

CARACTERIZACIÓN DE SECUENCIAS PRECUYANAS EN EL YACIMIENTO RANQUIL CO, BLOQUE AL SUR DE LA DORSAL, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA

Romina Banco¹, Diego Lenge¹

1: Oilstone Energía S.A. rbanco@oilstone.com.ar, dlenge@oilstone.com.ar

Palabras clave: Imágenes Resistivas, Electrofacies, Árbol de Decisión, Rocas Volcánicas

ABSTRACT

The Precuyano Cycle is one of the most heterogeneous stratigraphic records corresponding to the rifting stage evolution of the Neuquén Basin. Each volcanic-sedimentary depocenter has infill particularities and because of that, it is necessary to apply several methodologies in order to describe it properly. In this paper, we analyzed the Precuyo stratigraphic succession in the Ranquil Co Field employing cutting and petrographic description, logging and resistivity images in the attempt to achieve a methodology that is known as a decision tree. This was a useful method to identify different volcanic rock and depositional patterns in those wells in which there is a lack of information. The conjunction of this study with the seismic interpretation allows describing in detail the Precuyano Cycle in this depocenter.

INTRODUCCIÓN

El Ciclo Precuyano es una de las unidades más heterogéneas de la Cuenca Neuquina, por lo que en cada hemigraben es necesario un análisis particular y detallado para comprender no solo la naturaleza de su relleno, sino también la manera en que los procesos postdeposicionales influyeron en la calidad de las rocas. En la literatura se encuentran numerosos trabajos que tratan la complejidad de estos reservorios volcánicos mediante diversas metodologías con el fin de caracterizarlos apropiadamente (Valenzuela *et al.* 2005, Huang y Pan 2004, Gaillot *et al.* 2007, Pángaro *et al.* 2009, Watton *et al.* 2014, Barrionuevo 2015, Duan *et al.* 2020, entre otros).

En el presente trabajo se analizará una amplia base de datos entre las cuales se destacan petrografía de recortes de perforación y testigos laterales, perfiles eléctricos e imágenes resistivas provenientes del yacimiento Ranquil Co, con el fin de elaborar una metodología que permita establecer el modelo geológico de la zona. Dicho yacimiento se encuentra dentro de la concesión Al Sur de la Dorsal (I), y se encuentra a 18 km al sur de la ciudad de Cutral Co, limitando al este

con las áreas Puesto Roa y Dos Hermanas, al norte con el bloque Cutral Co Sur y al oeste con el área de Puesto Cortadera (Fig. 1).

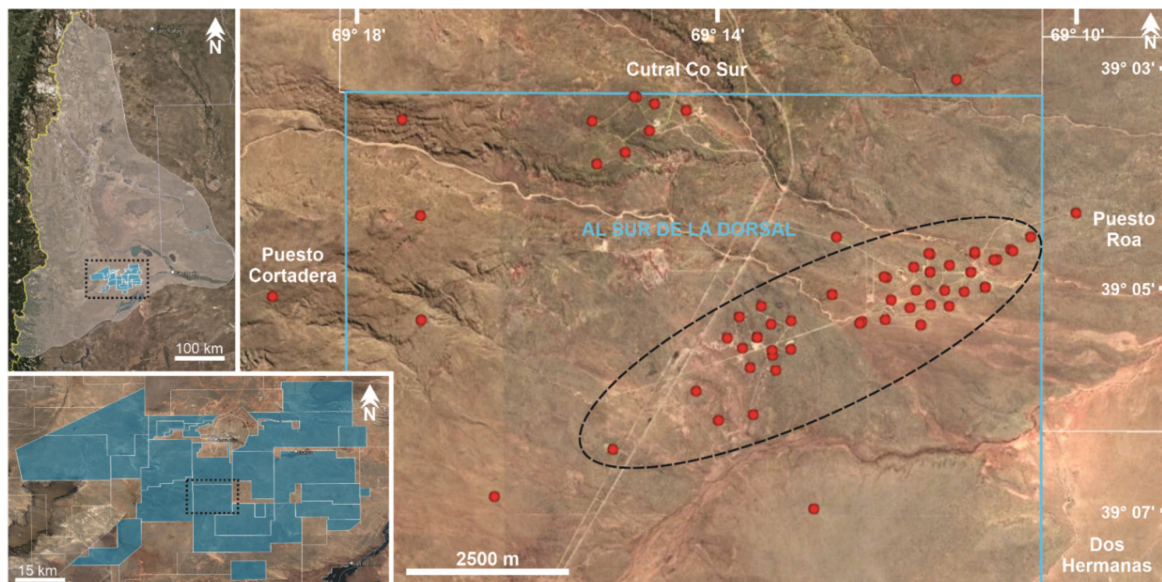


Figura 1. Ubicación del área del yacimiento Ranquil Co en el bloque Al Sur de la Dorsal.

HISTORIA DEL YACIMIENTO

Los primeros esfuerzos exploratorios fueron realizados por YPF en el año 1954, con la perforación del pozo RC.x-1 en lo alto de una estructura anticlinal reconocida en sísmica 2D. El sondeo fue abandonando por improductivo, y recién en el año 1966 YPF dio inicio a una segunda etapa exploratoria con el objetivo de analizar la sección inmediatamente inferior a la base de la Fm. Vaca Muerta, perforando cuatro pozos (RCO.x-2, RCO.x-3, RCO.x-4 y RCO.x-5) en los flancos de la estructura principal. El único que resultó descubridor de petróleo de la denominada Zona de Relleno (actualmente Fm. Quebrada del Sapo) fue el RCO.x-3, perforado en una estructura aislada, con cierre en tres direcciones contra falla.

A partir del año 2000, Pioneer Natural Resources (Argentina) S.A. luego de la adquisición de la sísmica 3D, comenzó la exploración de niveles profundos de la Fm. Lajas, la Fm. Los Molles y el Ciclo Precuyano, y en el año 2005 se perforó con éxito el pozo RCO.a-1007, descubriendo gas y condensados de las secuencias precuyanas. Con estos descubrimientos, entre los años 2006 y 2014, la compañía Apache Petrolera Argentina S.A. inició el desarrollo de la estructura profunda con la perforación de 25 pozos, en el marco del Proyecto “Gas Deep”.

A partir del año 2014, el área comienza a ser operada por YSUR, más tarde YPF, quienes perforan los últimos 3 pozos. Finalmente, en el año 2019, el bloque fue adquirido por Oilstone Energía S.A.

Actualmente los pozos productivos de secuencias precuyanas tiene una producción acumulada de 147.000 m³ de petróleo, 1.830 Mm³ de gas y 54.000 m³ de agua (Fig. 2).

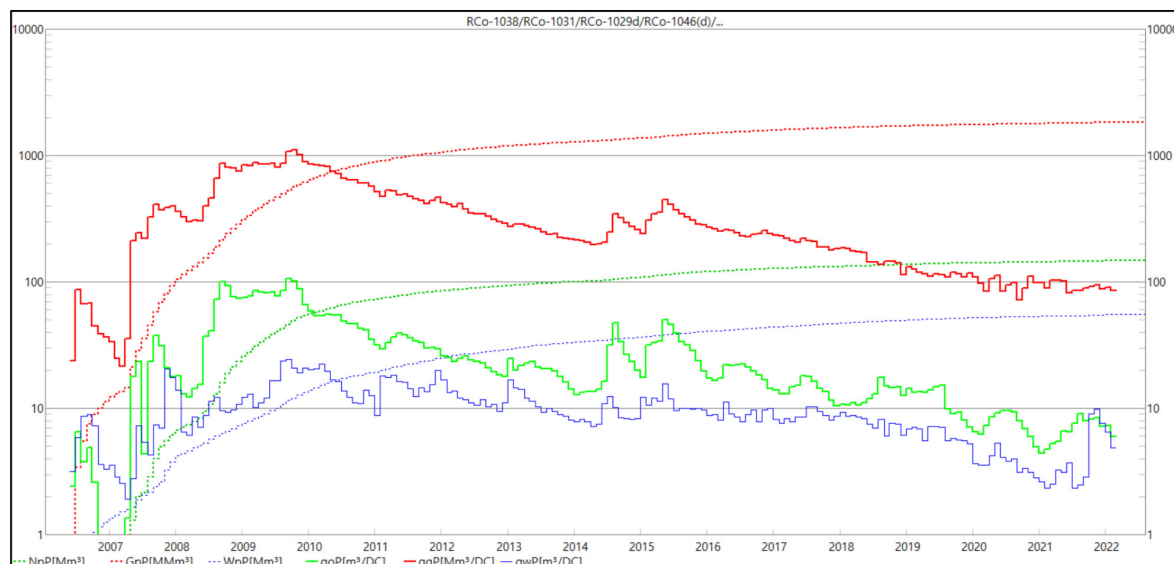


Figura 2. Historia de producción de los pozos con objetivo a los reservorios precuyanos.

CONSIDERACIONES TECTONO-ESTRÁTIGRAFICAS

Estratigrafía

La columna estratigráfica (Fig. 3) comienza con los depósitos del Ciclo Precuyano (etapa de synrift) desarrollados sobre un basamento (*pre rift*) datado en 284 +/- 1.3 Ma y 286.5 +/- 2.3 Ma en muestras de granodioritas y andesitas respectivamente (Pángaro *et al.* 2009). El Precuyano en general se compone de depósitos volcánicos, piroclásticos y/o volcanoclásticos, presentando así una fuerte afinidad volcánica. Es por ello que, debido a su génesis, cada hemigraben necesita de un estudio detallado para comprender la naturaleza de su relleno. Numerosas publicaciones han descripto y analizado sus secuencias, como por ejemplo las publicadas por Pángaro *et al.* (2002), Valenzuela *et al.* (2005), Pángaro *et al.* (2009), D'Elia *et al.* (2012), Barrionuevo y Lenge (2018), entre otras.

En la zona de la Dorsal de Huincul, la edad de estos depósitos está acotada por dataciones radimétricas, mostrando en los yacimientos de Anticlinal Campamento y Guanaco edades de 199 +/- 1.5 y 203 +/- 0.75 Ma (Schiuma y Llambías 2008), y 210 y 196 Ma en la zona del Cerro Chacaico (Bermúdez y Delpino 2002). A su vez, de manera particular para algunos de estos yacimientos ubicados en la Dorsal de Huincul, incluido el de Ranquil Co, Sisinni *et al.* (2011), describen que en los hemigrabenes más grandes, los sectores profundos muestran un mayor

contenido de rocas volcanoclásticas y sedimentarias, mientras que a la base y sobre los bordes de los mismos se han documentado mayores cantidades de lavas y brechas.

Sobre los depósitos precuyanos se desarrolla la Fm. Los Molles, la cual representa la primera ingresión marina de la cuenca, y su depositación ocurrió durante la etapa de *synrift* tardío a *post-rift* (Vergani *et al.* 1995, Veiga *et al.* 2001). Esta última, en conjunto con las facies deltaicas y litorales de la Fm. Lajas y las facies continentales de alta energía de la Fm. Challaco conforman un sistema depositacional complejo, que constituyen al Gr. Cuyo. El Gr. Lotena por su parte, está representado en la zona de estudio por la Fm. Lotena, mientras que el Gr. Mendoza se encuentra constituido por las formaciones Quebrada del Sapo/Tordillo, Vaca Muerta, Quintuco y Centenario. En discordancia, aparecen los depósitos continentales del Gr. Neuquén y por último los depósitos del Terciario y Cuaternario.

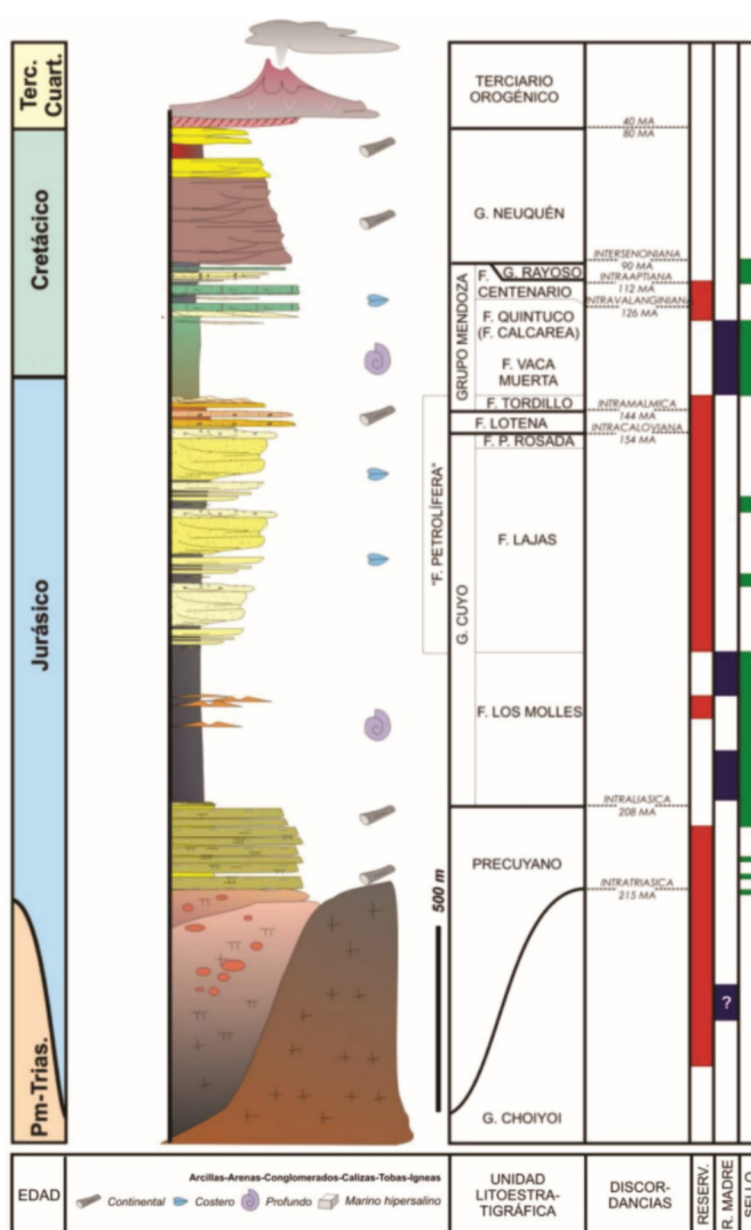


Figura 3. Columna estratigráfica de la zona de estudio (tomado de Brisson 2005, en Jorgensen *et al.* 2013)

Estructura

El yacimiento Ranquil Co se ubica dentro de la región morfoestructural de la Dorsal de Huincul (Fig. 4A). En diversas contribuciones científicas se han descriptos los estilos estructurales y los procesos involucrados en la generación de dichas estructuras. En este caso particular, la estructura pertenece a uno de los seis lineamientos que se desarrollaron en dirección NE-SO, el cual junto al de La Esperanza, Divisadero, Portezuelo Minas, Cutral Co Sur y Cerro Bandera, son asociados a fallas inversas de basamento con rechazo vertical, de poco desplazamiento de rumbo y con vergencia hacia el sureste (Silvestro y Zubiri 2008). La estructura en sí misma es un pliegue por propagación de falla, con cierre en tres direcciones, con flanco posterior (norte) de buzamiento relativamente suave y con su flanco frontal (sur) con buzamiento más abrupto (Fig. 4B), generado por procesos de inversión tectónica (Vergani *et al.* 1995, Silvestro y Zubiri 2008).

Sistema petrolero

En el área de estudio, hasta el momento, no se han registrado rocas con potencial oleogénico dentro del Ciclo Precuyano, y su vez, lamentablemente, no se han realizado análisis que permitan determinar el origen, tiempo y forma en el que se cargó el reservorio precuyano (Sisinni *et al.* 2011). Aún así, se asume a la Fm. Los Molles como roca generadora, aunque hasta la fecha no se han localizado facies ricas en materia orgánica con un nivel de maduración acorde en las cercanías a la zona. Dado que dicha unidad se encuentra en ventana de generación de

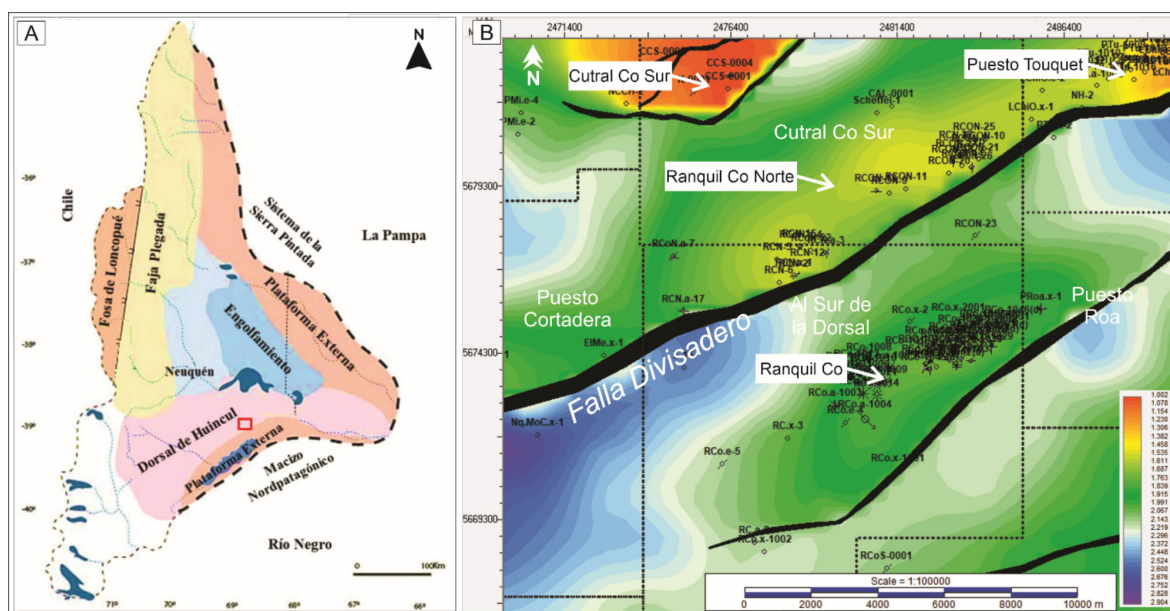


Figura 4. A) Regiones morfoestructurales y la ubicación de la zona en rojo (tomado de Alonso, *et al.* 2011). B) Mapa isócrono al tope del Ciclo Precuyano.

petróleo sobre el yacimiento, y que el mismo es esencialmente gasífero, habría que considerar una migración larga tanto lateral, a través de *carriers*, y vertical a través de las fallas.

METODOLOGÍA

El estudio se realizó utilizando datos de cinco pozos, que incluyen petrografía sobre recortes de perforación y testigos laterales, imágenes resistivas y perfiles eléctricos. El análisis integral de estos datos permitió construir un modelo de electrofacies, capaz de ser replicado en el resto de los pozos del yacimiento.

Desde el punto de vista litofacial, se identificaron tres grupos: lavas, rocas piroclásticas y rocas sedimentarias. El primero y más importante lo constituyen las lavas y brechas de composición andesítica, con menor participación de lavas basálticas y dacíticas. Al analizar sus arreglos texturales en las imágenes resistivas para caracterizar el arreglo y las variaciones texturales, y los contactos entre los cuerpos identificados a partir de los perfiles convencionales, se identificaron cuatro patrones diferentes: (a) brechosa, (b) masiva con grado variable de fracturamiento, (c) vesicular/amigdaloides y (d) geoformas compatibles con posibles lavas en almohadilla.

Una vez definidos los distintos arreglos texturales, se analizó su respuesta en perfiles eléctricos mediante el uso de *crossplots* (rayos *gamma*, resistividad profunda, densidad y tiempo de tránsito), para finalmente establecer las características para cada electrofacies. Con estos datos, se construyó un “árbol de decisiones”, que permitió distinguir con éxito, en primera instancia, lavas andesíticas de tobas, pudiéndose acotar dentro de las lavas los intervalos de lavas andesíticas brechadas, lavas masivas y/o en almohadilla y lavas con amígdalas.

Una vez ajustados los cinco pozos llave, se realizó la extrapolación a aquellos pozos sin análisis específicos, para finalmente caracterizar con datos de pozos a las cinco secuencias identificadas en el dato sísmico. Este método permitió identificar con menor incertidumbre las zonas de interés y al mismo tiempo poblar con datos de alta calidad el modelo geológico en construcción.

RESULTADOS

Litofacies

De acuerdo a los estudios de petrografía sobre recortes de roca y sobre testigos laterales se han distinguido tres facies principales: lavas, rocas piroclásticas y rocas sedimentarias.

Lavas

De acuerdo a su composición y arreglo textural se han reconocido tres litofacies: lavas de composición andesítica, lavas brechadas de composición andesítica y por último lavas basálticas,

las cuales poseen escasa representación. En general, las lavas andesíticas presentan textura porfírica (Fig. 5A) y están compuestas de fenocristales tabulares de plagioclasas, maclados y con zonación, inmersos en pastas con texturas pilotácicas, y en ocasiones traquíticas, con abundantes microlitos de plagioclasas y material vítreo cloritizado o desvitrificado subordinado. Es común la presencia de plagioclasas parcialmente alteradas a arcillas y cloritas, y con menor frecuencia se observan reemplazos parciales de calcita. A su vez, es usual la presencia de amígdalas parcialmente rellenas con prehnita, zeolitas, epidoto, cuarzo microcristalino, calcita y en ocasiones bitumen.

En el caso de las brechas, están compuestas de fragmentos de rocas volcánicas andesíticas, similares a las previamente descritas, inmersos en una matriz fina compuesta de fragmentos angulares/subangulares de andesitas, plagioclasas y escaso cuarzo (Fig. 5B). Los clastos de andesitas presentan texturas porfíricas con fenocristales de plagioclasas, inmersos en una pasta con textura intersertal y pilotácica. El tamaño de dichos clastos de andesitas oscila entre 2 mm a 20 mm. En dos pozos se han reconocido texturas perlíticas asociadas a estos niveles.

Por último, las lavas basálticas solo fueron reconocidas en un solo pozo. Las mismas presentan textura porfírica y con fenocristales de cristales de plagioclasas alteradas y escasos relictos de minerales máficos (probablemente piroxenos). La pasta es vítrea, pudiéndose reconocer microlitos de plagioclasas y abundantes minerales opacos, en ocasiones orientados. Se han observado amígdalas rellenas con calcita y otras rellenas con cuarzo microcristalino y zeolitas.

Rocas piroclásticas

En las descripciones realizadas durante el control geológico, se reconocieron niveles tobáceos, abundantes en el sector medio superior del Gr. Precuyo. Al analizar las secciones delgadas de los recortes de perforación en conjunto con los testigos laterales se observó que predominan tobas vítreas, según la clasificación de Pettijohn *et al.* (1987). En promedio, se componen de 83.3% de material vítreo con trizas parcialmente desvitrificadas, 11.7% de cristaloclastos de plagioclasas y cuarzo, y 5% de litoclastos de fragmentos de andesitas (Fig. 5C).

Como particularidades se puede mencionar que en solo una muestra de recortes de perforación se observó la presencia de fiammes, las cuales son asociadas a tobas soldadas o ignimbritas. A su vez en un sondeo, se registraron tobas con cristaloclastos y material vítreo con componentes bioclásticos, entre los que se destacan fragmentos de valvas, equinodermos, espículas de esponjas y foraminíferos (Fig. 5D).

Rocas sedimentarias

En todos los pozos del yacimiento se reconocieron rocas siliciclásticas, con menor participación de rocas carbonáticas. En general las rocas sedimentarias predominan en la sección superior del Gr. Precuyo, pero en ocasiones particulares, han sido descritas como intercalaciones

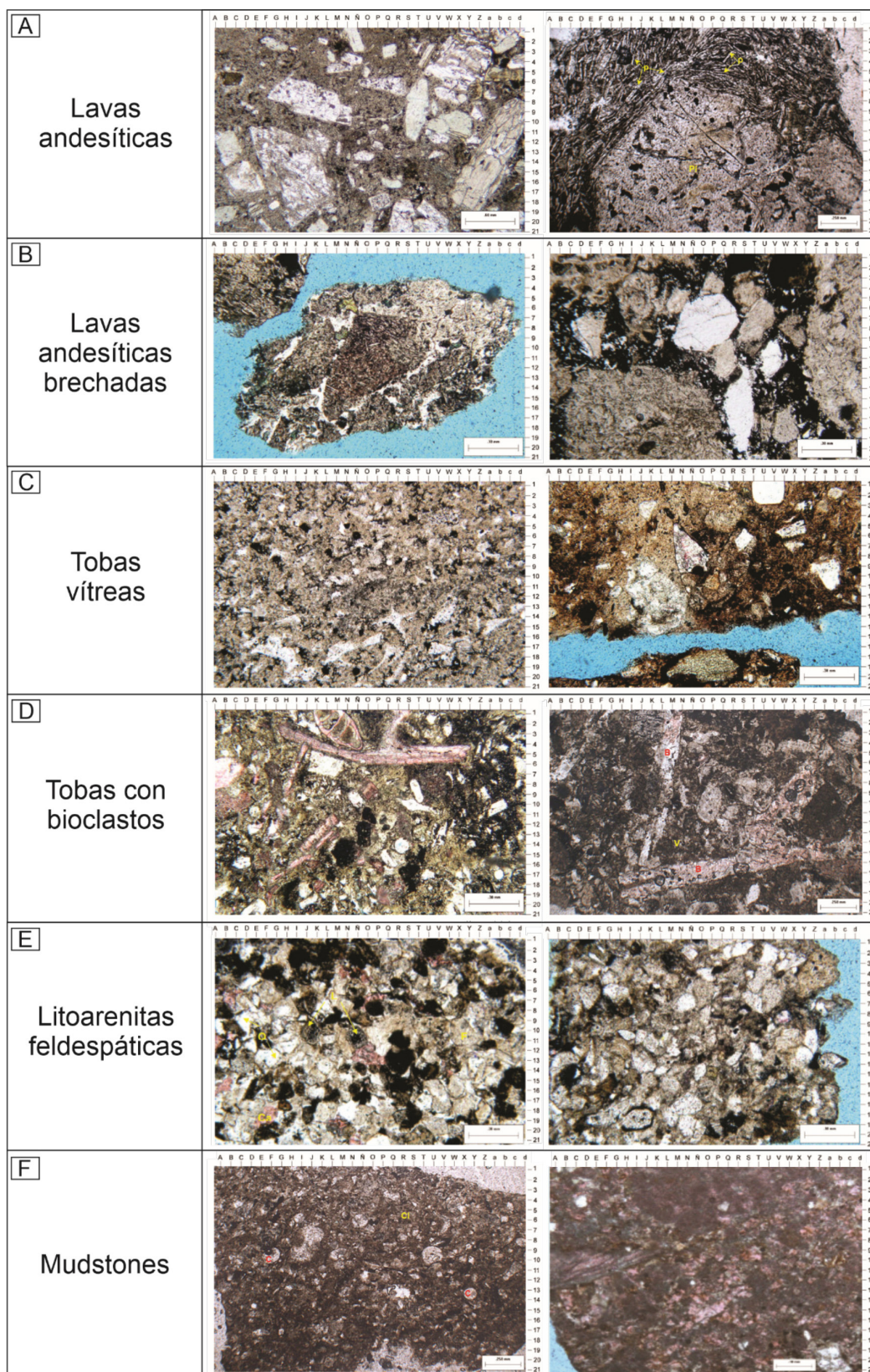


Figura 5. Análisis petrográficos. A) Lavas andesíticas. B) Lavas andesíticas brechadas. C) Tobas vítreas. D) Tobas con bioclastos. E) Litoarenitas feldespáticas. F) Mudstones.

dentro de las sucesiones volcánicas y piroclásticas. En orden relativo de abundancia, aparecen niveles de areniscas y areniscas tobáceas, pelitas con componentes tobáceos, mudstones con y sin componentes tobáceos.

Según los análisis realizados, las areniscas fueron clasificadas como litoarenitas feldespáticas de acuerdo a la clasificación de Folk (1974) (Fig. 5E). Las mismas poseen amplio desarrollo en el sector superior del Gr. Precuyo y están compuestas por 87% de clastos, de los cuales el 67% son líticos en su mayoría de origen volcánico y volcanoclástico, con escasos bioclastos de equinodermos, 30% de feldespatos y solo 6% de cuarzo. La proporción de matriz en baja (8%) con presencia de minerales argílicos recrystalizados, y cemento calcítico escaso (5%). El caso de los mudstones es llamativo, ya que los mismos fueron reconocidos en las sucesiones con predominio de lavas, con menor participación de componentes tobáceos. Los mismos se componen de una matriz calcimicrítica (95%), parcialmente recrystalizada a esparita, con menor participación de bioclastos (5%), entre los que se reconocieron valvas de pelecípodos y ostrácodos silicificados (Fig. 5F). Es frecuente la aparición de microestilolitas rellenas de óxidos.

Interpretación de imágenes resistivas de pozo

A pesar de la falta de datos de coronas, el uso de perfiles de imágenes resistivas permitió reconocer diferentes texturas en los litotipos definidos. Para el caso de las lavas, se destaca la presencia de texturas masivas con variable grado de fracturamiento, vesiculares/amigdaloides, brechosas y por último las lavas en almohadilla. En cuanto a las rocas piroclásticas, es común el desarrollo de bandeamiento/estratificación, al igual que en las rocas sedimentarias.

Tobas

Las facies tobáceas en general poseen resistividades moderadas a bajas, salvo alguna excepción relacionada al contenido de hidrocarburos. Como rasgo característico es posible apreciar un bandeamiento a través del cual es posible individualizar distintas capas (Fig. 6A). Los límites entre ellas son netos y los espesores observados son variables, identificando capas de 10 cm hasta 2 m de potencia. En cuanto al arreglo textural, las capas de mayor potencia aparecen como paquetes masivos, con algunas intercalaciones menores, dando como resultado una laminación.

Lavas de aspecto masivo con fracturamiento variable

Para el caso de las lavas de aspecto masivo, no es posible identificar ninguna textura por la falta de un contraste de resistividades en estas rocas. Se presentan como paquetes altamente resistivos de espesor variable, que pueden alcanzar los cinco metros de potencia. El único rasgo distinto es la aparición de fracturas conductivas o resistivas, de acuerdo al tipo de relleno

que pudieran albergar (Fig. 6B). Es frecuente que dichos paquetes graden transicionalmente a otras texturas aquí descritas. En los análisis petrográficos sobre recortes de perforación se observaron texturas traquíticas.

Lavas con texturas vesiculares/amigdaloides

Las lavas con texturas vesiculares/amigdaloides se registraron en un solo sondeo (imagen FMI), pero las mismas poseen particular importancia ya que constituyen unas de las facies que registraron producción de hidrocarburos. Estas lavas se presentan como intervalos resistivos, con geoformas irregulares de límites curvos y halos conductivos (Fig. 6C). A partir del estudio petrográfico sobre los recortes de perforación, se reconocieron amígdalas rellenas con prehnita en este sector. Los contactos de estos paquetes en general son netos, aunque también se han observado contactos transicionales esporádicos.

Lavas andesíticas brechadas

Las lavas con textura brechosa constituyen el principal reservorio del Gr. Precuyo en el yacimiento Ranquil Co, pudiendo ser reconocidas en muestras de control geológico, testigos laterales y en las imágenes resistivas. Los niveles se caracterizan por su alta resistividad, siendo esta una característica intrínseca a la litología, como así también relacionada al elevado contenido de hidrocarburos. En general las bases de estos depósitos son netas y pueden alcanzar espesores de hasta decenas de metros. El tamaño de los fragmentos que las componen pueden alcanzar hasta 70 cm (Fig. 6D).

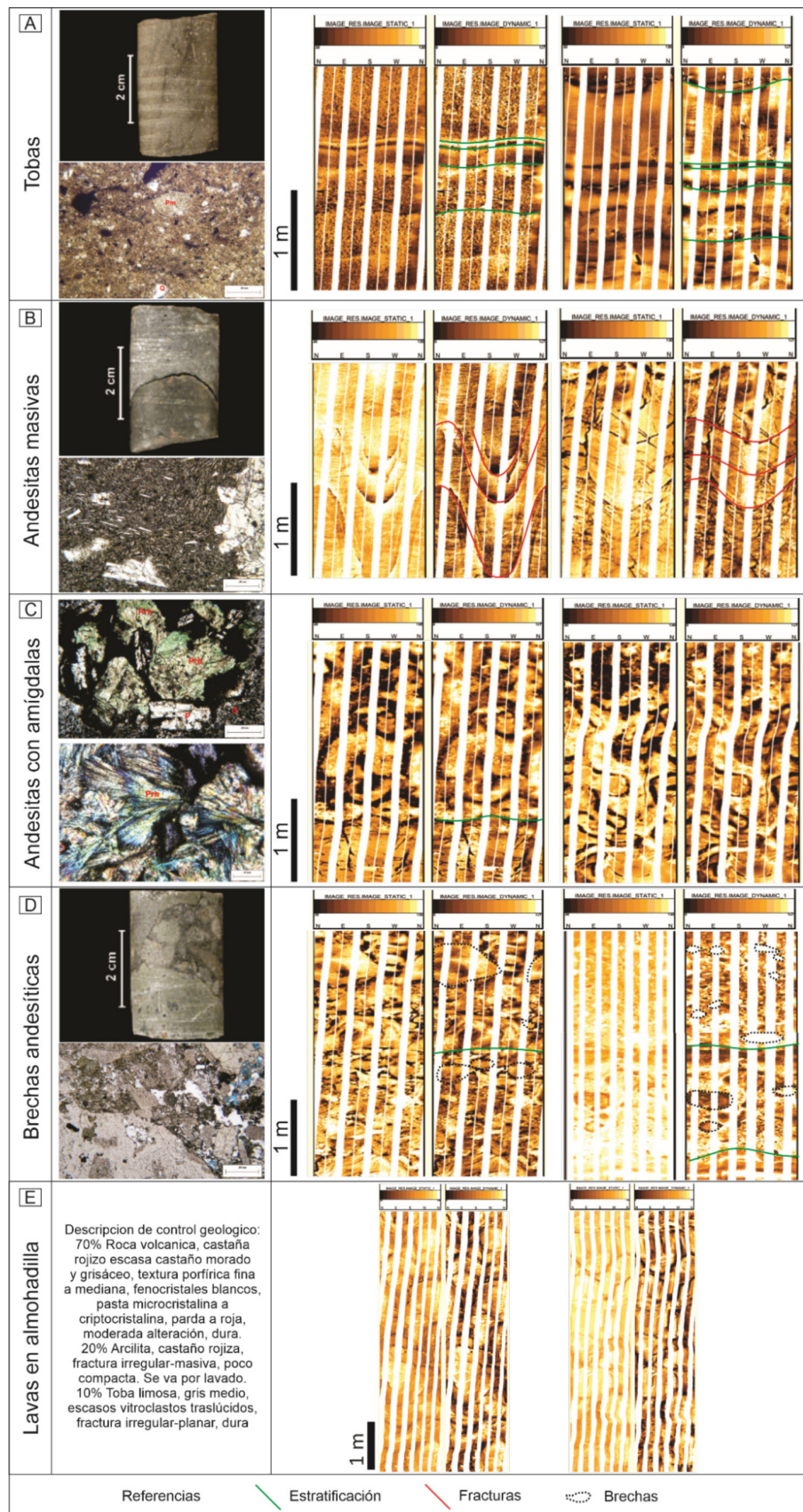
Lavas en almohadillas

Esta facies fue reconocida en dos pozos, en los sectores basales investigados. Se caracterizan por presentar altas resistividades, mostrando arreglos texturales circulares resistivos con halos más conductivos (Fig. 6E). De acuerdo a los datos de control geológico, se pudo determinar que estos intervalos se componen principalmente de rocas volcánicas, con menor participación de tobas limosas y arcilitas castañas rojizas. A partir de dicha asociación litológica en conjunto con las geoformas observadas, se podrían interpretar estas facies como posibles lavas en almohadillas. Hasta el momento, por la calidad de las imágenes resistivas, no fue posible observar patrones de fracturas radiales típicos de estas lavas.

Características de las rocas ígneas en perfiles a pozo abierto

El comportamiento de los perfiles en las rocas ígneas dependerá de varios factores, entre los que se destacan la composición, la estructura, la alteración hidrotermal, la presencia de poros y el contenido de hidrocarburos (Huang y Pan 2004). Los diagramas cruzados o *crossplots* han sido

Figura 6. Respuesta de las imágenes resistivas para cada litotipo reconocido. A) Tobas. B) Lavas andesíticas masivas. C) Lavas andesíticas con amígdalas. D) Lavas andesíticas brechadas. E) Lavas en almohadilla.



utilizados para el análisis de estos reservorios complejos en diversas contribuciones (Huang y Pan, 2004, Barrionuevo 2015), permitiendo agrupar o separar las litofacies identificadas. Tal es así que, teniendo en cuenta la falta de testigos corona y la falta de precisión en las descripciones de control geológico, los *crossplots* resultaron útiles para discriminar distintas litológicas volcánicas en los pozos del yacimiento. A su vez, a partir de ellos también se lograron identificar zonas con potencial hidrocarburífero remanente. Es de destacar que, con el análisis de las respuestas de los perfiles, los esfuerzos se centraron en discriminar las facies lávicas de las tobáceas, ya que la respuesta en la sección sedimentaria hasta el momento no resultó concluyente.

El crossplot con mayor utilidad fue el *gamma-ray* (GR) versus resistividad profunda (RES-D) (Fig.7). El perfil GR es una de las herramientas más efectivas para distinguir distintos tipos de rocas ígneas, ya que es sensible a la presencia de minerales radiactivos, entre ellos el feldespato potásico (Khatchikian, 1983). En el caso de la resistividad profunda, se utilizó para diferenciar lavas y tobas (Huang y Pan 2004).

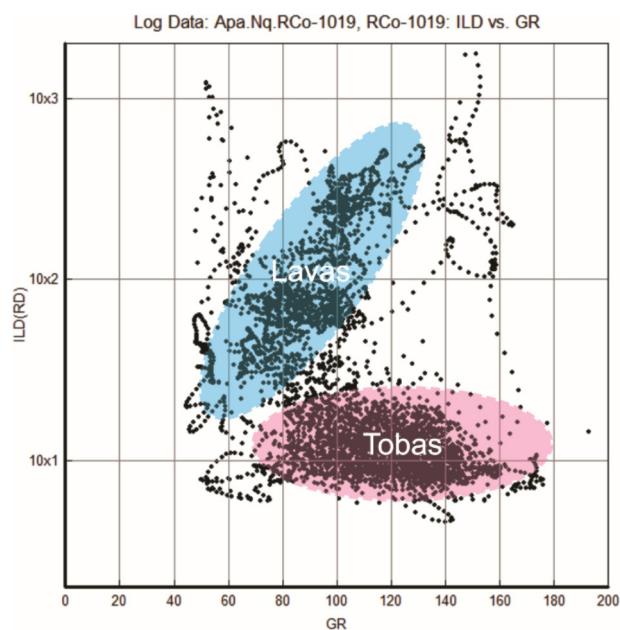


Figura 7. Crossplot GR vs Resistividad profunda, en el que se diferencian la respuesta de las tobas de la respuesta de las lavas brechadas, el principal reservorio.

A su vez, se utilizaron otros *crossplots* como por ejemplo GR versus tiempo de tránsito (DT) y GR versus densidad (ZDEN), los cuales fueron importantes para diferenciar los distintos tipos de lavas, identificados en los perfiles de imágenes resistivas. En la Tabla 1 se resumen las principales características de las litofacies reconocidas. Es importante resaltar que estos parámetros fueron observados en niveles donde las condiciones de la roca permitían determinar

un litotipo específico. Existen zonas, en especial las zonas de derrumbe (mal calibre), en donde las herramientas de perfilaje pueden tener mediciones defectuosas, pudiendo obliterar las condiciones eléctricas de la roca atravesada, siendo la resistividad y el tiempo de tránsito las más afectadas.

FACIES	GR (°API)	DT (US/F)	RES (OHMM)	ZDEN (GR/CM3)
Brechas andesíticas	35 - 125	60 - 75	50 - 300	2,32 - 2,61
Brechas andesíticas de alto GR	125 - 150	56 - 65	300 - 2000	2,38 - 2,53
Lavas con amígdalas	25 - 40	65 - 78	15 - 30	2,45 - 2,6
Andesitas masivas	15 - 90	49,5 - 65	20 - 700	2,6 - 2,81
Lavas en almohadilla	45 - 91	52 - 63	30 - 1200	2,6 - 2,7
Tobas	50 - 180	62 - 77	2,5 - 46	2,43 - 2,64

Tabla 1. Características eléctricas de las litofacies reconocidas.

Construcción de las electrofacies

El termino electrofacies fue introducido por Serra y Abbott (1982), definiéndose como la respuesta de un set de perfiles que caracteriza a un nivel y permite distinguirlo de otros. A partir de esta premisa, una vez realizada la caracterización eléctrica de cada una las litofacies encontradas, se construyó un “árbol de decisiones” que consistió en tomar a cada uno de los perfiles con sus rangos de variación establecidos para comenzar a discriminar los litotipos de interés (Fig. 8).

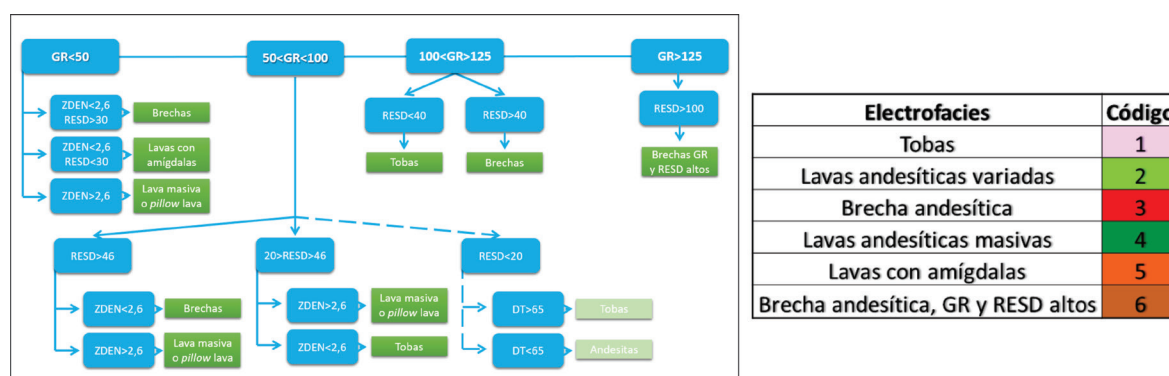


Figura 8. Diagrama de decisiones y tabla de electrofacies.

Como ya se mencionó el GR y la RESD ayudaron en la discriminación de distintos tipos de rocas ígneas (Fig. 9). Sin embargo, en algunos intervalos no resultaron suficientemente efectivos para diferenciar litotipos, por lo que se decidió utilizar además la densidad y en algunos casos el tiempo de tránsito. Lamentablemente no fue posible distinguir intervalos de lavas andesíticas

masivas y lavas en almohadilla, debido a que sus características eléctricas son muy similares dentro de los perfiles elegidos. Es por ello que en un futuro no se descarta profundizar en su caracterización con el fin de lograr una buena diferenciación. Por último, una vez ajustados los cinco pozos llave, se realizó la extrapolación a aquellos pozos sin análisis específicos.

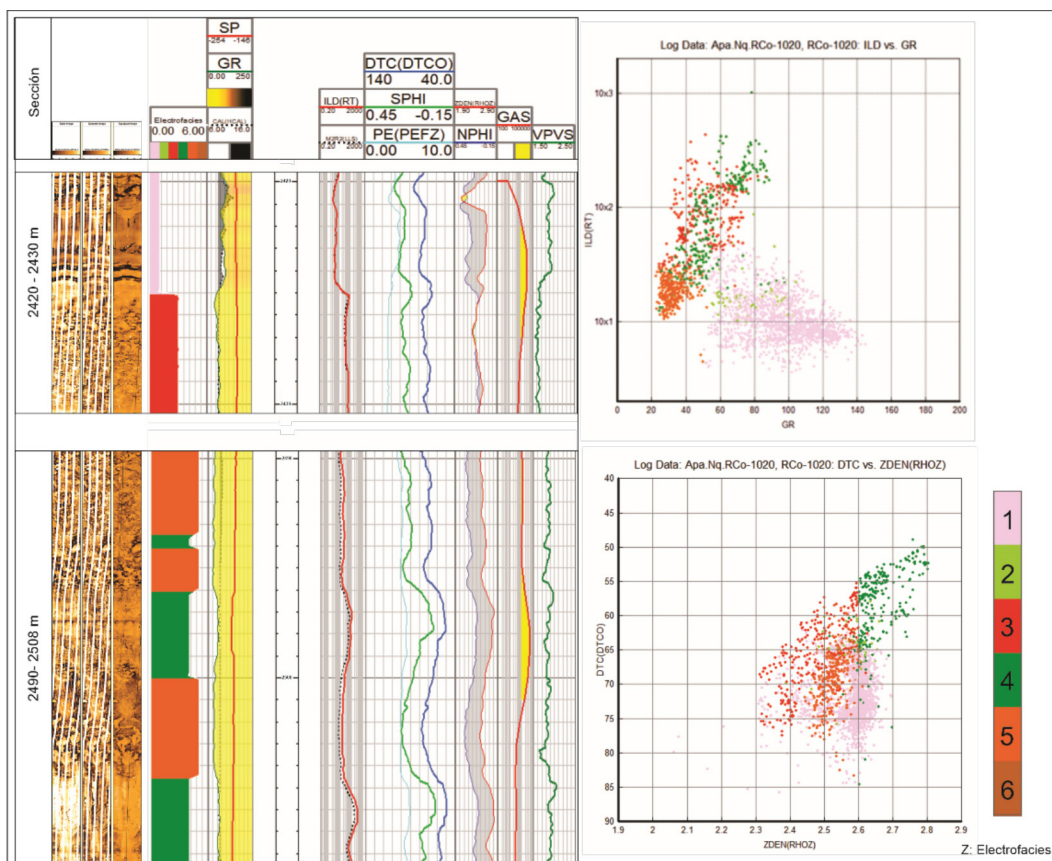


Figura 9. Perfil compuesto junto al perfil de imagen resistiva y el perfil de electrofacies.

Secuencias sísmicas y distribución de electrofacies

A partir del dato sísmico se interpretaron cinco secuencias (S I, S II, S III, S IV y S V; Fig. 11) y en conjunto con la extrapolación de electrofacies, se procedió a analizar la distribución de litotipos en los pozos donde la información de control geológico no permitió resolver con claridad la variación vertical observada.

Secuencia I

Es la que presenta mayor incertidumbre por la falta de información de pozo. Se caracteriza por presentar fuertes amplitudes con reflectores parcialmente discontinuos por fallamiento, y además de grandes variaciones de espesor.

Secuencia II

Siendo atravesada parcialmente por algunos pozos, presenta fuertes amplitudes con reflectores parcialmente discontinuos por fallamiento. Como característica principal, la misma presenta muy bajo potencial gasífero, con predominio de electrofacies de lavas andesíticas masivas y escasos niveles tobáceos intercalados. Es de destacar que en ella se reconocieron las geoformas similares a lavas en almohadillas, en las imágenes de pozo.

Secuencia III

La secuencia se caracteriza por presentar reflectores generalmente continuos, levemente deformados por el fallamiento, con amplitudes medias. Se destaca por presentar gran cantidad de facies de brechas andesíticas, la principal roca reservorio de la zona. Los mapas de espesor neto muestran que las facies brechosas se desarrollan más ampliamente hacia el NE, alcanzando 100 m de potencia en el centro del yacimiento (Fig. 10). Incluso es posible correlacionar estos cuerpos de un pozo a otro, registrando también zonas con signos de depleción, demostrando así una relativa continuidad lateral.

Hacia el SO, por su parte, dominan las facies de lavas andesíticas masivas intercaladas con facies de lavas andesíticas con amígdalas, las cuales, si bien poseen picos de gas total asociados, no presentan buenas características como reservorio (luego de ser fracturadas hidráulicamente). En un sondeo se documentó la presencia de mudstones sobre el sector oeste.

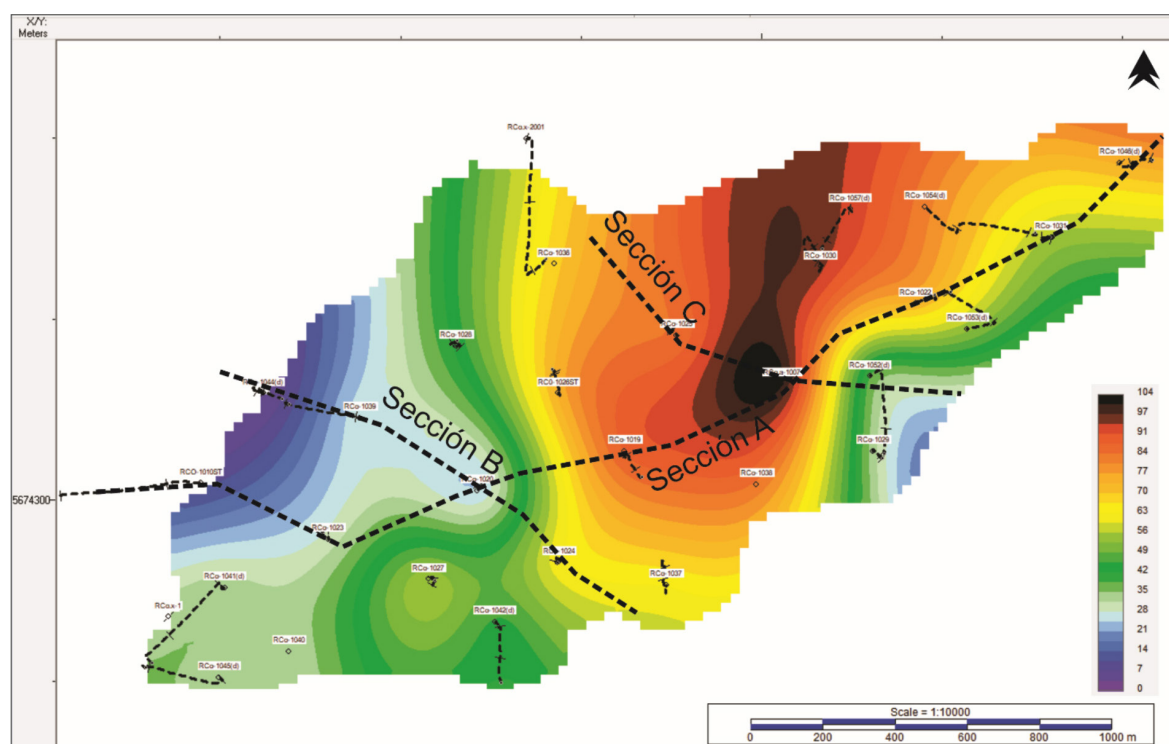


Figura 10. Mapa de espesor neto (en metros) de lavas andesíticas brechadas de la Secuencia III. En línea punteada se muestran las trazas de las secciones sísmicas A, B y C de la Figura 11.

Secuencia IV

Caracterizada por un aumento en la participación de rocas piroclásticas (tobas), esta secuencia representa un cambio de la actividad volcánica en la zona. A pesar de ello aún es posible distinguir algunos niveles de andesitas brechadas, en especial a la base, que resultaron productivas. Las amplitudes sísmicas observadas son bajas y sus reflectores sísmicos muestran buena continuidad lateral.

Secuencia V

Se compone principalmente de rocas volcanoclásticas que gradan hacia el tope a rocas sedimentarias finamente laminadas, marcando el fin de la actividad volcánica que le dio origen a los depósitos subyacentes. La misma no presenta zonas con facies de interés desde el punto de vista productivo. Se caracteriza por presentar amplitudes fuertes y reflectores continuos.

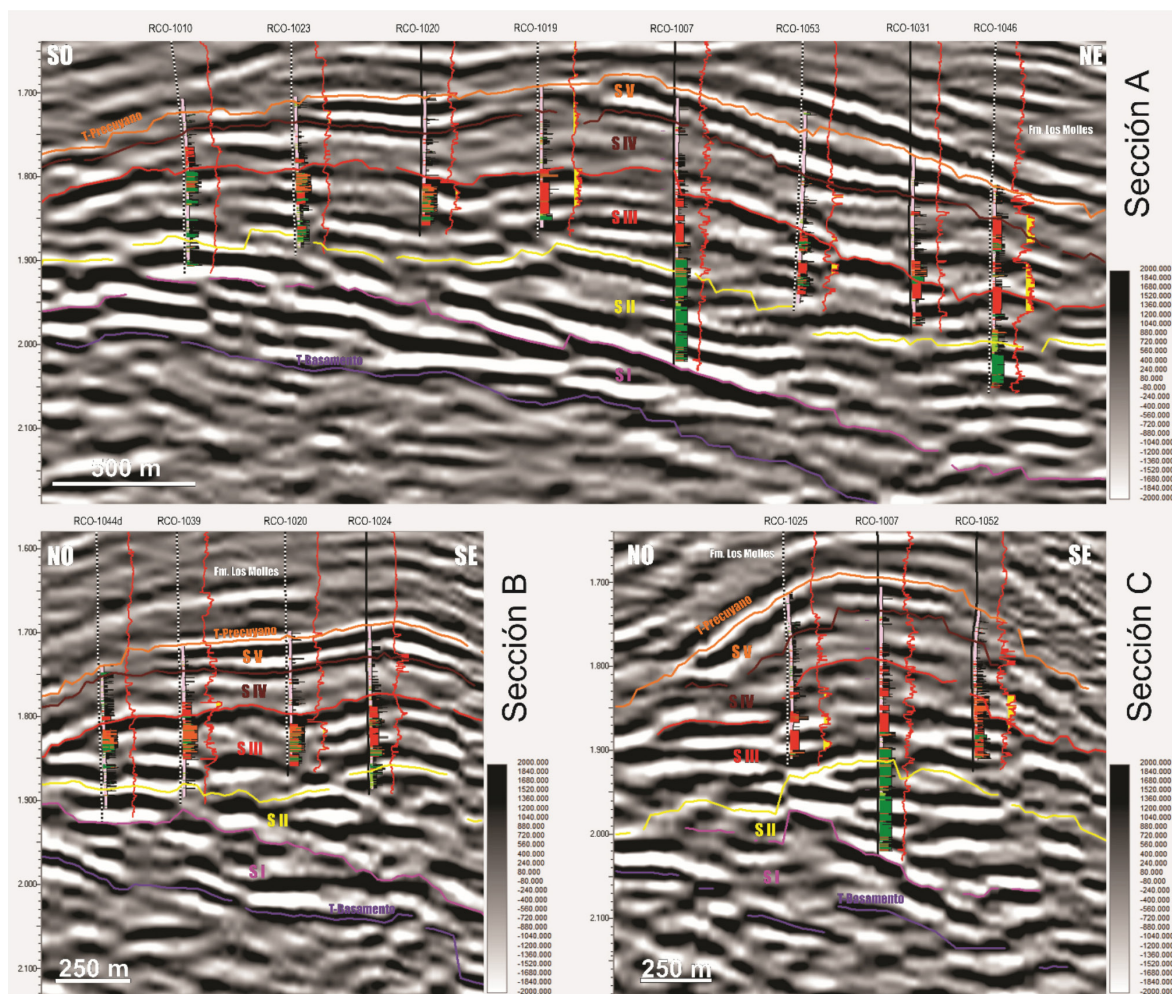


Figura 11. Secciones sísmicas (en tiempo) con los perfiles de electrofacies en colores. La curva roja pertenece a la curva de gas total (shading amarillo=mayor de 10.000 ppm de gas).

DISCUSIÓN

En base a las características observadas, las secuencias I y II pertenecen al relleno inicial del hemigraben precuyano, presentando fuertes variaciones de espesor. Si bien la secuencia I no fue alcanzada por ningún sondeo, sus características sísmicas son muy similares a las observadas en la secuencia II, por lo que se podría esperar que sus depósitos sean relativamente análogos.

La secuencia II presenta grandes incertidumbres dado que sus muestras representativas se obtuvieron únicamente de dos sondeos. Esta secuencia está compuesta principalmente por lavas masivas, con menor participación de posibles lavas en almohadilla. Si bien no se cuentan con datos de petrografía ni tampoco análisis químicos que permitan evidenciar la presencia de palagonita, en las imágenes resistivas fue posible observar que alrededor de las geoformas circulares aparecen intersticios de mayor conductividad, similares a los descritos por Gaillot *et al.* (2007). Esta respuesta podría corresponderse con materiales arcillosos reconocidos en los recortes de perforación, evidenciando una depositación subácnea para dichas lavas. Watton *et al.* (2014), describe características eléctricas muy similares a las halladas en este yacimiento, con bajos valores de GR y alta densidad y una clara semejanza en la respuesta del perfil de imagen resistiva. En cuanto a los espesores encontrados, los mismos no sobrepasan los 10 m y son seguidas por facies de lavas masivas de varias decenas de metros. El desarrollo de estas lavas masivas puede estar asociado a cambios en la viscosidad, en la tasa de enfriamiento y/o en la tasa de efusión (Gregg y Fink 1995, en Quiroga *et al.* 2017).

La secuencia III, que contiene a los reservorios de interés, se caracteriza por mostrar hacia el oeste-suroeste mayor desarrollo de facies de lavas masivas y vesiculares de composición andesítica, indicando la presencia de un volcanismo principalmente efusivo, de baja explosividad debido a la escasez de depósitos tobáceos asociados. La presencia de facies de mudstones en un sondeo indicaría la presencia de un cuerpo de agua relacionada a estos depósitos. Hacia el noreste, la secuencia III muestra mayor desarrollo de facies de lavas andesíticas brechadas, el principal reservorio de la zona. La fragmentación de estas brechas podría estar relacionada a procesos de *quenching*, que ocurren cuando un flujo de lava entra en contacto con un cuerpo de agua, dando como resultado autobrechas y/o hialoclastitas (White *et al.* 2015). Estos niveles presentan una buena continuidad lateral, que se evidencia a partir de la correlación de pozos, con espesores de hasta 50 m en algunos sondeos. Dichas interpretaciones están en línea con lo expuesto por Sisinni *et al.* (2011), en donde ya se mencionaban indicios de flujos de lava subácneos para las rocas precuyanas en Anticlinal Campamento y Ranquil Co.

Es de destacar que uno de los grandes interrogantes al comenzar el estudio, fue si la tectónica había jugado un rol preponderante en la generación de este reservorio. Diversos trabajos destacan el desarrollo de fracturas tectónicas como uno de los principales factores en el desarrollo de los reservorios precuyanos (Barrionuevo y Lenge 2018; López *et al.* 2018). Sin embargo, en el caso

del yacimiento Ranquil Co, la fragmentación de las rocas volcánicas fue sindepositacional, con interacciones agua-magma de diversa índole.

La Secuencia IV por su parte, está compuesta principalmente por tobas vítreas, con menor participación de facies de lavas brechadas a la base, marcando un cambio abrupto en el tipo de volcanismo. Si bien el origen de los depósitos tobáceos no fue motivo de estudio, ya que no constituyen el reservorio principal del campo, presentan algunas características particulares que merecen ser analizadas.

Además de las tobas vítreas, aparecen intercalaciones esporádicas de tobas compuestas por material vítreo levemente desvitrificado, cristaloclastos y vitroclastos en menor cantidad, con abundantes componentes bioclásticos entre los que se destacan valvas, foraminíferos, espículas de esponja y equinodermos. En el trabajo realizado por Aguirre *et al.* (2006) en la zona de estudio, asocian a estos depósitos con flujos piroclásticos que incorporan material esquelético al entrar en un medio subácneo marino. Dichas interpretaciones podrían guardar cierta relación con lo expuesto por Carrizo *et al.* (2018) para la zona de Sierra Barrosa y Aguada Toledo. Allí, uno de los miembros de la Fm. Cupen Mahuida también documenta la presencia de restos de valvas asociados a tobas vítreas muy finas.

Desde el punto de vista de la interpretación sísmica, los horizontes poseen baja impedancia acústica, compartiendo dicha característica con la Secuencia IV. De acuerdo a Carrizo *et al.* (2018), ese miembro “fue originado por flujos densos cargados de material piroclástico e hidromagmático, depositados en un ambiente subácneo sin-eruptivo, proveniente de aparatos explosivos, por lo que se las podrían asociar lateralmente a ignimbritas”. De esta manera, la Secuencia IV podría estar marcando no sólo un cambio en la explosividad de la actividad volcánica, sino posiblemente variaciones en la profundidad del cuerpo de agua con el cual interactuó el volcanismo.

Por último, la Secuencia V está compuesta por rocas sedimentarias con menores componentes de origen volcánico, representando el cese de la actividad volcánica en la zona de estudio. Suprayacente a ella aparecen los depósitos de la Fm. Los Molles, constituidos por arcillitas oscuras, con escasos niveles de areniscas finas, marcando el inicio de la depositación del Gr. Cuyo.

CONCLUSIONES

Para analizar depósitos de origen volcánico en subsuelo, es importante recurrir a una amplia gama de herramientas que nos permitan caracterizar las rocas desde diversos puntos de vista. La conjunción de datos de perfiles de pozo, testigos laterales, recortes de perforación, petrografía de las muestras, imágenes resistivas permitió la construcción de un árbol de decisiones. A partir del mismo se generó un modelo de electrofacies capaz de caracterizar a los depósitos del Precuyano del yacimiento Ranquil Co, en conjunto con su respuesta sísmica.

En el área de estudio, el Ciclo Precuyano está constituido por un arreglo complejo de unidades lávicas, piroclásticas y sedimentarias (Fig. 12). Las secuencias sísmicas I, II y III se caracterizan por presentar mayor participación de flujos de lavas subácueos, entre los que se destacan la presencia de rasgos similares a lavas en almohadilla, autobrechas y/o hialoclastitas y la aparición de intercalaciones de *mudstones*.

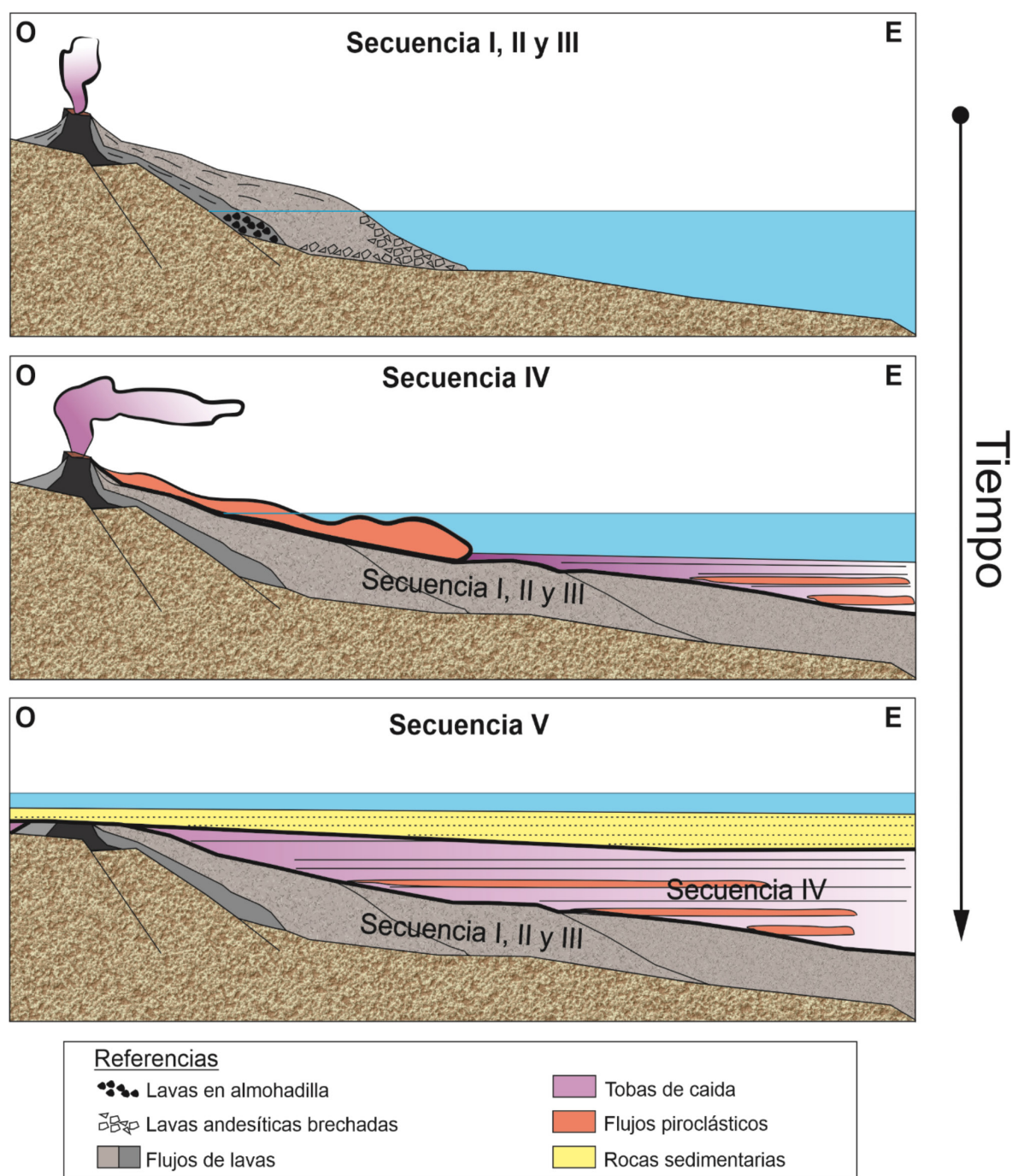


Figura 12. Perfiles esquemáticos que muestran la evolución genética de las secuencias precuyanas del yacimiento Ranquil Co.

La secuencia IV se compone principalmente de depósitos piroclásticos, marcando un cambio abrupto en el tipo de volcanismo que afectó a la zona de estudio. La aparición de niveles de tobas con componentes bioclásticos refleja un ambiente subácueo marino evidenciado por la presencia de valvas, foraminíferos, espículas de esponja y equinodermos. Por último, la secuencia V representa el fin del volcanismo en la zona, con aumento en la participación de rocas sedimentarias y una disminución de los componentes volcánicos, marcando el fin de los depósitos precuianos en la zona.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a las autoridades de Oilstone Energía S.A. por permitir la publicación de este trabajo, a Héctor Busnago de la compañía Emerson por colaborar en el nuevo procesamiento de las imágenes resistivas y al Dr. Iván Petrinovic por sus valiosas sugerencias.

REFERENCIAS

- Aguirre, C., Blanco Ibáñez, S., Ferraresi, P. y Rodríguez Schelotto, L. 2006. Informe interno LCV -Apache.
- Alonso, J., A. E., Giusiano, G., Chebli G., Ibáñez, 2011, 'Shale Gas en la Provincia de Neuquén'. Subsecretaría de Hidrocarburos, Energía y Minería, Prov. de Neuquén y Phoenix Oil & Gas, S.A. <http://www.energianeuquen.gov.ar/reservnoconvencionales.aspx>
- Barrionuevo M., 2015. Las rocas volcánicas del Grupo Choiyoi como reservorio de hidrocarburos. Yacimiento 25 de Mayo – Medanito S.E. (38° 1' 43" LS y 67° 53' 45" LO), Cuenca Neuquina, Argentina. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Tesis doctoral (inédita). 202 pp.
- Barrionuevo, M. y Lenge D. 2018. Reservorios del Grupo Choiyoi y Precuiano - Yacimiento Cerro Bandera - Rocas Reservorio (2da Edición). Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas Argentinas. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Buenos Aires
- Bermúdez, A. y Delpino, D. 2002. Perfiles tipo sobre las secuencias volcanoclasticas de la unidad Precuiano en la sierra de Chacayco (Área Ao. Lapa y Cerro Colorado). Segundo informe sobre dataciones radimétricas. Informe interno Repsol YPF (inédito), Buenos Aires.
- Brisson, I. 2005. Sistema Petrolero de Cupén Mahuida. YPF, informe interno.
- Carrizo, N., Coppo, R., Fernandez Sevesso, F., Montagna, A., Pose, A., Santiago, E., Schiuma M. y Suarez, M. 2018. Yacimientos Sierra Barrosa y Aguada Toledo (Formación Cupén Mahuida). Libro de Rocas Reservorio de Las Cuencas Productivas de la Argentina, Pág 443-451. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- D'Elia L., Muravchik M., Franzese J.R., Bilmes A. 2012. Volcanismo de sin-rift de la Cuenca Neuquina, Argentina: relación con la evolución Triásico-Tardía - Jurásico Temprano del margen Andino. *Andean Geol* 39:106-132

- Duan, Y., Xie, J., Su, Y., Liang, H., Hu, X. y Wang, Q. 2020. Application of the Decision Tree Method to Lithology Identification of Volcanic Rocks-Taking the Mesozoic in the Laizhouwan Sag as an Example. *Sci. Rep.* 10 (05), 19209. doi:10.1038/s41598-020-76303-y
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. The University of Texas, Austin. USA. 184p.
- Gaillot, P., Brewer, T. Pezard, P. y Yeh, E. 2007. Contribution of Borehole Digital Imagery in Core-Log Seismic Integration. *Scientific Drilling*, No. 5. P 50-53. DOI: 10.2204/iodp.sd.5.07.2007
- Gregg, T.K.P. and Fink, J.H. 1996. Quantification of extraterrestrial lava flow effusion rates through laboratory simulations. *Journal of Geophysical Research* 101. doi: 10.1029/96JE01254.
- Huang, B. y Pan, B. 2004. Characteristics of log responses and lithology determination of igneous rock reservoirs. *Journal of Geophysics and Engineering* 1: Pp. 51-55
- Jorgensen, L., Lopez Pez , G. A. y Pisani, F. 2013. Caracterización de la Fm Los Molles como reservorio de tipo Shale Gas en el ámbito Norte de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina, mostrando su analogía con reservorio de Shale Gas probado en EEUU. YPF S.A., Buenos Aires, Argentina.
- Khatchikian, A. 1983. Log evaluation of oil-bearing igneous rocks. *Journal Volume*: 197:7. World Oil. The United States.
- Lopez R., Ruiz R., Spacapan J., Hryb D., Mancada R., Santiago E. y Montagna A. 2018. Por qué y cómo hacer un modelo conceptual de fracturas naturales, el ejemplo de la Fm. Cup n Mahuida. X Congreso Exploración y Desarrollo Hidrocarburos, IAPG, Sesiones Generales: "Energía y Sociedad, aliados inseparables", p.971-985, Mendoza, Argentina.
- Pángaro F., Corbera R., Carbone O y Hinterwimmer G. 2002. Los reservorios del Precuyano. In: Schiuma M, Hinterwimmer G, Vergani GD (eds) *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas Argentinas*. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Buenos Aires, pp 229-254
- Pángaro F., Pereira D.M. y Micucci E. 2009. El sinrift de la dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina: evolución y control sobre la estratigrafía y estructura del  rea. *RAGA* 65:265-277
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R., 1987. *Sand and sandstone*. Springer-Verlag, New York, 553 pp.
- Quiroga, F., Figueroa Villegas, S., Becchio, R., Villagran, A., Filipovich, R., Ahumada, M., y Nieves, A. 2017. Caracterización de coladas de lavas almohadilladas en ambiente lacustre: volcanismo vinculado al rift del Grupo Salta-NOA. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74 (4): 511-523
- Schiuma M. y Llamb s E.J. 2008. New ages and chemical analysis on Lower Jurassic volcanism close to the Huincul High, Neuquén. *Rev Asoc Geol Argent* 63:644-652
- Serra, O., y Abbott, H.T. 1982. The Contribution of Logging Data to Sedimentology and Stratigraphy. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 22, 117-131.
- Silvestro, J y Zubiri, M. 2008 Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la dorsal Neuquina (39 S), Neuquén. *Revista Asociación Geológica Argentina* 63: 49-64
- Sisinni V., López S. y Lavia M. 2011. Yacimientos de gas no convencionales en el Ciclo Precuyano y en el basamento en el área de la Dorsal de Huincul en la Cuenca Neuquina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 693-710, Mar del Plata, Argentina.

- Valenzuela, M.E., Olea, G.M, Gutiérrez Pleimling, A. y Gavarrino, S. 2005. Evaluación del Precuyano en el Bloque Barranca de los Loros, Provincia de Río Negro. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mar del Plata), Actas en CD: 19 p.
- Veiga, R.D., Hechem, J., Bolatti, N., Agraz, P. Sánchez, E., Saavedra, C., Pángaro, F., García, D. y Moreiras, E. 2001. Syn-rift deposits as a new play concept in the central portion of the Neuquén Basin: future perspectives from the analysis of physical models. Hedberg Conference AAPG (Mendoza), Program with abstracts: 6 p., Mendoza.
- Vergani, G. D., Tankard, A.J., Bellotti, H.J. y Welsink, H.J. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquen Basin. Argentina. AAPG Mem. 62: 383-402.
- Watton, T.J., Cannon, S., Brown, R.J., Jerram, D.A., Waichel, B.L., 2014. Using formation micro-imaging, wireline logs and onshore analogues to distinguish volcanic lithofacies in boreholes: examples from Palaeogene successions in the Faroe–Shetland Basin, NE Atlantic. In: Hydrocarbon Exploration to Exploitation West of Shetlands. The Geological Society of London, London, pp. 173–192. <https://doi.org/10.1144/SP397.7>
- White, J., McPhie, J. y Soule, A. 2015. Submarine lavas and hyaloclastite. En Sigurdsson, H. (eds), The Encyclopedia of Volcanoes. Pp 363-375. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00019-5>