

GENERACIÓN DE UN MODELO ESTRATIGRÁFICO DE ALTA RESOLUCIÓN PARA DEPÓSITOS CARBONÁTICOS TERCIARIOS DE LA CUENCA DE CAMPOS

Raigosa Díaz, M.¹; Pereira, E.²

RESUMEN

El Miembro Siri corresponde al intervalo de interés en este estudio. El mismo es de gran importancia debido al contenido de petróleo pesado presente en la plataforma carbonática desarrollada durante el Terciario. Teniendo en cuenta esta importancia se emprendió un estudio con el objetivo de generar un modelo estratigráfico de alta resolución, en secuencias de 3^{er} orden, a partir de la interpretación de dos líneas sísmicas y el análisis de cinco perfiles de pozo. El modelo propuesto permitió a su vez realizar un modelo depositacional, que facilitó el entendimiento de la evolución de la producción carbonática Terciaria en la plataforma externa al sur de la Cuenca de Campos.

El modelo propuesto sugiere el desarrollo de una plataforma aislada mixta (siliciclástico-carbonática) generada sobre altos estructurales remanentes de la fase *rift*, resultante del inicio de la separación de Suramérica y África. La interpretación regional y detallada de las secciones sísmicas también permitió inferir un proceso de reactivación tectónica durante la instalación de la plataforma carbonática la cual sería responsable del carácter asimétrico en la morfología de la plataforma y de los procesos locales de subsidencia diferencial simultánea con la producción de sedimento carbonático.

Palabras clave: Miembro Siri, rocas carbonáticas, estratigrafía de alta resolución, estratigrafía sísmica, modelo depositacional.

HIGHT RESOLUTION SRATIGRAPHY FRAMEWORK FOR CARBONATIC DEPOSITS OF TERCIARY OF THE BASIN CAMPOS

ABSTRACT

The Siri Member is of great importance due to the heavy oil content that is present on the carbonate platform developed during the Tertiary. Considering this importance, we conducted a study with the objective of generating a high resolution stratigraphic framework, on 3rd order sequences, using the interpretation of two seismic sections and the analysis of five well logs. The proposed framework allowed for the development of a depositional model that helped on the understanding of the evolution of the carbonate production of the Tertiary on the external platform of the Campos Basin.

The proposed model suggests the development of a mixed isolated platform (siliciclastic-carbonatic) generated over structural horst remaining from the rift fase, resulting from the beginning of the break up of South America and Africa. The detailed and regional interpretation of the seismic sections also allowed to infer a process of tectonic reactivation during the installation of the carbonate platform. This process would have given the asymmetric character to the platform, and would have facilitated local process of simultaneous differential subsidence with the production of carbonate sediment.

Key words: Siri Member, carbonatics rocks, hight resolution stratigraphy, seismic stratigraphy, depositional model.

¹ Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), Rua Souza Franco No 76, apto 201 fundos. Barrio Vila Isabel, Río de Janeiro, Brasil. CEP 20551-120 mary.raigosa@gmail.com

² Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), egberto@uerj.br

INTRODUCCIÓN

En este estudio, se pretende aplicar los conceptos de estratigrafía de secuencias para analizar las rocas carbonáticas del Terciario de la Cuenca de Campos (Miembro Siri, Formación Emborê). El registro estratigráfico Terciario de la Cuenca de Campos muestra periodos alternantes de depositación de sedimentos siliciclásticos (turbiditos) y carbonáticos, así la integración de diferentes herramientas como el análisis de secciones sísmicas y perfiles eléctricos, permiten la generación de un modelo estratigráfico dentro del contexto de secuencias de 3^{er} orden, principalmente para las rocas carbonáticas, que son el objetivo de esta investigación. Está bien establecido que las márgenes carbonáticas tienen el potencial de crecer al mismo ritmo de ascenso del nivel del mar, de forma opuesta a lo que ocurre con los sedimentos siliciclásticos. El abordaje de un estudio en rocas carbonáticas requiere de un tratamiento especial con relación a la aplicación de los conceptos de estratigrafía de secuencias, así, para la

estratigrafía de secuencias, los sistemas depositacionales carbonáticos respondan de manera similar a los sistemas siliciclásticos.

ANTECEDENTES

Hasta ahora han sido pocos los trabajos publicados para el sistema depositacional carbonático del Terciario de la Cuenca de Campos. Waisman (2002) llevó a cabo un análisis estratigráfico de secuencias terciarias con énfasis en los carbonatos del Miembro Siri, región sur de la Cuenca de Campos, con base en la utilización de varias herramientas como: datos sísmicos (líneas sísmicas 3D, registro de pozos, muestras de *calha*, petrografía carbonática y datos bioestratigráficos. En este trabajo Waisman (2002) identificó diez secuencias estratigráficas, limitadas por discordancias y/o concordancias relativas, tanto en datos 3D como en perfiles eléctricos de los 13 pozos usados por el autor. El análisis interno de los patrones de apilamiento de las parasecuencias a partir de los datos

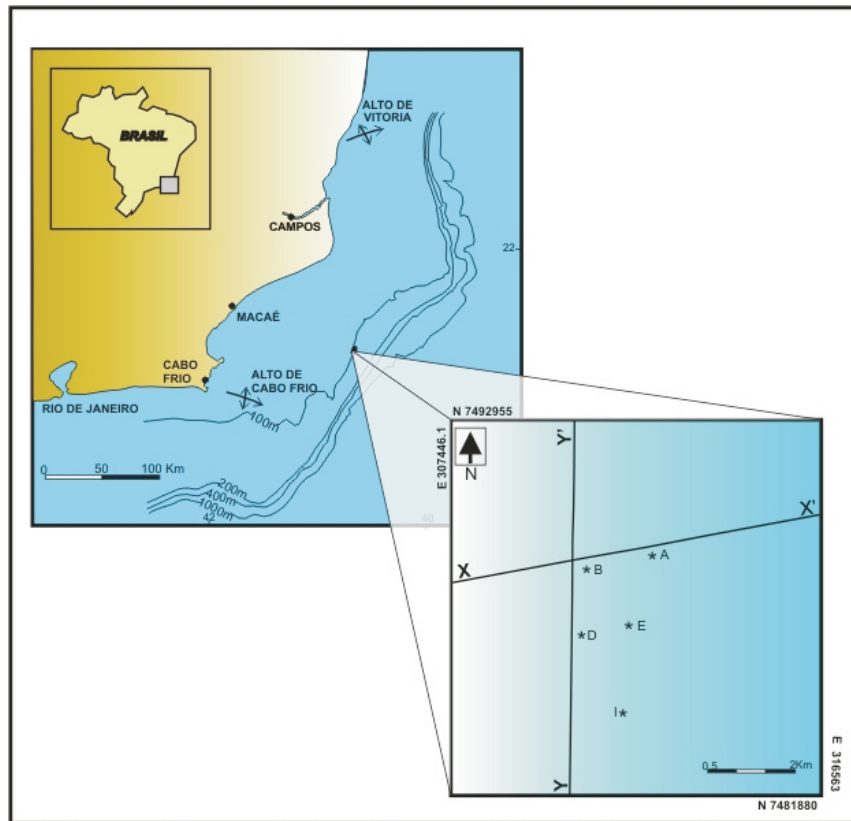


FIGURA 1. Localización del área de estudio, mostrando en detalle la disposición de las líneas sísmicas y los pozos analizados.

sísmicos así como las correspondientes respuestas de los perfiles eléctricos de los pozos permitió la identificación de los diferentes *system tract* y de otras superficies relevantes en el modelo estratigráfico. En esta propuesta Waisman (2002), amarró los límites de secuencia con la carta de variación eustática de Haq (1988 en Waisman, 2002).

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca de Campos está localizada sobre la parte *offshore* del Estado de Río de Janeiro, entre los paralelos 21° y 23° sur. Cubre un área de 100.000 Km² a lo largo de la margen pasiva de Brasil. De esta área solo 500 Km² corresponde a la porción *onshore* de la cuenca (FIGURA 1).

El Alto de Victoria corresponde al límite norte de la Cuenca de Campos con la Cuenca de Espírito Santo y el Alto de Cabo Frío corresponde al límite sur con la Cuenca de Santos (FIGURA 1). El área de estudio se encuentra localizada en la parte *offshore* al sur de la Cuenca de Campos, limitada por las coordenadas: N 7492955 / E 307446.1-N 7481880 / E 316563.0, ocupando un área aproximada de 101 Km² (FIGURA 1).

Esta cuenca es un excelente ejemplo de las denominadas cuencas de margen pasiva del Atlántico, presentes a lo largo de la costa este de Suramérica y oeste de África. La cuenca se desarrolló sobre un sustrato volcánico extrusivo que resultó de la fase final de la ruptura de Pangea (Formación Cabiúnas). Dataciones radiométricas K-Ar indican edades entre 122 y 134 M.a. para estos basaltos extrusivos (Mizusaki *et al.*, 1988; *in* Rangel *et al.*, 1994).

La evolución de la cuenca comenzó con un episodio *rifting* en el Cretáceo Temprano causando el desarrollo de “*half-grabens*” donde fueron depositados sedimentos lacustres (Formación Lagoa Feia Inferior). Estos sedimentos consisten de conglomerado con contenido de fragmentos de basalto suprayacidos por sedimentos siliciclásticos de grano fino depositados en un ambiente alcalino (Ferreira & Milani, 2000).

En la transición Barremiano-Aptiano una fuerte discordancia angular niveló la cuenca y sobre esta superficie ocurrió la primera transgresión marina proveniente del sur. La restricción por el desarrollo de un proto-golfo permitió la depositación de una espesa capa de sedimentos evaporíticos; estos consisten de depósitos cíclicos de halita y anhidrita (Formación Lagoa Feia Superior).

Durante el Albiano se desarrolló una extensa rampa carbonática, en áreas someras, con un espesor aproximado de 600 m y compuesta principalmente por oolitos y bancos pisolíticos (Formación Macaé Inferior). Posteriormente del Cenomaniano al Campaniano esta rampa carbonática de alta energía fue inundada por un continuo ascenso del nivel del mar y se desarrollaron en consecuencia fácies carbonáticas de agua profunda (Formación Macaé Superior) (Ferreira & Milani, 2000). Durante el desarrollo de este ambiente carbonático marino, rocas siliciclásticas y capas turbidíticas fueron también depositadas y corresponden a las capas de arenisca de grano fino conocidas como Areniscas Namorado. La rápida subsidencia de la cuenca durante el Cretáceo Tardío y Terciario tuvo como consecuencia la acumulación de más de 3000 m de sedimentos.

Esta secuencia consiste de capas siliciclásticas y carbonáticas asociadas a la elevación de la margen continental y al desarrollo de un complejo progradante que consiste de sedimentos de plataforma somera y de talud. Aquellos sedimentos consisten de arenisca fluvial costera y marina somera y capas de shales, bancos carbonáticos y shales de talud y fondo oceánico (Ferreira & Milani, 2000).

El Miembro Siri (Oligo-Mioceno), unidad de interés en este trabajo, constituye el conjunto de rocas carbonáticas compuestas por arenisca calcárea bioclástica color crema claro, conforme Rangel *et al.* (1994).

El estilo estructural de la Cuenca de Campos es dominado por dos elementos estructurales típicos de cuencas de margen divergente (Guardado *et al.*, 1989): (1) fase *rift* con estructuras extensionales de basamento tales como fallas normales de ángulo alto involucrando la corteza continental, basaltos y sedimentos pre-depositación a las rocas evaporíticas de la megasecuencia transicional; (2) estructuras extensionales de sobrecarga, tales como fallas listricas normales afectando los sedimentos post-depositación a los evaporitos.

METODOLOGIA

La metodología adoptada comprende el procesamiento, análisis e interpretación de datos, utilizando la estratigrafía de secuencias *sensu* Vail *et al.* (1977).

- Análisis y correlación de perfiles eléctricos.

Durante esta fase se realizó un análisis detallado de cinco pozos, que tuvo como objetivo identificar las principales variaciones observadas en los registros de los perfiles eléctricos (rayos gama y resistividad). En seguida se desarrolló la correlación de los pozos (A-B-D-E-I) con el fin de realizar un análisis de detalle en las unidades estratigráficas y los posibles límites de secuencia. El intervalo estudiado varía entre profundidades de 900 e 1400 m. La utilización de los perfiles eléctricos como herramienta en el análisis estratigráfico de secuencias junto con la interpretación de secciones sísmicas ayudó a definir la litología, las facies sísmicas y las propiedades de las rocas en el intervalo analizado.

- Elaboración de mapas isópacos.

La elaboración de los mapas isópacos ilustra la forma, orientación y geometría del relleno de la cuenca. En esta fase se elaboró un mapa de espesor para cada secuencia identificada utilizando como herramienta el programa Surfer 7.0.

- Análisis e interpretación de secciones sísmicas.

A partir de dos líneas sísmicas 2D migradas en tiempo (Y-Y' *strike* y X-X' *dip*, concedidas por la Agencia Nacional del Petróleo ANP), se realizó un análisis sismoestratigráfico detallado. La interpretación de las líneas sísmicas tuvo como fundamento el análisis de la geometría de los reflectores, además de la definición de los patrones de apilamiento de los paquetes sedimentarios con relación a los ciclos de 3^{er} orden. Las interpretaciones obtenidas fueron apoyadas con un sismograma sintético entre el registro sísmico del pozo A y la sección sísmica X-X' (FIGURA 2).

Los datos sísmicos fueron analizados a partir de la identificación de las superficies *onlap*, *downlap*, *toplap* y truncamientos erosivos, siendo interpretados de acuerdo con las técnicas de estratigrafía sísmica propuestas por Vail *et al.* (1977). La nomenclatura usada en este trabajo, con relación al análisis de los datos sísmicos, siguen las convenciones de Mitchum *et al.* (1977), Van Wagoner *et al.* (1990) y Posamentier & Vail *et al.* (1988). El análisis

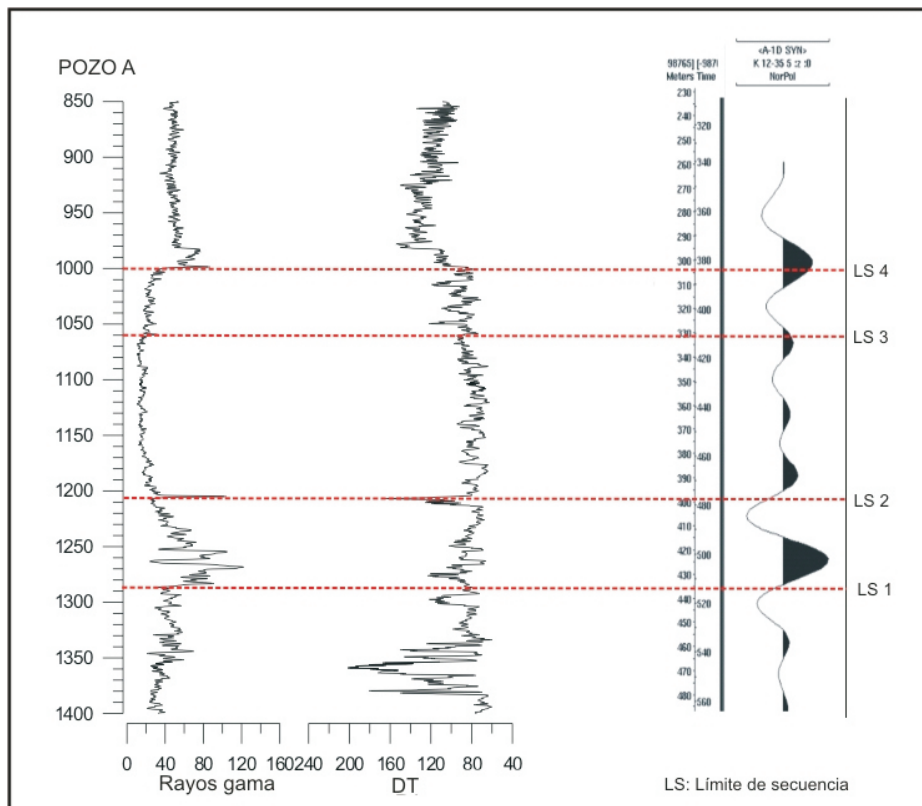


FIGURA 2. Sismograma sintético generado entre el registro sísmico del pozo A y la sección sísmica X-X'. (LS: límite de secuencia).

sismoestratigráfico fue llevado a cabo con ayuda del programa OpendTect, versión 2.3 y cuyo sistema de programación permite el procesamiento, visualización y interpretación de datos sísmicos 2D y 3D.

- Modelo depositacional para las rocas carbonáticas del Miembro Siri.

El desarrollo de este modelo tuvo como fundamento la identificación de los principales factores que controlaron la evolución de la plataforma carbonática (Miembro Siri).

RESULTADOS OBTENIDOS

El sistema carbonático Terciario de la Cuenca de Campos constituye una plataforma carbonática aislada mixta (siliciclástico-carbonática), formada en la plataforma externa. Procesos tales como subsidencia diferencial moderada y fluctuaciones del nivel del mar, causaron intervalos cortos de retrogradación, agradación y progradación de los depósitos carbonáticos, hacia los bordes de la plataforma (*leeward e windward*). En el intervalo estudiado fueron identificadas tres secuencias estratigráficas de 3^{er} orden (secuencias I-II-III) (FIGURA 3).

La parte inicial de la secuencia I está caracterizada por un prominente crecimiento de bancos carbonáticos en las márgenes de la plataforma, durante el ascenso rela-

tivo del nivel del mar. Esta situación generada durante el *transgressive system tract*, continuó durante el *high stand system tract* y generó una margen carbonática bien definida con una área restringida (lagunar) hacia el continente. Como el nivel del mar cae lentamente durante la parte final del *high stand system tract*, es originado en consecuencia un patrón progradacional en respuesta a las tasas de subsidencia relativamente bajas y tasas altas de productividad carbonática. La configuración interna de los reflectores permite inferir un establecimiento de fácies durante el *transgressive system tract e high stand system tract* de la unidad I que incluyen un *shelf rim* (borde de plataforma), compuesto por *rudstone* ó *grainstone* bioclástico y una región lagunar progradando hacia el continente. La facies lagunar propiamente dicha está compuesta por *wackstone* bioclástico y material siliciclástico proveniente del continente. El limite inferior de la secuencia I (LS1) no exhibe mucha evidencia de exposición y/o erosión, siendo entonces interpretada como un amalgamiento entre el límite de secuencia y una superficie transgresiva (FIGURA 3). La secuencia II fue depositada durante un segundo periodo de ascenso relativo del nivel del mar. La base de esta unidad (LS2) está caracterizada por una rápida inundación local, de acuerdo con las observaciones realizadas en los perfiles de pozos (FIGURA 2). En la interpretación de las líneas sísmicas fueron observados reflectores *onlap* y *downlap* sobre este límite. Una nítida retrogradación, en la margen

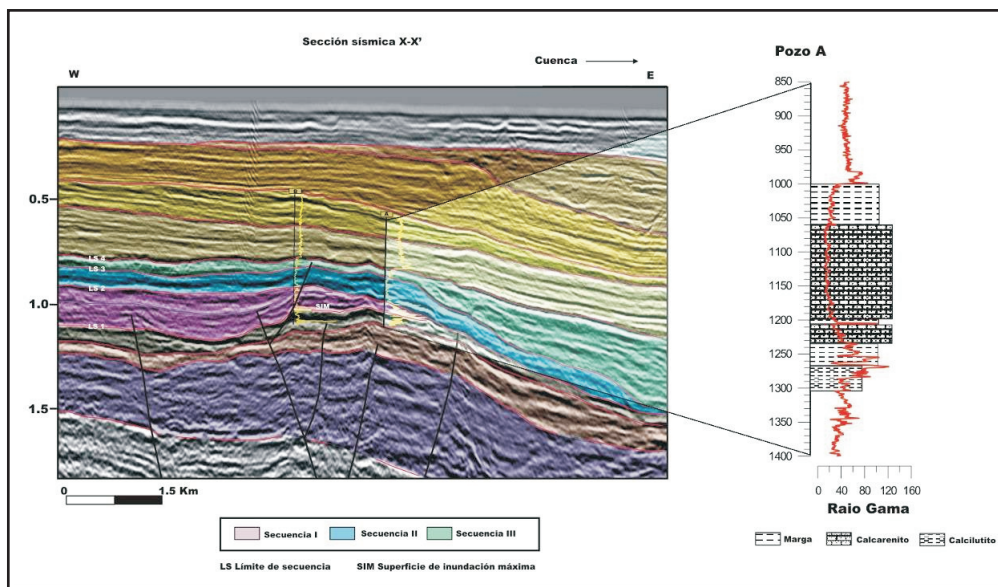


FIGURA 3. Sección sísmica X-X' con la proyección del pozo A y las unidades estratigráficas identificadas con los respectivos límites de secuencia.

este de la plataforma carbonática, es observada en la base de la secuencia II como consecuencia de la instalación de un *transgressive system tract* (FIGURA 3). Durante el siguiente *high stand system* la producción carbonática se torna mayor (fase *keep-up*), siendo entonces la entrada de sedimentos siliciclásticos relativamente baja durante esta fase. Los bordes de la plataforma no presentan el patrón de acreción vertical observado en la unidad I, sin embargo aun presenta fácies de margen de plataforma compuestas por *grainstone* biclásticos variando hacia fácies compuestas por *packstone* y *wackstone* en dirección a la cuenca (FIGURA 3). El tope de la unidad II (LS3) (FIGURA 3) no presenta rasgos de exposición y constituye una superficie de amalgamiento entre un límite de secuencia y la superficie transgresiva. Cabe resaltar que la secuencia II, constituye el intervalo de interés con relación al contenido de petróleo. En la secuencia III (FIGURA 3) fue identificada una superficie de inundación máxima separando un *transgressive system tract* de un *high stand system*. La misma estaría asociada a las terminaciones en *downlap* mas evidentes en la porción este de la sección sísmica X-X' (FIGURA 3). Una lenta elevación del nivel del mar marcaría el establecimiento del *high stand system*, hacia el tope de la unidad III, causando un patrón de apilamiento progradacional de sedimentación mixta siliciclástico-carbonática (FIGURA 3).

El tope de la unidad III (LS4), registra una inundación en los pozos y marca el fin de la producción carbonática Oligo-Miocena. De acuerdo con Waisman (2002) el Miembro Siri habría sido inundado por un pulso eustático de corta duración. La depositación de aproximadamente 300 m de carbonatos de agua somera indica una productividad moderada en concordancia con una subsidencia local, mas expresiva en la borda este de la cuenca dado el carácter dominante progradacional de las secuencias identificadas (FIGURA 3). Una reactivación tectónica en la Cuenca de Campos durante el Eoceno (Cobbold *et al.*, 2001), habría realizado los altos estructurales de la fase *rift*, facilitando así el desarrollo de la plataforma carbonática franca. Esta reactivación tectónica también sería responsable de la migración de petróleo hacia el intervalo carbonático Terciario.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La interpretación de las líneas sísmicas, permitió la identificación de estructuras geológicas, asociadas al fallamiento de la fase *rift*. Este tipo de fallamiento habría permitido el desarrollo de altos estructurales que habrían generado condiciones favorables para el desarrollo de la

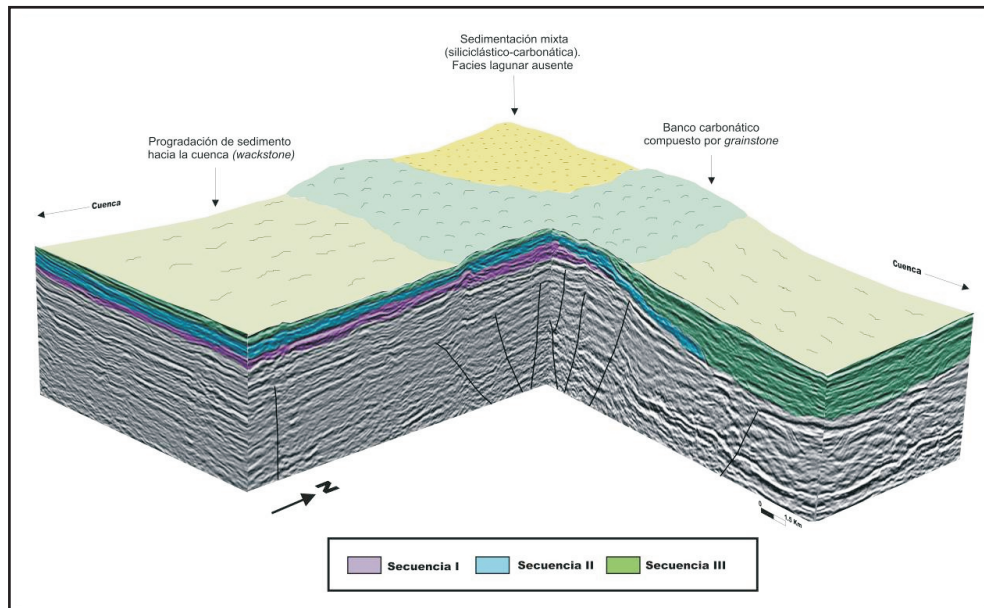


FIGURA 4. Bloque 3D elaborado a partir de la intersección de las secciones sísmicas X-X' (*dip*) y Y-Y' (*strike*). Esta figura ilustrando cada una de las unidades identificadas y la distribución de las fácies del *high stand system tract* presente en el tope de la unidad III.

plataforma carbonática Terciaria. La reactivación de estas estructuras sería también responsable de la migración de petróleo hacia la plataforma externa de la cuenca.

En la plataforma carbonática Oligo-Miocena, el fallamiento de la fase *rift* habría controlado la distribución de las fácies y el establecimiento de bancos locales sobre altos, mientras la subsidencia diferencial local, habría causado las variaciones laterales en el patrón de apilamiento a través de la plataforma, y al mismo tiempo habría ayudado en la generación de las fácies restringidas hacia el continente (*backreef*).

La configuración asimétrica de la plataforma sería realzada en dirección al continente por procesos de subsidencia localizados que permitieron el aislamiento y la generación de lagunas concomitante con los bancos generados en los bordes de la plataforma. Las secciones sísmicas también permiten descartar la presencia de estructuras asociadas a la tectónica de sal, debido a que estas presentan un dominio mayor en las áreas más profundas de la cuenca.

El borde este de la plataforma carbonática en las tres secuencias (línea sísmica X-X' *dip*), representa una porción de la plataforma carbonática con mejor desarrollo, siendo interpretada como un banco *keep-up*, caracterizado por reflectores de alta amplitud. Este margen constituiría a su vez una construcción orgánica que estaría bordeando la plataforma carbonática en forma de bancos, con orientación casi N-S, tal como fue reportado por Albertão *et al.* (2005).

Los datos de subsuperficie (sísmica 2D y perfiles de pozo), proporcionaron el desarrollo de un modelo 3D (FIGURA 4).

CONCLUSIONES

- El relieve estructural creado durante la fase *rift* Eocretácica de Suramérica y África (altos estructurales) determinaron la forma, tamaño y localización del crecimiento carbonático inicial en la plataforma externa de la Cuenca de Campos.

- La interpretación de las secciones sísmicas 2D, muestra que el sistema carbonático correspondiente al Miembro Siri registra eventos tectónicos locales y regionales entre el Oligoceno Superior y Mioceno Medio.

- El crecimiento local de bancos carbonáticos y la presencia de fácies lagunares restringidas en las secuencias I y II estuvieron favorecidas por procesos de subsidencia diferencial local, generados como consecuencia de un proceso de reactivación tectónica durante la depositación de la plataforma carbonática Terciaria.

- El alto gradiente de la plataforma en la parte este de la sección X-X', puede ser producto de una mayor tasa de subsidencia ayudada por la actividad del fallamiento durante la reactivación tectónica de la cuenca.

- La respuesta de las tres secuencias definidas con relación a los cambios del nivel relativo del mar es evidenciada por la presencia del *transgressive system tract* y/o *highstand system tract*. Cabe resaltar que no fueron identificados *lowstand system tract* en ninguna de las secuencias identificadas.

- La secuencia II representa la fase de mayor desarrollo de la plataforma carbonática terciaria y por lo tanto constituye el intervalo con mejores condiciones como roca reservorio.

- El límite de secuencia 4 (LS4) marca la inundación de la plataforma carbonática Terciaria durante el Mioceno Medio y representa una superficie de gran significancia regional, conforme Campbell (2005).

AGRADECIMIENTOS

- Agradecimiento muy especial a mi orientador Dr. Egberto Pereira, por quien por su paciencia, gran colaboración y orientación hizo posible la realización de este proyecto.

- Al profesor Dr. René Rodrigues, por los espacios de discusión y por los valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo.

- Al profesor Dr. Paulo Tibana, por la asesoría en el análisis petrográfico de rocas carbonáticas.

- A los profesores Dr. Jorge Carlos Della Fávera y Dr. Marco André Malmann Medeiros por las sugerencias y orientación en la interpretación de las secciones sísmicas.

- Al profesor Paulo de Tarso, por el suministro del programa para la interpretación de las líneas sísmicas.

- A la geofísica Gabriela Vicentelli, por su gran colaboración en el laboratorio de procesamiento e interpretación de datos sísmicos de la UNESP, Río Claro, Brasil.

- Al profesor Dr. Roberto Fainstein, porque su orientación y asesoría durante el curso de interpretación sísmica 2D

y 3D, fue muy importante en la etapa de finalización de este trabajo.

Waisman, G. (2002). Análise Estratigráfica de Sequências Terciárias com Ênfase nos carbonatos do Membro Siri. Região Centro-Sul da Bacia de Campos. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre.

REFERENCIAS

Albertão, G.A et al. (2005). Aplicação da Estratigrafia Química no Estudo de Reservatórios Carbonáticos da Bacia de Campos. Memórias do X Congresso Brasileiro de Geoquímica e II Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul. Pernambuco, Brasil.

Campbell, A.E (2005). Shelf-Geometry Response to Changes in Relative Sea Level on a Mixed Carbonate-Siliciclastic Shelf in the Guyana Basin. *Sedimentary Geology* 175, pp. 259-275.

Cobbold, P.R et al. (2001). Reactivation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos Basins, Southeastern Brasil. *AAPG Bulletin*, Vol. 85 (11), pp. 1925-1944 November. USA.

Figuereido, A.M; Milani E.J (2000). Sedimentary basins of South América. Memórias do XXXI Congresso Internacional de Geologia. Rio de Janeiro Agosto de 2000.

Guardado, L.R et al. (1989). Petroleum Geology of the Campos Basin, Brazil, A Model for a Producing Atlantic Type Basin. Divergent/Passive Margin Basin. Ed. AAPG, Memoir 48, pp. 3-79. USA.

Mitchum, R.M. et al. (1977). Seismic Stratigraphy and global changes of sea-level, part 7: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon Exploitation*. Ed. AAPG, Memoir 26, pp. 135-144. USA

Posamentier, H.W et al. (1988). Eustatic Controls on Clastic Deposition II – Sequence and System Tract Models. Sea Level Changes: An Integrated Approach: Special Publication No. 42, pp. 125-154.

Rangel, D et al. (1994). Bacia de Campos. *Boletim de Geociências*. PETROBRÁS, 8(1), pp. 203-217. Rio de Janeiro.

Vail, P.R et al. (1977). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level. *Seismic Stratigraphy - Applications to hydrocarbon Exploitation*. Ed. AAPG, Memoir 26, pp. 49-212. USA

Van Wagoner, J.C et al. (1990). Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores and Outcrops: Concepts for High Resolution Correlation of Time and Facies: *AA PG Methods in Exploration Series*, No. 7. 55p. USA

Trabajo recibido: abril 10 de 2007

Trabajo aceptado: julio 30 de 2007