

Modelamiento de Procesos en la depositación de Carbonatos, Plataforma Marion Norte y Sur del Mioceno

Modeling of Processes in the deposition of Carbonates, Platform Marion North and South of the Miocene



Navarrete Johanna
Email: janavarreteg@uce.edu.ec



Bustos Jairo
Email: jgbustos@uce.edu.ec

Palacios Diego
Email: dgpalacios@uce.edu.ec



John Cedric
Email: cedric.john@imperial.ac.uk



Benitez Marcelo
Email: mdbenitez@uce.edu.ec

Resumen

Marion Plateau es una plataforma de carbonatos fría-subtropical, ubicada al noroeste, costa afuera de Australia. Tiene dos plataformas separadas que presentan diferentes biotas de carbonatos que fueron desarrolladas en etapas de crecimiento independientes. En ese periodo de tiempo existió una glaciación, afectando los niveles glacio-eustáticos del mar y la acción de las olas que impactaron las tasas de crecimiento de los carbonatos y las geometrías de las plataformas. Sin embargo, no se ha podido establecer la relación entre los procesos involucrados en la depositación y etapas posteriores en los carbonatos. Los objetivos de este trabajo son: construir un apilamiento vertical de facies sedimentarias, correlacionar estratigráficamente las secuencias del Mioceno medio y representar las geometrías y patrones de apilamiento actuales, con base a condiciones conocidas. La metodología utilizada involucra correlación de estratigrafía secuencial de cinco límites de secuencias que representan “lowstands, transgressive y highstand system tracts” dentro de una mega secuencia, utilizando información de núcleos, secciones sísmicas, registros eléctricos y cambios en dolomitización. El modelamiento de procesos se genera para la relación de niveles eustáticos, tasa de subsidencia, producción de carbonatos, profundidad del agua y acción de las olas.

Los modelos representan tasas de sedimentación, distribución de facies y geometría de carbonatos alineados con la información existente de la locación. Como en todos los modelos, las limitaciones y asunciones afectan los resultados esperados, en este caso es la habilidad de reproducir los registros estratigráficos de espesor. Este estudio muestra exitosamente que los modelos de procesos son una alternativa para representar la interacción entre los eventos y las geometrías de los estratos de carbonatos que se puedan obtener. Al modelar las propiedades principales se genera la oportunidad de identificar factores que afectan las variaciones de los carbonatos en el subsuelo. Esto podría mejorar la caracterización y predicción en este tipo de reservorios y, consecuentemente, el potencial mejoramiento de las estrategias de producción de hidrocarburos.

Palabras Claves: *modelamiento procesos; plataforma Marion; carbonatos; estratigrafía secuencial.*

Abstract

Marion Plateau is a Miocene cool-subtropical carbonate platform located in offshore northeastern Australia. It has two separate platforms that present different carbonate biotas and were developed at independent growth stages. At that time there was an icehouse affecting the glacioeustatic sea levels, and wave base currents impacted carbonate growth rates and platform geometries. However, the relation between the process involved in the deposition and later stages of the carbonates are not well understood. This project objectives are build vertical stacking of sedimentary facies, correlate the middle Miocene sequence stratigraphic framework and obtain carbonate geometries and stacking patterns based on the existing constraints The methodology followed in this project involves sequence stratigraphic correlation of five sequence boundaries that denote lowstands, transgressive and highstands system tracts within a mega sequence using core data, seismic sections, electrical logs and dolomitization changes. Forward modelling is produced by the relation of eustasy levels, subsidence rate, carbonate production, water depth, and wave action. Models replicate sedimentation rates, facies distribution and carbonate geometries in line with the existent data of the location. As in all modelling processes, limitations and assumptions affect the expected results, which in this study is the ability of reproduce the stratigraphic thickness records.

This study successfully shows that forward modelling provides an alternative to representing the interaction between carbonate processes and the carbonate strata geometries that can be obtained. Modelling the key properties offers the opportunity to identify factors behind carbonate variations in the subsurface. This could improve carbonate reservoirs characterization and predictions, and subsequently the potential improvement of hydrocarbon production strategies.

Keywords: forward modelling; Marion plateau; carbonates; sequence stratigraphy.

Introducción

Los reservorios de carbonatos contienen más del 60% de las reservas convencionales de petróleo en el mundo y más del 30% de la producción diaria mundial viene de este tipo de reservorio (Akbar et al., 2000). La caracterización de carbonatos en el subsuelo es compleja y maneja heterogeneidades a pequeña escala que dificulta la obtención de modelos predictivos. Los procesos involucrados durante la depositación y eventos posteriores tienen alta incertidumbre, todavía hay poco entendimiento sobre los procesos que crean patrones complejos en los estratos, como definirlos y determinar el grado de complejidad (Burgess et al., 2012), y como esto puede impactar la continuidad lateral y la calidad de potenciales reservorios de hidrocarburos. Marion Plateau se ubica al noreste, costa afuera de Australia, entre 18°S y 23°S, hacia la parte marina de la gran barrera de arrecife, conocido en inglés como "Great Barrier Reef". La plataforma tiene dos acumulaciones de carbonatos del Mioceno, Marion Plateau Norte (NMP) y Marion Plateau Sur (SMP). La sección 194 del Programa de Perforación del Océano (Ocean Drilling Program -ODP) se enfocó en recuperar información de ambas plataformas, a lo largo de las líneas sísmicas (Fig. 1).

Marion Plateau no es una típica plataforma de carbonatos de agua tropical. Se formó durante el Mioceno en clima frío-subtropical bajo los efectos de glaciación, en los niveles glacio-eustáticos del mar, con el desarrollo de dos plataformas separadas. Definir el marco estratigráfico para ambas plataformas es complejo por el bajo porcentaje de recobro en los núcleos, litologías altamente dolomitizadas, reflexiones sísmicas transparentes en la sección Marion Plateau Sur (SMP), sets de registros eléctricos incompletos, y la incertidumbre en la interpretación de la información y las metodologías aplicadas; pero es fundamental aplicar un modelo cronológico preciso en las dos plataformas para determinar las tasas de sedimentación, comparar los niveles proximales del mar a eventos globales, y correlaciones límites de secuencias dentro del área de estudio. En el trabajo se utilizó el modelo de alta resolución creado para Marion Plateau Norte (NMP) por John et al. (2011) como base para desarrollar el marco estratigráfico del Mioceno medio de las plataformas Marion.

Marion Plateau es un escenario excelente para probar por primera vez la interacción de diferentes parámetros como niveles eustáticos, tasa de subsidencia, produc-

ción de carbonatos, profundidad del agua y acción de las olas para generar modelos de procesos uni y bi-dimensionales que repliquen los espesores existentes, tasas de sedimentación y geometrías de las plataformas Marion Norte y Sur durante el Mioceno medio.

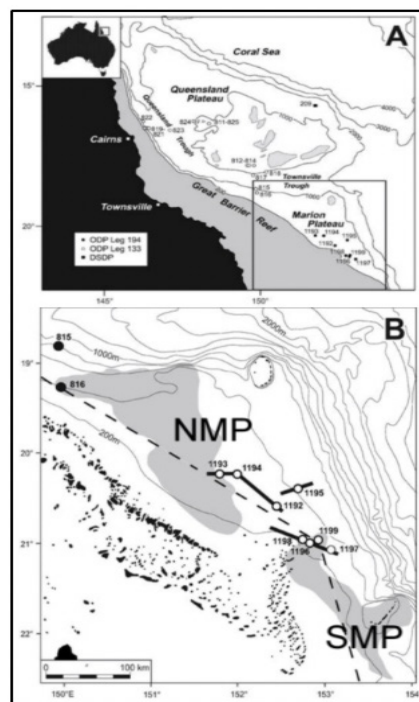


Figura 1. A) Mapa de ubicación de Marion Plateau. B) ODP Sección 194 con pozos y líneas sísmicas disponibles en NMP y SMP. Fuente: Ehrenberg et al., 2006

El modelamiento de procesos representa un método para determinar como un mecanismo establecido y ordenado se puede registrar como un estrato y permite examinar la precisión del mecanismo registrado. Los modelos unidimensionales evalúan los patrones de apilamiento, al tope de las plataformas de carbonatos, porque las geometrías de estratos agradacionales son comunes, en plataformas aisladas interiores, durante periodos de glaciaciones (Goldhammer et al. 1994; Della Porta et al., 2002) y, a menudo se asume que la eustasia de alta frecuencia y amplitud es un control dominante en el apilamiento. Mientras que, para los modelos bidimensionales, se combinan variaciones espaciales y temporales de subsidencia, transporte de sedimentos y producción de carbonatos (Williams et al., 2011).

Material y métodos

El marco estratigráfico secuencial definido en Marion Plateau Norte durante el Mioceno por John et al. (2011), se utilizó como guía para establecer una correlación



estratigráfica entre las plataformas Norte y Sur. Se incorporó: columnas litológicas, fotos e interpretaciones de núcleos de perforación, registros de rayos gamma y uranio en los pozos 194-1193 (NMP), 194-1196 and 194-1199 (SMP), y líneas sísmicas adquiridas por ODP (Fig. 1). El bajo recobro de núcleos en los pozos y la alta dolomitización tienen un impacto importante en la identificación de límites de secuencia, por lo que se requirió información complementaria para poder realizar la correlación como: superficies de erosión, superficies de exposición, picos de uranio relacionados con cambios en la dolomitización. Esta información se comparó con los datos bioestratigráficos disponibles para asegurar que sean equivalentes en tiempo.

El modelo unidimensional se basó en un proceso numérico llamado Dougal que responde a un modelo estratigráfico de acumulación de carbonatos construido en un Macros en Excel que fue descrito por Burgess et al., 2012, el cual registra la acumulación en el tope de plataforma, influenciado por la producción de sedimentos dependientes de profundidad de agua en perfiles eufótico, oligofótico y afótico que controlan la producción in situ (Burgess et al., 2012). Este modelo ilustra como la distribución de diferentes litofacies se construyen, capa por capa, como un sistema de depósito que responde a fuerzas externas y dinámicas internas autocíclicas.

El modelo fue aplicado a dos pozos en SMP (194-1196A, 194-1199A) y un pozo en NMP (194-1193A). La formulación se basa en la acumulación de carbonatos observados en cada iteración del modelo y los cambios, a través de un intervalo de tiempo determinado (0.00005 Ma) y limitado por el marco estratigráfico entre 13.9 y 16.6 Ma (Mioceno medio). Los parámetros principales que restringen el modelo son el cambio en el espacio de acomodación y tasas de acumulación de carbonatos. La tasa de acomodación es controlada por los valores de eustasia que fueron recopilados por las amplitudes estimadas definidas por la sobreposición entre "backstripping" e isotopos de oxígeno; y la subsidencia tectónica regional de 16-20 m durante 13-16 Ma que representa la subsidencia termal de 5-7 m/Ma (John et al., 2011). Estos datos fueron calculados para la plataforma Norte e interpretados para la plataforma Sur.

Las tasas de acumulación de carbonatos se relacionaron con la producción de cada biota a diferentes profundidades de agua. Para simular múltiples fábricas de producción de carbonatos, a diferentes tasas de acuerdo a la profundidad, la producción de sedimentos se calcula como la suma de las tasas de producción independientes de los eufóticos, oligofóticos y afóticos (Pomar, 2001a). Para cada tipo de producción, se especificó una tasa máxima como un parámetro esta-

blecido en el modelo con un modificador de tasa calculado como una función de la profundidad del agua. La producción de sedimentos para cualquier tiempo es la suma de los tres diferentes tipos de biotas, y la acumulación fue calculada a partir de la tasa de producción de sedimentos y el límite de acumulación, por lo que no puede existir acumulación por encima del nivel del mar. Cada perfil de producción genera un tipo diferente de carbonato, potencialmente simultáneo y en la misma profundidad de agua (Horbury & Adams, 1996; Rankey, 2004). En el modelo 1D, los factores externos como erosión, hiatos sedimentarios, transporte de sedimentos no son caracterizados independientemente. Por lo tanto, las tasas de sedimentación de 100 m/Ma para SMP y 150 m/Ma para NMP son aplicados para los tres pozos incluidos en el modelo tomados del reporte de ODP Sección 194 (Isern et al., 2002). Las tasas de acumulación de carbonatos se combinan con la profundidad de agua estimada a partir de los ensambles de Grandes Foraminíferos Bentónicos (Larger Benthic Foraminifers, LBF) en Marion Plateau por Hallock et al. 2006.

El modelamiento 2D se basa en los mismos tres pozos modelados en 1D, usando el software Dionisos. La sección tuvo una orientación NO-SE con dimensiones de la grilla de 100 x 100 m (1879 X 16 celdas). Burgess & Prince, 2014 describen que Dionisos crea un modelo estratigráfico a escala de cuenca de las arquitecturas de los estratos desarrolladas en escala de tiempo geológico (Granjeon & Joseph, 1999). Incluye una variación de procesos sedimentarios y tectónicos, y es capaz de crear modelos complejos de estratos de carbonatos. El modelo se usó para crear un modelo bidimensional que combine espacial y temporalmente: variaciones de subsidencia, transporte de sedimentos y producción de carbonatos (Williams et al., 2011). Esta aproximación matemática permite calcular la erosión, el transporte y la depositación de un rango de sedimentos de varios tamaños a tasas determinadas por la pendiente topográfica, flujo de agua y coeficientes de difusión terrestres y marinos (Burgess & Prince, 2014). Además, Dionisos representa otros procesos estratigráficos esenciales para generar geometrías de estratos, a gran escala, que no son considerados en el modelamiento 1D. Las variaciones de acomodación se modelan por la combinación espacial y temporal de la subsidencia total variable con las curvas sinusoidales del nivel eustático del mar para crear la historia simple y compleja del nivel relativo del mar.

El aporte de sedimentos puede ser constante en el modelo o variar, con el tiempo (Burgess & Prince, 2014).

El flujo de trabajo para el desarrollo del modelo tiene tres etapas principales con varias subdivisiones para replicar la estructura del modelamiento 1D: de-

finición de facies y sedimentos, espacio de acomodación y producción de carbonatos.

Resultados

Marco estratigráfico para NMP

La respuesta sísmica en NMP permitió observar geometrías internas dentro de la megasecuencia B y subdividir secuencias y parasecuencias. En el modelo de alta resolución de John et al. 2011, se propuso un marco estratigráfico para la plataforma norte, en base a estas geometrías, isótopos de SR y capas de glauconitas. Los límites de secuencia fueron limitados por inconformidades erosionales (Fig. 2).

- Parasecuencia MSB1 — Clinoformas progredientes (~18.0 Ma – 16.5 Ma): comprenden clinoformas de carbonatos sobre la secuencia siliciclástica MSA. El límite superior de la secuencia está marcado por el truncamiento de reflectores cerca del pozo 194-1193 (John et al., 2011).

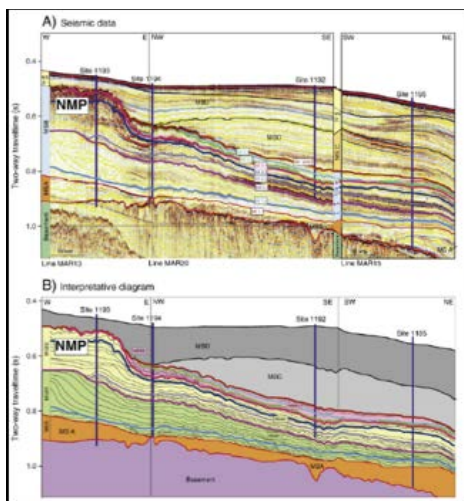


Figura 2. A) Sección sísmica interpretada mostrando los límites de secuencias. Fuente: Isern et al., 2002. B) Diagrama interpretativo con las geometrías sísmicas de cada parasecuencia dentro de la megasecuencia B. Fuente: John et al., 2011

Las edades de los límites de secuencia dentro de MSB1 no fueron definidas con precisión, pero las edades interpoladas de los pozos 194-1192 y 194-1195 ajustan con las edades de las secuencias MBI-2 y MBI-3 (Abreu y Anderson, 1998, Miller et al., 1998).

- Parasecuencia MSB2 — Agradación a progradación de rampa de carbonatos (“MCR”) en NMP (~16.5 Ma–13.9 Ma), la base de la secuencia MSB2 está marcada por el truncamiento de las clinoformas progredientes de MSB1, visible entre los pozos 194-1193 y 194-1194. Esta secuencia representa una rampa de carbonatos en el pozo 194-1193, caracterizado por el alto contenido de arcillas y su posterior cementación (John et al., 2011). Se observaron tres secuen-

cias: MSB2.1 (16.6 Ma–15.4 Ma) con evidencia de reflectores offlap que sugieren una retrogradación, a gran escala de la plataforma, representada por una estructura redondeada mostrada en la Fig. 2.

- La secuencia MSB2.2 (15.4–14.7) programada en la base como evidencia de la migración de la cresta de la plataforma hacia el Este en el pozo 194-1193, y agradacional a retrogradante en el tope. Las facies litificadas de NMP fueron definidas dentro de la secuencia MSB2.2. La última secuencia está representada por la etapa final de agradación de la NMP antes de la muerte de la plataforma en 13.9 Ma. El límite de la secuencia para MSB 2.3 (14.7–13.9 Ma) se reconoce por el cambio entre facies de plataforma dolomitizadas a facies no dolomitizadas (John et al., 2011).
- Parasecuencia MSB3 — Rampa Lowstand (13.9 Ma–10.9 Ma): la base de la secuencia fue identificada en el pozo 194-1194 y correlacionado al tope de NMP en el pozo 194-1193 (Isern et al., 2002). La parasecuencia está dividida en tres secuencias individuales (MSB3.1–MSB3.3) que se observan núcleos con evidencia de condensación e incremento en $\delta^{18}O$. Los reflectores en la secuencia MSB3 son evidencia de progradación a la base de la secuencia y offlap hacia el tope de la secuencia (John et al., 2011).

Eustasia y tasa de subsidencia

Los valores de eustasia se compilaron de la combinación de amplitudes estimadas por la sobre posición entre backstripping e isótopos de oxígeno en NMP entre 16.5 a 13.9 Ma (Mioceno medio) por John et al., 2011. Se realizó una corrección considerando las caídas del nivel del mar, asociados con la subsidencia termal regional de Marion Plateau, durante los intervalos de tiempo de variaciones del nivel del mar. La subsidencia regional tectónica se estimó en 16–20 m durante 13–16 Ma. Por lo que, el componente de subsidencia termal es de 5–7 m/Ma. Estos valores fueron añadidos a las variaciones eustáticas mencionadas antes. Las variaciones del nivel del mar, corregidas para los cuatro intervalos incluyen los efectos de subsidencia termal, las cuáles son: 52.7–80.7 m (13.9 Ma), 28.6–38.2 m (14.7 Ma), 25.7–28.6 m (15.4 Ma), y 25.8–28.1 m (16.5 Ma) mostradas en la Figura 3. Un enfoque similar se usó para estimar la magnitud de incrementos eustáticos: 36.4–55.7 m (14.7–13.9 Ma), 19.8–28.6 m (15.4–14.7 Ma), y 17.8–19.8 m (16.5–15.4 Ma) (John et al., 2011).

Estimación de la profundidad de agua

Los valores de profundidad de agua se estimaron usando ensambles de Grandes Foraminíferos Bentónicos (Larger Benthic Foraminifers, LBF) determinados en los pozos (194-1193A, 194-1196A). En ambos pozos, los LBF más abundantes incluyen *Amphistegina*, *Cycloclypeus*, *Lepidocyclina*, *Miogypsina* y *Operculina* (Hallock et al, 2006). El clima frío-subtropical fue crítico para la historia de deposición de la plataforma Marion a lo largo del Mioceno.

Las edades de los límites de secuencia dentro de MSB1 no fueron definidos con precisión, pero las edades interpoladas de los pozos 194-1192 y 194-1195 se ajustan con las edades de las secuencias MBI-2 y MBI-3 (Abreu y Anderson, 1998, Miller et al., 1998).

- Parasecuencia MSB2 — Agradación a progradación de rampa de carbonatos (“MCR”) en NMP (~16.5 Ma–13.9 Ma), la base de la secuencia MSB2 está marcada por el truncamiento de las clinoformas progradantes de MSB1, visible entre los pozos 194-1193 y 194-1194. Esta secuencia representa una rampa de carbonatos en el pozo 194-1193, caracterizado por el alto contenido de arcillas y su posterior cementación (John et al., 2011). Se observaron tres secuencias: MSB2.1 (16.6 Ma–15.4 Ma) con evidencia de reflectores offlap que sugieren una retrogradación a gran escala de la plataforma, representada por una estructura redondeada mostrada en la Figura 2.
- La secuencia MSB2.2 (15.4–14.7) prograda en la base como evidencia de la migración de la cresta de la plataforma hacia el Este en el pozo 194-1193, y agradacional a retrogradante en el tope. Las facies litificadas de NMP fueron definidas dentro de la secuencia MSB2.2. La última secuencia está representada por la etapa final de agradación de la NMP antes de la muerte de la plataforma en 13.9 Ma. El límite de la secuencia para MSB 2.3 (14.7–13.9 Ma) se reconoce por el cambio entre facies de plataforma dolomitizadas a facies no dolomitizadas (John et al., 2011).
- Parasecuencia MSB3 — Rampa Lowstand (13.9 Ma–10.9 Ma): la base de la secuencia fue identificada en el pozo 194-1194 y correlacionado al tope de NMP en el pozo 194-1193 (Isern et al., 2002). La parasecuencia está dividida en tres secuencias individuales (MSB3.1–MSB3.3) que se observan núcleos con evidencia de condensación e incremento en $\delta^{18}O$. Los reflectores en la secuencia MSB3 son evidencia de progradación a la base de la secuencia y offlap hacia el tope de la secuencia (John et al., 2011).

Eustasia y tasa de subsidencia

Los valores de eustasia se compilaron de la combinación de amplitudes estimadas por la sobre posición entre backstripping e isotopos de oxígeno en NMP entre 16.5 a 13.9 Ma (Mioceno medio) por John et al., 2011. Se realizó una corrección considerando las caídas del nivel del mar asociados con la subsidencia termal regional de Marion Plateau, durante los intervalos de tiempo de variaciones del nivel del mar. La subsidencia regional tectónica se estimó en 16–20 m durante 13–16 Ma. Por lo que el componente de subsidencia termal es de 5–7 m/Ma. Estos valores fueron añadidos a las variaciones eustáticas mencionadas antes. Las variaciones del nivel del mar corregidas para los cuatro intervalos incluyen los efectos de subsidencia termal, las cuáles son: 52.7–80.7 m (13.9 Ma), 28.6–38.2 m (14.7 Ma), 25.7–28.6 m (15.4 Ma), y 25.8–28.1 m (16.5 Ma) mostradas en la Figura 3. Un enfoque similar se usó para estimar la magnitud de incrementos eustáticos: 36.4–55.7 m (14.7–13.9 Ma), 19.8–28.6 m (15.4–14.7 Ma), y 17.8–19.8 m (16.5–15.4 Ma) (John et al., 2011).

Estimación de la profundidad de agua

Los valores de profundidad de agua se estimaron usando ensambles de Grandes Foraminíferos Bentónicos (Larger Benthic Foraminifers, LBF) determinados en los pozos (194-1193A, 194-1196A). En ambos pozos, los LBF más abundantes incluyen *Amphistegina*, *Cycloclypeus*, *Lepidocyclina*, *Miogypsina* y *Operculina* (Hallock et al, 2006). El clima frío-subtropical fue crítico para la historia de deposición de la plataforma Marion a lo largo del Mioceno.

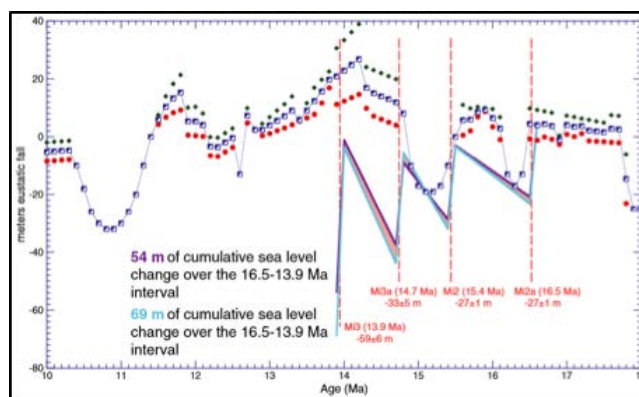


Figura 3. Curvas acumuladas del nivel del mar, de plataforma Marion, comparando las amplitudes estimadas con backstripping del margen de New Jersey (Kominz et al., 2008). Caídas y subidas del nivel del mar entre 16.5 a 13.9 Ma (Mioceno medio) en la plataforma Marion. Fuente: John et al., 2011

La fábrica de carbonatos en la plataforma sur mantuvo su crecimiento con los pulsos del nivel del mar, con mayor notoriedad, durante el Mioceno temprano, miliolid LBF indicó 180 m de sedimentación en

una plataforma somera restringida (<12 m) (Hallock et al., 2006).

En el Mioceno medio existió una regresión del nivel del mar, el área del pozo 194-1193 volvió a la zona eufótica. Durante esta fase, se acumularon 200 m de calizas y dolomitas dominadas por briozoarios y LBF de tamaños y formas que podrían indicar paleo profundidades oligofóticas (>50 m) a eufóticas (<30m). En el intervalo entre 100 y 223 mbsf (meters below sea floor), la presencia de LBF comunes sugieren condiciones oligofóticas en el orden de 50-100 m. Mientras que, en el intervalo de 40 a 90 mbsf, existen morfologías robustas de LBF y evidencia de esqueletos con daño físico, indicando condiciones más someras (<30m) (Shipboard Scientific Party, 2002).

Los núcleos de la plataforma sur muestran alta dolomitización, lo que dificultó el entendimiento de la historia de depositación. Una diferencia notable en las facies se observó en el pozo 194-1196 (Shipboard Scientific Party, 2002) entre 182 y 336 mbsf, donde existen floatstones de esqueletos y grainstones, ambos están dominados por foraminíferos porcelanáceos, grandes y pequeños, que indican aguas someras cálidas con saturación de carbonato más alto que cualquier otro intervalo observado en las plataformas. La presencia de pequeñas piezas de materia orgánica, con abundantes gastrópodos y bivalvos, corroboraron la interpretación de que las condiciones ambientales permanecieron cerca del nivel del mar (<12 m) (Hallock et al., 2006).

Definición de sedimentos y asociaciones de facies

Los sedimentos incluidos en el modelo predominan en las descripciones del núcleo de las dos plataformas. Los briozoarios dominan los carbonatos de aguas someras en NMP, algas rojas y LBF son sedimentos secundarios. Mientras que en SMP, los fragmentos de algas rojas y rodolitos son los sedimentos predominantes, con corales y LBF como componentes secundarios (Shipboard Scientific Party, 2002). A pesar de las diferencias de biotas, los ensamblajes de LBF son bastante similares (Hallock et al., 2006). El lodo carbonatado se incluyó para caracterizar las áreas entre plataformas, pero también se encontró una capa de 20 m. en el pozo 194-1193.

Las asociaciones de facies se identificaron en base al tamaño de grano observado, durante la revisión litológica de los núcleos y controlado por sedimentos. Se consideraron seis facies en función a la ocurrencia de sedimentos, energía de olas y ubicación. La tabla 1 presenta un resumen de los sedimentos, facies y criterios de definición observados en la plataforma Marion.

Tabla 1. Sedimentos y facies incluidos observados en la plataforma Marion

Sediments	Facies	Description
Carbonate mud	Mudstone	Fine sediments, carbonate mud dominated. Inter-platforms.
Red algae	Boundstone	Red algae dominated.
Bryozoans	Packstone	Bryozoan dominated, NMP present
Rhodoliths	Floatstone	Red algae and LBF dominated
LBF	Rudstone	LBF dominated
	Grainstone	Rhodolith dominated, depth and wave energy dependent

Parámetros para la estimación de producción de carbonatos

Durante el Mioceno temprano, el pozo 193-1193 ubicado en NMP mostró un incremento importante en tasas de depositación de 15 a 150 m/Ma; en el Mioceno medio la tasa de sedimentación no se definió directamente. Se asumió para el modelamiento que el nivel de crecimiento para ambas plataformas tiene la misma tendencia. Para SMP, las tasas de crecimiento de la plataforma se registraron en 80 m/Ma en ~140m de espesor durante el Mioceno medio (Isern et al., 2002). La figura 4 muestra tasas de sedimentación para todos los pozos de la zona.

Los perfiles de sedimentación permitieron la definición de litofacies, de acuerdo con las proporciones relativas de materiales eufóticos, oligofóticos y afóticos, dentro de cada capa modelada. Estos perfiles concuerdan con las profundidades de agua estimadas con las asociaciones de LBF por Hallock et al. (2006).

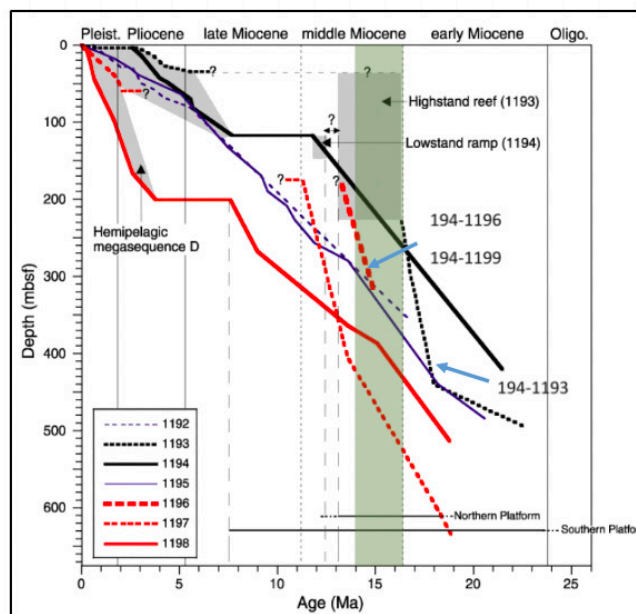


Figura 4. Tasas de sedimentación en las plataformas Marion. La zona verde representa el tiempo usado en el modelamiento (16.6 Ma -13.9 Ma).

Fuente: Isern et al, 2002

La producción de carbonatos, para el modelo, uso valores relacionados con las tasas de sedimentación presentadas anteriormente y, los valores para cada tipo de sedimento y profundidad de agua se consideraron como proporciones de la producción

esperada. La tabla 2 muestra los valores de producción de carbonato, considerando la profundidad de agua, para cada tipo de sedimentos.

Tabla 2. Producción de carbonatos versus profundidad de agua para cada tipo de sedimentos. Valores expresados como proporciones

Water depth	Bryozoans	Carbonate mud	LBF	Red algae	Rhodoliths
0	1	0	0	1	1
10	0.8	0.5	0.8	0.5	0.8
20	0.8	0.5	0.8	0.5	0.8
30	0.5	0.5	0.5	0	0.8
40	0.5	0.5	0.5	0	0.5
50	0	1	0	0	0

Las tasas de sedimentación obtenidas en el modelo respetan los rangos esperados. Sin embargo existen valores altos al inicio del modelo y, el modelo definió valores negativos como se muestra en la Figura 5.

El modelo de evolución de facies tiene buena correlación con las litofacies descritas (Figura 6) y representa los parámetros principales que influyen su depositación y acumulación. El modelo muestra cuatro asociaciones de facies: mudstone, packstone, floatstone y grainstone. Estas litofacies tenían gran espesor y eran las capas predominantes. Sin embargo, las capas delgadas compuestas de boundstone y rudstone no están representadas en el modelo. Las áreas entre plataformas son dominadas por facies mudstone.

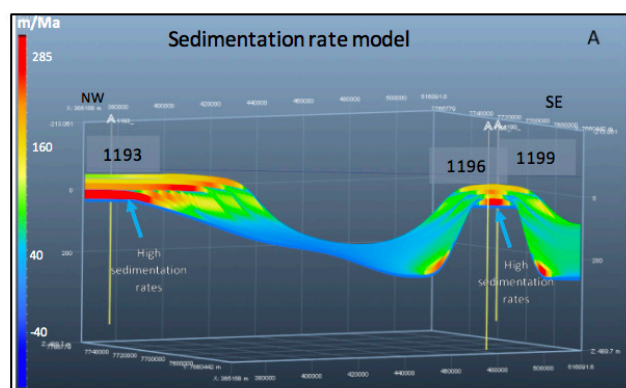


Figura 5. A) Modelo de distribución de tasas de sedimentación. Exageración vertical: 100x.

Discusión

Estratigrafía secuencial para NMP y SMP

Las características observadas en los núcleos y cambios en el registro de uranio en los pozos ubicados en SMP se interpretaron como eventos equivalentes, en tiempo a las secuencias y parasecuencias definidas dentro de la mega secuencia B en NMP por John et al. (2011). Los cambios en la dolomitización sugieren la circulación de agua normal a ligeramente modificada como principal agente dolomitizante. La alternancia entre dolomita y cali-

za podría representar intervalos de exposición subaérea extensa, inmediatamente después de la depositación. Los episodios de somerización podrían causar la estabilización mineralógica (reemplazo de aragonito y calcita magnesiana por calcita con bajo contenido de magnesio), disminuyendo el potencial químico disponible para generar dolomitización durante las siguientes exposiciones a circulación de agua salina.

En el caso de NMP, otro factor puede ser su relativa cercanía a tierra, lo que pudo disminuir la acción de fuerzas oceánicas generando mayor circulación de agua y por lo tanto mayor dolomitización (Ehrenberg et al., 2006).

Estas intercalaciones de dolomitas-calizas se evidenciaron con mayor frecuencia en SMP que en NMP, y son consistentes con la observación de la progradación de ambas plataformas en las secuencias MSB 1.2, MSB 2.1, MSB 2.3, tal como se muestra en la Figura 7 y el resumen de marco estratigráfico en la Tabla 3. Además, la etapa de crecimiento de carbonatos más reciente, solo aplica para SMP; el límite de secuencia MSB 3.1 fue interpretado como dolomita a caliza y una superficie de exposición relacionada con el inicio de un lowstand y luego una transgresión seguida por un highstand (John et al., 2011). Finalmente, el límite de secuencia MSB 3.3 se interpretó como un cambio en la dolomitización que sugiere una posible exposición subaérea o el efecto de aguas meteóricas que podría representar una caída importante del nivel del mar dentro de SMP (Conesa et al, 2005), que se interpretó como el límite entre las mega secuencias B y C.

La teoría de highstand shedding (Schlager et al., 1994), inicialmente desarrollada para sistemas de carbonatos tropicales dominados por corales predice que la máxima producción de carbonatos ocurre durante highstands cuando el tope de la plataforma está inundado y es mínima durante el lowstand, cuando la plataforma está expuesta y la fábrica de carbonatos se reduce significativamente (John et al, 2011). La evidencia para la condensación de sedimentos, durante lowstands, es la mayor característica de la teoría mencionada. El modelo para la plataforma Marion está basado en que los límites de secuencias MSB 2.3 y MSB 3.1 (Figura 7, tabla 3) están asociados con una superficie de exposición inundada por un cambio en la profundidad de agua, y una inconformidad observada en las reflexiones sísmicas; el tope de la plataforma representa el fin del crecimiento de carbonatos con una superficie de erosión y suelo (John et al., 2011). Para SMP, el límite de secuencia MSC 1.1 está asociado con superficies de exposición y suelo al tope de la plataforma que representan el fin del tercer crecimiento de carbonatos. Estas secuencias fueron interpretadas como una señal que NMP y SMP estuvieron expues-

tas y la productividad de los carbonatos disminuyó considerablemente durante los lowstands

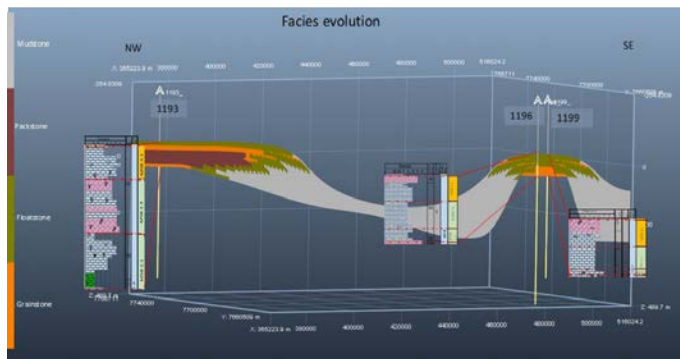


Figura 6. Modelo de facies comparado con los perfiles estratigráficos en el Mioceno medio. Exageración vertical: 100x

Registro de patrones de apilamiento en modelamiento de procesos

El modelo unidimensional generado con la formulación de Dougal, representa un rango limitado de procesos conocidos que controlan la formación de plataformas de carbonatos. Las principales asunciones para entender la distribución de espesores de las litofacies son las relaciones de producción con profundidad de agua usadas para representar la sedimentación eufótica, oligofótica y afótica, y las litofacies creadas con las curvas de producción-profundidad. Al modificar estas asunciones, los resultados serían diferente, por lo que se requiere mayor investigación sobre la naturaleza de las fábricas de carbonatos que controlan la distribución de espesores.

Los modelos resultantes son simplificaciones de la interacción entre los cambios eustáticos registrados durante el Mioceno medio y las profundidades de agua de los ensambles de LBF. Las tasas de sedimentación se estimaron por Shipboard Scientific Party (2012). Los registros estratigráficos en los pozos y los espesores replicados con el modelo de procesos son representativos de lo observado en los núcleos. Los procesos de erosión, compactación o transporte no son reproducidos en este modelo simplificado.

Se realizó un caso de sensibilidad, utilizando condiciones de sedimentación en carbonatos tropicales, para probar como afectarían los espesores estratigráficos, manteniendo los parámetros de acomodación de la plataforma Marion (eustasia y subsidencia, valores de profundidad de agua) apoyado por la asunción de que el principal control en este modelo es la tasa de sedimentación. Los resultados mostraron un espesor tres veces mayor al observado en los datos.

Esencialmente, estos resultados confirman que los patrones de carbonatos, litofacies y espesores están determinados por la combinación de las variaciones de aporte y espacio de acomodación (Schlager, 1993). La tasa de producción de sedimentos es un control claro en los resultados y probablemente el control principal, en el escenario probado en el modelo. Las curvas eustáticas y de subsidencia, y los rangos de profundidad de agua fueron validados con este modelo unidimensional.

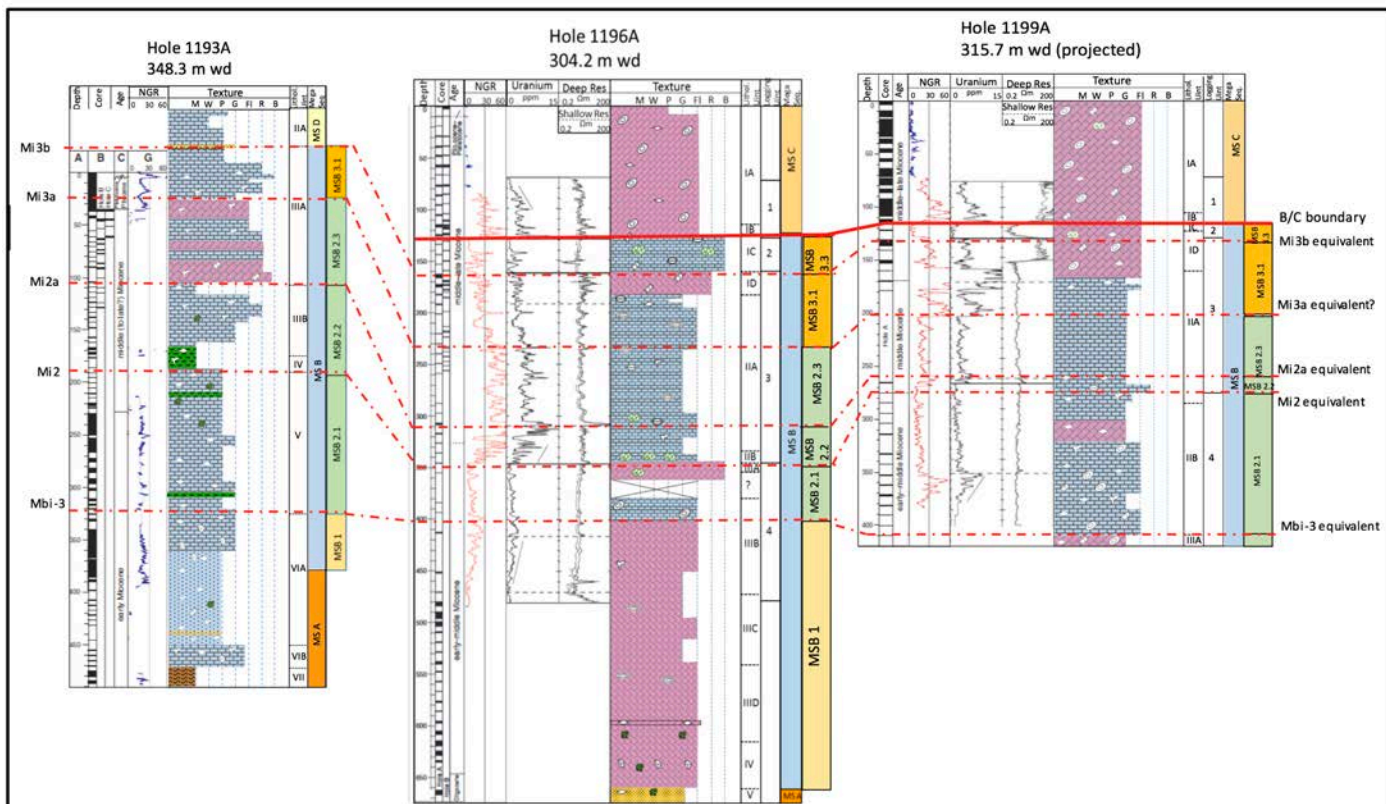


Figura 7. Correlación del marco estratigráfico para NMP y SMP en el Mioceno Medio

Geometrías obtenidas del modelo de procesos 2d

El modelo trata de replicar las geometrías de las plataformas de carbonatos e interplataforma de Marion basado en parámetros conocidos y probados en modelo unidimensional. Se ejecutó como una evaluación de los factores que controlan la geometría de las plataformas como la producción de sedimentos, el transporte de sedimentos, topografía inicial, cambios en la acomodación por subsidencia y procesos eustáticos, y corrientes oceánicas.

La limitación de los modelos numéricos es que son una representación simplificada de un sistema sedimentario real. Dionisos se basa en varias asunciones, sobre como un sistema sedimentario se comporta (Prince & Burgess, 2013). Otra limitación es la aplicabilidad de los coeficientes de difusión para el transporte de sedimentos que no están bien definidos con ejemplos reales, especialmente en sistemas de carbonatos marino-someros. Estos rangos de valores tratan de representar una variedad de situaciones posibles durante la depositación, desde casos dominados por acumulaciones en sitio a sistemas dominados por transporte donde todos los sedimentos producidos son transportados a la cuenca (Williams et al., 2011).

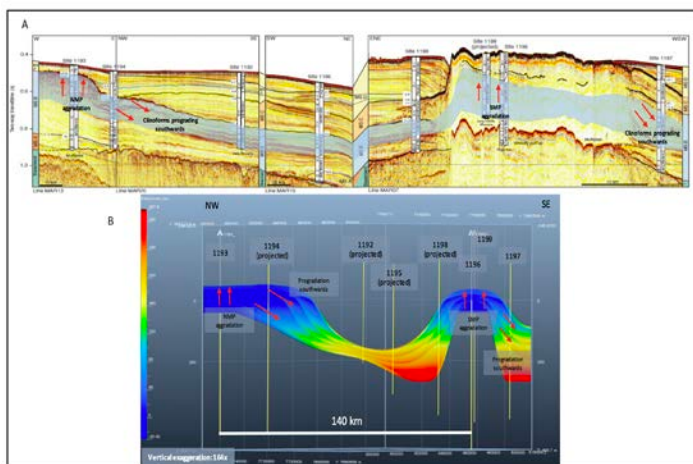


Figura 8. A) Geometrías de agradación y progradación en las reflexiones sísmicas en NMP, SMP e interplataforma. La zona celeste representa las secuencias dentro de mega secuencia B. Fuente: Isern et al., 2002. B) Modelo de batimetría 2D demostrando la agradación y progradación.

Los modelos se basan en la determinación de las geometrías, en balance con la producción de carbonatos en sitio y las tasas de transporte de sedimentos dependientes del gradiente topográfico (Williams et al., 2011). Las geometrías modeladas para NMP progradan hacia el sur. La SMP muestra una geometría agradacional en la plataforma misma, y cliniformes de alto ángulo progradantes, al margen sureste; sin embargo, la arquitectura asimétrica con un margen de escarpe en el flanco noroeste (Isern et al., 2002) no fue capturado en el modelo. En la figura 8 se observa la comparación entre las geometrías de las líneas sísmicas, a lo largo de la plataforma Marion y, el modelo creado en Dionisos.

El espesor estratigráfico, en ambas plataformas, no fue

reproducido con precisión por el modelo. Los espesores resultantes fueron la mitad de los espesores reales. Una explicación para este desajuste puede ser la energía de la acción de olas y la profundidad base.

Se observó, en un modelo preliminar, que la acción de las olas en mayor intensidad interrumpe la agradación de carbonatos en la plataforma, generando espesores menores en la plataforma e incrementando el espesor de sedimentos interplataforma. Esto se interpretó como una relación directa entre la erosión de la plataforma por acción de las olas intensificando la cantidad de sedimentos transportados a la zona entre plataformas. Sin embargo, la ausencia de acción de olas en el modelo tiene un impacto importante en las geometrías resultantes. Otra posibilidad podría ilustrarse con el espacio de acomodación creado por el modelo. El modelo de batimetría fue consistente con las observaciones de profundidad de agua y cambios eustáticos definidos por John et al. 2011, sugiriendo que la batimetría no permitió mayor acumulación de sedimentos en el espacio disponible. Además, los procesos de compactación probablemente no tuvieron gran influencia en la creación de espacio de acomodación.

Las tasas de sedimentación modeladas mostraban valores iniciales altos, ubicados en los sitios de inicio de las plataformas y representan la edad inicial del modelo, esto demuestra que el modelo representa la nucleación de carbonatos en ambas plataformas, lo cual no es real porque el crecimiento de las plataformas Marion, inició antes del tiempo capturado en el modelo (Mioceno temprano) (Isern et al., 2002). Además, se encontraron valores cero que fueron correlacionados con caídas del nivel del mar donde no existía producción de carbonatos. Finalmente, las tasas de sedimentación negativa se asociaron con periodos de exposición de las plataformas denotando posibles procesos de erosión (Fig 9).

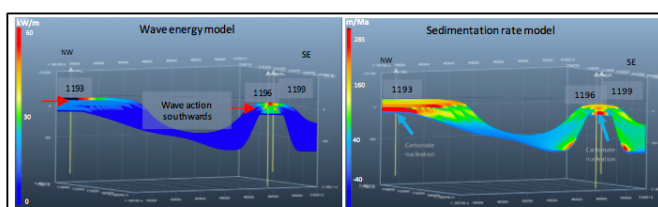


Figura 9. Modelos 2D de las propiedades de las plataformas Norte y Sur de Marion. A) Energía de las olas; B). Tasas de sedimentación. Exageración vertical: 100x

Conclusiones

El marco estratigráfico para las plataformas Norte y Sur de Marion, identificó cinco límites de secuencia en el Mioceno Medio que son correlacionables en las dos plataformas: MBI-3, Mi2, Mi2a, Mi3a y Mi3b. La definición se basó en inconformidades sísmicas, superficies de exposición y erosión, y efectos de dolomitización. Estos cinco límites de secuencia se interpretaron como, lowstands, transgresiones y highstands, dentro de la mega secuencia B. La definición del marco

estratigráfico se usó para correlacionar los cambios del nivel del mar, estimados para la plataforma Norte de Marion.

El primer modelo de procesos para la plataforma Marion se desarrolló entre 16.6 y 13.9 Ma por la calidad y cantidad de información para construir los modelos. Los modelos unidimensionales evaluaron el patrón de apilamiento en las plataformas y generó espesores estratigráficos precisos que validaron las curvas de eustasia y subsidencia reportadas por John et al., 2011, la profundidad de agua y las tasas de sedimentación generadas por ODP Leg 194.

Los resultados de los modelos 2D generaron una representación realística y precisa de las geometrías de agradación y progradación en el Mioceno medio, con la interacción entre el espacio de: acomodación, producción de carbonatos, batimetría y energía de las olas. Los modelos obtuvieron buen resultado en la distribución de facies y tasas de sedimentación representadas en los datos de entrada. Como debilidad, los espesores estratigráficos requieren mayor entendimiento de la interfase entre la producción de carbonatos para cada biota, los factores de transporte de sedimentos, parámetros de acción de las olas y el espacio de acomodación disponible para mantener la acumulación de sedimentos. Una limitación del modelo fue la asunción de parámetros como la energía de las olas y el aporte de sedimentos que requirió usar datos análogos.

Las plataformas Norte y Sur de Marion son un escenario excelente para experimentar la interacción de múltiples controles, incluyendo el transporte de: sedimentos, producción de sedimentos, subsidencia diferencial y oscilaciones del nivel relativo del mar para obtener geometrías de plataformas de carbonatos y, es una oportunidad para entender las variaciones de los carbonatos, en el subsuelo, para mejorar la caracterización de yacimientos de carbonatos que podrían optimizar las estrategias de producción de hidrocarburos.

Referencias bibliográficas

- Abreu, V.S., Anderson, J.B., 1998. Glacial eustasy during the Cenozoic; sequence stratigraphic implications. *AAPG Bulletin* 82, 1385–1400.
- Adey, W.H., 1965. The genus *Clathromorphum* (Corallinaceae) in the Gulf of Maine. *Hydrobiologia* 26 (3–4), 539–573.
- Adey, W.H., 1973. Temperature control of reproduction and productivity in a subarctic coralline alga. *Phycologia* 12 (3/4), 111–118.
- Akbar, M., B. Vissapragada, A. H. Alghamdi, D. Allen, M. Herron, A. Carnegie, D. Dutta, J.-R. Olesen, R. Chourasiya, and D. Logan, 2000, a snapshot of carbonate reservoir evaluation: *Oilfield Review*, v. 12, p. 20-21
- Brandano, M., V. Frezza, L. Tomassetti, and M. Cuffaro, 2009, Heterozoan carbonates in oligotrophic tropical waters: The Attard member of the lower coralline limestone formation (Upper Oligocene, Malta): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 274, no. 1-2, p. 54-63, doi: 10.1016/j.palaeo.2008.12.018.
- Burgess, P. and V. Wright, 2003, Numerical Forward Modeling of Carbonate Platform Dynamics: An Evaluation of Complexity and Completeness in Carbonate Strata: *Journal of Sedimentary Research*, v. 73, no. 5, p. 637-652, doi:10.1306/020503730637.
- Burgess, P. and D. Emery, 2004, Sensitive dependence, divergence and unpredictable behavior in a stratigraphic forward model of a carbonate system: *Geological Society, London, Special Publications*, v. 239, no. 1, p. 77-94, doi:10.1144/gsl.sp.2004.239.01.06.
- Burgess, P., 2008, The nature of shallow-water carbonate lithofacies thickness distributions: *Geol.*, v. 36, no. 3, p. 235, doi:10.1130/g243326a.1.
- Burgess, P. and D. Pollitt, 2011, The origins of shallow-water carbonate lithofacies thickness distributions: one-dimensional forward modelling of relative sea-level and production rate control: *Sedimentology*, v. 59, no. 1, p. 57-80, doi:10.1111/j.1365-3091.2011.01303.x.
- Burgess, P. and G. Prince, 2014, Non-unique stratal geometries: implications for sequence stratigraphic interpretations: *Basin Res.*, v. 27, no. 3, p. 351-365, doi:10.1111/bre.12082.
- Conesa, G.A.R., Favre, E., Münch, P., Dalmasso, H., and Chaix, C., 2005, Biosedimentary and paleoenvironmental evolution of the Southern Marion Platform from the middle to late Miocene (northeast Australia, ODP Leg 194, Sites 1196 and 1199).
- Della Porta, G., Kenter, J.A.M. and Bahamonde, J.R. (2004) Depositional facies and stratal geometry of an Upper Carboniferous prograding and aggrading high-relief carbonate platform (Cantabrian Mountains, N Spain). *Sedimentology*, 51, 267–295.
- Ehrenberg, S., J. McArthur, and M. Thirlwall, 2006, Growth, Demise, and Dolomitization of Miocene Carbonate Platforms on the Marion Plateau, Offshore NE Australia: *Journal of Sedimentary Research*, v. 76, no. 1, p. 91-116, doi:10.2110/jsr.2006.06.
- Freiwald, A., Henrich, R., 1994. Reefal coralline algal build-ups within the Arctic Circle: morphology and sedimentary dynamics under extreme environmental seasonality. *Sedimentology* 41, 963–984.
- Gaina, C., Müller, R.D., Royer, J.-Y., and Symonds, P., 1999. The evolution of the Louisiade Triple Junction. *J. Geophys. Res.*, 104:12927–12940.
- Goldhammer, R.K., Oswald, E.J. and Dunn, P.A. (1991) Hierarchy of stratigraphic forcing: example from Middle Pennsylvanian shelf carbonates of the Paradox Basin. In: *Sedimentary Modeling: Computer Simulations and Methods for Improved Parameter Definition* (Eds E.K. Franseen, W.L. Watney, C.G.S.C. Kendall and W. Ross), *Kansas Geol. Surv. Bull.*, 233, 361–414. Kansas Geological Survey, Lawrence, KS.



Granjeon, D., Casa, M.C., Eschard, R., and Joseph, P., 2002, Stratigraphic modeling: A new tool to construct 3-D geological models for basin modeling purposes: (abstract) American Association of Petroleum Geologists, Annual Meeting Program, v. 11, p. A66.

Granjeon D., Joseph P., 2012, Concepts and Applications of a 3-D multiple lithology, diffusive model in stratigraphic modelling: Society for Sedimentary Geology (SEPM) Special publications 62.

Halfar, J., Zack, T., Kronz, A., Zachos, J., 2000. Geochemical signals of rhodoliths (coralline red algae) — a new biogenic archive. *Journal of Geophysical Research* 105 (C9), 22107–22116.

Halfar, J., S. Hetzinger, W. Adey, T. Zack, G. Gamboa, B. Kunz, B. Williams, and D. Jacob, 2011, Coralline algal growth-increment widths archive North Atlantic climate variability: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 302, no. 1-2, p. 71-80, doi: 10.1016/j.palaeo.2010.04.009.

Hallock, P., Sheps, K., Chapronière, G., and Howell, M., 2006, Larger benthic foraminifers of the Marion Plateau, northeastern Australia (ODP Leg 194): comparison of faunas from bryozoan (Sites 1193 and 1194) and red algal (Sites 1196–1198) dominated carbonate platforms.

Haq, B., Hardenbol J., and Vail P., 1987, Chronology of Fluctuating Sea Levels since the Triassic: *Science*, v. 235, no. 4793, p. 1156-1167, doi:10.1126/science.235.4793.1156.

Horbury, A.D. and Adams, A.E. (1996) Microfacies associations in Asbian carbonates: an example from the Urswick Limestone Formation of the southern Lake District, northern England. In: *Recent Advances in Lower Carboniferous Geology* (Eds P. Strogon, I.D. Somerville and G.L. Jones), *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 107, 221–238. The Geological Society, London.

Isern A., Anse F., 2002, ABSTRACT: Sea-Level Magnitudes Recorded by Continental Margin Sequences on the Marion Plateau, Northeast Australia: ODP Leg 194: *Bulletin*, v. 86, doi: 10.1306/3fef3e25-1741-11d7-8645000102c1865d.

John, C., Mutti, M., 2005. The response of heterozoan carbonate systems to Palaeoceanographic, climatic and eustatic changes: a perspective from slope sediments of the Marion Plateau (ODP Leg 194). *Journal of Sedimentary Research* 75, 51–65.

John, C., G. Karner, E. Browning, R. Leckie, Z. Mateo, B. Carson, and C. Lowery, 2011, Timing and magnitude of Miocene eustasy derived from the mixed siliciclastic-carbonate stratigraphic record of the northeastern Australian margin: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 304, no. 3-4, p. 455-467, doi: 10.1016/j.epsl.2011.02.013.

Kindler, P., C. Ruchonnet, and T. White, 2006, The Southern Marion Platform (Marion Plateau, NE Australia) during the Early Pliocene: a lowstand-producing, temperate-water carbonate factory: *Geological Society,*

London, Special Publications, v. 255, no. 1, p. 269-282, doi:10.1144/gsl.sp.2006.255.01.16.

Kominz, M.A., Browning, J.V., Miller, K.G., Sugarman, P.J., Mizintsevav, S., Scotese, C.R., 2008. Late Cretaceous to Miocene sea-level estimates from the New Jersey and Delaware coastal plain coreholes: an error analysis. *Basin Research*.

Miller, K.G., Mountain, G.S., Browning, J.V., Kominz, M., Sugarman, P.J., Christie-Blick, N., Katz, M.E., Wright, J.D., 1998. Cenozoic global sea level, sequences, and the New Jersey transect; results from coastal plain and continental slope drilling. *Reviews of Geophysics* 36, 569–601.

Mutter, J.C., and Karner, G.D., 1980. The continental margin off northeast Australia. In Henderson, R.A., and Stephenson, P.J. (Eds.), *The Geology and Geophysics of Northeast Australia*. *Geol. Soc. Aust., Queensl. Div.*, 47–69.

Pomar, L., 2001, Types of carbonate platforms: a genetic approach: *Basin Research*, v. 13, no. 3, p. 313-334, doi:10.1046/j.0950-091x.2001.00152.x.

Prince, G. & Burgess, P., 2013, Numerical modeling of falling-stage topset aggradation: implications for distinguishing between forced and unforced regressions in the geological record. *J. Sediment. Res.*, 83, 767–781.

Rankey, E.C., 2004, On the interpretation of shallow shelf carbonate facies and habitats: how much does water depth matter? *J. Sed. Res.*, 74, 2–6.

Shipboard Scientific Party, 2002. Leg 194 summary. In Isern, A.R., Anselmetti, F.S., Blum, P., et al., *Proc. ODP, Init. Repts.*, 194: College Station TX (Ocean Drilling Program), 1–88.

Schlager, W. (1993) Accommodation and supply – a dual control on stratigraphic sequences. *Sed. Geol.*, 86, 111– 136.

Schlager, W., Reijmer, J.J.G., Droxler, A., 1994. Highstand shedding of carbonate platforms. *Journal of Sedimentary Research* 64, 27–281.

Struckmeyer, H. and P. Symonds, 1997, Tectonostratigraphic evolution of the Townsville Basin, Townsville Trough, offshore northeastern Australia: *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 44, no. 6, p. 799-817, doi:10.1080/08120099708728356.

Symonds, PA., Davies, P.J., Feary, D.A., and Pigram, C.J., 1988. Geology of the northeastern Australian margin basins. In Harrison, P.L. (Ed.), *Queensland 1988 Exploration and Development*. *Pet. Explor. Soc. Aust. Symp.*

Williams, H., P. Burgess, V. Wright, G. Della Porta, and D. Granjeon, 2010, Investigating Carbonate Platform Types: Multiple Controls and a Continuum of Geometries: *Journal of Sedimentary Research*, v. 81, no. 1, p. 18-37, doi:10.2110/jsr.2011.6.