

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS PRELIMINAR DEL CONTROL ESTRUCTURAL EN LA
HIDROGEOLOGÍA DE ZONAS RURALES DE SECANO DE MEDIA MONTAÑA EN
LA REGIÓN DE COQUIMBO.**

RICARDO OYARZÚN L.¹
JORGE OYARZUN M.²
JOSE L. ARUMI R.³
JORGE NUÑEZ C.⁴
HUGO MATURANA C.⁵
NORA GOMEZ⁶
JERRY P. FAIRLEY⁷

RESUMEN

El estudio y conocimiento de los procesos hidrológicos en zonas de secano de media montaña es relativamente limitado, tanto a nivel internacional como en particular en Chile, especialmente en la zona centro-norte del país. Esto, a pesar que en muchas zonas rurales las aguas subterráneas representan la única fuente “confiable y permanente” de abastecimiento de agua para consumo humano o actividades agrícolas o mineras.

Esta contribución presenta, en primer lugar, una descripción conceptual general de la hidrología en zonas áridas y semiáridas de media montaña, y sigue con un análisis prospectivo preliminar para la región de Coquimbo, tomando como base de análisis el registro de pozos y vertientes existentes en el área de estudio. A través de análisis gráficos, estadísticos y geoestadísticos simples se infiere el probable control geológico-estructural existente.

¹ Profesor Asociado, Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena / CEAZA – royarzun@userena.cl

² Profesor Titular, Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena – joyarzun@userena.cl

³ Profesor Titular, Depto. de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción / CRHIAM – jarumi@udec.cl

⁴ Profesor Asistente, Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena / CAZALAC – jhnunez@userena.cl

⁵ Profesor Titular, Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena – hmaturan@userena.cl

⁶ Alumna memorista Ingeniería Civil Ambiental, Universidad de La Serena – noni.1208@gmail.com

⁷ Profesor Titular, Depto. de Ciencias Geológicas, Universidad de Idaho – jfairley@uidaho.edu

Entonces Moisés le pidió ayuda a Dios, y le dijo:

-¿Qué voy a hacer con esta gente? ¡Poco les falta para matarme a pedradas!

Dios le contestó:

-Quiero que lleves a los israelitas hasta la montaña de Horeb. Allí estaré esperándote, sobre la roca. Tú adelántate, y llévate a algunos de los jefes del pueblo. Llévate también la vara con la que convertiste en sangre el agua del río Nilo. Cuando llegues allá, golpea la roca con la vara. Así saldrá agua de la roca, y todos podrán beber.

(Exodo, Capítulo 17)

1.- CONTEXTO GENERAL

Las zonas áridas y semiáridas, es decir aquellas regiones donde la evapotranspiración potencial excede la precipitación (ambas variables consideradas en forma anual) cubren más del 30% de la superficie terrestre (Scanlon et al., 2006). Estas zonas se encuentran típicamente en ambos hemisferios entre las latitudes 15-35 °, y por lo tanto, reciben una radiación solar favorable para las actividades agrícolas (Herczeg y Leaney, 2011). Sin embargo, sus recursos hídricos son, por definición, escasos, y enfrentan una creciente demanda a nivel mundial y nacional. Más aún, elementos como la variabilidad o cambio climático pueden representar un factor de estrés adicional en dichas áreas (CONAMA, 2006; Núñez et al., 2013), una situación que ya está ocurriendo desde hace varios años en varias cuencas en Chile, especialmente en la zona Centro-Norte del país (Oyarzún et al., 2014a,b).



Figura 1. Noticia Diario El Dia (La Serena), 14 de Marzo 2006.

Junto con la importancia de las zonas áridas y semiáridas, las zonas de montaña, es decir las áreas de altitud mayor a 1000 msnm, más aquellas ubicadas entre 200 y 1000 msnm con pendientes mayores a 20‰, comprenden más de un 39% de la superficie global continental (excluyendo Antártica y Groenlandia) (Viviroli et al., 2007), y tienen por lo tanto, una clara relevancia a nivel mundial, tanto en términos económicos como ambientales y sociales.

En este contexto, el disponer de un sólido entendimiento de los procesos hidrológicos en zonas montañosas de regiones áridas y semiáridas es un requisito esencial para el desarrollo de estrategias modernas de gestión integrada de recursos hídricos para hacer frente a los problemas

de escasez propios de dichas regiones (Voeckler y Allen, 2012). Específicamente, en relación a los recursos de agua subterránea, la cual suele ser en zonas áridas y semiáridas la única fuente “confiable y permanente” de agua (Herczeg y Leaney, 2011), su evaluación es especialmente difícil, en particular en zonas extensas y/o remotas, dados los costos asociados a tales proyectos. Así, el costo y complejidad de las investigaciones, especialmente a nivel de cuenca, se traduce en que, a pesar de su importancia, normalmente pocos estudios hidrogeológicos son llevados a cabo a dicha escala, especialmente en zonas rurales con baja densidad poblacional (Van Camp et al., 2013; Oyarzún et al., 2014a). Esto es especialmente efectivo en Chile en las “zonas de secano de media montaña”, es decir terrenos de pendientes moderadas a abruptas con elevaciones menores a 2000 msnm que dependen mayor o únicamente de la precipitación como fuente de agua.

El término “recarga del frente de montaña” (o Mountain Front Recharge, MFR, en inglés) comprende “todos los componentes de la recarga al acuífero de una cuenca que tienen su origen en las montañas aledañas”. Incluye lo que se conoce como (a) Recarga del Bloque de Montaña (o Mountain Block Recharge, MBR), es decir, los componentes subsuperficiales de MFR que conectan las partes altas de las cuencas con los acuíferos de las zonas bajas, así como (b) la infiltración desde cursos de agua perennes e efímeros que se encuentran cercanos a dichas montañas (Wilson y Guan, 2004; Magruder et al. 2009; Aishlin y McNamara, 2011; Carling et al. 2012) (Figura 2).

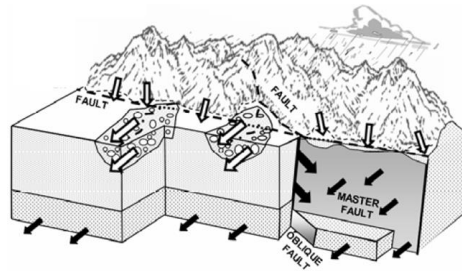


Figura 2. Diagrama que muestra los componentes de MFR: recarga cercana a la superficie (flechas blancas), recarga de mayor profundidad (flechas negras), así como el control estructural de rasgos geológicos como fallas sobre los patrones de flujo de aguas subterráneas (tomado de Wilson y Guan, 2004).

Tal como señalan Wilson y Guan (2004), “MFR es una componente importante, si no predominante, de recarga en regiones áridas y semiáridas, pero al mismo tiempo suele ser la menos conocida”. En efecto, a pesar de ser la recarga un componente clave en la comprensión y caracterización de cualquier sistema hidrogeológico, la contribución de aguas subterráneas desde las zonas de montañas hacia las zonas aluviales contiguas es difícil de caracterizar y de cuantificar, como consecuencia de factores como la heterogeneidad en las condiciones meteorológicas en la zona de montañas, la topografía, los patrones de vegetación, y las condiciones del suelo y del basamento rocoso (Carling et al. 2012). Además, el rol de este último en los balances hídricos no ha recibido históricamente mayor atención. En efecto, comúnmente éste era considerado simplemente como una capa impermeable, a pesar de reconocerse que las cuencas y zonas altas sí contribuyen agua a las zonas bajas y los acuíferos de zonas de valles (Aishlin y McNamara, 2011).

En el macizo rocoso, con baja conductividad en la matriz, es la red de fracturas, especialmente en zonas con mayor densidad de fracturas cerca de fallas, el factor principal en el flujo de agua. Por ello, un componente básico e importante en el estudio de los procesos de recarga, almacenamiento y conducción de agua en zonas de montaña se relaciona con la evaluación de la posibilidad de infiltración y flujo del agua. Por lo tanto, el control estructural ejercido por rasgos geológicos sobre el flujo del agua es relevante. En efecto, características como la abertura de las fracturas, la conectividad de fracturas y la densidad de fracturas son factores claves que determinan la capacidad del basamento rocoso de conducir agua, permitiendo la infiltración superficial del agua así como su almacenamiento subsuperficial (Voeckler y Allen, 2012). En particular, los llamados “lineamientos” o rasgos estructurales lineales (fallas, diaclasas y planos de contacto), son claves para entender la ocurrencia y flujo de aguas subterráneas, especialmente en sistemas montañosos con litologías ígneas y metamórficas de baja porosidad primaria (Sander, 2007). Estos lineamientos pueden ser útiles para inferir las trayectorias preferenciales de flujo de agua subterránea (Babiker y Gudmundsson, 2004; Tessema et al., 2012).

2. CASO DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

2.1. Antecedentes Generales y Estudios Previos

La Región de Coquimbo se localiza en el Centro-Norte de Chile, entre 29°-32°15' Lat. S y 69°45'-71° 45' Long. W. Se extiende sobre un área de ca. 40.700 km², con un clima árido a semiárido. Alrededor de un 65% de la superficie corresponde a terrenos con elevaciones menores a 2000 msnm, es decir, a zonas donde los procesos hidrológicos dependen fuertemente de la lluvia y donde la nieve no juega un rol de importancia. Además, más de 18145 km², ca. 45% de la superficie regional, presentan elevaciones entre 500 y 2000 m. Así, una extensa e importante superficie de la Región de Coquimbo corresponde a zonas rurales de secano de media montaña, las que han sido reconocidas como de importancia ambiental para la Región (CONAMA, s/a).

Desde el punto de vista geológico, la Región de Coquimbo se encuentra en un segmento del territorio donde predominan las condiciones tectónicas compresivas, lo que se traduce en la carencia de un valle central. La mayor parte de los macizos rocosos están conformados por gruesas secuencias volcánico-sedimentarias intruidas por rocas graníticas plutónicas. Además, como consecuencia del clima y del relieve, tanto la meteorización de las rocas como el desarrollo de los suelos son, en general, de reducida magnitud. Por lo tanto, la permeabilidad de las rocas es principalmente del tipo secundaria y relacionada con su fracturamiento. Si bien se han realizado algunos análisis estructurales de lineamientos basados en imágenes Landsat (ej. Tidy, 1985; Oyarzun et al., 2007), éstos han estado orientados a su relación con los yacimientos minerales y no a fines hidrogeológicos. Al respecto, los estudios hidrogeológicos en la Región de Coquimbo se han enfocado típicamente en las zonas de riego y en las partes bajas de los valles, es decir, en las estrechas zonas de rellenos aluviales asociadas a los principales ríos y tributarios (ej. SERPLAC-DGA-ONU-CORFO, 1979; Anacona, 2010). Así entonces, hay una falta de información confiable acerca de las extensas zonas de laderas de las zonas de secano adyacentes a los valles. Además, la relativamente escasa información disponible se ha derivado a partir de un limitado número de pruebas de bombeo y es, por lo tanto, sitio-específica. De esta forma, su extrapolación a áreas mayores, especialmente de terrenos en pendiente con suelos poco profundos y basamento rocoso fracturado, es compleja (Oyarzún et al., 2014a).

Con respecto a los pocos estudios llevados a cabo en zonas de secano de la Región de Coquimbo, se puede destacar el trabajo de CNR-Geofun (2003), el cual se enfocó en un diagnóstico y propuesta de alternativas de desarrollo para comunidades rurales de la zona, basado en un uso más eficiente de los recursos hídricos disponibles, tanto superficiales como subterráneos. Sin embargo, es reconocido en el propio estudio que la falta de información local y de registros sistemáticos dificulta una evaluación adecuada del potencial de agua subterránea en la zona de estudio, y que temas específicos de hidrogeología como la recarga no son abordados. Posteriormente, CIREN (2004) desarrolló un estudio orientado hacia la obtención de un modelo de exploración de aguas subterráneas en localidades rurales/comunidades agrícolas, en el área entre los ríos Elqui, Limarí y Choapa, sobre la base del procesamiento de imágenes satelitales, y siguiendo un enfoque más bien “tradicional”, es decir, que a partir de una serie de capas temáticas, índices integradores y procesamiento de la información en ambiente SIG, se buscó identificar zonas de mayor disponibilidad de aguas subterráneas. Sin embargo, el intento de validación posterior detectó algunos problemas, no siendo del todo exitosa la construcción de pozos en zonas seleccionadas. Así, aunque dicho trabajo entrega valiosa información para una zona relativamente extensa, existe cierto nivel de incertidumbre sobre los resultados presentados. El mismo año Luengo (2004) desarrolló un estudio hidrogeológico general y una simulación numérica usando Modflow para la microcuenca de la Rinconada de Punitaqui (30°21' S, 71°21' W) (Fig. 3), en la Provincia de Limarí, evaluando la importancia de los recursos hídricos existentes en las zonas de fracturas del macizo rocoso de dicha zona, así como analizando la posibilidad de aumentar la eficacia de su obtención. Finalmente en forma más reciente, Oyarzún et al. (2014a) determinaron propiedades hidrogeológicas (conductividad hidráulica, porosidad drenable) en 6 cuencas de zonas de media montaña (incluyendo la zona de Punitaqui) a partir del análisis de recesión de caudales superficiales.



Figura 3. Visión general en la zona de cabecera de la subcuenca del Estero Punitaqui, Provincia de Limarí (Oyarzún et al., 2014a)

En resumen, pese a la existencia de algunos esfuerzos de importancia que se han llevado a cabo para mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos en zonas rurales de secano de media montaña en ambientes áridos y semiáridos como la Región de Coquimbo, aun existen muchas interrogantes asociadas a la infiltración, recarga, existencia y flujo de aguas subterráneas en dichos ambientes. Esta situación motivó la formulación (y actual ejecución) del proyecto “A multi-approach assessment of "mountain block recharge" in rural, middle mountain rain-fed areas

of North Central Chile“, contexto en el cual se desarrolla la presente contribución. En particular ésta tiene como objetivo general realizar un análisis prospectivo inicial de la situación de las aguas subterráneas en las zonas rurales de secano de media montaña de la Región de Coquimbo.

2.2. Análisis Prospectivo

A diferencia del “enfoque tradicional” que consiste en establecer en base a diferentes coberturas espaciales (ej. geología, topografía, vegetación) un nivel de probabilidad de existencia de aguas subterráneas, la presente contribución adopta un enfoque “inverso”, tomando como elemento base del análisis la ubicación de fuentes conocidas de aguas subterráneas, tal como se presenta a continuación y analizando, en forma preliminar, las relaciones y atributos que se desprenden de ellos.

Para esto, la información base para el análisis desarrollado corresponde a la base de datos pública de derechos de aprovechamiento concedidos para la Región de Coquimbo de la DGA, obtenida de http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx. Esta comprende registros de 5972 derechos asociados a acuíferos como fuente de agua (pozos) y 57 a vertientes. Adicionalmente, esta base de datos fue complementada con un listado de 271 pozos construidos en el marco de un Programa de bombeo fotovoltaico de INDAP para pequeños agricultores (<http://www.minagri.gob.cl/wp-content/uploads/2013/08/5.-Apoyo-de-INDAP-a-ERNC.pdf>).

Sobre la base de este compilado inicial se obtuvo la cota superficial del terreno para cada pozo o vertiente (no disponible originalmente) a partir de <http://www.gpsvisualizer.com/elevation>. Posteriormente se procedió a eliminar de la base de datos todos aquellos pozos o vertientes que tuviesen problemas asociados a coordenadas o caudales mal registrados, así como aquellos ubicados por debajo de los 200 msnm y los existentes en zonas de riego y/o en las zonas de relleno aluvial asociadas a los principales ríos y esteros de la Región (Figura 4).



Figura 4. Ejemplos de identificación y descarte de pozos y/o vertientes por encontrarse en zonas de riego (Panel A, subcuenca del Estero Punitaqui) o en zonas de relleno aluvial de ríos o esteros (Panel B, Río Grande aguas abajo del embalse La Paloma)

Con esto, la base de datos considerada se redujo a 3822 registros, cuyo detalle se presenta en la Tabla 1 y su distribución espacial se muestra en la Fig. 5.

Tabla 1. Detalle de los pozos y vertientes comprendidos en la base de datos final.

Fuente	Tipo	Categoría (caudal)	Número de registros
DGA	Pozo	Menos a 1 l/s	2720
		De 1 a 10 l/s	766
		Mayor a 10 l/s	102
	Vertiente	Menor a 1 l/s	3
		De 1 a 10 l/s	13
INDAP	Pozo	Menor de 1 l/s	205
		De 1 a 10 l/s	13

En general resulta evidente que la mayor parte de las fuentes de agua (especialmente los pozos) representan una disponibilidad baja en forma individual, con caudales menores o en torno al litro por segundo, lo cual es esperable por la naturaleza del sistema y ubicación de las fuentes, es decir, por encontrarse en una zona semiárida a árida, de secano, de media montaña con basamento rocoso de baja porosidad primaria.



Figura 5. Distribución espacial de pozos y vertientes incluidos en la base de datos final (se incluye demarcación de la subcuenca del E. Punitaqui, línea rojo-oscuro en parte central de la imagen).

Así entonces, si bien los recursos hídricos existentes no serían aparentemente adecuados para actividades altamente demandantes de agua, sí representan un potencial recurso de valor para pequeños asentamientos rurales (especialmente micro y pequeños agricultores) que normalmente pueden desarrollar sus actividades con caudales bajos (Fig. 6). Un segundo aspecto de interés se refiere a la alta concentración de fuentes de aguas subterráneas (especialmente pozos) existentes en la zona de la subcuenca del Estero Punitaqui, en la Provincia de Limarí, lo cual confirma lo señalado por Luengo (2004) en relación al potencial hidrogeológico de dicha zona.



Figura 6. Ejemplo de asentamiento rural en Quebrada Santa Gracia, Provincia de Elqui

La distribución de frecuencias de la altura de los lugares de ubicación de las fuentes de agua se presenta en la Figura 7. Resulta interesante el que básicamente existen, en forma aparente, dos poblaciones (ambas sesgadas) con una mayor frecuencia de registros en torno a los 300 msnm (primer grupo) y en torno a los 800 msnm (segundo grupo), siendo la primera con mayor cantidad de fuentes. Esto podría interpretarse, en términos iniciales, como la existencia de dos principales niveles o zonas de mayor porosidad y conductividad en el macizo rocoso.

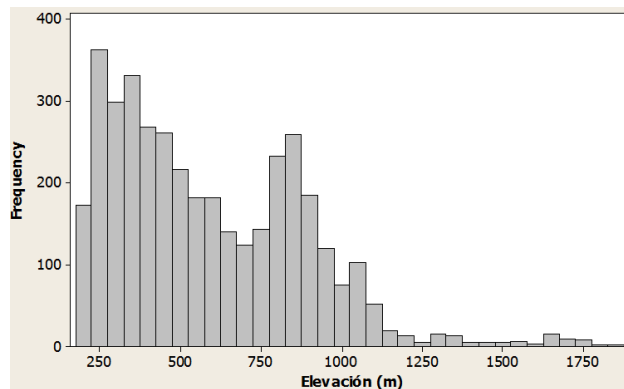


Figura 7. Histograma de frecuencia de ubicación de cotas de fuentes de agua.

La disposición de los pozos y vertientes fue importada en Surfer 7.0, lo que permitió desarrollar dos análisis adicionales. En primer lugar, se procedió a realizar en forma manual una identificación de rasgos lineales asociados a la distribución de pozos, lo que se muestra a modo de ejemplo para un sector en particular (parte de la subcuenca del E. Punitaqui) en la Fig. 8.

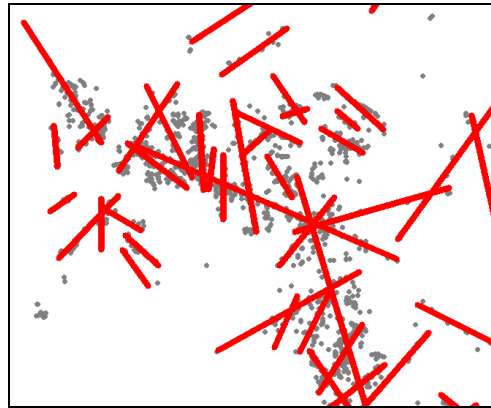


Figura 8. Rasgos lineales (segmentos rojos) identificados en función de la disposición de fuentes de agua, pozos y vertientes (círculos grises).

Este análisis permitió obtener un mapa inicial de atributos lineales asociados a la distribución de pozos para la Región de Coquimbo en las condiciones consideradas por el presente estudio (Fig. 9).

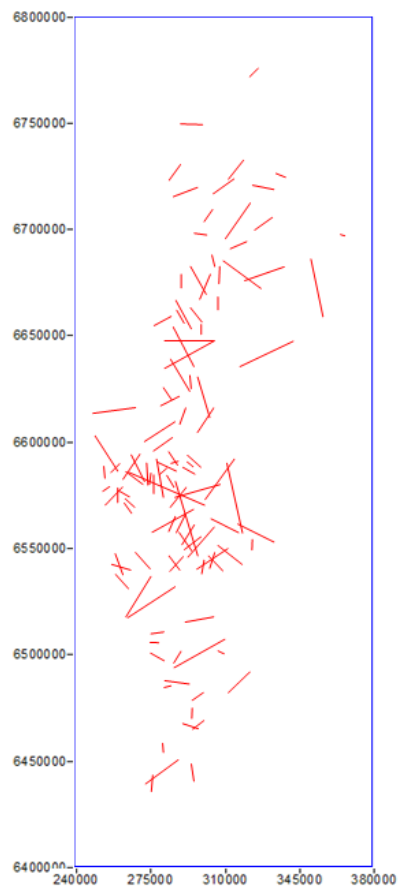


Figura 9. Distribución espacial en el área de estudios de atributos lineales asociados a la disposición de fuentes de aguas subterráneas.

En total, se identificaron 116 atributos lineales, cuya distribución de orientación es mayoritariamente en torno a los 45° y 135° tal como se muestra en la Figura 10.

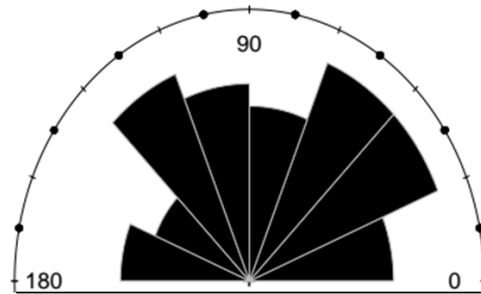


Figura 10. Diagrama de rosas de distribución de frecuencia de orientaciones de rasgos lineales asociados a la presencia de pozos y vertientes.

En otras palabras, se puede advertir un “orden” en la ubicación de los pozos. Si bien es cierto se puede inferir que van a existir pozos “cercaos a, o donde vive la gente”, también es cierto que en zonas rurales de secano la gente vive (se asienta) donde hay agua disponible. Así entonces, este “orden” en la distribución de pozos y vertientes se podría asociar a factores geológicos estructurales que favorecen la existencia de aguas subterráneas en fracturas y discontinuidades asociadas a dichas orientaciones principales.

El análisis previo considera sólo la distribución de las orientaciones de los rasgos lineales. Sin embargo, también resulta de interés el considerar la extensión de éstos. Así entonces y como complemento de lo anterior, se procedió a analizar la dependencia espacial de los pozos y vertientes considerando como variable de análisis el caudal nominal (derecho de aprovechamiento) de éstos. Dado que un análisis previo evidenció que los caudales tenían una distribución no normal fuertemente sesgada (Fig. 11), el análisis de dependencia espacial consideró el cálculo de los variogramas a partir de los logaritmos naturales de los caudales (buscando una “normalización” en la distribución de éstos), y los resultados se presentan en la Fig. 12 para el caso omnidireccional y en la Fig. 13 para los variogramas direccionales.

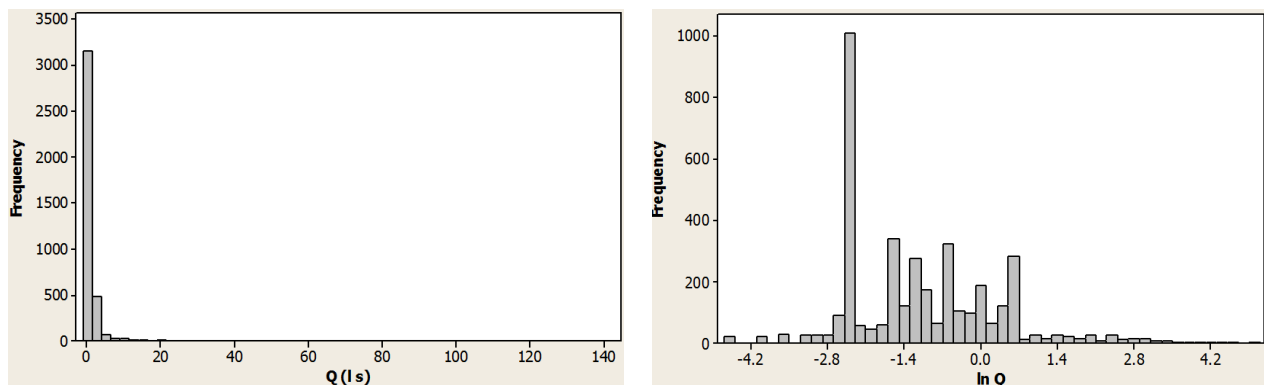


Figura 11. Histograma de frecuencias de pozos y vertientes según caudal (Izquierda) y logaritmo natural del caudal (Derecha)

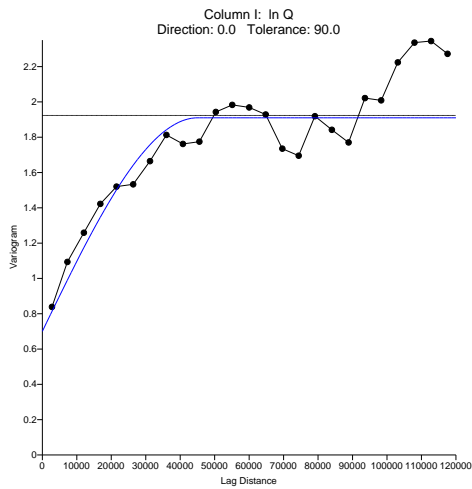
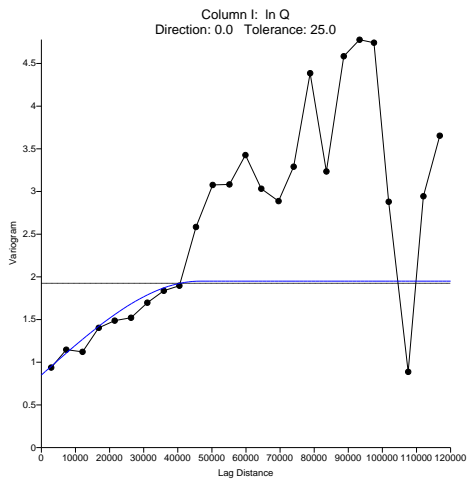
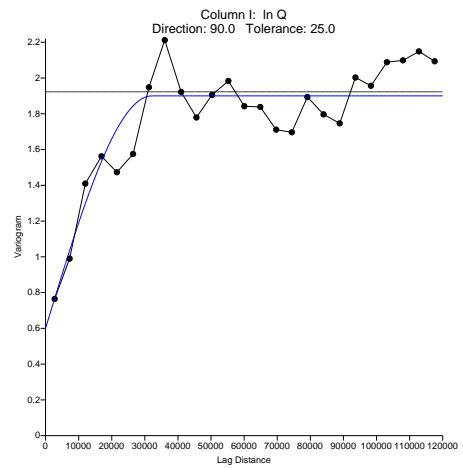


Figura 12. Variograma omni-direccional

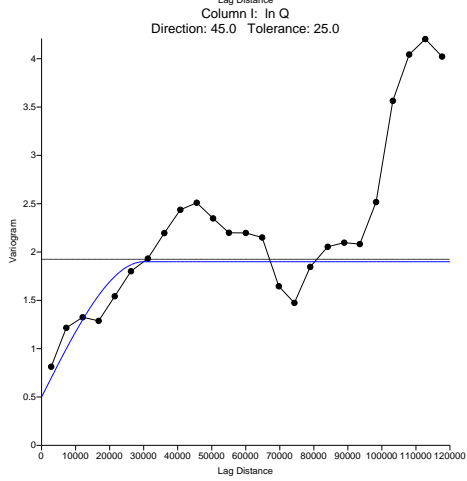
A



B



C



D

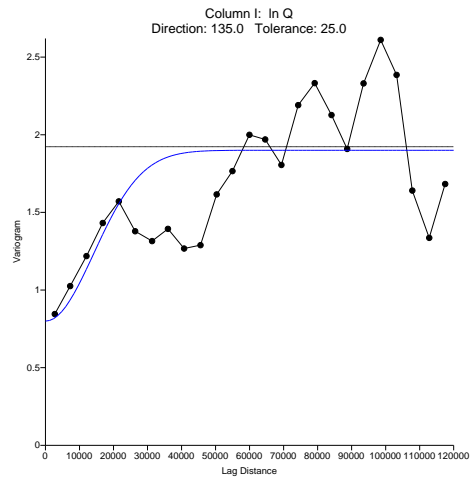


Figura 13. Variogramas direccionales. A: 0°; B: 90°; C: 45°; D: 135° (en todos se considera una tolerancia de +/- 25°)

En términos simples, se advierte una “estructura espacial” en la distribución de fuentes de agua subterránea, asociado a una elipse de anisotropía cuyo mayor eje (mayor dependencia espacial) se ubica en torno a los 135° con un rango del orden de 55 km, mientras que su eje menor (menor dependencia), con un rango de alrededor de 28 km, se presenta en torno a los 45°. Esto refuerza lo encontrado con respecto a la distribución de las orientaciones de los atributos lineales, en términos de que la ubicación de pozos y vertientes no es, al menos en términos aparentes, aleatoria, si no que existe un patrón de distribución que puede ser asociado a rasgos geológicos-estructurales. De hecho, las direcciones NW y NE constituyen orientaciones tectónicas principales en la Región de Coquimbo.

COMENTARIOS FINALES

Junto con una presentación conceptual simplificada del tema hidrogeológico en zonas áridas y semiáridas de media montaña, este trabajo presenta un estudio preliminar de relaciones hidrogeológicas y sus atributos espaciales en la zona de secano de la Región de Coquimbo entre 200 y 2000 msnm. Para ello, se ha tomado como base la información pública existente de pozos y vertientes en la zona de estudio.

A partir de inspección visual y junto con análisis estadísticos y geoestadísticos básicos, fue posible establecer patrones lineales asociados a la distribución de las fuentes de agua existentes (pozos y vertientes) y caracterizar su distribución espacial. Estos presentan rasgos que se pueden asociar a un control geológico-estructural, evidenciándose dos orientaciones preferentes: NW y NE. Este tipo de evidencia debiera ser entonces considerada, junto con estudios más detallados e información complementaria, en futuros programas de búsqueda y/o desarrollo de nuevas fuentes de agua en zonas rurales de secano de media montaña.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Proyecto Fondecyt (1150587) “A multi-approach assessment of "mountain block recharge" in rural, middle mountain rain-fed areas of North Central Chile“.

REFERENCIAS

Aishlin, P., McNamara, J.P. 2011. Bedrock infiltration and mountain block recharge accounting using chloride mass balance. *Hydrological Processes* 25(2): 1034-1948.

Anaconda, J. 2010. Sistematización y análisis crítico de la información hidrogeológica de la cuenca del río Limarí, con especial énfasis en la zona bajo embalses y en la interacción aguas superficiales/aguas subterráneas. Memoria de Título Ing. Civil Ambiental, University of La Serena.

Babiker, M., Gudmundsson, A. 2004. The effect of dykes and faults on groundwater flow in an arid land: the Red Sea Hills, Sudan. *Journal of Hydrology*, 297: 256-273.

Carling, G.T., Mayo, A.L., Tingey, D., Bruthans, J. 2012. Mechanisms, timing, and rates of arid region mountain front recharge. *Journal of Hydrology* 428-429: 15-31.

CIREN. 2004. Determinación de zonas homogéneas de existencia de aguas subterráneas en los interfluvios de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Centro de Información de Recursos Naturales, 33 p. and anexes.

CNR-Geofun. 2003. Estudio de los recursos hídricos en el secano IV Región para una propuesta de desarrollo agrícola. Available at http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/estudios/index/assoc/HASHf5b7.dir/CNR-0095_3.pdf. Accessed May 8, 2014.

CONAMA. 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Comisión Nacional del Medio Ambiente: Santiago.

CONAMA. S/A. Política Ambiental de la Región de Coquimbo. Available at: <http://www.sinia.cl/1292/fo-article-26202.pdf>. Accessed June 6, 2014.

Herczeg, A.L., Leaney, F.W. 2011. Review: Environmental tracers in arid-zone hydrology. *Hydrogeology Journal* 19: 17-29.

Luengo, P. 2004. Modelación numérica del flujo de aguas subterráneas en rocas. Aplicación en la cuenca de la Rinconada (Punitaqui), IV Region. Graduation Project, Civil Engineering, University of La Serena.

Magruder, I.A., Woessner, W.W., Running, S.W. 2009. Ecohydrologic process modelling of mountain block groundwater recharge. *GroundWater* 47(6): 774-785.

Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R., Arumí, J.L. 2013. Influence of the Pacific Ocean multidecadal variability on the distributional properties of hydrological variables in north-central Chile. *Journal of Hydrology* 501: 227-240.

Oyarzun, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., Higuera, P. 2007. Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion-contamination in streams sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Earth Sciences (formerly Environmental Geology)* 53: 283-294.

Oyarzún, R., Godoy, R., Núñez, J., Fairley, J.P., Oyarzún, J., Maturana, H., Freixas, G. 2014a. Recession flow analysis as a suitable tool for hydrogeological parameter determination in steep, arid basins. *Journal of Arid Environments* 105: 1-14.

Oyarzún, R., Barrera, F., Salazar, P., Maturana, H., Oyarzún, J., Aguirre, E., Alvarez, P., Jourde, H. 2014b. Applying a multi-method approach for surface water-shallow groundwater connectivity assessment. *Hydrogeology Journal* 22: 1857-1873

Sander, P. 2007. Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. *Hydrogeology Journal* 15: 71-74.

Scanlon, B.R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, M., Simmers, I. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes* 20: 3335-3370.

SERPLAC-DGA-ONU-CORFO, 1979. Hidrogeología de la cuenca del río Limarí. Investigación de Recursos Hidráulicos en la IV Región. Proyecto CHI 535. 65 p.

Tessema, A., Mengistu, H., Chirenje, E., Abiye, T., Demlie, M. 2012. The relationship between lineaments and borehole yield in North West Province, South Africa: results from geophysical studies. *Hydrogeology Journal* 20: 351-368

Tidy, E. 1985. Estudio geológico estructural basado en imágenes Landsat de Chile entre los paralelos 18° S y 35° S. In: Frutos, J., Oyarzun, R., Pincheira, M. (Eds.) *Geología y recursos minerales de Chile*. Universidad de Concepción, 136-202

Van Camp, M., Mjemah, I.C., Al Farrah, N., Walraevens, K. 2013. Modeling approaches and strategies for data-scarce aquifers: example of the Dar es Salaam aquifer in Tanzania. *Hydrogeology Journal* 21: 341–356.

Viviroli, D., Dürr, H.H., Messerli, B., Meybeck, M., Weingartner, R. 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research* 43, W07447, doi:10.1029/2006WR005653

Voeckler, H., Allen, D.M. 2012. Estimating regional-scale fractured bedrock hydraulic conductivity using discrete fracture network (DFN) modeling. *Hydrogeology Journal* 20: 1081-1100.

Wilson, J.L., Guan, H. 2004. Mountain-block hydrology and mountain-front recharge. In: Phillips, F.M., Hogan, J., Scanlon, B. (Eds). *Groundwater Recharge in A Desert Environment: The Southwestern United States*. AGU, Washington, DC.