SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

TECNOLOGÍAS DE MONITOREO DE PROCESOS HIDROLÓGICOS. EJEMPLOS, VENTAJAS Y RIESGOS.

JOSE LUIS ARUMI R.[1]
ENRIQUE MUÑOZ O. [2]
OCTAVIO LAGOS R.[1]
RICARDO OYARZÚN L.[3]
CAMILO SOUTO E.[1]
ANDRÉS PÉREZ[1]
MARCELO DÍAZ[1]
FELIPE MUÑOZ[1]

RESUMEN

El desarrollo tecnológico reciente permite monitorear en forma mucho más rápida y económica procesos hidrológicos. Este trabajo presenta ejemplos de aplicaciones de tecnologías de monitoreo en diferentes cuerpos de agua de la Región del Biobío. El primer caso corresponde a la medición directa de evaporación desde el Lago Laja, realizada mediante el uso de un sistema de Eddy Covarianza, que logró medir tasas de evaporación desde dicho lago de hasta 3,4 m^3/s. El segundo caso corresponde al uso de drones con cámaras térmicas para determinar el ingreso de aguas subterráneas en un tramo del río Diguillín. Finalmente, el tercer caso corresponde al mapeo de ingresos de agua subterránea desde el fondo de una laguna usando mediciones de Radón. Se concluye que existe una importante oferta tecnológica que nos permite generar muchos datos. Pero que estos análisis y mediciones deben estar respaldados por un riguroso estudio de los procesos que se están controlando. Lo anterior, porque existe el riesgo de que se presenten documentos que poseen impresionantes conjuntos de datos, pero con un pobre análisis conceptual.

[1] Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola Departamento de Recursos Hídricos, Centro CRHIAM, - jarumi@udec.cl
[2] Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. Concepción, Chile.
[3] Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería de Minas, Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas. La Serena, Chile.

1. INTRODUCCIÓN

Dados los efectos que la escasez hídrica ha tenido sobre la zona central de Chile, que produce incerteza sobre la futura disponibilidad de agua y considerando el aumento de demanda de este recurso producto del crecimiento de la población y el desarrollo económico, es que se hace necesario desarrollar mejores herramientas para el estudio de los procesos hidrológicos que controlan la generación de escorrentía y la mantención de ecosistemas.

Los procesos hidrológicos en una cuenca consisten en procesos de recarga y liberación de agua en sistemas de almacenamiento como el manto nival, sistemas subterráneos y superficiales como lagos y lagunas. En la actualidad existen complejos modelos hidrológicos que permiten modelar desde el flujo de agua en una columna de suelo a la generación de escorrentía en una cuenca nivo-pluvial. Si bien los procesos hidrológicos pueden ser modelados y existe bastante experiencia acumulada en ello, se reconoce que los modelos poseen incerteza propia de su creación, que pasa por una conceptualización del sistema y su necesaria simplificación. Por ello, la mejor forma de reducir la incerteza en el estudio de los procesos hidrológicos es contar con mediciones directas o indirectas de las variables que intervienen en el balance hídrico. El desarrollo tecnológico reciente permite monitorear en forma mucho más rápida y económica los procesos hidrológicos que hace sólo algunos años. Este trabajo presenta ejemplos de aplicaciones de tecnologías que están en desarrollo en diferentes cuerpos de agua de la Región del Biobío.

- El primer caso corresponde a la medición directa de evaporación desde el Lago Laja, realizada mediante el uso de un sistema de Eddy Covarianza
- El segundo caso corresponde al mapeo de ingresos de agua subterránea desde el fondo de una laguna usando mediciones de Radón
- El tercer caso corresponde al uso de drones con cámaras térmicas para determinar ingreso de aguas subterráneas en un tramo del río Diguillín

2. MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN EN EL LAGO LAJA

Durante la última década, el manejo de los recursos hídricos en el sistema Laja se ha transformado en un tema crítico debido a un largo período de escasez hídrica que ha afectado a Chile, así como también el incremento de la sensibilidad ciudadana por la protección de los paisajes y los servicios ecosistémicos, que ha tomado al Salto del Laja como un icono central. Por todo lo anterior se han realizado una serie de proyectos sobre la hidrología de la cuenca del Laja y el manejo de dicho sistema (Arumi et al., 2015; Muñoz et al., 2014).

Es interesante destacar que todos los modelos operacionales del sistema Laja se basan en resolver el balance hídrico en el Lago Laja, ocupando estimaciones de los aportes de escorrentía de la cuenca aportante al Lago y estimaciones de la evaporación del Lago, que

son simplistas y que en algunos casos llegan a despreciar totalmente este componente del balance en el lago.

Por esta razón se desarrolló un estudio para comparar distintos modelos de estimación de evaporación desde el lago (Pérez, 2017) que fueron contrastadas con los resultados de una campaña de medición de la evaporación desde la superficie del lago, realizada en la temporada 2016-2017. Debido a los alcances de este documento, a que la comparación de los modelos se presenta en otro trabajo paralelo en este congreso, este documento se referiere sólo a las mediciones de evaporación

Tras un recorrido exhaustivo del lago y un análisis de la dirección predominante de los vientos, se seleccionó un punto en la orilla del lago que reunía las condiciones de accesibilidad y representatividad, principalmente considerando que el lago estuviera a barlovento. En este punto se instaló un sistema Eddy Covariance (EC) para medir los principales componentes del balance de energía y las principales variables medioambientales que afectan la evaporación, en intervalos de 30 minutos. Para medir la radiación solar se utilizó un piranómetro (LI-200R, Licor, Lincoln, NE, USA), montado a 3 metros de altura. La radiación neta fue medida con un radiómetro neto (NR-Lite2, Kipp & Zonen, Delft, Holanda), montado a dos metros de altura y utilizando un brazo de extensión de dos metros de largo para captar siempre la energía proveniente de la superficie de agua. El flujo de calor sensible. fue medido con un anemómetro sonico 3D (CSAT3, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) montado a 2 metros de altura en forma horizontal a la dirección del viento y una fina termocupla (FW3, Campbell Scientific, Logan, UT, USA). El flujo de calor latente fue medido por el anemómetro sónico y un analizador de gases (EC150, Campbell Scientific, Logan, UT, USA).

La temperatura del aire y la humedad relativa fueron medidas con una sonda (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) a 2,5 metros de altura. La temperatura superficial del agua fue medida con un registrador de temperatura (iButton DS1921Z, Maxim Integrated, San Jose, CA, US), fijado a una cuerda de uso marino anclada a un peso y suspendida con una boya. La velocidad de viento fue medida con el mismo anemómetro sónico 3D. Señales de estos instrumentos se muestrean cada 5 segundos, y se almacenan como la media transcurridos 30 minutos en un registrador de datos (CR3000, Campbell Scientic, Logan, UT, USA). Dos baterías de 12 V, conectadas en paralelo suministraron la energía.

Durante 7 días del mes de noviembre de 2016; enero (22 al 28/01) y marzo (17 al 23/03) del 2017, se realizaron mediciones de las componentes del balance de energía superficial y las variables medioambientales que afectan la evaporación. Se realizó un procesamiento de los datos, eliminando los valores que sean atribuibles a ruidos en los datos, falla de sensor o días de lluvia, resultando en un total de 747 datos distribuidos en 259 en enero, 255 en marzo y 233 en noviembre. Los resultados medios diarios obtenidos se presentan en la tabla 1, en términos de altura de agua evaporada. Las tasas de evaporación del lago se estimaron a partir de las curvas superficie-altura del Lago Laja, obtenidas por la batimetría realizad por la DOH el año 2015, usando la cota media diaria medida por la DGA y suponiendo que el valor medido representa al valor medio de evaporación en el lago.

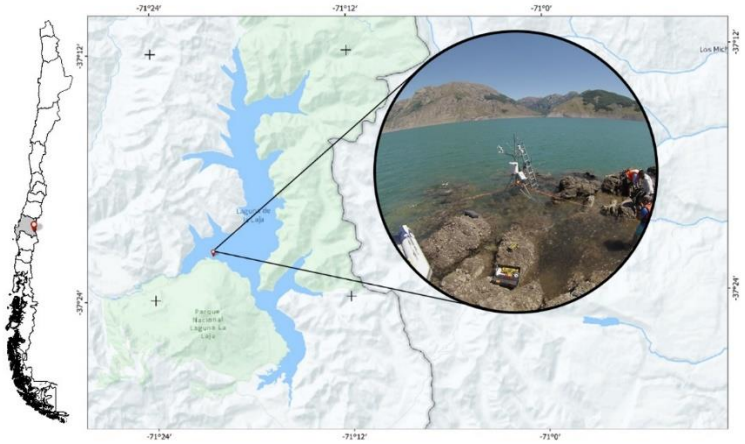

Figura 1. Ubicación de la estación Eddy Covariance (Pérez, 2017)

Tabla 1. Resultados de evaporación medidos en el Lago Laja

Fecha	Altura de agua evaporada (mm/día)	Tasa de evaporación desde el lago (m^3/s)
10-nov-2016	1,5	1,2
11-nov-2016	1,9	1,6
12-nov-2016	1,9	1,5
13-nov-2016	2,2	1,8
22-ene-2017	3,2	2,6
23-ene-2017	4,0	3,3
24-ene-2017	2,4	2,0
25-ene-2017	3,6	2,9
26-ene-2017	3,9	3,2
27-ene-2017	3,2	2,6
18-mar-2017	4,1	3,4
19-mar-2017	4,0	3,3
20-mar-2017	3,5	2,8
21-mar-2017	3,0	2,4
22-mar-2017	2,3	1,9

3. MAPEO DE INGRESOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DESDE EL FONDO DE UNA LAGUNA

La Laguna Santa Elena se ubica en el sector de Santa Clara, a 6 kilómetros al poniente de la Ruta 5 Sur, en la Comuna de Bulnes, Región del Biobío. La laguna corresponde a los restos de un paleo-cauce del río Itata y posee una superficie de 0,61 km^2. La laguna es de gran importancia para el sector, por la gran presencia de especies de aves. En la década del 90 esta laguna recibió la denominación de ser el "Hogar del Cisne de cuello negro en Ñuble", transformándose en un atractivo turístico del lugar. (http:www.nublenaturaleza.cl). Además de su atractivo paisajístico y de protección ambiental de especies, es utilizada como fuente de turismo, además de la práctica de deportes acuáticos, pesca y riego.

Figura 2. Laguna Santa Elena.

La laguna Santa Elena cuenta con dos entradas de agua superficiales (provenientes de canales de riego) y una salida de agua superficial, sin embargo, Matta (2015) concluyó que el principal aporte de agua a esta laguna corresponde a aguas que ingresan desde un acuífero cuya profundidad se estima entre los 8 y 16 metros. Con el fin de determinar si esto es efectivo, se realizó un mapeo de la presencia de Radón en el fondo de la laguna.

El Radón (^{222}Rn) se ha utilizado como un trazador natural para indicar la presencia de aguas subterráneas (Négrel et al. 2007). Este elemento se produce por la desintegración del Radio (^{226}Ra) el cuál a su vez deriva del isótopo del uranio (^{238}U) y tiene una vida media de 3,8 días, por lo que desaparece en cuerpos de agua superficiales. Como el radón es soluble en agua, no es reactivo, cumple las características de un trazador ambiental. La presencia de Radón en el fondo de la laguna indica la existencia de aportes permanentes de aguas subterráneas.

Usando la batimetría realizada por Matta (2015) se diseñó un programa de muestreo al fondo de la laguna en 13 puntos distribuidos a lo largo de la laguna (Figura 3a). El muestreo se realizó usando un bote Zodiac, con motor eléctrico y una botella de Niskin. Los resultados confirman el ingreso de agua subterránea a la laguna al centro de ésta.

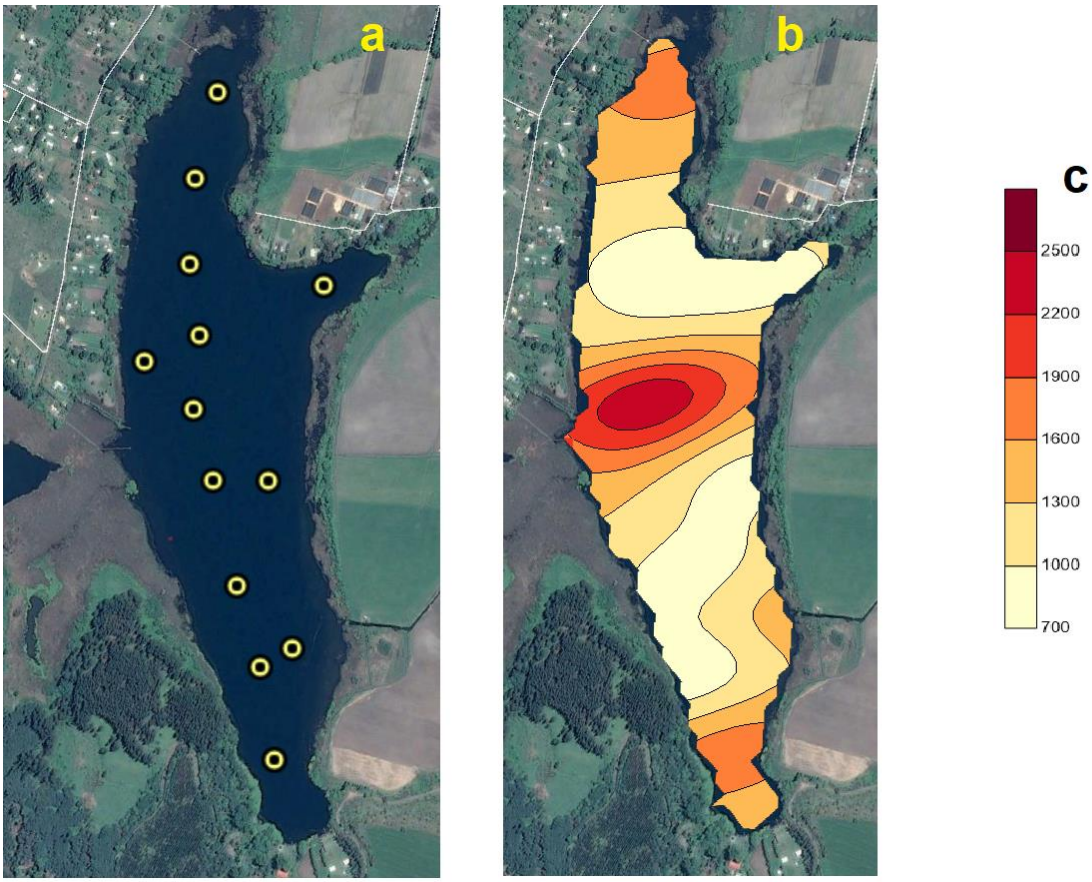

Figura 3: a) Puntos muestreados en la laguna Santa Elena, b) Niveles de Radón detectados en el fondo de la laguna y c) escala de valores de concentración de Radón en Bq/m^3.

4. USO DE IMÁGENES TERMALES EN EL RÍO DIGUILLIN EN LOS TILOS.

Existen múltiples ejemplos en la literatura sobre el uso de temperatura como un trazador para estudiar interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Debido a que la temperatura puede ser medida directa o remotamente, es posible utilizar el transporte convectivo de calor de agua para obtener información sobre el movimiento del agua (Constanz, 2008). Sierra y Henderson (2004) utilizaron la teledetección infrarroja térmica para medir la corriente y la temperatura ribereña en Nicola River, Columbia Británica. Tcherepanov et al. (2005) utilizó la imagen termal de Landsat para identificar la descarga de agua subterránea en los lagos someros dominados por aguas subterráneas en Nebraska. El Servicio de Parques Nacionales de los Estados Unidos publicó un informe para la evaluación de la temperatura de la corriente usando imágenes infrarrojas térmicas (Vicki O. y DG Anderson, 2005).

El uso en la práctica de imágenes infrarrojas térmicas para estudiar la interacción agua superficial subterránea en ríos de la zona central de Chile, se vio limitada por la disponibilidad de imágenes satelitales con una resolución adecuada y por el costo que significaba arrendar el vuelo de un avión que dispusiera de una cámara térmica. Ambas

limitaciones fueron eliminadas al ampliarse la oferta de vehículos no tripulados (drones) con cada vez mayor capacidad de carga y autonomía de vuelo.

Es así como en enero del 2017 se realizó un vuelo en un tramo de 2 kilómetros de la parte baja del río Diguillín, en un sector denominado Los Tilos, en la comuna de Bulnes. Por trabajos anteriores se conoce que en esa zona existen recuperaciones en el río que pueden deberse a retornos de riego o exfiltraciones de aguas subterráneas. Campañas de aforos realizado al inicio y al final del tramo permitieron determinar un incremento de caudal de aproximadamente 200 L/s, valor significativo al considerar que el río sólo poseía un caudal de 1600 L/s en enero y 600 L/s a fines de marzo.

El dron utilizado es un cuadricoptero modelo BOT de alta gama, con una cámara térmica es marca FLIR modelo TAU2 13 mm. El vuelo del dron se realizó después del mediodía, con la temperatura del agua en el río cercana a 21°C. Se obtuvieron una serie de imágenes térmicas georreferenciadas donde se distinguen puntos con diferencias térmicas atribuibles al ingreso de agua más fría al tramo del río. En la figura 4 se presentan dos puntos que corresponden a: un ingreso de agua correspondiente a retornos de riego (Punto A) que puede ser visto en la figura 5, y una vertiente que exfiltraba en la ribera norte del río (Punto B) que se presenta en la figura 6. Esta vertiente no había sido detectada anteriormente.

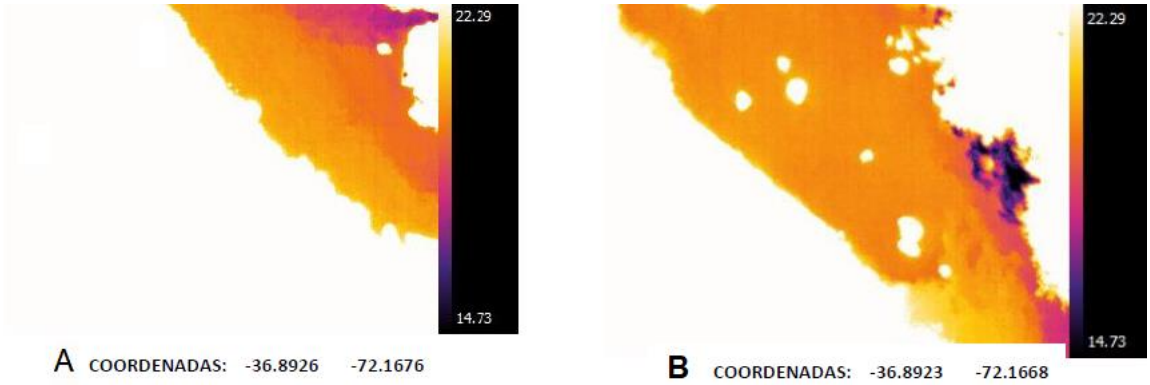

Figura 4. Anomalías térmicas que reflejan ingresos de agua fría detectados en dos puntos del tramo de río estudiado.

Figura 5. Ingreso de excedentes de riego en un desagüe, punto A de figura 5

Figura 6. Vertiente en la ribera norte del tramo del río Diguillín, punto B de figura 5

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En los últimos se han generado tecnológicos que permiten realizar avances notables en el monitoreo de las variables involucradas en el balance hídrico. En este artículo se han presentado tres ejemplos de tecnologías disponibles, pero hay varias otras como el uso de equipos para medir caudales basados en los efectos Doppler o Faraday, o el cada vez más masivo uso de la concentración de isótopos ambientales como trazadores.

La principal ventaja que se presenta actualmente es la reducción de costos de adquisición o arriendo de equipos. Sólo por mencionar un ejemplo, el costo de contratar un vuelo el año 2002 para hacer un levantamiento térmico del río Diguillín es aproximadamente el 70% del costo del Dron utilizado en el vuelo del año 2017 ($ 10.000.000). Otro ejemplo son los equipos ADV (Doppler) utilizados para aforar el río Diguillín en el estudio de los Tilos, permiten realizar mediciones tres veces más rápido que con los equipos mecánicos, que además deben ser calibrados regularmente.

Todo lo anterior constituye parte de una creciente oferta tecnológica que nos permite generar muchos datos, e impresionantes imágenes. Sin embargo, existe el riesgo creciente de que se presenten documentos con detrás de las cuales existe un pobre análisis conceptual. Por ejemplo, si el sistema Eddy Covariance está mal ubicado los datos de evaporación medidos no serán válidos y podrán significar cualquier cosa. En el caso del Radón, si la toma de muestra no se hace en el lugar correcto y/o el proceso de manipulación y análisis de la muestra no se hace correctamente, el muestreo será una pérdida de tiempo, En el caso del vuelo del Dron, si no existe un diseño previo de la estrategia de vuelo, sólo se dispondrá de imágenes que no permitirán su posterior procesamiento. Vale la pena indicar que el autor principal de este trabajo ha cometido este tipo de errores en algún momento y aprendido de ello.

Es importante tener presente que las tecnologías existentes son un apoyo y no reemplazan el estudio y conceptualización de los procesos hidrológicos. Sin embargo, debidamente utilizadas, permiten realizar un avance notable en el estudio del balance hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo de Conicyt a través de los proyectos Fondecyt-BMBF-PCCI1-2031 y Conicyt/Fondap/15130015. Además qse expresa el agradecimiento a la empresa EMOingenieros Ltda. (https://www.emoingenieros.cl/uav) por facilitar el uso del vehículo aéreo no tripulado y por el procesamiento de la información fotográfica y topográfica.

REFERENCIAS

Arumi, JL., J. Dietrich, I Neuweiler. Analisis de las filtraciones de la barrera del Lago Laja. XXI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, octubre 2015.

Constantz, J., 2008. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. Water Resources Research, Vol. 44, W00D10, doi:10.1029/2008WR006996, 2008

Matta, C. (2015). Diseño de una Red de Instrumentación para el monitoreo hidrológico de la laguna Santa Elena (tesis de pregrado). Universidad de Concepción. Chillán. Chile.

Muñoz E.; Zúñiga R., and JL: Arumi; Análisis hidrológico del sistema Laja. Impactos por cambios antropogénicos y análisis de una nueva regla de operación. XII Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, agosto 2014.

Négrel, P.; Lemière, B.; Machard de Grammont, H.; Billaud P.; Sengupta, B. 2007 Hydrogeochemical processes, mixing and isotope tracing in hard rock aquifers and surface waters from the Subarnarekha River Basin, (east Singhbhum District, Jharkhand State, India). Hydrogeology Journal 15: 1535–1552.

Pérez, A. 2017. Evaluación de modelos para estimar evaporación en cuerpos de agua: Caso de estudio Laguna del Laja. Proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción. 51 pp.

Sierra, R., and G. S. Henderson. 2004. Airborne thermal infrared remote sensing of stream and riparian temperature. Nicola Rievr, British Columbia. Journal of Environmental Hydrology. Vol 12.

Tcherepanov, E. N., V. A. Zlotnik, and G. M. Henebry. 2005. Using Landsat themal imagery and GIS for identification of groundwater discharge into shallow groundwater lakes. International Journal of Remote Sensing. Vol 26(17). September 2005. pages 3649-3661.

Vicki O., and D. G. Anderson. 2005. Evaluation of Stream Temperature Regimes for Juvenile Coho Salmon in Redwood Creek Using Thermal Infrared. Technical Report/NPS/NRWRD/NRTR-2005/331. U. S. National Park Service.