

## Marco tectónico y su correlación con la hidrología en las cuencas de Tongoy y Limari, Chile

Álvaro Araneda A.\*  
Manuel Araneda C.\*  
Eugenio Celedon C.\*

*Recibido en diciembre de 2016; aceptado en junio de 2017*

### Abstract

The tectonic model between the Tongoy Bay area and the west part of Limarí River basin allows connecting the morphological structure of the underground bedrock with the current and historical hydrology of Limarí River. Such morphology was obtained from the analysis and interpretation of 668 gravimetric stations distributed in 28 profiles. The information is supported by the results of several seismic profiles already conducted in the area.

The result of the gravimetric analysis shows a very irregular bedrock morphology, where two underground basins of considerable dimensions separated by a gap in the bedrock stand out. The first basin is located in the north area of the survey zone, Seca/Pachingo creek area, which main axis is north-south strike with an approximate depth of 550 m to the bedrock; end the second basin is located south-west from the survey area, Barraza/Socos zone, with the main axis of east-west strike and approximate depth of 500 m to the bedrock.

According to the existing and available background information, the hypothesis states that Limarí River, in ancient times, run into the Pacific Ocean through Tongoy Bay, east from Puerto Aldea site. The hypothesis is also supported by drilling results conducted in nearby Quebrada Seca and Cerrillos de Tamaya sites, indicating the existence of sedimentary materials characteristic from north-strike hydric flows.

*Key terms: Geophysics, Tectonics, Hydrology.*

### Resumen

El modelo tectónico entre el sector de la bahía de Tongoy y la parte oeste de la cuenca del río Limarí permite relacionar la estructura morfológica del basamento subterráneo con la hidrología actual e histórica del río Limarí. Dicha morfología que fue obtenida mediante el análisis e interpretación de 668 estaciones gravimétricas distribuidas en 28 perfiles. La Información obtenida fue complementada con resultados de una serie de perfiles sísmicos ya realizados en la zona.

.....  
\* Consultores independientes, Santiago, Chile: [segmi@netexpress.cl](mailto:segmi@netexpress.cl)

El análisis de los resultados gravimétricos muestra una morfología del basamento bastante irregular, destacan dos cuencas subterráneas de considerables dimensiones separadas por un alto en el basamento rocoso. La primera de ellas, está ubicada en el área norte de la zona de estudio, sectores de Quebrada Seca–Pachingo, cuyo eje principal tiene dirección norte-sur con profundidad aproximada al basamento de 550 m y, la segunda, ubicada al suroeste de la zona de estudio, sectores de Barraza–Socos con un eje principal de dirección este-oeste y profundidad aproximada al basamento de 500 m.

De acuerdo a los antecedentes obtenidos y existentes se postula que el río Limarí en la antigüedad desembocó en el océano Pacífico por la bahía de Tongoy, al este de la localidad de Puerto Aldea. Hipótesis sustentada en resultados de sondeos realizados en las zonas cercanas a las localidades de Quebrada Seca y Cerrillos de Tamaya, indicadores de materiales sedimentarios característicos de flujos hídricos con dirección norte.

*Palabras claves: geofísica, tectónica, hidrología.*

## Introducción

Varias bahías del litoral chileno como la de Tongoy, Coquimbo y Mejillones presentan similitudes geomorfológicas en las cuales se destacan bahías profundas abiertas hacia el norte limitadas hacia el oeste por cordones montañosos compuestos por rocas fundamentales de edad Precámbrica y rocas graníticas y, hacia el este, la cordillera de la Costa. Al interior de estas bahías, se presentan extensas mesetas marinas en las que afloran secuencias sedimentarias rodeadas por depresiones tectónicas que guardan un completo registro de la sedimentación marina Cenozoica (Krebs *et al.* 1992, Benado 2000). El estudio de estas secuencias sedimentarias aporta antecedentes importantes para entender la evolución tectónica del margen continental activo del norte de Chile asociado al proceso de subducción.

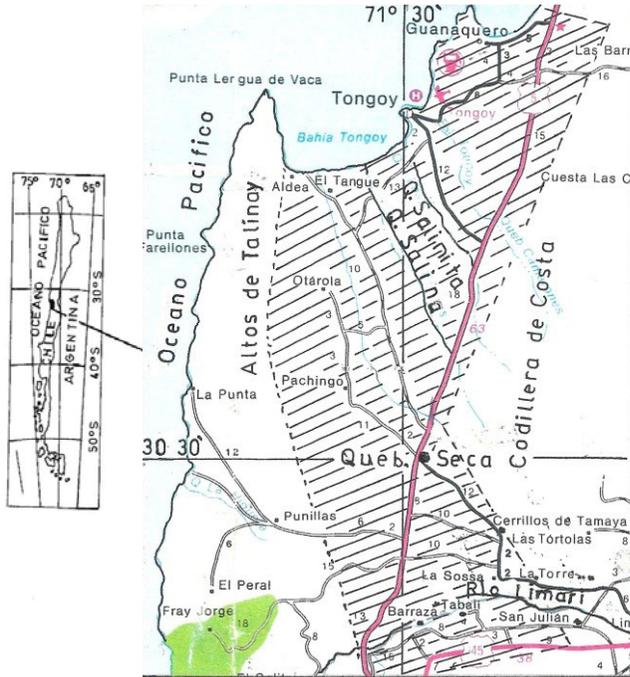
Se ha considerado que los Altos de Talinay son un bloque tectónico activo separado de la cordillera de la Costa que interrumpe la morfología lineal del litoral (Saillard *et al.* 2012).

En general, las investigaciones del margen continental han tenido un carácter local; con excepción del trabajo de Armijo y Thiele (1990) quienes intentaron relacionar rasgos morfoestructurales del margen continental con la subducción de la península de Mejillones, situación similar a la ocurrida en el sector de la bahía de Tongoy, la cual presenta una gran falla normal que produjo el acantilado costero, la falla de Mejillones y el Puerto Aldea respectivamente. La causa sería un cambio brusco en el ángulo del manto de la placa subductante, el cual se verifica por debajo de la cordillera de la Costa.

Niemeyer *et al.* (1996) postulan que la deformación extensional en el presente es un fenómeno compartido por todo el margen continental, comprendido entre cordillera de la Costa y el frente de subducción.

**Marco morfológico y geológico**

La zona de estudio se encuentra ubicada entre las latitudes 30°03'-30°45' S y las longitudes 71°45'-71°10' W (Figura 1). Esta zona se compone de las siguientes unidades morfológicas: a) en el sector oeste se localiza una cadena montañosa con dirección norte-sur paralela a la costa denominada Altos de Talinay, compuesta principalmente por un complejo precámbrico de rocas metamórficas, constituido por gneis, esquistos, filitas y rocas graníticas en el sur; b) hacia el este de la unidad anterior se encuentra una plataforma fluvio-marina de forma alargada en la cual existen una serie de quebradas con dirección norte-sur y, c) el límite este de esta plataforma lo constituye una cadena montañosa que comienza en el cerro San José en el sur, para terminar en el cerro La Viñeta al norte. La mayor parte de esta estructura corresponde al batolito que conforma la cordillera de la Costa, compuesto por rocas graníticas de edad Mesozoica. En la zona costera destacan las rocas del cerro Guanaqueros, las de la península de Tongoy y aquéllas que aparecen al interior de las quebradas Salina y Salinita (Figura 2), las que también pertenecen al batolito indicado.



**Figura 1.** Ubicación de las áreas de estudio, cuenca de Tongoy y parte oeste de la cuenca Limari.



El área sur de la zona estudiada está limitada por las siguientes localidades: al norte, por el pueblo de Quebrada Seca; al sur, por los pueblos de Barraza y Tabali; al oeste, por el macizo Altos de Talinay y al oeste, por los pueblos de Cerrillos de Tamaya y San Julián. Esta zona está compuesta por una extensa terraza cuya altura varía entre los 300 msnm, y está constituida por depósitos aluviales de hasta 300 m de espesor (Thomas 1967) representados principalmente por conglomerados gruesos y bolones poco cementados con intercalaciones de numerosos lentes de areniscas. Esta observación concuerda con profundidades determinadas por sísmicas de Meinardus (1961) y por el modelo gravimétrico determinado en ese estudio.

### **Tectonismo**

Existen varias hipótesis sobre el origen de la tectónica que involucra la bahía de Tongoy y áreas anexas; la más actual es la descrita por Saillard *et al.* (2012), la cual está basada en dataciones U-Th de las rocas del área. Esta información sostiene que la bahía de Tongoy antiguamente estaba inundada por el océano Pacífico y que las rocas del macizo Altos de Talinay y el cerro Guanaqueros correspondían a islas durante el Pleistoceno medio. La datación de los depósitos del río Limarí indican edades miocenas-pleistocenas, por lo tanto el río Limari ya existía cuando la bahía de Tongoy estaba cubierta por el océano Pacífico. Al analizar comparativamente las zonas de desembocadura planteada y con la actual, la hipótesis tiene mucho sentido, considerando los esfuerzos del agua para llegar al mar, la primera, un vertimiento directo y la segunda atravesando el macizo rocoso de Altos de Talinay.

La tectónica indica que a medida que fue transcurriendo el tiempo y como producto de cambios eustáticos en el nivel del mar y ascenso tectónico de la corteza terrestre, debido al proceso de subducción, el océano fue retrocediendo. Este hecho permitió la generación de terrazas marinas, las cuales en algún tiempo geológico cortaron el flujo del río en el antiguo curso, lo que ocasionó el estancamiento del agua en la zona de Quebrada Pachingo. Este tectonismo y retroceso generaron que el río buscara una nueva trayectoria cambiando su curso superficial, iniciándose el proceso de erosión para atravesar los Altos de Talinay (Ota *et al.* 1995).

Los Altos de Talinay están compuestos por un intrusivo Jurásico que presenta sectores con diques, rocas cataclásticas y miloníticas, lo cual habría facilitado la erosión del macizo y posterior entrada del río Limari. Esta hipótesis se sustenta aún más, ya que justo entre la unión del intrusivo y el río, existe un dique y una falla, que se hace normal al sur del río, además de otras, una importante falla que determinó la dirección del río a través del macizo rocoso.

Otro antecedente de gran importancia es la morfología del basamento rocoso, determinado en este estudio, el cual indica la existencia de profundidades al basamento entre 550 y 70 m. Estos espesores del relleno sedimentario, producto del retroceso del océano hacia el norte, suponen una erosión subterránea generada por el antiguo curso del río Limarí en la zona. Dicho estudio indica un

levantamiento del basamento entre la actual cuenca del río y la zona de Quebrada Pachingo, el cual habría generado el aislamiento fluvial de esta zona.

### Marco hidrogeológico

El sistema hídrico entre las zonas de Tongoy y el pueblo de Cerrillos de Tamaya está compuesto principalmente por los aportes del río Limarí, que en algunos casos afloran en la Quebrada Pachingo. La característica general de la tectónica en la zona, sustenta que el río Limarí habría escurrido superficialmente en la antigüedad por la Quebrada Pachingo (Bruggen 1950, Taylor 1947, Borgel 1961, Saillard *et al.* 2012). Las quebradas Romeral, Camarones, Salina y Salinitas no estarían consideradas como tributarias de la Quebrada Pachingo, debido a la existencia subterránea de un cordón granodiorítico que las separa, con dirección norte-sur, el cual termina en los afloramientos ubicados en el sector de la mina "La Niña".

En el sector de la bahía de Tongoy se pueden identificar las siguientes unidades hidrogeológicas:

- a) Rocas intrusivas ubicadas en la cabecera de las quebradas con permeabilidades muy bajas.
- b) Depósitos coluviales que se localizan en los altos de las quebradas y forman conos de deyección que sirven como vías de descenso de aguas meteóricas en niveles más bajos. Depósitos que presentan una fracción clástica mayormente compuesta por gravas medias a gruesas, arenas y ripios finos en una matriz de arena media a fina con limos y arcillas.
- c) Depósitos eólicos en el sector costero que sirven como vía de descenso de aguasmeteóricas hacia niveles más bajos, compuestos por arenas bien graduadas con alta esfericidad.
- d) Depósitos sedimentarios marinos semiconsolidados ubicados en los sectores altos de la cuenca, los cuales presentan una gran variedad de facies. En el área de estudio, básicamente es un potente estrato de coquina, que engrana con depósitos continentales antiguos de origen aluvial. La unidad se encuentra parcialmente saturada estimándose una permeabilidad variable entre 0.1 y 1 (m/día).
- e) Relleno fluvial emplazado de forma ininterrumpida a lo largo de cada quebrada, cuyo espesor disminuye hacia el sector alto de ellas. Además de depósitos que están compuestos por gravas y ripios mal gradados, arenas y limos con buena estratificación. Dicha unidad es capaz de almacenar y transmitir cantidades importantes de agua subterránea con permeabilidades variable que son estimadas entre 1 y 10 (m/día).

## Marco Geofísico en la Región Tongoy-Limari

### Gravedad

Los primeros estudios del campo potencial de la gravedad en el área de la bahía de Tongoy, corresponden a un perfil realizado por la costa entre los afloramientos rocosos existentes entre la península de Tongoy y aquellos ubicados en el sector de Puerto Aldea (Meinardus 1961). Dicho trabajo tomó como plano datum el nivel medio del mar en el área, lo que simplificó el cálculo para obtener el modelo bidimensional de la bahía de Tongoy. El cálculo de la anomalía de Bouguer fue con un contraste de densidad de  $0.6 \text{ gr/cm}^3$ , lo que dio una anomalía de 11.5 mGal equivalente a una profundidad de 460 m. Dicho valor se encuentra frente a la Quebrada Pachingo.

Con el fin de investigar con mayor detalle la morfología del basamento subterráneo, asociado al recurso hídrico de las cuencas del río Limarí y de la Quebrada Pachingo, se realizó un levantamiento gravimétrico en dichas zonas, para lo cual los datos gravimétricos fueron referidos a una estación ubicada en la entrada a la localidad de Los Vilos, perteneciente a la Red Nacional de Gravedad de Chile y ligada a la Red Internacional Estandarizada de Gravedad de 1971 (IGSN 71). Adicionalmente se utilizaron dos estaciones referenciales de terreno para los loops locales (Tabla 1).

Estación	Gravedad	Altura	Coordenada UTM	
	Mgal	m	Este (m)	Norte (m)
Los Vilos	979504.24	38.5	264294.97	6466879.34
PR Tongoy (Pto. N°1)	979363.86	120.0	266476.52	6639649.49
PR Quebrada Seca (Pto. N° 294)	979394.19	118.0	261447.11	6621295.59

**Tabla 1.** Estaciones gravimétricas referidas a la Red Nacional de Gravedad.

Parte de los perfiles gravimétricos fueron realizados en la plataforma de la bahía de Tongoy. El resto de ellos se ubicaron en el sector de la cuenca del río Limarí, entre el macizo Altos de Talinay y la cordillera de la Costa (Figura 3).

Con la finalidad de considerar los efectos regionales de la zona, los perfiles fueron ligados en sus extremos a afloramientos rocosos.

Las estaciones gravimétricas se midieron cada 500 m y fueron referenciadas con un GPS MAP64s de Garmin. La ubicación de las estaciones fue georeferenciada con una precisión de  $\pm 25 \text{ m}$  en la horizontal y en altura de  $\pm 3 \text{ m}$ . Las cotas de las estaciones se determinaron con altimetría, minimizando el error mediante la

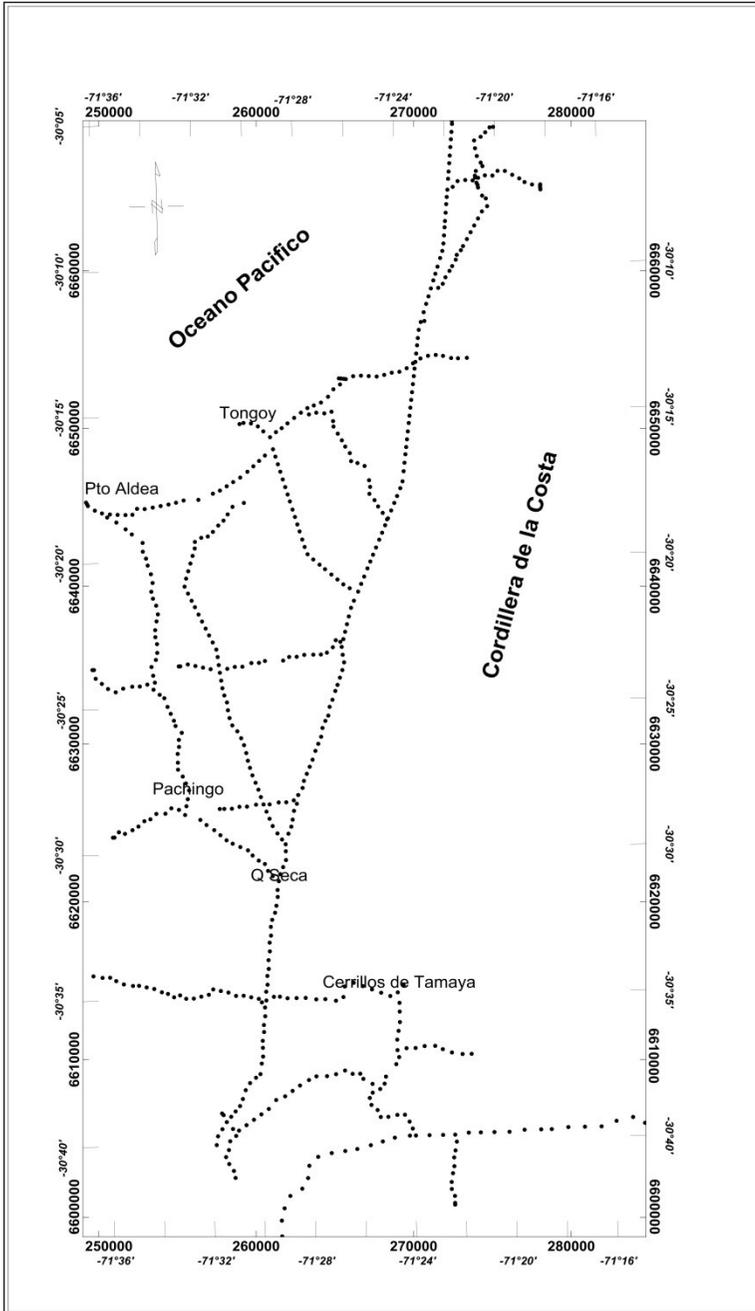


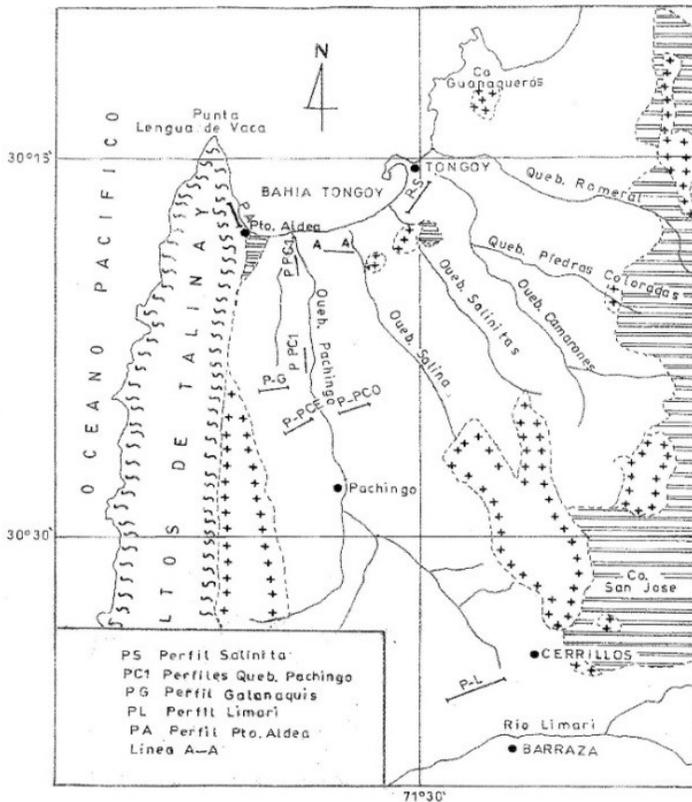
Figura 3. Ubicación de líneas gravimétricas en los sectores de la cuenca de Tongoy y Limarí.

realización de circuitos que no duraran más de 3 horas. La deriva instrumental no fue superior a 0.07 mGal, estimándose que el error máximo de la anomalía de Bouguer por estación no superara los 0.3 mGal.

En la obtención de la anomalía de Bouguer se consideraron los siguientes valores medios para la densidad: relleno sedimentario 2.1 gr/cm<sup>3</sup> y roca basal 2.6 gr/cm<sup>3</sup>. Los valores de las reducciones fueron las siguientes: Latitud C1=0.7476 mGal/m, Altura Ch =0.3086 mGal/m, Bouguer CB= 0.2010 mGal/m.

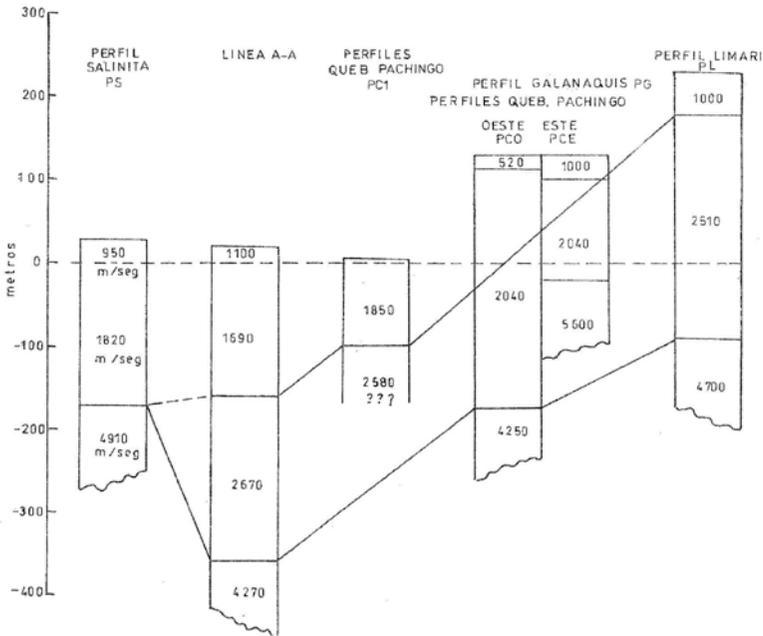
*Sísmica de refracción*

Los antecedentes sísmicos se basan en exploraciones realizadas por el Instituto de Geofísica y Sismología de la Universidad de Chile (Meinardus 1961), dichos estudios se ubican en la parte norte de la bahía de Tongoy y muestran una tendencia de los perfiles sísmicos paralela a la costa (Figura 4).



**Figura 4.** Ubicación de los perfiles sísmicos en la zona de Tongoy y parte oeste del Limari (Meinardus 1961).

Los resultados de las experiencias sísmicas permitieron determinar la estratigrafía con sus respectivos espesores (Figura 5). Destaca que la relación de velocidades con el tipo de suelos es aproximada, ya que no existen sondajes de validación; sin embargo, es una buena aproximación para explicar la litología presente y su relación con la hidrogeología de la zona.



**Figura 5.** Correlación de las velocidades de los perfiles sísmicos con sus respectivas velocidades (Meinardus 1961).

## Resultados

De acuerdo a observaciones del terreno, el nivel freático en el sector de la Quebrada Pachingo se encuentra superficialmente, debido a la existencia de afloramientos de agua en la zona. Este hecho no impide que el recurso hídrico se almacene en profundidades mayores.

La estratigrafía determinada por la sísmica, no limita que el recurso hídrico circule a través de dichos suelos, salvo en aquellas velocidades que sobrepasan

los 4,000 m/seg y representan a la roca sana, la cual está presente en toda el área menos en un sector de la Quebrada Pachingo; debido a que las longitudes de los perfiles sísmicos no permitieron investigar a profundidades mayores de 400 m.

Del análisis de la morfología del basamento subterráneo, determinado por gravimetría, se establece la existencia de dos cuencas subterráneas de considerables dimensiones, separadas por un alto en el basamento rocoso (Figura 6). La primera cuenca ubicada en la plataforma de la bahía de Tongoy, en el norte del área de estudio (color azul), cuyo eje principal tiene dirección norte-sur y una profundidad promedio al basamento de 550 m. La segunda cuenca ubicada en el área suroeste de la zona de estudio, sectores de Barraza/Soco, cuyo eje principal tiene una dirección este-oeste y una profundidad promedio aproximada al basamento de 500 m.

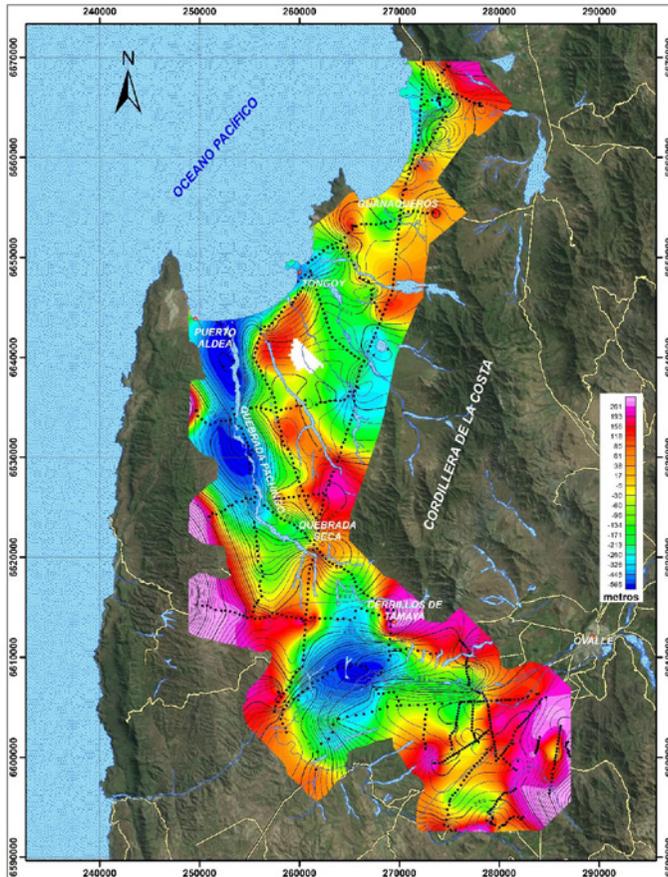
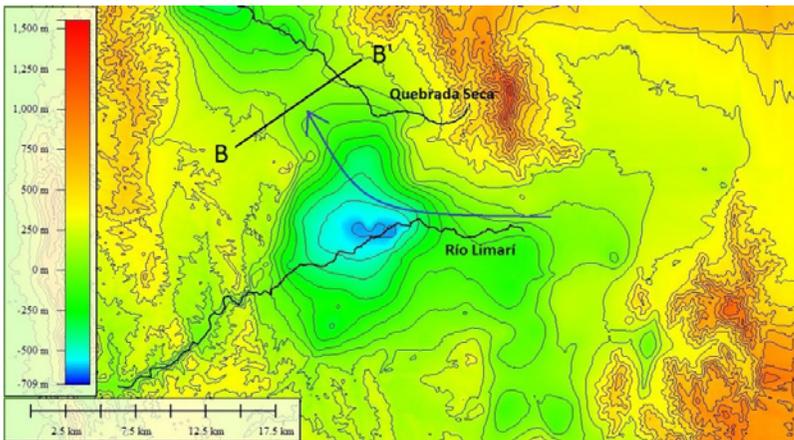


Figura 6. Modelo Morfológico del basamento subterráneo de la cuenca de Tongoy, Limari oeste.

Se postula que el área de la Quebrada Pachingo es una de las zonas de mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico, considerando que ésta tiene una alimentación hídrica subterránea constante, proveniente del río Limarí. Hipótesis basada en la similitud existente entre las distancias al basamento rocoso de la zona, en la que se intersecta el río Limarí con el macizo Altos de Talinay y el alto del basamento existente entre la Quebrada Pachingo y, el actual cauce del río Limarí. Este hecho indica un equilibrio hidráulico entre el sector del río Limarí y la Quebrada Pachingo. Parte del recurso hídrico escurriría superficialmente hacia la costa atravesando los Altos de Talinay y, la otra parte, escurriría subterráneamente hacia el norte, pasando por el sector de la Quebrada Pachingo hacia la bahía de Tongoy.

Adicionalmente el análisis de los materiales encontrados en sondajes cercanos a la Quebrada Pachingo, demuestran la presencia de arenas, gravas y bolones desde los 48 hasta los 70 m de profundidad, hecho que indica la presencia de materiales pertenecientes al antiguo cauce superficial del río Limarí, con desembocadura en la bahía de Tongoy. Del estudio morfológico del basamento en el sector Quebrada Seca, se puede postular la existencia de un flujo subterráneo del río Limari, que escurriría por la zona donde el basamento se encuentra a una profundidad de 62 m (Figura 7).



**Figura 7.** La flecha azul indica el hipotético flujo subterráneo del río Limari que pasaría al sector de la Quebrada Pachingo.

## Conclusiones

Basados en los nuevos antecedentes gravimétricos se avala la hipótesis de que el río Limarí, en el Pleistoceno medio desembocó en la bahía de Tongoy, específicamente al este de la localidad de Puerto Aldea.

Existe un alto en el basamento o portezuelo que divide las zonas de Quebrada Pachingo y el actual cauce del río Limarí, que separa las dos grandes cuencas subterráneas que contendrían un recurso hídrico importante.

Existe un equilibrio hídrico entre la zona de la Quebrada Pachingo y la intersección entre el actual río Limarí con los Altos de Talinay, teniendo escorrentías superficiales hacia el oeste (océano Pacífico) y flujo subterráneo hacia el norte (Quebrada Pachingo). En la actualidad existen afloramientos de agua permanentes en ciertas zonas de la Quebrada Pachingo, hecho que indica un suministro constante del recurso de forma subterránea.

La morfología del basamento subterráneo obtenida mediante gravedad concuerda en parte con aquellas obtenidas por la sismica de refracción.

La hipótesis de la dinámica del tectonismo en el margen continental ha sido descrita en varias publicaciones (Bruggen 1950, Taylor 1947, Krebs *et al.* 1993, Niemeyer *et al.* 1996, Saillard *et al.* 2012), los cuales aportan hipótesis similares de la tectónica de la zona hasta hoy día. Esta tectónica es avalada por rasgos morfológicos obtenidos en esta publicación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a las empresas SEGMI e HIDROGESTIÓN por su contribución al mejoramiento de este artículo.

## Referencias

- Araneda, M.; Capelli, M., Araneda, A. 2016. "Modelo estructural de sector norte de la península de Mejillones, Chile", *Revista Geofísica*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, en prensa.
- Armijo, R., Thiele, R. 1990. "Active faulting in northern Chile; ramp stacking and lateral decoupling along a subduction plate boundary", *Earth and Planetary Science Letter*. vol. 98, pp. 40-61.
- Benado, D.E., 2000. "Estructuras y estratigrafía básica de terrazas marinas en el sector costero de Altos de Talinay y bahía Tongoy, influencia neotectónica", *Memoria*, Universidad de Chile, p. 78.
- Borgel, R., 1961. "El interfluvio Elqui-Limarí", *Descripción morfométrica y morfográfica del sector litoral*. Instituto de Geografía, Universidad de Chile.
- Bruggen, J., 1950. *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.

- Krebs, W.; Aleman, A.; Padilla, H.; Rosenfeld, L. y Niemeyer, H. 1992. "Age and Paleogeographic significance of the caleta Herradura diatomite. Peninsula de Mejillones, Antofagasta Chile", *Revista Geológica de Chile*, vol. 19, pp. 75-81.
- Meinardus, H., 1961. Exploraciones geofísicas en el área de Tongoy. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Instituto de Geofísica y Sismología, Publicación núm. 2, Ed. Universitaria S.A., pp. 205-215.
- Niemeyer, H.; González, G. y Martínez-de-los Ríos, E. 1996. "Evolución tectónica Cenozoica del margen continental activo de Antofagasta, Chile", *Revista Geológica de Chile*, vol. 23, núm. 2, pp. 165-186.
- Ota, Y.; Miyachi, T.; Paskoff, R. y Kobs, M. 1995. Plio-Quaternary Mariric terrace and their deformation along the Altos de Talinay, North central Chile, *Revista Geológica de Chile*, vol. 20, pp. 89-102.
- Saillard, M.; Riotte, J.; Regard, V.; Violette, A.; Herail, G.; Audin, L. and Riquelme, R. 2012. "Beach ridges U-Th dating in Tongoy bay and tectonic implications for a peninsula by system, Chile". *Journal of South American Earth Science*, vol. 40, pp. 77-84.
- Taylor, G., 1947. "The Tongoy Area", Informe Inédito, Santiago, Chile.
- Thomas, H. 1967. *Geología de la Hoja de Ovalle*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile B°23, p. 58.