



Universidad de Concepción

VOLCANISMO, AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL VALLE DE AGUAS CALIENTES

Rayén Rivera / José Luis Arumí / Ricardo Oyarzún / Mario Lillo
Ricardo Figueroa / Javier Mariángel



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Volcanismo, aguas subterráneas y servicios ecosistémicos
en el Valle de Aguas Calientes.

Rayén Rivera, José Luis Arumí, Ricardo Oyarzún, Mario Lillo

Ricardo Figueroa y Javier Mariángel.

Agosto 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

VOLCANISMO, AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL VALLE DE AGUAS CALIENTES

Rayén Rivera / José Luis Arumí / Ricardo Oyarzún / Mario Lillo
Ricardo Figueroa / Javier Mariángel

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Rayén Rivera

Geóloga.
Estudiante del programa de
Doctorado en Ciencias Ambientales
con mención en Sistemas Acuáticos
Continetales,
Universidad de Concepción.
Personal de apoyo CRHIAM.



José Luis Arumí

Ingeniero Civil.
Doctor of Philosophy.
Major on Engineering.
Profesor Titular Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



Ricardo Oyarzún

PhD en Engineering Science.
Washington State University, USA.
Profesor Titular
Departamento de Ingeniería de Minas,
Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena.
Investigador Asociado CRHIAM.



Mario Lillo

Doctor en Informática.
Universidad Politécnica de Madrid.
Profesor Titular de la
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Asociado CRHIAM.



Ricardo Figueroa

Profesor de Biología.
Doctor en Ciencias Biológicas,
Universidad de Málaga.
Profesor Asociado,
Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Investigador Asociado CRHIAM.

**Javier Mariángel**

Ingeniero Civil Agrícola.
Diseñador de obras civiles de riego.
Monitor NDR (No Deje Rastro, NOLS PATAGONIA)
Montañista.

RESUMEN

El Valle de Aguas Calientes, ubicado en la cordillera andina de la Región de Ñuble, es una zona de gran interés geológico, turístico-recreativo y ecológico, debido a la interacción entre el vulcanismo y las aguas subterráneas, y que generan importantes servicios ecosistémicos en la zona. Emplazado en la ladera sur del Complejo Volcánico Nevados de Chillán y a 80 Km de la ciudad de Chillán, este valle es famoso por sus vertientes termales que alcanzan temperaturas de hasta 80°C. Está formado por 13 estratovolcanes alineados en sentido Noroeste-Sureste, los cuales se encuentran agrupados en dos subcomplejos: 1) Cerro Blanco, sin actividad volcánica reciente y cubierto por el glaciar Cerro Blanco, y 2) Las Termas, con importante actividad volcánica, fumarolas y aguas termales asociadas, ampliamente utilizadas con fines turísticos. Además, el complejo volcánico posee muchas vertientes frías y termales distribuidas a lo largo de su perímetro, las cuales se asocian a la presencia de fracturas y fallas geológicas que permiten la circulación de aguas lluvia y de deshielo dando origen al Río Diguillín, uno de los principales afluentes del Río Itata.

INTRODUCCIÓN

El Valle de Aguas Calientes, ubicado en la cordillera andina de la Región de Ñuble, es una zona de gran interés geológico y ecológico debido a la presencia de vulcanismo y aguas subterráneas que se relacionan con potenciales servicios ecosistémicos de la zona. Emplazado en la ladera sur del Complejo Volcánico Nevados de Chillán (Figura 1), y a 80 km de la ciudad de Chillán (Figura 2), el Valle de Aguas Calientes con sus 90 ha de praderas, se caracteriza por ser una zona turística, a la cual se accede mediante trekking o cabalgata de aproximadamente 4 horas de ascenso, hasta llegar a un sector donde afloran grandes vertientes de agua termal, alcanzando temperaturas de hasta 80° C, de ahí su nombre. Estas vertientes dan origen al río Diguillín, el cual recorre aproximadamente 100 km desde la cordillera hasta la depresión intermedia, formando una de las subcuencas de la hoya hidrográfica del Itata.

Al encontrarse colindante al Volcán Chillán, los suelos del valle consisten principalmente en cenizas y piroclastos que han contribuido a la formación de suelos arenosos ricos en compuestos minerales. En gran parte del área

predominan praderas que son utilizadas como veranadas, sin embargo, existen zonas donde no se encuentra vegetación debido a que los suelos presentan altas concentraciones de sulfatos, del orden de 200 a 2000 mg/kg (Mariángel, 2013).



Figura 1.

Vista panorámica del Complejo Volcánico Nevados de Chillán desde el Valle de Las Trancas. Fuente: Elaboración propia.

En relación con la hidrología del sector, el Valle constituye la cabecera de cuenca del río Diguillín, y es una importante zona de recarga de los acuíferos del sector debido a la presencia de fallas y fracturas geológicas. Por otro lado, el Valle de Aguas Calientes se encuentra dentro de la Reserva de la Biósfera Corredor Biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja (Figura 2), declarada como tal en el año 2011 por la UNESCO. Los principales objetos de conservación de la reserva son el huemul (*Hippocamelus bisulcus*), el puma (*Puma concolor*), el gato colocolo (*Leopardus colocolo*), la güiña (*Leopardus guigna*), el lagarto matuasto del Laja (*Phymaturus vociferator*) y lagartija de Hernán Nuñez (*Lialaemus hernannunezi*). Con relación a la flora, en el área de Nevados de Chillán se identifican al menos siete tipos de comunidades vegetales según Gajardo (1994, en San Martín, 2014). Asimismo, se resalta la confluencia de dos ecosistemas amenazados, al formar parte de la transición vegetacional entre el bosque esclerófilo de la zona central y el bosque templado del sur (San Martín, 2014).

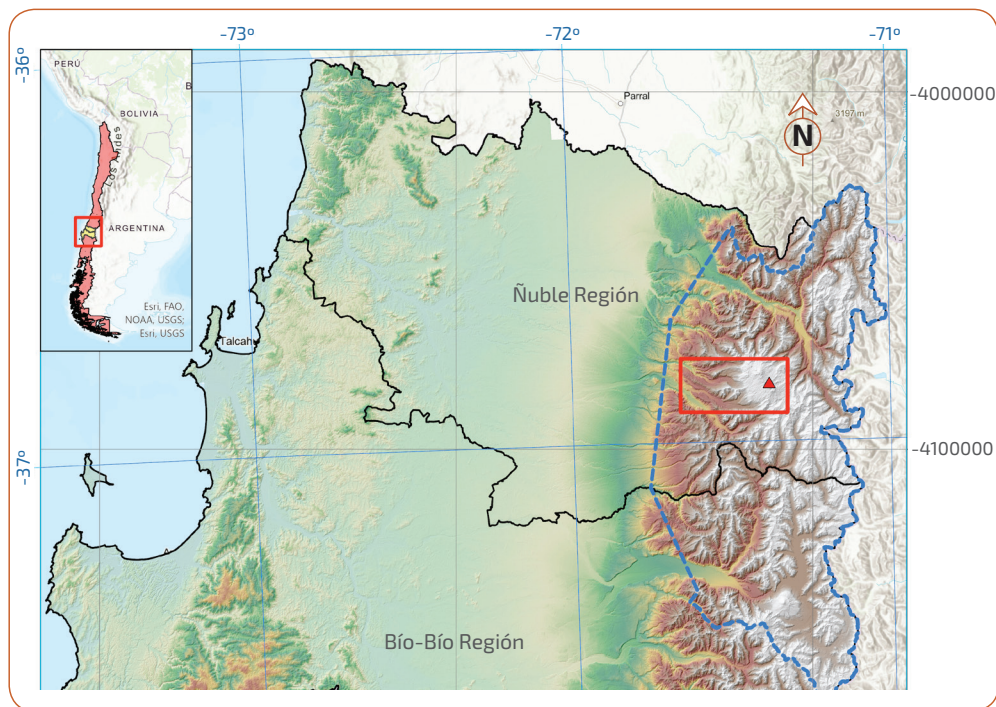


Figura 2.

Ubicación del Valle de Aguas Calientes (representado por un triángulo rojo). La línea azul representa el contorno de la Reserva de la Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja. Fuente: Rivera & Tassara, (2023).

GEOLOGÍA Y VULCANOLOGÍA

La historia evolutiva del paisaje que da lugar al Valle de Aguas Calientes, tiene estrecha relación con los procesos asociados al Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh), formado por 13 estratovolcanes (tipo de volcán cónico que se forma por la acumulación de capas alternantes de lava y ceniza volcánica depositadas a lo largo de sucesivas erupciones) alineados en sentido Noroeste-Sureste (Naranjo *et al.*, 2008), que actualmente se encuentran agrupados en dos subcomplejos: el Subcomplejo Cerro Blanco en el noroeste, y el Subcomplejo Las Termas, en el sureste (Figura 3).

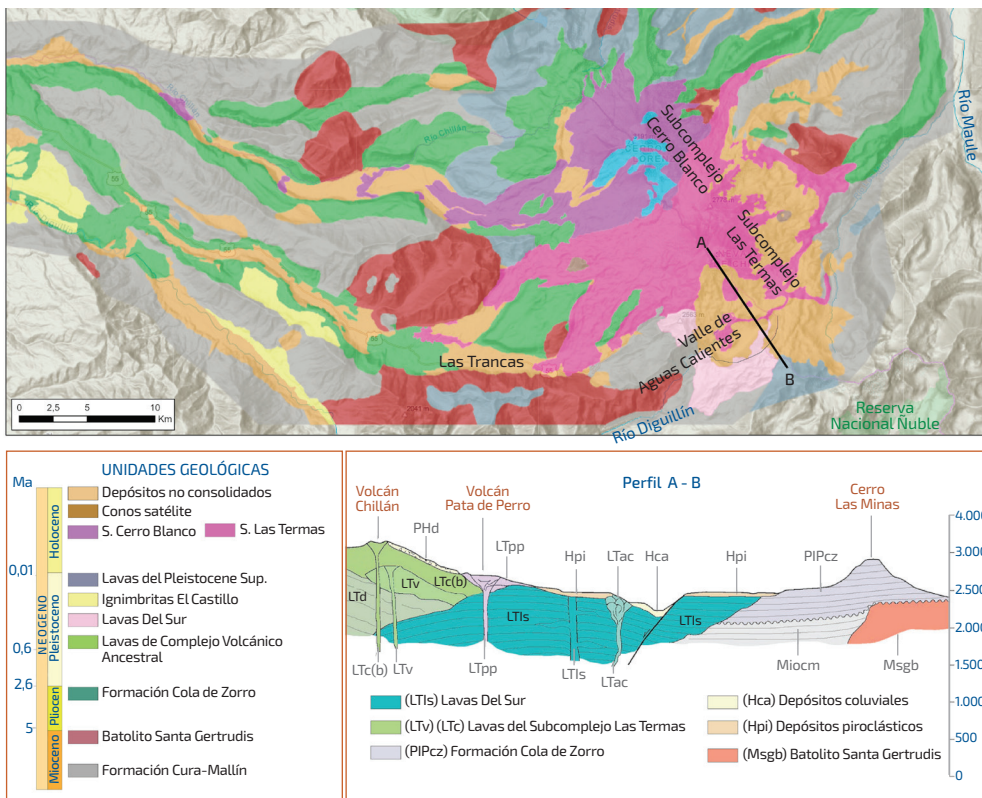


Figura 3.

Mapa y perfil geológico del Valle de Aguas Calientes. Fuente: Basado en la carta geológica de Naranjo *et al.*, (2008).

El CVNCh tiene una historia de ~650 mil años (Dixon, 1999), que comienza con un vulcanismo de tipo subglacial, es decir, la lava se emplazó por los bordes de un valle cubierto de hielo durante un periodo de grandes glaciaciones a nivel global. El rápido enfriamiento del material volcánico en contacto con las paredes del glaciar, que bajaba desde la cordillera por el Valle de Las Trancas, le otorgó a estas "lavas ancestrales" (Naranjo *et al.*, 2008) características morfológicas distinguibles, y tipos de fracturamiento de tipo columnar (Figura 4).



Figura 4.

Lavas del “Complejo Volcánico Ancestral” con fracturas (diaclasas) columnares por su enfriamiento en contacto con el hielo. Valle de Las Trancas.

Fuente: Rayén Rivera, (2014).

En su evolución postglaciar, hace ~40 mil años, el sistema volcánico comenzó a evolucionar de manera distinta en el sector norte y sur, formando los dos subcomplejos que se identifican actualmente. El subcomplejo Cerro Blanco (sector norte) incluye los volcanes Santa Gertrudis, Gato, Cerro Blanco (donde se encuentra el relicto del glaciar homónimo, y la cima más alta con 3.212 msnm), Calfú, Pichicalfú, y Baños. La erupción del volcán Santa Gertrudis (1861 - 1865) es la actividad más reciente registrada en este sector. Por su parte, el subcomplejo Las Termas (sector sur), ha presentado intensa actividad volcánica en el último siglo, y lo componen centros eruptivos relativamente antiguos como los volcanes Democrático, Chillán, Pata de Perro, Viejo, y volcanes que fueron formados por erupciones que podemos fechar en base al registro histórico, como los volcanes Nuevo (1906 - 1948), Arrau (1973 - 1986), Chudcún (2003), San Sebastián (2008) y Nicanor (2016).

Cabe destacar que en el sector Cerro Blanco no se han encontrado vertientes termales, mientras que el sector Las Termas es reconocido (e incluso explotado turísticamente) por la presencia de ellas, cuyo origen se asocia a la interacción entre las aguas subterráneas y el volcanismo actual (Figura 5).

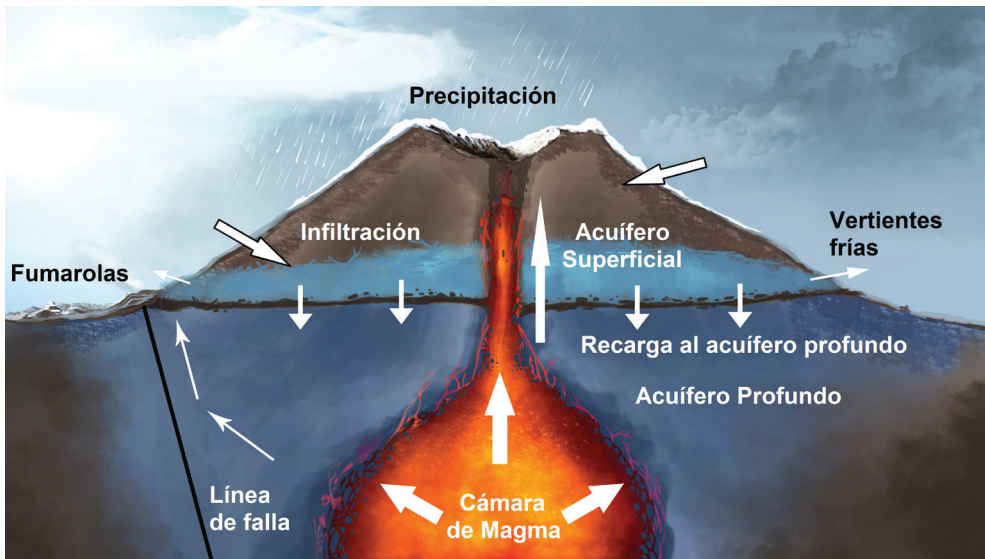


Figura 5.

Esquema conceptual del probable sistema acuífero existente en el volcán Chillán. Fuente: Adaptado de Peiffer *et al.*, (2011).

El Valle de Aguas Calientes corresponde a una cuenca de origen volcánico, limitada al sureste por escarpe arqueado de cara a los volcanes (Figura 6). Algunos autores como Dixon *et al.*, (1999) postulan que este escarpe representa el remanente de una caldera que habría colapsado hace ~40 mil años, tras una erupción muy explosiva que la habría generado.

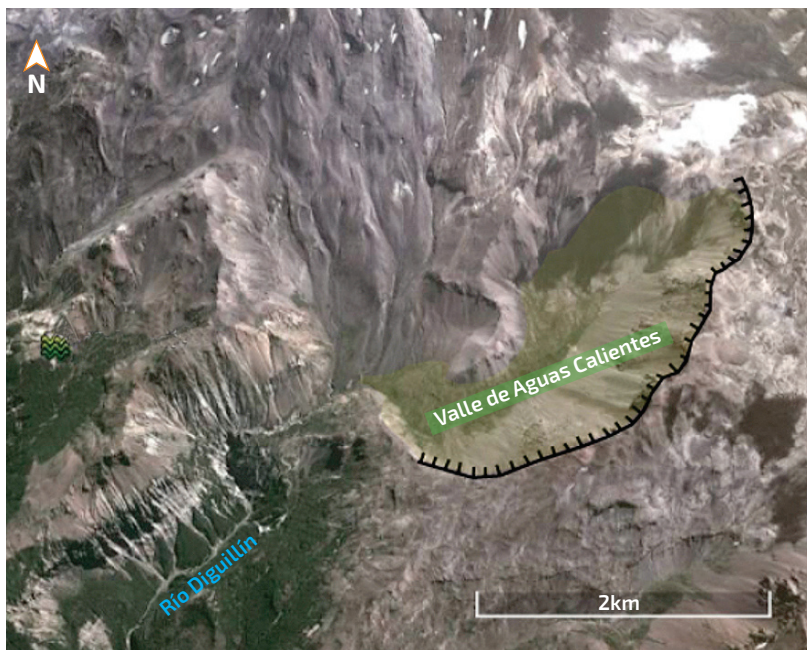


Figura 6.

Morfología del Valle de Aguas Calientes, limitado al sureste por una posible antigua caldera volcánica. Fuente: Google Earth Pro.

HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

El complejo volcánico Nevados de Chillán posee muchas vertientes frías distribuidas a lo largo de su perímetro, y una concentración de vertientes termales en su ladera sur, por lo que es razonable suponer que se comporta en la forma de un sistema acuífero similar a los descritos por Gmati *et al.*, (2011) y Peiffer *et al.*, (2011). Es decir, con un acuífero superficial que recibe recarga por infiltración de aguas lluvias y derretimiento de nieve, y que a su vez recarga a un acuífero más profundo que está en contacto con la cámara magmática del volcán. Esto calienta el agua, produciendo vapor que escapa por fracturas y fallas geológicas, que a su vez originan las vertientes de agua caliente (Arumí, 2014), como se observa en la Figura 5.

El Valle de Aguas Calientes constituye la cabecera de cuenca del río Diguillín, la cual es de régimen hidrológico mixto, ya que su caudal presenta valores altos, tanto como consecuencia de las precipitaciones del invierno como por el deshielo en primavera e inicio del verano. La precipitación media anual sobre la cuenca es de 1.875 mm, mientras que la temperatura media mensual del aire en la cuenca es de 12,4°C con un rango entre 6°C en invierno a 20°C en verano (Morales, 2014).

Debido a la ubicación de la cuenca, presenta alta variabilidad temporal con respecto a las características hidro-meteorológicas, donde el efecto orográfico produce un incremento de las precipitaciones. Esto, sumado a la presencia de depósitos fluvioglaciales, lavas altamente fracturadas y fallas geológicas, hace que este Valle sea una importante zona de recarga de acuíferos (Zúñiga, 2012).

La disponibilidad de agua en los ríos y esteros de la zona central de Chile durante los meses de estiaje (que corresponden al final del verano y principios de otoño, es decir, desde mediados de enero a mediados de abril), está controlada por el tipo y dinámica de los procesos hidrológicos que en ella ocurren, que se han visto disminuídos en los últimos ~13 años producto de la mega sequía (Alvarez-Garretón *et al.*, 2021). Por lo tanto, la disponibilidad de agua durante la temporada de estiaje depende de los procesos de almacenamiento que ocurren en la cuenca, por lo cual es relevante comprender cómo se libera a lo largo de la temporada.

En este sentido, es crucial el desarrollo de investigaciones que se enfoquen en estudiar los procesos de aguas subterráneas que alimentan a los manantiales responsables de mantener el flujo base. En la cuenca del río Diguillín, los resultados del trabajo de Morales (2014) muestran que el comportamiento del volumen de agua subterránea no se ve influido por las precipitaciones (Figura 7). Los caudales del río, principalmente los del período seco, explican mejor el comportamiento del volumen de agua subterránea debido a los deshielos que los recarga.

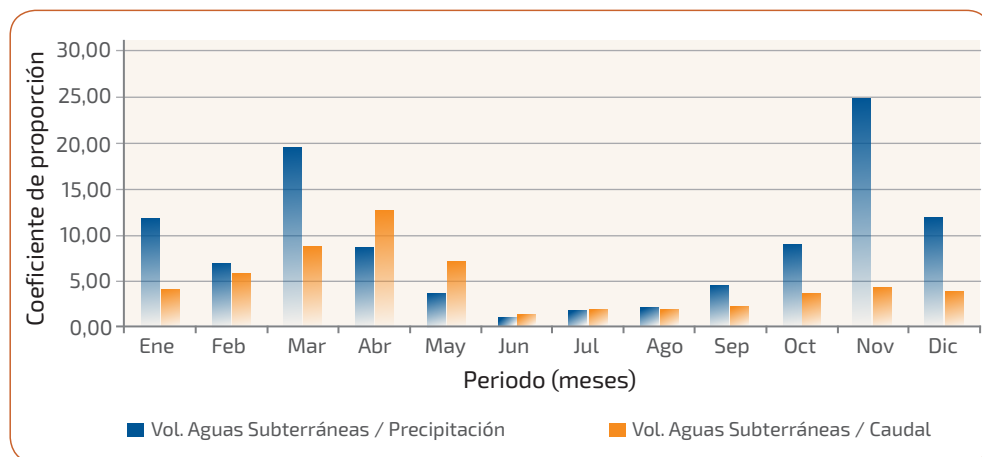


Figura 7.

Coefficiente de proporción de las reservas o volumen de agua subterránea a nivel mensual respecto a la precipitación y al caudal para la subcuenca San Lorenzo (Alto Diguillín). Fuente: Morales, (2014).

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS ASOCIADOS AL VALLE AGUAS CALIENTES

Los servicios ecosistémicos son todos aquellos bienes y servicios generados por la estructura y procesos de un ecosistema, y que satisfacen de manera directa o indirecta distintas necesidades humanas (MEA, 2005). Son constituyentes fundamentales del bienestar humano (De Groot *et al.*, 2002), que surgen de la interacción de procesos bióticos y abióticos (Haines-Young & Potschin, 2010). Su estudio es importante ya que busca equilibrar los sistemas socio-ecológicos, conservar su biodiversidad y hábitats para mantener una productividad sostenible a lo largo del tiempo, representando una aproximación real y medible de la sustentabilidad.

En Chile, el concepto fue difuso y se utilizó indistintamente como bienes o beneficios ambientales, servicios ambientales, bienes ambientales, etc., paralelamente se multiplicaron iniciativas privadas para la conservación de la biodiversidad y entre estas, las áreas silvestres protegidas (Sepúlveda y Villarroel, 2006). Pero fue con el impulso de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EMA, 2001 - 2005) que surgieron iniciativas relevantes como el

grupo FORECOS (Forest Ecosystem Services, grupo de investigación de la Universidad Austral de Chile), principalmente con énfasis en los servicios que proveen los bosques nativos como reguladores de la calidad y cantidad de agua, en distintas escalas espaciales y temporales en la ecorregión de los bosques valdivianos.

También CORFO financió el Instituto Forestal (INFOR) para investigar la producción de agua, mientras se realizaba "Evaluación Ecosistémica del Milenio: bienestar humano y manejo sustentable en San Pedro de Atacama – Chile" (RIDES, 2005), que junto a otras iniciativas y producción científica (ej. Oyarzun *et al.*, 2005; Nahuelhual *et al.*, 2007; De la Barrera *et al.*, 2015, entre otras) relevan la importancia de los diversos servicios ecosistémicos que generan los espacios naturales como los que ofrece el Valle de Aguas Calientes, e impulsan el interés público para la conservación de la biodiversidad, especialmente cuando no existe ningún tipo de manejo para su preservación.

Durante largos periodos de tiempo, en las cercanías del Valle de Aguas Calientes han ocurrido eventos de tipo volcánicos, arrastre de material sedimentado provocados por el derretimiento de nieve, lluvias torrenciales que drenan a la parte plana del valle enterrando parte de la pradera, proceso de pedogénesis que regula la formación de suelos con características granulométricas y mineralógicas que permiten el crecimiento de verdes praderas (Figura 8), las cuales sirven de alimento a los bovinos que son llevados al Valle en la temporada estival, generando importantes servicios de provisión de carne y leche para consumo de subsistencia y venta local, siendo también un servicio cultural al mantener la tradiciones locales.

Las condiciones climáticas que dominan la cordillera de los Andes, más las condiciones térmicas que genera el Valle de Aguas calientes, permiten que las praderas perduren inclusive en invierno. Mientras que las condiciones producidas por la energía geotérmica (asociada al vulcanismo) permite el derretimiento de la nieve acumulada en el Valle, de manera que la temporada de "veranadas" comienza tempranamente (Figura 9). De este modo, el ganado es llevado a pastar al valle desde el mes de noviembre para terminar en el mes de marzo, antes de que comiencen las primeras nevadas de la temporada.



Figura 8.

Suelos formados en la parte plana del valle.
Fuente: Javier Mariángel, (2013).



Figura 9.

Veranadas en el Valle de Aguas Calientes
Fuente: Javier Mariángel, (2013).

Asimismo, el Valle de Aguas Calientes está fuertemente controlado por fallas y fracturas, lo cual genera interacciones entre el suelo, el agua y las rocas. El agua surge a la superficie en forma de vertientes geotermales aportando agua constante durante todo el año (Figura 10) y constituyen la cabecera de cuenca del río Diguillín, entregando el abastecimiento de agua río abajo, hacia la Reserva Ñuble y posteriormente todos los predios colindantes. El complejo turístico Termas de Chillán adquiere su recurso hídrico directamente del Valle de Agua Calientes, entubando algunas de sus vertientes para el abastecimiento y consumo de agua de sus instalaciones como hoteles, cabañas, centros de esquí, garantizando todo el año la disponibilidad de agua. La baja presión antrópica sobre los suelos y los servicios de regulación asociados a procesos de biológicos y oxigenación del agua, permiten un agua de calidad apta para el consumo humano (Mariángel, 2013).



Figura 10.

Vertiente de agua geotermal producida por las fallas geológicas.
Fuente: Javier Mariángel, (2013).

El complejo volcánico Nevados de Chillán es conocido internacional y nacionalmente por poseer diversos recursos naturales para el desarrollo del turismo, actividades deportivas, ser apto para la recreación y el goce de la naturaleza. El Valle de Aguas Calientes es habitualmente visitado por turistas que gustan disfrutar de un trekking con alto valor paisajístico, o solici-

tan diversos servicios a empresas de turismo que ofrecen cabalgatas con el propósito de disfrutar del paisaje o transporte a sitios de aguas termales.

Otro atractivo interesante es la formación de cuevas de nieve que nacen por el vapor que surge de las vertientes geotermales, las cuales son visitadas en épocas de invierno-primavera, para lo cual se necesita de equipamiento de alta montaña y guías especializados por el difícil acceso en esa temporada.

También, desde el punto de vista cultural, el Valle de Aguas Calientes fue definido como un importante sitio de interés geológico (geositio) del sector (Rivera & Tassara, 2023), destacando por su valor científico (hidrogeológico, volcanológico y geomorfológico). Además, este sitio sobresale por estar cerca de cerros colindantes como el volcán Chillán (Figura 11) y cerro las Minas, siendo un lugar idóneo para montar campamentos y proceder a la ascensión de los macizos.

Los atractivos naturales son apreciados por los turistas, montañistas y arrieros, siendo el verano la época más concurrida. Estos servicios culturales han permitido un alto desarrollo turístico económico y social en el lugar.



Figura 11.

Volcán Chillán desde el Valle de Aguas Calientes.
Fuente: Javier Mariángel, (2013).

CONCLUSIONES

Por el hecho de estar ubicado a los pies del Complejo Volcánico Chillán, el Valle de Aguas Calientes posee características geológicas y geomorfológicas controladas por la interacción entre el volcanismo y las aguas subterráneas. Los suelos de este valle presentan texturas arenosas, abundan los depósitos piroclásticos y las lavas están fuertemente fracturadas. La presencia de actividad termal de origen volcánico en el Valle de Aguas Calientes permite asegurar la existencia de recursos hídricos, geotérmicos constante durante todo el año. Estas condiciones generan que el Valle de Aguas Calientes proporcione a la sociedad, diversos y sinérgicos servicios ecosistémicos que interactúan para beneficio y uso de la comunidad.

Sin embargo, en la actualidad no existe una regulación en el uso del suelo y otros recursos existentes en el valle, con una creciente industria turística carente de una adecuada planificación, que permita potenciar esta actividad en un marco de desarrollo sustentable, que propicie la adecuada interacción entre los diversos servicios ecosistémicos de regulación, provisión y culturales que actualmente provee y que son parte de la identidad local y regional.

REFERENCIAS

- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. 2021. Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 429-446 pp. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Arumí, J. L., Oyarzún, R., Muñoz, E., Rivera, D., & Aguirre, E. 2014. Caracterización de dos grupos de manantiales en el río Diguillín. *Tecnología y ciencias del agua*, 5 (6).
- Dixon, H. M., M., Sparks, S., Chavez, R., Naranjo, J., Dunkley, P., Young, S., Gilbert, J., Pringle, M. 1999. Geología del Volcán Nevados de Chillán. *Rev. geol. Chile*, 26. <https://doi.org/10.4067/S0716-02081999000200006>
- Gmati, S., Tase, N., Tsujimura, M., & Tosaki, Y. 2011. Aquifers Interaction in the Southwestern Foot of Mt. Fuji, Japan, Examined through Hydrochemistry and Statistical Analyses. *Hydrological Research Letters*, 5, 58-63 pp. <https://doi.org/10.3178/hrl.5.58>
- Haines-Young, R., & Potschin, M. 2010. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Ecosystem Ecology: a new synthesis*, 1, 110-139 pp.
- Mariángel, J. 2013. Caracterización Del Valle De Aguas Calientes e Identificación de sus Servicios Ecosistémicos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción. 50 pp.
- Morales, C. 2014. Determinación del comportamiento del flujo base y su relación con variables de estado hidrológicas en la cuenca del río Diguillín, Región del BíoBío, Chile, Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Nahuelhual, L., Donoso, P., Lara, A., Núñez, D., Oyarzún, C. & Neira, E. 2007. Valuing ecosystem services of Chilean temperate rainforests. *Environment, Development and Sustainability*, 9, 481-499 pp.
- Naranjo J.A., G. J. y. S. R. 2008. Geología del complejo volcánico Nevados de Chillán, Región del BíoBío. Carta Geológica de Chile, *Serie Geología Básica* 114, 28 pp.

- Oyarzún, C., Nahuelhual, L. & Núñez, D. 2005. Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 20(3)-21(1), 88-95 pp.
- Peiffer, L., Taran, Y. A., Lounejeva, E., Solís-Pichardo, G., Rouwet, D., & Bernard-Romero, R. A. 2011. Tracing thermal aquifers of El Chichón volcano-hydrothermal system (México) with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Ca/Sr and REE. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 205(3), 55-66 pp. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.004>
- RIDES. 2005. Evaluación Ecosistémica del Milenio: Bienestar Humano y Manejo Sustentable en San Pedro de Atacama-Chile. Santiago.
- Rivera, R., & Tassara, A. 2023. Geo-Circuit for Interpretation of the Geological Evolution in the Nevados de Chillán Volcanic Complex, Chile. *Geoheritage*, 15(2). <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00832-x>
- San Martín, P. 2014. Reserva de la Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán – Laguna del Laja: de la amenaza de la extinción al desarrollo sustentable. En: A Moreira-Muñoz & A Borsdorf (eds) Reservas de la Biosfera de Chile: Laboratorios para la Sustentabilidad. Academia de Ciencias Austriaca, Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Santiago, *serie Geolibros* 17, 146-160 pp.
- Sepúlveda, C. & Villarroel, P. 2006. Servicios ecosistémicos y financiamiento de la conservación privada en Chile. *Ambiente y Desarrollo (Chile)* 22, 12-20 pp.
- Zúñiga, R. M., E., Arumi, J.L. (2012). Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y Proyectos*, 11, 69-78 pp.



Universidad de Concepción

VOLCANISMO, AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL VALLE DE AGUAS CALIENTES



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015

Serie Comunicacional CRHIAM