

REVISIÓN DEL MARCO ESTRATIGRÁFICO E HIDROGEOLÓGICO PARA EL SISTEMA DE ACUÍFEROS DE LA CUENCA DE MAGALLANES, CHILE

Jesús Pinto¹, Álvaro Pérez¹, Aníbal Velásquez¹

1: ENAP Magallanes. jpintor@enap.cl, aperezp@enap.cl, avelasqueza@enap.cl

Palabras clave: acuíferos, Chile, cuenca de Magallanes, cronoestratigrafía, hidrogeología, Cenozoico

ABSTRACT

This contribution constitutes a revision of the stratigraphic and hydrogeologic framework of the Magallanes aquifer system based on previous work, well logs correlations, outcrop observations and new geochronologic data. The system can generally be divided into three hydrostratigraphic units separated by significant unconformities, from base to top: El Salto-Filaret, Palomares and Cabo Negro. The El Salto and Filaret formations are considered latest Oligocene to early Miocene in age, and they may contain both infiltrated and connate seawater. The Palomares Formation is early to middle Miocene in age, and the Cabo Negro formation, composed of glacial and glaciofluvial sediments, represents the Holocene cover in the region. Groundwater chemistry from wells indicates potable water only in Palomares and Cabo Negro, especially in the latter. Depending on the sedimentary configuration, aquifers may vary from confined in the bedrock to free in the Quaternary cover, but in the latter confined and semiconfined may also occur. Aquifers below the mean sea level and close to the Magallanes Strait locally contains brackish water suggesting lateral encroachment of saltwater from coastal areas. Better knowledge of groundwater characteristics and implementation of key policies to identify and mitigate potential groundwater mismanagement and/or contamination is necessary for sustainable exploitation of natural resources, aquifers' protection, and the social understanding of their safe development.

INTRODUCCIÓN

Las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego (Fig. 1) constituyen una región muy importante desde el punto de vista agrícola, comercial e industrial en el sur de Chile. Además, en la región se concentran las únicas reservas conocidas de hidrocarburos del país, lo que ha mantenido el interés de la industria nacional durante el último siglo (Thomas 1949). Este interés se ha visto fortalecido durante la última década por el descubrimiento de importantes acumulaciones no convencionales de gas que, junto con otras actividades productivas, ha provocado un aumento de la tasa de crecimiento económico y demográfico en la región. El agua subterránea es un recurso natural invaluable en cualquier parte del mundo y, por ende, la cantidad de agua disponible en el subsuelo para su uso municipal e

industrial debe ser tema de cuidado y preocupación a medida que aumentan las actividades en ambos ámbitos.

Desde comienzos de la exploración petrolera en la Cuenca de Magallanes, el tema de las aguas subterráneas ha sido de gran importancia y preocupación tanto para la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) como para la administración pública a través de organismos encargados de la gestión de los recursos hídricos. Inicialmente, el interés de ENAP en las aguas subterráneas se debió a los inconvenientes que implicaban las surgencias de este fluido durante la perforación de pozos petroleros exploratorios. Posteriormente, la relativa abundancia de este recurso motivaría su explotación para el aprovechamiento de las poblaciones asociadas con los campos petroleros como, por ejemplo, Cañadón Grande y Cabo Negro en el continente y Cerro Sombrero y Cullen, en Tierra del Fuego. Las principales surgencias que involucraban obstáculos para la perforación de los pozos petroleros ocurrían al alcanzar la Formación Palomares (Mioceno), que constituye la unidad rocosa más joven y somera del área de estudio. Así, esta unidad, junto con los sedimentos cuaternarios glaciofluviales suprayacentes se convirtieron en las dos unidades más importantes de la Región para ENAP desde el punto de vista hidrogeológico (Fig. 1).

Mordojovic (1950) estudió la estructura y presión de la cuenca artesiana de Península Espora, norte de Tierra del Fuego (Fig. 1), a partir de secciones geológicas de pozos petroleros perforados en el área. Consideró solo la sección del “Terciario superior” establecida en el pozo Cerro Sombrero-1 y la asignó a la formación *Side* de Barwick (1949), hoy en día reconocida como dos unidades litoestratigráficas distintas, de base a tope: Filaret y Palomares (Fig. 2). Cortés (1963), a partir de

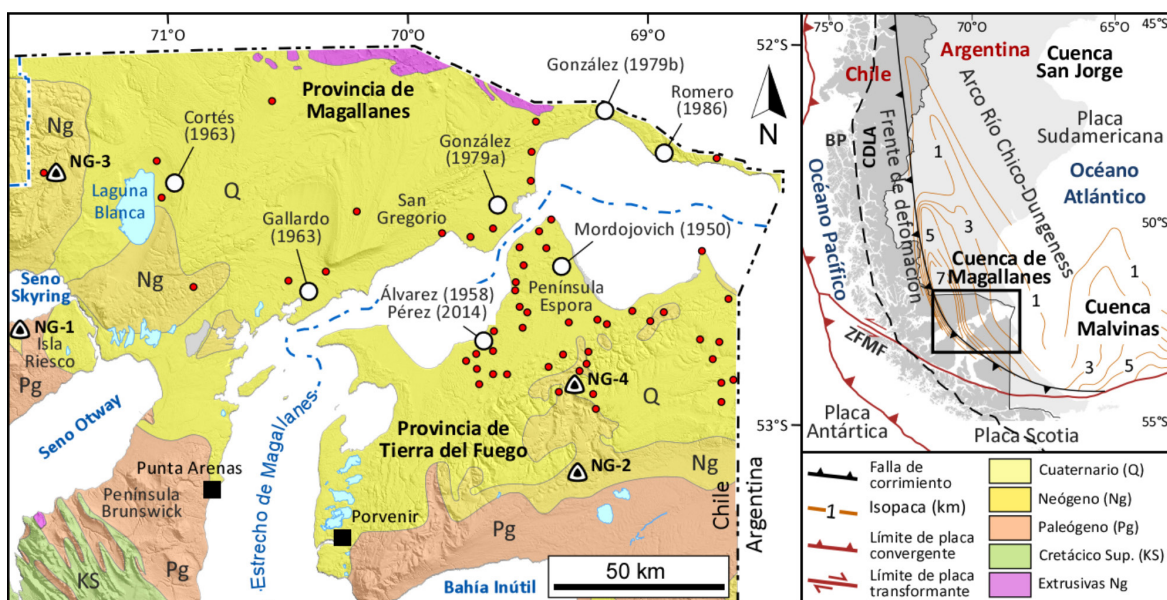


Figura 1. Mapa geológico simplificado de la Región de Magallanes mostrando la distribución de las principales unidades cro- noestratigráficas, pozos de interés hidrogeológico (puntos rojos), localidades de estudios pioneros conducidos por Enap (círculos blancos) y ubicaciones relativas de muestras con nuevas edades U-Pb en circón detrítico incluidas en este estudio (triángulos blancos-negros). BP = Batolito de la Patagonia, CDLA = cinturón de deformación de Los Andes, ZFMF = zona de fallas Magallanes-Fagnano.

indicios documentados durante la perforación del pozo Laguna Blanca-1 en las adyacencias de Laguna Blanca (Fig. 1), describe la “cuenca artesiana de Laguna Blanca”, ubicada en la vecindad oriental de ese cuerpo de agua. Posteriormente, en la década del 80s, los sondeos Riquelme-1 y Riquelme-2, ubicados también cerca de Laguna Blanca, reportaron surgencia de agua dulce. El acuífero al cual se hace mención ocurre en la Formación Palomares. González (1979a), sobre la base de trabajos previos, define la cuenca artesiana de la parte norte de Tierra del Fuego y Punta Delgada, cuyos acuíferos corresponden a la Formación Palomares. Pérez (2014), actualiza y amplía los datos piezométricos para el sector norte de la Isla de Tierra del Fuego a partir de los nuevos sondeos perforados a la fecha y la integración con información sísmica 3D.

Asimismo, los depósitos glaciofluviales también fueron objeto de investigación, entre la que se destaca la de la llamada “Cuenca de Oazy Harbour” (Gallardo, 1963), quien analizó los pozos de agua perforados por la Sociedad Explotadora de Tierra del Fuego en la estancia homónima, en las cercanías de San Gregorio. Además, se ha demostrado la existencia de acuíferos en la cobertura glaciofluvial en el Valle de Cañadón Grande (González 1979b) y en Posesión (Romero 1986) (Fig. 1).

Por su parte, organismos estatales han promovido dos estudios regionales a través de consultores privados sobre las principales características de las unidades hidrogeológicas de Magallanes. En el año 1991, la Dirección General de Aguas (DGA) llevó a cabo un estudio hidrogeológico en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena (DGA 1991) para obtener información relevante de la conformación geológica y del comportamiento del sistema hidrogeológico de la zona, desarrollando un modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos existentes. Posteriormente, debido al crecimiento demográfico y, por ende, el aumento en la demanda de agua, en el año 2016 la DGA adjudicó una licitación a Arcadis Chile S.A. para la actualización y el modelado del sistema de acuíferos de la Región de Magallanes (DGA 2016). El énfasis fue puesto en los depósitos cuaternarios glaciofluviales. De acuerdo con este trabajo aproximadamente 50 % de las aguas subterráneas de Magallanes extraídas a partir de pozos de agua se destinan para el consumo humano y animal, 12 % para uso industrial, 10 % para riego y el restante 28 % para otros usos. La DGA cuenta con 33 estaciones pluviométricas repartidas que mensualmente registran información en la zona de estudio.

Aunque la utilización de las aguas subterráneas por parte de la actividad petrolera se puede considerar irrelevante con respecto a otros usos (DGA 2016), el incremento en la extracción de gas natural a partir de rocas de baja permeabilidad por parte de ENAP ha impulsado la obtención de nuevos datos y la investigación del sistema hidrogeológico de la región con la finalidad de mantener una actividad responsable y consecuente con la protección de las aguas subterráneas. Como parte de ese compromiso, este trabajo constituye una revisión del marco estratigráfico y sedimentario del sistema de acuíferos de Magallanes en las porciones septentrionales de las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego sobre la base de información previa, registros de pozo y afloramientos y nuevos datos geocronológicos.

UBICACIÓN Y ESCENARIO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio incluye las porciones septentrionales de las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego (Fig. 1). Geológicamente, estas provincias se encuentran dentro del ámbito de la Cuenca de Magallanes. La evolución geológica de la Cuenca es compleja y está íntimamente vinculada a la geodinámica Andina a lo largo del margen Pacífico de Sudamérica (Biddle *et al.* 1986, Wilson 1991). Luego de una fase de fracturamiento continental (“*rifting*”) durante el Jurásico Medio-Tardío (Bruhn *et al.* 1977, Biddle *et al.* 1986, Wilson 1991, Pankhurst *et al.* 2000) y una etapa de extensión y margen pasivo durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Dalziel 1981, Wilson 1991), se produce la inversión tectónica y establecimiento de una cuenca de antepaís durante el Cretácico Tardío-Paleógeno (Natland *et al.* 1974, Winslow 1981, Biddle *et al.* 1986, Wilson, 1991, Fildani y Hessler 2005).

La deformación y, consecuentemente, la fase inicial de antepaís fue progresiva y diacrónica, estimándose una edad cercana al Aptiano-Albiano hacia el norte (Provincia de Última Esperanza) y Coniaciano o más joven cerca del límite meridional de la cuenca (Bernhardt *et al.* 2012, Malkowski *et al.* 2015). Este evento causó levantamiento y subsidencia por flexión diferenciales cuyo resultado fue el desarrollo progresivo de una discordancia regional y la sedimentación en los depocentros de una gran variedad de rocas terrígenas y volcánicas con granulometría variable de conglomerádica a arcillosa. La sucesión paleógena puede alcanzar los 6 km de espesor en la parte más profunda de la cuenca (antefosa) (Fig. 1).

Luego de una disminución en los movimientos compresivos y la deformación, la región experimentó un régimen transpresivo, con una tectónica predominantemente de deslizamiento de rumbo, donde prevaleció una sedimentación más continental acompañada de volcanismo a partir del Neógeno (Winslow 1982). La sucesión sedimentaria incluye las formaciones El Salto al oeste y Filaret hacia el este, seguidas estratigráficamente de la Formación Palomares. Luego de un período de erosión y/o no deposición, la última glaciación del Holoceno dejó una serie de formas y depósitos glaciofluviales que cubren la mayor parte del área de estudio. El Neógeno-Holoceno, intervalo de interés en este trabajo, conforma el principal sistema hidrogeológico de la Región de Magallanes (Fig. 3).

TERMINOLOGÍA APLICADA A LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Un sistema hidrogeológico (también referido como unidad hidrogeológica) es cualquier sedimento y/o unidad rocosa (*e.g.*, miembro, formación o grupo) cuyas propiedades hidráulicas difieren de los sedimentos o rocas adyacentes. El sistema puede estar compuesto por uno o más intervalos permeables e impermeables conectados de tal manera que su capacidad de almacenar, transmitir y recargar el agua funciona como un todo. La agrupación de estos intervalos puede

ser subjetiva, pero en general se reconoce una jerarquía tripartita, que de mayor a menor rango incluye: (1) sistema de acuíferos, (2) unidad hidroestratigráfica y (3) acuífero. Un sistema de acuíferos se define como “un cuerpo heterogéneo de materiales permeables y pobremente permeables intercalados que funcionan regionalmente como una unidad saturada con agua, consiste en dos o más acuíferos separados, al menos localmente, por unidades confinantes que impiden el movimiento del agua subterránea pero no afecta la continuidad hidráulica total del sistema” (Poland *et al.* 1972).

Una unidad hidroestratigráfica puede definirse como un sedimento y/o unidad rocosa distinguida y caracterizada por sus propiedades hidrológicas únicas, especialmente la porosidad y permeabilidad (Maxey 1964, Seaber 1988). El acuífero es la unidad básica en hidrogeología y se define como una o más unidades geológicas consolidadas o no consolidadas que contienen agua en cantidades económicamente rentables y con la suficiente calidad para pozos y manantiales (*e.g.*, Sharp 2007). En general, los acuíferos pueden ser confinados (o artesianos) o no confinados (o libres), dependiendo respectivamente de la ocurrencia o no de una unidad de baja permeabilidad (unidad confinante o acuitardo) inmediatamente por encima.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sobre la base de perfiles de electromagnetismo transitorio, en el estudio de la DGA (2016) se propusieron tres unidades hidrogeológicas: (1) cuaternaria, unidad principal y conformada por los depósitos no consolidados glaciofluviales del Holoceno; (2) “basamento hidrogeológico”, compuesto por las formaciones Filaret, Palomares y unidades equivalentes; y (3) “basamento resistivo”, definido por un cambio significativo en los valores de resistividad y que posiblemente coincida con formaciones más antiguas que el Neógeno.

Este estudio está basado principalmente en el conocimiento previo del sistema de acuíferos de Magallanes y la obtención de nuevos datos geocronológicos y sedimentarios sobre la base de registros de pozo y localmente de datos de afloramiento. Así, la Fig. 2 muestra un esquema simplificado de las principales unidades estratigráficas involucradas en el sistema hidrogeológico de la Región de Magallanes.

Edad Tentativa	Oeste (Continental norte)	Este (Tierra del Fuego)
Holoceno-Pleistoceno	Cabo Negro (Glaciofluvial)	
Mioceno inferior	Palomares (continental-transicional)	Palomares (transicional-marino somero)
Oligoceno?-Mioceno inferior?	El Salto (continental)	Filaret (transicional-marino somero)

Figura 2. Unidades lito-estratigráficas someras que conforman el principal sistema hidrogeológico de la Región de Magallanes.

Este reporte incluye 4 dataciones U-Pb en circones detríticos (Tabla 1) provenientes de las formaciones que conforman el Paleógeno de la antefosa en afloramientos de Isla Riesco y Península Brunswick (Fig. 1). Las cuatro muestras para geocronología fueron procesadas y analizadas en el laboratorio de Geoanalítica de la Universidad Estatal de Washington, EE. UU. Cada muestra fue triturada y tamizada para aislar la fracción <300 μm . Los circones se separaron de otros minerales usando un separador magnético Frantz combinado con líquidos pesados siguiendo métodos estándares. Los circones estándares, que entre otros incluyen el FC-1 de Paces y Miller (1993) de edad $1099 \pm 0,6$ Ma como el estándar de edad primaria, y los desconocidos fueron montados en discos de “epoxy” de ~2.5 cm de diámetro que luego fueron pulidos para exponer las partes internas de los cristales. Los análisis de datación U-Pb se realizaron por medio de ablación láser acoplado a un espectrómetro de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (LA-ICPMS, por sus siglas en inglés) (Gehrels *et al.* 2008). La ablación de los circones se llevó a cabo con un sistema de ablación láser de estado sólido New Wave que produjo cavidades de 20-30 μm de diámetro. El material generado fue luego introducido al ICPMS para la medición de los isótopos de U, Th y Pb. El Pb común fue calculado utilizando el modelo Pb común para la Tierra de Stacey y Kramer (1975). La edad seleccionada para circones <1000 Ma es la $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Para la estimación de edad máxima de sedimentación (EMS) se omitieron dataciones con contenido de Uranio >1000 ppm y/o edades con discordancia mayor a 20 % y discordancia inversa menor a -5 %. La EMS está dada por el grupo de granos (≥ 3) más jóvenes cuyos errores se solapan a dos desviaciones estándares (2s) de la muestra (YGC2s de Dickinson y Gehrels 2009).

Muestra	Provincia	Latitud	Longitud	Unidad lito-estratigráfica	Litología principal
NG-1	Magallanes	-52.56245	-71.70246	El Salto	Arenisca media a gruesa
NG-2	Tierra del Fuego	-53.11413	-69.33575	Filaret	Arenisca conglomerática
NG-3	Magallanes	-52.30381	-71.58398	Palomares	Toba gruesa, lapilli
NG-4	Tierra del Fuego	-52.89297	-69.34291	Palomares	Arenisca tobácea, gruesa

Tabla 1. Información básica de las muestras seleccionadas para datación U-Pb en circones detríticos. Sistemas de coordenadas geográfico basado en el datum WGS84.

RESULTADOS Y PERSPECTIVAS

Unidades Estratigráficas e Hidroestratigráficas

Un entendimiento del marco estratigráfico local es crucial para una mejor apreciación del comportamiento a corto o largo plazo de cualquier sistema de acuíferos en determinada región. En esta sección se resume la estratigrafía y sedimentología de las unidades que componen la principal unidad hidrogeológica de la Cuenca de Magallanes en el territorio chileno.

La Fig. 3 muestra el esquema estratigráfico general en superficie y subsuelo para el Oligoceno-Holoceno de la Cuenca. La escala de tiempo y pisos internacionales se derivan de

la Carta Cronoestratigráfica Internacional (Cohen *et al.*, 2013), mientras que los pisos locales se corresponden con los propuestos por Natland *et al.* (1974) posteriormente revisados por Mobil (1979). Los nombres de formaciones y/o divisiones estratigráficas corresponden a los definidos por ENAP para la porción chilena de la cuenca. La Fig. 4 indica las edades máximas de deposición sobre la base de diagramas de estimación de densidad de Kernel y de promedios ponderados de dataciones $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ en circones detríticos obtenidas para cuatro muestras seleccionadas en el área de estudio.

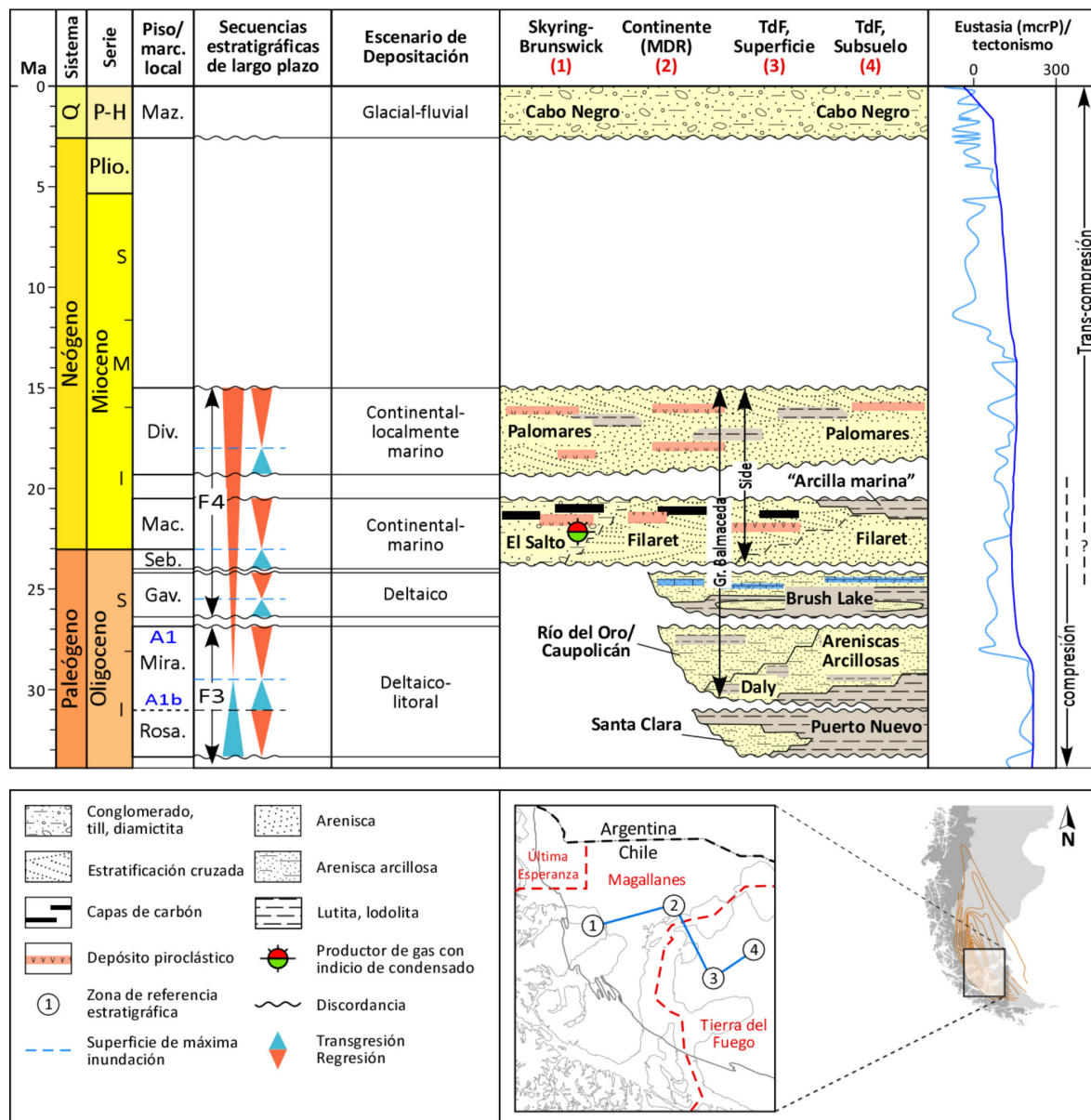


Figura 3. Diagrama cronoestratigráfico para las porciones septentrionales de las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego, Cuenca de Magallanes. Los sectores numerados del 1-4 se basan en el tipo de información disponible y el ámbito geológico que representa. Las características de las unidades y sus edades provienen de varias fuentes citadas en el texto y nuevos datos U-Pb de circones detríticos obtenidos por ENAP. La definición de pisos estratigráficos locales es modificada a partir de Natland *et al.* (1974) y Mobil (1979). Las megasecuencias F3-F4 son las propuestas por Mpodozis *et al.* (2011). Los eventos tectónicos principales e historia de cuenca según Fildani *et al.* (2008). mrP = metros con respecto al Presente.

De acuerdo con Mordojovic (1950), la Formación Filaret abarca los estratos comprendidos entre la Formación Brush Lake y las areniscas azules, incluyendo de base a tope el Carbón Inferior, las areniscas Verdes y el Carbón Superior; mientras que la Formación Palomares incluía los estratos comprendidos entre el Carbón Superior y los depósitos glaciofluviales del Cuaternario. Considerando la descripción original, en la base de Palomares se localiza una lutita glauconítica localmente arenosa, indudablemente marina debido a la ocurrencia de equinodermos y foraminíferos bentónicos, cuya extensión lateral al parecer es restringida. Utilizando esta lutita como capa guía Mordojovic establece una estructura sinclinal con eje en dirección NW-SE.

De acuerdo con las nuevas correlaciones y edades obtenidas a partir de circones detríticos, las relaciones estratigráficas indican que la denominada “arcilla marina” se correspondería más bien con el tope de Filaret en el dominio de la Plataforma Springhill (Fig. 3). La ausencia de esta unidad hacia el oeste se interpreta como el producto de acuñamiento o truncamiento por no deposición o erosión respectivamente.

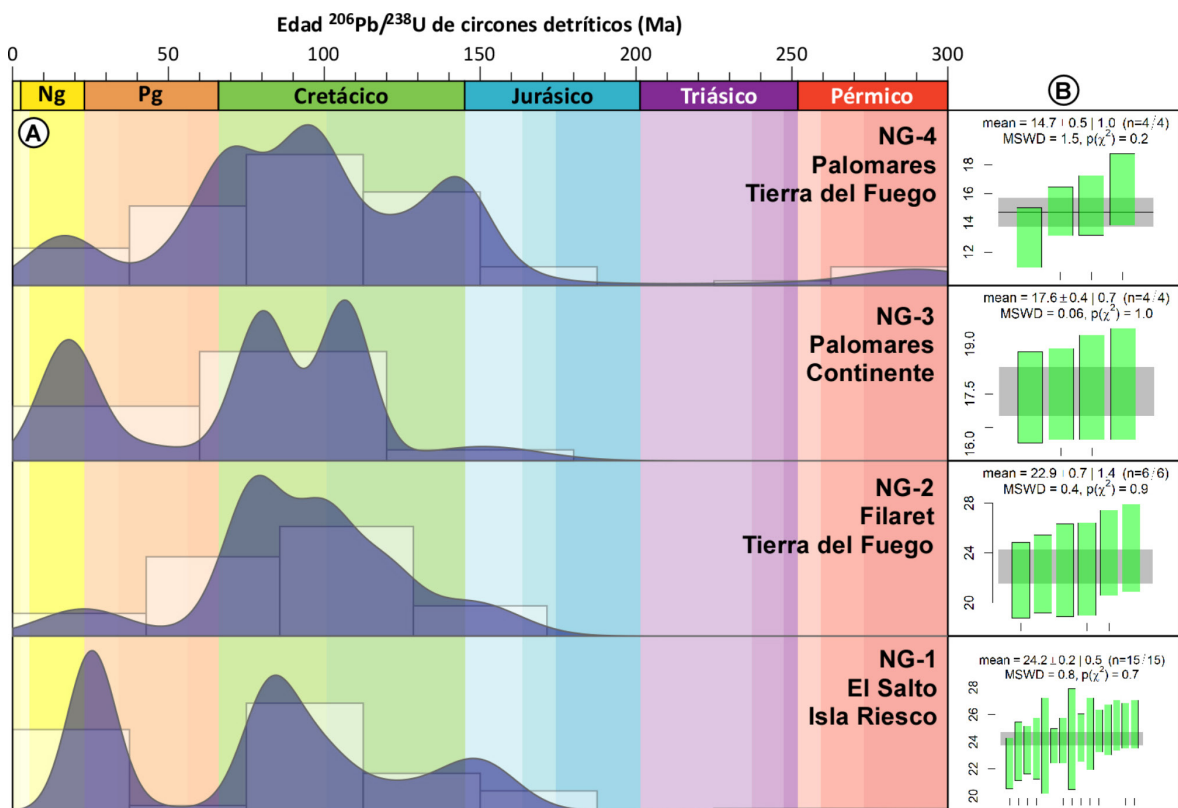


Figura 4. (A) Diagramas de estimación de densidad de Kernel y (B) de promedios ponderados de dataciones $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ en circones detríticos obtenidas para cuatro muestras seleccionadas en el área de estudio; ambos diagramas obtenidos a partir del programa Isoplot R (Vermeesch 2018). En (A) solo se consideran las edades < 300 Ma. En ambos casos los errores representan 2s. La edad máxima de depósito en (B) está dada por el grupo más joven de granos (≥ 3) que se solapan a 2s (YGC2s) (Dickinson y Gehrels 2009). Ver Fig. 1 para ubicación de las muestras.

La Formación El Salto (Fig. 5) (González 1952) en su sección tipo de Chorrillo El Salto y Estancia El Salto, al norte de Seno Skyring, alcanza unos 750 m de espesor. La unidad está compuesta principalmente de conglomerados, areniscas y arcilitas localmente carbonosas que yacen en contacto discordante con la Formación Loreto a lo largo de la costa NE del Seno Skyring y en los valles de los ríos Rubens y Pérez. González (1952) dividió la formación en tres miembros, de base a tope: (1) Las Coles (370 m), en la Estancia María, costa norte de Seno Skyring, compuesto de conglomerados, areniscas conglomeráticas, lutitas carbonosas y capas delgadas de carbón, contiene concreciones calcáreas; (2) Río Verde (220-280 m), a lo largo del Río Verde, lado este de Seno Skyring, compuesto de capas alternantes de conglomerados, areniscas conglomeráticas a finas, limolitas y lutitas, hacia la base se menciona localmente una capa glauconítica con gas; y (3) San Antonio (100-250 m), en el Río San Antonio, tributario del Río San José, que a su vez es afluente del Río Penitente, compuesto de conglomerados y areniscas conglomeráticas.

De acuerdo con Hoffstetter *et al.* (1957), la formación El Salto no puede ser más joven que el Mioceno inferior debido a su posición estratigráfica por debajo de la Formación Palomares y su macrofauna característicamente santacrucense, refiriéndose a la Formación Santa Cruz del lado argentino, que ha sido considerada Mioceno inferior a medio (*e.g.*, Marshall *et al.* 1986, Tauber 1997a,b). Las dataciones de circones detríticos realizadas por Hervé *et al.* (2004) sugieren una edad de $21,8 \pm 1,5$ Ma, lo que la ubica en el Aquitaniano (Mioceno inferior). Malumian *et al.* (2013) propusieron una edad Oligoceno superior-Mioceno inferior y concluyeron que tanto la base como el tope de la formación se caracterizan por importantes hiatos estratigráficos. En el sector de Tranquilo, noroeste del área de estudio, los autores dividieron la unidad en dos intervalos: uno inferior de edad Oligoceno-Mioceno temprano y otro superior de edad Mioceno medio. La muestra NG-1 de este trabajo arrojó una edad de $24,2 \pm 0,2$ Ma (Fig. 4). Así, los equivalentes



Figura 5. Afloramiento de la formación El Salto en el sector Río Pérez, mostrando su típica litología conglomerática; note el truncamiento de las capas arenosas basales por el cuerpo conglomerático superior. Altura del afloramiento en la foto ~2 m.

laterales de El Salto serían, por lo menos en parte, las formaciones Río Guillermo-Santa Cruz en el sector de Río Turbio (lado argentino) y la Formación Filaret en la Isla Tierra del Fuego (ver abajo).

La Formación Filaret (Fig. 6), propuesta por Cortés *et al.* (1955), no ha sido reconocida en la porción occidental de la Provincia de Magallanes (Fig. 1). Su localidad tipo es la sección Filaret, al noreste de Brush Lake, Tierra del Fuego, donde consiste en 200-400 m de areniscas conglomerádicas, areniscas y fangolitas, localmente fosilíferas. Cecioni en Hoffstetter *et al.* (1957) consideró una edad Oligoceno-Mioceno temprano. Tanto Cecioni como Barwick (1955) la correlacionaron con la Formación El Salto. Una nueva datación U-Pb en circones detríticos arrojó una edad de $\sim 22,9 \pm 0,7$ Ma (Fig. 4) que junto con los reportados por Hervé *et al.* (2004), además de los datos bioestratigráficos de Malumián *et al.* (2013), indican una equivalencia temporal. Se infiere una interdigitación o transición progresiva a los depósitos de la Formación el Salto hacia el oeste.



Figura 6. Afloramiento de areniscas de grano medio con estratificación cruzada festoneada de la Fm. Filaret a lo largo de la carretera CH-259, Isla Tierra del Fuego. La escala vertical de la fotografía es ~ 1 m.

La estratigrafía neógena culmina con esta formación. El nombre de Palomares fue introducido casi simultáneamente por Decat y Pomeyrol (1931) y Keidel y Hemmer (1931) para referirse a los depósitos continentales que descansaban discordantemente sobre lo que hoy se conoce como Formación El Salto. Thomas (1949) manteniendo la misma relación estratigráfica de los autores previos, la denomina Formación Palomares y propone los afloramientos en las inmediaciones de Cerro Palomares al este del Canal Fitz Roy como la localidad tipo. La unidad, de unos 100-700 m de espesor, está compuesta de areniscas, conglomerados y depósitos tobáceos que González (1952) incluyó en dos miembros, de base a tope: San José y Penitente. En la práctica, el miembro San José se distingue del miembro Penitente por la presencia de areniscas con líticos azules (Pérez y Agurto 2016). La Formación Palomares ha sido reconocida en toda la estratigrafía del área de estudio, tanto en superficie como en el subsuelo. Barwick (1949) denominó la sucesión

Caupolicán-Palomares Grupo Balmaceda en Sierra Balmaceda, Tierra del Fuego. El mismo autor, se refirió a las formaciones Filaret y Palomares como Formación Side en el valle del Río Side. En la parte norte de Tierra del Fuego, González (1953) subdividió la formación en 5 intervalos o miembros informales, que en orden estratigráfico ascendente son: Olivos (areniscas grises azulado a verdoso), Campanario (lodolitas tobáceas localmente carbonosas), Bellavista (conglomerados y areniscas azules), Primavera (intercalación de areniscas azules y tobas) y el más joven dominado por tobas.

Velásquez (2016) interpretó las secciones de la ladera oeste de Cerro Palomares y al este del Río San José como depósitos de oleadas piroclásticas de proximidad intermedia con respecto a la fuente, aparentemente ubicada más al oeste. Según Velásquez (2016), la sucesión del Río San José

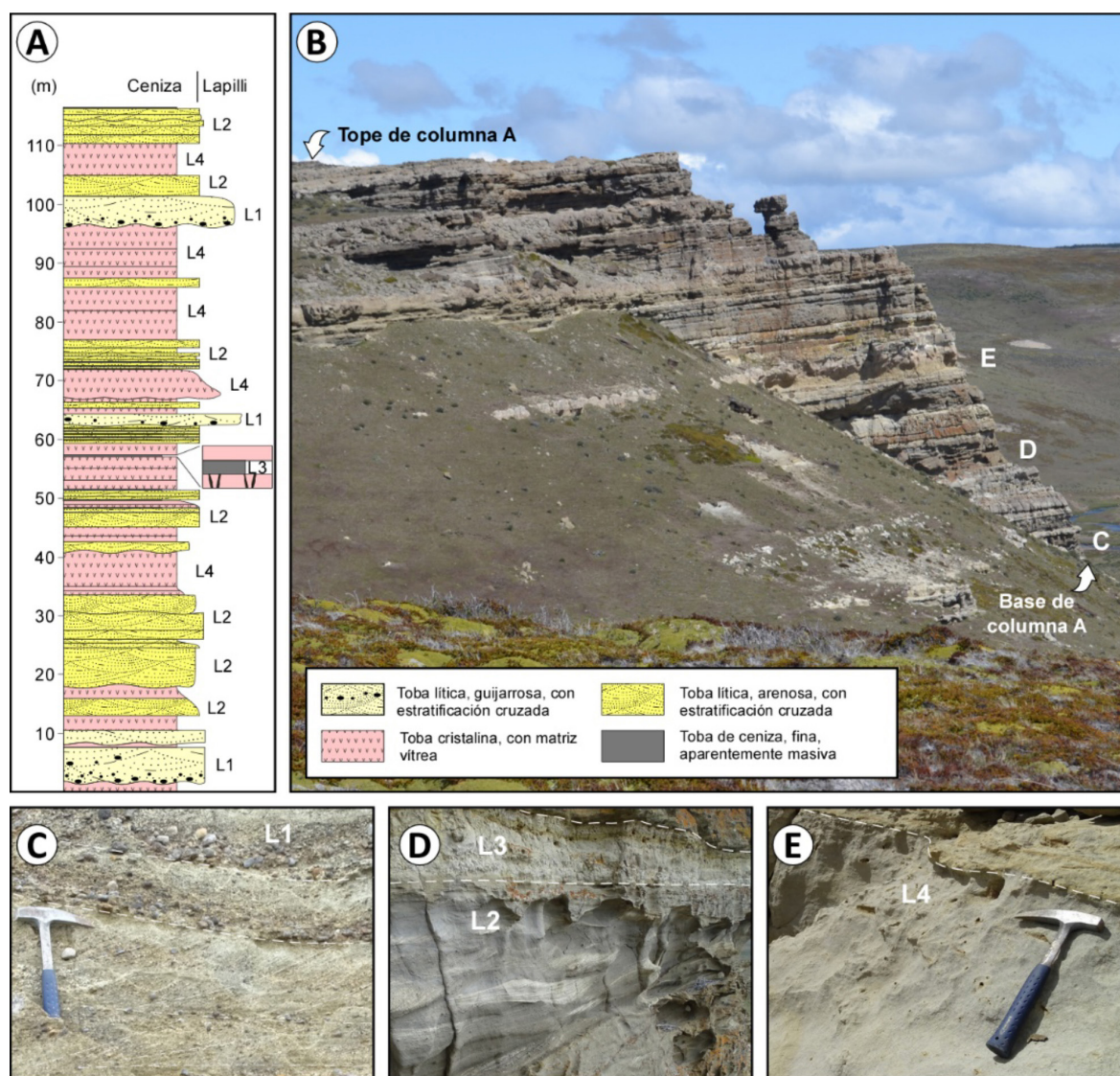


Figura 7. Columna (A) y afloramiento (B) de la Formación Palomares en el sector este del Río San José (modificada de Velásquez 2016). (C-E) Ejemplos de la litología volcánico-litica dominante (ver texto).

está compuesta por intercalaciones de cuatro litologías principales (Fig. 7): L1, toba lítica soportada por matriz arenosa, con granos tamaño lapilli grueso a bloque, la estructura sedimentaria más notable es la estratificación cruzada; L2, toba lítica oscura, de granulometría tamaño lapilli, con líticos basálticos vesiculares de hasta 5 cm de diámetro y redondeados y conductos de segregación de fluidos, con estratificación cruzada, lateralmente continuas y con espesores variables de 0,5 hasta 15 m; L3, toba de ceniza, generalmente claras, sin presencia de líticos ni cristales, lateralmente continuas y con espesores de hasta 1 m (~20 cm en promedio); L4, toba cristalina con matriz vítrea, amarillentas y aparentemente masiva, con agregados esféricos de ceniza, cristales y huesos de mamíferos, con espesores que varían de 0,7-8,5 m. Hacia la base de los afloramientos, existen niveles de brecha monomítica (basáltica) con geometría lobular de hasta 4 m de espesor.

Los afloramientos al sur de Cerro Sombrero a lo largo de la carretera 257 (Fig. 8) se caracterizan por intercalaciones de L2, toba lítica oscura, arenosa, con estratificación cruzada, lateralmente discontinuas (lentes?) y con espesores mayores a los 0,5 m; L3 toba de ceniza, claras, sin líticos ni cristales apreciables a simple vista; L4, toba cristalina con matriz vítrea, amarillentas y aparentemente masiva, con lapillis acrecionarios, con espesores que varían de 0,5-1 m.

La edad de la formación ha sido considerada tradicionalmente Mioceno inferior sobre la base de restos de vertebrados santacruceses (*e.g.*, Hoffstetter *et al.* 1957). En su localidad tipo, Valeria *et al.* (2016) obtuvieron una edad de $19,3 \pm 0,8$ Ma (Burdigaliano, Mioceno inferior) para basaltos

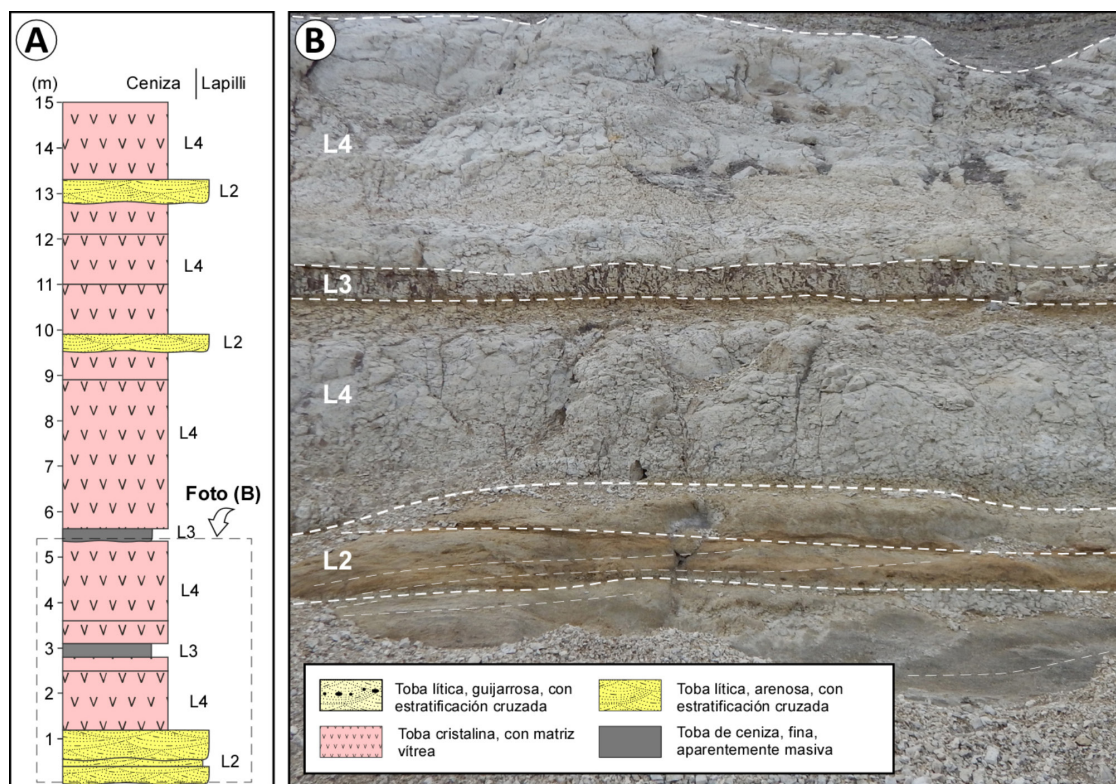


Figura 8. Columna (A) y afloramiento (B) de la Formación Palomares a lo largo de la carretera 257 en Tierra del Fuego. La litología dominante es volcanoclástica.

de la sección basal mediante el método K/Ar en roca total. Dos muestras seleccionadas para este trabajo, NG-3 en las adyacencias de su localidad tipo y NG-4 en Tierra del Fuego (Figs. 1 y 4), arrojaron respectivamente edades U-Pb en circones detríticos de $17,6 \pm 0,4$ Ma (Burdigaliano, Mioceno inferior) y $14,7 \pm 0,5$ Ma (Langhiano, Mioceno medio).

La topografía del área de estudio fue esculpida por glaciares cuaternarios que se movieron en sentido suroeste-noreste desde el Manto de Hielo Patagónico Sur hacia el margen Atlántico. Los procesos glaciales modificaron o destruyeron la geomorfología precedente resultando en estructuras y depósitos glaciofluviales que caracterizan la región en la actualidad (Figs. 1 y 8). El retroceso y derretimiento de varios lóbulos principales produjeron “cubetas” hidrográficas (*e.g.*, Senos Skyring y Otway, Estrecho de Magallanes y Bahía Inútil), separadas por planicies y lomas compuestas por una mezcla caótica de gravas y arenas con intercalaciones de arcillolitas; localmente ocurren varvas glaciares que indican un escenario lacustre. En el área de estudio, los depósitos glaciofluviales, tradicionalmente asignados a la Formación Cabo Negro por geólogos de ENAP, promedia los 50-150 m de espesor, pero pueden alcanzar hasta los 300 m localmente. De acuerdo con varios tipos de dataciones, estos depósitos son el producto de procesos glaciales entre 1100-450 ka. (*e.g.*, Darvill *et al.* 2014 y referencias incluidas allí). Los depósitos de Cabo Negro constituyen la principal unidad hidrogeológica de agua subterránea potable en la Región.

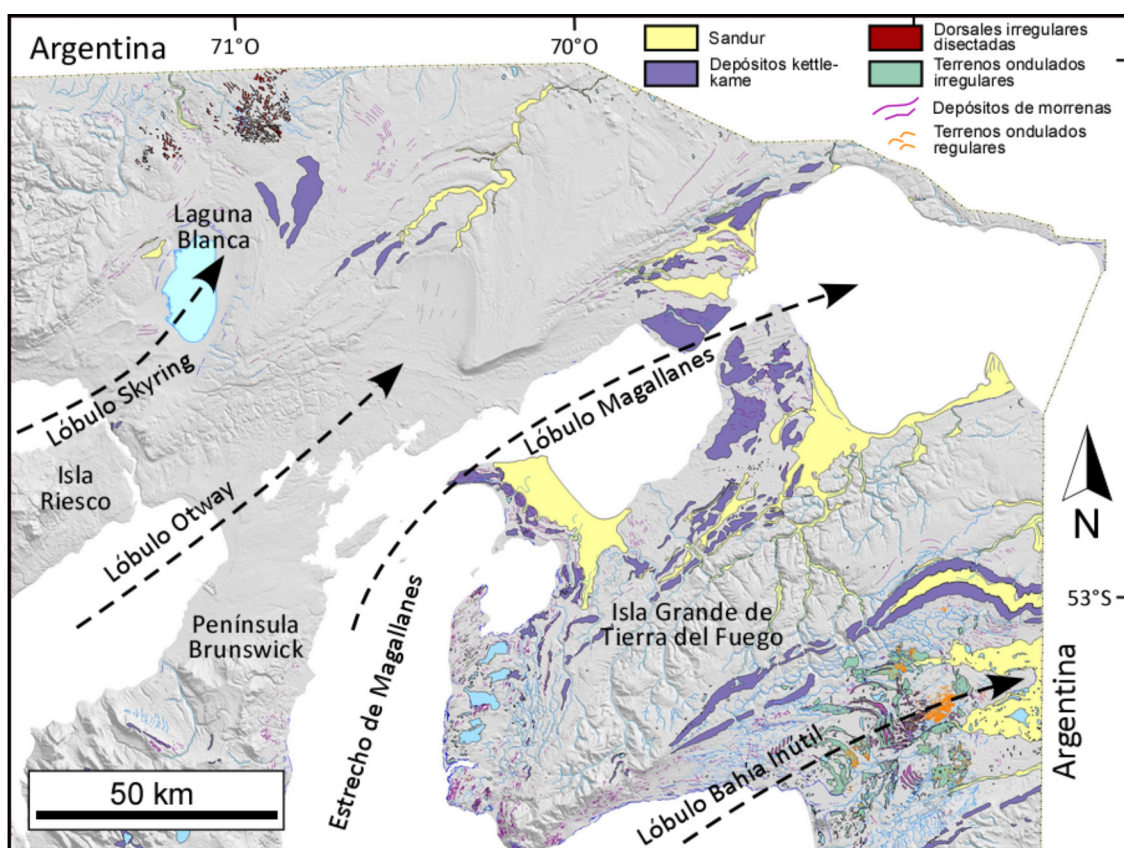


Figura 9. Mapa geomorfológico glacial mostrando cuatro lóbulos principales y varios tipos de estructuras y depósitos glaciofluviales en el área de estudio. Datos obtenidos a partir de Darvill *et al.* (2014).

Sistema	Serie	Unidad Estratigráfica	Unidad Hidroestratigráfica
Cuaternario	Holoceno	Cabo Negro	Acuíferos no confinados glaciofluviales
Neógeno	Mioceno	Palomares	Acuífero confinado de Palomares
		Arcilla Marina	Unidad confinante local (acuitardo)
		El Salto/Filaret	Potencial acuífero confinado El Salto-Filaret
Paleógeno	Oligoceno	Loreto/Brush Lake	Unidad confinante regional (acuitardo)

Figura 10. Nomenclatura propuesta para la subdivisión del sistema de acuíferos Oligoceno superior-Holoceno de la Cuenca de Magallanes en unidades hidroestratigráficas. En general, los intervalos acuíferos coinciden con unidades aloestratigráficas delimitadas en su base y tope por discontinuidades de carácter regional (ISSC 1994).

Considerando las características sedimentarias e hidráulicas, se propone subdividir el sistema de acuíferos de Magallanes en unidades hidroestratigráficas (Maxey 1964, Seaber 1988) (Fig. 10) que permitan a futuro mejores delineación y entendimiento de los intervalos más permeables, con la finalidad de establecer unidades de flujo discretas. Para esto es necesario integrar diferentes tipos de datos, que dentro de los más importantes resaltan como esenciales, un marco estructural

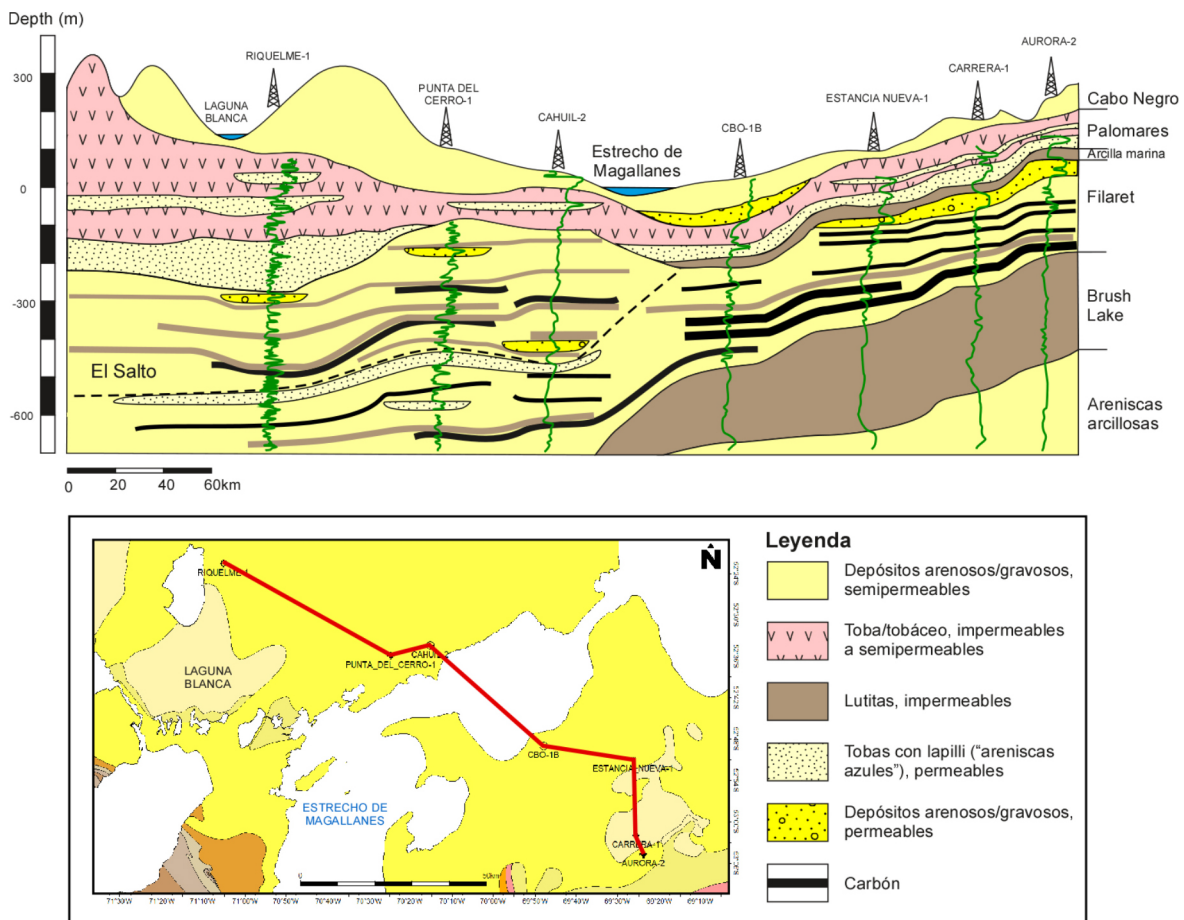


Figura 11. Sección geológica ilustrando la distribución y relaciones estratigráficas de las unidades que componen el principal sistema de acuíferos de Magallanes, formaciones El Salto/Filaret hasta los depósitos no consolidados glaciofluviales de la formación Cabo Negro. El registro de pozo (curva verde) es resistividad.

y estratigráfico confiable, que no solo considere los aspectos locales de los potenciales acuíferos, sino también regionales, como las relaciones temporales y geométricas (cambios de facies, compartimentación, etc.) entre sí o con intervalos impermeables que de una u otra manera pudieran influir tanto en su distribución espacial como en sus características hidrológicas y diagenéticas (Fig. 11).

En general, la topografía del lecho rocoso (*i.e.*, tope de la Fm. Palomares) se asemeja a la topografía superficial (Figs. 9, 11-12). En la porción continental, la elevación del lecho rocoso descende de aproximadamente 600 m en la parte occidental (Cerro Palomares) a -250 m en la parte oriental (Primera Angostura, Estrecho de Magallanes). En la Isla Tierra del Fuego, esta descende de unos 250 m en el sector meridional (Sierra Balmaceda) a -250 m hacia el norte, en Primera Angostura. La elevación del lecho rocoso por debajo del nivel del mar a lo largo del Estrecho de Magallanes probablemente esté vinculada con la depresión isostática causada por la carga del lóbulo Magallanes (Fig. 9) del último período glacial.

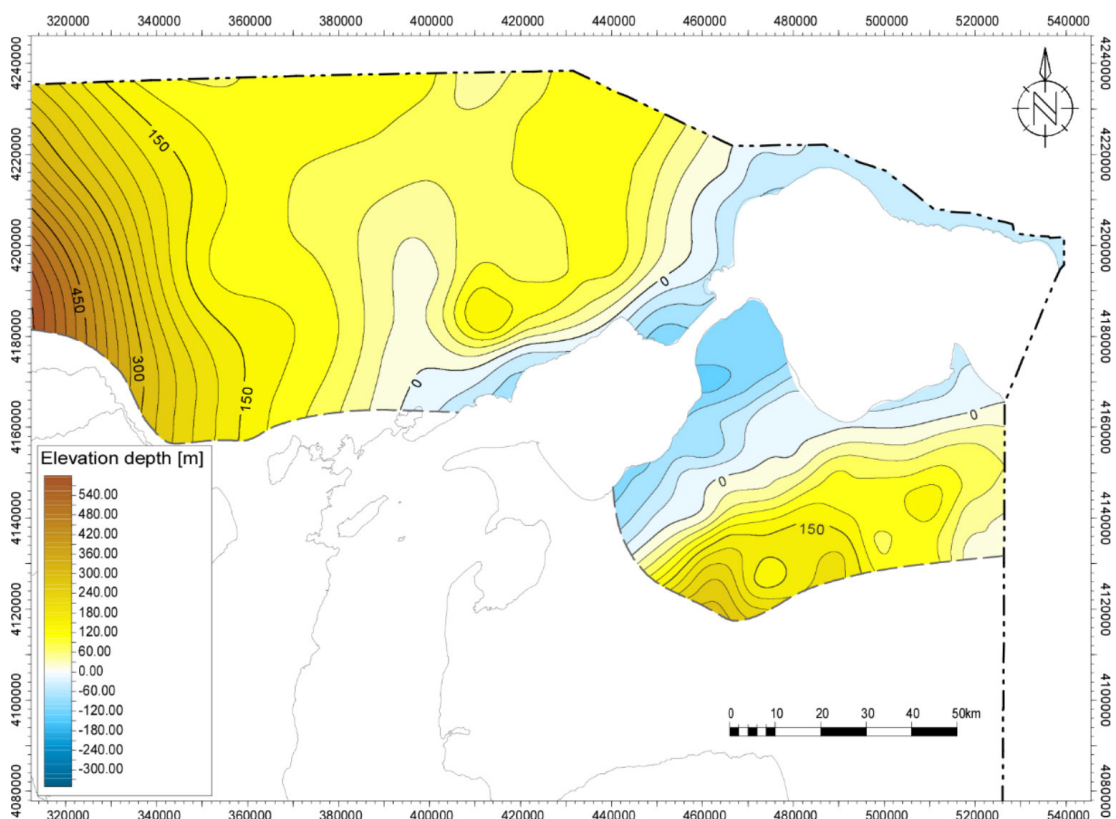


Figura 12. Mapa de elevación del lecho rocoso en las porciones septentrionales de las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego. El límite meridional del área de estudio (línea discontinua) coincide aproximadamente con el límite de ocurrencia de la Formación Palomares.

El espesor promedio de los depósitos glaciofluviales es de aproximadamente 100 m, aunque puede superar los 250 m en algunas partes del continente (Fig. 13).

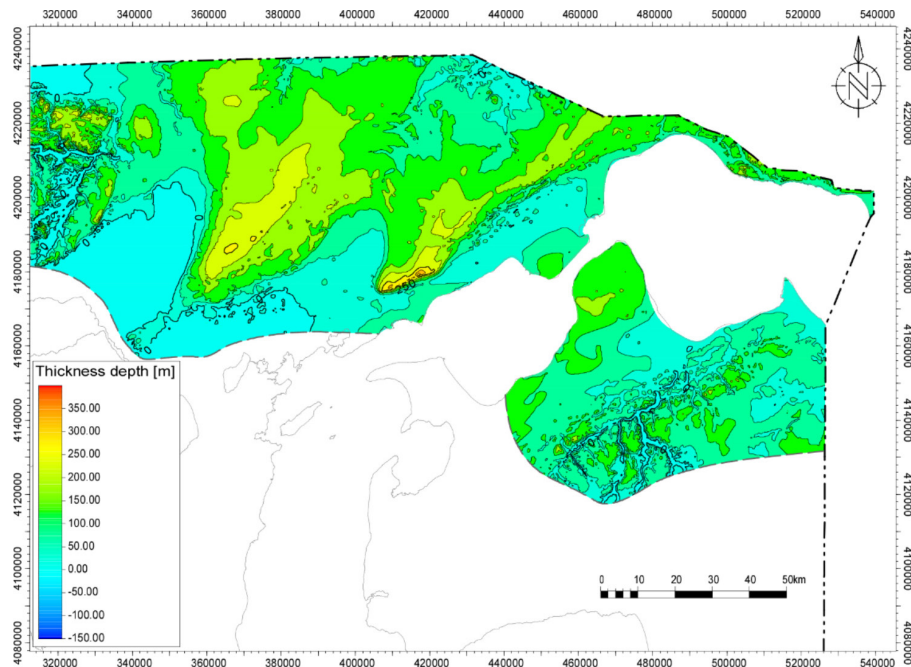


Figura 13. Mapa de espesor para el cuaternario en las porciones septentrionales de las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego. Valores negativos indican espesor por debajo del nivel del mar. El límite meridional del área de estudio (línea discontinua) coincide aproximadamente con el límite de ocurrencia de la Formación Palomares.

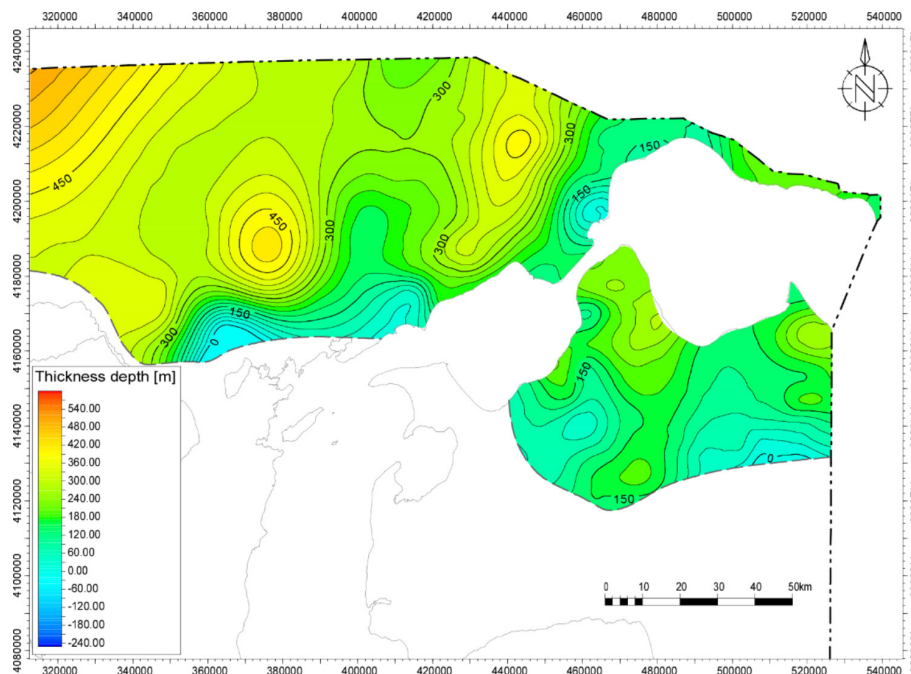


Figura 14. Mapa de espesor para Palomares en las porciones septentrionales de las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego. Valores negativos indican espesor por debajo del nivel del mar. El límite meridional del área de estudio (línea discontinua) coincide aproximadamente con el límite de ocurrencia de la Formación Palomares.

El espesor de la Formación Palomares promedia unos 120 m en las adyacencias del Estrecho de Magallanes, pero aumenta drásticamente en dirección noroeste en el área continental (Fig. 14).

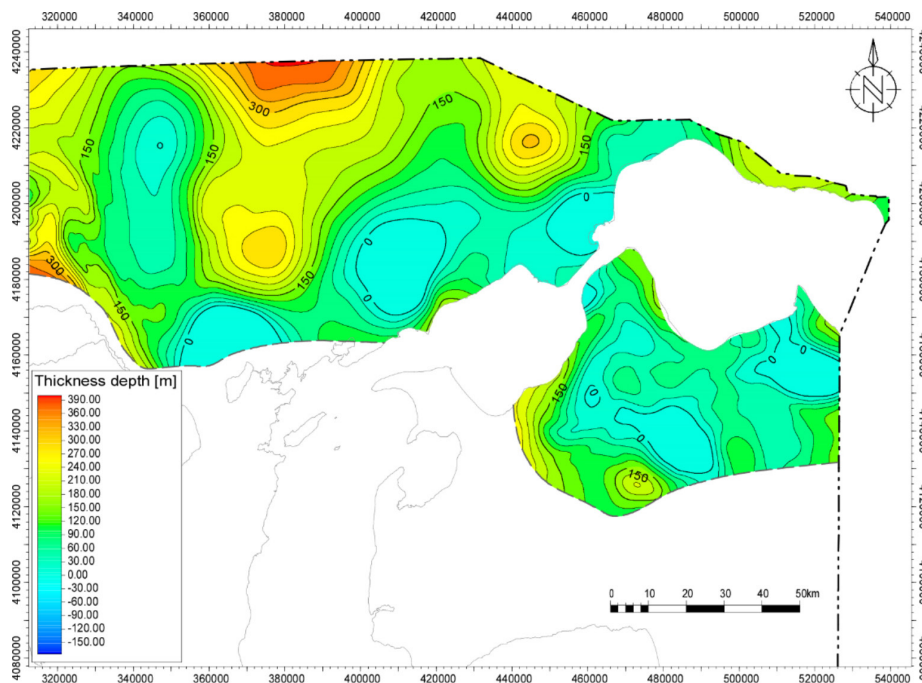


Figura 15. Mapa de espesor para las “areniscas azules” base de la Fm. Palomares en las porciones septentrionales de las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego. Valores negativos indican espesor por debajo del nivel del mar. El límite meridional del área de estudio (línea discontinua) coincide aproximadamente con el límite de ocurrencia de la Formación Palomares.

Aunque los depósitos de las formaciones El Salto y Filaret han mostrado potencial de acuíferos en algunas partes del área de estudio, las evaluaciones realizadas hasta ahora sugieren que el agua sería salobre a salada y por lo tanto no apta para actividades municipales y/o agrícolas. Los análisis químicos del agua obtenida a partir de varios pozos en el área de estudio indican que tanto los sedimentos glaciofluviales como la Formación Palomares contienen localmente agua dulce y potable de acuerdo con la norma chilena NCh 409/1 84 pero que en algunas partes podría contener elementos metálicos (*e.g.*, hierro) o cationes (*e.g.*, de sodio) que serían contraproducentes para el uso comunal (DGA 1991). De acuerdo con la DGA, esto pudiera explicarse debido al deterioro y aporte de hierro a partir de tuberías muy viejas o desgastadas y a la invasión del agua de mar proveniente del Estrecho de Magallanes. Lo último está ejemplificado en las figs. 12-15 donde se pueden observar varios puntos o zonas de probable infiltración de agua marina en áreas cercanas al estrecho de Magallanes. Hacia las zonas más elevadas y ubicadas al oeste y sur del área de estudio, las aguas parecen mostrar mejor calidad. Esta característica es esperable ya que las unidades hidroestratigráficas pueden estar expuestas a la superficie y comúnmente recargarse

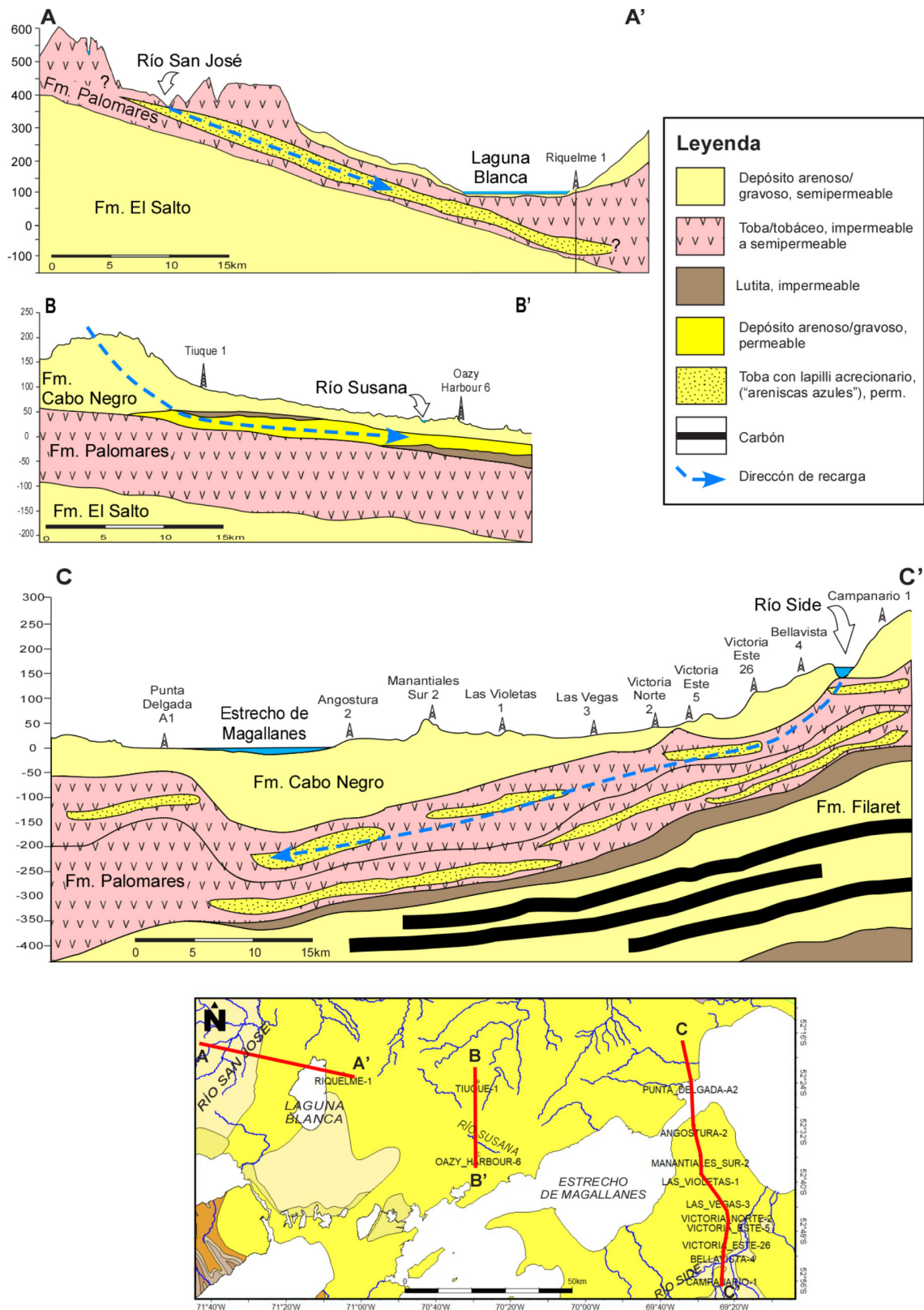
a partir de precipitaciones o derretimiento de nieve luego de la estación invernal (Fig. 16). En el sector de San Gregorio y sus adyacencias (Fig. 1) la ocurrencia de una estructura anticlinal causada por deformación trans-compresiva local sugiere un aislamiento estructural y probablemente estratigráfico entre las partes occidental y oriental del sistema hidrogeológico continental (Fig. 12). Además, hasta la fecha no se ha identificado acuífero alguno por debajo del lecho rocoso. En caso de ocurrir intervalos con potencial de acuífero probablemente contengan agua salobre y/o salina debido a que en parte el Cuaternario y su mayoría el intervalo con mejor potencial de acuífero de Palomares (*i.e.*, “areniscas azules”) se encuentran por debajo del nivel del mar.

Perspectivas en el Uso y Cuidado del Sistema de Acuíferos de Magallanes

De acuerdo con la última actualización de la información sobre el sistema de acuíferos de magallanes impulsada por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA 2016), el uso del agua subterránea se distribuye en casi un 50 % para el consumo humano y animal, 9 % para riego, 12 % para el uso industrial y el restante 28 % para otros usos, donde se destacan las operaciones energéticas y la piscicultura. Debido a la creciente demanda de agua y gas en la región, es crucial que la explotación y uso de ambos recursos vayan de la mano dentro de un marco de desarrollo económico sustentable. En consecuencia, durante los últimos años, tanto ENAP como los fiscalizadores gubernamentales han acordado impulsar políticas internas dirigidas a la protección del medio ambiente y los recursos de aguas subterráneas.

Aunque ENAP siempre ha mantenido una actitud consciente ante los pros y contras de la actividad petrolera en la Región, desde el 2014 junto a sus filiales extendió y actualizó la implementación de medidas para fiscalizar y evitar, o en su defecto mitigar y subsanar, cualquier impacto ambiental negativo de sus operaciones. Debido a que los hidrocarburos generalmente se encuentran por debajo del principal sistema de acuíferos, la protección de las aguas subterráneas comienza desde el momento de la perforación. La creciente producción a partir de yacimientos gasíferos no convencionales ha provocado una revisión y consideración adicional sobre potenciales contaminantes (*e.g.*, fluidos de perforación y de fracturamiento hidráulico, gas y/o agua recuperada).

Antes de cualquier otra actividad, unas de las tareas de perforación es garantizar la estabilidad de un pozo exploratorio o de extensión, *i.e.*, proteger las paredes del hoyo para evitar derrumbes y aislar manifestaciones de fluidos. Para ello los pozos son construidos siguiendo un esquema telescópico, con cañerías de revestimiento que disminuyen su diámetro en la medida que el pozo se vuelve más profundo. Esta medida, que considera un diámetro lo suficientemente ancho y seguro para las primeras decenas de metros de perforación, resulta de especial utilidad para aislar los acuíferos al momento de atravesarlos, evitando así el riesgo de colapso y, por ende, la pérdida de inversión y la potencial contaminación de los acuíferos. Las distintas etapas son revestidas con



cañerías de acero. El tramo más superficial, donde se encuentran los acuíferos de interés, cuenta con una cementación que rellena la totalidad del espacio anular formado entre la tubería y la pared del pozo. Para asegurar el adecuado aislamiento entre esta etapa y las más profundas, donde se encuentran los reservorios saturados en hidrocarburo, el diseño de la cementación involucra el traslape de estos sellos, de manera de obtener una doble cementación y dos revestidores de acero en la unión de las etapas de diferente diámetro. Adicionalmente, cada pozo perforado cuenta con un perfil de cementación (CBL-VDL-GR), que no es más que un registro acústico que permite verificar la integridad de la cementación y la disposición de las transiciones entre cañerías de distintos calibres. Este registro, además se utiliza para establecer los intervalos de punzados y estimulaciones de producción lejos de cualquier potencial acuífero en la columna estratigráfica atravesada. Finalmente, la configuración de las cañerías y su cementación, así como también la ocurrencia de potenciales acuíferos en el intervalo atravesado, es reportado a la autoridad ambiental para su conocimiento y catastro.

Por otra parte, los cálculos previos y el análisis posterior de decenas de operaciones de fracturamiento hidráulico tanto en continente como en la Isla Tierra del Fuego, indican que los eventos de fracturamiento ocurren a varios cientos de metros por debajo de cualquier acuífero somero y en donde las fracturas no se extienden más allá que de varias decenas de metros hacia arriba. Para cada operación de fracturamiento hidráulico se evitan posibles afectaciones a las aguas superficiales por medio de puntos de monitoreo en ríos, ubicados aguas abajo de los pozos sometidos a esta técnica. Los controles involucran la medición periódica de parámetros químicos que buscan establecer cualquier alteración de la calidad original de las aguas.

Desde el punto de vista geofísico, además de los registros tradicionales de pozos y el uso de ondas acústicas para la prospección de hidrocarburos, técnicas como la inducción electromagnética (utilizado por Arcadis en su reporte para el DGA del 2016) y el georadar podrían brindar un mejor panorama de lo que ocurre en el subsuelo, incluyendo el cartografiado de la mesa de agua (acuíferos no confinados) y otros rasgos subterráneos un poco más profundos imposibles de establecer de otra manera (Salako y Adepelumi 2018). La diferenciación de intervalos conductivos a resistivos utilizando métodos electromagnéticos transitorios (DGA 2016) es de gran importancia, no obstante, aún quedan interrogantes sobre la ocurrencia de agua dulce y unidades resistivas vs conductivas, además de la posibilidad de relacionar determinada respuesta con el contenido de arcillas, ya sean detríticas o diagenéticas. Otra variable para considerar en estudios futuros es la interfaz agua dulce-agua salobre y/o salada. De acuerdo con el informe del DGA (2016), los datos electromagnéticos indican que parte de las aguas salobres o saladas encontradas en algunos intervalos acuíferos ocurren preferentemente a lo largo del Estrecho de Magallanes, sugiriendo que, al menos localmente, agua salada del Estrecho está invadiendo los acuíferos artesianos por debajo del nivel de mar (Fig. 12). No se sabe con certeza la magnitud de este proceso, ni la escala horizontal o vertical en la que ocurre, y de hecho los autores desconocen cualquier estudio

o estimación formal al respecto, pero en estudios futuros no cabe duda de que debe ser una variable para considerar en cualquier modelo debido a las consecuencias negativas que pudiera traer desde la perspectiva social y agrícola. En general, cualquiera de las dos técnicas mencionadas anteriormente, o ambas, podrían usarse como sustitución y/o complemento de la sísmica de reflexión utilizada tradicionalmente por la exploración petrolera, lo que se traduciría en un mejor entendimiento de la heterogeneidad litológica y complejidad estratigráfica de los depósitos más someros, especialmente de los glaciofluviales.

En el ámbito petrofísico, hasta ahora no se cuenta con datos de porosidad y permeabilidad que permitan una mejor definición de los intervalos permeables o impermeables. Estos datos, junto con la interpretación de superficies importantes de discontinuidad se usarían como base para el refinamiento tanto del marco estratigráfico secuencial como de las unidades hidrogeológicas.

La integración de toda esta información resultaría en una mejor caracterización y cartografía del sistema de acuíferos de Magallanes, haciendo énfasis en las principales unidades hidroestratigráficas y sus componentes acuíferos y acuitardos.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Esta contribución presenta un nuevo esquema cronoestratigráfico para las tres unidades que conforman el Neógeno del área de estudio. De acuerdo con correlaciones regionales y los nuevos datos geocronológicos U-Pb en circones detríticos, la sucesión neógena yace discordantemente sobre rocas del Eoceno hacia el oeste y del Oligoceno hacia el este. Esta comienza al oeste con los depósitos continentales gruesos de la Formación el Salto que grada lateralmente a los depósitos más finos y marinos de la Formación Filaret hacia el este; ambas tentativamente asignadas aquí al Aquitaniano (Mioceno inferior), aunque no se descarta por completo la posibilidad de que la sedimentación haya comenzado en la parte más tardía del Chattiano (Oligoceno superior). Estas unidades son seguidas discordantemente por los depósitos transicionales a marinos de la Formación Palomares de edad principalmente Burdigaliano (Mioceno inferior) pero sin descartar la posibilidad que su sedimentación se haya podido extender hasta el Langhiano inferior (Mioceno medio). En general, las edades del Neógeno son ligeramente más jóvenes hacia el oeste, sugiriendo una dirección de aporte de sedimento y progradación hacia el sureste. Si estas edades son correctas, entonces existe un hiato muy significativo (ya sea por erosión o no deposición) de más de 10 millones de años de duración entre el Neógeno y los depósitos glaciofluviales del Holoceno.

La sucesión Neógeno-Holoceno constituye el principal sistema hidrogeológico de la Región de Magallanes. Este se puede dividir en dos contextos sobre la base de sus características hidro-lógicas y fisiográficas: (1) noroccidental, que ocupa la porción septentrional de la Provincia de Magallanes y (2) suroriental, en la parte norte de la Provincia de Tierra del Fuego. La capacidad de

producción de agua está relacionada con la recarga de este sistema, así como también a sus propiedades petrológicas, diagenéticas y petrofísicas. Es por esto que dentro de los datos más relevantes y necesarios para una estimación más precisa de los recursos hídricos subterráneos se encuentran las tasas y direcciones de flujos, transición de agua dulce a agua salobre/salada, estudios petrográficos de facies y procesos diagenéticos, refinamiento de propiedades como conductividad y transmisibilidad hidráulica, además de la extensión y heterogeneidad de las unidades hidrogeológicas.

Para mantener un balance entre la recarga y el consumo de agua subterránea en la Región, es necesario mantener una política dirigida a la actualización y obtención de nuevos datos sobre la disponibilidad de acuíferos y la demanda regional de agua. Organismos estatales como el DGA y ENAP han realizado esfuerzos en esta línea, con la finalidad de incrementar el acervo documental y la experiencia sobre la disponibilidad y calidad del agua subterránea en la Región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a las gerencias de ENAP Magallanes y SIPETROL por permitir la publicación de este trabajo y por brindar su invaluable apoyo en la logística y fondos para la adquisición de la información. También damos las gracias a Agustín Estivariz y José Paredes por sus revisiones y comentarios constructivos.

REFERENCIAS CITADAS

- Barwick, J.S., 1949. The Tertiary stratigraphy and structure of northern Tierra del Fuego. ENAP, Reporte Interno (inédito).
- Barwick, J.S., 1955. The surface stratigraphy of portions of Magallanes Province, Chile. ENAP, Reporte Interno (inédito), 96 p. + 14 figs.
- Bernhardt, A., Jobe, Z.R., Grove, M. and Lowe, D.R., 2012. Palaeogeography and diachronous infill of an ancient deep-marine foreland basin, Upper Cretaceous Cerro Toro Formation, Magallanes Basin, Basin Research, v. 24, p. 269-294.
- Biddle, K.T., Uliana, M.A., Mitchum Jr., R.M., Fitzgerald, M.G., and Wright, R.C., 1986. The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America, in Allen, P.A., and Homewood, P., eds., Foreland Basins. International Association of Sedimentologists, Special Publication 8, p. 41-63.
- Bruhn, R. L. y Dalziel, I.W.D., 1977. Destruction of the Early Cretaceous marginal basin in the Andes of Tierra del Fuego, en Talwani M., y Pitman, W. C., Ill, eds., Island arcs, deep sea trenches, and back-arc basins. American Geophysical Union, Maurice Ewing Series, v. 1, p. 395-406.
- Cortes, R., 1963. La Cuenca Artesiana de Laguna Blanca. ENAP, Reporte Interno (inédito).
- Cortés, R., Céspedes, S., Rodríguez, F. y Rivera, R., 1955. Levantamiento geológico del área Filaret-Río Chico, Tierra del Fuego. ENAP, Reporte Interno 01.0100.0010, 24 p. + 4 adjuntos y 2 figuras.

- Dalziel, I.W.D., 1981. Back-arc extension in the Southern Andes—a review and critical reappraisal. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 300, p. 319-335.
- Darvill, C.M., Stokes, C.R., Bentley, M.J. and Lovell, H., 2014. A glacial geomorphological map of the southernmost ice lobes of Patagonia: the Bahía Inútil-San Sebastián, Magellan, Otway, Skyring and Río Gallegos lobes. *Journal of Maps*.
- Decat, J. y Pomeyrol, R., 1931. Informe geológico sobre las posibilidades petrolíferas de la región Magallánica. *Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería*, v. 43, p. 763-772.
- DGA, 1991. Catastro y evaluación de los recursos hídricos subterráneos XII Región. Punta Arenas, Intendencia de la XII Región, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Magallanes y Antártica Chilena, 158 p.
- DGA, 2016. Actualización de información y modelación hidrológica, acuíferos de la XII Región, Magallanes y la Antártica. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Informe Definitivo Etapa II, 238 p.
- Dickinson, W.R. and Gehrels, G.E., 2009. U-Pb ages of detrital zircons in Jurassic eolian and associated sandstones of the Colorado Plateau—evidence for transcontinental dispersal and intraregional recycling of sediment. *Geological Society of America Bulletin*, v. 121, p. 408-433.
- Duhart, J., 1955. Cuenca artesiana en la parte NE de tierra del Fuego. ENAP, Reporte Interno (inédito), 6 p. + 6 figs.
- Fildani, A., Romans, B.W., Fosdick, J.C., Crane, W.H. y Hubbard, S.M., 2008. Orogenesis of the Patagonian Andes as reflected by basin evolution in southernmost South America, In Spencer, J.E. and Titley, S.R., eds., *Ores and orogenesis—Circum-Pacific tectonics-geologic evolution and ore deposits*. Arizona Geological Society Digest, v. 22, p. 259-268.
- Gallardo, A. 1963. Comentario geológico sobre el estado de los pozos perforados en Oazy Harbour. ENAP, Reporte Interno (inédito), 8 p. + 1 anexo.
- Gary, M., McAfee, R., Jr. and Wolf, C.L., 1972, *Glossary of geology*. Washington, D.C., American Geological Institute, 857 p.
- González, E., 1952. Levantamiento geológico estructural en el área de Estancia El Salto-sección Las Coles. ENAP, Reporte Interno (inédito), 30 p. + 2 anexos.
- González, E., 1953, Estratigrafía y distribución de los grupos El Salto y Palomares. ENAP, Reporte Interno (inédito), 53 p. + 7 figs.
- González, E., 1979a. El Agua Subterránea en el Área de Punta Delgada. ENAP, Informe Interno (inédito), 15 p.
- González, E., 1979b. El Agua Subterránea en Magallanes. ENAP, Informe Interno (inédito).
- González, E. y Cortés, R., 1953, Levantamiento geológico en la parte noreste de Tierra del Fuego. ENAP, Reporte Interno (inédito), 21 p. + 2 figs.
- Hoffstetter, R., Fuenzalida, H. y Cecioni, G., 1957. Chile, In *Lexique Stratigraphique International*. France, Centre National de la Recherche Scientifique, v. 5, 444 p.
- ISSC (International Subcommittee on Stratigraphic Classification) of IUGS International Commission on Stratigraphy, 1994. *International stratigraphic guide* (2d edition, Amos Salvador, ed.). Trondheim, Norway, International Union of Geological Sciences, and Boulder, Colorado, Geological Society of America, 214 p.
- Keidel, I. y Hemmer, A., 1931. Informe preliminar sobre las investigaciones en la región petrolífera de

- Magallanes en los meses de verano de 1928-1929. Boletín del Departamento de Minas y Petróleo, Ministerio de Fomento, p. 44-55.
- Malkowski, M.A., Sharman, G.R. and Graham, S.A., 2015. Characterization and diachronous initiation of coarse clastic deposition in the Magallanes-Austral foreland basin, Patagonian Andes. *Basin Research*, doi: 10.1111/bre.12150.
- Malumián, N., Hromic, T. y Náñez, C., 2013. El Paleógeno de la Cuenca de Magallanes–Bioestratigrafía y discontinuidades. *Anales del Instituto de la Patagonia*, v. 41, p. 29-52.
- Marshall, L.G., Drake, R.E., Curtis, G.A., Butler, R.F., Flanagan, K. and Naeser, C., 1986. Geochronology of type Santacrucian (Middle Tertiary) land mammal age, Patagonia, Argentine. *Journal of Geology*, v. 94, p. 449-457.
- Maxey, G.B., 1964. Hydrostratigraphic units. *Journal of Hydrology*, v. 2, p. 124-129.
- Mordojovich, C., 1950. Cuenca Artesiana en la Península Espora. ENAP, Reporte Interno (inédito).
- Natland, M.L., González, E., Cañón, A. and Ernst, M., 1974. A system of stages for correlation of Magallanes Basin sediments. *Geological Society of America, Memoir* 139, p. 1-126.
- Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P.Jr. and Jackson, J.A., 2011. Glossary of Geology. American Geosciences Institute, Fifth Edition, Revised, 800 p.
- Thomas, C.R., 1949. Geology and petroleum exploration in Magallanes Province, Chile. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 33, p. 1553-1578.
- Pankhurst, R.J., Riley, T.R., Fanning, C.M. and Kelley, S.P., 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and Antarctic Peninsula—chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana. *Journal of Petrology*, v. 41, p. 605-625.
- Pérez, A. 2014. Manifestaciones de agua subterránea en el bloque Arenal. ENAP, Reporte Interno (inédito). 18 p. + 7 anexos.
- Pérez, A. y Agurto, C., 2016. Posibilidad de agua subterránea en Dorado-Riquelme y Coirón. ENAP, Reporte Interno (inédito), 75 p.
- Poland, J.F., Lofgren, B.E. and Riley, F.S., 1972. Glossary of selected terms useful in studies of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal. US Geological Survey Water-Supply Paper 2025, (USGS, Wash., D.C. 1972).
- Romero, G. 1986. Posibles alternativas de agua potable subterránea para Posesión. ENAP, Reporte Interno (inédito), 3 p.
- Salako, A.O., and Adepelumi, A.A., 2018. Aquifer, classification, and characterization, In Javaid, M.S., ed., *Aquifers–Matrix and Fluids*, Open access peer-reviewed edited volume, DOI 10.5772/intechopen.69070.
- Seaber, P.R., 1988. Hydrostratigraphic units, in, Back, W., Rosenschein, J.R. and Seaber, P.R., *Hydrogeology–The Geology of North America*. Geological Society of America, Volume O-2, pp. 9-14.
- Sharp, J.M., Jr., 2007. A glossary of hydrogeological terms. The University of Texas, Austin, Texas, 63 p.
- Tauber, A., 1997a. Paleoeología de la Formación Santa Cruz (Mioceno Inferior) en el extremo sudoeste de la Patagonia. *Ameghiniana*, v. 34, p. 517-529.
- Tauber, A., 1997b. Bioestratigrafía de la Formación Santa Cruz (Mioceno inferior) en el extremo sudoeste de la Patagonia. *Ameghiniana*, v. 34, p. 413-426.
- Thomas, C.R., 1949. Geology and petroleum exploration in Magallanes Province, Chile. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v.

- 33, p. 1553-1578.
- Valeria, A., Vásquez, C. y Barra, C. 2016. Informe de datación radiogénica K-Ar No. 019/2016. Unidad de geología isotópica, Departamento de Laboratorios Servicio Nacional de Geología y Minería, inédito. 3 p.
- Velázquez, A., 2016. Condiciones depositacionales de la Formación Palomares, XII Región de Magallanes. Memoria para optar al título de geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Vermeesch, P., 2018. Isoplot R—a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, v.9, p. 1479-1793.
- Wilson, T.J., 1991. Transition from back-arc to fore-land basin development in the southernmost Andes—stratigraphic record from the Última Esperanza District, Chile. *Geological Society of America, Bulletin*, v. 103, p. 98-111.
- Winslow, M.A., 1982. The structural evolution of the Magallanes basin and neotectonics in the southernmost Andes. *Antarctic Geosciences*, 3rd symposium on Antarctic geology and geophysics, Madison, University of Wisconsin Press, p 143-154.
- Zapata, S., 1982. Características de los depósitos cuaternarios y su potencial acuífero en zona campamento Cullen. ENAP, Informe Interno (inédito), 3 p.

