

GEOLOGÍA SEDIMENTARIA Y DIAGÉNESIS DEL RESERVORIO GASÍFERO NO CONVENCIONAL PALEOCENO DE LA “ZONA GLAUCONÍTICA”, BLOQUE ARENAL, TIERRA DEL FUEGO, CHILE

Jesús Pinto¹, Daniela Vallejos¹, Ángel González¹

1: ENAP Magallanes. jpintor@enap.cl; dvallejos@enap.cl; agonzalezg@enap.cl

Palabras clave: Cuenca de Magallanes, diagénesis, geología sedimentaria, Paleoceno, reservorios no convencionales, zona glauconítica

ABSTRACT

The Paleocene-Eocene “Zona Glauconítica” of the Chilean Magallanes Basin contains an important tight-gas reservoir in the Arenal Block, where it represents the lower part of the unit (40-50 m thick) and the most prolific Tertiary gas reservoir in the Tierra del Fuego Province. This work focuses on the impact of lithofacies, stratigraphy and diagenesis on reservoir quality based mainly on the analysis of well log, drill core, thin-section and XRD/XRF data from exploration wells and complemented with 3D seismic data and previous investigations. Three new U-Pb ages from detrital zircons are also included. The reservoir lies unconformably above Cretaceous rocks and beneath the Eocene section of the “Zona Glauconítica”. It represents middle- to outer-shelf deposits and is divided into two parts separated by an important discontinuity surface. The lower one, of Danian-(?)Selandian age, comprises green-grain-rich tuffaceous to lithofeldspathic mudrocks and wackes. The upper one is Thanetian in age and is dominated by tuffaceous mudrocks and wackes with lesser green grains. Compaction and local calcite cementation and detrital clay content were the main porosity-reducing factors during earlier burial. In contrast, development of authigenic chlorite and dissolution/leaching out of labile/chloritic grains were the main porosity-enhancing processes during advanced burial. Polygonal faults and some important discontinuity surfaces in the reservoir may have served as barriers and/or pathways for fluid flows during burial. An understanding of the spatial variability of these characteristics is crucial to reduce exploration risk and to improve well planning in the area.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el aumento de la demanda doméstica de gas y el carácter maduro a marginal de la producción petrolera en la Cuenca de Magallanes a partir de yacimientos convencionales ha provocado una redefinición del paradigma exploratorio en la región. Un resultado de esto es el descubrimiento de acumulaciones comerciales de gas en los depósitos terrígenos y volcánoclasticos de la “Zona Glauconítica” del Bloque Arenal (Fig. 1). El intervalo reservorio, que constituye la parte inferior de la unidad, comenzó a explotarse en el año 2013 y actualmente es el principal productor

de gas en la Provincia de Tierra del Fuego en Chile, contribuyendo con aproximadamente el 50 % de la producción de gas de ENAP en la Cuenca. El área de reservas probadas es de unos 70 km² y en ella la profundidad del reservorio varía entre 2000-2300 m por debajo del nivel del mar.

Desde los inicios de la actividad petrolera en la región, la “Zona Glauconítica”, de ahora en adelante referida como “ZG”, ha sido de interés para la industria. Como resultado de ello, se han promovido varios estudios patrocinados por ENAP para establecer su distribución y entender sus características estratigráficas y sedimentológicas (Mohr 1945, Gallardo 1958, Hauser 1964, Natland *et al.* 1974, Di Biase 1980, Biddle *et al.* 1986, Carpinelli *et al.* 2013, Zurita *et al.* 2013; LCV 2014a,b,c, Carpinelli *et al.* 2015, González *et al.* 2017, Frigerio 2018, LCV 2018a,b, González *et al.* 2018, Lohmar 2018, Jop 2021). De acuerdo con estos trabajos, la sedimentación de la “ZG” fue diacrónica y registra una transgresión generalizada que afectó la Cuenca de Magallanes durante el Paleoceno-Eoceno. El intervalo reservorio se caracteriza no solo por una marcada heterogeneidad litológica sino también por porosidades moderadas (10-20%) y permeabilidades muy bajas (<0,1 mD), por lo que ha sido referido como un reservorio “tight” de gas (e.g., González *et al.* 2018). Con la finalidad de incrementar reservas y, por ende, garantizar un suministro ininterrumpido de gas para la región a largo plazo, estos reservorios se han convertido en importantes objetivos de exploración.

Dado el carácter diacrónico y no convencional del reservorio de la “ZG” un entendimiento de su evolución y variabilidad espacial puede ser crucial para la estimación de la naturaleza, distribución y complejidad lateral de los intervalos más productivos. Por lo tanto, para las siguientes fases de la prospección en la cuenca se requiere una evaluación más detallada e integrada de los factores principales que controlan su extensión y propiedades físicas, lo cual, además, determinará en gran medida la planificación, incluyendo el espaciamiento y orientación de nuevos pozos exploratorios en la región. Debido a que el potencial de reservorio de las rocas sedimentarias depende de la interacción de los procesos de depositación y diagenéticos, la descripción y el reconocimiento de intervalos petrológicos y diagenéticos discretos es esencial para el modelado predictivo de calidad de reservorio tanto en el área de estudio como en otros sectores de la cuenca.

Basados en la recopilación e integración de la información existente y la obtención de nuevos datos, este trabajo se enfoca en la descripción e interpretación de las características estratigráficas, sedimentológicas y diagenéticas más importantes del reservorio ZG en el Bloque Arenal, incluyendo la definición de litofacies y ambientes de depositación, estimación de procesos diagenéticos que pudieron haber afectado positiva o negativamente el potencial de reservorio y por último, proponer un esquema cronoestratigráfico que sirva como herramienta de correlación y evaluación de superficies claves que pudieran influir en la acumulación y distribución de fluidos. Debido a la naturaleza diacrónica de la “ZG” y la poca extensión del área de estudio con respecto a la distribución regional de la unidad, aún queda mucha información por revisar, analizar e integrar; por lo tanto, los resultados e interpretaciones presentados aquí no deben ser considerados concluyentes y/o aplicables a escala de cuenca.

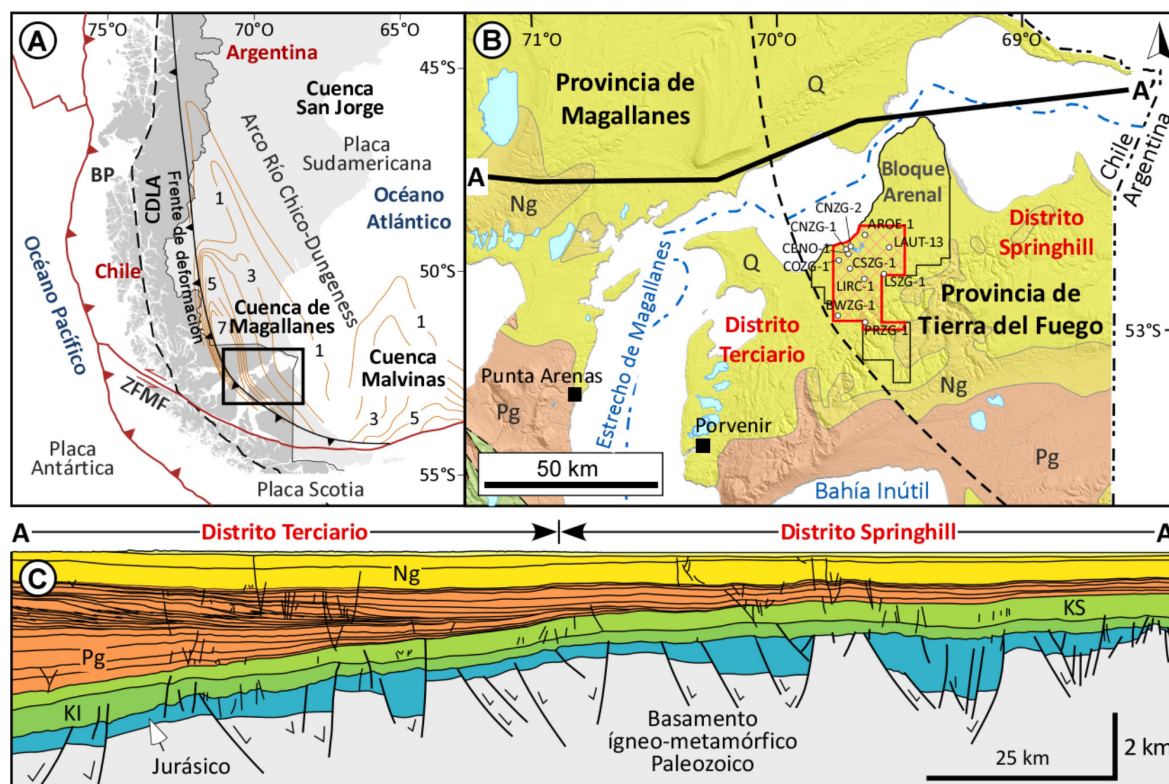


Figura 1. (A) Mapa índice de Sudamérica meridional mostrando ubicación relativa del área de estudio, extensión y espesor de la provincia sedimentaria Magallanes-Malvinas (isopacas crema, en km) y elementos tectonoestructurales mayores. (B) Mapa geológico simplificado de la Región de Magallanes mostrando la distribución de unidades cronoestratigráficas, la ubicación del área de estudio y pozos seleccionados (demarcación roja del Bloque Arenal) en Tierra del Fuego. (C) Sección geológica regional esquematizando la configuración y relleno de la Cuenca de Magallanes (ubicación de la sección en B). BP = Batolito de la Patagonia, CDLA = cinturón de deformación de Los Andes, ZFMF = zona de fallas Magallanes-Fagnano, KI = Cretácico Inferior, KS = Cretácico Superior, Ng = Neógeno, Pg = Paleógeno, Q = Cuaternario.

UBICACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, sector central del Bloque Arenal, está enmarcada dentro de la Provincia de Tierra del Fuego, aproximadamente a 80 km, en dirección NE a través del Estrecho de Magallanes, de la ciudad de Punta Arenas (Fig. 1A-B). Desde el punto de vista petrolero se circunscribe al Distrito Terciario definido por Harambour (1978) para la Cuenca de Magallanes (Fig. 1B). Desde el punto de vista geológico, el Bloque Arenal se encuentra en la parte occidental de una plataforma con buzamiento oeste que caracteriza la porción oriental de la Cuenca de Magallanes y donde se preservó un promedio de 2,5 km de espesor de rocas clásticas y volcánicas (Figura 1C). Esta estructura, conocida como Plataforma Springhill, es de carácter regional y está vinculada a la deformación por flexión de la fase de antepaís que comenzó en el Cretácico Tardío.

La Cuenca de Magallanes (sensu Biddle *et al.* 1986) (Fig. 1A) es una depresión de forma ovalada con orientación NNO-SSE compartida por Chile y Argentina que contiene unos 8 km de rocas sedimentarias y, en menor proporción, volcánicas clásticas a neógenas (Thomas 1949,

Biddle *et al.* 1986). La Cuenca es asimétrica y se profundiza en dirección oeste hacia el cinturón de deformación de Los Andes Patagónicos. Hacia el este, en su margen Atlántico, está limitada por el Arco Río Chico-Dungeness, un alto estructural del basamento que la separa de las cuencas Golfo San Jorge al norte y Malvinas al este, ambas en territorio argentino (Biddle *et al.* 1986, Wilson 1991).

La Cuenca de Magallanes en su sector chileno se desarrolló a partir del Jurásico como consecuencia de la tectónica de placas y la geodinámica Andina (Biddle *et al.* 1986, Galeazzi 1998). Su evolución tectono-sedimentaria puede resumirse en tres fases principales, cada una asociada en menor o mayor grado con actividad volcánica: (1) cuenca extensional de tras-arco, denominada Rocas Verdes, producto de la fragmentación y separación continental de Gondwana meridional en el Jurásico Medio-Tardío, donde se acumularon rocas volcánicas y sedimentarias hasta el Cretácico Temprano (e.g., Bruhn *et al.* 1977, Dalziel 1986, Fosdick *et al.* 2014); (2) inversión y desarrollo de cuenca de antepaís durante la transición Cretácico Temprano-Tardío (Dalziel 1986, Wilson 1991, Fildani *et al.* 2008, Ghiglione *et al.* 2010), cuya configuración y patrones de subsidencia por flexión controlaron la sedimentación durante el Cretácico Tardío-Paleógeno (Winslow 1981), promoviendo la acumulación de sedimentos finos intercalados con depósitos de granulometría gruesa que actualmente constituyen importantes intervalos prospectivos y productivos en el Paleógeno (e.g., la ZG) (Fig. 2); (3) régimen transpresivo durante el Neógeno, caracterizado por una sedimentación transicional a continental (Winslow 1981).

En el área de estudio, los depósitos de la “ZG” descansan discordantemente sobre rocas cretácicas (Gallardo 1958, Biddle *et al.* 1986) (Fig. 2) y registran una transgresión generalizada que caracterizó la región de Magallanes durante el Paleoceno-Eoceno. La sedimentación de esta unidad fue diacrónica (Hauser 1964, Biddle *et al.* 1986), más antigua en el oeste, hacia donde también es más espesa, y más joven hacia el este, en el Distrito Springhill (Fig. 1C). Aunque la “ZG” se encuentra ampliamente distribuida en la porción oriental de la Cuenca, no en todas partes parece tener potencial de reservorio económicamente rentable. Sin embargo, en algunas localidades como, por ejemplo, en bloques del continente y especialmente en el Bloque Arenal, la unidad incluye acumulaciones importantes de gas y en menor proporción de condensado (González *et al.* 2018). En estos bloques, tanto los intervalos reservorio (yacimiento “ZG”) como su estratigrafía adyacente se encuentran variablemente afectados por fallas intraformacionales de poco rechazo que forman una red poligonal vistas en planta (Pinto *et al.* 2014, 2018) (Fig. 3). Los sistemas de fallas poligonales (SFP) son rasgos diagenéticos tempranos, más que tectónicos, comunes en muchas cuencas sedimentarias a escala global (e.g., Cartwright 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización sedimentaria y diagénética se basó principalmente en la descripción de testigos corona y análisis petrográficos y de datos de difracción de rayos X (DRX) llevados a cabo por el laboratorio LCV, Argentina, para ENAP Magallanes y revisados por los autores. Datos de fluorescencia de rayos X (FRX) obtenidos por Geolog para ENAP Magallanes en el 2018 fueron incorporados para soportar las interpretaciones litológicas y diagénéticas. El trabajo fue complementado con información sísmica 3D, de registros de pozo y bioestratigráfica disponibles. Esta contribución también incluye tres nuevas dataciones de U-Pb en circones detríticos para el intervalo de interés, analizadas en EE. UU a través de ECP Geoconsulting en Texas. Puntualmente se revisó y utilizó información de bloques adyacentes, particularmente para el amarre de las

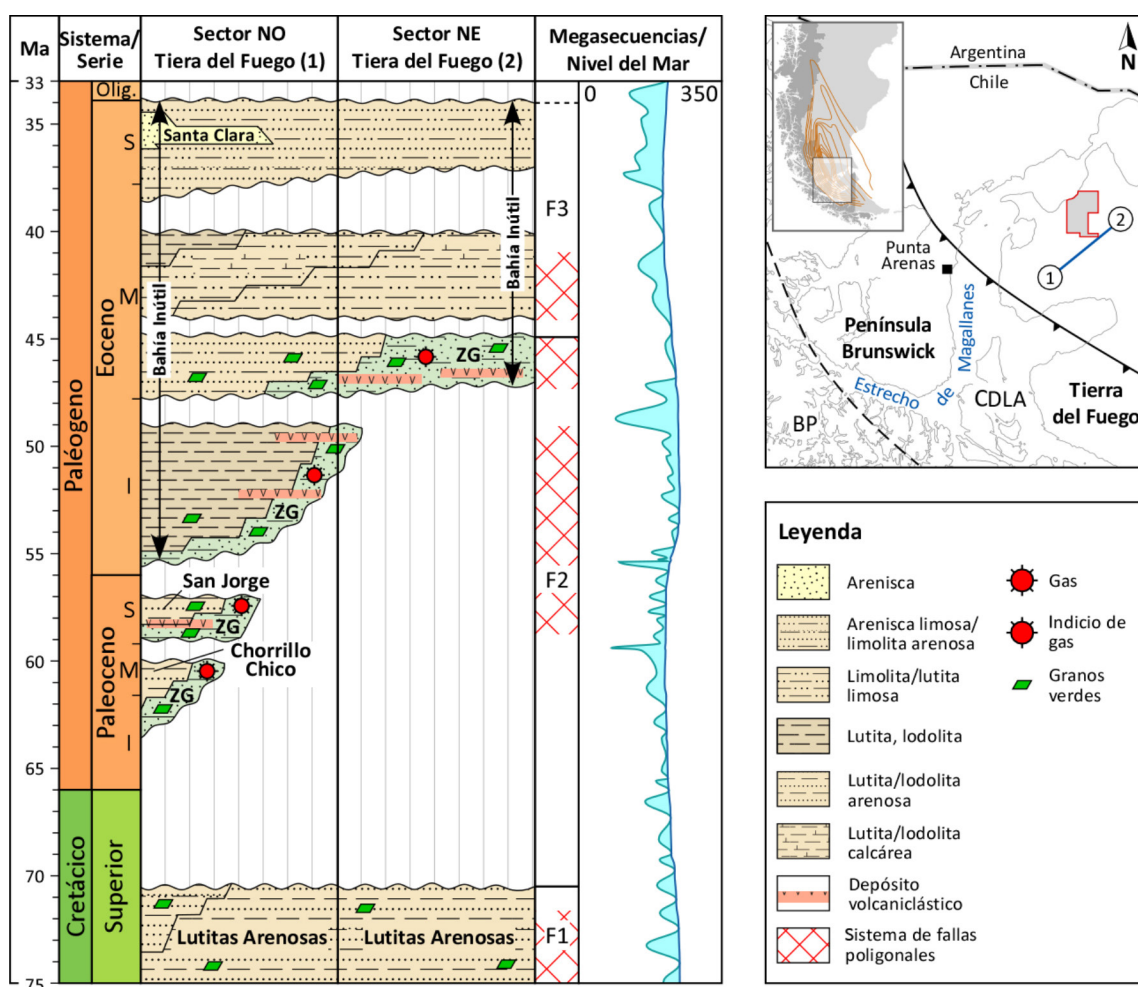


Figura 2. Diagrama estratigráfico para el Paleógeno en el sector norte de la Provincia de Tierra del Fuego mostrando la nomenclatura y las relaciones cronoestratigráficas, intervalos afectados por sistemas de fallas poligonales y potencial petrolífero de la "ZG". Edades cronoestratigráficas y curvas del nivel del mar internacionales derivadas de Time Scale Creator 8.0 (Gradstein *et al.* 2020). Definición de megasecuencias (F1-3) según Mpodozis *et al.* (2011). BP = Batolito de la Patagonia, CDLA = cinturón de deformación de Los Andes, TdF = Tierra del Fuego. ZG = "Zona Glauconítica".

correlaciones estratigráficas; además se consideró la información previa (publicada y confidencial), incluyendo carpetas de pozos, informes internos, tesis de grado y artículos de congresos y revistas.

Para las correlaciones estratigráficas en el área de estudio se seleccionaron 11 pozos (Fig. 1B) con registros de rayos gamma, sónico, neutrónico, densidad, factor fotoeléctrico y resistividad. Un total de aproximadamente 120 m de testigos corona, provenientes de 7 de estos pozos, fueron descritos para la estimación de litofacies y superficies estratigráficas relevantes. El análisis petrográfico de 50 secciones delgadas incluyó la estimación visual de la litología, porosidad, tipo de grano, textura y contenido fósil. De acuerdo con el tipo y tamaño de las partículas constituyentes, fábrica de la roca y estructuras sedimentarias primarias se identificaron 4 litofacies. Para la caracterización de las superficies estratigráficas se consideró la posición cronoestratigráfica y cambios bruscos en la bioturbación, granulometría, litología y/o diagénesis.

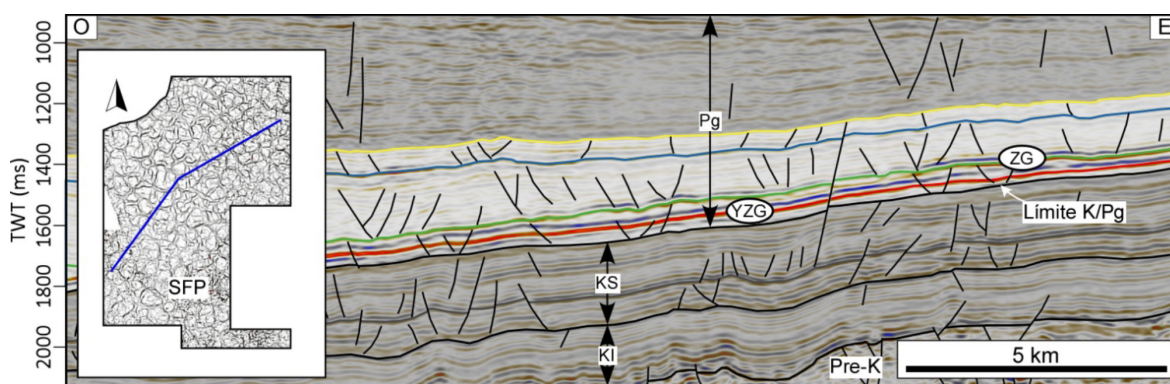


Figura 3. Perfil sísmico en tiempo mostrando los marcadores principales asociados con la "ZG" e ilustrando la expresión sísmica, geometría y distribución del sistema de fallas poligonales (SFP) en el Paleógeno del área de estudio; el horizonte azul separa un SFP maduro por debajo de otro inmaduro por encima (Pinto *et al.* 2018). La exageración vertical es ~5x. Pre-K = Pre-Cretácico, KI = Cretácico Inferior, KS = Cretácico Superior, Pg = Paleógeno. YZG = yacimiento ZG.

Las tres muestras para geocronología obtenidas a partir de los testigos corona de los pozos COZG-1, CSZG-1 y PRZG-1 fueron procesadas y analizadas en el laboratorio de Geoanalítica de la Universidad Estatal de Washington, EE.UU. Cada muestra fue triturada y posteriormente tamizada para aislar la fracción <300 μm . Los circones se separaron de otras especies minerales usando un separador magnético Frantz combinado con líquidos pesados siguiendo métodos estándares. Los circones estándares, incluyendo el FC-1 de edad $1099 \pm 0,6$ Ma (Paces y Miller 1993) utilizado 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 para 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 depósito (EMD) se omitieron dataciones con contenido de Uranio >1000 ppm y/o edades con discordancia mayor a 20 % y discordancia inversa menor a -5 %.

RESULTADOS E INTERPRETACIONES

Estratigrafía

Como ya se ha mencionado, la sedimentación de la “ZG” fue diacrónica (Hauser, 1964; Biddle *et al.*, 1986) y comenzó durante la fase de antepaís en la antefosa ubicada al oeste del área de estudio. Generalmente, este intervalo representa las etapas tempranas de la transgresión Paleoceno-Eoceno, ya sea como depósitos arenosos transgresivos de anteplaya, incluyendo algunas capas conglomeráticas (e.g., Gallardo, 1958), probablemente producto de la erosión transgresiva (“ravinement”), o como depósitos marinos progradantes que representan pausas temporales en la transgresión general (e.g., Carpinelli *et al.*, 2012).

Esta unidad descansa discordantemente sobre los depósitos cretácicos finos de lutitas arenosas (e.g., Gallardo, 1958; Biddle *et al.*, 1986) (Fig. 2). El contacto es brusco y produce una respuesta característica en sísmica 3D y registros de pozo (Figs.3 y 4). En secciones sísmicas, la unidad comienza como un reflector de mediana intensidad, relativamente continuo, sobre una superficie que trunca reflectores infrayacentes. En registros de pozo se manifiesta como una disminución en la respuesta de rayos gamma y sónico y como un aumento en los valores de densidad y resistividad, esta última variable, pero comúnmente significativo; el efecto fotoeléctrico puede utilizarse como complemento para separar algunas capas y/o intervalos discretos ricos en granos verdes cloríticos/glauconíticos. El contacto superior es más difícil de establecer, ya que no tiene una expresión distintiva ni un patrón consistente en los registros; sin embargo, este se puede colocar donde ocurre un aumento en el registro de rayos gamma y una disminución de las respuestas de resistividad y efecto fotoeléctrico, común en muchos pozos del área (Fig. 4).

Los datos geocronológicos de circones detríticos (174 granos) obtenidos para tres muestras de testigos corona recuperados por los pozos COZG-1, CSZG-1 y PRZG-1 (Fig. 4), indican 5 poblaciones principales (más de tres granos): 270-260 Ma, 150-140 Ma, 125-115 Ma, 105-90 Ma y 70-55 Ma. Menos del 6 % de los granos son de edades mayores a 300 Ma, siendo el más viejo de 1050 ± 70 Ma. Las poblaciones de edades más jóvenes sugieren una edad máxima de depósito de $65,6 \pm 0,3$ Ma ($n = 50$) y $63,5 \pm 0,7$ Ma ($n = 13$) para las muestras de los pozos PRZG-1 y COZG-1, respectivamente, asignándolas al Daniano, Paleoceno inferior. La edad máxima de depósito para la muestra del pozo CSZG-1 es $55,7 \pm 0,9$ Ma ($n = 6$), asignándola al Thanetiano, Paleoceno superior.

En los testigos corona recuperados a partir de varios pozos ocurren varias superficies de discontinuidad estratigráfica que localmente separan litofacies y relaciones geométricas que pueden constituir elementos claves no solo para la interpretación cronoestratigráfica sino también para la estimación del flujo de fluidos dentro y a través de los intervalos reservorio (Fig. 5). Una de estas

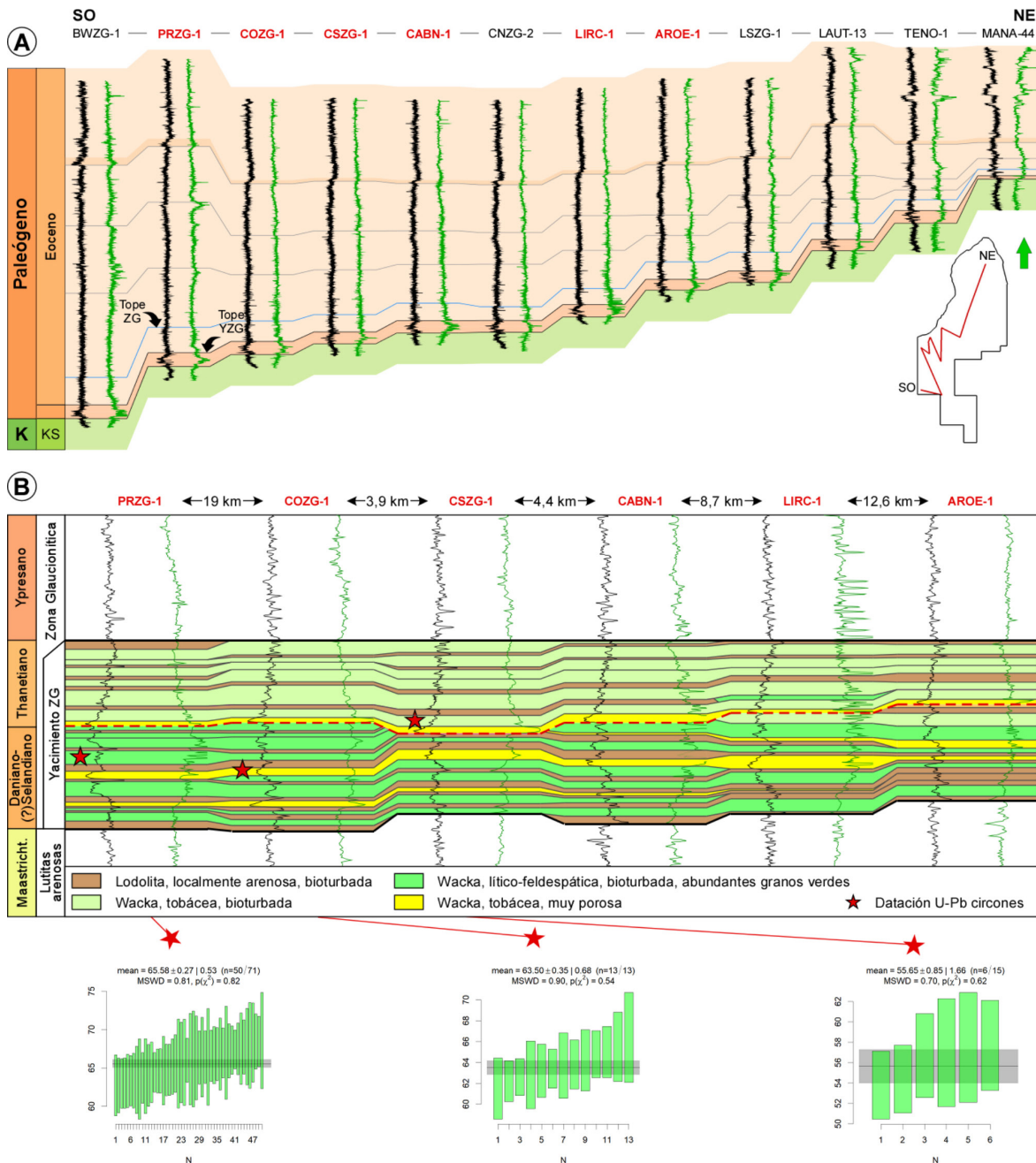


Figura 4. (A) Sección de correlación SO-NE mostrando la disposición y relaciones estratigráficas de la "ZG" en el sector central-septentrional del Bloque Arenal. La sección está horizontalizada en la transición Paleoceno-Eoceno, considerada discordante y a partir de la cual aparece el género del foraminífero bentónico *Elphidium* (e.g., Malumíán *et al.* 2013). (B) Esquema cronoestratigráfico y distribución de litofacies sedimentarias para el reservorio ZG en el área de estudio a partir de los pozos en rojo. Las estrellas indican intervalos con nuevas edades U-Pb de circones detríticos y sus respectivos diagramas de promedios ponderados de edades individuales. Secciones construidas con registros eléctricos GR (negro) y Resistivo (verde).

superficies divide el reservorio ZG en dos intervalos, uno inferior de edad Daniano y otro superior de edad Thanetiano (Fig. 4B), considerando los nuevos datos geocronológicos. Por encima de la superficie ocurren wackas tobáceas porosas. Las rocas por debajo de la superficie pueden estar muy bioturbadas (trazas sin diferenciar) y cementadas por calcita, además de contener fracturas delgadas parcialmente rellenas con calcita blanca que al igual que las litofacies son truncadas por la superficie (Fig. 5A).

Otros dos tipos de superficies que ocurren en el reservorio involucran erosión y probablemente cambios en los niveles de energía y/o en el régimen de depositación. Una de las superficies se caracteriza por un relieve significativo y un marcado contraste litológico entre los depósitos infra y suprayacentes (Fig. 5B). Por encima de la superficie ocurren clastos de lutita (“*shale rip-up clasts*”) y fragmentos fósiles tanto calcáreos (e.g., serpúlidos y bivalvos) como fosfáticos (restos de peces) que pudieran sugerir erosión durante un período de ascenso del nivel relativo del mar. El otro tipo de superficie (Fig. 5C) involucra un cambio granulométrico significativo en los depósitos suprayacentes, llegando a ser conglomeráticos y cuyos granos más grandes se corresponden con clastos de lutita. Esta superficie probablemente refleja erosión durante bajadas del nivel relativo del mar.

También ocurren sustratos firmes que pudieran indicar una interrupción significativa en la sedimentación. Un sustrato firme (Clari *et al.* 1995) representa un sedimento cuya consistencia estable resulta a partir de la compactación y deshidratación cerca del fondo marino (e.g., Bromley 1990). El intervalo típicamente se caracteriza por la ocurrencia de un sistema de trazas fósiles de uno a varios centímetros de diámetro (Clari *et al.* 1995) que en el caso del reservorio ZG lo conforma la ocurrencia monótona y abundante del icnogénero *Thalassinoides* (Fig. 5D-E). La superficie que separa este intervalo de los depósitos suprayacentes se considera de omisión ya que implica un período de tiempo durante el cual no ocurre sedimentación neta, ya sea por no depositación y/o erosión (Bromley 1990, Clari *et al.* 1995). Estas superficies probablemente registran un del nivel de base alto y tasas muy bajas a nulas de sedimentación durante estadios de máxima profundidad de agua.

Litofacies y Ambiente Sedimentarios

Los trabajos anteriores de la “ZG” en el subsuelo de la Isla Tierra del Fuego sugieren heterogeneidad lateral de litofacies y depositación bajo condiciones marinas. Las correlaciones regionales (e.g., Biddle *et al.* 1986) y los cambios laterales de litofacies indican una profundización de la “ZG” hacia el oeste-suroeste. Una evidencia clara de profundización hacia el oeste es el aumento progresivo de espesor de la sucesión acompañado de eventos de flujos en masa y turbidíticos en esa dirección. El material siliciclástico probablemente se originó a partir de dos fuentes, uno al oeste y vinculado con las tierras emergidas debido a la deformación andina, y otro hacia el este y

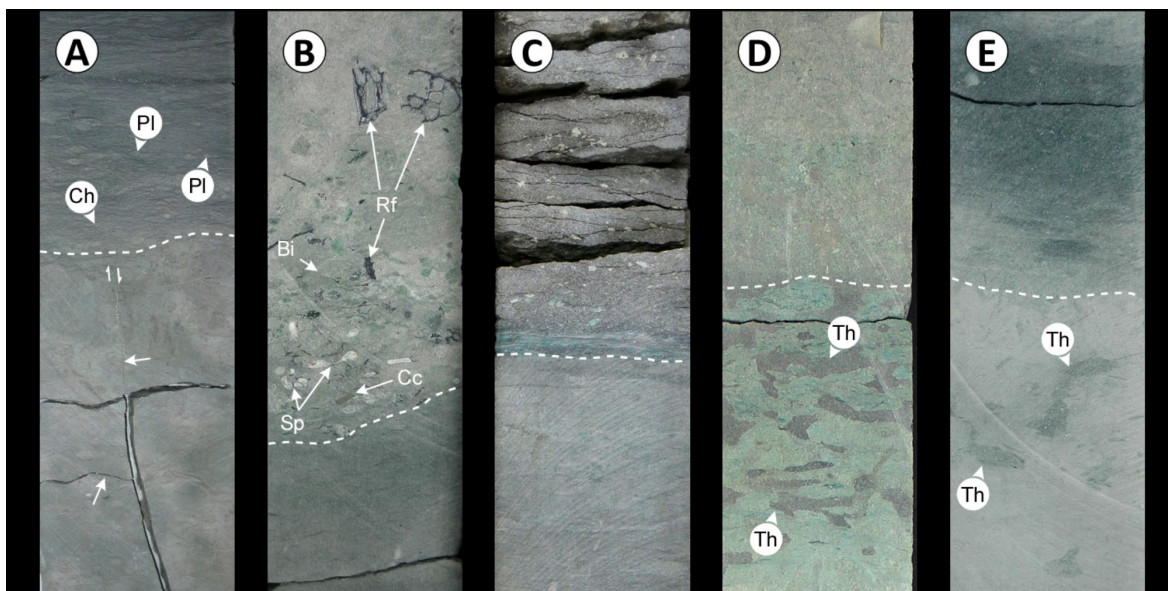


Figura 5. Fotografías de caras pulidas de testigos corona mostrando la ocurrencia de superficies importantes en el reservorio ZG del Bloque Arena. (A) superficie de discontinuidad irregular que separa lutita tobácea por debajo de wacka bioturbada por encima, inmediatamente por debajo de esta superficie la roca está muy cementada por calcita y contiene fracturas delgadas (flechas), algunas de ellas microfallas parcialmente rellenas con calcita blanca que no se extienden más allá de la superficie; Ch = Chondrites y Pl = Planolites. (B) Superficie irregular con relieve marcado que separa wackas con contenido variable de granos verdes, por encima de la superficie ocurren clastos de lodolita color crema (Cc) y verde (Cv), fragmentos de serpúlidos (Sp) y bivalvos de concha fina (Bi) y restos fosfáticos de peces (Rf). (C) Superficie que separa litofacies de granulometría fina por debajo de litofacies con granos tamaño grava por encima. (D y E) Superficies ligeramente irregulares que separan litologías caracterizadas por el icnogénero *Thalassinoides* por debajo, de depósitos de granulometría más gruesa y menos bioturbados por encima; las cavidades biogénicas muestran relleno pasivo proveniente del material suprayacente. El eje horizontal de la fotografía para cada testigo de corona es de 9 cm, aplicables de igual manera a la escala vertical.

asociado con las tierras bajas del continente, incorporadas en las aguas durante subidas del nivel de base y transportadas hacia el sureste a zonas más profundas. La profundización de la cuenca hacia el oeste-suroeste es consistente con el buzamiento de la región propuesta por varios autores sobre la base de interpretaciones sísmicas y sedimentológicas (e.g., Hauser 1964, Biddle *et al.* 1986).

En general, los 120 m de testigos corona evaluados consisten esencialmente en lodolitas y wackas compuestas de cantidades variables de material terrígeno, volcanoclástico y granos verdes. La granulometría de estos depósitos varía principalmente de fina a media, aunque en algunas capas, particularmente a lo largo de superficies de discontinuidad, los granos de grava fina a media pueden ser importantes (Fig. 5B-C). La bioturbación puede estar ausente a nivel de capa, pero generalmente es común a muy abundante; la asociación de trazas fósiles incluye, además de otras formas no determinadas, *Chondrites*, *Planolites*, *Teichichnus* y *Thalassinoides*, y en menor proporción, *Asterosoma*, *Ophiomorpha*, *Phycosiphon* y *Zoophycos*. Esta asociación es diagnóstica de la icnofacies Cruziana, que representa condiciones de depositación sobre la plataforma media a externa por debajo del tren de oleaje normal, pero que pudiera ser afectado por tormentas (e.g., Seilacher 1967). Considerando lo anterior, en el área de estudio se reconocen 4 litofacies sedimentarias (e.g., González *et al.* 2018), cuya definición y características petrológicas y petrofísicas principales

son resumidas en la Tabla 1. La Fig. 6 muestra los rasgos microscópicos de cada una de ellas.

Las litofacies F1 y F2 se pueden alternar para formar intervalos con estratificación similar

Lito-facies	Definición	Componentes principales	Estructuras sedimentarias	Ambiente de depósito	Porosidad promed. (%)	Permeabilidad promed. (mD)
F1	Lutita tobácea, bioturbada	>75% de matriz lodosa arcillosa y tobácea, con cantidades variables (pero <25%) de arena muy fina a fina de líticos ígneos (principalmente volcánicos), plagioclasas, granos verdes y en menor proporción cuarzo.	Laminación gruesa paralela a ondulada. Localmente ocurre “fiamme”. Puede alternar rítmicamente con F2. Bioturbación variable.	Plataforma externa	10	0,01
F2	Wacka tobácea, bioturbada	40-60% de granos muy finos a medios de líticos volcánicos, plagioclasas y en menor proporción de granos verdes y cuarzo, embebidos en una matriz lodosa arcillosa y tobácea.	Estratificación delgada paralela a ondulada. Puede alternar rítmicamente con F1. Bioturbación variable.	Plataforma externa	15	0,1
F3	Wacka lítico-feldespática, bioturbada	40-60% de granos muy finos a medios de líticos volcánicos, granos verdes, plagioclasas y en menor proporción de granos verdes y cuarzo, embebidos en una matriz lodosa arcillosa.	Estratificación delgada y laminación gruesa paralela a ligeramente ondulada. Bioturbación moderada a intensa.	Plataforma media a externa	16	0,2
F4	Wacka tobácea, porosa	40-60% de granos finos a medios de líticos volcánicos, granos verdes generalmente diluidos, plagioclasas y en menor proporción de cuarzo, embebidos en una matriz lodosa arcillosa.	Aparentemente masiva, laminación gruesa difusa, poca bioturbación.	Plataforma media a externa	23	2,4

Tabla 1. Resumen de las principales litofacies sedimentarias establecidas para el reservorio ZG en el sector central del Bloque Arenal (e.g., González *et al.* 2018).

a la “flaser”. El carácter rítmico de las intercalaciones de estas dos litofacies podría reflejar fluctuaciones de poca duración en la producción y transporte de terrígenos finos, fluctuaciones frecuentes del nivel relativo del mar o una combinación de ambos. En general, estos intervalos se interpretan como resultado de sedimentación sobre las partes externas de la plataforma, por debajo del tren de oleaje de tormenta, donde las capas argiláceas representan la decantación de material terrígeno fino suspendido durante períodos de quiescencia hidrodinámica. Las capas con mayor cantidad de material grueso (i.e., arena a grava) indican suministro de material desde las partes más someras o internas de la plataforma durante períodos de mayor energía. La litofacies F3 domina la parte inferior (Daniano-?Selandiano) del reservorio, mientras que F2 predomina en la parte superior (Thanetiano) (Fig. 4B). La litofacies F4 es más común en la parte inferior del reservorio y se incluye como litofacies sedimentaria debido a que el origen de los “poros” es aún ambiguo.

En el área de estudio, la “ZG” muestra una forma tabular o en manto (Figs. 3 y 4A) que, junto con el análisis sedimentológico, sugiere ambientes de depósito que varían de plataforma media a externa. Las litofacies y la aparente ausencia de flujos gravitatorios de sedimento, así como también

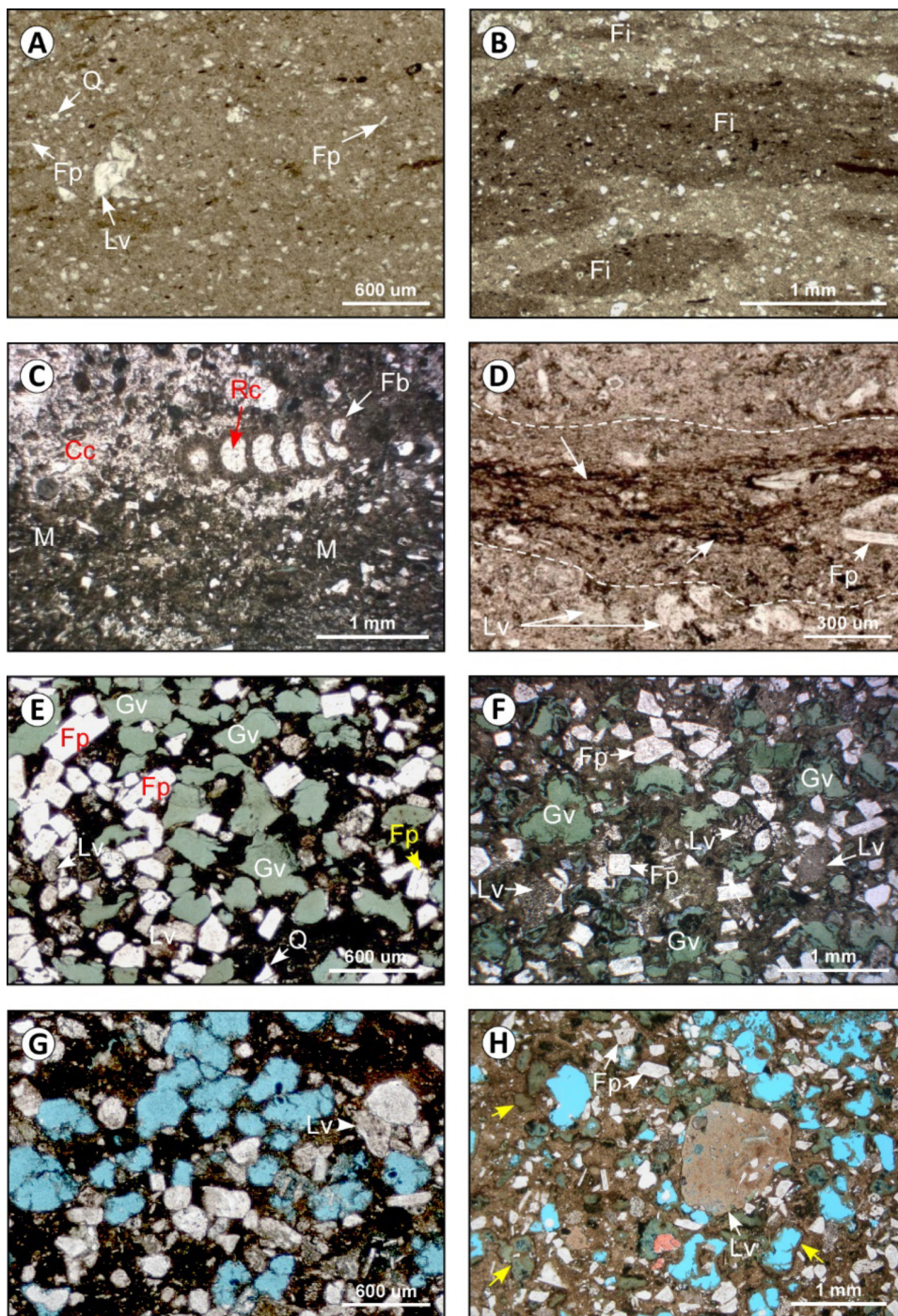


Figura 6. Fotomicrografías de las principales litofacies sedimentarias definidas para el área de estudio. (A-B) F1, lodolita tobácea, bioturbada. (A) Aunque predomina el material arcilloso también ocurren granos arenosos (muy finos a medios) angulosos a subangulosos de fragmentos líticos volcánicos (Lv), plagioclasas (Fp) y cuarzo (Q). (B) Localmente se observa textura del tipo “flamme” (Fi). (C-D) F2, wacka tobácea, bioturbada. (C) Abundante matriz arcillosa (M) con granos muy finos a finos de naturaleza principalmente lítica, parches cementados por calcita (Cc) y escasos foraminíferos bentónicos rellenos de cemento calcítico equigranular (Rc). (D) Lámina arcillosa irregular con concentración de materia orgánica fina a lo largo de los planos de laminación (flechas); los granos más grandes son líticos volcánicos (Lv) y plagioclasas (Fp). (E-F) F3, wacka lito-feldespática, bioturbada. Notar los clastos subangulosos a subredondeados de fragmentos líticos volcánicos (Lv), plagioclasas (Fp) y cuarzo (Q), con cantidades variables de granos verdes cloríticos/glaconíticos (Gv). (G-H) F4, wacka tobácea, porosa. Clastos subangulosos a subredondeados de líticos volcánicos (Lv) y plagioclasas (Fp), con granos verdes glauconíticos/cloríticos (Gv) y muy buena porosidad por disolución. Todas las fotomicrografías con nícoles paralelos.

de deformación de sedimentos no consolidados en los testigos corona recuperados, sugieren pendientes de deposición muy bajas, probablemente menores a 5°, típicas de plataformas estables. La naturaleza discordante del contacto entre los depósitos cretácicos de lutitas arenosas y los depósitos terciarios, localmente glauconíticos y conglomeráticos, de la “ZG” (e.g., Gallardo 1958) sugieren que la transgresión marina se caracterizó por erosión de antepaya o ravinamiento significativa. No obstante, la común ocurrencia de glauconita, componente muy importante en algunas capas y sectores más allá del área de estudio, indica condiciones de depósito dominadas por tasas bajas de sedimentación y rápido ascenso del nivel relativo del mar a profundidades mayores a los 50 m (e.g., Bornhold y Giresse 1985, Rao *et al.* 1993). La subsidencia diferencial, menor en las zonas de plataforma y mayor en el depocentro (antefosa), pudieron ejercer un control importante en la distribución y tipo de sedimento.

Geoquímica

Los análisis de difracción de rayos X (DRX) para 112 muestras del reservorio ZG a partir de 7 pozos del área de estudio, indican litologías dominadas por una mezcla de cuarzo (40 % en promedio), plagioclasas (30% en promedio) y minerales de arcilla (30 % en promedio). El contenido de feldespatos potásicos es muy bajo y en general no supera el 5% del volumen total de los siliciclásticos. La calcita puede estar ausente o constituir más del 50% de la roca, especialmente cuando ocurre asociada con algunas superficies de discontinuidad. La pirita es común en todas las litofacies y puede llegar a alcanzar el 2% a escala de capa. Algunos intervalos contienen cantidades significativas de zeolitas (e.g., analcima y clinoptilolita) y serpentinas (e.g., fraipontita). La fracción arcillosa está principalmente compuesta por clorita (48%), illita (25%) y arcillas de doble capa esmectita-illita (27%) (Fig. 7). En general la glauconita está ausente o se encuentra en cantidades que no superan el 5% del volumen total de la fracción arcillosa.

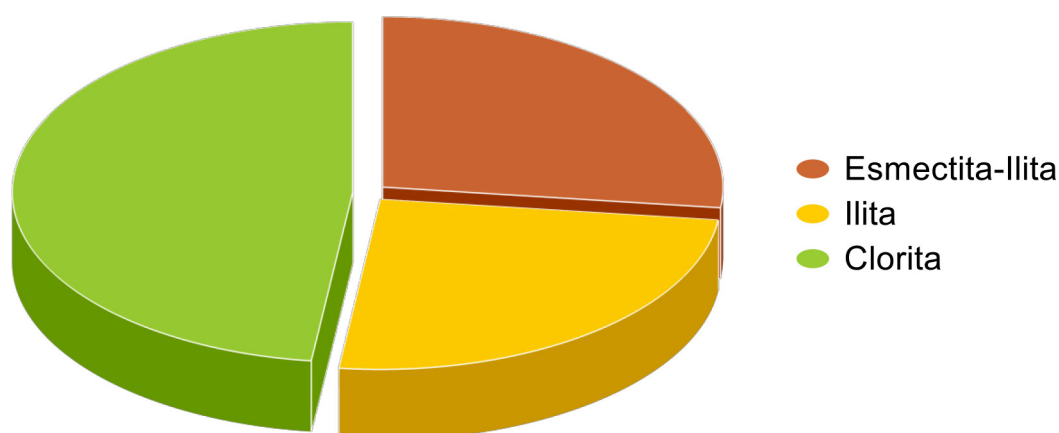


Figura 7. Diagrama de torta ilustrando las proporciones relativas de arcillas en el reservorio ZG en el área de estudio.

Los análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) para 40 muestras del reservorio ZG a partir de tres pozos del área de estudio, indican una variación en el contenido de SiO_2 de 60-80 % con un promedio de 65 % y de Al_2O_3 de 8,5-15 % con un promedio de 12 %. En general, estos depósitos se caracterizan por un elevado contenido de Fe_2O_3 (3-13 %) y MgO (1-4 %). El contenido de TiO_2 (0,5-1 %) es moderadamente alto y pudiera estar vinculado tanto a la ocurrencia de óxidos (e.g., rutilo e ilmenita) y/o con la ocurrencia de biotita, serpentina, clorita y/u otros minerales de arcilla, estos últimos observados en menor o mayor proporción en los análisis petrográficos. El cociente $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ varía de 12-25 % con un promedio de 18 %, sugiriendo una procedencia de fuentes de composición intermedia a félsica (e.g., Hayashi *et al.* 1997); la relación TiO_2 con respecto al contenido de Ni (24-46 ppm) soporta esta interpretación (Floyd *et al.* 1989).

De acuerdo con los cocientes logarítmicos de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ en el diagrama de Herron (Herron 1988) (Fig. 8), las muestras analizadas del reservorio ZG caen en los ámbitos de las arenitas ricas en hierro, lutitas, lutitas ricas en hierro y wackas. El desplazamiento de muestras hacia los ámbitos de lutitas y areniscas ferruginosas pudiera ser provocado por reemplazamiento de pirita, fragmentos líticos volcánicos y/o matriz arcillosa rica en clorita (e.g., Besly *et al.* 1993). El cociente $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ varía de 0,02-0,2 (promedio = 0,13) y sugiere una composición rica en arcilla y pobre en feldespato potásico con respecto a otros siliciclásticos gruesos (e.g., Cox *et al.*

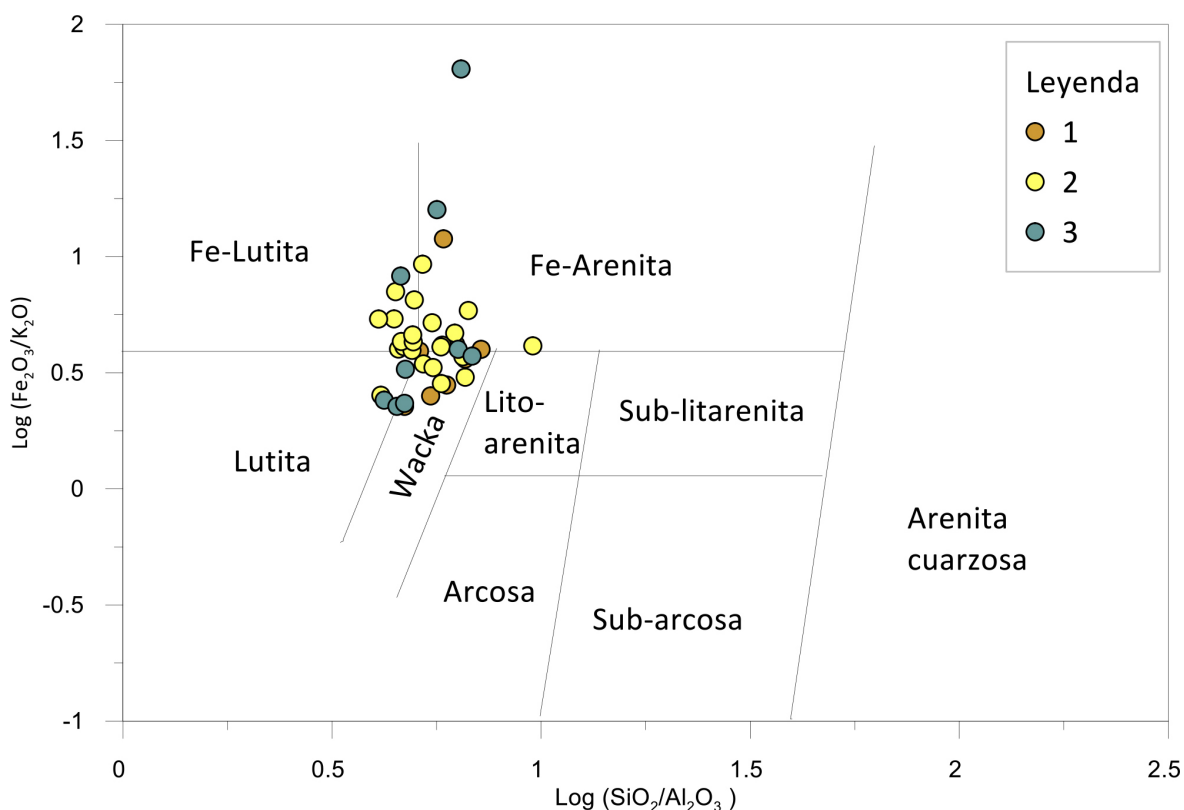


Figura 8. Clasificación de las litofacies del reservorio ZG en el área de estudio de acuerdo con el diagrama de Herron (1988). 1 = lutita, 2 = wacka, 3 = wacka porosa.

1995), que le imprime al reservorio ZG un carácter inmaduro desde el punto de vista textural pero maduro desde el punto de vista composicional, esto último soportado por la variación del coeficiente $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (4-10) (e.g., Roser *et al.* 1996). La abundancia de material volcániclastico en estos depósitos también pudiera ser un factor determinante en la disminución de los valores de $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$. La falta de correlación estadísticamente significativa entre K_2O y Al_2O_3 ($R^2 = 0,4$; $n = 40$) sugiere que la cantidad de K_2O no está controlada exclusivamente por minerales de arcilla. Los datos de elementos trazas y dos cocientes a partir de ellos pueden usarse para inferir condiciones de depósito (e.g., Jones y Manning 1994, Nath *et al.* 1997,). Los cocientes U/Th (0,1-0,6) y Ni/Co (0,6-1,2) sugieren condiciones óxicas de depósito para las muestras analizadas.

Diagénesis, Porosidad y Permeabilidad

Dos de los factores más importantes en la evaluación del potencial de reservorio de las rocas sedimentarias son la diagénesis y la porosidad, en particular la efectiva. Aunque la diagénesis tiende a destruir la calidad de reservorio de muchas unidades rocosas con este potencial, en muchos reservorios petrolíferos del mundo, la diagénesis jugó un papel inverso (e.g., Mullins y Cook 1986). En este apartado se resumen los aspectos diagenéticos más relevantes observados en el análisis microscópico de muestras del reservorio ZG en el área de estudio y su posible impacto en la preservación o modificación de la calidad de reservorio.

El reservorio ZG ha sufrido una historia diagenética compleja que incluye procesos tempranos (sobre el fondo marino o eogénesis) a tardíos durante la etapa de soterramiento; no obstante, la calidad de reservorio parece estar íntimamente ligada con esta última etapa denominada mesogénica. Esta etapa comienza una vez que el sedimento es soterrado por debajo de la acción de los procesos diagenéticos superficiales, desde niveles someros a progresivamente más profundos. Los procesos característicos incluyen (Fig. 9) deformación plástica de partículas, compactación física que puede estar acompañado de reorientación y fragmentación de granos, piritización y glauconitización, desarrollo de matriz y remplazo de granos ricos en clorita/ilita y serpentina (e.g., fraipontita), fracturamiento, cementación por calcita y disolución parcial a total de granos.

La Fig. 10 muestra una secuencia paragenética tentativa de los eventos reconocidos en los testigos corona investigados del área de estudio. De acuerdo con esta secuencia, se pueden definir dos grupos básicos de procesos diagenéticos que afectaron la calidad de reservorio (i.e., porosidad y permeabilidad). El primer grupo se considera reductor o destructor de porosidad primaria e incluye la compactación mecánica y la cementación con calcita, ambos actuando desde la eogénesis y continuando hasta la mesogénesis temprana. El segundo grupo mejora o crea porosidad secundaria e incluye el desarrollo de minerales de remplazo como glauconita y clorita y la disolución diferencial de granos. La bioturbación y fracturamiento temprano por el desarrollo de fallas poligonales pudiera haber ejercido un control en la calidad final de reservorio, pero su importancia re-

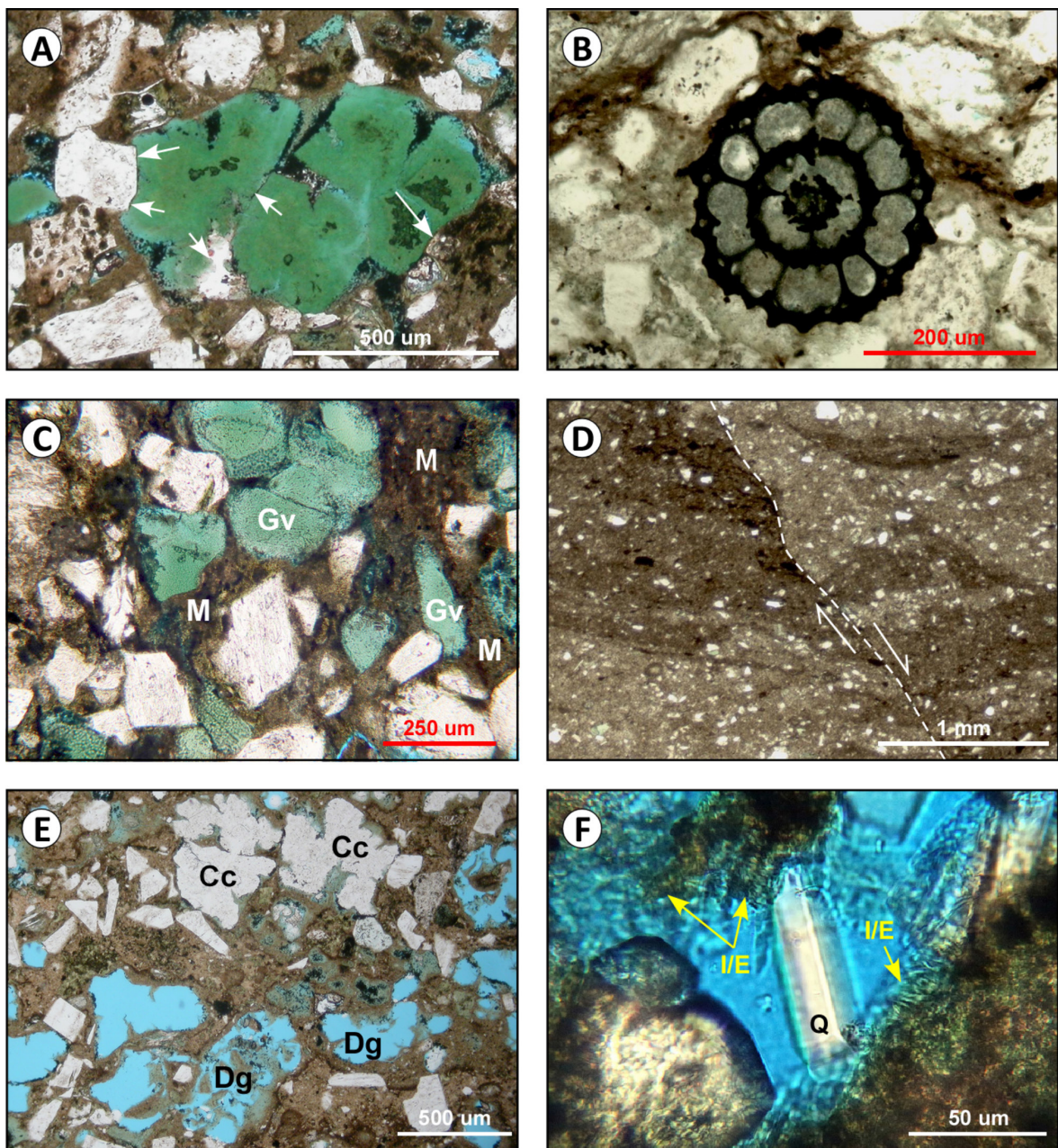


Figura 9. Fotomicrografías de fábricas diagenéticas comunes en la “ZG” del Bloque Arenal. (A) Deformación plástica de partículas (flechas) por compactación física durante el soterramiento temprano; localmente puede estar acompañado de reorientación y fragmentación de partículas componentes. (B) Piritización de bioclastos. (C) Matriz rica en illita y fraipontita (M) y granos verdes cuyo carácter original ha sido reemplazado por serpentina/clorita (Gv). (D) Fracturamiento con desplazamiento (micro-falla) en lodolita tobácea con textura tipo “fiamme”. (E) Cementación por calcita (Cc) y disolución parcial a total de granos (Dg) creando porosidad (azul). (F) Porosidad móldica por disolución (azul) parcialmente obstruida por cuarzo autigénico (Q) y arcilla esmectita-illita (I/E). Todas las fotomicrografías con nícoles paralelos.

lativa hasta ahora no se ha podido ponderar. Por otro lado, aunque la porosidad primaria intergranular parece estar ausente, no se descarta la ocurrencia de microporosidad primaria intercrystalina en las distintas litofacies. La porosidad secundaria es la que predomina y puede variar de menos del 10 % en los intervalos lodosos a más de 20 % en algunas capas de *wackas* tobáceas (Tabla 1). La

porosidad secundaria está dominada por móldica, intragranular y, en menor proporción, intercris- talina, especialmente en la matriz. La ocurrencia de microporos en minerales de arcilla y la matriz puede incrementar la porosidad hasta en un orden de magnitud con respecto a la porosidad visual o petrográfica. La cementación con calcita probablemente ocurrió durante la etapa temprana del soterramiento y localmente afectó significativamente la calidad de reservorio, ya sea rellenando microfracturas (Fig. 5A) u obstruyendo la porosidad primaria intra e interpartícula (Fig. 6C).

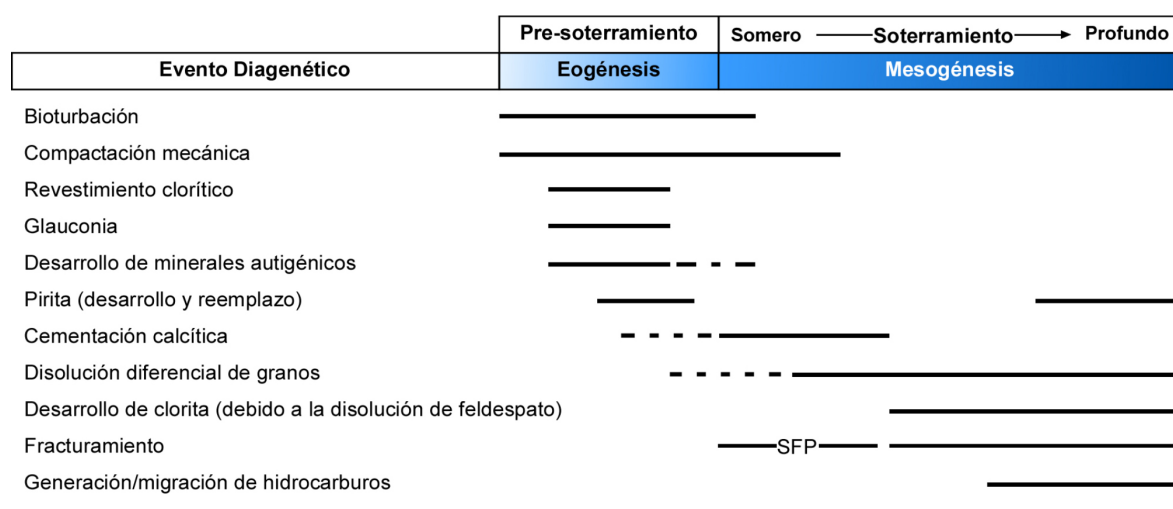


Figura 10. Secuencia paragenética para las rocas reservorio del área de estudio sobre la base de los análisis petrográficos.

Una característica particular del reservorio ZG es su contenido variable, pero persistente, de granos verdes y, en menor proporción, de pirita, aunque esta última localmente puede ser abundante y afectar, por ejemplo, las lecturas de resistividad. La pirita diagenética temprana ocurre como nódulos pequeños y/o framboides, mientras que la pirita diagenética tardía ocurre como remplazo de bioclastos (Fig. 9B). Los granos verdes son muy comunes en la parte inferior del reservorio, donde pueden llegar a alcanzar hasta más del 35% del volumen total de una capa (Figs. 6E-F y 9C); las litofacies por debajo (lutitas arenosas) y por arriba (parte superior del reservorio) contienen cantidades relativamente menores, no más del 15%. Los análisis de DRX indican que los granos verdes son principalmente cloríticos en lugar de glauconíticos como tradicionalmente se había pensado. No obstante, la mayoría de los granos verdes cloríticos probablemente pasaron por una fase temprana de glauconitización previo al proceso de cloritización.

La clorita no solo ocurre como arcilla principal de los granos verdes sino también como parte de la matriz, cemento y relleno de poro (autigénica). La clorita autigénica probablemente se desarrolló por disolución de feldespatos o fragmentos líticos volcánicos durante la mesogénesis tardía al mismo tiempo o después de la alteración de esmectita e illita. Aunque la clorita es un mineral de densidad alta, la clorita autigénica es comúnmente microporosa y puede provocar en la roca una

densidad relativamente baja (con relativamente buena porosidad) pero con baja permeabilidad (Worden *et al.* 2020). La porosidad secundaria (móldica), al parecer por disolución de granos, que caracteriza la litofacies F4 (Figs. 6G-H y 9E), ha sido tema de interés e interrogantes desde sus primeros análisis petrográficos. Componentes como bioclastos, feldespatos y granos glauconíticos se han propuesto como precursores de las cavidades; no obstante, la forma de las cavidades y composición y fábrica de la roca, junto con la estabilidad de la glauconita a profundidades del reservorio (~2 km en promedio) complica esas interpretaciones. Otra posibilidad, basada en la composición preponderantemente clorítica de los granos verdes preservados, es que los poros de la litofacies F4 fueron el producto de disolución o lavado de clorita durante la acidificación del ambiente diagenético debido a un incremento en el flujo de CO₂, lo cual hace a la clorita más soluble especialmente a temperaturas menores de 120 °C (e.g., Worden *et al.* 2020). El CO₂ pudo ser aportado en solución, provenir de la disolución de material carbonático (e.g., valvas de invertebrados) o a partir de la presencia de hidrocarburos. De acuerdo con esta hipótesis, una vez cloritizado el grano, su precursor podría ser cualquiera de los mencionados anteriormente e inclusive partículas volcánicas como lapilli o vesículas inicialmente rellenas con vidrio volcánico.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De acuerdo con los nuevos datos geocronológicos (U-Pb en circones detríticos), el reservorio gasífero no convencional de la “ZG” en el sector central del Bloque Arenal es de edad Paleoceno y puede ser dividido en dos intervalos: uno inferior Daniano-(?)Selandiano y otro superior Thanetiano, separados por una superficie discordante. El reconocimiento apropiado de esta y otras superficies importantes constituye un paso esencial en la evaluación de su potencial como (1) indicadores de eventos tectónicos o eustáticos para reconstrucciones geohistóricas y (2) vías de migración de fluidos y barreras de permeabilidad vertical para el análisis del riesgo exploratorio en la cuenca. Si las edades U-Pb de circones detríticos son robustas, este nuevo esquema ayudará a una mejor correlación cronoestratigráfica y, por ende, a un mayor entendimiento regional de las relaciones tanto verticales como laterales de los intervalos reservorio de la “ZG” para futuras ubicaciones de pozos exploratorios.

El potencial de reservorio de las rocas sedimentarias depende de la interacción de los procesos de depósito y diagenéticos, especialmente en rocas con alto contenido de clorita y otros tipos de arcilla, ya que solo una pequeña cantidad de ellas en el sistema de poros puede modificar sustancialmente la porosidad efectiva y, por ende, la permeabilidad. Debido a que el producto final de la diagénesis depende de la composición original de los sedimentos, la naturaleza y movimiento de los fluidos intersticiales y el carácter y tiempo de acción de los procesos físico-químicos involucrados, el establecimiento de una secuencia paragenética es esencial para el modelado geológico del reservorio. En general, las rocas del reservorio ZG en el Bloque Arenal exhiben

baja calidad de reservorio, mostrando buenas porosidades, pero permeabilidades esencialmente limitadas. La variación lateral y vertical en la composición mineral (e.g., cuarzo, plagioclasa, calcita, minerales de arcilla, etc.) y los efectos de soterramiento (e.g., compactación, cementación, disolución diferencial de granos y fracturamiento) no solo pueden producir heterogeneidad lateral y vertical en las propiedades petrofísicas, sino también patrones característicos en registros de pozo, curvas de presión capilar y tamaños de garganta de poro.

La caracterización y modelado de un reservorio dominado por minerales autigénicos como la clorita o glauconita requiere no solo un conocimiento sistemático del tipo y escala de heterogeneidad de sus propiedades, sino también de los límites de las litofacies correspondientes. La gran variabilidad de las respuestas de registros de pozo y propiedades petrofísicas en una sucesión siliciclástica “limpia”, es decir, sin o con muy poca presencia de arcillas, está directamente relacionada con la composición de los granos y el tipo de porosidad y fluido intersticial. Sin embargo, la cementación calcítica y el contenido de partículas carbonáticas, además de la ocurrencia de minerales como clorita, piritita y fosfato, complican el panorama. Esta situación se presenta en el reservorio ZG y a menos que se entienda y estime de manera cuantitativa la escala y distribución tridimensional de la heterogeneidad de los intervalos reservorio, los esquemas de exploración y explotación para esta unidad seguirán siendo una interrogante.

Por otro lado, debido a su potencial efecto sobre el sistema petrolífero de una región, el reconocimiento de fallas poligonales en la Cuenca de Magallanes ha incentivado no solo nuevas ideas sobre los modelos de migración de fluidos sino también nuevas estrategias para el manejo de la actividad de exploración y perforación. Dado que el reservorio ZG se encuentra afectado por estas fallas su ocurrencia podría tener implicaciones negativas o positivas de acuerdo con las características y relaciones geométricas de las fallas y los intervalos reservorios o sellos. Desde el punto de vista negativo, las fallas poligonales podrían constituir localmente un riesgo para la capacidad de sello y por consiguiente para la retención de los fluidos. Por otra parte, en el mejor de los casos, estas fallas podrían beneficiar la productividad actuando como vías de alta permeabilidad. Además, en la práctica se ha aprendido que las fallas poligonales pueden compartimentar el reservorio, creando en algunos casos distintas condiciones de permeabilidad y comportamiento hidrodinámico en cada compartimento (e.g., González *et al.* 1998).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las gerencias de ENAP Magallanes y SIPETROL por permitir la publicación de este trabajo. También estamos muy agradecidos con las correcciones de forma y las sugerencias constructivas de fondo de los evaluadores Mariano Ragazzi y Muriel Miller.

REFERENCIAS CITADAS

- Biddle, K.T., Uliana, M.A., Mitchum Jr., R.M., Fitzgerald, M.G., y Wright, R.C., 1986. The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America, en Allen, P.A., and Homewood, P., eds., *Foreland Basins*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 8, p. 41-63.
- Bornhold, B.D., y Giresse, P., 1985. Glauconitic sediments on the continental shelf off Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 55, p. 653-664.
- Bromley, R.G., 1990. *Trace Fossils—Biology and Taphonomy*. Unwin Hyman, London, 280 pp.
- Bruhn, R.L. and Dalziel, I.W.D., 1977. Destruction of the Early Cretaceous marginal basin in the Andes of Tierra del Fuego, in Talwani, M., and Pitman, W.C., eds., *Island Arcs Marginal Basins and Deep Sea Trenches*. American Geophysical Union, p. 395-405.
- Carpinelli, A., Saá, A., Radic, J.P., Valderrama, J.M. y Zurita, E., 2013. Propuestas de pozo 2013-2014. ENAP Informe Interno (inédito), 157 p.
- Carpinelli, A., Saá, A., Zurita, E., Valderrama, J.M., Radic, J.P., Soto, L., Zapata, R. y Gschaidner, T., 2015. Propuesta de desarrollo y extensión de la “Zona Glauconítica” desde locaciones multipozo, Bloque Arenal. ENAP Informe Interno (inédito), 91 p.
- Cartwright, J.A., 2011. Diagenetically induced shear failure of fine-grained sediments and the development of polygonal fault systems. *Marine and Petroleum Geology*, v. 28, p. 1593-1610.
- Clari, P.A., Dela Pierre, F. and Martire, L., 1995. Discontinuities in carbonate successions—identification, interpretation, and classification of some Italian examples. *Sedimentary Geology*, v. 100, p. 97-121.
- Cox, R., Low, D.R., Cullers, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, p. 2919-2940.
- Dalziel, I.W.D., 1986. Collision and cordilleran orogenesis—an Andean perspective, in Coward, M.P. and Ries, A.C., eds., *Collision Tectonics*. Geological Society of London Special Publication 19, p. 389-404.
- Di Biase, 1980. Distribución de lavas andesíticas en la base de la Zona Glauconítica. ENAP Informe Interno (inédito).
- 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.
- Fildani, A., Romans, B.W., Fosdick, J.C., Crane, W.H. and 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.
- Fosdick, J.C., Graham, S.A. and Hilley, G.E., 2014. Influence of attenuated lithosphere and sediment loading on flexure of the deep-water Magallanes retroarc foreland basin, Southern Andes. *Tectonics*, v. 33, p. 1-21.

- Frigrerio, P., 2018. Caracterización y origen de los niveles porosos empobrecidos en potasio de zona glauconítica, XII región de Magallanes, Chile. Universidad Andrés Bello, Tesis de Pregrado, 167 p.
- Galeazzi, J.S., 1998. Structural and stratigraphic evolution of the western Malvinas Basin, Argentina. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 82, p. 596-636.
- Gallardo, A., 1958. Estudio regional de sub-superficie sobre la zona glauconítica, su distribución y sus posibilidades de acumulación de hidrocarburos. ENAP, Informe Interno (inédito).
- Gehrels, G.E., Valencia, V.A., and Ruiz, J., 2008. Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of U-Pb ages by laser ablation-multicollector-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Geochemistry Geophysics Geosystems, American Geophysical Union, v. 9, 13 p.
- Ghiglione, M.C., Quinteros, J., Yagupsky, D., Bonillo-Martínez, P., Hlebszevtich, J., Ramos, V.R., Vergani, G., Figueroa, D., Quesada, S. and Zapata, T., 2010. Structure and tectonic history of the foreland basins of southernmost South America. Journal of South American Earth Sciences, v. 2, p. 262-277.
- González, A., Ahumada, M., Canessa, N., Pérez, A., Sánchez, J. y Valderrama, J., 2017. Prospectividad área Arenal Suroeste (ASO) reservorio Zona Glauconítica, Bloque Arenal, isla Tierra del Fuego, Chile. ENAP, Informe Interno (inédito), 36 p.
- González, A., Valderrama, J.M., Gschaidner, C.T., Adaros, R., Verdugo, M., Canessa, N.D., Pérez, A., Velásquez, A., Sánchez, J., Ahumada, M. y González, M., 2018. Desarrollo del "play tight gas" Zona Glauconítica, Bloque Arenal, Cuenca de Magallanes, Chile: caso estudio. 10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos No Convencionales: Hacia una Nueva Convención, Mendoza, Argentina, p. 455-477.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M., eds, 2020. The Geologic Time Scale 2020. Elsevier, Amsterdam.
- Hauser, A., 1964. La "Zona Glauconítica" en la plataforma Springhill, Magallanes, Chile". Tesis no publicada, Universidad de Chile, Escuela de Geología, 266 p.
- Harambour, S., 1978. Exploración petrolera en Magallanes. ENAP, Informe Interno (inédito), 15 p.
- Hayashi, K., Fujisawa, H., Holland, H., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 61, p. 4115-4137.
- Herron, M.M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data: Journal of Sedimentary Petrology, v. 58, p. 820-829.
- Jop, F.R., 2021. Caracterización petrológica, geoquímica y geocronológica de la "Zona Glauconítica" superior de la Cuenca de Magallanes. Universidad Andrés Bello, Tesis de Pregrado, 142 p.
- LCV, 2014a. Sondeo Cabaña Norte-1 (1ª y 2ª ccc), formación Zona Glauconítica, estudio sedimentológico, petrofísico, petrográfico, diagénético, mineralógico y de microscopía electrónica de barrido. ENAP Informe Interno (inédito), 56 p.
- LCV, 2014b. Sondeo Arenal Oeste-1 (1ª ccc), formación Zona Glauconítica, estudio sedimentológico, petrofísico, petrográfico, diagénético, mineralógico y de microscopía electrónica de barrido. ENAP Informe Interno (inédito), 38 p.

- LCV, 2014c. Sondeo Lircay-1 (1^a ccc), formación Zona Glauconítica, estudio sedimentológico, petrofísico, petrográfico, diagenético, mineralógico y de microscopia electrónica de barrido. ENAP Informe Interno (inédito), 69 p.
- LCV, 2018a. Sondeos Cabaña Oeste ZG-1, Cabaña Sur ZG-1 y Cabaña Norte ZG-2, muestras de coronas reservorio Zona Glauconítica, estudio petrográfico, diagenético, mineralógico, de microscopia electrónica de barrido y petrofísico. ENAP Informe Interno (inédito), 118 p.
- LCV, 2018b. Sondeo Progreso ZG-1, muestras de coronas formación Zona Glauconítica, estudio petrográfico, diagenético, mineralógico, de microscopia electrónica de barrido y petrofísico. ENAP Informe Interno (inédito), 63 p.
- Lohmar, S., 2018. Informe final de asesoría para el estudio de rocas volcánicas en la "Zona Glauconítica" del área Cabaña-Río del Oro. ENAP, Informe Interno (inédito), 46 p.
- Malumian, N., Hromic, T. y Nández, C., 2013. El Paleógeno de la Cuenca de Magallanes-Bioestratigrafía y discontinuidades. *Anales del Instituto de la Patagonia*, v. 41, p. 29-52.
- Mohr, C., 1945. Columna estratigráfica Pozo Manantiales-1. ENAP, Informe Interno (inédito), 1 p.
- Mpodozis, C., P. Mella, and D. Padva, 2011. Estratigrafía y megasecuencias sedimentarias en la cuenca Austral-Magallanes, Argentina y Chile. Artículo presentado en el VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, Argentina.
- Mullins, H.T. y Cook, H.E., 1986. Carbonate apron models—alternatives to the submarine fan model for paleoenvironmental analysis and hydrocarbon exploration. *Sedimentary Geology*, v. 48, p. 37-79.
- 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.
- Paces, J.B. and Miller, J.D., 1993. Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: Geochronological insights to physical, petrogenic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga Midcontinent Rift System. *Journal of Geophysical Research*, v. 98, p. 13997-14013.
- Pinto, J.A., Montecinos, M. y Mella, P., 2014. Polygonal Fault System in the Cretaceous of the Magallanes Basin, southern Chile. Extended abstract prepared in conjunction with oral presentation given at AAPG International Conference & Exhibition, Istanbul, Turkey, September 14-17.
- Pinto, J.A., González, D.L., González, A.P., Zapata, R.A. y Mella, P.E., 2018. Polygonal Fault System in the Paleogene of the Magallanes Foreland Basin, Southern Chile. Extended abstract prepared in conjunction with oral presentation given at Unconventional Resources Technology Conference in Houston, Texas, 23-25 July.
- Rao, V.P., Lamboy, M., y Dupeuble, P.A., 1993. Verdine and other associated authigenic (glaucony, phosphate) facies from the surficial sediments of southwestern continental margin of India. *Marine Geology*, v. 111, p. 133-158.
- Roser, B.P., Cooper, R.A., Nathan, S. and Tulloch, A.J., 1996. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, v. 39, p. 1-16.
- Seilacher, A., 1967. Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, v. 5, pp. 413-428.

- Stacey, J.S. and Kramer, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 26, p. 207-221.
- Thomas, C.R., 1949. Geology and petroleum exploration in Magallanes Province, Chile. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 33, p. 1553-1578.
- Vallejos, D., 2020. Descripción sedimentológica, interpretación de facies e integración de datos petrofísicos del testigo del pozo Cabaña Oeste ZG-1, Yacimiento Zona Glauconítica, Bloque Arenal, Magallanes. ENAP. Informe Interno (inédito).
- Vermeesch, P., 2018, IsoplotR—a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, v. 9, p. 1479-1493.
- Wilson, T.J., 1991. Transition from back-arc to fore-land basin development in the southernmost Andes: stratigraphic record from the Ultima Esperanza District, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, v. 103, p. 98-111.
- Winslow, M.A., 1981. 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.
- Worden, R.H., Griffiths, J., Wooldridge, L.J., Utley, J.E.P., Lawan, A.Y., Muhammed, D.D., Simon, N. and Armitage, P.J., 2020. Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, v. 204, p 1-38.
- Zurita, E., Carpinelli, A., Trejo, S. and Saa, A., 2013. Gas resource potential from Maastrichtian-Eocene reservoir in Magallanes Basin, Chile. *American Association of Petroleum Geologists, International Conference and Exhibition, Cartagena, Colombia, September 8-11, 2013*, Search and Discovery Article no. 90166.

