio hidráulico, pendiente y composición del material de fondo.

Para la evaluación de las pérdidas de conducción asociadas con el SRLD, la condición de referencia es el balance hídrico para los siete tramos de río sin la operación del SRLD. Para esto se consideraron las estadísticas mensuales de caudales del periodo previo a la operación del sistema entre los años 2003 y 2007, pues es el único periodo en que se dispone de una estadística completa de caudales para los cauces naturales relacionados con el SRLD. La aplicabilidad de la ecuación (1) fue evaluada comparando los valores de caudal estimados a la salida del nodo 8, con los valores medidos en la estación fluviométrica río Laja en Tucapel (figura 2b).

Para simular la operación del SRLD se consideraron siete escenarios definidos por

valores de caudales incrementales almacenados durante la temporada invernal en el lago Laja y que son descargados a través de la central El Toro (cuadro 1). Estos caudales fueron definidos para cubrir los posibles rangos de operación del SRLD, considerando el valor máximo que puede ser entregado de acuerdo con las reglas de operación (DOH, 2007).

## Resultados

Los valores de pérdidas por infiltración para los caudales incrementales descargados por la central El Toro al SRLD se presentan en el cuadro 1, donde se puede observar que estas pérdidas son del orden del 4.5 al 2.8% del caudal descargado por la central El Toro. Para todo el tramo en estudio, las pérdidas por evaporación para los ríos Polcura y Laja son de aproximadamente  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  y no aumentaron significativamente para los distintos valores de caudales incrementales descargados al SRLD, debido a que el ancho superficial del cauce no varió en forma importante.

En la figura 2c se muestra que la relación entre los caudales incrementales descargados por la central El Toro y los caudales posibles de ser extraídos al SRLD por la bocatoma Tucapel puede ser considerada lineal. Esta aproximación será usada para la operación del sistema.

## Conclusiones

Los resultados de este estudio permitieron corroborar la hipótesis de trabajo de que, a lo largo de los 54 kilómetros del estudio, los ríos Polcura y Laja infiltran aguas hacia el sistema regional de aguas subterráneas. Este resultado es consistente con las características generales de los ríos andinos de la zona centro sur de Chile, los cuales, en su recorridos por la precordillera andina (transición entre la Cordillera de los Andes y la Depresión Central), forman valles con materiales de relleno permeable, en donde los depósitos de agua subterránea tienden a ser profundos

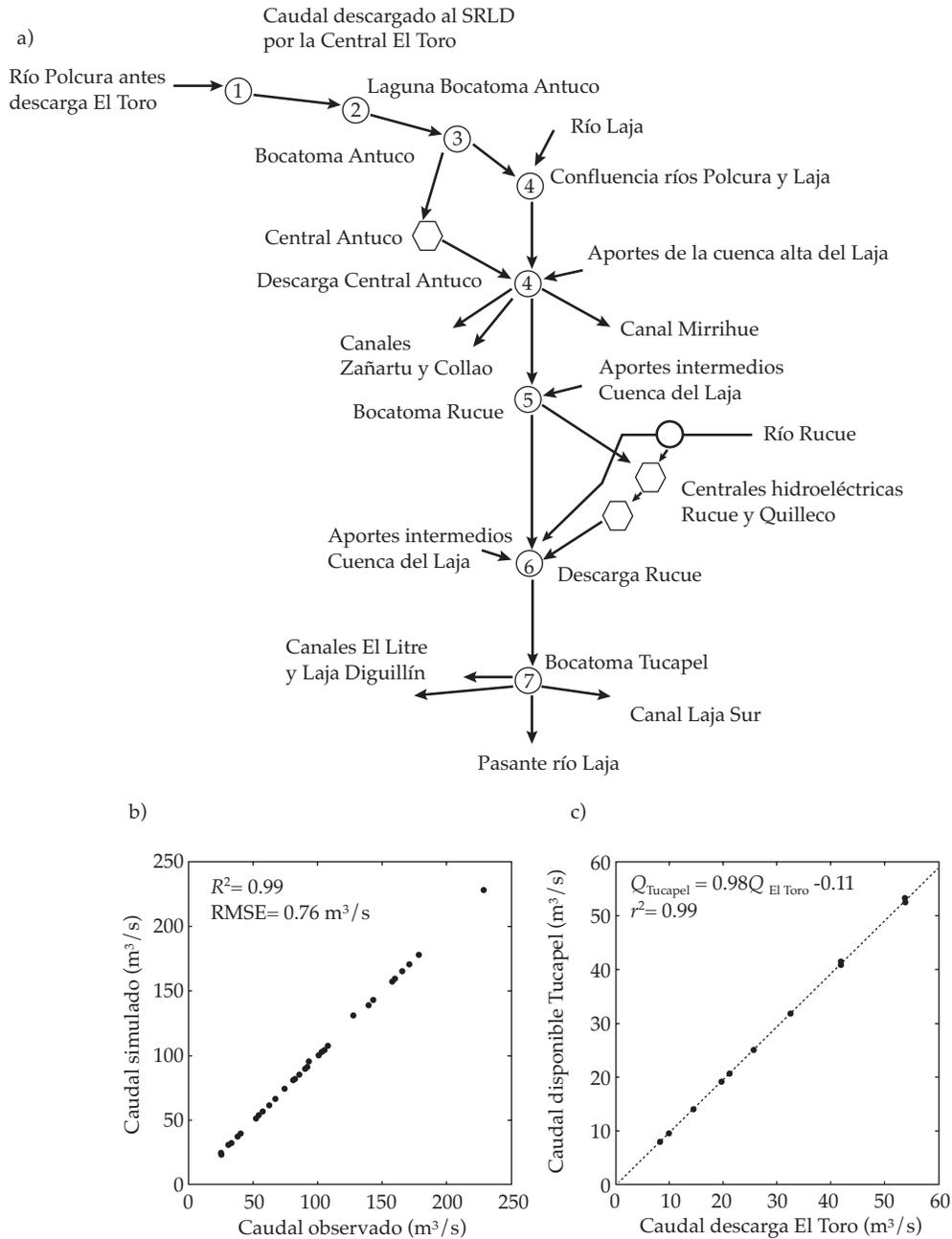


Figura 2. a) Diagrama unifilar modelo ríos Polcura y Laja; b) verificación del modelo de balance hídrico utilizado; c) estimación de pérdidas de conducción en el SRLD producidas entre la descarga El Toro y la bocatoma Tucapel.

y las filtraciones desde los lechos de los ríos son un importante mecanismo de recarga de aguas subterráneas.

Para la operación del sistema de riego Laja-Diguillín es necesario considerar las pérdidas

de conducción que se producen por infiltración y evaporación desde el lecho de los ríos Polcura y Laja, en los tramos donde se realiza la conducción de las aguas del sistema. Se concluye que el caudal que debe ser descargado

Cuadro 1. Pérdidas por infiltración del SRLD en los tramos Polcura y Laja.

Caudal descargado por El Toro al SRLD m <sup>3</sup> /s	Pérdidas por infiltración por río en m <sup>3</sup> /s		Pérdidas por infiltración totales m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de pérdida con relación al caudal descargado por El Toro	Caudal disponible en bocatoma Tucapel m <sup>3</sup> /s
	Río Polcura	Río Laja			
10	0.07	0.38	0.45	4.5	9.55
20	0.12	0.71	0.83	4.1	19.17
30	0.16	0.99	1.15	3.8	28.85
40	0.18	1.20	1.38	3.4	38.62
50	0.21	1.38	1.59	3.2	48.41
60	0.22	1.52	1.74	2.9	58.26
65	0.23	1.58	1.81	2.8	63.19

<sup>1</sup> Condición natural del río sin aportes del SRLD.

por la central El Toro debe ser mayor al caudal requerido en la bocatoma Tucapel de acuerdo con la regla de operación indicada en la figura 2c.

Recibido: 24/08/09  
Aceptado: 15/02/12

## Referencias

- ANDERSON, M.P. and WOESSNER, W.W. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego: Elsevier Science & Technology Books, 1991, 381 pp.
- DE BRUIN, H.A. A simple model for shallow lake evaporation. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 17, 1978, pp. 1132-1134.
- DOH. *Guía Para la Explotación del Lago Laja*. Gobierno de Chile. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas-Endesa, S.A., 2007, 17 pp.
- KHEPAR, S.D., YADAV, A.K., SONDH, S.K., and SHERRING, A. Modelling surplus canal water releases for artificial recharge of groundwater through surface drainage systems. *Irrigation Science*. Vol. 19, No. 2, January, 2000, pp. 95-100.
- McKENZIE, R. and CRAIG, A. Evaluation of river losses from the Orange River using hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*. Vol. 241, No. 1-2, January, 2001, pp. 62-89.
- NASA. *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* [en línea], 2005. Disponible en *World Wide Web*: <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/>.
- ROSENBERRY, D.O. A seepage meter designed for use in flowing water. *Journal of Hydrology*. Vol. 359, No. 1-2, September, 2008, pp. 118-130.
- TANNY, J., COHEN, S., ASSOULINE, S., LANGE, F., GRAVA, A., BERGER, D., TELTCH, B., and PARLANGE, M. Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates. *Journal of Hydrology*. Vol. 351, No. 1-2, March, 2008, pp. 218-229.
- THIELE, R., MORENO, H., ELGUETA, S., LAHSEN, A., REBOLLEDO, S. y PETIT-BREUILH, M.E. Evolución geológico-geomorfológica Cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista geológica de Chile*. Vol. 25, núm. 2, diciembre 1998, pp. 229-253.

## Abstract

ARUMÍ-RIBERA, J.L., RIVERA-SALAZAR, D.A., ROUGIER-HERRERA, A. & DÍAZ-BORQUEZ, R. Estimation of water losses in sections of rivers in the Laja-Diguillín system, central region of Chile. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 3, July-September, 2012, pp. 135-141.

During the Chilean summer of 2008 in the Laja-Diguillín irrigation system, a study was conducted to estimate irrigation water loss due to infiltration and evaporation in two sections of the Polcura and Laja rivers, which are used for channeling these waters. To evaluate losses due to infiltration, a monthly water balance model with specific equations was used which included infiltration and evaporation processes in the sections of the river. This model was parameterized using data for infiltration velocity in the riverbed, measured during a field campaign and calibrated using historical flow data. Losses in channeling the irrigation water ranged from 4.5 to 2.8% of the flow discharged into the system.

**Keywords:** riverbed infiltration, riverbed evaporation, groundwater-surface water interaction, irrigation channels.

## Dirección institucional de los autores

*Dr. José Luis Arumí Ribera*

Universidad de Concepción  
Departamento de Recursos Hídricos  
Av. Vicente Méndez 595  
Casilla 537  
Chillán, Octava Región, CHILE  
Teléfono: +56 (42) 208 804  
Fax: +56 (42) 275 303  
jarumi@udec.cl

*Dr. Diego Andrés Rivera Salazar*

Universidad de Concepción  
Departamento de Recursos Hídricos  
Av. Vicente Méndez 595  
Casilla 537  
Chillán, Octava Región, CHILE  
Teléfono: +56 (42) 208 804  
Fax: +56 (42) 275 303  
dirivera@udec.cl

*Ing. Alfonso Rougier Herrera*

Ministerio de Obras Públicas  
Dirección de Obras Hidráulicas  
Monradé 59 piso 5  
Santiago, Región Metropolitana, CHILE  
Teléfono: +56 (2) 4494 000  
Fax: +56 (2) 4410 914  
alfonso.rougier@mop.gov.cl

*Ing. Ricardo Díaz Borquez*

Prisma Ingeniería  
Arturo Prat 60, Oficina 41  
rdiazb@prisma.cl  
Santiago, Región Metropolitana, CHILE  
Teléfono: +56 (2) 6330 754  
Fax: +56 (2) 6395 421  
rdiazb@prisma.cl