

CARACTERIZACIÓN INTEGRAL GEOLÓGICA-ESTADÍSTICA DE LA FORMACIÓN QUINTUCO, EN EL YACIMIENTO LINDERO ATRAVESADO, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA

Diego D. Lasalle (1)

(1) Pan American Energy dlasalle@pan-energy.com

Keywords: Quintuco Formation, stratigraphy sequences, Neuquen Basin.

Abstract:

The lower Quintuco Formation belongs to a transgressive-regressive sequence of Thitonian-Valanginian age.

The stratigraphic characterization study focuses on establishing a geological model useful to help to understand and predict hydrocarbon bearing facies and their relationship between the Eastern and Western Lindero Atravesado block, Neuquén basin, Argentina.

The methodology is based upon revision and reinterpretation of over 14500m of well cuttings and ten cores, vertical sequence facies analysis (targeting different shallowing-up levels), and sequence stratigraphy correlation using the existing 3D seismic data.

A sound final model is achieved by generating tridimensional litho-cubes using Gaussian Sequence Simulation techniques (geostatistic).

The depositional environment is interpreted to be formed by strips of inner-platform oolitic barriers, bounding a restricted shelf lagoon where dolomitization processes took effect (Eastern Lindero Atravesado).

Only one productive level, called "Capa Cero" is being developed in Western Lindero Atravesado. Based on this model, new prospective areas are being proposed in both areas within Lindero Atravesado block

INTRODUCCIÓN:

La Formación Quintuco es integrante de la secuencia transgresiva-regresiva Titoniana-Valanginiana que se inicia con los depósitos marinos de la Formación Vaca Muerta, y que culmina con los términos continentales fluvio deltaicos de la formación Centenario.

Subdividida en tres miembros (Superior, Medio e Inferior) de acuerdo a características geoelectricas y litológicas, se distinguen en cada uno de ellos ambientes que varían entre las facies extremas ya citadas.

Regionalmente la naturaleza litofacial condiciona la distribución de las zonas productivas. En Lindero Atravesado sólo el Mb. Inferior posee interés económico.

El Miembro Inferior de la Formación Quintuco en el Area Lindero Atravesado, corresponde a una edad Valanginiano temprano, registrándose el pase a depósitos de edad Tithoniano-Berriasiano en la base.

Con fines de desarrollar el yacimiento, históricamente se dividió al Mb. Inferior, en cuatro unidades paraestratigráficas (A, B, C y D), homologables a las reconocidas en el yacimiento Río Neuquén y subdividiéndolas luego en ocho (A1, A2, B1, B2; etc).

Se realizó el presente estudio estratigráfico de caracterización cuyo objetivo es el de establecer un modelo geológico que permita entender y predecir la distribución de facies favorables para el entrapamiento de hidrocarburos, como asimismo la relación entre los sectores Oriental y Occidental del área.

A partir de la descripción de 14.500 m de cuttings utilizando la clasificación de Dunham (1962) y Embry y Klován (1971) y 10 coronas, se analizó la evolución vertical de facies deposicionales reconociéndose ciclos de somerización de diferentes ordenes, limitados por niveles que implican una profundización relativa.

Diversos reservorios se reconocen en Lindero Atravesado Oriental a lo largo de unos 200 m de espesor; mientras que solo uno (“Capa Cero”) se desarrolla en Lindero Atravesado Occidental.

La solidez del modelo descrito arriba, determinado en forma puntual en la distribución geográfica de pozos utilizados, fue reafirmada en términos de estratigrafía secuencial, al relacionarla e integrarla con la interpretación de la sísmica existente.

Este modelo geológico integral permitió describir con mayor certidumbre, las áreas en desarrollo como así también evaluar el potencial exploratorio mediante la generación ulterior de modelos tridimensionales con perfiles litológicos modelados utilizando simulación secuencial gaussiana (Geoestadística).

METODOLOGÍA DE TRABAJO:

Etapas I – Elaboración de la Información de Base

El trabajo de caracterización geológica se desarrolló en tres etapas.

En esta primera etapa descrita con detalle en la **Fig.Nº1 y 2**, se pasa sucesivamente desde la descripción de cutting con clasificaciones apropiadas para rocas carbonáticas (Dunham-Embry y Klován), estudios bioestratigráficos, Redes Neuronales para la generación de perfiles faltantes y la identificación de facies con un significado genético, para ser usadas en la Etapa II, en un análisis vertical de las mismas.

Mediante la utilización de Pozos Clave (cuatro pozos con coronas), junto a la información anterior, se procedió a la generación de perfiles de facies en Lindero Atravesado Oriental.

Posteriormente se realizó la descripción de facies de los pozos correspondientes al Sector Occidental (10 pozos).

La información referente a la descripción de facies se graficó en informes individuales, conteniendo un perfil en Esc. 1:200, con el detalle litológico y el set de perfiles completo, donde también se indicó la ubicación de punzados y el resultado de los ensayos iniciales.

Se aplicaron términos modificadores a las nomenclaturas propuestas por los autores mencionados, según se detalla a continuación.

- Arenoso: participación silicoclástica superior al 15%.
- Dolomitizado: reemplazo dolomítico superior al 50%.
- Dolomía (grainstone): se aplica en los casos en los que, si bien el reemplazo dolomítico es cercano al 100%, es posible reconocer la textura original.
- Arenitas y pelitas transicionales: participación de granos carbonáticos en una proporción mayor de 10%.
- Arenitas calcáreas: calcita como cemento.
- Textura sacaroides: mosaico dolomítico euhedral, con abundante desarrollo de porosidad intercrystalina y móldica (no es posible reconocer la textura original)

Los subciclos y secciones identificados, se detallan en la columna tipo (**Fig.Nº3**). Los subciclos 1.1.1, 1.1.2, 4.1, 4.2 y 4.3, concentran más del 50% de los ensayos originales de petróleo y gas, y poseen el mayor porcentaje de dolomitas, y fueron utilizados como base para la realización de Block Diagramas y mapeo de espesores permeables e isolíticos de dolomías a fin de mostrar el ambiente geológico de depositación, divisiones laterales y verticales de los reservorios. **Fig.Nº4**

El estudio de coronas incluyó: descripción litológica, sedimentológica, petrográfica, diagenética, petrofísica (básica), NOBP (bajo presión de confinamiento), PE (puntos extremos), PC (presión capilar), FF (factor de formación), también DRX (difracción de Rayos X), MEB (microscopio electrónico de barrido) y EDAX (microanálisis por sonda de electrones).

Considerando los dos sectores del Yacimiento en su conjunto, la totalidad de metros de cutting descripto alcanzó aproximadamente los 14.500 m, con 36 pozos, más 101 m de coronas (10 coronas, 2 carreras dobles y 8 simples).

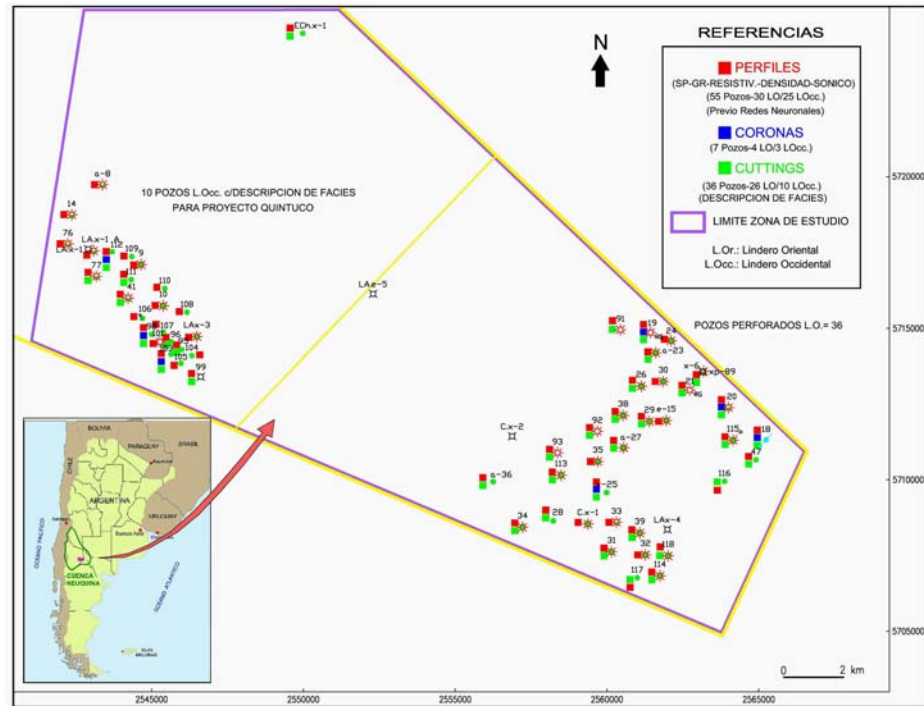


Fig 1-Yac.Lindero Atravesado-Detalle de información

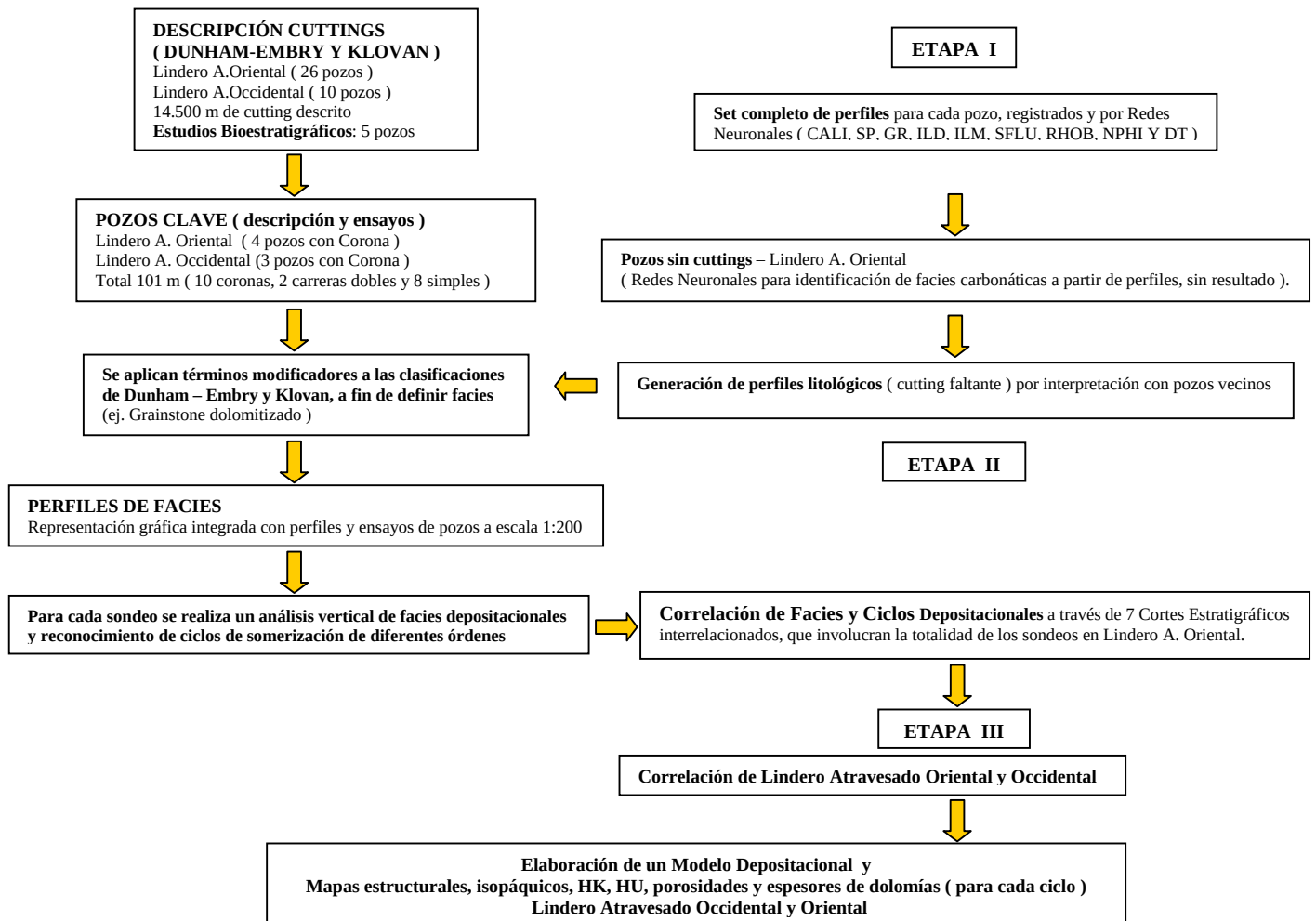


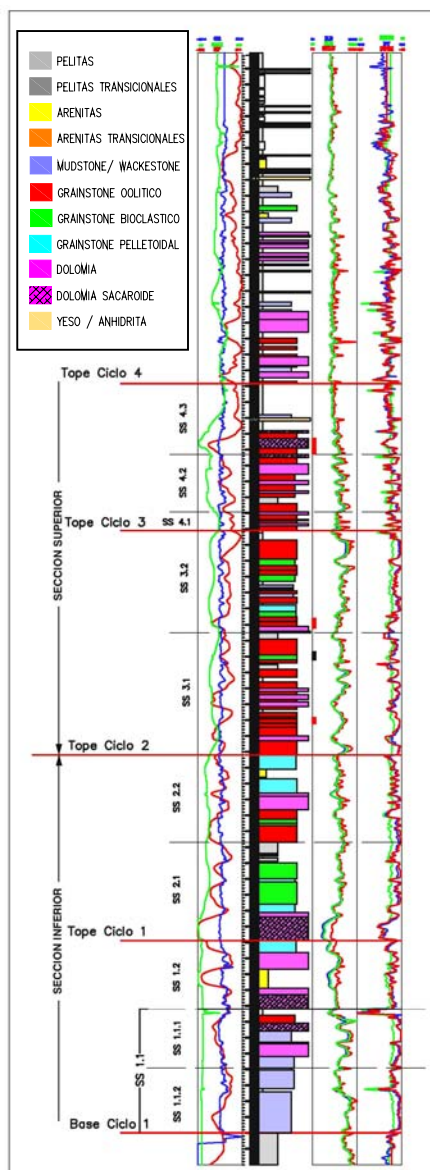
Fig.2-Metodología de trabajo

La definición de subciclos y secciones se equipara al término “parasequences” y “parasequences set”, empleado habitualmente en la bibliografía (Van Wagoner et al, 1988a), considerados en un rango que los sitúa como subciclos estratigráficos de Cuarto y Quinto Orden reconocibles en la escala de testigos corona y perfiles de pozo (Goldhammer et al, 1999).

Las nomenclaturas litológicas utilizadas corresponden a las clasificaciones para rocas carbonáticas propuestas por Dunham (1962) y Embry y Klován (1971) y la porosidad fue descrita siguiendo la clasificación de Choquette y Pray (1970). Las muestras clásticas fueron clasificadas de acuerdo a la terminología propuesta por Dott (1964) y Folk (1970) y la porosidad fue descrita siguiendo la clasificación de Schmidt y Mc Donald (1979).

Se reconocieron once facies definidas sobre la base de criterios composicionales y texturales. Con el aporte de las estructuras sedimentarias observadas en las coronas se asignaron niveles de energía y se interpretaron ambientes depositacionales en sentido amplio. Las mismas son: pelitas, pelitas transicionales, arenitas, arenitas transicionales, mudstone/wackestone, packstone/grainstone peletoidal, packstone/grainstone bioclástico, packstone/grainstone oolítico, dolomías, yeso/anhidrita y toba, añadiéndose el término dolomitizado, cuando así correspondiere.

Se identificaron en el Miembro Inferior de la Fm. Quintuco diez subciclos de orden menor agrupados en cuatro ciclos, y considerando la totalidad del intervalo se reconocen dos ciclos mayores, limitados por la que



parece ser la superficie de profundización relativa más extendida de todo el intervalo ubicada en la base del subciclo 3.1.

Considerando el entorno de las facies presentes en todos los pozos, son destacables dos profundizaciones relativas: base subciclo 3.1 y base subciclo 4.2. La primera de ellas, más extendida y perdurable está asociada a facies de plataforma interna, excepto en las posiciones más proximales (que es donde se define el límite), siendo la componente principal de carácter agradacional. Para la segunda, base subciclo 4.2, evoluciona muy rápidamente a posición de planicie de mareas, en toda el área, indicando una dinámica progradacional, destacándose por lo tanto comportamientos diferentes en cada uno de estos eventos.

Dada la escasa extensión del área de estudio el contraste de facies en el interior de cada ciclo es poco marcado. En relación a esta limitación cabe destacar que los mismos fueron definidos predominantemente en los pozos ubicados en el sector NE del área, en los que por tener una ubicación paleogeográfica proximal, se verifica una mayor movilidad de los subambientes depositacionales que se expresa en una mayor variación de las facies en sentido vertical.

Asimismo la zona NE cuenta con tres de las cuatro coronas existentes en Lindero Atravesado Oriental, lo que permitió a su vez un mayor ajuste.

El análisis de cada subciclo revela una tendencia somerizante y, considerando la totalidad del intervalo, puede generalizarse una tendencia agradacional-progradante en la evolución de las facies ya que se verifica la evolución desde facies marino abiertas en la base hasta la instalación de condiciones de deposición supramareales en casi toda el área hacia el techo del Mb. Inferior.

Modelo Paleoambiental

Sobre la base de las litologías descritas y las estructuras sedimentarias observadas en los tramos coroneados, se elaboró un modelo depositacional generalizado. Se interpreta a Lindero Atravesado Oriental como parte de una rampa carbonática con desarrollo de complejos de barras oolíticas discontinuos de alta energía desarrollada en la *plataforma interna*. Los componentes esqueléticos están subordinados. Se observaron pelecípodos, gastrópodos, equinodermos y, localmente, algas rojas. En ocasiones presenta importante aporte silicoclástico y dolomitización parcial.

Estas barras restringen parcialmente hacia el continente (Este) una zona submareal somera de circulación moderada caracterizada como *marino semirestringido (lagoon)*. Las litologías identificadas son packstones y grainstones pelletoidales, en ocasiones arenosos, subordinados wackestones y mudstones. Los componentes esqueléticos son escasos a ausentes, representados por gastrópodos, pelecípodos y abundantes calciesferas en sectores. En una corona perteneciente a la subsecuencia 3.1 del pozo AB.Nq.LA-19 se observó macroscópicamente el desarrollo de una pequeña bioconstrucción de anélidos y ostreidos. Estos son los depósitos en los que se produjo con mayor intensidad el proceso de dolomitización. La observación petrográfica de muestras de coronas permite atribuir un origen diagenético temprano para estas litologías, asociado a la circulación de salmueras desde la planicie mareal expuesta circundante.

En la posición más proximal se desarrolla una *planicie de mareas* pelítica hasta evaporítica con crecimiento desplazativo de nódulos de yeso (*sabkha*). Estos niveles pudieron ser observados macroscópicamente en una corona del sondeo AB.Nq.LA.a-20 (por arriba del ciclo SS4.2). Los niveles de arenitas intercaladas con depósitos proximales pueden interpretarse como aportes episódicos desde el continente.

Este esquema generalizado se repite para cada subciclo depositacional, con litologías e improntas diagenéticas semejantes pudiendo aproximarse una línea costera de recorrido general NE-SW y una zona de mayor profundización relativa en las inmediaciones del sondeo BS.Nq.LA.a-36, el cual en todo su desarrollo mantiene una situación depositacional de plataforma interna.

Observando la evolución vertical en el área, se verifica la migración del tren de facies propia de cada subambiente. Así, el primer avance de la planicie de mareas en el área se verifica hacia el techo del ciclo 2.2. Los niveles basales de los ciclos 3.1 y 3.2 representan el máximo corrimiento

de las facies de plataforma hacia el continente, mientras que hacia el techo del ciclo 4.3 se instala la planicie de mareas pelítico-evaporítica en la mayor parte del área.

Este corrimiento de subambientes deposicionales refleja la dinámica de relleno de la cuenca que se interpreta como controlada por factores exógenos, con una tendencia general agradacional-progradante.

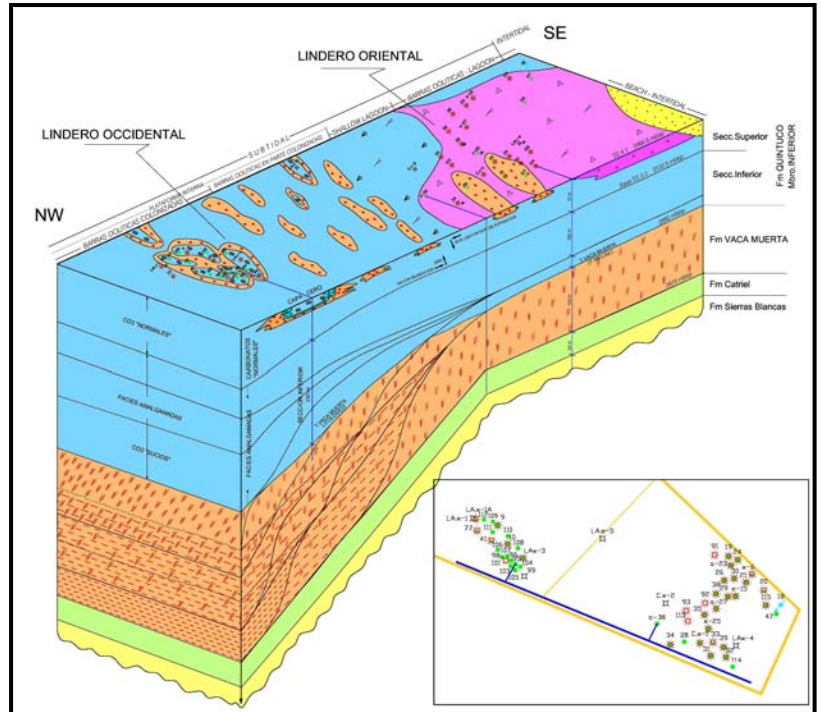
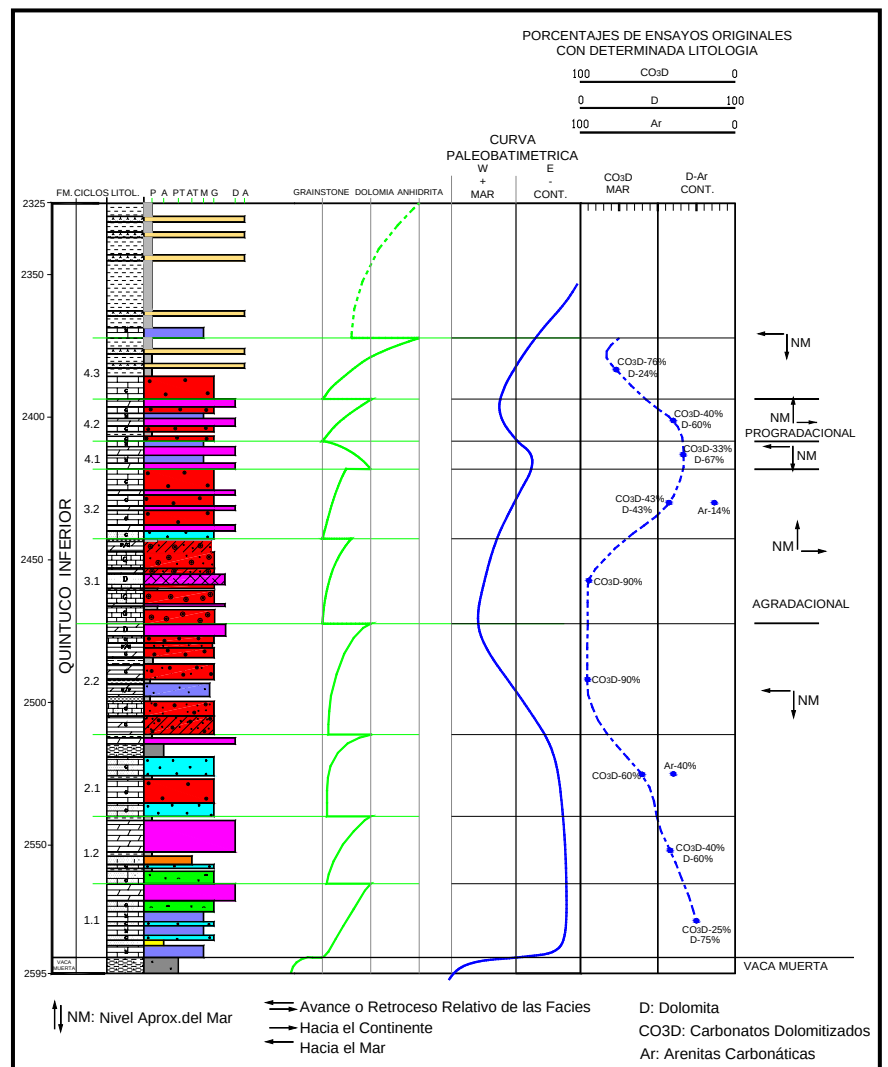


Fig.4 - Block Diagrama-Modelo Paleoambiental

Fig.5-Ciclos Deposicionales



Bioestratigrafía

Se estudiaron, desde el punto de vista bioestratigráfico muestras de los sondeos PAE.Nq.LA.xp-89 y BS.Nq.LA-34 (LCV SRL, 2000;2001).

La edad determinada para el intervalo en estudio corresponde al Valanginiano temprano. También se registra el pase a depósitos de edad Tithoniano-Berriasiano en la base.

Los *microfósiles* encontrados son predominantemente ostrácodos bentónicos de los géneros *Cytherella* Jones y *Cytherelloidea* Alexander y muy escasos foraminíferos calcáreos (polimorfínidos) y aglutinados (*Miliammina* sp.).

En el sondeo LA.xp-89 se realizó el estudio de *palinomorfos*, encontrándose formas continentales y marinas, lo cual se toma como indicio de proximidad a la costa.

No se encontraron *nanofósiles* lo cual puede ser indicativo de salinidad anormal.

Para el sondeo LA-34 se observa un incremento de formas y diversidad de fauna, hacia el techo del intervalo en estudio (Subciclos 4.1, 2 y 3). El citado incremento indica en ese sector del yacimiento inundaciones relativas, donde la más conspicua se produce en el Subciclo 4.3, dentro de un contexto de escasez general de los elementos analizables (foraminíferos).

Todas las formas encontradas indican condiciones marino marginales de aguas cálidas y probablemente de salinidad anormal, con una profundidad menor a los 10 m.

Consideraciones Estructurales

Lindero Atravesado Oriental presenta, para el Miembro Inferior de la Fm. Quintuco, dos rasgos estructurales: el primero de ellos es un flanco de un braquianticlinal de rumbo SSO-NNE, cuyo eje penetra desde el Yac. Río Neuquén hacia el sur, con posiciones cuspidales en las cercanías de dicho yacimiento y se desarrolla principalmente en el sector centro y norte del área.

El segundo rasgo estructural es una estructura anticlinal, pero de rumbo casi transversal al anterior y se localiza en el sector sur de Lindero Atravesado Oriental, alcanzando sus isóbatas más altas en las cercanías del pozo Esso.Nq.Cx-1. Con una forma simétrica aunque el flanco Noreste presenta buzamientos más acentuados en contraste con los flancos E, O y SE; más suaves y regulares.

Esta configuración estructural responde a un complejo juego de fallas que afecta a niveles más profundos, que aunque no alcanza en general a los subciclos SS 4.2 y 4.3, controlan de alguna forma su geometría .

Dichas fallas son principalmente del tipo de desplazamiento de rumbo, con origen en basamento y que con orientación ONO-ESE se extiende hacia Lindero Atravesado Occidental, asociado a fallas de alivio de tipo sintético o antitético de orientación N-S a NNO-SSE, de extensión lateral menor.

Del juego de fallas de alivio, tres alcanzan el tope de los SS 4.2 y 4.3 de la Fm. Quintuco, una de ellas en las cercanías del pozo Cx-1.

De esta manera la zona de desplazamiento principal y las fallas de alivio afectan mayormente los flancos sur y este de la estructura respectivamente, determinando una serie de cierres locales que estaría englobados dentro de la estructura principal, cuyo ápice se encuentra como fuera expresado, en la zona del Cx-1.

Caracterización de Reservorio

Las mejores condiciones como reservorio se encuentran en las capas de caliza dolomitizada, depositadas hacia el continente (Este) de los bancos oolíticos. Las mismas fueron observadas petrográficamente en muestras de coronas pertenecientes a los sondeos AB.Nq.LA.a-18, LA.a-19, LA.a-20 y AB.Nq.LA.x-25.

Litológicamente son *dolomías con textura sacaroides*, constituidas por un mosaico cristalino fino subhedral a euhedral. En ocasiones se reconoce textura de grainstone, con participación de bioclastos, silicoclastos tamaño arena fina a media y conspicuos granos y oolitas fosfáticos y síliceos. Esta facies desarrolla generalmente buenos valores de porosidad (10-25%) con textura intercristalina y móldica . Macroscópicamente es en general masiva, o con remanentes de láminas

en algunos casos. La fuerte impronta diagenética es interpretada como temprana (eodiagenética), vinculada a situaciones de somerización en cada ciclo depositacional. Se presenta asociada a *depósitos proximales atribuidos a un ambiente marino semirestringido*.

Comparando el espesor promedio para el ciclo con el porcentaje de dolomía surge que los mayores espesores acumulados de dolomías se encuentran en los niveles correspondientes a los Subciclos 1.1, 1.2 y 4.1.

Se encuentran también buenas condiciones como reservorio en la facies de *grainstones dolomitizados*. Los mismos presentan diferente proporción de granos silicoclásticos tamaño arena media, oolitas recrystalizadas, peloides, oolitas superficiales y litoclastos. Los bioclastos están generalmente subordinados y representados por pelecípodos, equinodermos y gastrópodos. La observación petrográfica de la porosidad en muestras de coronas indica buen desarrollo, 10-20%, con textura intergranular, móldica e intragranular. Macroscópicamente las capas son masivas o con estratificación cruzada y se interpretan como barras *depositadas en condiciones marinas abiertas*.

Arenitas y areniscas calcáreas fueron productivas de hidrocarburos (gas-petróleo) en los sondeos LA.a-19, AB.Nq.LA-23 y AB.Nq.LA-21.

En facies de Grainstones oolíticos no dolomitizados, packstone-grainstones pelletoidales, mudstones y otras litologías finas se registraron en ensayos hidrocarburos (en un porcentaje menor). En estos casos, mudstones y litologías finas, la producción podría estar controlada por factores como estilolitas y fracturas.

Los entrapamientos estratigráficos por cambios laterales de permeabilidad dada la distribución de facies en cada paleogeografía definida, son el denominador común. Así por ejemplo capas dolomitizadas pueden variar lateralmente a depósitos pelíticos de llanura de mareas o a grainstones totalmente cementados hacia la plataforma.

Del mismo modo las pelitas de llanura de mareas presentes hacia el techo de los subciclos 2.2, 4.1, 4.2 y 4.3 pueden constituir sellos de carácter más regional.

En la **Fig.Nº5** se muestra una curva, que indica los porcentajes de ensayos asociados a determinadas litologías, (dolomitas, carbonatos dolomitizados y arenas) y que acompaña las inflexiones de la curva paleobatimétrica, originada a partir de la interpretación de las secuencias de facies y su litología.

Se advierte así que las dolomitas tienen mayor porcentaje de ensayos originales con petróleo en los subciclos inferiores y superiores, mientras que en los subciclos intermedios (SS 2.2 y 3.1) los ensayos en su mayoría gasíferos, se concentran en litologías correspondientes a grainstones oolíticos dolomitizados (Lasalle D.,2002).

Para el SS1.1.1, los espesores de dolomia, se ubican en una franja NE/SO, inclusive sus mayores espesores (5-11.5m). Los espesores permeables están en general distribuidos en una franja de orientación NNE/SSO en el sector Este del área; sus espesores alcanzan un máximo de 5m (norte) a los 9m en el Sur; y los mismos disminuyen hacia el oeste y este.

En el SS 1.1.2, los espesores de Dolomia tienen orientación NE/SO, disminuyendo hacia el oeste. Hacia el este, se presentan continuos, adentrándose en el yacimiento Río Neuquén. Los mayores espesores se encuentran en el SE (25.4m), considerando la suma de estos dos subciclos en el pozo PAE.Nq.LA-114.

El subciclo SS 4.1, presenta las dolomias ubicadas en una franja NE/SO, con una importante continuidad areal, abarcando casi la totalidad de Lindero Atravesado Oriental, los espesores permeables no son importantes (1-1,5 m).

El SS 4.2, tiene los mayores espesores de dolomias ubicados, en una franja NE/SO, sin grandes variaciones, con espesores entre 3 y 4 m.

Los espesores permeables, se agrupan con valores de entre 0.5-2 m en el NE y en el SO.

Para el SS 4.3 el plano de suma de dolomias muestra una franja con orientación NE/SO, donde los mayores espesores se ubican en el S, con valores que van de 13,5m (LA-114, en el SE) a 8.5 m (LA-34, en el SO). Hacia el medio de esta franja y al oeste los espesores promedian los 4m.

Respecto a los espesores permeables, los mismos se encuentran alineados en general dentro de una franja con igual orientación a la encontrada en los planos Suma de Dolomías, donde los mayores espesores (2-3 m) se ubicaron en una posición, SO/NE.

Lindero Atravesado Occidental

Análisis de Ciclos Depositacionales

En cada sondeo del sector de Lindero Atravesado Occidental incluido en el área de estudio se analizó la evolución vertical de facies reconociéndose tres secciones (equivalente al Mb. Inferior en Lindero Atravesado Occidental), con diferente asociación de litologías. La **Sección Inferior** es predominantemente carbonática, la **Sección Media** está integrada por una asociación de carbonatos de variada composición y pelitas con ocasionales niveles de anhidrita y la **Sección Superior** es también mixta clástico-carbonática, pero presenta una proporción mayor de carbonatos de composición homogénea.

En todas las secciones se reconocen ciclos depositacionales limitados por superficies de inundación. Los mismos son difíciles de delimitar en la **Sección Inferior** ya que, en general se trata de secuencias de facies submareales amalgamadas. Se diferencian grainstones oolíticos, pelletoidales, bioclásticos y litoclásticos, framestones, mudstones y dolomías, interpretados como depósitos de plataforma interna.

Es difícil el reconocimiento de ciclos depositacionales en el interior de cada columna ya que se trata de un apilamiento de depósitos de batimetría semejante con una componente eminentemente agradacional, sin un notorio corrimiento lateral de facies.

La Sección Inferior remata con litologías dolomitizadas interpretadas como framestone de corales (reservorio en explotación denominado Capa Cero). Se atribuye el reemplazo dolomítico a procesos diagenéticos tempranos vinculados a extrema somerización o exposición subaérea (10-25% de porosidad secundaria por disolución), tamaños de poros corresponde al rango de micro hasta macroporo (0.05-0.40 mm), las porosidades presentes son intercrystalina, móldica, intergranular, vugular y escasa fisuras. Los rangos de valores medidos en el laboratorio son: 15,49-29,62% de porosidad y 12,68-257,3mD de permeabilidad.

Se interpreta en general un ambiente de deposición de *plataforma interna*, con desarrollo de barras oolíticas y condiciones de oxigenación y temperatura que posibilitaron el desarrollo de pequeñas construcciones coralinas.

Los límites de ciclos se reconocen fácilmente en la **Sección Media**, la misma está integrada por múltiples ciclos de inundación-desección. Litológicamente están representados por niveles carbonáticos (mudstones, mudstones dolomitizados, grainstone oolíticos, dolomías) que hacia el techo pasan rápidamente a pelitas con escasas intercalaciones de arenitas, mudstones y anhidrita.

Hacia el NO se verifica un incremento en la proporción de litologías carbonáticas y una disminución del reemplazo dolomítico.

Se reconocen numerosos ciclos de somerización, cuyo espesor varía entre 30 y 5 metros, con una tendencia general a disminuir el espesor individual hacia el techo. El escaso desarrollo de éstos ciclos parece responder a una reducción en el espacio de acomodación, que genera una tendencia predominantemente progradacional en la evolución de la facies.

Cada nivel carbonático representa una profundización relativa con deposición en condiciones submareales someras que rápidamente evolucionan hacia el techo a condiciones supramareales evaporativas (sabbkha).

En el sector Norte los pozos PAE.Nq.LA- 109, 110, 111 y 112, presentan un reservorio por encima del techo de Capa Cero con ensayos originales con petróleo, interpretado como parte de otra secuencia, por arriba del nivel de correlación Capa Cero – SS 4.1.

La **Sección Superior**, presenta un contraste marcado entre facies finas supramareales que son sobreyacidas por facies submareales. Cada uno de ellos presenta una tendencia somerizante. Hacia el techo del intervalo estudiado se observa el desarrollo de dos ciclos mixtos carbonáticos-

silicoclásticos que en conjunto representan una profundización respecto a las condiciones depositacionales de la Sección Media.

Están integrados por capas de grainstones oolíticos interestratificadas con pelitas y asociadas a arenitas, que hacia el techo evolucionan rápidamente a niveles netamente pelíticos. Los niveles dolomitizados son muy escasos.

Puede interpretarse el desarrollo de pequeñas barras oolíticas en una situación submareal proximal, que evolucionan hacia el techo a una situación de planicie de mareas pelítica. La sección no presenta desarrollo de la facies de dolomía que constituye el reservorio en otros niveles.

Del análisis de la totalidad del material puede generalizarse una tendencia agradacional en la evolución de facies para la Sección Inferior y progradante para las Secciones Media y Superior.

(Fig.Nº7)

Consideraciones Estructurales

La conformación estructural al tope de la Capa Cero es la de un anticlinal cerrado asimétrico, de rumbo NO-SE, con un flanco norte suave buzando hacia el NE y el otro más abrupto y fallado al sur, buzando al SO. El eje de la estructura se hunde suave al NO y en forma más pronunciada al SE y presenta dos culminaciones; la más importante al sur del YPF.Nq.AB.LA-10 y oeste del YPF.Nq.LAx-3 y otra en las cercanías del pozo B.Nq.LA-77.

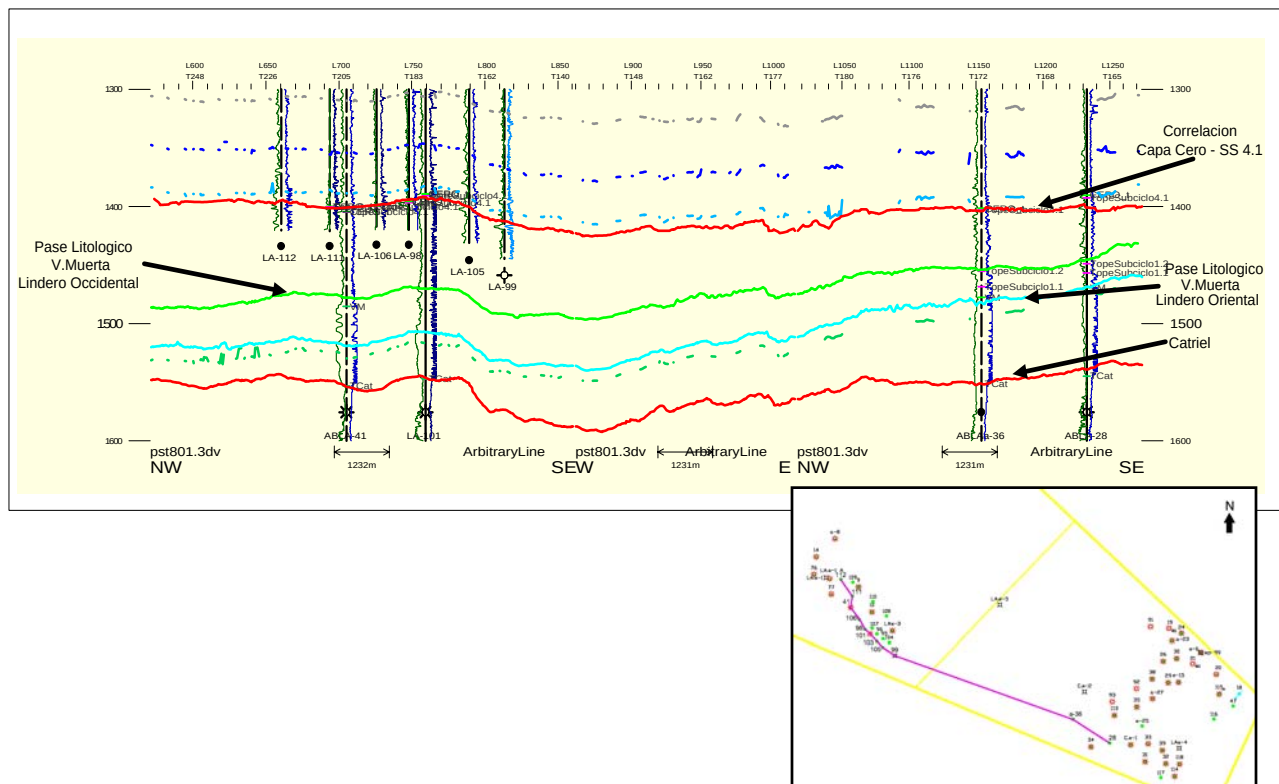


Fig.6- Horizontes interpretados

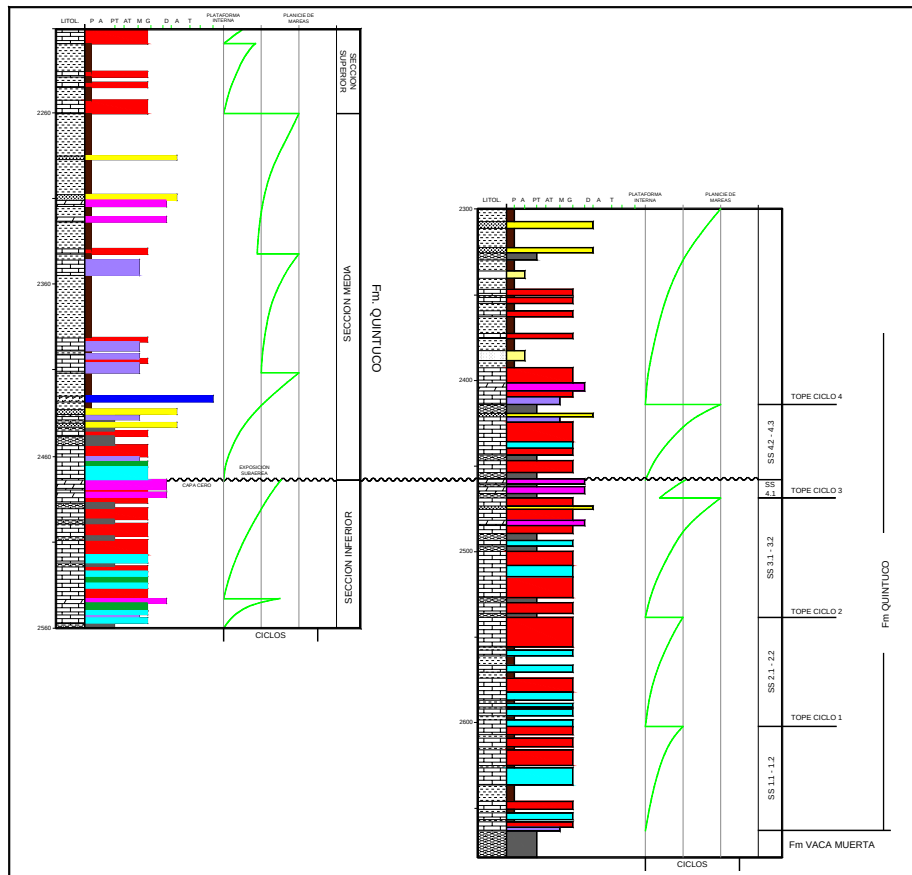


Fig.7-Correlación Lindero Atravesado Oriental-Occidental

Relación Lindero Atravesado Oriental – Occidental

Sobre la base del análisis estratigráfico realizado en ambos yacimientos, se realizó la correlación efectuada entre los Ciclos y Subciclos Depositacionales reconocidos, utilizando la sísmica 3D como marco sismoestratigráfico.

En ambos sectores se identificaron ciclos depositacionales de diferente magnitud. Cada uno de ellos está integrado por un conjunto de capas que muestran tendencia somerizante, limitados por superficies de inundación. Esta definición equipara el término “ciclo” a “parasequence”, empleado habitualmente en la bibliografía (Van Wagoner et al., 1988a).

En el Sector Occidental los ciclos no tienen buena definición, por lo cual fueron delimitados tramos de orden mayor, que incluyen más de un ciclo, denominados “secciones”. Las mismas son comparables al término “parasequence set” utilizado en la bibliografía (Van Wagoner et al., 1988a). La magnitud de los ciclos y secciones (parasequences y parasequence sets) considerados incluye el rango de subciclos estratigráficos de cuarto (espesores de hasta 50m aprox.) y quinto orden (espesores de hasta 20m aprox.) reconocibles en la escala de testigos coronas y perfiles de pozo (Goldhammer et al., 1999).

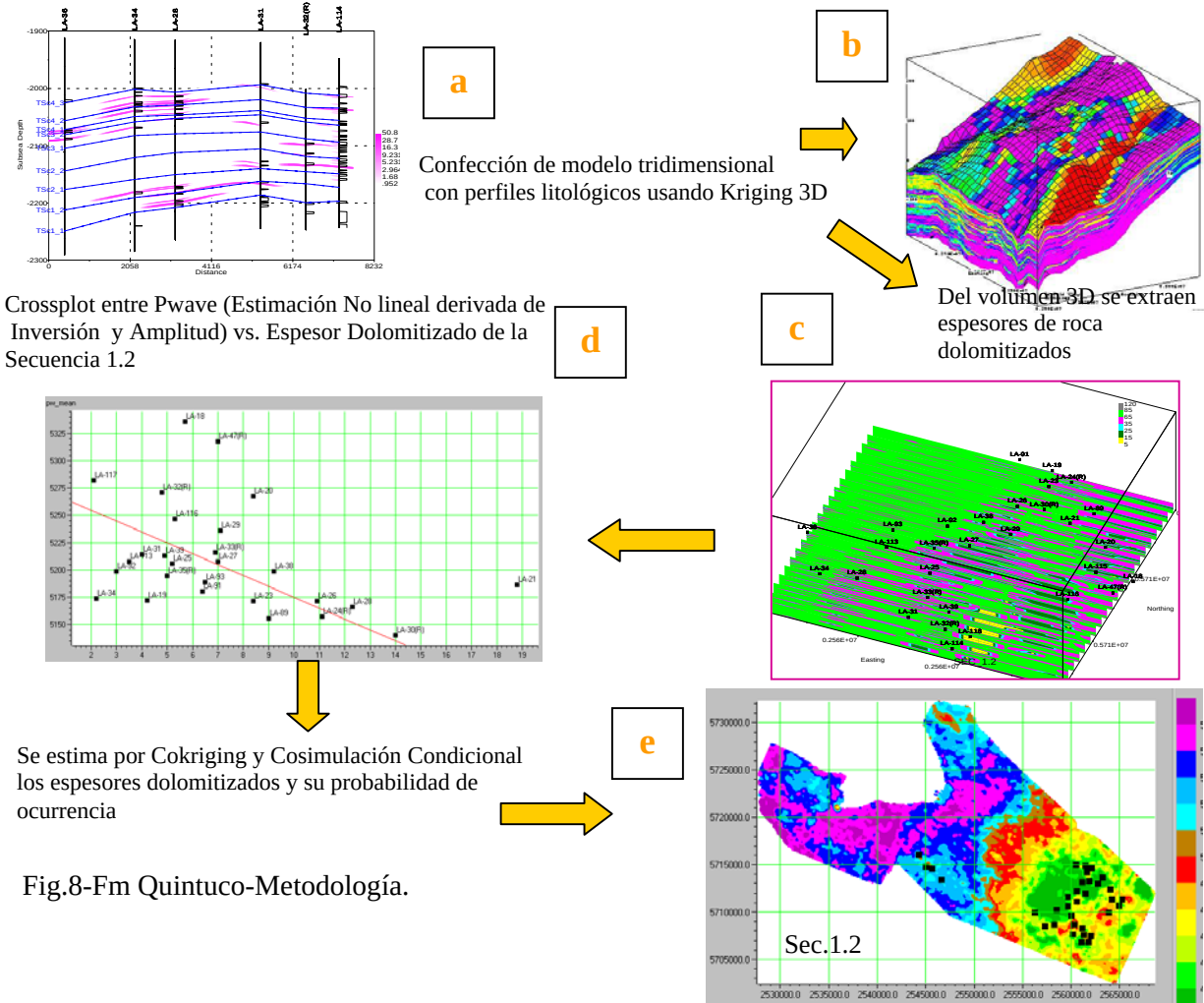
En ambos yacimientos se identifica una superficie (techo Sección Inf.= SS4.1) que se equipara a un límite de secuencia depositacional a lo largo de la cual se observan evidencias de exposición subaérea (grietas, niveles brechados, marcas de raíces, capas delgadas de 5 a 20 cm de litologías variables, indicando cambios permanentes en las condiciones de depositación, por ejemplo corona PAE.Nq.LA-98 de Capa Cero), erosión subaérea, con un hiatus depositacional significativo, que implica una caída relativa del nivel del mar (Van Wagoner et al., 1988b). En sedimentos carbonáticos una evidencia clara de caída relativa del nivel del mar es la exposición subaérea de facies submareales (Goldhammer, 1999).

Esta superficie se correlaciona en Lindero Atravesado Oriental con el techo de la SS 4.1, y es considerada por su extensión, una superficie de exposición de carácter regional, visible en líneas sísmicas (horizontes interpretados, en sísmica 3D **Fig.Nº6**), que sumado a las características diagenéticas observadas petrográficamente implican una caída relativa del nivel del mar que facilitó la exposición de este sector de la plataforma.

CARACTERIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

A los efectos de aportar parámetros cuantitativos a la caracterización estratigráfica-petrofísica al Mb. Inferior de la Formación Quintuco, se aplicó un conjunto de técnicas lineales (Geoestadística) y No Lineales (Redes Neuronales) a partir de la integración de datos sísmicos (amplitud e impedancia) y perfiles de pozo. Además se utilizó información cualitativa debidamente codificada, perteneciente a descripciones de facies carbonáticas de la Formación Quintuco a los efectos de ser integrada a la información sísmica (Larriestra, 2004). La integración se realizó en varias etapas, a saber (**Fig. 8a, b, c, d y e**):

- Se confeccionó un modelo tridimensional con perfiles litológicos usando Kriging 3D
- Se extrajeron del volumen 3D espesores de roca dolomitizados
- Se correlacionaron los espesores de las distintas secuencias con valores de velocidad sónica (P-wave) del cubo 3D (Pwpnn) (Larriestra, 2003).
- Se estimaron por Cokriging y Cosimulación Condicional los espesores dolomitizados y su probabilidad de ocurrencia.



Metodología

Los perfiles litológicos fueron convertidos mediante una convención a perfiles numéricos a los efectos de que puedan ser integrados en modelos tridimensionales, mediante un programa ad hoc.

Dicho programa realizó la interpolación de los perfiles originales a un espaciamiento de constante de 0.10 m usándose una convención numérica.

Posteriormente se realizaron curvas indicadoras (0 = ausencia, 1 = presencia) de todas las litologías dolomitizadas a los efectos del computo final de espesores.

Procesos: Kriging 3D

Con los perfiles numéricos se confeccionaron modelos tridimensionales para las distintas litologías a los efectos de observar el comportamiento espacial a partir de pozos. Una vez finalizados los mismos se procedió a la extracción de espesores dolomitizados los que serían utilizados en la etapa siguiente de integración con la sísmica en la etapa de Cokriging.

Cokriging y Cosimulación Condicional

Una vez establecidos los espesores, se tomó el Cubo de Velocidad Sónica calculado previamente (Larriestra y Curia, 2000) y se extrajeron velocidades sísmicas medias, mínimas y máximas para cada secuencia. De las mejores correlaciones se extrajeron los pares espesores/velocidad sónica para la estimación final de espesores por cokriging y el análisis de probabilidades mediante simulación condicional. En algunos casos no se puede discriminar entre facies dolomitizadas y clásticas finas. Los rangos de velocidades para los reservorios dolomitizados son:

Secuencia	Veloc. Mínima(m/s)	Veloc. Máxima(m/s)
4.3	4525	5100
4.2	4850	5300
4.1	4850	5350
3.2	5150	5400
3.1	5250	5360
2.2	5000	5360
2.1	5225	5350
1.2	5125	5280
1.1	4400	4900

Debido a la amplitud del rango de velocidades, no se pudo definir un cubo Indicador de dolomitas ya que quedaban sobreestimadas las zonas de interés.

Resultados

En Lindero Atravesado Oriental a partir del cubo de litología de Dolomitas, Grainstone/Packstone y Pelitas, fue posible apreciar la frecuencia de cada uno de los litotipos, siendo el de mayor presencia la asociación packstone/grainstone. Las pelitas ocupan el segundo lugar y las dolomitas completan el cuadro estadístico.

Los modelos litológicos integrados en un cubo fueron analizados por secuencias, mediante cortes estratigráficos paralelos O-E y comparados con la caracterización y modelo geológico para la parte superior de cada secuencia. Este primer modelo geológico, confeccionado solamente con pozos muestra interesantes similitudes con el análisis de facies carbonáticas realizado.

Las dolomitas muestran un desplazamiento en la dirección SE-NO variando de acuerdo a las posiciones relativas de la costa con retrocesos y avances, como también se observa en el corte de la **Fig.8a**, con la variación horizontal y vertical de los cuerpos dolomíticos.

Análisis Exploratorio de Datos y Crossplots

Las correlaciones entre los espesores dolomitizados y los parámetros estadísticos de la velocidad sónica varían entre 0.55 y 0.71 para todas las secuencias. Estas correlaciones deben considerarse regulares, pero son esperables, ya que los espesores dolomitizados son minoritarios y su velocidad sónica promedio se encuentra afectada por la población de carbonatos duros (Packstone/Grainstone)

Espesores - Probabilidades

En los mapas de probabilidad, se muestra la probabilidad de encontrar espesores dolomitizados mayores a determinado valor en metros, los cuales concuerdan en general con la división de porcentajes de ensayos originales con determinada litología.

En las secuencias 1.1 y 1.2 los espesores de dolomitas se desplazarían hacia el ESE, un límite de esos espesores se observa en el Plano de Probabilidad de $HK > 1m$ (**Fig. 9**), mientras que en las secuencias 2.1 y 2.2 permanecerían de forma relativa uniformemente distribuidas en el área del yacimiento. En las secuencias 3.1 y 3.2 la tendencia es a aumentar hacia el ONO.

La secuencia 4.1 la probabilidad disminuye hacia el BS.Nq.EChx-1 y domina Lindero Atravesado Oriental en el centro-norte y parte sur de Lindero Atravesado Occidental. En la secuencia 4.2 las mayores probabilidades se encuentran en Lindero Atravesado Oriental, mientras que en la secuencia 4.3 los valores altos de probabilidad tienden a aumentar hacia el NO, aunque no se puede establecer si esta probabilidad (mayor a 0.9) pueda estar asociada a otra litología de similar conductividad sónica que las dolomías (margas?).

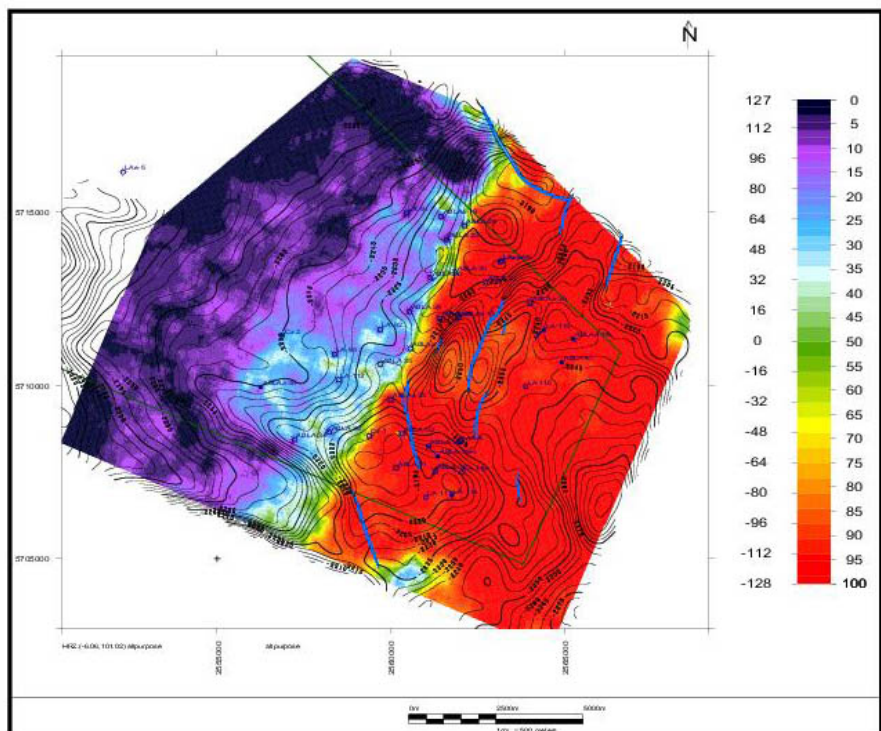
Porosidad Media

A partir de la fórmula de Willie-Rose para carbonatos y tomando como referencia los ensayos petroacústicos realizados en laboratorio (G.Rial y Asociados, 1995) se calculó un cubo de porosidad a partir del cubo sónico existente. Cabe agregar que este no es un cálculo geoestadístico y que puede haber discrepancias con las observaciones anteriores.

En la **Fig.10** se muestran el plano de Phi media para la secuencia 1.1, sobreimpuesto a un plano estructural. La porosidad se mantiene alrededor de valores medios y en general aumenta donde los valores de espesor de dolomita también lo hacen. Cabe remarcar que el aumento de porosidad mostrado al oeste, de la zona de dolomitas, no es válido, ya que es un ambiente de facies margosas. Especial mención debe realizarse en la secuencia 4.1 (**Fig. 11**) donde se puede apreciar que hacia el norte disminuyen las condiciones petrofísicas y con un límite SO-NE (que coincide en su orientación, con el notable límite de la secuencia 1.1).

La secuencia 4.2 muestra una disminución de la porosidad hacia el NO y en la 4.3 un aumento generalizado en ese mismo sentido.

Fig.9-Plano Geoestadístico
Probabilidad de $HK > 1m$
Lindero Atravesado Oriental



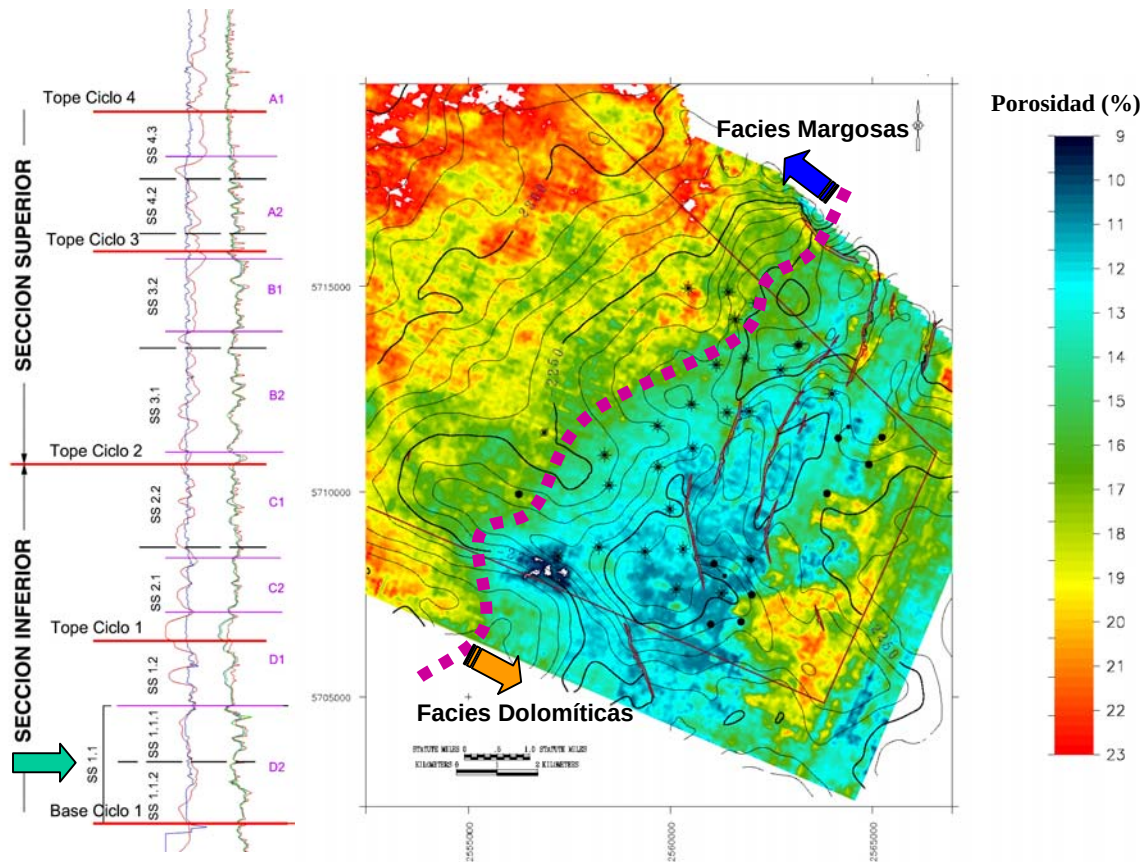


Fig.10-SS 1.1 (D2) Porosidad Media y Curvas Estructurales (Lindero Atravesado Oriental)

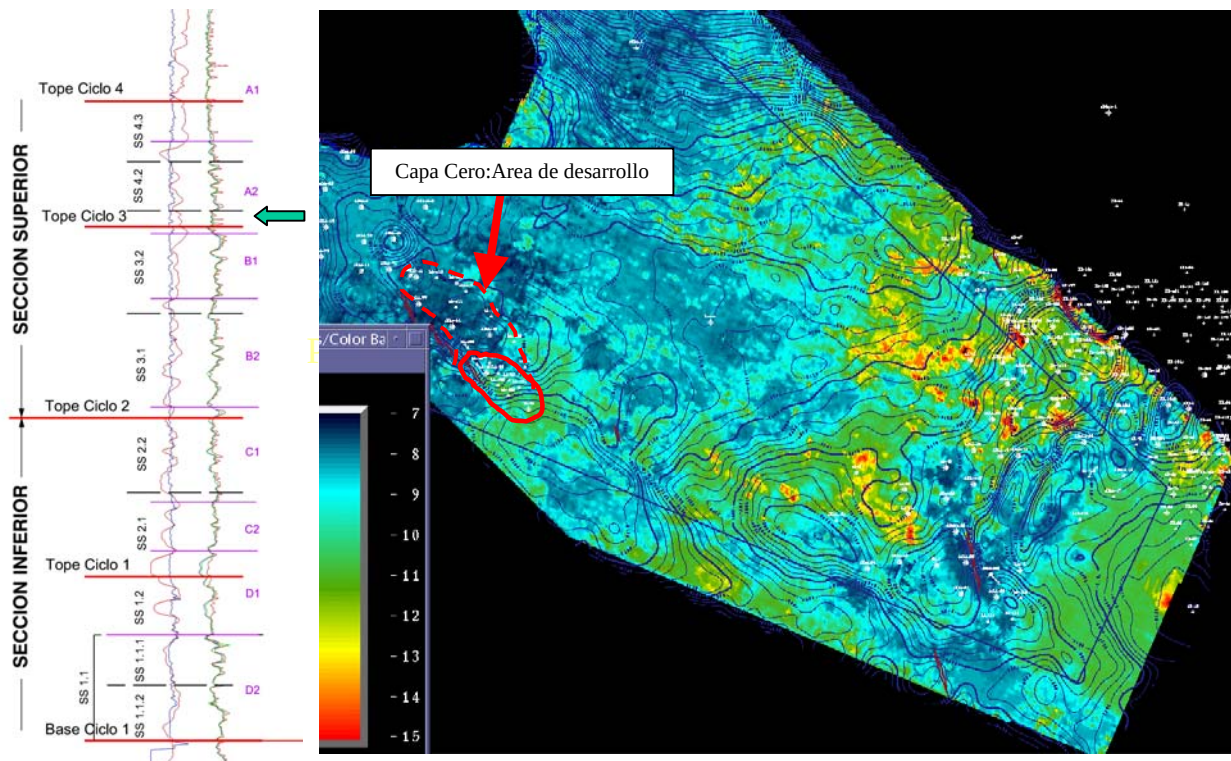


Fig.11-Secuencia 4.1-Porosidad Media y Curvas Estructurales (Lindero Atravesado Oriental y Occidental).

CONCLUSIONES

- 1) El Estudio Integrado de Caracterización de la Fm. Quintuco, permitió la diferenciación litoestratigráfica y secuencial.
- 2) Lindero Atravesado Oriental: se identificaron 10 subciclos (SS) de cuarto y quinto orden, agrupándolos en 4 ciclos mayores, limitados por una superficie de máxima inundación relativa (SS 3.1). Cada subciclo revela una tendencia somerizante.
- 3) Lindero Atravesado Occidental: los ciclos no tienen buena definición, por lo que sus tramos son de un orden mayor e incluyen más de un ciclo y se denominan Secciones (Inferior, Media y Superior).
- 4) Para ambos bloques, se identifica una superficie, equiparable a un límite de secuencia depositacional, con evidencias de exposición o erosión subaérea, identificable en líneas sísmicas. Este nivel es el SS 4.1 (Lindero Atravesado Oriental) y correlaciona con el nivel equivalente a Capa Cero (Lindero Atravesado Occidental).
- 5) El ambiente de depositación se interpreta integrado por una faja de barras oolíticas en la plataforma interna, que restringe un sector costero asimilable a un lagoon, posteriormente dolomitizado (Lindero Atravesado Oriental).
- 6) Las mejores condiciones como reservorio se encuentran en las facies de dolomías sacaroides con una porosidad petrográfica entre 10 y 25%.
- 7) La mayoría de los ensayos iniciales y pozos productivos de gas de Lindero Atravesado Oriental, se ubican en el sector oeste, en facies de carbonatos dolomitizados (SS 3.1 y 4.3), mientras que los de petróleo se concentran en el sector este, en facies de dolomías (SS 1.1, 1.2, 4.1 y 4.3).
- 8) En los pozos ubicados en el sector Norte del área desarrollada de Capa Cero (Lindero Atravesado Occidental), se advierte un mayor grado de cementación y menor dolomitización. En este sector se ubicaron niveles dolomíticos petrolíferos por arriba de este reservorio.
- 9) Las facies carbonáticas son sensibles a la velocidad sónica, los gráficos de relación utilizados para el cokriging muestran estas tendencias.
- 10) En algunos casos no se puede discriminar entre facies dolomitizadas y clásticas finas.
- 11) Se determinaron velocidades máximas y mínimas para los reservorios dolomitizados, debido al amplio rango de estas, no se pudo definir un Cubo Indicador de dolomitas ya que quedarían sobreestimadas las zonas de interés.
- 13) La posición y distribución en el Este de Lindero Atravesado de las bajas IA (Impedancias Acústicas), especialmente para los subciclos inferiores, que representan los objetivos petrolíferos principales; se interpretan como los intervalos de mayor probabilidad de presentar niveles porosos permeables. También se observa que para el intervalo 4.1 (Capa Cero), en Lindero Atravesado Occidental, una posible continuación de este reservorio hacia el Norte de la actual zona de explotación.
- 14) La conjunción de la interpretación geológica a partir de pozos y la derivada de la sísmica y técnicas geoestadísticas, permiten consolidar un modelo geológico integral para el Miembro Inferior de la Fm. Quintuco que otorga un potencial de desarrollo hidrocarburífero remanente en Lindero Atravesado.
- 15) La coexistencia de factores tales como mayor concentración de dolomías, posición estructural comprendida entre cotas productivas, y ensayos de naturaleza petrolífera hacen del sector Este de Lindero Atravesado Oriental una zona prospectiva de interés, al igual que en Lindero Atravesado Occidental, para el Subciclo 4.1.s.

Agradecimientos

El autor agradece a las compañías Pan American Energy y Repsol YPF S.A., la posibilidad de publicar el presente trabajo y en especial, a Eduardo Martinez por la lectura crítica del trabajo, a Estanislao Kozlowski por sus oportunas sugerencias y a la cartógrafa G. Bernatek por su colaboración en las distintas ilustraciones. Homenajeando a la querida Silvia Corbari, con quién

pude profundizar conceptos y correlaciones en la Formación Quintuco, en ello implícito también mi agradecimiento a las colegas Patricia Ferraresi y M. Rodríguez Schelotto de LCV SRL. Agradezco también la colaboración de Claudio Larriestra de Larriestra Geotecnologías, en la discusión y desarrollo de las técnicas geoestadísticas aplicadas.

Lista de trabajos citados en el texto:

- Choquette, P. W., and L. C. Pray, 1970, Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: AAPG Bull. , v. 54, p. 207-250.
- Dott, R. H., 1964, Wacke, graywacke and matrix-what approach to immature sandstone classification: Jour. Sed. Petrology, v. 34, p. 625-6323.
- Dunham, R.J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional textures, en W. E. Ham, ed., Classification of carbonate rocks: AAPG Memoir 1, p. 108-121.
- Embry, A. F., and J. E. Klován, 1971, A late Devonian reef tract on north-eastern Bank island, N. W. T.: Bull. Canadian Petroleum Geology, v. 19, p. 730-781.
- Folk, R. L., P. B. Andrews, and D. W. Lewis, 1970, Detrital sedimentary rocks classification and nomenclature for use in New Zeland: New Zeland Jour. Geol. and Geophys., v. 13, p. 937-968.
- Goldhammer, R.K, Lehrmann, D.J., 1999. SEPM Special Publication 63-Advances in Carbonate Sequence Stratigraphy.
- Graciela Rial y Asociados, 2003. Estudios Petrofísicos y Mediciones Acústicas pozos AB.Nq.LA-19, 20, 21, 23, 25, 26, 28 y BS.Nq.LA-34.
- LCV SRL, 2000. Estudio Bioestratigrafico sondeos BS.Nq.LA-34, PAE.Nq.101, 98 y 103.
- LCV SRL, 2001. Estudio Bioestratigrafico xp-89.
- Larriestra y Curia, 2000. Geoestadística Aplicada al análisis de reservorios en las Formaciones Quintuco y Sierras Blancas.
- Larriestra Geotecnologías, 2003. Procesamiento de Cubo Sónico.
- Larriestra Geotecnologías, 2004. Cubos Formación Quintuco y Sierras Blancas.
- Lasalle D., 2002. Estudio de Caracterización Integral. Formación Quintuco. Miembro Inferior. Yacimiento Lindero Atravesado. Informe inédito. Pan American Energy.
- Schlager, Wolfgang, 2000, Sequence stratigraphy of carbonate rocks. Vnité Universiteit/Earth Sciences, Amsterdam, The Netherlands.
- Schmidt, V., and D. A. McDonald, 1979, Texture and recognition of secondary porosity in sandstones: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 26, p. 175-207.
- Van Wagoner, J. C., H. W. Posamentier, R. M. Mitchum, P. R. Vail, J. F. Sarg, T. S. Loutit, and J. Handberg, 1988, An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions, en Wilgus, C. K., B. S. Hastings, C. G. St. C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross, and J. C. Van Wagoner, eds., Sea Level changes: An Integrated Approach: SEPM Special Publication N°. 42, p. 39-45.a)
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., and others. 1988. The Fundamentals of Sequence Stratigraphy and key definitions. SEPM Special Publications, N° 36.b)