

Figura 5.1. Depósitos fluviales en el tramo inferior de la Formación Aguardiente (pozo LY-1X). Los números en los círculos indican la posición del núcleo y el cuadro rojo corresponde a una sección ampliada del basamento y el tramo basal de Formación Aguardiente.

5.2.2. Rampa carbonática interna a media

Se disponen sobre un depósito *lag* transgresivo (**Facies 46**) y comprenden calizas lodosas de textura tipo *wackestone/packstone* masivos (**Facies 35**), formando sucesiones de hasta 34 pies de espesor, con abundantes bivalvos indeterminados y escaso contenido de equinodermos, ostreas, gasterópodos y serpúlidos. Los bioclastos se disponen sin orientación preferencial, generalmente flotando en la matriz micrítica, y se presentan comúnmente desarticulados y fragmentados, con tamaños mayores 2 a mm (Figura 5.2). La fracción clástica es moderada a abundante (**Facies 32**), así como el contenido de glauconita (granos). Se intercalan algunas capas de lutitas (**Facies 23**) de hasta 3 pulgadas de espesor. La bioturbación es escasa, localmente con trazas de *Thalassinoides*, *Palaeophycus* y *Planolites* (niveles lutíticos). Se observan estilolitas de baja amplitud, en ocasiones anastomosadas, dando un aspecto de fábrica nodular.

Interpretación: El dominio de calizas con abundante lodo calcáreo, sin estructuras sedimentarias tractivas, sugiere deposición en un ambiente de baja energía. La asociación de invertebrados bentónicos, compuesta mayoritariamente por organismos no dependientes de la luz, tales como moluscos (principalmente bivalvos) y equinodermos (organismos estenohalinos) indican un ambiente marino de salinidad normal (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003). El carácter desarticulado y fragmentado de los bioclastos, indica retrabajo y transporte por corrientes o eventos de tormentas. La abundancia local de glauconita, en algunos intervalos, sugieren bajas tasas de sedimentación y ambientes marinos someros (Flügel, 2004). La presencia de materiales clásticos en una matriz carbonática, sugieren un ambiente de deposición donde coexiste el desarrollo de una rampa carbonática interrumpida ocasionalmente por influjos clásticos proveniente de áreas emergidas.

En rampas carbonáticas, los depósitos como los aquí estudiados, se pueden generar en zonas de *lagoon* (rampa interna), así como en sectores más distales (rampa media) por debajo del nivel de olas normales. Las zonas de *lagoon* se caracterizan además,

por presentar abundantes peloides y oncoídes como componentes no esqueletales (Tucker *et al.*, 1993; Wright y Burchette, 1996; Christ *et al.*, 2012 todos citados en Schwarz *et al.*, 2013). Estos últimos componentes, están ausentes en las facies descritas para la Formación Aguardiente, por lo que estos intervalos carbonáticos se acumularon dominanteamente en ambientes de rampa media.

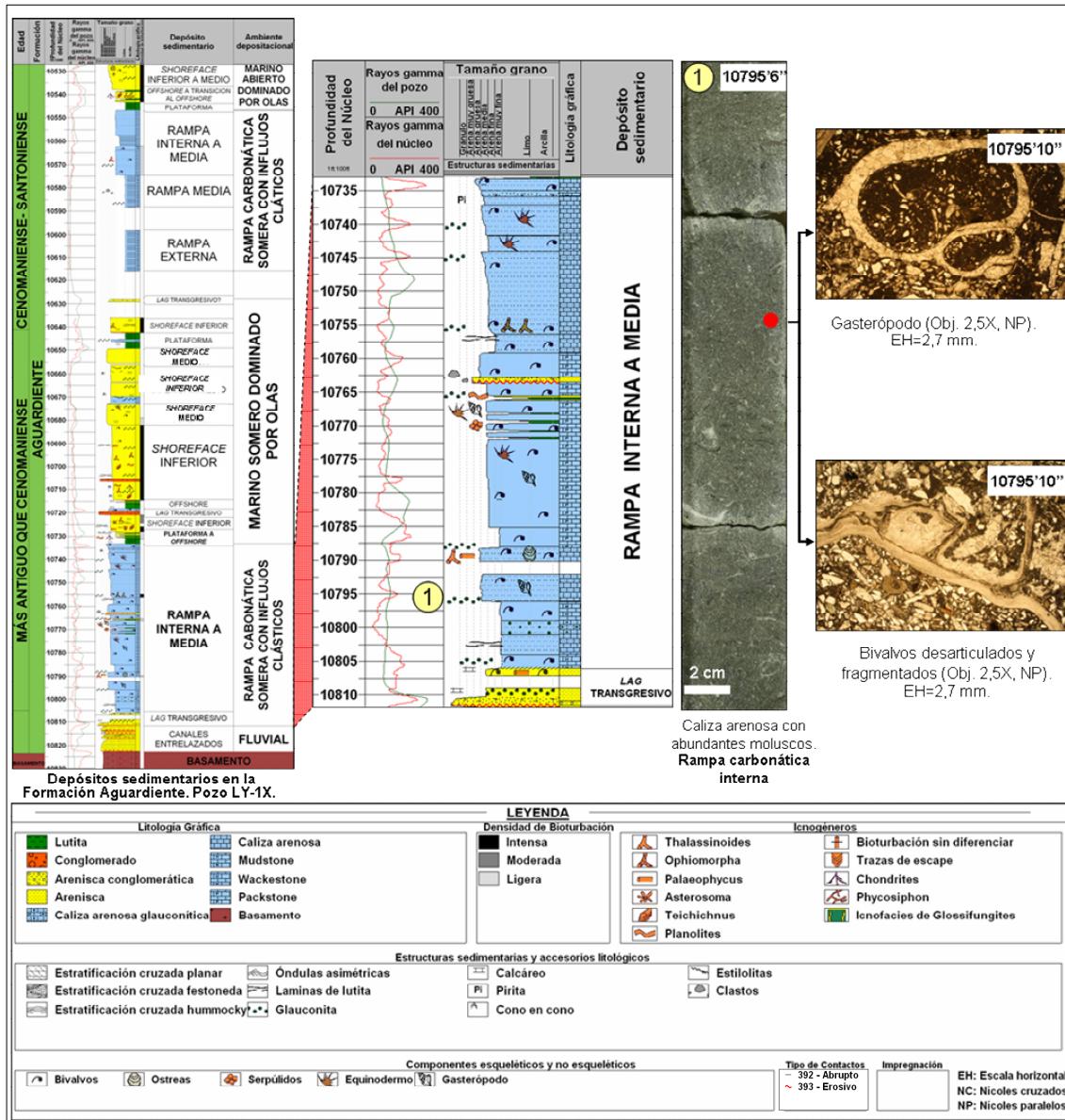


Figura 5.2. Depósitos de rampa interna a media y cara de playa inferior (*shoreface inferior*) en la sección basal y media de la Formación Aguardiente (pozo LY-1X). El número en el círculo indica la posición del núcleo.

5.2.3. Marino abierto dominado por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas

Dentro de los depósitos marinos abiertos se interpretaron ambientes de plataforma, *offshore* (costa afuera), transición al *offshore* (costa afuera) y *shoreface* (anteplaya) inferior a medio. Estos depósitos (principalmente *shoreface* inferior), se intercalan con depósitos de rampa carbonática, y se acumularon formando parasecuenias grano y estratocrecientes de 13 a 69 pies de espesor, reflejando eventos de regresión normal a menor escala.

Los depósitos de plataforma de 3 a 7 pies de espesor, consisten de lutitas con laminación paralela (**Facies 23**), fractura astilosa y ligeramente calcáreas. Los depósitos de *offshore* a transición al *offshore*, forman sucesiones granocrecientes de 2 pies de espesor y consisten principalmente de areniscas de grano muy fino, ocasionalmente con laminación paralela y óndulas de flujos combinados, intercaladas con lutitas laminadas (**Facies F19, F20 y F21**). La bioturbación es intensa, con dominio de *Planolites* y *Chondrites*.

Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) inferior (Figura 5.3) presentan arenisca de grano muy fino a fino, intensamente bioturbadas (**Facies F18**), con muy escasa preservación de estratificación cruzada *hummocky*. Los icnogéneros dominantes son *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Teichichnus*, *Asterosoma*, *Chondrites* y *Ophiomorpha*. Los depósitos de *shoreface* medio a superior consisten de areniscas de grano medio a grueso (**Facies F17**), con ligera tendencia granocreciente, aspecto masivo, con escaso a moderado grado de bioturbación. Se observan escasos restos de bivalvos y equinodermos. Los depósitos de *shoreface* presentan de 3 a 23 pies de espesor.

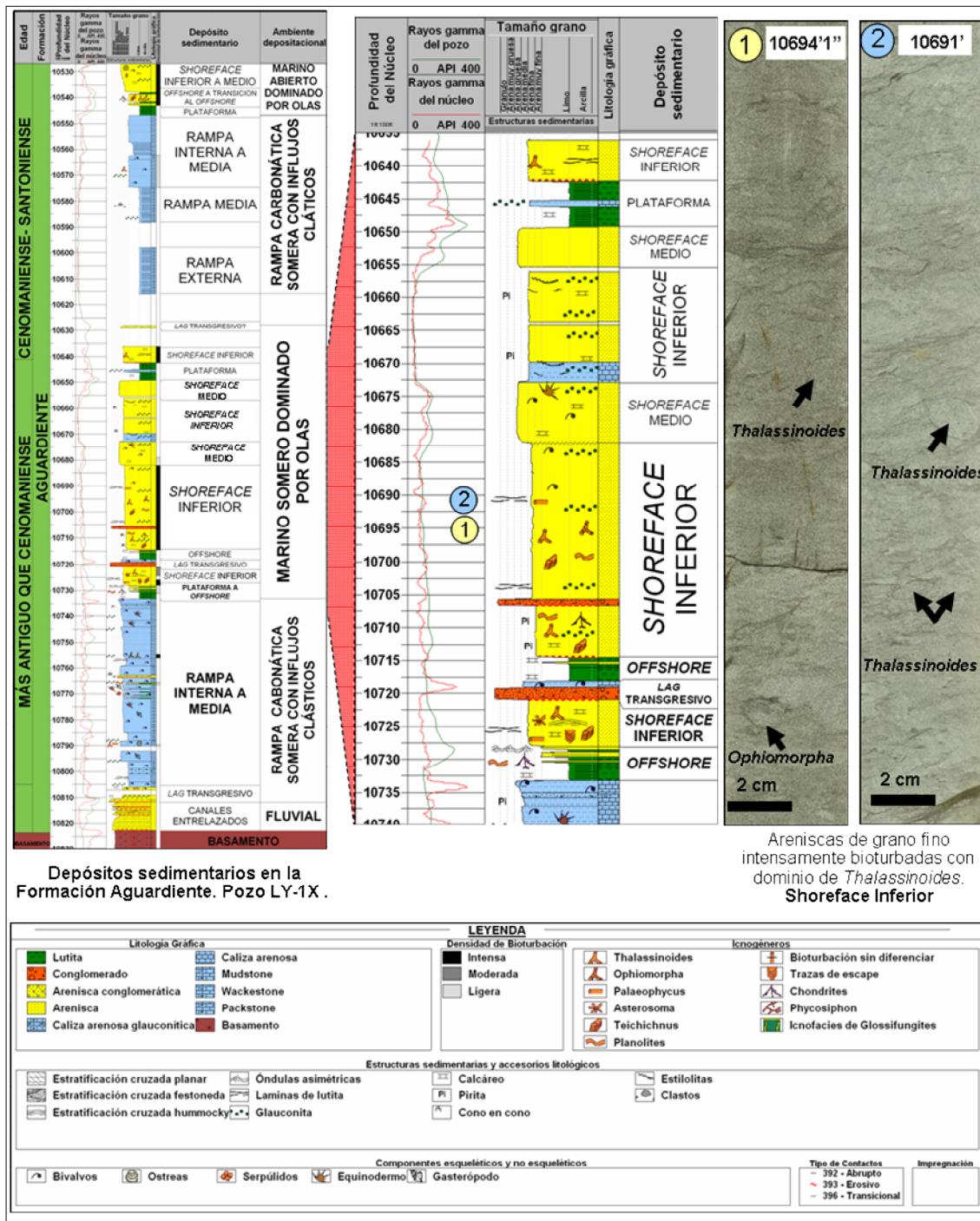


Figura 5.3. Depósitos de *shoreface* (anteplaya) inferior en la sección media de la Formación Aguardiente (pozo LY-1X). Los números en los círculos indican la posición de los nucleos.

Interpretación: Las capas de lutitas (plataforma), son interpretadas como producto de la decantación en sectores de baja energía, por debajo del nivel base de olas de tormentas. La intercalación de lutitas y areniscas corresponde al *offshore* (costa afuera) a transición al *offshore?*, indican alternancia de decantación a partir de aguas calmas (buen tiempo) y flujos oscilatorios y/o combinados asociados a eventos de tormentas, en sectores por debajo del nivel base de olas normales y por encima del nivel base de olas de tormenta. Las capas de areniscas intensamente bioturbadas, reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2012), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. La relativamente moderada diversidad y alta intensidad de trazas fósiles, sugieren ambiente de salinidad normal. Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) se consideran producto de la sedimentación en costas con baja intensidad y frecuencia de tormentas.

5.2.4. Rampa carbonática externa

Estos depósitos comprenden calizas lodosas tipo *mudstone*, con aspecto masivo, de 68 pies de espesor y con escasos foraminíferos planctónicos (**Facies 36**). Se observan bivalvos hacia el tope, que se disponen sin orientación preferencial, flotando en la matriz y se presentan comúnmente desarticulados y fragmentados. La fracción siliciclástica es moderada hacia el tope del intervalo.

Interpretación: El dominio de calizas con abundante matriz micrítica (*mudstone*), indica sedimentación por decantación en ambientes de baja energía. La ocurrencia de foraminíferos planctónicos, escasos organismos infaunales y ausencia de bioturbación, sugieren condiciones de poca oxigenación, muy probablemente por debajo del nivel base de olas de tormenta (rampa externa). El contenido clástico se asocia posiblemente a sedimentación durante eventos de tormentas desde zonas emergidas.

5.3. Modelo depositacional de la Formación Aguardiente.

El intervalo inferior de la Formación Aguardiente (Albiense Tardío-Cenomaniano Temprano) en el pozo LY-1X (Campo La Yuca), se acumuló en un sistema fluvial de baja sinuosidad, con desarrollo de canales fluviales entrelazados de espesor limitado que se disponen por encima de un basamento de origen ígneo (granito) del Paleozoico (Santiago *et al.*, 2014), generados muy probablemente durante la etapa tardía del sistema de nivel del mar bajo. Por encima de los canales fluviales, se depositó un sistema de rampa carbonática somera durante un evento transgresivo (Figura 5.4), con generación de depósitos con dominio de moluscos (rampa interna? a media) y de forma subordinada con foraminíferos planctónicos y alta abundancia de lodo micrítico (rampa externa). Los cambios verticales graduales de las facies carbonáticas y la ausencia de depósitos asociados a flujos gravitativos de sedimentos, sugiere deposición en ambientes carbonáticos de baja pendiente, típicamente de rampa homoclinal (Red, 1982).

Los depósitos de rampa carbonática, se alternan localmente con depósitos clásticos marinos abiertos someros (mayormente depósitos de *shoreface*), generando una sedimentación de tipo mixta clástica-carbonática. Esta alternancia sugiere una reducción considerable del aporte clástico durante la sedimentación de los intervalos carbonáticos, asociada a un aumento relativo del nivel del mar.

Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) de carácter regresivo, están caracterizados por areniscas intensamente bioturbadas, desarrollados en costas débilmente afectadas por tormentas, con rara preservación de capas de tempestitas. La relativamente moderada diversidad (*Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Teichicnhus*, *Asterosoma*, *Chondrites* y *Ophiomorpha*) y alta densidad de trazas fósiles sugieren ambientes de salinidad normal y baja energía, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2012). Localmente se intercalan depósitos acumulados en ambientes más profundos

de plataforma a transición al *offshore* (costa afuera). No se dispone de otros núcleos que permitan establecer la orientación de los cuerpos arenosos y carbonáticos.

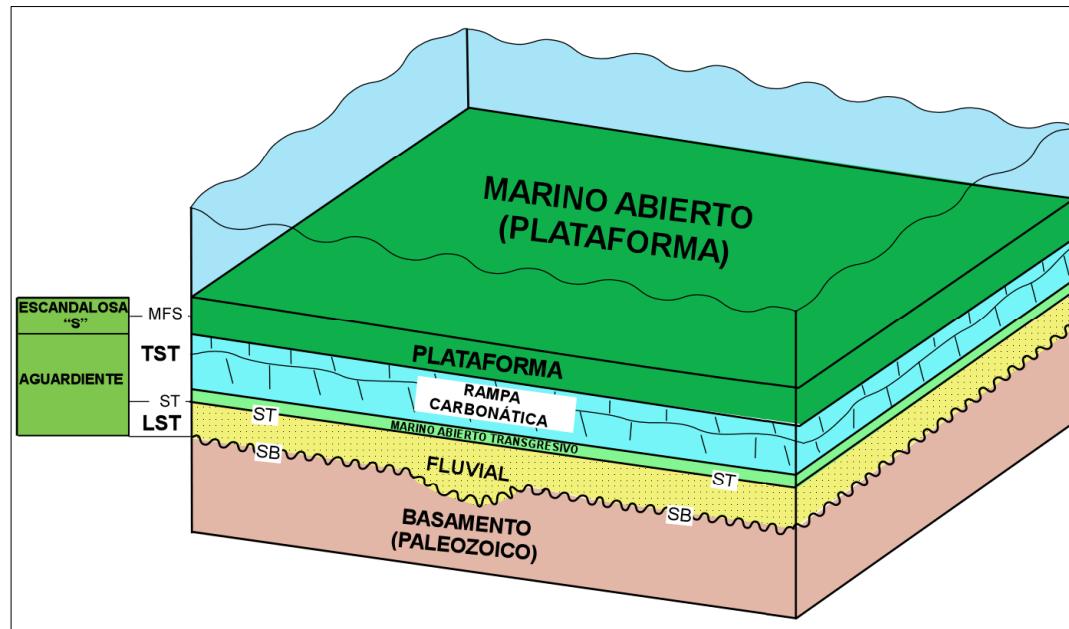


Figura 5.4. Modelo depositacional esquemático conceptual (sin escala) propuesto para la Formación Aguardiente. Los depósitos fluviales se acumularon posiblemente durante la etapa tardía del cortejo depositacional de nivel del mar bajo o el comienzo de un cortejo transgresivo. Referencias: discordancia subaérea (SB), superficie transgresiva (ST), superficie de máxima inundación (MFS), cortejo depositacional de nivel del mar bajo (LST), cortejo depositacional transgresivo (TST). Basado en Catuneanu *et al.* (2011).

La máxima profundización de la cuenca se alcanza con la depositación de lutitas de plataforma correspondiente al Miembro “S” de la Formación Escandalosa, representando esta unidad una superficie de máxima inundación (MFS). El tramo superior de la sección se someriza con el avance de un sistema de *shoreface* (anteplaya), correspondiente al Miembro “R” de la Formación Escandalosa, cuyo espesor cortado por el núcleo es de apenas 3 pies.

Es importante destacar que en el pozo LY-1X, Goncalves *et al.* (1998), interpretaron que la sección sedimentaria de los núcleos del intervalo 11822-10470 pies, corresponden a la Formación Escandalosa (miembros “P” y “O”), que se disponen

sobre el basamento (intervalo 10822-10856 pies). En el presente estudio se considera, con base a las descripciones sedimentológicas, registros de pozos, posición estratigráfica y la interpretación sísmica, que esta sección corresponde a la Formación Aguardiente y base de La Formación Escandalosa. Los miembros “P” y “O” se encuentran omitidos debido la presencia de una falla normal a la profundidad de 10411 pies (Espin *et al.*, 2017).

5.4. Caracterización petrográfica de la Formación Aguardiente

Para esta unidad se realizó el análisis petrográfico de 25 muestras de núcleos correspondiente al pozo LY-1X (Apéndice 1). Se identificaron cuatro (4) microfacies de carbonatos de mezcla: arenisca micrítica, micrita arenosa, micrita lodoso, caliza de aloquímicos lodoso y caliza de aloquímicos arenosa, según la clasificación de Mount (1985); dos (2) microfacies de carbonatos puros: *wackestone/packstone* de moluscos y *mudstone/wackestone* de foraminíferos planctónicos, según Dunham (1962); y dos (02) microfacies clástica: waca cuarzosa y subarcosa de acuerdo a la clasificación de Pettijhon, Potter y Siever (1972).

En las microfacies de carbonatos de mezcla el principal ortoquímico es la micrita, entre 20 y 78%. Los aloquímicos están representados por pelecípodos, gasterópodos y equinodermos en mayor proporción, y foraminíferos bentónicos, briozoarios, algas calcáreas, ostrácodo e intraclastos, en menor proporción.

La fracción siliciclástica está compuesta por cuarzo monocristalino entre 15 y 58%, y tamaño de grano entre arena fina a media. Otros componentes minoritarios son pirita y glauconita. La porosidad es baja y oscila entre 1 a 3% (Figura 5.5).

En las microfacies carbonáticas, los aloquímicos (11-50%) más abundantes corresponden a moluscos, equinodermos y foraminíferos planctónicos y de forma subordinada, briozoarios e intraclastos. El principal ortoquímico es la micrita de 30-

80%. Presenta cuarzo de grano fino, glauconita, fosfato y pirita como componentes no carbonáticos en porcentajes que no superan el 10%. La porosidad es baja y oscila entre 1 a 2%.

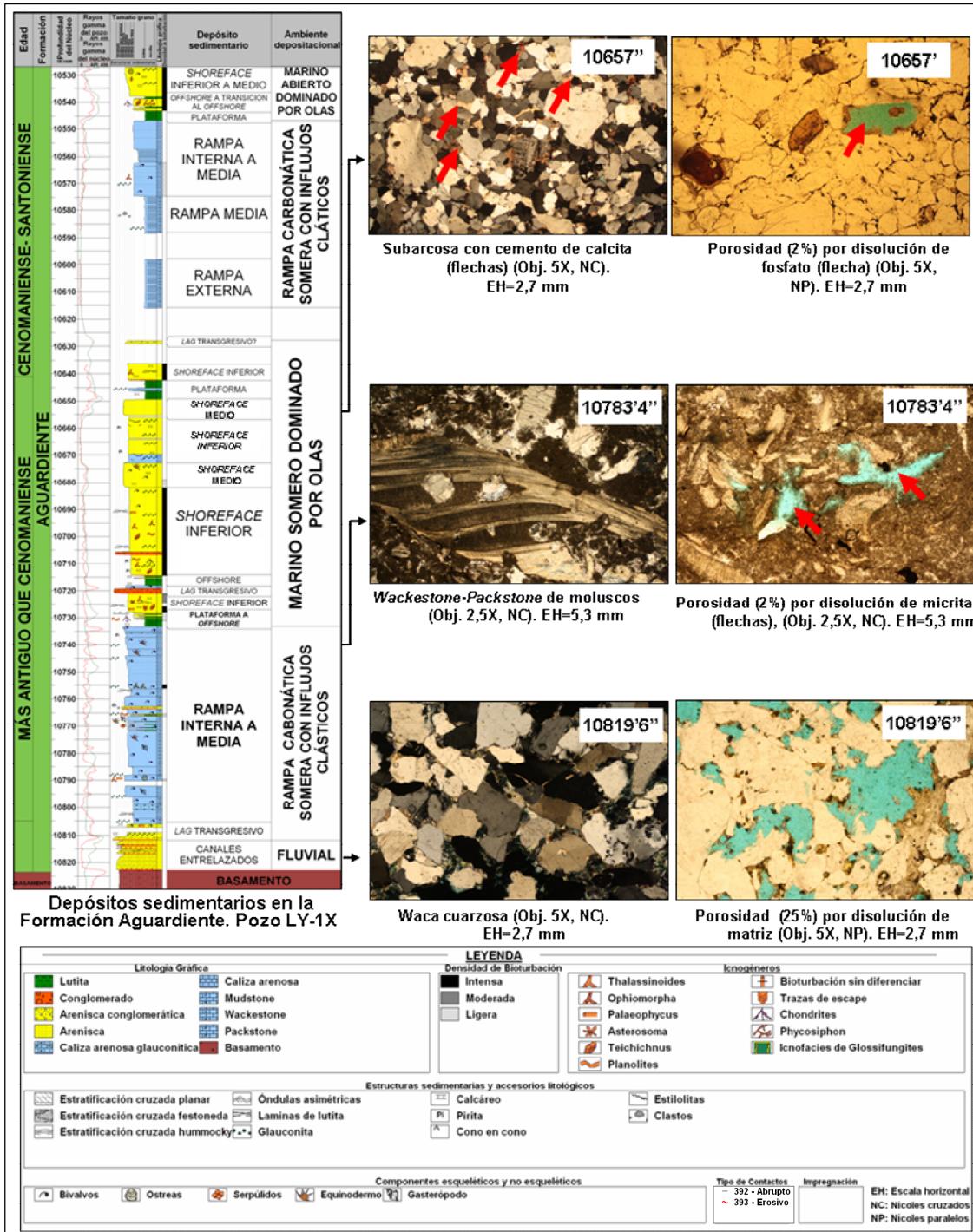


Figura 5.5. Aspectos texturales y composicionales de la Formación Aguardiente (pozo LY-1X).

Los efectos diagenéticos identificados en las facies de carbonatos puros y de carbonatos de mezcla, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta el tardío. Los principales procesos diagenéticos tempranos son: a) micritización en dominio freático marino (Logman, 1980); b) *boring* (horadación) en dominio freático marino (Logman, 1980); c) disolución y cementación en dominio freático meteórico (Logman, 1980); d) cementación sintaxial en dominio freático meteórico (Logman, 1980); e) recristalización de la matriz micrítica; f) inversión homoaxial, g) glauconitzación; h) piritización; i) silicificación de moluscos. Los efectos más importantes de la diagénesis tardía corresponden a procesos de presión-solución, representados por el desarrollo de contactos microestilolíticos y fracturas.

Las microfacies clásticas están constituidas principalmente de cuarzo monocristalino en porcentaje de 46 a 61%, fragmentos de rocas sedimentarias (1-3%), feldespatos (albita y microclino) con porcentajes que no superan el 3%. La matriz es arcillosa entre 3 y 10%. El cemento es principalmente de calcita (10-40%) y silíceo (5-10%). Texturalmente son areniscas de grano muy fino a medio, subangular a subredondeados y bien escogidos. Los contactos entre granos son principalmente grano-cemento y cóncavo-convexo. La porosidad observada, principalmente por disolución de matriz y cemento clacáreo es baja (1-2%), aunque en las facies de canales fluviales (base de la Formación Aguardiente) puede alcanzar hasta 30%.

Los efectos diagenéticos identificados en las microfacies clásticas, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta el tardío. El principal proceso diagenético temprano corresponde a la cementación de calcita y sílice. Con respecto a los procesos tardíos son principalmente de disolución, tanto de la matriz arcillosa (Figura 5.5) como de granos de feldespatos. Adicionalmente, se observa alteración de feldespatos a minerales de arcilla y compactación de granos dúctiles (micas). Según Surdam *et al.* (1989) la disolución de feldespatos se produce en zonas de intensa diagénesis (80-120°C).

En cuanto al potencial como rocas reservorio, los cuerpos arenosos de los canales fluviales a la base de la Formación Aguardiente representan las facies de mayor calidad, con porosidades de origen secundario (disolución de matriz arcillosa) que alcanzan hasta un 30%. Sin embargo, estos depósitos presentan espesores limitados (9 pies) por posibles condiciones de *bypass* (transporte y no depositación) de sedimentos durante la etapa del nivel del mar bajo. No se dispone de otros núcleos que permitan establecer la orientación de estos cuerpos arenosos.

Los depósitos de mayor espesor, acumulados en ambientes de rampa carbonática (media y externa) y marino abierto de *shoreface* (anteplaya), representan rocas de baja calidad como rocas reservorio, con porosidades que varían entre 1 y 3%. La abundante matriz micrítica en las facies carbonáticas y en los carbonatos de mezcla, así como la intensa actividad de organismos infaunales, con destrucción de la fábrica primaria y la cementación de calcita, son factores que disminuyeron considerablemente la calidad como rocas reservorio de estos depósitos. Por otro lado, los intervalos lutíticos correspondientes al Miembro “S” de la Formación Escandalosa, constituyen la principal roca sello de los reservorios inferiores.

5.5. Asociaciones de facies del Miembro “R” de la Formación Escandalosa

El Miembro “R” de la Formación Escandalosa se encuentra pobemente representado en los núcleos de los pozos BEJ-1X (18 pies), GSM-1X (31 pies), GU-507 (31 pies), TOR-1X (6 pies) y LY-1X (3 pies), siendo caracterizados de forma general desde el punto de vista paleoambiental (Anexos 1 al 5).

Esta unidad consiste dominanteamente de lutitas laminadas a masivas, intercaladas con capas delgadas de areniscas de grano fino a muy fino, forman intervalos granocrecientes, y escasas calizas arenosas con moluscos. Presenta un espesor de 41 a 146 pies. A continuación se describen los depósitos sedimentarios interpretados de base a tope para el Miembro “R” de la Formación Escandalosa:

5.5.1. Depósitos marinos abiertos dominados por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas

Dentro de los depósitos marinos abiertos se interpretaron ambientes de plataforma a *offshore* (costa afuera), transición al *offshore* (transición a costa afuera) y *shoreface* inferior (anteplaya) en los pozos GSM-1X, GU-507 y LY-1X.

Los depósitos de plataforma a *offshore* están constituidos principalmente de lutitas con laminación paralela (**Facies F23**), fractura astillosa y con escasas intercalaciones de areniscas de grano muy fino a fino (**Facies F22**), intensamente bioturbadas con dominio de *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Planolites* y *Teichicnhus*. Localmente se intercalan delgados niveles de calizas arenosas con escasos a moderados moluscos (bivalvos y gasterópodos) y restos esqueletales fosfatizados. Estos depósitos presentan de 6 a 20 pies de espesor.

Los depósitos de transición al *offshore* de 4 a 5 pies de espesor, consisten de areniscas de grano fino a muy fino y delgadas intercalaciones de lutitas (**Facies F29**), escasamente galuconíticas e intensamente biotubadas, con dominio de icnogéneros de *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Ophiomorpha*, *Chondrites*, *Planolites* y *Teichicnhus*. Los depósitos de *shoreface* inferior (3 pie de espesor) consisten de areniscas de grano fino a muy fino (**Facies F18**), intensamente bioturbadas con un moteado indistinto (Figura 5.6).

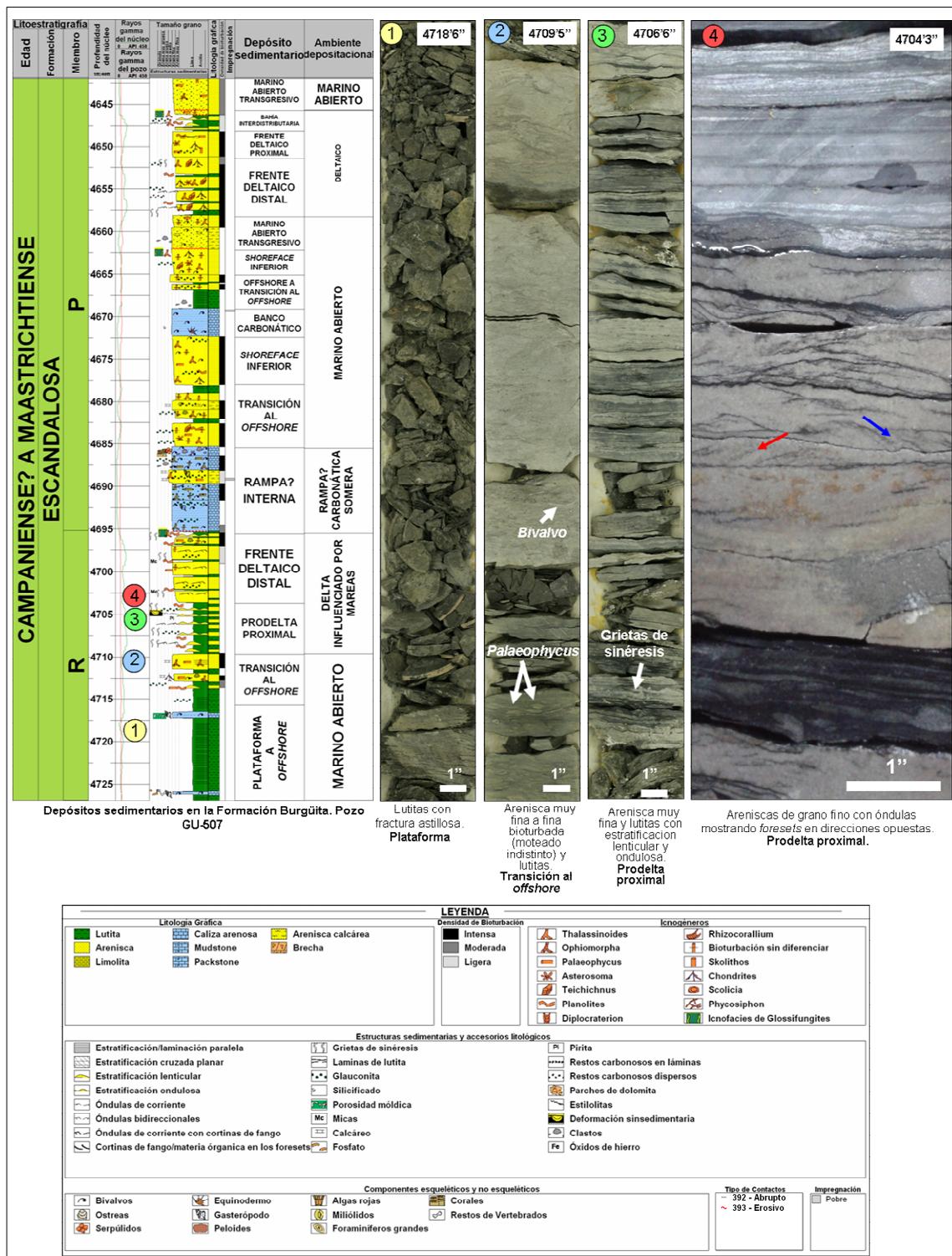


Figura 5.6. Depósitos marinos abiertos y deltaicos del Miembro “R” de la Formación Escandalosa (pozo GU-507). Los números en los círculos indican la posición del núcleo.

Interpretación: Las capas de lutitas (plataforma), son interpretadas producto de la decantación en sectores de baja energía por debajo del nivel base de olas de tormentas. La intercalación de lutitas y areniscas (*offshore* a transición al *offshore*), indican alternancia de decantación a partir de aguas calmas (buen tiempo) y sedimentación a partir de eventos de tormentas, en sectores por debajo del nivel base de olas normales y por encima del nivel base de olas de tormenta. Las capas de areniscas intensamente bioturbadas (*shoreface* inferior), reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois et al., 2012), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. La relativamente moderada diversidad y alta intensidad de trazas fósiles sugieren ambiente de salinidad normal. Los *shoreface* se consideran producto de la sedimentación en costas con baja intensidad y frecuencia de tormentas.

5.5.2. Deltas inflenciados por mareas

Hacia el suroeste del área, en el pozo GU-507, se identificaron sistemas deltaicos con influencia de mareas, principalmente con depósitos de prodelta y frente deltaico. Los depósitos muestran arreglos granoestratocreciente integrados por una intercalación dominante de areniscas de grano muy fino a fino y lutitas laminadas a masivas, con escasa glauconita.

- **Prodelta proximal**

Estos depósitos consisten de una alternancia rítmica y centimétrica de lutitas laminadas a masivas y areniscas de grano muy fino limosa, definiendo estratificación ondulosa y lenticular (**Facies F15**). Las areniscas presentan laminación ondulítica de corriente, con láminas de lodo (*mud drapes*) en los *foreset*s. En ocasiones se observa óndulas mostrando *foreset*s en direcciones opuestas (Figura 5.6). Las grietas de sinéresis y las estructuras de deformación sinsedimentarias son comunes. La bioturbación es escasa a dominio *Planolites*. Estos depósitos de 6 pies de espesor presentan base gradacional y tendencia grano-estratocreciente

Interpretación: El predominio de lutitas sobre las areniscas de grano muy fino, con estratificación lenticular y ondulosa indican una alternancia de sedimentación por decantación y tracción en un ambiente de baja energía (dominado por procesos de decantación). La presencia de grietas de sinéresis, el bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012). La existencia de *sets* de ondulas adyacentes mostrando *foreset*s en direcciones opuestas (bidireccionalidad), así como láminas de lodo (*mud drapes*), sugieren acción de mareas (Walker, 2006).

- **Frente deltaico distal**

Conformados por areniscas de grano muy fino a fino, que intercalan con delgados niveles de lutitas de color gris oscuro, formando un intervalo grano y estratocreciente (**Facies F14**). Las capas de arenisca presentan laminación ondulítica de corriente con láminas de lodo (*mud drapes*) en los *foreset*s. Presentan grietas de sinéresis y bandas de siderita. La bioturbación es escasa a localmente intensa con ejemplares de *Thalassinoides*, *Paleoaphycus* y *Planolites*. El espesor de estos depósitos es de 8 pies.

Interpretación: El predominio de areniscas de grano fino, con laminación ondulítica de corriente y la escasa presencia de lutitas indica procesos tractivos dominantes asociados a flujos de baja energía sobre los procesos de decantación. La presencia de láminas de lodo en las caras frontales de las ondulitas indican la acción de mareas (Walker, 2006). Al igual que en los depósitos de prodelta distal, la presencia de grietas de sinéresis, el bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012).

- **Canales distributarios?/ canal de mareas**

Estos depósitos consisten de areniscas de grano grueso a fino (**Facies F9 y F10**), con base erosiva y tendencia granodecreciente, formando sucesiones de 11 pies de espesor, localmente con estratificación cruzada, láminas de lodo (*mud drapes*) y/o materia orgánica particulada en los *foreset*s (capas frontales), que se hacen más abundantes hacia el tope de los canales. Presenta escasas grietas de sinéresis y abundantes clastos de arcillas dispersos. El grado de bioturbación es bajo, observándose ejemplares de *Ophiomorpha*, *Palaeophycus* y *Planolites*.

Interpretación: La depositación en canales se evidencia por la base erosiva, la estratificación cruzada y tendencia granodecreciente (Bhattacharya y Walker 1992). La acción de mareas es reflejada por la presencia de *mud drapes* en las capas frontales de la estratificación cruzada (Walker, 2006). El bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad y alta energía.

5.6. Modelo depositacional del Miembro “R” de la Formación Escandalosa

La sedimentación de la sección superior del Miembro “R” (Cenomaniense) de la Formación Escandalosa corresponde principalmente a ambientes marinos abiertos de baja intensidad y frecuencia de tormentas (pozos TOR-1X, GSM-1X y GU-507). Los depósitos de plataforma a transición al *offshore* son los dominantes, formando sucesiones grano-estratocrecientes integrados de lutitas y areniscas intensamente bioturbadas. La relativamente moderada diversidad y alta densidad de trazas fósiles, con formas estenohalinas como *Chondrites* y *Phycosiphon*, sugieren ambientes de salinidad normal (Buatois *et al.*, 2012).

Hacia el tope de la unidad se reconocieron depósitos de deltas con fuerte participación de mareas, con un predominio de depósitos de prodelta y frente deltaico

(pozo GU-507) y canales distributarios? (pozo BEJ-1X). En general, los depósitos muestran arreglos granoestratocreciente integrados por una intercalación de carácter rítmico de lutitas y areniscas de grano muy fino a medio sugiriendo una tendencia progradacional. Estos depósitos muestran una importante influencia de mareas, evidenciada por la presencia de estructuras bidireccionales (ondulas adyacentes con capas frontales en direcciones opuestas) y las láminas de lodo tapizando los *foreset*s (capas frontales) de la laminación ondulítica (Walker, 2006). La icnofauna empobrecida y las grietas de sinéresis sugieren fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012; Bhattacharya, 2006), producto de la descarga de agua dulce, lo cual, es consistente con la interpretación deltaica propuesta.

5.7. Asociaciones de facies del Miembro “P” de la Formación Escandalosa

El Miembro P de la Formación Escandalosa de edad Cenomanense conforma una sucesión grano-estratodecreciente, integrada por areniscas de grano grueso a fino y de manera subordinada, lutitas laminadas. Su espesor varía entre 63 y 198 pies. La agrupación vertical de las facies sedimentarias permitió definir cinco (5) asociaciones de facies en estos depósitos: 1) canales fluviales entrelazados; 2) canales estuarinos influenciados por mareas; 3) planicie de mareas?; 3) barras de mareas; 4) depósitos marinos abiertos transgresivos; 4) depósitos marinos abiertos dominado por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas; 5) barras carbonáticas (Anexos 2 al 11).

A continuación se describen de forma detallada los depósitos sedimentarios interpretados de base a tope para el Miembro “P” de la Formación Escadalosa:

5.7.1. Canales fluviales apilados

Estos depósitos presentan base erosiva, localmente delineadas por clastos conglomeráticos y consisten de areniscas de grano muy grueso a medio, tendencia granodecreciente con estratificación cruzada festoneada a planar (**Facies F2**),

comúnmente con restos carbonosos en láminas y/o dispersos. Se apilan formando sucesiones de 12 a 34 pies de espesor (Figuras 5.7 y 5.8). No se observa bioturbación. Localmente se intercalan capas de lutitas carbonosas (Facies F8), micáceas, de hasta 8 pulgadas de espesor y areniscas de grano muy fino definiendo estratificación lenticular (**Facies F6**). En los pozos BOR-31 y BEJ-1X, estos cuerpos arenosos están moderada a intensamente impregnados de hidrocarburos.

Los canales fluviales se disponen sobre depósitos marinos abiertos de transición al *offshore* (pozo TOR-1X) y deltaicos?/planicie de mareas (BEJ-1X), pobemente representados, correspondientes al Miembro R de la Formación Escandalosa.

Interpretación: La estratificación cruzada planar y festoneada indican migración de dunas de crestas rectas (2D) y sinuosas (3D), respectivamente (Nichols, 2009). La base erosiva y la tendencia granodecreciente reflejan una acumulación en sistemas de canales (Bhattacharya y Walker 1992). La presencia de superficies erosivas internas y unidades amalgamadas indica el desarrollo de canales apilados (Buatois *et al.*, 2012). La ausencia de evidencias marinas, especialmente de organismos típicamente marinos y estructuras sedimentarias que indiquen acción de mareas, permiten interpretar que estos depósitos se acumularon en ambientes de agua dulce. La intercalación de lutitas carbonosas hacia el tope de algunos canales fluviales, sugiere el abandono de los mismos y depositación en zonas de baja energía de la planicie de inundación. La disposición de los canales fluviales sobre depósitos marinos infrayacentes que no presentan una relación genética (salto brusco de facies), sugiere incisión de canales fluviales durante una caída del nivel del mar.

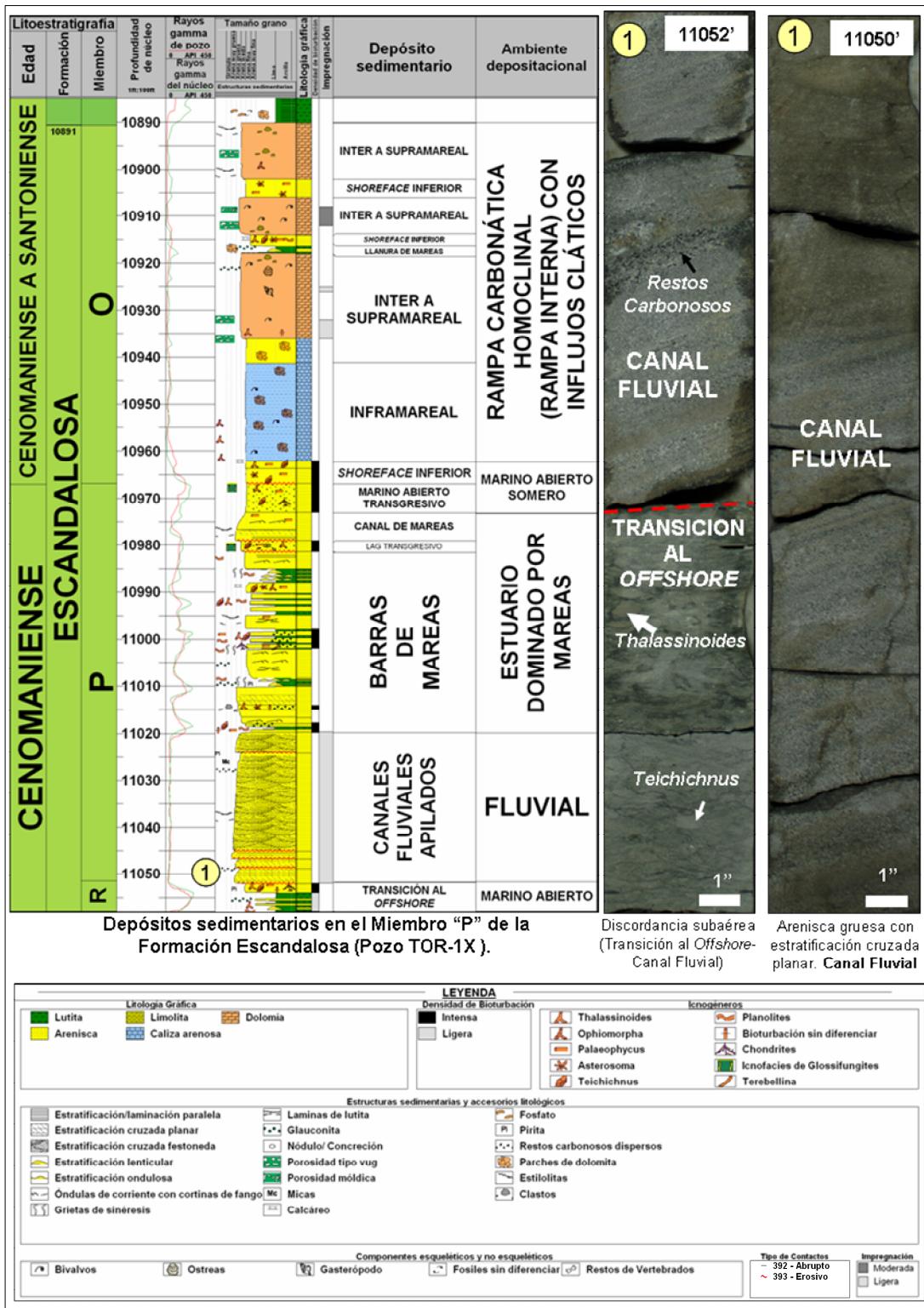


Figura 5.7. Depósitos fluviales del Miembro "P" de la Formación Escandalosa (pozo TOR-1X). Los números en los círculos indican la posición del núcleo.

5.7.1 Canales estuarinos influenciados por mareas

Estos depósitos comprenden areniscas predominantemente de grano grueso a fino (**Facies F9 y F10**), con base erosiva, tendencia granodecreciente, formando sucesiones de 14 a 35 pies de espesor, con estratificación cruzada festoneada a planar, frecuentes láminas de lodo (*mud drapes*) y/o materia orgánica particulada en los *foreset*s (capas frontales) o dispersa, que se hacen más abundantes hacia el tope de los canales (Figuras 5.8 y 5.9). La base de los canales está localmente delineada por clastos tamaño muy grueso a conglomerático. Hacia el tope de la unidad se observa escasa glauconita. El grado de bioturbación es bajo, siendo *Ophiomorpha*, *Thalassinoides*, *Rhizocorallium*, *Palaeophycus* y *Planolites* los icnogéneros reconocidos.

Interpretación: La depositación en canales se evidencia por la base erosiva, la estratificación cruzada y tendencia granodecreciente (Bhattacharya y Walker 1992). La presencia de unidades amalgamadas definidas por superficies erosivas internas sugiere canales multiepisódicos. La acción de mareas es reflejada por la presencia de láminas de lodo (*mud drapes*) en las capas frontales de la estratificación cruzada (Walker, 2006). Los intervalos con materia orgánica particulada sugieren una conexión directa con el continente. El bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental, posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad y alta energía. La acción marina también queda evidenciada por la presencia de glauconita.

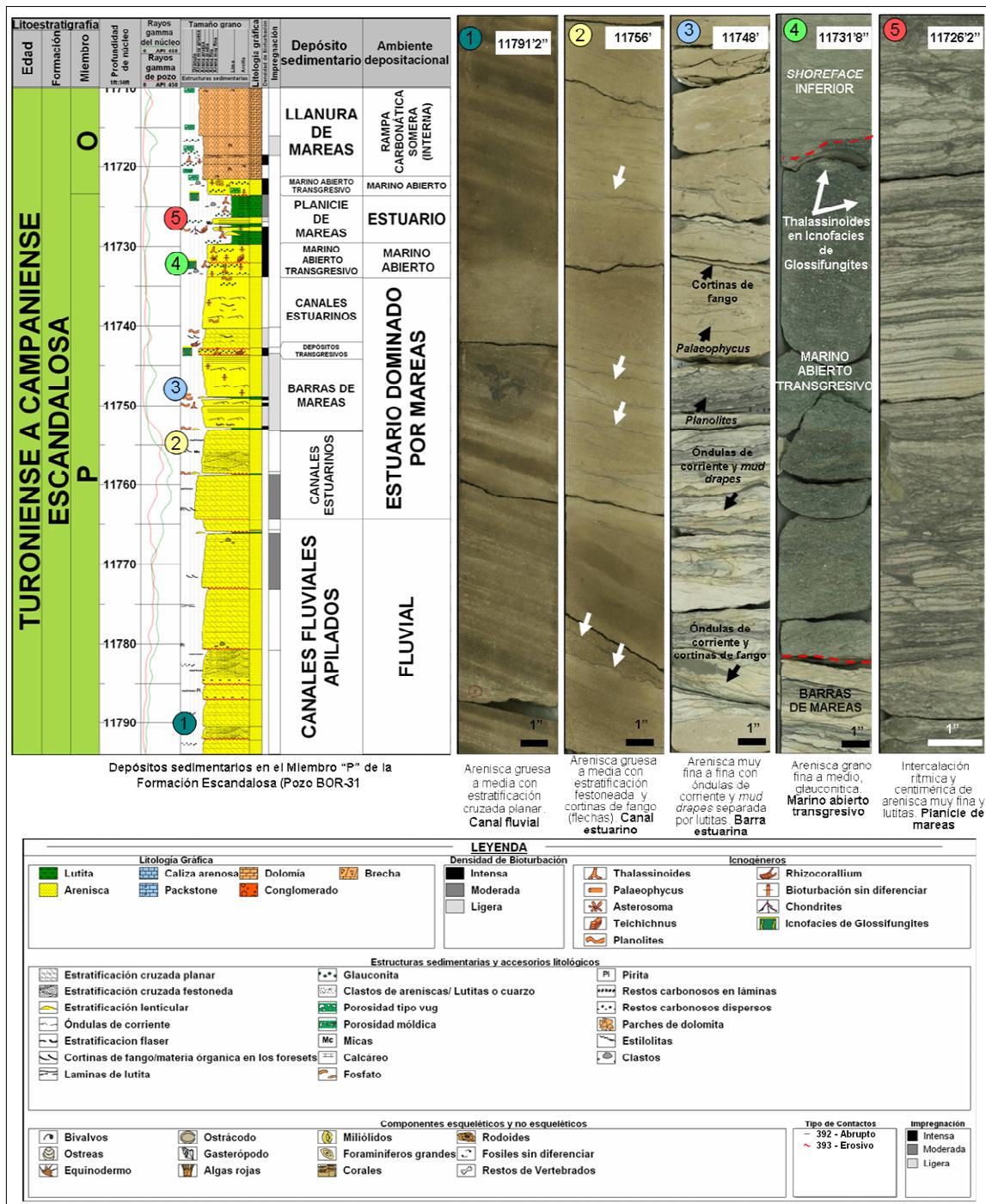


Figura 5.8. Depósitos fluviales-estuarinos del Miembro "P" de la Formación Escandalosa (pozo BOR-31). Los números en los círculos indican la posición del núcleo.

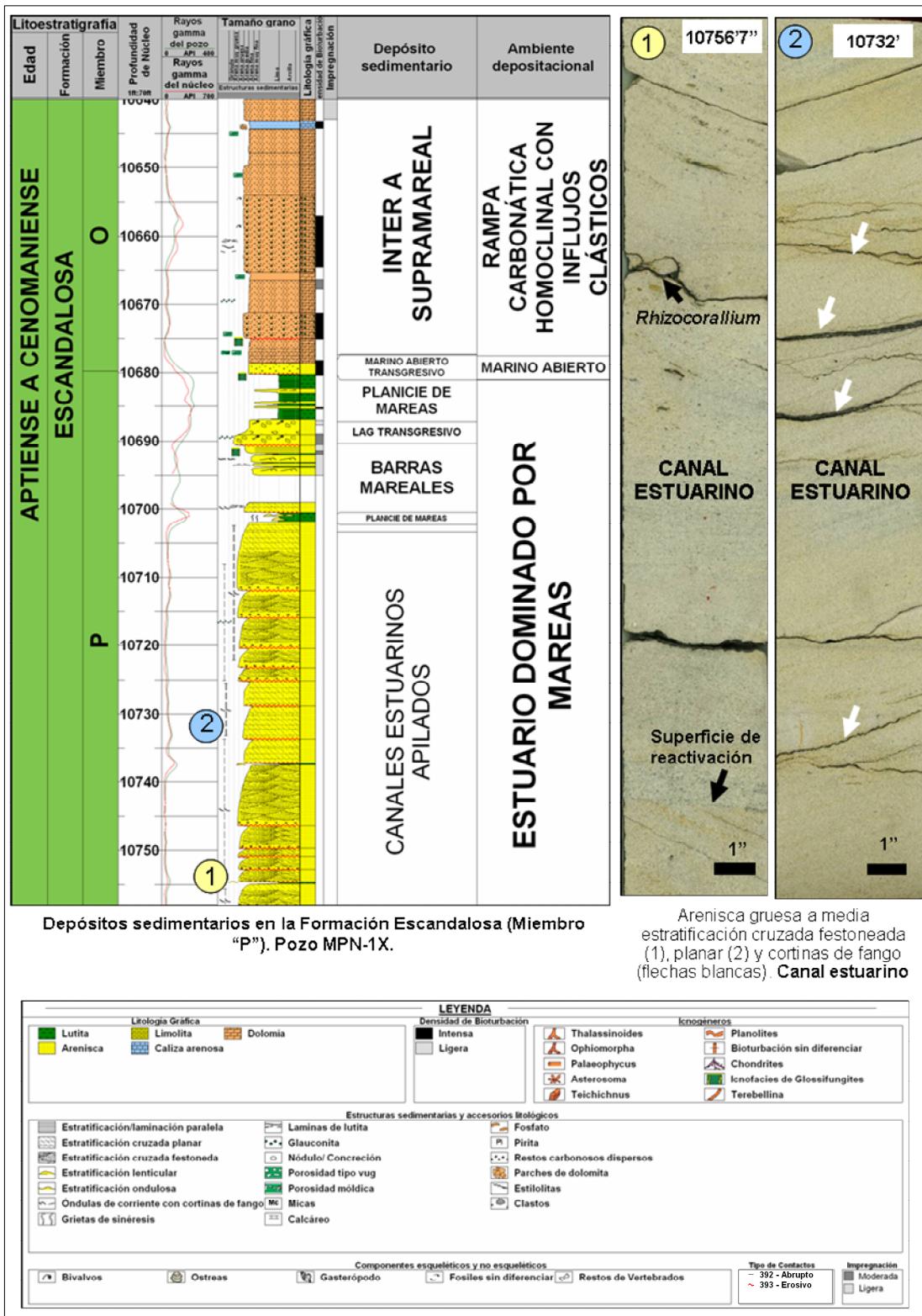


Figura 5.9. Depósitos estuarinos del Miembro “P” de la Formación Escandalosa (pozo MPN-1X). Los números en los círculos indican la posición del núcleo.

5.7.2 Planicie de mareas

Estos depósitos consisten de una alternancia rítmica y centimétrica de lutitas (dominante) masivas o laminadas y areniscas de grano muy fino, limosas, con laminación ondulítica de corriente comúnmente con láminas de lodo (*mud drapes*) en los *foreset*s (capas frontales) de las ondulitas y ocasionalmente laminación paralela (Figura 5.8). Dominan la estratificación ondulosa y lenticular (**Facies F14 y F15**). Localmente se observan óndulas mostrando *foreset*s en direcciones opuestas. Comúnmente presentan grietas de sinéresis y glauconita.

El grado de bioturbación es bajo a localmente intenso con dominio de los géneros: *Planolites*, *Thalassinoides* y de forma subordinada *Teichichnus*, *Asterosoma* y *Palaeophycus*. Los espesores de estos depósitos varían de 2 a 14 pies.

Interpretación: El predominio de lutitas sobre las areniscas de grano muy fino, con estratificación lenticular, ondulosa y laminación paralela, indican una alternancia de sedimentación por decantación y tracción en un ambiente de baja energía (dominado por procesos de decantación). La presencia de grietas de sinéresis, el bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de un ambiente estresado posiblemente asociado a fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012). Las láminas de lodo en los *foreset*s (capas frontales) de las ondulitas sugieren influencia de mareas (Walker, 2006). El contenido de glauconita, en algunos intervalos, sugieren bajas tasas de sedimentación (Flügel, 2004).

Estos depósitos heterolíticos, se ubican inmediatamente por encima de canales estuarinos, por lo que podrían corresponder a sectores de medio del estuario (cuenca estuarina), en el marco de estuarios dominados por oleaje. Sin embargo, para el Miembro “P” de la Formación Escandalosa en los pozos estudiados, la división tripartita arena-fango-arena, que caracteriza un estuario dominado por oleaje no es tan pronunciada (excepto en el pozo SAB-1X). En ese sentido, se considera que el

Miembro “P”, representa un relleno de un sistema fluvio-estuarino dominado por mareas (Dalrymple *et al.*, 1992)

5.7.3 Barras de mareas

Estos depósitos de base neta/transicional, se ubican por encima de planicies de mareas/canales estuarinos. Se inician con delgados niveles de facies heterolíticas de lutitas y areniscas muy finas definiendo estratificación ondulosa, lenticular y flaser (**Facies F14**). Seguidamente dominan areniscas de grano fino a medio, tendencia granocreciente (**Facies F13**), con laminación ondulítica de corriente (Figura 5.8), con láminas de lodo (*mud drapes*) en los *foreset*s (capas frontales) hacia la base y estratificación cruzada planar al tope.

Localmente se observa ondulas adyacentes mostrando *foreset*s en direcciones opuestas. Presentan escasas grietas de sinéresis y localmente moderado contenido de glauconita. El grado de bioturbación es bajo a localmente intenso con dominio, siendo *Planolites*, *Palaeophycus*, *Thalassinoides*, *Teichichnus*, y de forma subordinada *Asterosoma* los icnogéneros reconocidos. Los espesores varían de 5 a 32 pies.

Interpretación: el dominio de laminación ondulítica de corriente y estratificaron cruzada planar, reflejan sedimentación por tracción en un medio subáctico. Las láminas de lodo (*mud drapes*), ondulas adyacentes con *foreset*s (capas frontales) en direcciones opuestas y la laminación flaser indican la acción de mareas. La presencia de grietas de sinéresis, el bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican un ambiente estresado, debido posiblemente a fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012). La presencia de glauconita indica sedimentación con influencia marina. La tendencia granocreciente, y la asociación de estos depósitos en forma directa con las planicies de mareas/canales estuarinos, permiten interpretar a estas facies como un complejo de barras en la boca del estuario.

5.7.4 Depósitos marinos abiertos transgresivos

Estos depósitos se ubican por encima de las barras de boca de estuarios. Consisten predominantemente de areniscas glauconíticas (**Facies F24**), de grano fino a medio, ocasionalmente con escasos restos de bivalvos y equinodermos. La bioturbación es moderada a intensa con destrucción de la fábrica primaria (Figura 5.8). Se reconocen icnofósiles de los géneros: *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Teichichnus*, *Chondrites*, *Planolites* y *Asterosoma*. La base es erosiva y está delineada por *Thalassinoides* y *Rhizocorallium* en icnofacies de *Glossifungites*. Localmente se intercalan lutitas de color gris oscuro con laminación paralela. Estos depósitos presentan un desarrollo regional en el área. Los espesores varían de 2 a 6 pies.

Interpretación: La presencia de abundante glauconita y restos de organismos estenohalinos (equinodermos) indican un ambiente marino de salinidad normal (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003).

La moderada diversidad e intensa bioturbación, reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2012), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales (dominio de areniscas). La base erosiva, delineada por icnofacies de sustratos firmes, representa una superficie transgresiva de ravinamiento generada por erosión de oleaje durante la subida relativa del nivel del mar.

5.7.6. Marino abierto dominado por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas

Dentro de los depósitos marinos abiertos se interpretaron ambientes de plataforma, *offshore* (costa afuera), transición al *offshore* (transición a costa afuera) y *shoreface* (antepalaya) inferior a medio.

Los depósitos de plataforma de 2 a 18 pies de espesor, consisten de lutitas con laminación paralela (**Facies F23**) y fractura astillosa. Los depósitos de *offshore* a transición al *offshore* (**Facies F19, F20 y F21**), forman sucesiones granocrecientes de 4 a 8 pies de espesor y consisten principalmente de areniscas de grano muy fino, ocasionalmente con estratificación cruzada *microhummocky*, intercaladas con lutitas laminadas a masivas. La bioturbación es intensa, con dominio de los icnogéneros *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Teichicnhus*, *Asterosoma*, *Chondrites* y *Asterosma*.

Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) inferior presentan areniscas de grano muy fino a fino, intensamente bioturbadas (**Facies F18**). Los icnogéneros dominantes son *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Teichicnhus*, *Asterosoma*, *Chondrites* y *Ophiomorpha*. Se observan escasos restos de bivalvos. Los depósitos de *shoreface* presentan de 8 a 16 pies de espesor (Figura 5.10).

Interpretación: Los depósitos de lutitas (plataforma) son interpretados como producto de la decantación en sectores de baja energía, por debajo del nivel base de olas tormentas. La intercalación de lutitas y areniscas (*offshore* a transición al *offshore*) indican alternancia de decantación a partir de aguas calmas (buen tiempo) y flujos oscilatorios durante eventos de tormentas, en sectores ubicados por debajo del nivel base de olas normales y por encima del nivel base de olas de tormenta.

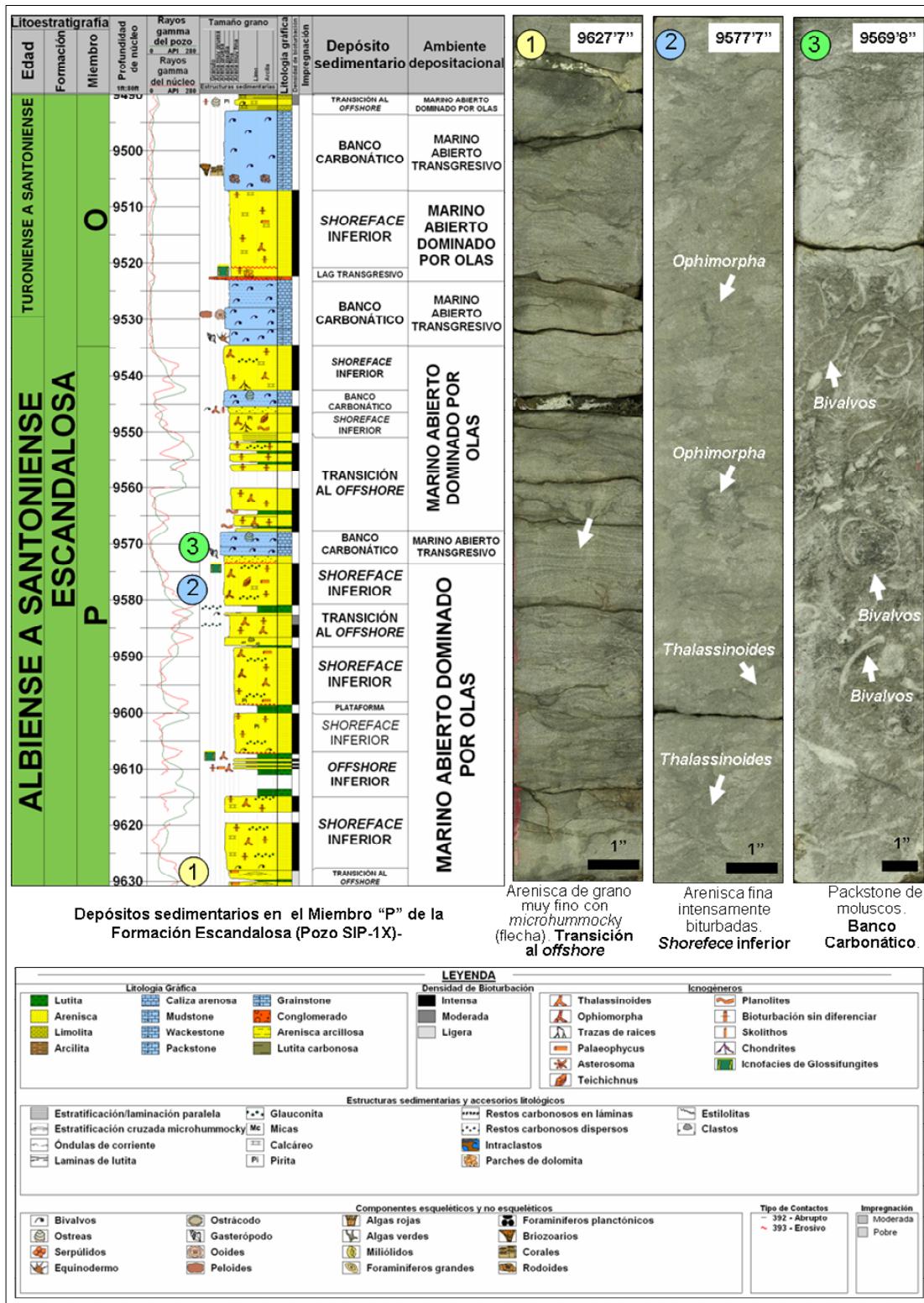


Figura 5.10. Depósitos marinos abiertos someros en el Miembro “P” de la Formación Escandalosa (pozo SIP-1X). Los números en los círculos indican la posición del núcleo.

Las capas de areniscas intensamente bioturbadas, reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2011), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. La relativamente moderada diversidad y alta intensidad de trazas fósiles, presencia de glauconita y restos de organismos estenohalinos (equinodermos) indican un ambiente marino de salinidad normal. Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) inferior se consideran producto de la sedimentación en costas con baja intensidad y frecuencia de tormentas.

5.7.7. Bancos carbonáticos (*shoals*)

Estos depósitos se reconocen localmente en el área de Sipororo (SIP-1X) y se presentan recurrentemente en el Campo Guanarito (GU-507). Se disponen sobre depósitos de ambientes de *shoreface* (anteplaya), generando una sedimentación de tipo mixta (clástica-carbonática). Comprenden calizas lodosas de textura tipo *wackestone/ packstone* masivos (**Facies 35**), formando sucesiones de 3 a 8 pies de espesor, con abundantes bivalvos indeterminados (Figura 5.10) y escaso contenido de gasterópodos, ostreas y equinodermos. Los bioclastos se disponen sin orientación preferencial, generalmente flotando en la matriz micrítica y se presentan comúnmente desarticulados y fragmentados. La fracción clástica es moderada a abundante (**Facies F32**), así como el contenido de glauconita (granos) e intraclastos. La bioturbación es escasa a localmente intensa con trazas de *Thalassinoides* y *Palaeophycus*. Se observan estilolitas de baja amplitud.

Interpretación: El dominio de calizas con abundante lodo calcáreo, sin estructuras sedimentarias tractivas, sugiere depositación en un ambiente de baja energía. La asociación de invertebrados bentónicos, compuesta mayoritariamente por organismos no dependientes de la luz, tales como moluscos (principalmente bivalvos) y equinodermos (organismos estenohalinos) indican un ambiente marino de salinidad

normal (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003). El carácter desarticulado y fragmentado de los bioclastos, indica retrabajo y transporte por corrientes o eventos de tormentas.

La abundancia local de glauconita, en algunos intervalos, sugieren bajas tasas de sedimentación y ambientes marinos someros (Flügel, 2004). La presencia de materiales clásticos en una matriz carbonática, sugieren un ambiente de depositación donde coexiste el desarrollo de una rampa carbonática interrumpida ocasionalmente por influjos clásticos proveniente de áreas emergidas. Estos depósitos se interpretan como barras carbonáticas (*shoals*), en un ambiente submareal, y se acumularon posiblemente por debajo del nivel base de olas normales.

5.8. Modelo depositacional del Miembro “P” de la Formación Escandalosa

El Miembro “P” de la Formación Escandalosa (Cenomaniense) presenta importantes variaciones laterales de facies. Hacia el sur y sureste, en los pozos BEJ-1X (Campo Bejucal), MPN-1X (Campo Maporal), BOR-31 (Campo Borburata), TOR-1X (Campo Torunos), OBI-3X (Campo Obispo) y SAB-1X (Campo Sabaneta) corresponde principalmente a depósitos de ambientes fluvio-estuarinos con fuerte participación de mareas. El tramo superior de la unidad se acumuló en ambientes marinos abiertos transgresivos. Hacia el noroeste y noreste, en los pozos LLM-2X (Campo Las Lomas), GSM-1X (Campo Guasimoto), SIP-1X (Campo Sipororo) y GU-507 (Campo Guanarito), pasa lateralmente a ambientes mas distales, mayormente depósitos marinos someros dominados por procesos de olas de buen tiempo, con desarrollo de importante cuerpos arenosos de *shoreface* (antepaya) inferior.

La tendencia grano-estratodecreciente, mostrando un pasaje de depósitos de agua dulce a depósitos de aguas salobres y, finalmente, de salinidad normal, reflejan un patrón retrogradacional consistente con un sistema fluvio-estuarino. Los canales fluviales apilados (areniscas de grano grueso a fino con estratificación cruzada), muy probablemente se acumularon durante un estadio del nivel del mar bajo, representando la base de una discordancia subaérea. Los depósitos fluviales se

observan solamente en los pozos BEJ-1X, TOR-1X y BOR-31, debido a que los núcleos representativos de estos depósitos no fueron cortados en el resto de los pozos o a la no depositación por condiciones de *bypass* (transporte y no depositación) en el área.

Durante una fase transgresiva subsecuente, se depositaron canales estuarinos de baja sinuosidad y complejo de boca de estuario (barras y planicie de mareas). En estos depósitos el bajo grado de bioturbación, la icnodiversidad empobrecida y las grietas de sinéresis, sugieren un ambiente estresado por fluctuaciones de salinidad. La influencia de mareas se evidencia por las comunes láminas de lodo (*mud drapes*) en las capas frontales de la estratificación cruzada de los depósitos canalizados y de barras, ocasionalmente formando parejas de arcillas y la presencia de facies heterolíticas acumuladas en las planicies de mareas, mostrando óndulas con bipolaridad. Además, en los pozos estudiados, a excepción del pozo SAB-1X, no se observa la división tripartita arena-lodo-arena tan pronunciada, que caracteriza un estuario dominado por oleaje (Darymple *et al.*, 1992). En ese sentido, se considera que el Miembro “P”, representa un relleno de un sistema fluvio-estuarino dominado por mareas (Figura 5.11).

Los depósitos marinos abiertos desarrollados en costas débilmente afectadas por tormentas, corresponden mayormente a ambientes de *shoreface* (anteplaya) inferior y transición al *offshore*, integrados por areniscas intensamente bioturbadas y escasos niveles de lutitas laminadas. La relativamente moderada diversidad y alta densidad de trazas fósiles, con formas estenohalinas como *Chondrites* y *Phycosiphon*, sugieren ambientes de salinidad normal. Se intercalan localmente bancos carbonáticos con abundantes moluscos, asociados a reducción considerable del aporte clástico generando una sedimentación de tipo mixta (clástica - carbonática).

Las relaciones de facies sugieren que hacia el sur los depósitos están afectados fuertemente por las mareas, debido a la ampliación del rago mareal en las zonas de canales y bahías costeras.

Con el avance de la transgresión se acumularon depósitos marino abierto de carácter transgresivo, por encima del nivel base de olas normales. En el pozo GU-507, se observan algunos intervalos con depósitos de prodelta y frente deltaico reflejando una progradación deltaica. Estos depósitos deltaicos hacia el norte del área, sugieren que el aporte de sedimentos no era constante a lo largo de la línea de costa, siendo la tasa de aportes de sedimentos (en cortos intervalos de tiempo) mayor a la tasa de aumento del espacio de acomodación hacia sectores cercanos al Arco de El Baúl.

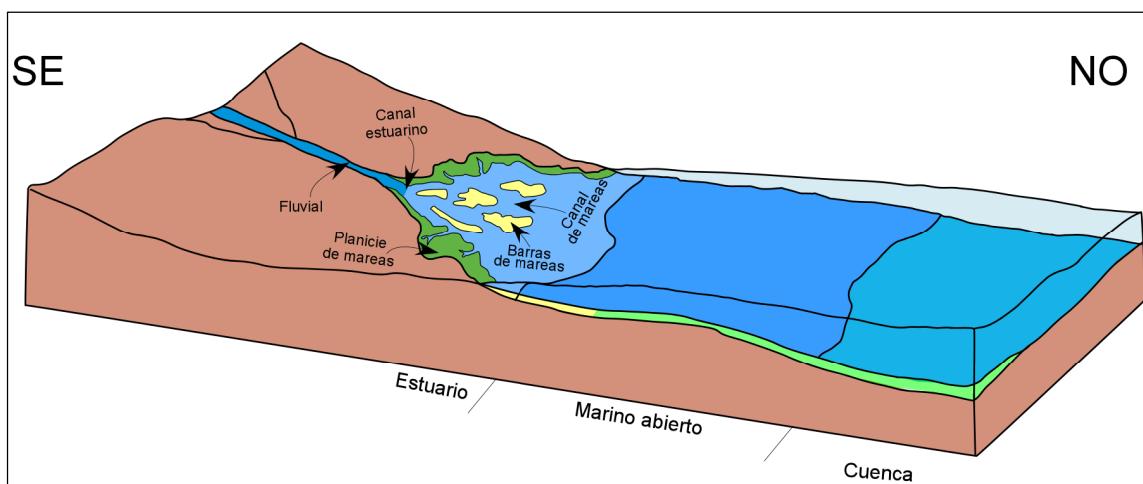


Figura 5.11. Modelo sedimentológico esquemático conceptual (sin escala) para el Miembro “P” de la Formación Escandalosa, representado por un sistema fluvio-estuarino dominado por mareas (suroeste y sureste) y ambientes marinos abiertos débilmente afectados por tormentas (noreste y noroeste).

Basado en Nichols (2009).

La Figura 5.12 muestra el mapa de distribución de facies sedimentarias al tope del Miembro “P” de la Formación Escandalosa, donde se observa una diferenciación en las facies en el área de estudio. Hacia el sur (pozo BEJ-1X) la sedimentación está representada por sistemas fluviales de baja sinuosidad. En los pozos MPN-1X (Campo Maporal), BOR-31 (Campo Borburata), TOR-1X (Campo Torunos) y SAB-

1X (Campo Sabaneta), corresponde mayormente a depósitos de canales estuarinos con dominio de mareas. Hacia el suroeste (pozos LLM-2X y GSM-1X) y noreste (pozo SIP-1X) comprende mayormente depósitos marinos someros de *shoreface* (anteplaya) inferior, de baja intensidad y frecuencia de tormentas. En el pozo GU-507 (Campo Guanarito), la sedimentación corresponde a canales de mareas.



Figura 5.12. Mapa de distribución de facies sedimentarias al tope del Miembro "P" de la Formación Escandalosa.

5.9. Caracterización petrográfica del Miembro “P” de la Formación Escandalosa

Para esta unidad se realizó el análisis petrográfico de 41 muestras de núcleos pertenecientes a los pozos SAB-1X, MPN-1X, BOR-31, SIP-1X, LLM-2X, TOR-1X, OBI-3X y GU-507 (Apéndices 2 al 9). Se identificaron cuatro (4) microfacies clásticas: waca cuarzosa, subarcosa, arenita cuarzosa y areniscas glauconíticas (*green sandstones*), de acuerdo a la clasificación de Pettijhon, Potter y Siever (1972); tres (3) microfacies de carbonatos de mezcla: arenisca micrítica, micrita arenosa y caliza de aloquímicos arenosa, según la clasificación de Mount (1985); y una (1) microfacies de dolomía no planar de acuerdo a Sibley y Gregg (1987).

Las microfacies clásticas, están constituidas principalmente de 40-70% cuarzo monocrystalino, 3% fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias, y hasta 7% de feldespatos (albita y microclino) (subarcosas). La matriz es arcillosa y varía entre 3 a 10% (en las wacas alcanza hasta 25%). El cemento es principalmente de caolinita (1-10%), silíceo (1-5%) y ocasionalmente de dolomita (7%). Ocasionalmente presentan hasta 40% de glauconita (*green sandstone*). Texturalmente son areniscas de grano fino a grueso, subangular a subredondeadas y moderada a bien escogidas. Los contactos entre granos son principalmente longitudinal, cóncavo-convexo, suturados y grano-matriz. La porosidad observada en los depósitos canalizados varía entre 5-25%, aunque en los depósitos marinos abiertos oscila entre 1-7% (Figuras 5.13 y 5.14).

Los efectos diagenéticos identificados en las facies, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta el tardío. El principal proceso diagenético temprano corresponde a la cementación de calcita, silícea y dolomita. Con respecto a los procesos tardíos son principalmente de disolución, tanto de la matriz arcillosa como de granos de feldespatos. Adicionalmente, se observa alteración de feldespatos a minerales de arcilla y compactación de granos dúctiles (micas). Según Surdam *et al.*

(1989), la disolución de feldespatos se produce en zonas de intensa diagénesis (80-120°C).

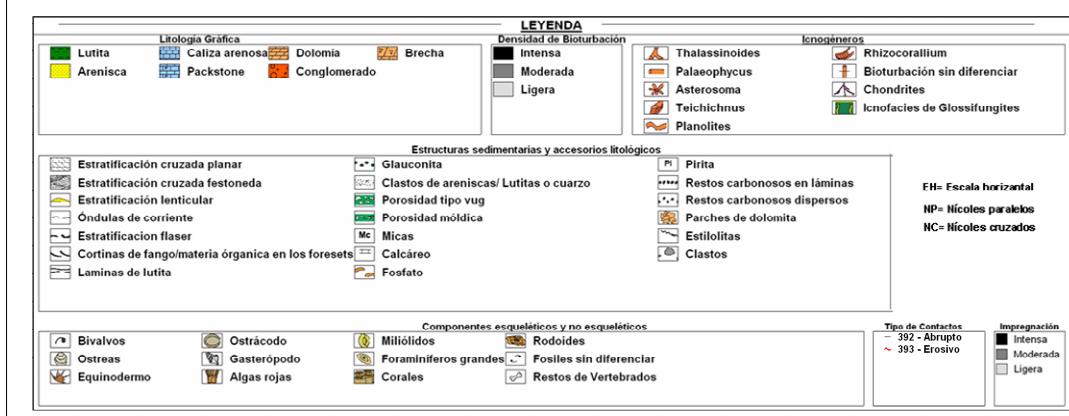
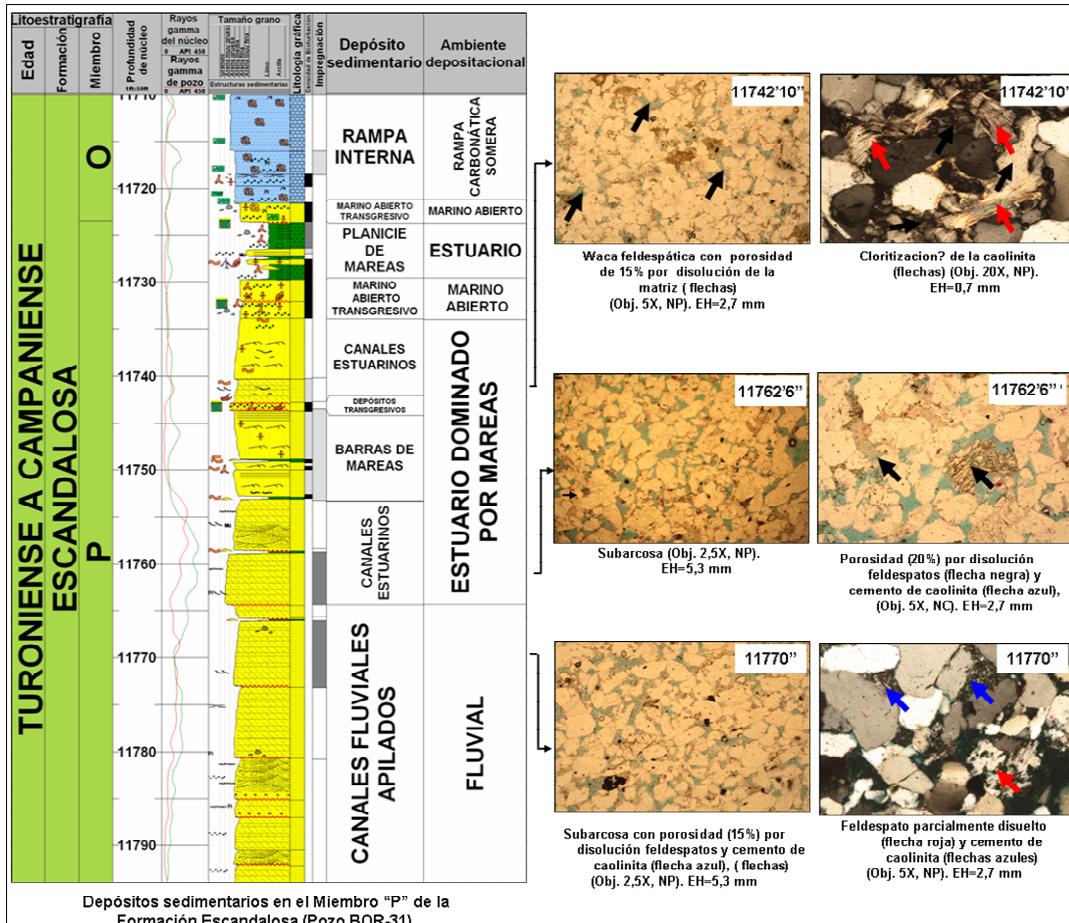
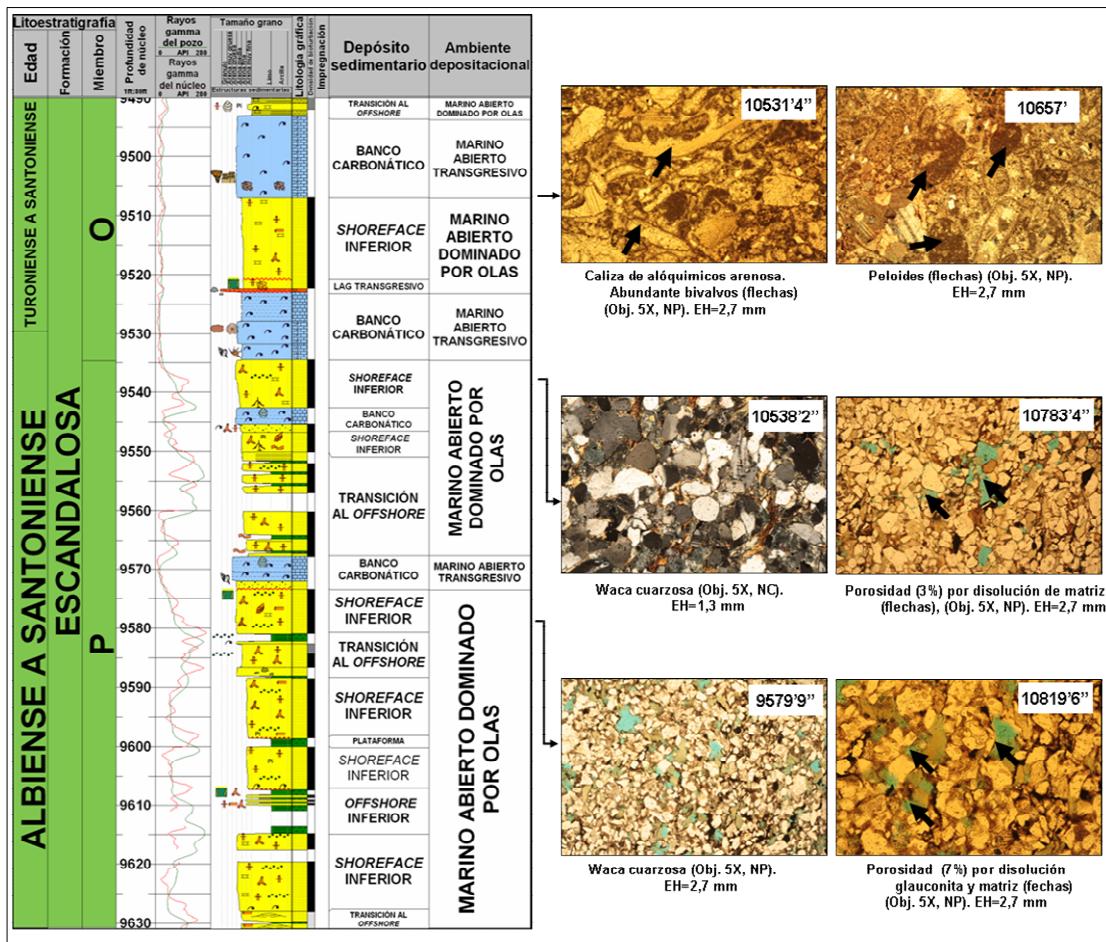


Figura 5.13. Aspectos texturales y composicionales del Miembro “P” de la Formación Escandalosa (pozo BOR-31).



Depósitos sedimentarios en el Miembro "P" de la Formación Escandalosa (Pozo SIP-1X).

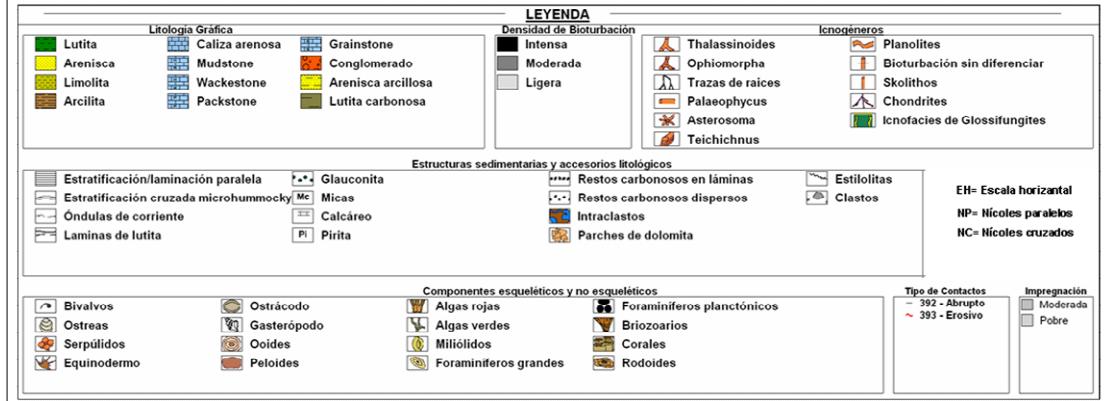


Figura 5.14. Aspectos texturales y composicionales del Miembro “P” de la Formación Escandalosa (pozo SIP-1X).

En las microfacies de carbonatos de mezcla el principal ortoquímico es la micrita, entre 23 y 62%. Los aloquímicos están representados por pelecípodos, gasterópodos y

equinodermos en mayor proporción. La fracción siliciclastica está compuesta por cuarzo monocristalino entre 10 y 31%, con tamaño de grano fino. La porosidad es de 1 a 3% (Figura 5.14), aunque, localmente puede alcanzar hasta 12%.

Los efectos diagenéticos identificados en las facies de carbonatos de mezcla, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta el tardío. Los principales procesos diagenéticos tempranos son: a) micritización en dominios freático marino (Logman, 1980); b) *boring* (horadación) en dominios freático marino (Logman, 1980); b) disolución y cementación en dominios freático meteórico (Logman, 1980); c) cementación sintaxial en dominios freático meteórico (Logman, 1980); d) recristalización de la matriz micrítica; e) inversión homoaxial, f) glauconitzación; g) piritización; h) silicificación de moluscos. Los efectos más importantes de la diagénesis tardía corresponden a procesos de presión-solución, representados por el desarrollo de contactos microestilolíticos y fracturas.

En cuanto al potencial como rocas reservorio, los cuerpos arenosos tanto de canales fluviales como estuarinos, representan las facies de mayor calidad, con porosidades primarias y de origen secundario (disolución de matriz arcillosa y feldepatos) que alcanzan hasta un 25%. Estos depósitos se encuentran intensamente impregnados de hidrocarburos en los pozos BOR-31 y BEJ-1X. En el pozo TOR-1X, el grado de impregnación varía de ligero a moderado. Los depósitos canalizados de espesor entre 14 a 58 pies de acuerdo a las relaciones de facies tienen una orientación SSE (Figura 5.15).

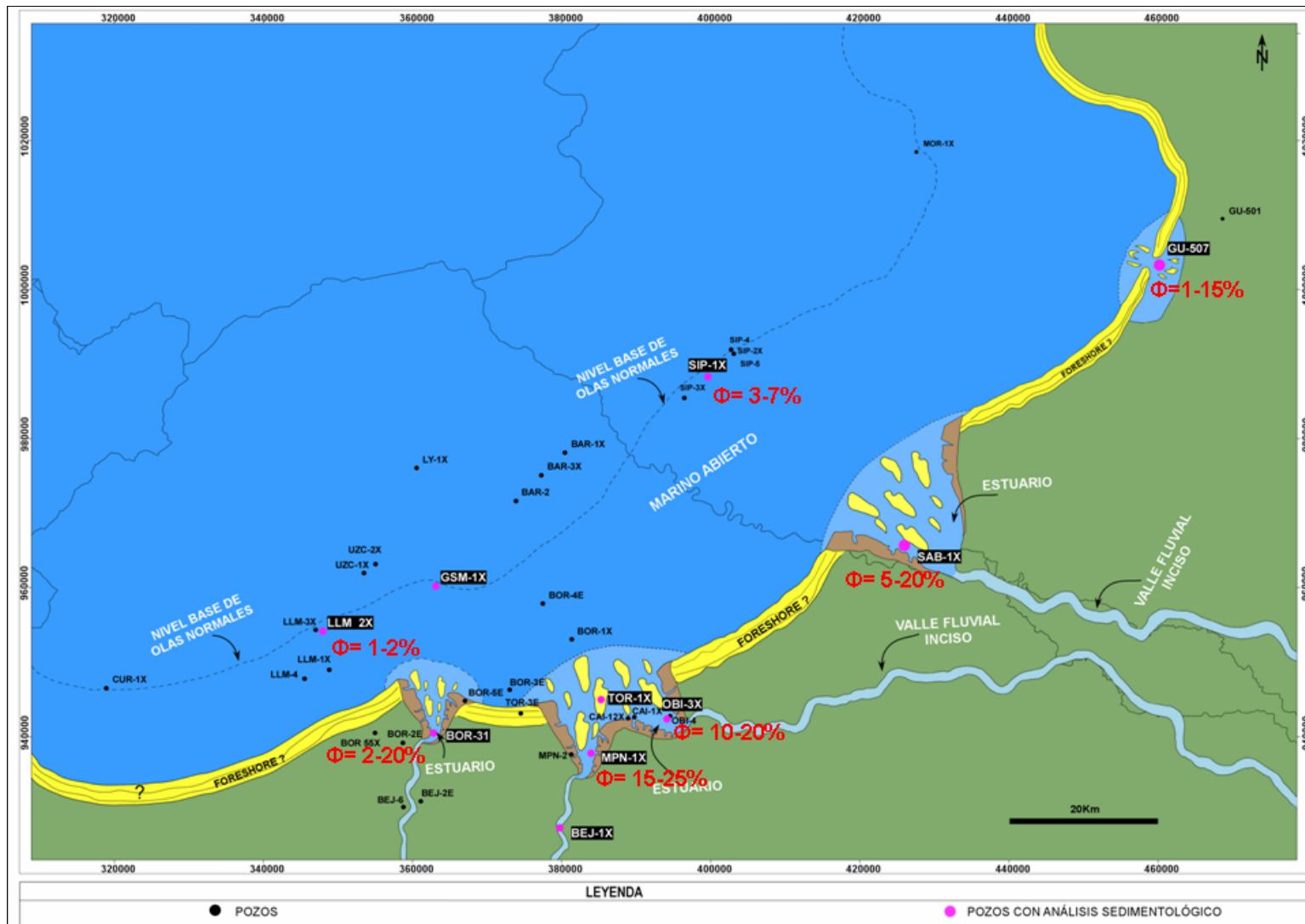


Figura 5.15. Porosidades visuales (indicadas en números rojos) y su relación con los depósitos sedimentarios del Miembro “P” de la Formación Escandalosa.

Los depósitos acumulados en ambientes marinos abiertos de *shoreface* (anteplaya) y bancos carbonáticos, representan rocas de baja calidad como reservorio, con porosidades entre 1 y 7% (Figura 5.15). La intensa actividad de organismos infaunales, con destrucción de la fábrica primaria en las facies clásticas, así como la abundancia de lodo carbonático en las facies de carbonatos de mezclas, son factores que disminuyeron considerablemente la calidad como reservorio de estos depósitos

5.10. Asociaciones de facies del Miembro “O” de la Formación Escandalosa

El Miembro “O” (Cenomaniense- Turoniense), hacia el sureste y noreste del área (pozos LLM-2X, GSM-1X, SIP-1X y GU-507), consiste dominantemente de calizas lodosas parcialmente dolomitizadas, tipo *wackestone-packstone* con dominio de bivalvos, gasterópodos, equinodermos y peloides, con alternacia de areniscas de grano fino intensamente bioturbadas. Hacia el sur y sureste (pozos BEJ-1X, MPN-1X, BOR-31, TOR-1X, OBI-3X y SAB-1X), los depósitos carbonáticos comprenden mayormente dolomías masivas, comúnmente arenosas y dolomías con abundantes restos de conchas de moluscos. El espesor de esta unidad en el área varía entre 44 y 102 pies. Se reconocieron tres (3) asociaciones de facies en estos depósitos: 1) llanura de mareas a supramarea; 2) rampa carbonática interna; y 2) depósitos marinos abiertos dominados por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas (Anexos 2 al 11).

A continuación se describen de forma detallada los depósitos sedimentarios interpretados para el Miembro “O” de la Formación Escandalosa:

5.10.1. Llanura de mareas a zona supramareal

Se disponen sobre depósitos estuarinos/marinos abiertos someros y rampa carbonática interna, en contacto neto/erosivo y formando sucesiones de 4 a 80 pies de espesor. Hacia el sur (pozos BEJ-1X, BOR-31, BOR-31 y TOR-1X) y sureste

(pozos SAB-1X) comprenden dolomías masivas comúnmente arenosas (**Facies F44**), con escasos restos de bivalvos, y ocasionalmente con textura de brechas (**Facies F46**) soportadas por clastos (pozos MPN-1X y BOR-31). Se intercalan localmente facies heterolíticas de arenisca de grano fino y lutitas laminadas, definiendo estratificación ondulosa y lenticular (**Facies F15**).

El contenido de glauconita es moderado a localmente abundante (**Facies 45**). La bioturbación es escasa a localmente intensa. Los icnogéneros dominantes son *Thalassinoides* y *Ophiomorpha*. Ocasionalmente las trazas de *Ophiomorpha* presentan relleno laminado (tidalita tubular). Los depósitos de llanura de mareas presentan de 4 a 10 pies de espesor (Figura 5.16).

Interpretación: Las dolomías con textura de brecha sugieren fracturamiento durante diagénesis temprana, probablemente asociado con procesos durante exposición subaérea (Mendez, 2002). La acción de mareas es evidenciada por la presencia de trazas de *Ophiomorpha* con relleno mareal (Wetzel *et al.*, 2014), así como la presencia de facies heterolíticas definiendo estratificación ondulosa y lenticular (alternancia de tracción y decantación). La presencia local de moluscos en estos depósitos, así como su asociación con depósitos de rampa interna con calcita original (parcialmente dolomitizadas), permiten interpretar un origen secundario para las mismas, producto de la dolomitización en etapas de diagénesis temprana (Tucker y Wright, 2004) de calizas lodosas y calizas arenosas (dolomías arenosas). Durante eventos de caídas del nivel del mar, los depósitos originalmente sedimentados en ambientes inframareales, posiblemente quedaron en un ambiente inter a supramareal, lo que favoreció procesos de dolomitización. Las facies de carbonatos con más tiempo por encima de la línea de baja marea, presentaron condiciones para desarrollar procesos de dolomitización completos (Méndez, 2002).

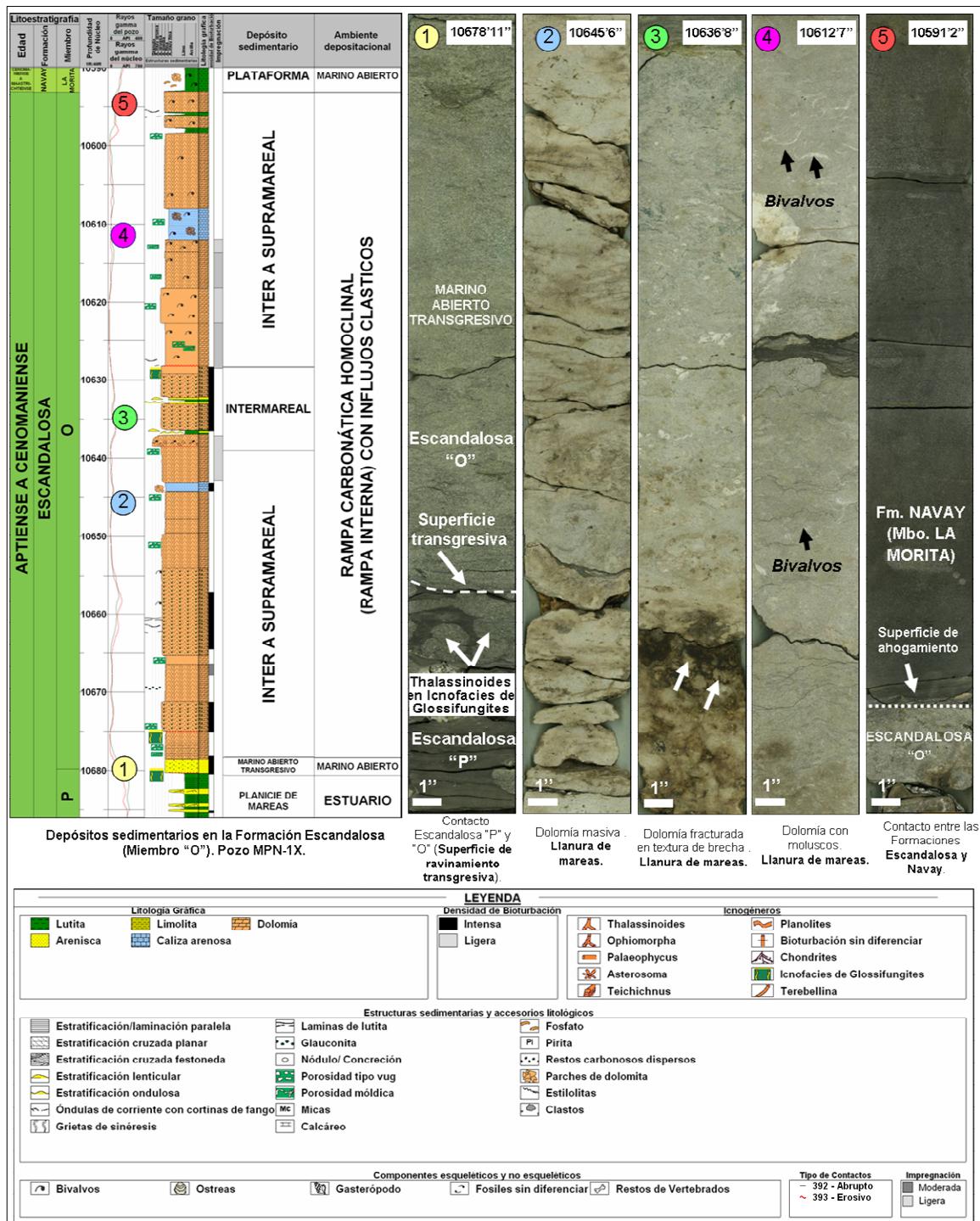


Figura 5.16. Depósitos de llanura de mareas a supramareal en el Miembro “O” de la Formación Escandalosa (pozo MPN-1X).

5.10.2. Rampa carbonática interna (depósitos submareales someros)

Se disponen sobre depósitos marinos abiertos de *shoreface* (anteplaya)-*offshore* (costa afuera) y comprenden calizas lodosas de textura tipo *wackestone/packstone* masivos, ocasionalmente *mudstone*, formando sucesiones de hasta 5 a 44 pies de espesor, con abundantes bivalvos y escaso a localmente moderado contenido de peloides, equinodermos, gasterópodos y ostreas (**Facies F35**). Los bioclastos se disponen sin orientación preferencial, generalmente flotando en la matriz micrítica, y se presentan comúnmente desarticulados y fragmentados (Figura 5.17). La fracción siliciclastica es moderada a abundante (**Facies F32 y F33**), así como el contenido de glauconita (**Facies F34**). La bioturbación es escasa, localmente intensa, con trazas de *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Teichichnus* y *Ophiomorpha*. Localmente, se observa porosidad tipo móldica y quedad (*vug*). Presenta dolomititación en parches o en bandas delgadas, preferencialmente distribuidas en estilolitas de baja amplitud.

Interpretación: El dominio de calizas con abundante lodo calcáreo, sin estructuras sedimentarias tractivas, con frecuentes peloides, sugiere deposición en un ambiente protegido de baja energía, probablemente lagunar de rampa interna. La presencia de equinodermos (organismos estenohalinos), indican un ambiente marino de salinidad normal (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003). El carácter desarticulado y fragmentado de los bioclastos, indica retrabajo y transporte por corrientes o eventos de tormentas. La abundancia local de glauconita, en algunos intervalos, sugieren bajas tasas de sedimentación y ambientes marinos someros (Flügel, 2004).

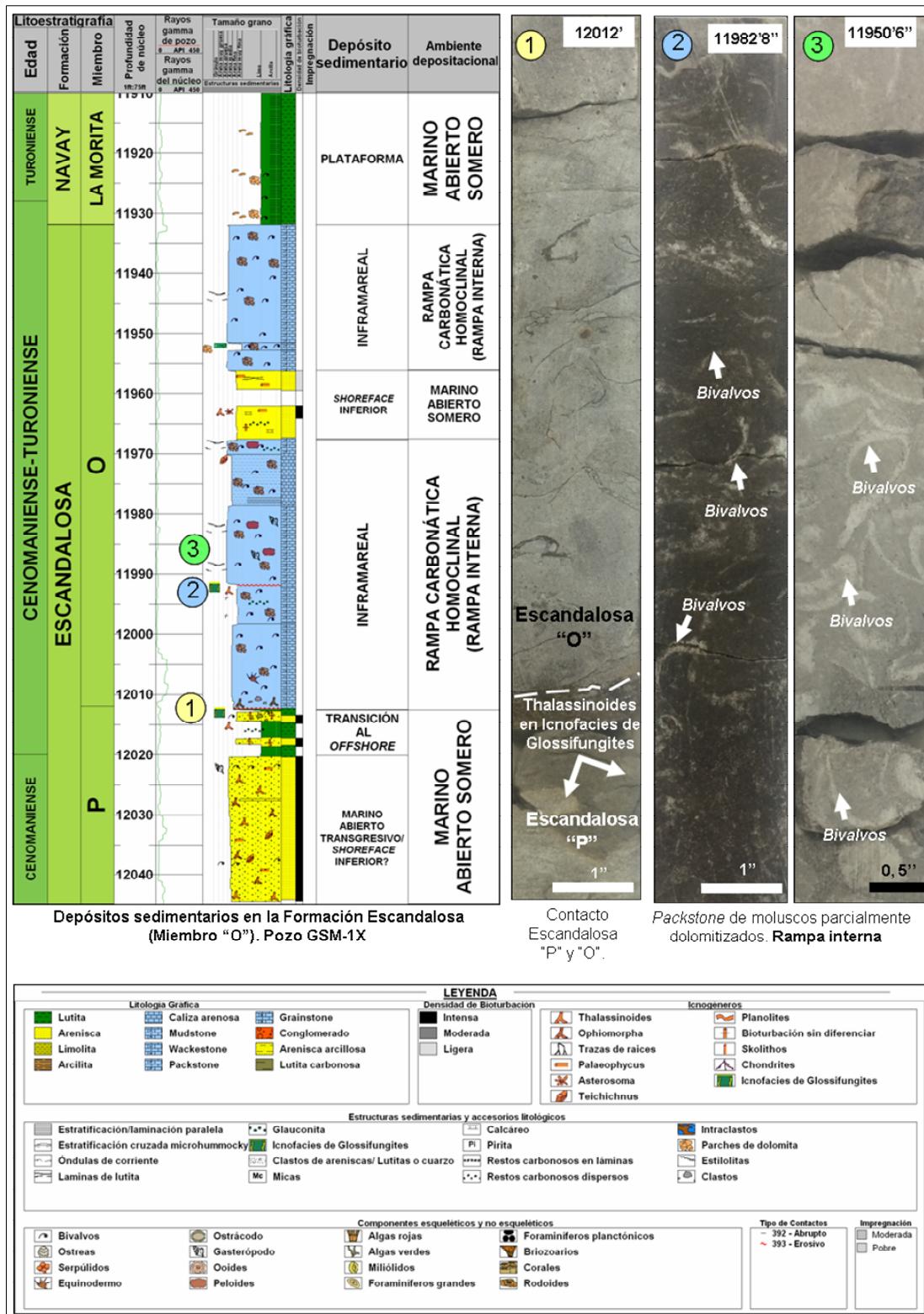


Figura 5.17. Depósitos de rampa interna y *shoreface* (anteplaya) en el Miembro O de la Formación Escandalosa (pozo GSM-1X).

Las dolomías con abundantes moluscos y restos de equinodermos, permiten interpretar un origen secundario para las mismas, producto de la dolomitización en etapas de diagénesis temprana de calizas lodosas y calizas arenosas (dolomías arenosas). De acuerdo a Méndez (2002), durante eventos de caídas del nivel del mar, los depósitos originalmente sedimentados en ambientes inframareales, posiblemente quedaron en un ambiente inter a supramareal, lo que favoreció procesos de dolomitización.

5.10.3. Marino abierto dominado por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas

Estos depósitos se intercalan con depósitos de rampa carbonática interna y comprenden principalmente ambientes de *shoreface* (anteplaya) inferior. Consisten de areniscas de grano muy fino a fino (**Facies F17**), tendencia granocreciente, ligeramente calcáreas, escaso contenido de moluscos, moderada a intensamente bioturbadas (moteado indistinto). Los icnogéneros dominantes son *Thalassinoides*, *Asterosoma*, *Palaeophycus* y de forma subordinada *Chondrites* y *Ophiomorpha*. Los depósitos de *shoreface* presentan de 6 a 11 pies de espesor (Figura 5.17).

Interpretación: Las capas de areniscas intensamente bioturbadas, reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2011), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) inferior se consideran producto de la sedimentación en costas con baja intensidad y frecuencia de tormentas.

5.11. Modelo sedimentológico del Miembro “O” de la Formación Escandalosa

Durante el avance de la transgresión, los depósitos de ambientes estuarinos y marinos abiertos (*shoreface-offshore*) del Miembro “P” de la Formación Escandalosa,

son reemplazados verticalmente por depósitos de carbonatos transgresivos dolomitizados, acumulados en una rampa carbonática somera, correspondientes al Miembro “O” de la Formación Escandalosa. La base de esta unidad es una superficie erosiva de carácter regional, delineada por icnofacies de sustratos firmes (icnofacies de *Glossifungites*), y representa una superficie transgresiva de ravinamiento generada por erosión de oleaje durante la subida relativa del nivel del mar (Figuras 5.16 y 5.17).

La rampa carbonática, hacia el suroeste y noreste del área (pozos LLM-2X, GSM-1X, SIP-1X y GU-507), comprende depósitos de calizas lodosas parcialmente dolomitizadas, tipo *wackestone-packstone* con dominio de bivalvos, gasterópodos, equinodermos y peloides, acumulados en zonas submareales de rampa interna. Los depósitos de calizas, se alternan localmente con depósitos clásticos marinos dominados por procesos de olas de buen tiempo (mayormente depósitos de *shoreface* inferior), generando una sedimentación de tipo mixta clástica-carbonática.

Hacia el sur y sureste (pozos BEJ-1X, MPN-1X, BOR-31, TOR-1X y SAB-1X), los depósitos carbonáticos consisten mayormente de dolomías masivas, comúnmente arenosas y dolomías con escasos a moderados restos de moluscos, generados en zonas parcialmente restringidas en ambientes submareales a inter y supramareal. No se observaron depósitos generados por flujos gravitativos de sedimentos, siendo los cambios verticales de facies relativamente graduales, sugiriendo una deposición en ambientes carbonáticos de bajo gradiente, típicamente de rampa homoclinal (Red, 1982) (Figura 5.18).

Las dolomías son de origen secundario, producto de la dolomitización de carbonatos de mezcla (dolomías arenosas) y calizas lodosas (dolomías planar-s y planar-e). Este proceso ocurrió en al menos dos eventos de dolomitización, tal como se evidencia en la zonación de los cristales de dolomita, mostrando un núcleo oscurecido el cual posee un grado de dolomitización menor, que comúnmente genera porosidad

intracristalina y un borde muy claro producto de un proceso posterior con desarrollo de caras subhédrales a euhédrales. De acuerdo a Gregg y Sibley (1987), el desarrollo de cristales euhédrales a subhédrales tiene lugar a bajas temperaturas (menores a 50°C), por lo que infiere que la dolomitización de la secuencia estudiada ocurrió a poca profundidad de soterramiento.

Durante eventos regresivos se favoreció los procesos de dolomitización, en los ambientes inter y supramareales. Las zonas más proclives para la dolomitización intensa se ubican en ambientes predominantemente por encima de la línea de marea alta, generando dolomías masivas, mientras que, en otras de menor dolomitización, correspondientes a las áreas con predominio de sedimentación inframareal (rampa interna), la litología preservó completamente ó en parte la calcita original, y está caracterizada por una sedimentación de carbonatos con texturas de *wackestone* y *packstone* de bivalvos (Méndez, 2002).

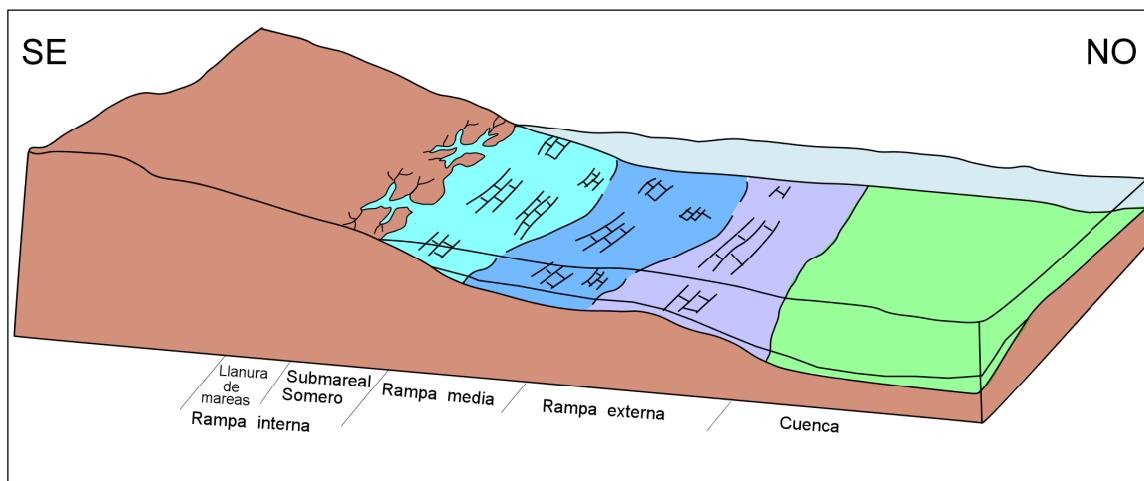


Figura 5.18. Modelo sedimentológico esquemático conceptual (sin escala) del Miembro “O” de la Formación Escandalosa. La sedimentación corresponde a una rampa carbonática homoclinal (mayormente rampa interna).

La presencia de materiales clásticos en una matriz carbonática o intercalados con intervalos carbonáticos, sugieren un ambiente de deposición donde coexiste el

desarrollo de una rampa carbonática, interrumpida ocasionalmente por influjos clásticos proveniente de áreas emergidas.

En el pozo GU-507, el Miembro “O” está parcialmente erosionado al noreste del área, producto de la erosión que ocurrió en el Eoceno Temprano, debido a la colisión de la Placa del Caribe y la Placa Suramericana.

La Figura 5.19 muestra el mapa de distribución de facies al tope del Miembro “O” de la Formación Escandalosa, donde se observa una sedimentación en una rampa carbonática interna. Hacia el noroeste y noreste del área (pozos LLM-2X, GSM-1X, SIP-1X y GU-507), comprende ambientes submareales de rampa carbonática interna, con depósitos parcialmente dolomitizados. Hacia el sur y sureste (pozos BEJ-1X, MPN-1X, BOR-31, TOR-1X y SAB-1X), los depósitos carbonáticos consisten mayormente de dolomías masivas, comúnmente arenosas y dolomías con abundantes restos de conchas de moluscos, generados en zonas submareales a inter y supramareal. La dolomitización está asociada a eventos de caídas del nivel del mar, siendo este proceso más intenso en las facies de carbonatos con más tiempo por encima de la línea de baja marea, con una dolomitización completa (Méndez, 2002).

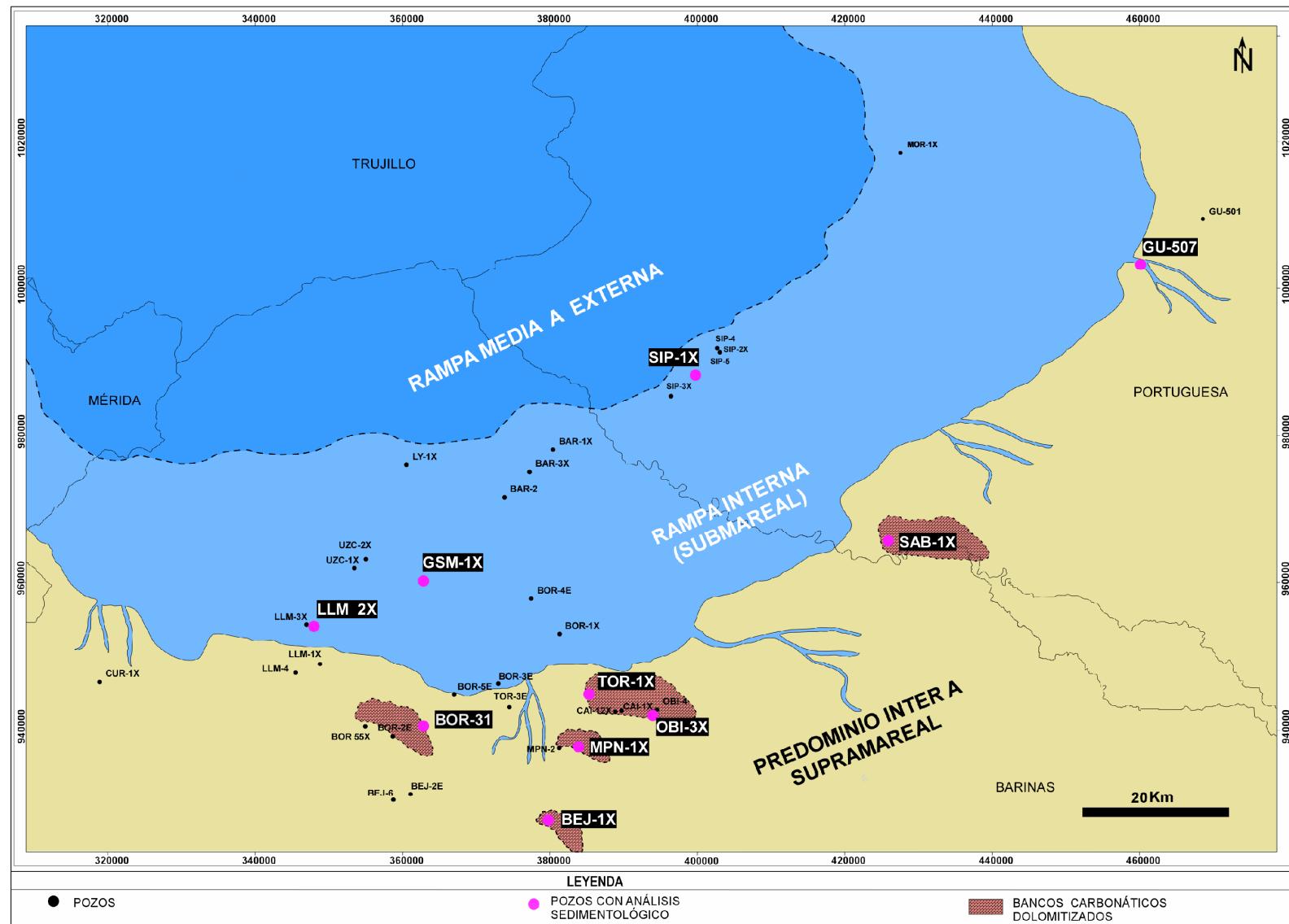


Figura 5.19. Mapa de distribución de facies sedimentarias al tope del Miembro “O” de la Formación Escandalosa.

5.12. Caracterización petrográfica del Miembro “O” de la Formación Escandalosa

Para esta unidad se realizó el análisis petrográfico de 92 muestras de núcleos pertenecientes a los pozos SAB-1X, MPN-1X, BOR-31, SIP-1X, GSM-1X, LLM-2X, TOR-1X, BEJ-1X OBI-3X y GU-507 (Apéndices 2 al 11). Se identificaron tres (3) microfacies de dolomía: no planar, planar-s y planar-e de acuerdo a Sibley y Gregg (1987) con variable contenido de fracción arenosa; dos (2) microfacies de carbonatos puros: *wackestone* y *packstone* de moluscos según Dunham (1962); cuatro (4) microfacies de carbonatos de mezcla: caliza de aloquímicos lodoso, caliza de aloquímicos arenosa, arenisca micrítica y micrita lodoso según la clasificación de Mount (1985); dos (2) microfacies clásticas: subarcosa y arenita cuarzosa calcárea, de acuerdo a la clasificación de Pettijhon, Potter y Siever (1972).

Las microfacies de dolomías presentan una fábrica que varía de planar (principalmente planar-s) a no planar (Figura 5.20) y un tamaño de cristales polimodal, con destrucción total de la fábrica original (salvo por escasos fantasmas de bivalvos), sólo preservándose la fracción clástica (10-24%) y la glauconítica (2-5%). La fracción clástica, es mayormente tamaño arena muy fina a fina. Las porosidades estimadas varían de 1 a 7% (localmente 12%), con frecuente impregnación de hidrocarburos (pozos MPN-1X, SAB-1X y BOR-31), principalmente intercristalina, intracristalina y oquedad (*vug*). En las microfacies de carbonatos de mezcla el principal ortoquímico es la micrita, entre 15 y 82%. Los aloquímicos están representados por moluscos en mayor proporción y, de forma subordinada, equinodermos, briozoarios, algas calcáreas, ostrácodos y peloides. La fracción siliciclástica está compuesta por cuarzo monocristalino entre 10 y 50%, con tamaño de grano entre arena muy fina a media. Otros componentes minoritarios son glauconita y pirita. Presentan dolomitización parcial, preferencialmente en la matriz micrítica. La porosidad es baja, entre 1 y 2%.

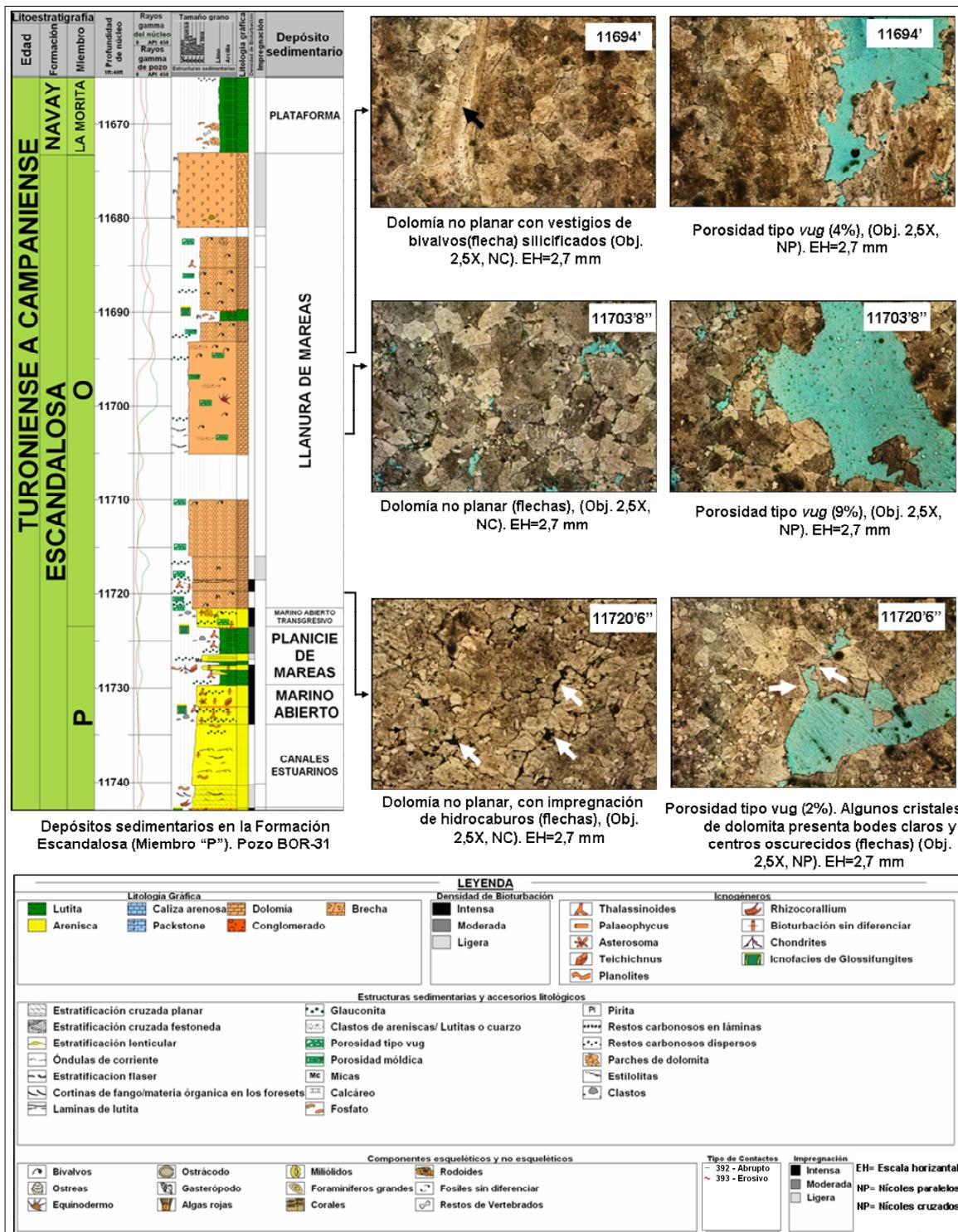


Figura 5.20. Aspectos texturales y composicionales del Miembro "O" de la Formación Escandalosa (pozo BOR-31).

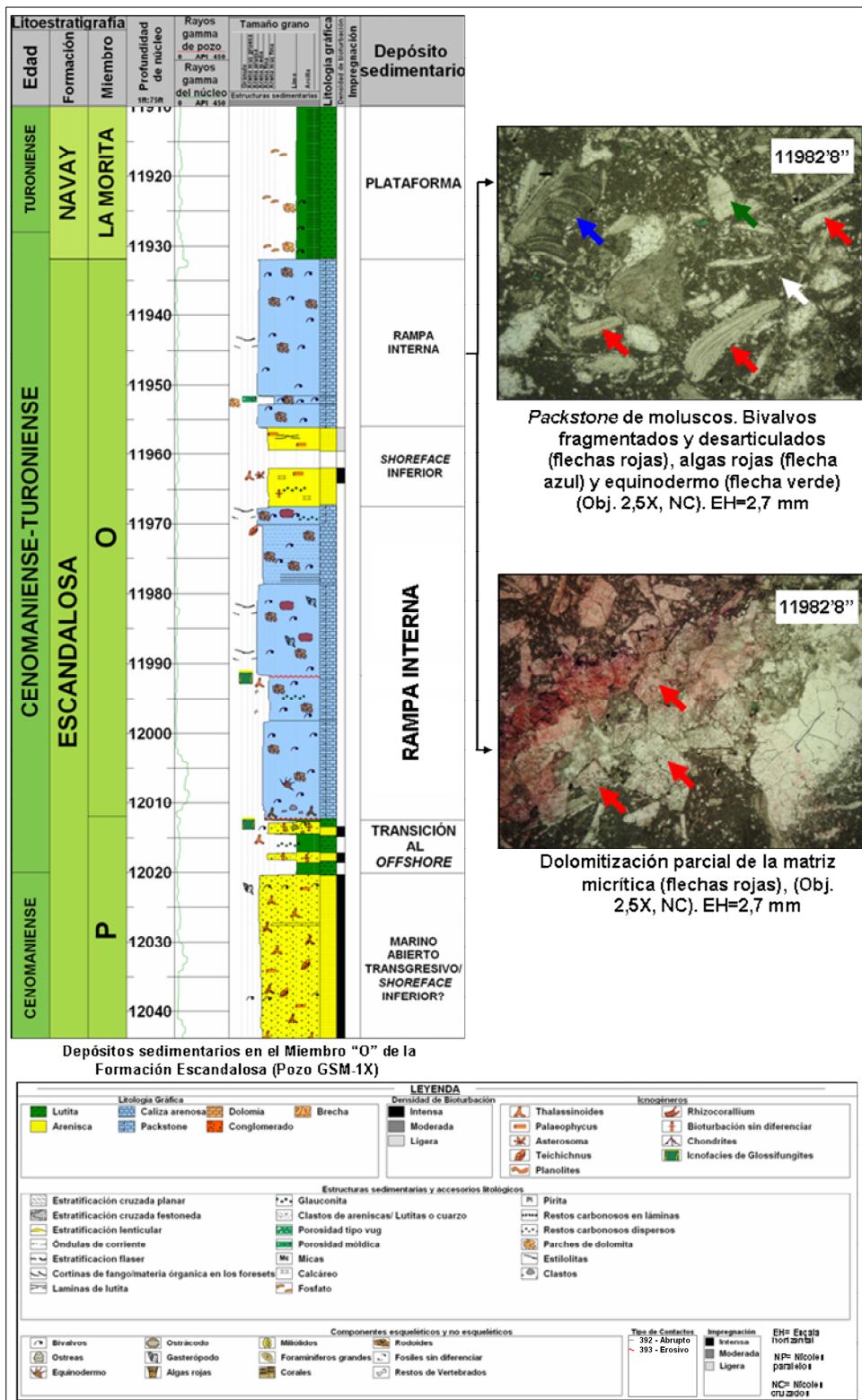


Figura 5.21. Aspectos texturales y composicionales del Miembro "O" de la Formación Escandalosa (pozo GSM-1X).

En las microfacies carbonáticas, los aloquímicos (20-32%) más abundantes corresponden a moluscos y, de forma subordinada, equinodermos, peloídes, foraminíferos planctónicos e intraclastos. El principal ortoquímico es la micrita, entre 45-65%. Presenta cuarzo de grano fino, glauconita, fosfato y pirita como componentes no carbonáticos en porcentajes que no superan el 5%. No se observó porosidad (Figura 5.21).

Las microfacies clásticas, están constituidas principalmente de cuarzo monocrystalino (55-60%), fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias (1%), feldespatos (albita y microclino) con porcentajes hasta 5% (subarcosas). La matriz es arcillosa y varía entre 5 a 10%. El cemento es principalmente de dolomita (20%), calcita (15%) y silíceo (5-10%). Ocasionalmente presenta glauconita (2%). Texturalmente son areniscas de grano muy fino a fino, angular a subangular y bien escogidas. Los contactos entre granos son principalmente grano-cemento y tangenciales. La porosidad es baja (1%), por disolución de matriz arcillosa y cemento.

Los efectos diagenéticos identificados en las facies de carbonatos de mezcla, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta tardío. Los principales procesos diagenéticos tempranos son: a) micritización en dominios freático marino (Logman, 1980); b) *boring* (horadación) en dominios freático marino (Logman, 1980); c) cementación isópaca en dominios freático marino (Logman, 1980); d) disolución y cementación tipo equigranular en dominios freático meteórico (Logman, 1980); e) cementación sintaxial en dominios freático meteórico (Logman, 1980); f) recristalización de la matriz micrítica; g) inversión homoaxial, h) fosfatización; i) piritización; j) dolomitización preferencialmente de matriz micrítica. Los efectos más importantes de la diagénesis tardía corresponden a procesos de presión-solución, representados por el desarrollo de contactos microestilolíticos y fracturas y dedolomitización, posiblemente durante etapas de telogénesis.

Los efectos diagenéticos identificados en las facies clásticas, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta el tardío. El principal proceso diagenético temprano corresponde a la cementación de calcita, silícea y dolomita. Con respecto a los procesos tardíos son principalmente la disolución del cemento de dolomita. Adicionalmente, se observa alteración de feldespatos a minerales de arcilla. Según Surdam *et al.* (1989) la disolución de feldespatos se produce en zonas de intensa diagénesis (80-120°C).

En cuanto al potencial como rocas reservorio, en las facies donde el proceso de dolomitización fue más intenso (pozos SAB-1X, MPN-1X), con desarrollo de porosidad intercristalina, intracristalina, móldica y *vug*, representan las de mayor calidad, alcanzando porosidades entre 3 y 7%. Estos depósitos se encuentran comúnmente con impregnación de hidrocarburos. Hacia el noroeste y noreste del área (pozos LLM-2X, GSM-1X, SIP-1X y GU-507), con predominio de sedimentación inframareal, donde la dolomitización de depósitos de calizas fue parcial, representan rocas de baja calidad como reservorios, con porosidades entre 1 y 2% (localmente 10% en los depósitos de canales de mareas en el pozo GU-507). La abundante matriz micrítica en las facies carbonáticas y en los carbonatos de mezclas, y la cementación de calcita son factores que disminuyeron considerablemente la calidad como reservorio de estos depósitos (Figura 5.22).

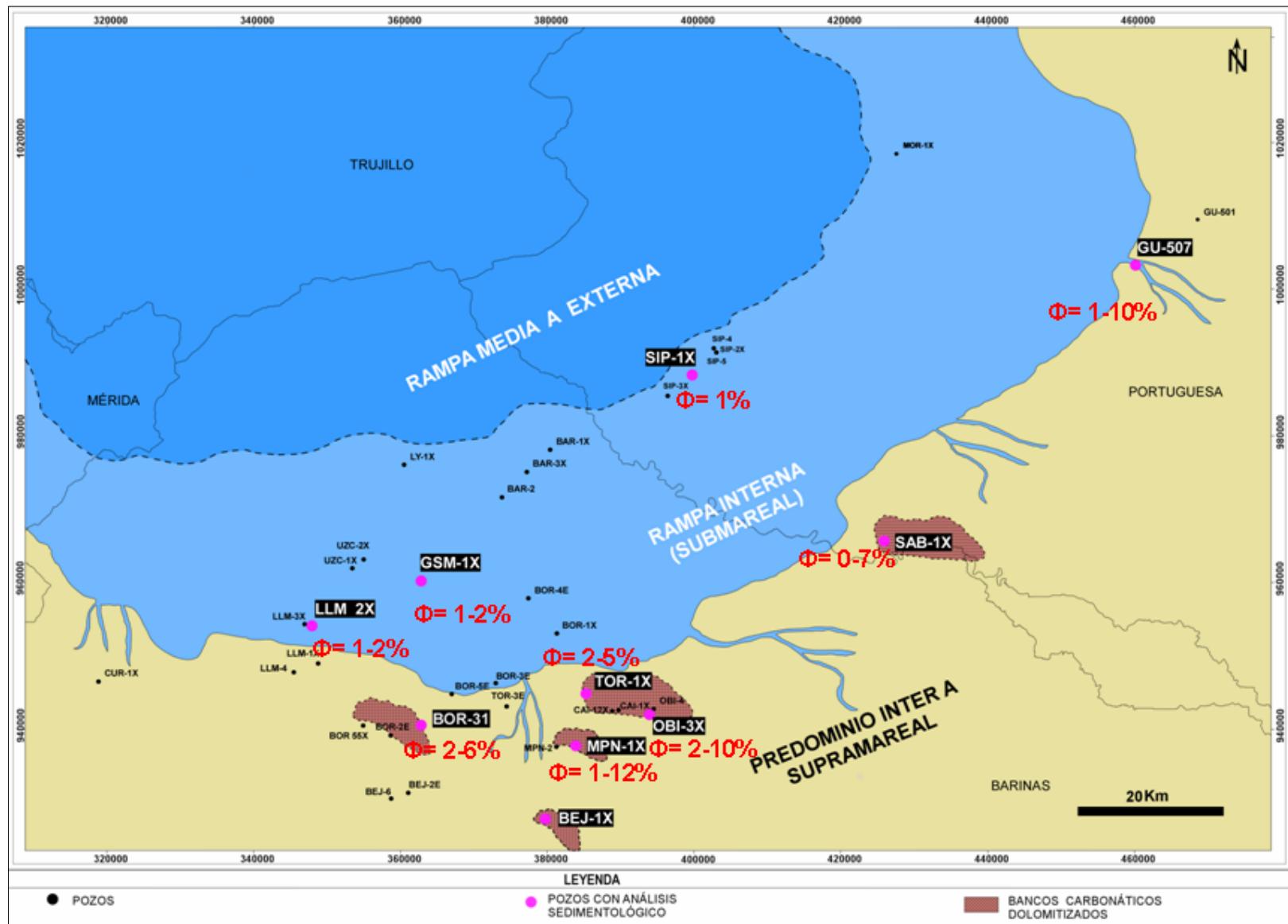


Figura 5.22. Porosidades visuales (indicadas en números rojos) y su relación con los depósitos en el Miembro “O” de la Formación Escandalosa.

5.13. Modelo sedimentológico de la Formación Navay

La máxima transgresión de la cuenca se alcanza durante la deposición del Miembro La Morita (Turonense-Coniacense) de la Formación Navay, representando la superficie de máxima inundación de mayor orden en la sección de interés. El Miembro La Morita comprende ambientes marinos abiertos (pozos GSM-1X, BOR-31, BEJ-1X, TOR-1X, LLM-2X y MPN-1X), principalmente con desarrollo de depósitos de plataforma (Anexos 2, 3, 5, 6, 10 y 11), acumulados por debajo del nivel base de las olas de tormentas. En este contexto, la base del Miembro La Morita marca el deceso (superficie de ahogamiento) de la rampa carbonática del Miembro O de la Formación Escandalosa, producto de la sumersión por debajo de la zona fótica (Schlager, 1999) y el establecimiento de una sedimentación clástica de ambientes más profundos (Figura 5.23).

Seguidamente, se depositó en contacto transicional el Miembro Quevedo (Coniacense-Campaniense), predominantemente en ambientes marino abierto de plataforma (pozo GSM-1X) a *shoreface* (anteplaya) medio (pozos SIP-1X), marcando el inicio de una progradación que se agudiza con la acumulación de la Formación Burgüita (Anexos 3 y 9).

Los depósitos de plataforma de 9 a 65 pies de espesor, están constituidos principalmente de lutitas con laminación paralela (**Facies F23**), fractura astillosa y localmente con muy escasa materia orgánica. Hacia la base, el Miembro La Morita presenta abundantes restos de fosfato, foraminíferos planctónicos, parches o bandas de dolomita y escasas intercalaciones muy delgadas de calizas lodosas, con escasos bivalvos y amonites (pozo LLM-2X). Los depósitos *offshore* (costa afuera), principalmente *offshore* inferior, consisten mayormente de limolitas calcáreas (**Facies F22**), con abundantes restos de vertebrados (peces?), fosfatos, escasos bivalvos y parches o bandas de dolomita, intercaladas con lutitas con laminación paralela o masiva y escasas capas de arenisca de grano muy fino, limosas y comúnmente con estratificación cruzada *microhummocky* (Facies F21). Las capas de limolitas están

intensamente bioturbadas con icnogéneros sin diferenciar, localmente se reconocen *Thalassinoides*. Los depósitos de *offshore* (costa afuera) varían de 4 a 13 pies de espesor (Figura 5.23).

Los depósitos de transición al *offshore* consisten de areniscas de grano fino a muy fino, comúnmente con estratificación cruzada *hummocky*, *microhummocky* y óndulas de flujos combinados, intercaladas con delgadas capas de lutitas laminadas o masivas (Facies F19). El grado de bioturbación es bajo, reconociéndose localmente *Chondrites* y *Palaeophycus*. Los depósitos de *shoreface* inferior (afectados por tormentas), consisten de areniscas de grano fino a muy fino (Facies F18), localmente con estratificación cruzada *hummocky*. La bioturbación es moderada a escasa con trazas de los icnogéneros *Thalassinoides* y *Palaeophycus*. Los depósitos de *shoreface* medio consisten de areniscas de grano fino a medio/grueso, con estratificación paralela a aspecto masivo y bioturbación escasa a ausente con icnogéneros de *Thalassinoides* *Palaeophycus* y *Ophiomorpha* (Facies F17). Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) forman sucesiones de de 5 a 34 pies de espesor.

Interpretación: Los depósitos de lutitas (plataforma) son interpretados como producto de la decantación en sectores de baja energía, por debajo del nivel base de olas de tormentas. La presencia de foraminíferos planctónicos y amonites indican condiciones de salinidad normal. La ausencia de bioturbación, posiblemente sugiere condiciones de poca oxigenación. La intercalación de lutitas y areniscas con estratificación cruzada *hummocky* y *microhummocky* (*offshore* a transición al *offshore*) indican alternancia de decantación a partir de aguas tranquilas durante buen tiempo y flujos oscilatorios asociados a eventos de tormentas, en sectores ubicados por debajo del nivel base de olas normales y por encima del nivel base de olas de tormenta. Las capas de limolitas masivas, con abundantes restos de vertebrados son interpretadas como el producto de la deposición a partir de flujos turbulentos, generados durante eventos de tormentas. Las capas localmente amalgamadas de areniscas con estratificación cruzada *hummocky*, son el resultado de flujos

oscilatorios y combinados en condiciones de alta energía durante eventos de tormentas, depositadas por encima del nivel base de olas normales (Buatois *et al.*, 2011).

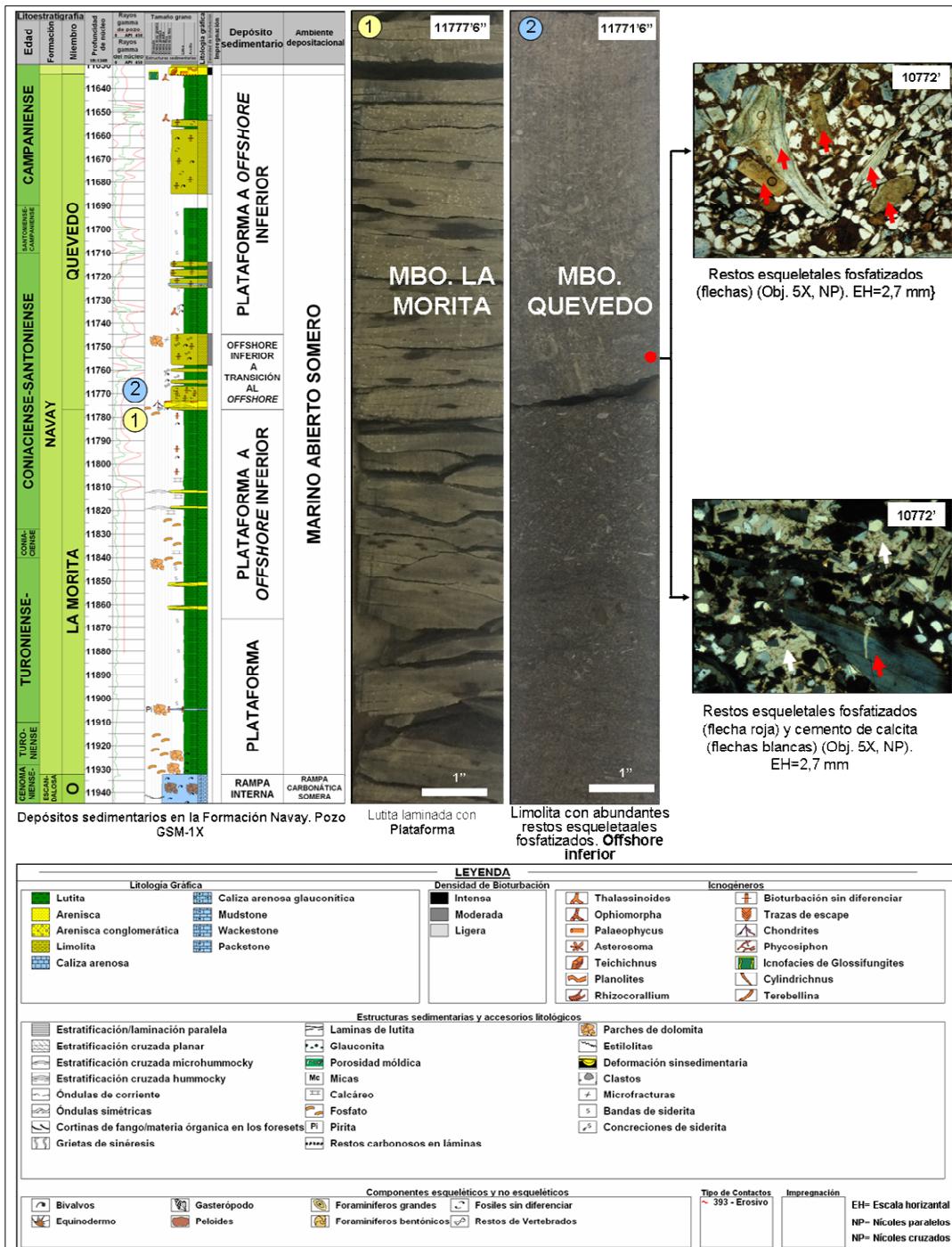


Figura 5.23. Depósitos marino abierto en la Formación Navay (pozo GSM-1X).

5.14. Asociaciones de facies de la formación Burgüita

La Formación Burgüita conforma una sucesión grano-estratocreciente, integrada por areniscas de grano grueso a fino y, de manera subordinada, lutitas laminadas y limolitas masivas. El espesor de esta formación oscila entre 0 pies, donde se encuentra completamente erosionada, y 336 pies. La agrupación vertical de las facies sedimentarias permitió definir dos (2) asociaciones facies en estos depósitos: 1) marinos abiertos dominados por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas (*plataforma-shoreface*); 2) delta dominado por olas (Anexos 2, 3, 7 y 8).

A continuación se describen de forma detallada los depósitos sedimentarios interpretados, de base a tope, para la Formación Burgüita

5.14.1. Marino abierto dominado por oleaje de baja intensidad y frecuencia de tormentas

La sección inferior de la Formación Burgüita en los pozos GSM-1X y MPN-1X, se acumuló en ambientes marinos abiertos, principalmente con desarrollo de depósitos de plataforma, *offshore* (costa afuera), transición al *offshore* (transición a costa afuera) y *shoreface* inferior. Estos depósitos se acumularon formando sucesiones grano-estratocrecientes, con algunas superficies de inundación internas.

Los depósitos de plataforma de 33 a 48 pies de espesor, consisten predominantemente de lutitas con laminación paralela y fractura astillosa (**Facies F23**). Localmente se intercalan delgadas capas de areniscas, intensamente bioturbadas, con abundantes restos de vertebrados, fosfato y clastos gruesos (**Facies F22**). La icnofauna está representada por *Thalassinoides*.

Los depósitos de *offshore* (principalmente *offshore* inferior), de 8 a 46 pies de espesor, consisten de lutitas con laminación paralela a masiva, escasas intercalaciones

delgadas de arenisca de grano muy fino a fino (**Facies F21**), intensamente bioturbadas, presentando un moteado indistinto y limolitas/areniscas muy finas masivas a laminadas, con abundantes restos de vertebrados y fosfato, escasamente bioturbadas, con trazas fósiles sin diferenciar (**Facies F22**). En el pozo MPN-1X, el tope de la Formación Burgüita presenta escasas intercalaciones de delgadas capas de arenisca de grano muy fino, limosas que comúnmente contienen estratificación cruzada *microhummocky* y óndulas de flujos oscilatorios (**Facies F20**).

Los depósitos de transición al *offshore* (costa afuera), de 3 a 6 pies de espesor, consisten de areniscas, intensamente bioturbadas con intercalaciones delgadas de lutitas, con laminación paralela y fractura astillosa (**Facies F20**). La bioturbación es intensa con ejemplares de *Thalassinoides*, *Asterosoma*, *Palaeophycus*, *Planolites* y *Rhizocorallium*. En el pozo MPN-1X, el tope de la Formación Burgüita presenta areniscas de grano fino a muy fino, comúnmente con estratificación cruzada *microhummocky*.

Los depósitos de *shoreface* (anteplaya) inferior presentan arenisca de grano fino a muy fino, intensamente bioturbadas (**Facies F18**), reconociéndose principalmente *Thalassinoides*, *Asterosoma*, *Palaeophycus* y localmente *Ophiomorpha* y *Diplocraterion* (Figura 5.24). Los depósitos de *shoreface* medio de 18 pies de espesor, consisten de areniscas de grano fino a medio, aspecto masivo y con moderado a bajo grado de bioturbación. Los depósitos de *shoreface* superior consisten de areniscas de grano medio a grueso, con estratificación cruzada festoneada y escasa bioturbación (**Facies F17**). El espesor de estos depósitos varía de 3 a 20 pies.

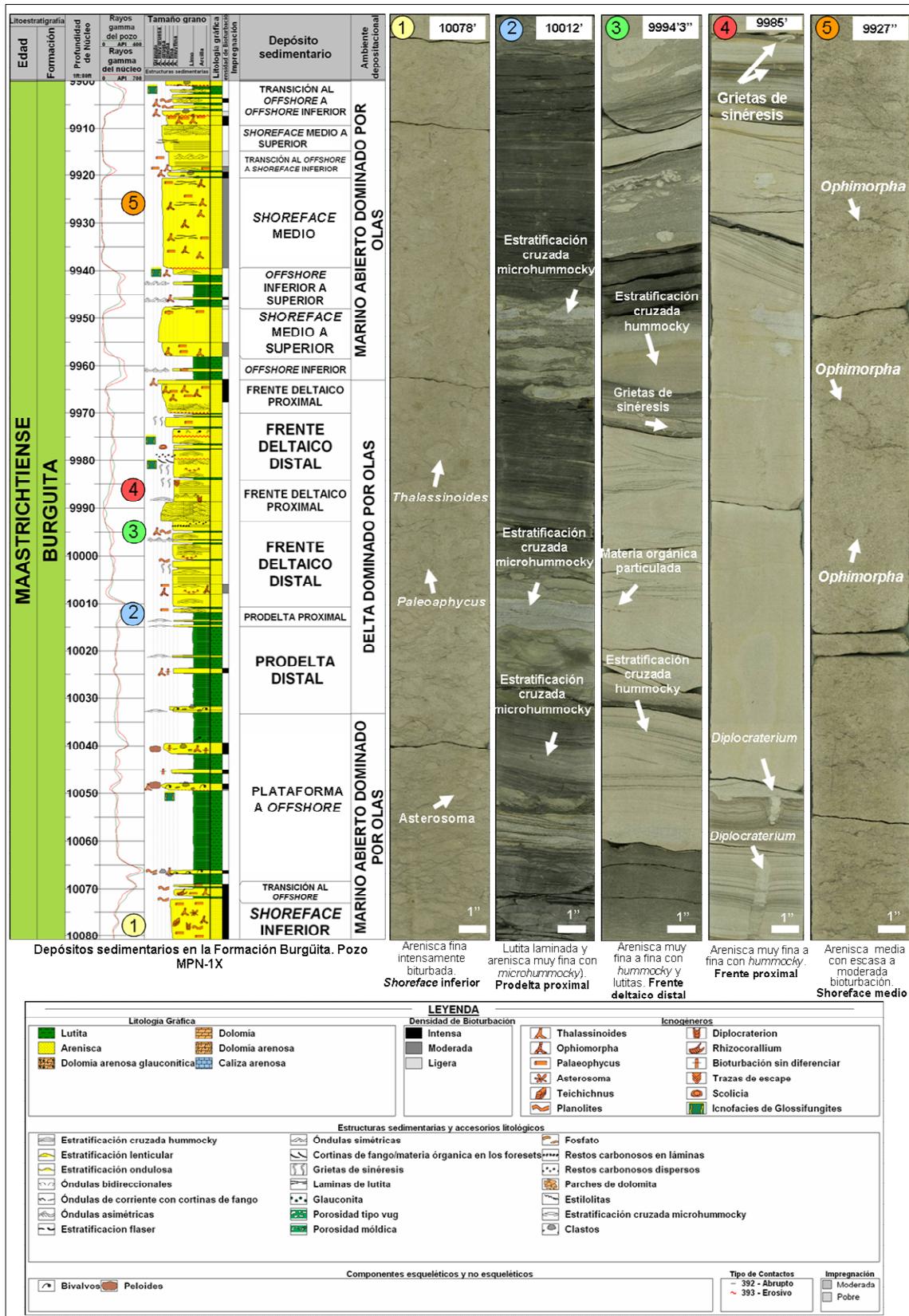


Figura 5.24. Depósitos marinos abiertos y deltaicos en la Formación Burgüita (pozo MPN-1X).

Interpretación: Las capas de lutitas (plataforma) son interpretadas producto de la decantación en sectores de baja energía, por debajo del nivel base de olas de tormentas. La intercalación de lutitas y areniscas (*offshore* a transision al *offshore*) indican alternancia de decantación a partir de aguas tranquilas (buen tiempo) y flujos oscilatorios y/o combinados, asociados a eventos de tormentas, en sectores por debajo del nivel base de olas normales y por encima del nivel base de tormenta.

Las capas de areniscas intensamente bioturbadas, reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2011), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. La relativamente moderada diversidad y alta intensidad de trazas fósiles sugieren ambientes de salinidad normal. Las capas de areniscas de grano medio a grueso con estratificación cruzada festoneada, son el resultado de flujos unidireccionales (migración de dunas 3D) en condiciones de alta energía, y en sectores cercanos a la costa. Los *shoreface* (anteplaya) se consideran producto de la sedimentación en costas con baja intensidad y frecuencia de tormentas.

5.14.2. Delta dominado por oleaje

Hacia el suroeste y noreste del área, en los pozos MPN-1X, GSM-1X y SAB-1X, se identificaron sistemas deltaicos con dominio del oleaje, principalmente con depósitos de prodelta y frente deltaico. Los depósitos muestran arreglos grano-estratocrecientes integrados por una intercalación dominante de areniscas de grano muy fino a grueso, de bases y topes netos/erosivos, y lutitas laminadas a masivas.

• Prodeltá

Estos depósitos consisten de una alternancia rítmica y centimétrica de lutitas masivas o laminadas y de forma subordinada areniscas de grano muy fino, limosa, con estratificación cruzada *hummocky*, *microhummocky* y óndulas de flujos combinados (**Facies F27 y F28**). La bioturbación es escasa a localmente intensa con icnogéneros

de *Palaeophycus*, *Planolites*, *Thalassinoides*, *Chondrites* y *Phycosiphon*. Presenta frecuentes grietas de sinéresis y escasas estructuras de deformación sinsedimentaria. Estos depósitos presentan base gradacional y tendencia grano-estratocreciente. El espesor varía de 5 a 62 pies de espesor (Figuras 5.24 y 5.25).

Interpretación: El predominio de lutitas sobre las areniscas de grano muy fino, con estratificación cruzada *hummocky*, *microhummocky* y óndulas de flujos combinados, indican sedimentación por decantación en ambientes de baja energía, alternado con eventos de tormentas. La presencia de grietas de sinéresis, el bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012). Las estructuras de deformación sedimentaria, sugiere altas tasas de sedimentación y altas pendientes.

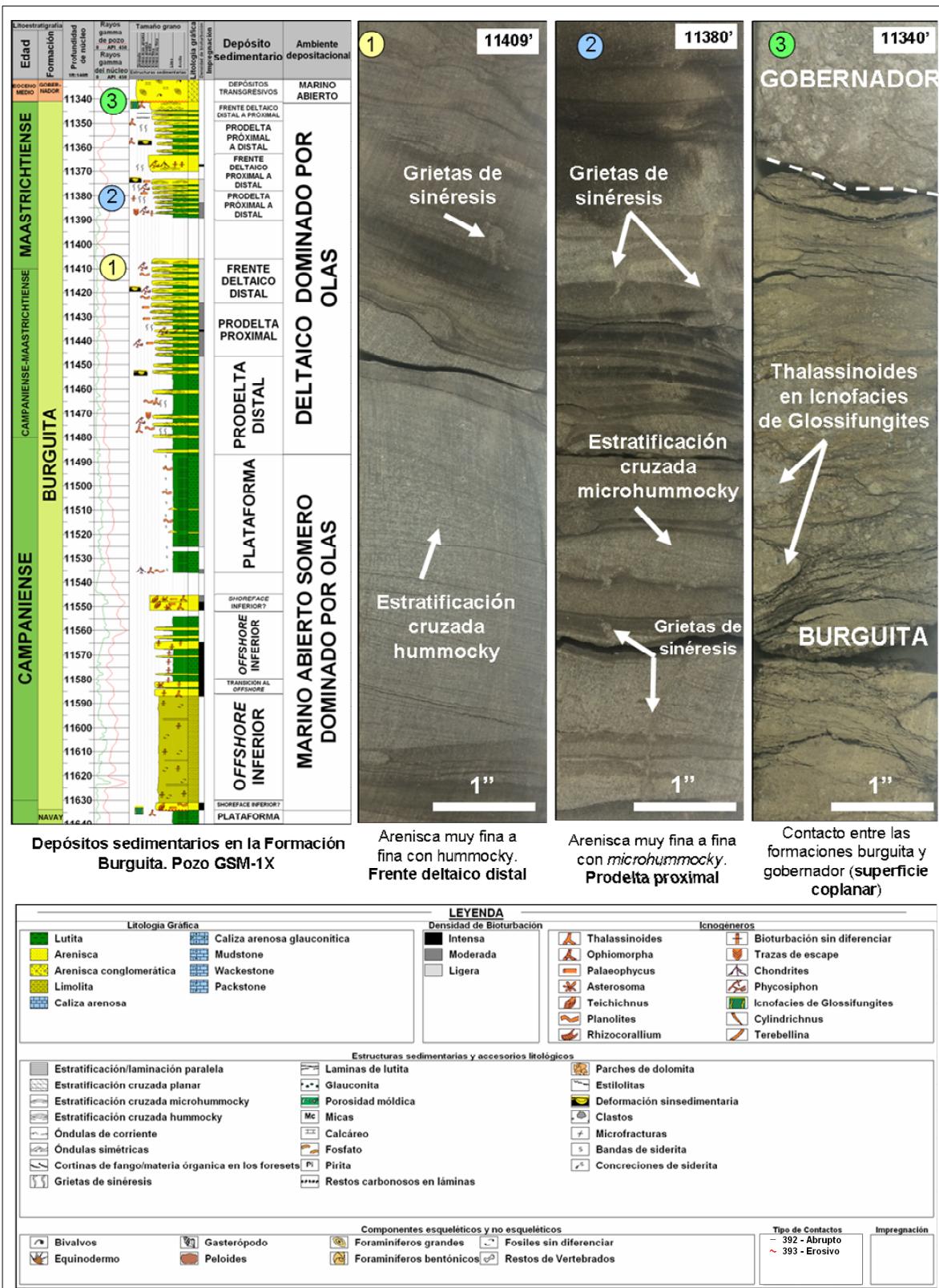


Figura 5.25. Depósitos marinos abiertos y deltaicos en la Formación Burguita (pozo GSM-1X).

- **Frente deltaico**

Estos depósitos consisten predominantemente de areniscas de grano muy fino a fino, con estratificación cruzada *hummocky*, *microhummocky* y localmente óndulas de flujos combinados (**Facies F25 y F26**) y de corriente. Se intercalan areniscas de grano fino medio, con estratificación cruzada festoneada (**Facies F17**) y capas delgadas de lutitas laminadas a masivas. Presenta frecuentes grietas de sinéresis, materia orgánica particulada dispersa y en láminas y escasas estructuras de deformación sinsedimentaria. Estos depósitos presentan base neta y tendencia grano-estratocreciente (Figuras 5.24, 5.25 y 5.26). En el pozo MPN-1X, se observan *sets* de capas amalgamadas, con estratificación cruzada *hummocky* de bases erosivas. La bioturbación es escasa a localmente intensa con icnogéneros de *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Chondrites*, *Phycosiphon*, *Ophiomorpha* y trazas de escape. El espesor varía de 8 a 45 pies.

Interpretación: Las capas localmente amalgamadas de areniscas con estratificación cruzada *hummocky*, *microhummocky* y localmente óndulas de flujos combinados, son el resultado de flujos oscilatorios y combinados en condiciones de alta energía, durante eventos de tormentas. La presencia de grietas de sinéresis, el bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012). Las estructuras de deformación sinsedimentaria, sugiere altas tasas de sedimentación y altas pendientes. Los intervalos con materia orgánica particulada sugieren una conexión directa con sistemas fluviales.

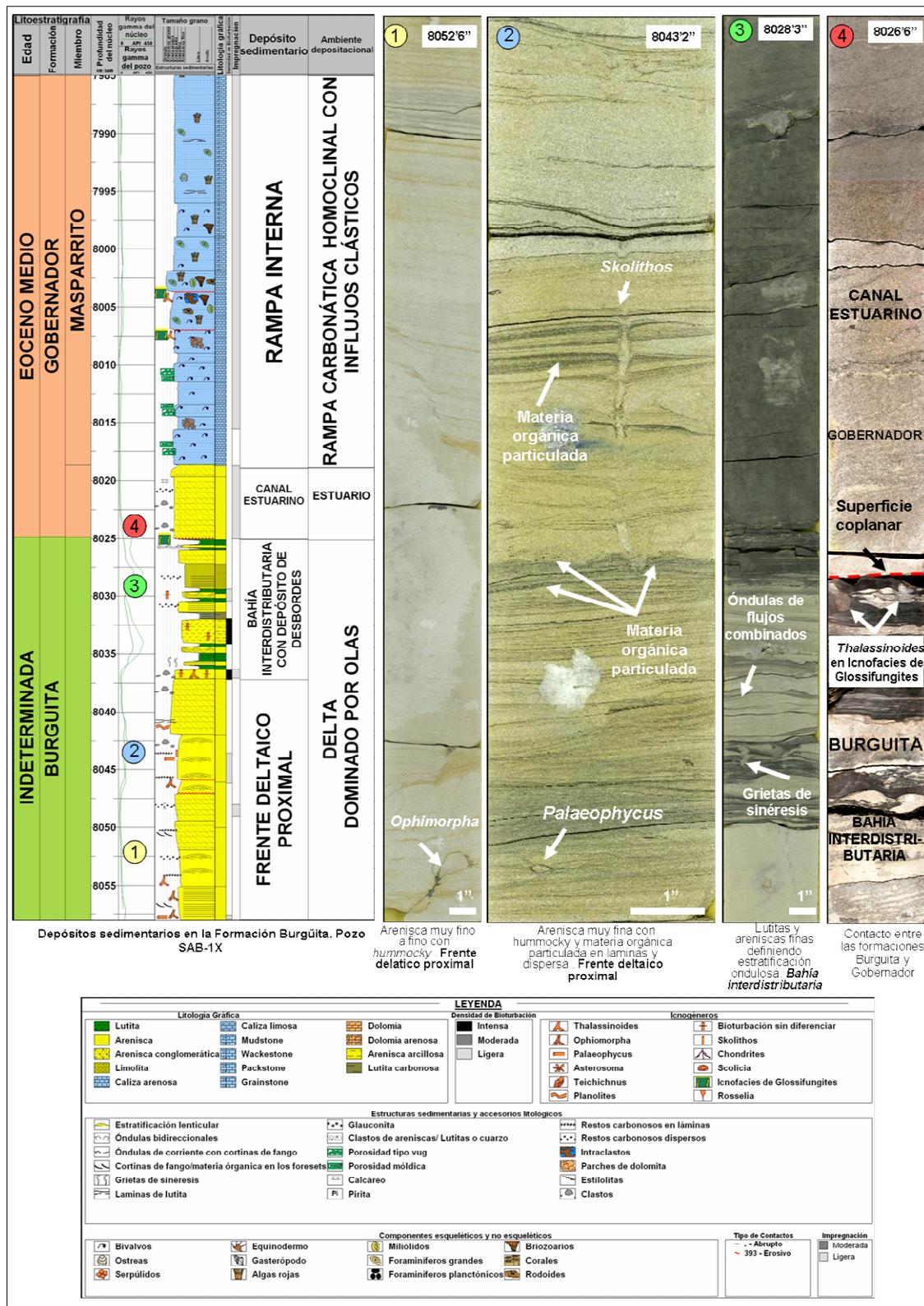


Figura 5.26. Depósitos deltaicos en la Formación Burgüita (pozo SAB-1X).

- **Bahía interdistributaria con eventos de desbordes**

Intercalación de areniscas de grano muy fino a fino con laminación paralela y ondulas de flujos combinados y estratificación cruzada *microhummocky* y lutitas carbonosas laminadas (**Facies F27**). Presenta ligera biturbación con *Thalassinoides*, *Phycosiphon* y *Palaeophycus*. Las grietas de sinéresis y materia orgánica particulada son escasas (Figura 5.26). La base de este depósito es neta. El espesor es de 10 a 17 pies.

Interpretación: El predominio de areniscas de grano fino a medio, con estratificación paralela y laminación ondulítica de corriente y presencia de delgadas capas de lutitas, indica procesos tractivos dominantes sobre los procesos de decantación. Los intervalos de arenisca se interpretan como de abanicos de rotura. La presencia de lutitas carbonosas sugiere el desarrollo de áreas pantanosas.

- **Canales distributarios**

Estos depósitos forman intervalos granodecrescentes con base erosiva, y consisten de areniscas de grano muy grueso a fino con estratificación cruzada festoneda a planar (**Facies F9 y F10**), localmente con láminas de lodo en los *foreset*s (capas frontales). La bioturbación es escasa con ejemplares de *Thalassinoides* y *Palaeophycus* al tope de los intervalos. Frecuentemente presentan materia orgánica particulada dispersa.

Interpretación: La estratificación cruzada planar y cruzada festoneda indican migración de dunas 2D y 3D, respectivamente (Nichols, 2009). Los intervalos con materia orgánica particulada sugieren una conexión directa con sistemas fluviales. El bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental, posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad y alta energía. La influencia de mareas se evidencia por las láminas de lodo en las capas frontales de la estratificación (Bhattacharya, 2006).

5.15. Modelo sedimentológico de la Formación Burgüita

El Campaniense-Maastrichtiense estuvo caracterizado por una fase marcadamente regresiva, período en el cual se sedimentó la Formación Burgüita. El tramo inferior de esta unidad, comprende depósitos marinos abiertos al sur y suroeste (pozos MPN-1X y GSM-1X), principalmente con desarrollo de depósitos de plataforma, *offshore* (costa afuera), transición al *offshore* (transición a costa afuera) y *shoreface* (anteplaya) inferior, acumulados en costas débil a moderadamente afectadas por tormentas. Estos depósitos forman parasecuencias grano-estratocrecientes, reflejando progradaciones desde ambientes de plataforma a *shoreface* inferior, con algunas superficies de inundación internas. La relativamente moderada diversidad y alta densidad de trazas fósiles, con formas estenohalinas como *Chondrites* sugieren ambientes de salinidad normal.

La sección superior de la Formación Burgüita, está representada por una sedimentación en un sistema deltaico dominado por oleaje (pozos GSM-1X MPN-1X y SAB-1X) y, de forma subordinada, participación de procesos fluviales y de mareas. Los depósitos corresponden mayormente a ambientes de frente deltaico y prodelta, con desarrollo subordinado de planicie deltaica (Figura 5.27). En general, muestran arreglos grano-estratocrecientes integrados por una intercalación de areniscas de grano muy fino a medio y lutitas, sugiriendo una tendencia progradacional. Estos depósitos se encuentran dominados por estructuras de flujos oscilatorios y combinados (estratificación cruzada *hummocky*, *microhummocky* y óndulas de olas), y presentan localmente restos vegetales. La icnofauna se encuentra empobrecida, muy probablemente asociada a fluctuaciones de salinidad, producto de la descarga de agua dulce, lo cual, es consistente con la interpretación deltaica propuesta. Adicionalmente, desde el punto de vista sedimentológico, existen evidencias de dilución de la salinidad marina normal a partir de descargas de agua dulce, tales como grietas de sinéresis (Buatois *et al.*, 2012; Bhattacharya, 2006). Los sistemas deltaicos progradan sobre depósitos marinos abiertos de plataforma.

Hacia el área de Sabaneta, localmente los depósitos del frente deltaico presentan estructuras sedimentarias tractivas de corrientes unidireccionales (estratificación cruzada planar y ondulas de corrientes), reflejando un menor retrabajo del oleaje del sedimento aportado por los canales distributarios. En el área de Obispo (pozo OBI-3X), la influencia del oleaje se ve reducida debido al predominio de depósitos de planicie deltaica (canales distributarios), por acumularse en sectores menos expuestos al tren de olas, evidenciándose la acción del oleaje en los depósitos de bahía interdistributaria.

En el pozo MPN-1X, el tope de la Formación Burgüita marca el restablecimiento de condiciones de salinidad normal, asociada a la sedimentación de un sistema de *offshore* (costa afuera)-*shoreface* (anteplaya), con moderada preservación de capas de tempestitas.

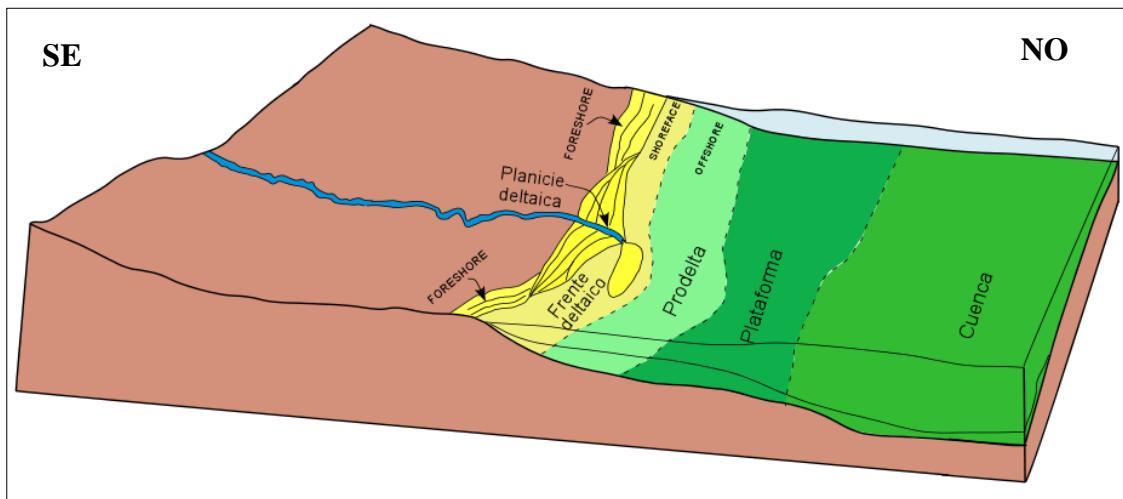


Figura 5.27. Modelo sedimentológico esquemático conceptual (sin escala) para la Formación Burgüita. Hacia el tramo inferior dominan los ambientes marinos abiertos débilmente afectados por tormentas, y hacia los tramos medio y superior la sedimentación está representada por un sistema deltaico dominado por olas.

Es importante resaltar que la Formación Burgüita fue completamente erosionada hacia el sur y suroeste (pozos BOR-31 y LLM-2X) y noreste (pozos SIP-1X y GU-

507), debido a la erosión a la que estuvo expuesta el área a finales del Cretácico y durante el Paleoceno (Parnaud *et al.*, 1995).

La Figura 5.28 muestra la distribución de facies sedimentarias al tope de la Formación Burgüita, donde se observa una diferenciación en las facies en el área de estudio. Hacia el suroeste (pozo GSM-1X), la sedimentación está representada por sistemas deltaicos dominados por olas, con depósitos mayormente de frente deltaico. Hacia el sur (pozo MPN-1X), la sedimentación corresponde a ambientes marinos abiertos de *shoreface* (anteplaya) inferior. En el área de Obispo (pozo OBI-3X) predominan los depósitos de planicie deltaica (canales distributarios y bahía interdistributaria).

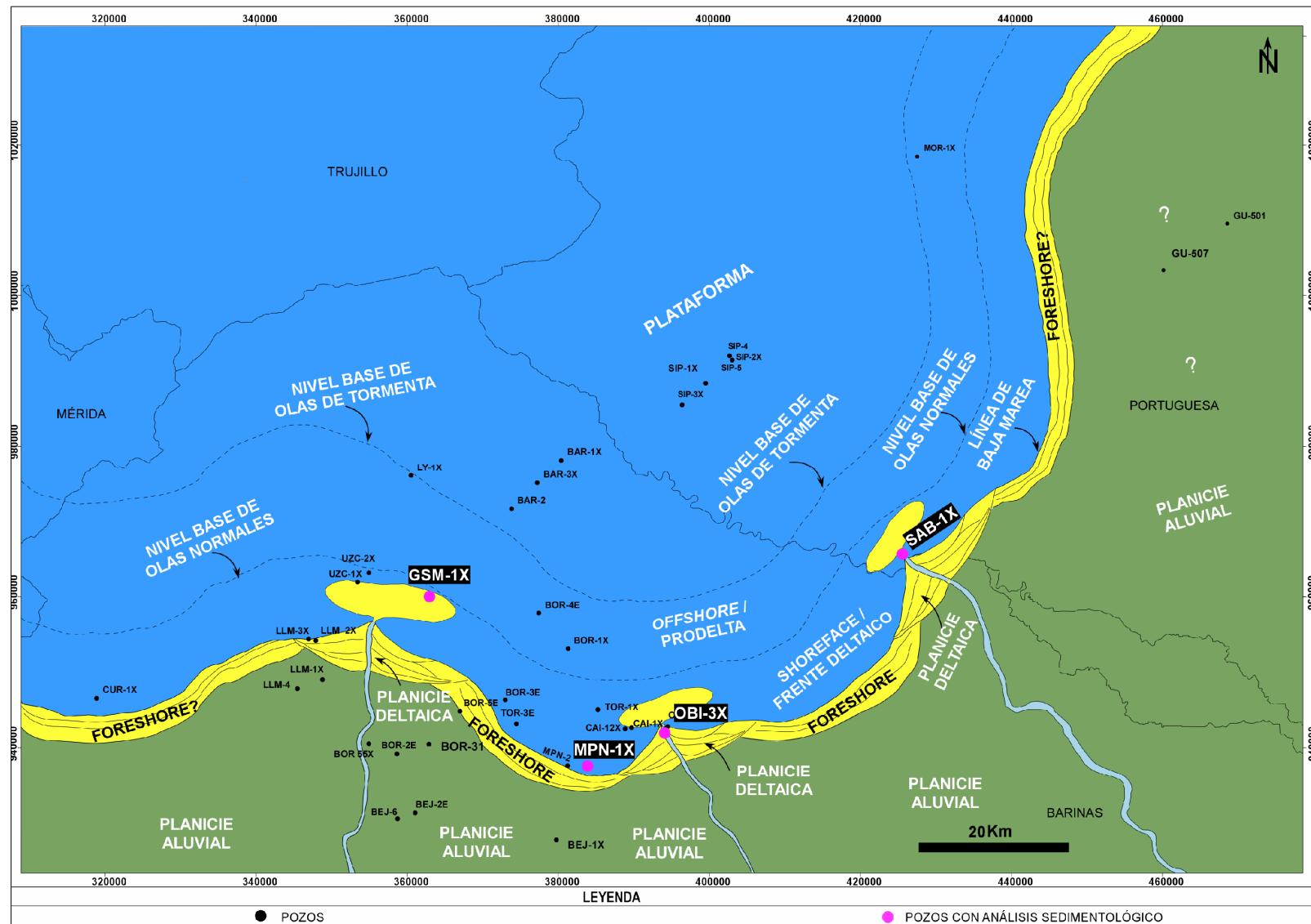


Figura 5.28. Mapa de distribución de facies sedimentarias al tope de la Formación Burgüita

5.16. Caracterización petrográfica de la Formación Burgüita

Para esta unidad se realizó el análisis petrográfico de 27 muestras de núcleos pertenecientes a los pozos SAB-1X, MPN-1X, GSM-1X y OBI-3X (Apéndices 2, 3, 8 y 10). Se identificaron cuatro (4) microfacies clásticas: waca cuarzosa, subarcosa, arenita cuarzosa y waca feldespática de acuerdo a la clasificación de Pettijhon, Potter y Siever (1972). En el pozo GSM-1X se identificaron tres (3) microfacies de carbonatos de mezcla: arenisca micrítica, micrita arenosa y caliza de aloquímicos lodoso según la clasificación de Mount (1985).

Las microfacies clásticas, están constituidas principalmente por cuarzo monocrystalino (52-76%), fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias (1-5%), feldespatos (albita y microclino) que alcanzan hasta un 12% (subarcosas). La matriz es arcillosa (1-5%) (en las wacas 15 a 40%). El cemento es principalmente de caolinita (1-15%), silíceo (1%) y ocasionalmente de dolomita (7-10%). Otros componentes minoritarios son muscovita y ocasionalmente fosfatos que no superan el 5%. Texturalmente son areniscas de grano fino a muy grueso, subangular a subredondeados y moderadas a bien escogidas. Los contactos entre granos son principalmente longitudinal, cóncavo-convexo, suturados y grano-matriz. La porosidad observada varía de 5-25%, de origen primario y por disolución de matriz arcillosa, cemento de caolinita y granos.

Los efectos diagenéticos identificados en las facies clásticas, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta el tardío. El principal proceso diagenético temprano corresponde a la cementación de calcita y silícea. Con respecto a los procesos tardíos son principalmente de disolución, tanto de la matriz arcillosa, cemento de caolinita y de granos de feldespatos (Figura 5.29). Adicionalmente, se observa alteración de feldespatos a minerales de arcilla y compactación de granos dúctiles (micas). Según Surdam *et al.* (1989), la disolución de feldespatos se produce en zonas de intensa diagénesis (80-120°C).

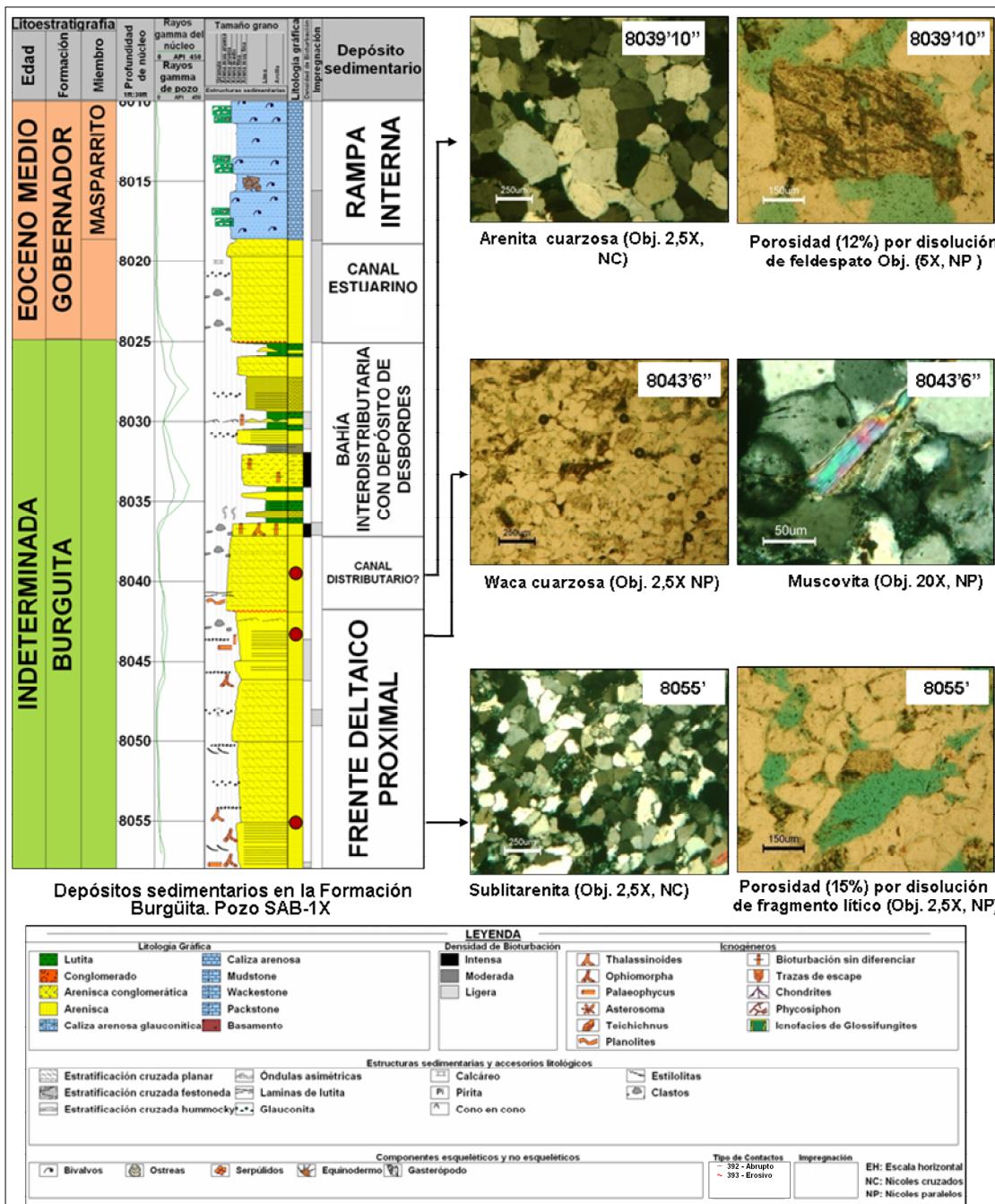


Figura 5.29. Aspectos texturales y composicionales de la Formación Burgüita. (Pozo SAB-1X).

En las microfacies de carbonatos de mezcla, el principal ortoquímico es la micrita, entre 5 y 10%. Los aloquímicos (12-29%) están representados por pelecípodos, algas rojas y foraminíferos. La fracción siliciclástica está compuesta por cuarzo monocrystalino entre 39 y 53%, con tamaño de grano muy fino. Otros componentes minoritarios son pirlita y *pellets*. La porosidad varía de 2% a nula.

En cuanto al potencial como rocas reservorio, los cuerpos arenosos de frente deltaico y *shoreface* (anteplaya) representan las facies de mayor calidad, con porosidades de origen primario y secundario (disolución de matriz arcillosa, cemento de caolinita y feldespato) que alcanzan hasta un 20%. Los depósitos de *offshore* (*costa afuera*) inferior (pozo GSM-1X) representan rocas de baja calidad como reservorio, con porosidad de 2% (Figura 5.30). La abundante matriz micrítica y arcillosa, así como la intensa actividad de organismos infaunales, con destrucción de la fábrica primaria y la cementación de calcita, son factores que disminuyeron considerablemente la calidad como rocas reservorio de estos depósitos.

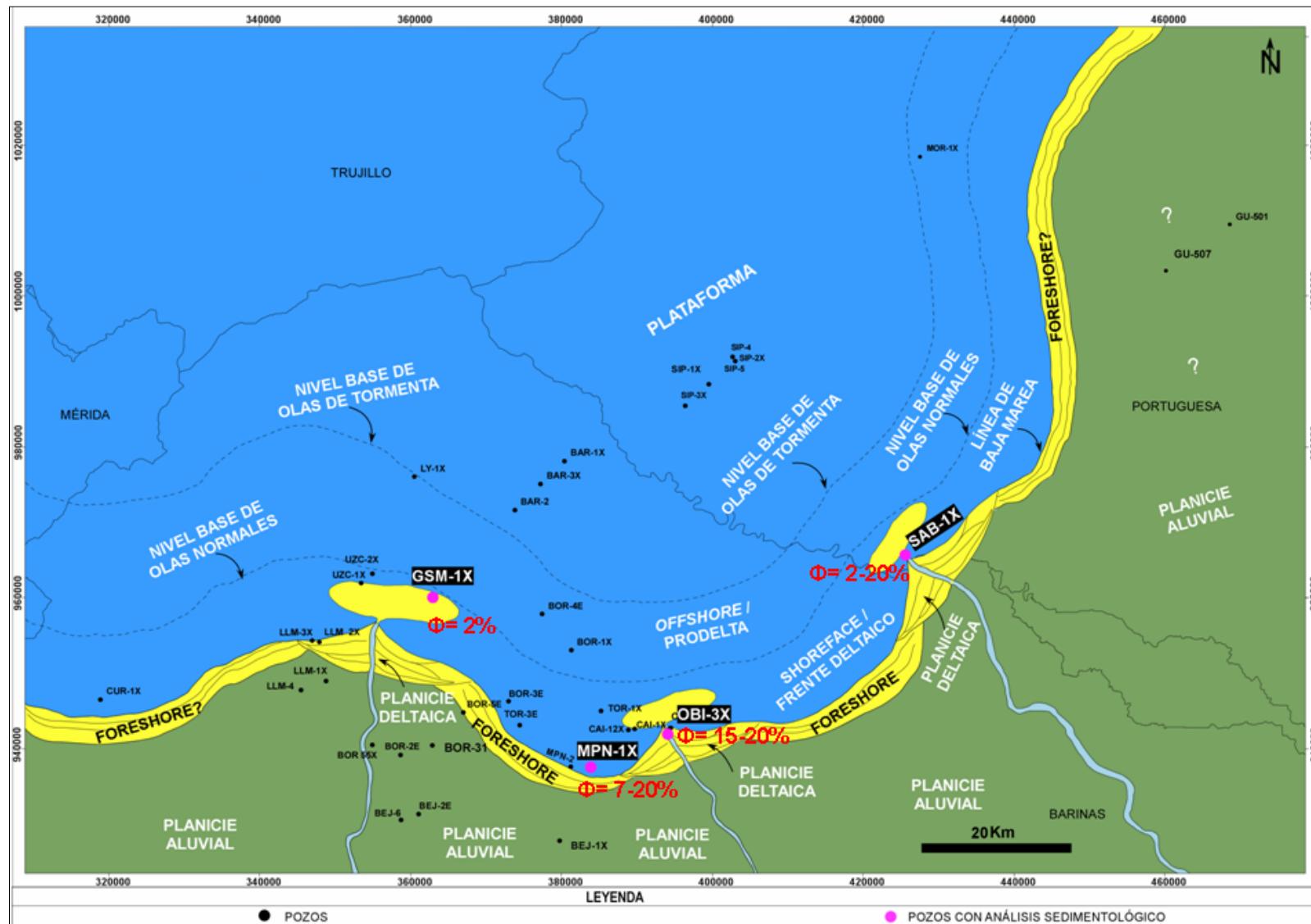


Figura 5.30. Porosidades visuales (indicadas en números rojos) y su relación con los depósitos en la Formación Burgüita.

5.17. Asociaciones de facies de la sección siliciclástica de la Formación Gobernador

La sección siliciclástica de la Formación Gobernador, en general, conforma una sucesión integrada por areniscas de grano muy grueso/conglomerático a fino, y de manera subordinada, lutitas/ arcilitas laminadas. Para esta unidad, se identificaron y caracterizaron cuatro (4) asociaciones de facies sedimentarias: 1) depósitos marinos abiertos (*shoreface* inferior); 2) depósitos fluvio-estuarinos incisos; 3) delta dominado por el oleaje?; y 3) delta dominado por procesos fluviales (Anexos 2, 3, 6, 8, 9, 10 y 11). A continuación se describen detalladamente:

5.17.1. Depósitos marinos abiertos transgresivos

Estos depósitos consisten predominantemente de areniscas de grano fino, intensamente bioturbadas (**Facies 24**) con abundantes granos de cuarzo tamaño conglomeráticos dispersos (pozo SIP-1X). Se reconocen *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Teichichnus* y *Ophiomorpha*. La base es erosiva y está delineada por *Thalassinoides* en icnofacies de *Glossifungites*.

En los pozos BEJ-1X y GSM-1X se caracterizan por areniscas de grano medio a grueso, con abundante matriz arcillosa y aspecto masivo, pobremente seleccionadas y con escasos foraminíferos grandes (**Facies 31**).

Interpretación: Las capas de areniscas intensamente bioturbadas reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2011), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. La relativamente moderada diversidad y alta abundancia de trazas fósiles sugieren ambiente de salinidad normal (*shoreface* inferior?). Los depósitos de grano grueso, pobremente seleccionados, reflejan alta energía. La superficie erosiva, delineada por la icnofacies de *Glossifungites*,

representa una superficie transgresiva de ravinamiento generada por la erosión del oleaje durante la subida relativa del nivel del mar. Esta superficie se encuentra amalgamada con la discordancia Cretácico-Eoceno Medio, representando una superficie coplanar (límite de secuencia-superficie de transgresión amalgamada).

5.17.2. Canales fluviales entrelazados

Estos depósitos presentan base erosiva, localmente delineadas por clastos conglomeráticos y consisten de areniscas de grano grueso/conglomerático a medio, tendencia granodecreciente con estratificación cruzada festoneada a planar, comúnmente con restos carbonosos en láminas y/o dispersos (**Facies F1, F2 y F3**). Se apilan formando sucesiones de 40 a 90 pies de espesor (Figura 5.31). No se observa bioturbación.

Localmente se intercalan capas de hasta 2 pies de espesor de arcillas carbonosas, micáceas, con laminación paralela y trazas de raíces (**Facies F7**). Los canales fluviales se disponen sobre depósitos marinos abiertos de *shoreface?* (Figura 5.31) y bancos carbonáticos en el pozo BEJ-1X.

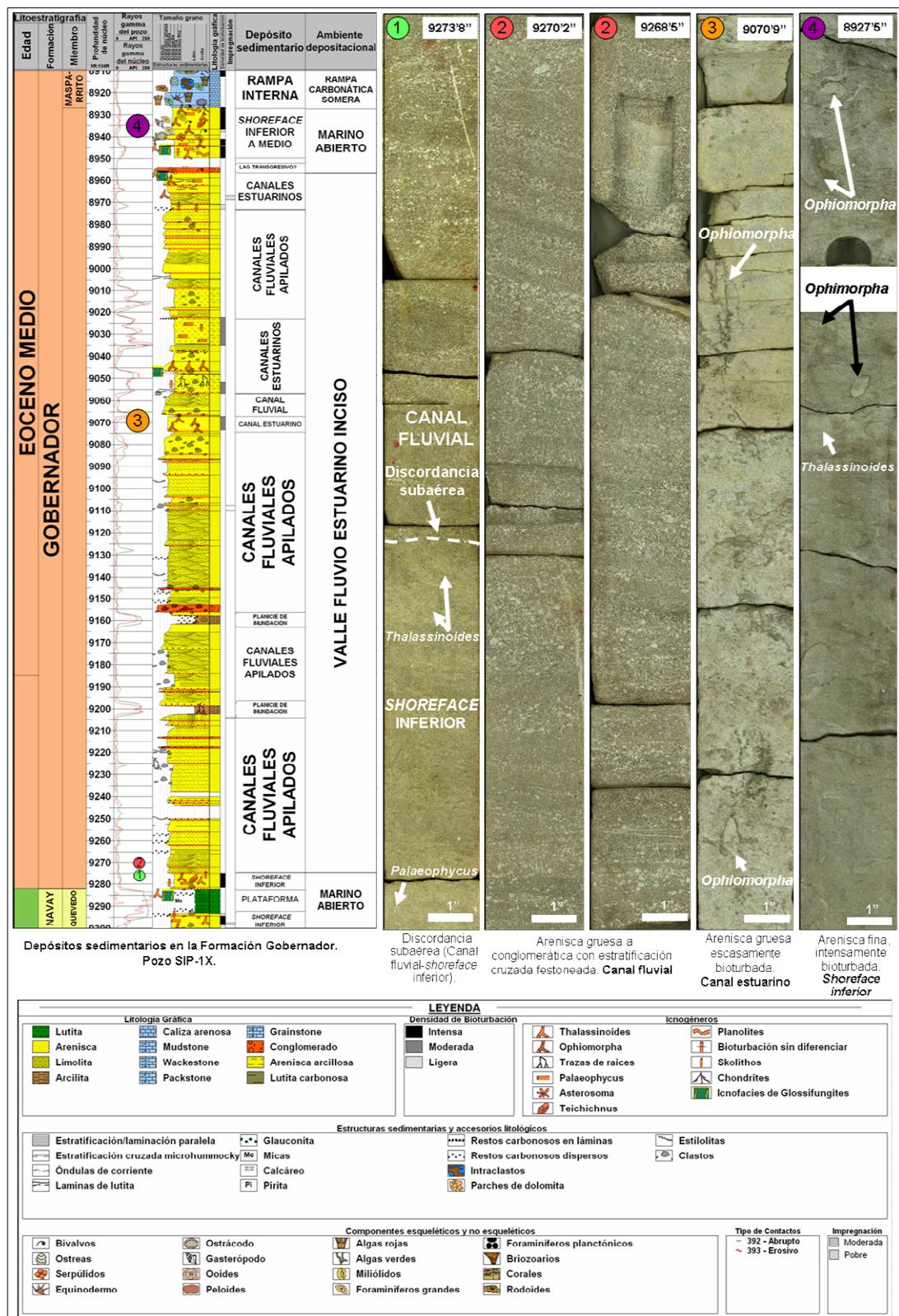


Figura 5.31. Depósitos fluvio-esturinos y marinos abiertos en la sección siliciclástica de la Formación Gobernador (pozo SIP-1X).

Interpretación: La estratificación cruzada planar y festoneada indica migración de dunas de crestas rectas (2D) y sinuosas (3D), respectivamente (Nichols, 2009). La base erosiva y la tendencia granodecreciente reflejan una acumulación en sistemas de canales (Bhattacharya y Walker 1992). La presencia de superficies erosivas internas y unidades amalgamadas indica el desarrollo de canales apilados (Buatois *et al.*, 2011). La ausencia de evidencias marinas, especialmente de bioturbación de organismos típicamente marinos y estructuras sedimentarias que indiquen acción de mareas, permiten interpretar que estos depósitos se acumularon en ambientes de agua dulce. La intercalación de arcilita carbonosa, con trazas de raíces hacia el tope de algunos canales fluviales, sugiere el abandono de los mismos y depositación en zonas de baja energía de la planicie de inundación. La disposición de los canales fluviales sobre depósitos marinos abiertos y marino marginales infrayacentes, que no presentan una relación genética (salto brusco de facies), sugiere incisión de canales fluviales durante una caída del nivel del mar.

5.17.3. Canales estuarinos

Estos depósitos se reconocen en el tramo superior de la sección siliciclástica de la Formación Gobernador (pozos SIP-1X y LLM-2X) y hacia la base de los pozos OBI-3X y SAB-1X. Consisten de areniscas predominantemente de grano grueso a fino, base erosiva y tendencia granodecreciente, con estratificación cruzada planar a festoneada y láminas de lodo (**Facies F9, F10, F11 y F12**). Forman sucesiones de 7 a 35 pies de espesor. Las bases de los canales en ocasiones están delineadas por *Thalassinoides* en icnofacies de *Glossifungites* (pozos SAB-1X y OBI-3X) (Figura 5.26). El grado de bioturbación es bajo, observándose ejemplares aislados de *Ophiomorpha* (Figura 5.31).

Interpretación: La depositación en canales se evidencia por la base erosiva, la estratificación cruzada y tendencia granodecreciente (Bhattacharya y Walker 1992). El bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés

ambiental posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad y alta energía. La superficie erosiva, delineada por la icnofacies de *Glossifungites*, representa una superficie transgresiva de ravinamiento, generada durante la subida relativa del nivel del mar.

5.17.4. Shoreface (anteplaya) inferior

Estos depósitos se reconocen en el tramo superior de la sección siliciclástica de la Formación Gobernador (pozo SIP-1X). Se disponen sobre los depósitos de canales estuarinos y consisten de areniscas predominantemente de grano muy fino a fino, intensamente bioturbadas, con escasos foraminíferos grandes, bivalvos, gasterópodos, serpúlidos y ostrácodos (**Facies F18**). La icnofauna está representada por *Thalassinoides*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Teichichnus*, *Chondrites*, *Planolites* y *Asterosoma*. Localmente presenta superficies internas de erosión, delineadas por *Thalassinoides* en icnofacies de *Glossifungites*. Forman sucesiones de 20 pies de espesor (Figura 5.31).

Interpretación: Las capas de areniscas con relativamente alta diversidad e intensa bioturbación, reflejan condiciones de sedimentación de baja energía en un ambiente estable, sin influencia de factores de estrés (Buatois *et al.*, 2011), en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. La presencia de foraminíferos grandes indican un ambiente marino de salinidad normal (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003). La base erosiva en algunos intervalos, delineada por icnofacies de sustratos firmes, representa una superficie transgresiva de ravinamiento, generada por la erosión del oleaje durante la subida relativa del nivel del mar.

5.17.5. Depósitos deltaicos dominados por olas?

Hacia el sur del área (pozo BEJ-1X), en el tramo inferior de la Formación Gobernador, se identificaron sistemas deltaicos, con desarrollo de depósitos de prodelta distal y frente deltaico distal a proximal.

Los depósitos muestran arreglos grano-estratocrecientes, integrados por una intercalación dominante de areniscas de grano muy fino a medio, de bases y topes transicionales/netos, intensamente bioturbadas, con restos vegetales frecuentes y lutitas laminadas a masivas.

La icnofauna en estos depósitos, presenta diversidad y abundancia similares a ambientes marinos abiertos de *shoreface* (anteplaya)-*offshore* (costa afuera). Sin embargo, desde el punto de vista sedimentológico, existen evidencias de dilución de la salinidad marina normal a partir de descargas de agua dulce, tales como grietas de sinéresis (Buatois *et al.*, 2012; Bhattacharya, 2006). En este sentido, los intervalos con materia orgánica particulada sugieren una conexión directa con sistemas fluviales, lo cual es consistente con la interpretación deltaica propuesta.

- **Prodelta proximal**

Estos depósitos consisten de una alternancia centimétrica de lutitas masivas o laminadas y de forma subordinada areniscas de grano muy fino, limosas, definiendo estratificación ondulosa (**Facies 30**). Localmente se observa materia orgánica particulada y láminas de lodo (*mud drapes*). La bioturbación es escasa a localmente intensa, con icnogéneros tales como *Palaeophycus*, *Thalassinoides* y *Teichichnus*.

Interpretación: El predominio de lutitas sobre las areniscas de grano muy fino, con estratificación ondulosa, indican una alternancia de sedimentación por decantación y tracción en un ambiente de baja energía (dominado por procesos de decantación). El bajo grado de bioturbación y la baja icnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental, posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad (Buatois *et al.*, 2012). Las láminas de lodo sugieren influencia de mareas (Walker, 2006).

- **Frente deltaico**

Estos depósitos consisten predominantemente de areniscas de grano muy fino a medio, intensamente bioturbadas, con frecuentes restos carbonosos dispersos o en láminas (**Facies 29**). Hacia la base se intercalan capas delgadas de lutitas. Presentan grietas de sinéresis y láminas de lodo (*mud drapes*). La bioturbación es intensa y la icnofauna está representada por *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Terebellina*, *Planolites*, *Asterosoma*, *Teichichnus*, *Ophiomorpha* y *Chondrites*. Estos depósitos presentan tendencia grano-estratocreciente y el espesor es de 42 pies (Figura 5.32).

Interpretación: Las capas de areniscas intensamente bioturbadas, reflejan condiciones de sedimentación de baja energía, en sectores inmediatamente por encima del nivel base de olas normales. Las grietas de sinéresis, sugieren la influencia de agua dulce asociada a floculación y contracción de las arcillas como resultado de cambios en la salinidad (Plummer y Gostin, 1981, citados en Bhattacharya, 2006). Los intervalos con materia orgánica particulada sugieren una conexión directa con sistemas fluviales.

La acción de las mareas queda evidenciada por la presencia de láminas de lodo (Walker, 2006) en las capas frontales de la laminación. La tendencia grano-estratocreciente, donde las facies de prodelta son reemplazadas de manera transicional por depósitos del frente deltaico, refleja eventos de regresión normal.

5.17.6. Depósitos deltaicos fluvio-dominados

En los pozos BEJ-1X, BOR-31 y LLM-2X, la Formación Gobernador en el tramo medio y superior, comprende sistemas deltaicos con fuerte influencia de procesos fluviales, principalmente con depósitos de canales distributarios entrelazados, acumulados principalmente en la planicie deltaica *subácuea*.

- **Canales distributarios entrelazados**

Estos depósitos presentan base erosiva, localmente delineadas por clastos conglomeráticos. Consisten de areniscas de grano grueso a fino, formando varios intervalos de clara tendencia granodecreciente con estratificación cruzada festoneada y planar, con frecuentes restos carbonosos dispersos o en láminas (**Facies F9 y F10**). Hacia el tope de los intervalos presenta areniscas de grano fino a muy fino con lamiación ondulítica de corriente (**Facies F11**). La bioturbación y láminas de lodo (*mud drapes*) se hacen más abundantes hacia el tope de los canales. La icnofauna está representada por ejemplares robustos de *Ophiomorpha* (pozo BEJ-1X), *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Teichichnus*, *Diplocraterion* y *Planolites*. Los depósitos de canales distributarios entrelazados forman sucesiones de 65 a 120 pies de espesor (Figura 5.32).

Hacia el suroeste (pozo BEJ-1X), se disponen de forma abrupta sobre los depósitos de frente deltaico desarrollados en un delta posiblemente dominado por olas. En los pozos BOR-31 y BEJ-1X, los cuerpos de canales distributarios presentan intensa impregnación de hidrocarburos (Figura 5.32).

Interpretación: La depositación en canales se evidencia por la base erosiva, la estratificación cruzada y tendencia granodecreciente (Bhattacharya y Walker 1992). La presencia de superficies erosivas internas y unidades amalgamadas indica el desarrollo de canales apilados (Buatois *et al.*, 2011). La acción de mareas es reflejada por la presencia de láminas de lodo (*mud drapes*) en las capas frontales de la estratificación cruzada. El bajo grado de bioturbación y la baja incnodiversidad, indican condiciones de estrés ambiental, posiblemente asociadas a fluctuaciones de salinidad y alta energía. La disposición de estos canales sobre depósitos de frente deltaico dominados por olas infrayacentes, que no presentan una relación genética (salto brusco de facies), sugiere una rápida progradación relacionada a una regresión forzada.

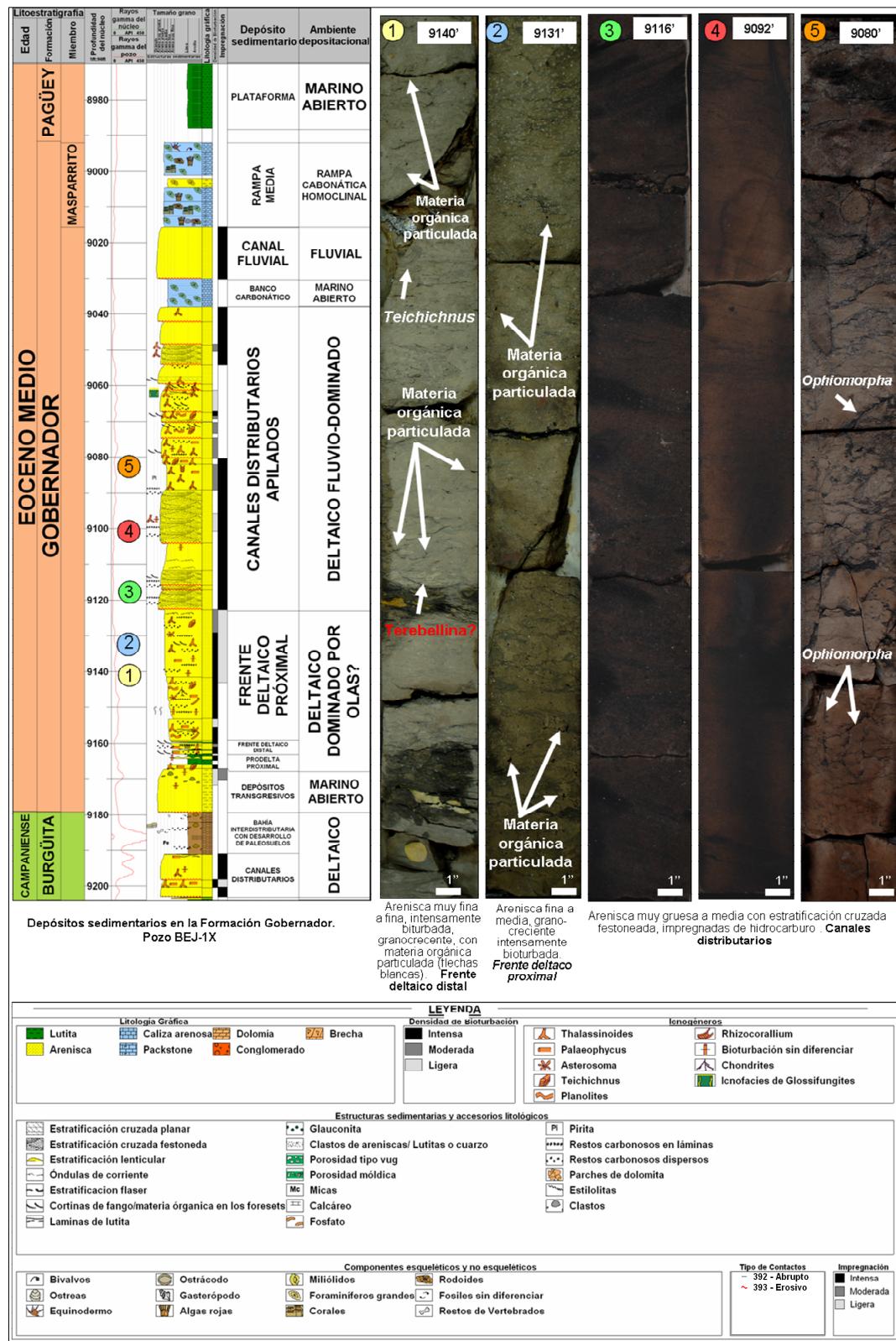


Figura 5.32. Depósitos deltaicos en la sección siliciclastica de la Formación Gobernador (pozo BEJ-1X).

5.18. Modelo sedimentológico de la sección siliciclástica de la Formación Gobernador

Al período de erosión/no depositación ocurrido a finales del Cretácico y durante el Paleoceno/Eoceno Temprano, debido a la colisión del Arco Volcánico del Pacífico y la Placa Suramericana y al emplazamiento de las Napas de Lara (Parnaud *et al.*, 1995), le sigue la sedimentación de la Formación Gobernador (Eoceno Medio), sobre un paleorelieve irregular, que probablemente influenció la organización de las facies en valles incisos y en zonas de interfluvio adyacentes (Bejarano, 2001). La base de la Formación Gobernador, representa una superficie coplanar (límite de secuencia-superficie de transgresión amalgamada) que delinea la discordancia Cretácico-Eoceno Medio. Esta superficie es claramente reconocida en los pozos SIP-1X, GSM-1X y SAB-1X.

La sedimentación de la sección basal de la Formación Gobernador (sección clástica) presenta importantes variaciones laterales de facies en el área. Hacia el noreste del área (pozo SIP-1X), corresponde principalmente a ambientes de valle fluvio-estuarino inciso, que apoyan de forma abrupta sobre depósitos marino abierto transgresivos de *shoreface* (anteplaya) inferior (areniscas intensamente bioturbadas). Los canales fluviales entrelazados, formados por potentes unidades arenosas granodecrescentes y bases erosivas, se acumularon durante un estadio del nivel del mar bajo (Figura 5.33). Estos canales incisos habrían alimentado sistemas deltaicos hacia la costa.

Hacia el suroeste y sureste (pozos BOR-31, BEJ-1X y LLM-2X), la sedimentación es mas distal, con desarrollo mayormente de canales distributarios entrelazados incisos, caracterizados por potentes cuerpos arenosos de bases erosivas y escasamente bioturbados, emplazados dominante en la planicie deltaica *subácuea*, relacionados a una rápida progradación, posiblemente a una regresión forzada.

Estos depósitos sobreyacen de forma abrupta sobre sistemas deltaicos posiblemente dominado por oleaje, con desarrollo principalmente de prodelta y frente deltaico, representando este contacto posiblemente una discordancia subaérea. Los depósitos de prodelta y frente deltaico muestran arreglos grano-estratocrecientes, integrados por una intercalación de areniscas intensamente bioturbadas y lutitas. La icnofauna presenta diversidad y abundancia similares a ambientes marinos abiertos de *shoreface* (anteplaya)-*offshore* (costa afuera), sin embargo, existen evidencias de dilución de la salinidad marina normal a partir de descargas de agua dulce, tales como grietas de sinéresis y abundantes restos vegetales.

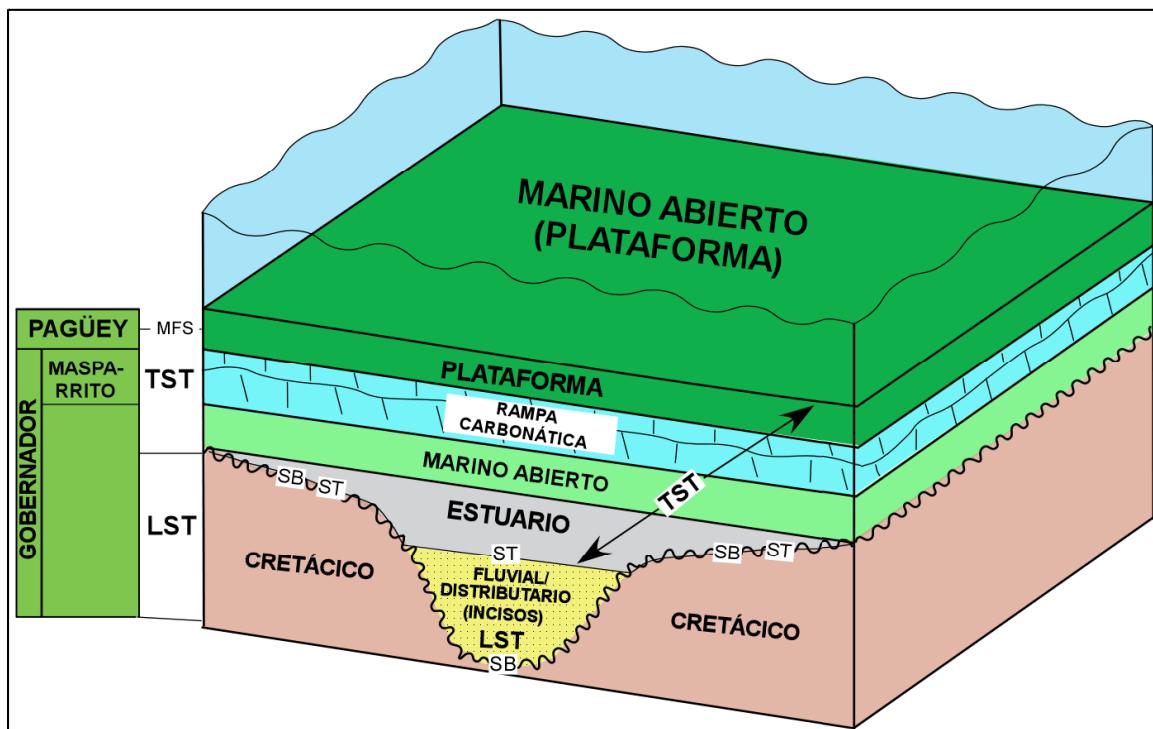


Figura 5.33. Modelo esquemático conceptual (sin escala) aplicable a la deposición de la sección siliciclastica de la Formación Gobernador. Referencias: discordancia subaérea (SB), superficie transgresiva (ST), superficie de máxima inundación (MFS), cortejo depositacional de nivel del mar bajo (LST), cortejo depositacional transgresivo (TST). Basado en Catuneanu *et al.* (2011).

Durante la fase transgresiva subsecuente, los canales fluviales y distributarios son reemplazados verticalmente por depósitos de canales estuarinos (pozos SIP-1X,

LLM-2X y BOR-31), caracterizados por areniscas de grano grueso a fino, escasamente bioturbadas y localmente fosilíferas (algas rojas y formainiferos grandes), estando restringidos al tope de la sucesión. Los canales se llenan finalmente con depósitos arenosos intensamente bioturbados, acumulados en ambientes marinos de *shoreface* (anteplaya) inferior (pozo SIP-1X) o son reemplazados por ambientes de rampa carbonática somera correspondientes al Miembro Masparrito (Figura 5.33). Hacia el noroeste (pozo GSM-1X) y noreste (pozo SAB-1X), no se desarrollaron depósitos fluviales por condiciones de *bypass* en el área (zonas de interfluvio).

La Figura 5.34 muestra la distribución de facies sedimentarias para el tope de la sección siliciclastica de la Formación Gobernador, donde se observa una diferenciación en las facies en el área de estudio. En los pozos OBI-3X y SIP-1X, la sedimentación está representada por un relleno de valle inciso con desarrollo principalmente de canales fluviales entrelazados. En el pozo SAB-1X se caracteriza por condiciones de *bypass* de sedimentos (interfluvio). En los pozos BEJ-1X, BOR-31 y LLM-2X, la sedimentación corresponde mayormente a canales distributarios entrelazados, desarrollados principalmente en la planicie deltaica *subácuea*. Los canales fluviales y deltaicos se acumularon durante un estadío del nivel del mar bajo.



Figura 5.34. Mapa de distribución de facies sedimentarias al tope de la sección siliciclástica de la Formación Gobernador.

5.19. Caracterización petrográfica de la sección siliciclástica de la Formación Gobernador

Para esta unidad se realizó el análisis petrográfico de 30 muestras de núcleos pertenecientes a los pozos SAB-1X, BOR-31, SIP-1X, LLM-2X, BEJ-1X y OBI-3X (Apéndices 2, 4, 5, 6, 8 y 11). Se identificaron tres (3) microfacies clásticas: arenitas cuarzosas, wacas cuarzosas y subarcosas de acuerdo a la clasificación de Pettijhon, Potter y Siever (1972). En el pozo SIP-1X se identificaron tres (3) microfacies de carbonatos de mezcla: areniscas micríticas, areniscas de aloquímicos y calizas de aloquímicos arenosas según la clasificación de Mount (1985).

Las microfacies siliciclásticas, están constituidas principalmente de cuarzo monocrystalino (57-80%), fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias (1-4%), feldespatos (albita y microclino), con porcentajes que alcanzan hasta 5% (subarcosas). La matriz es arcillosa entre 3 y 7% (en las wacas varía de 15 a 25%). El cemento es principalmente de silíce (1-8%) y calcita (2-4%). Otros componentes minoritarios son moscovita, circón y pirita que no superan el 3%. Texturalmente son areniscas que varían de grano fino a muy grueso, subangular a subredondeados y moderadas a bien escogidas. Los contactos entre granos son principalmente longitudinal, cóncavo-convexo, suturados y grano-matriz. La porosidad observada es de 3-25%, de origen primario y por disolución de matriz arcillosa y granos (Figura 5.35).

Los efectos diagenéticos identificados, permiten ubicarlos desde el dominio diagenético temprano hasta tardío. El principal proceso diagenético temprano corresponde a la cementación de calcita y silícea. Con respecto a los procesos tardíos son principalmente de disolución, tanto de la matriz arcillosa como de granos de feldespatos. Adicionalmente, se observa alteración de feldespatos a minerales de arcilla y compactación de granos dúctiles (micas). Según Surdam *et al.* (1989) la disolución de feldespatos se produce en zonas de intensa diagénesis (80-120°C)

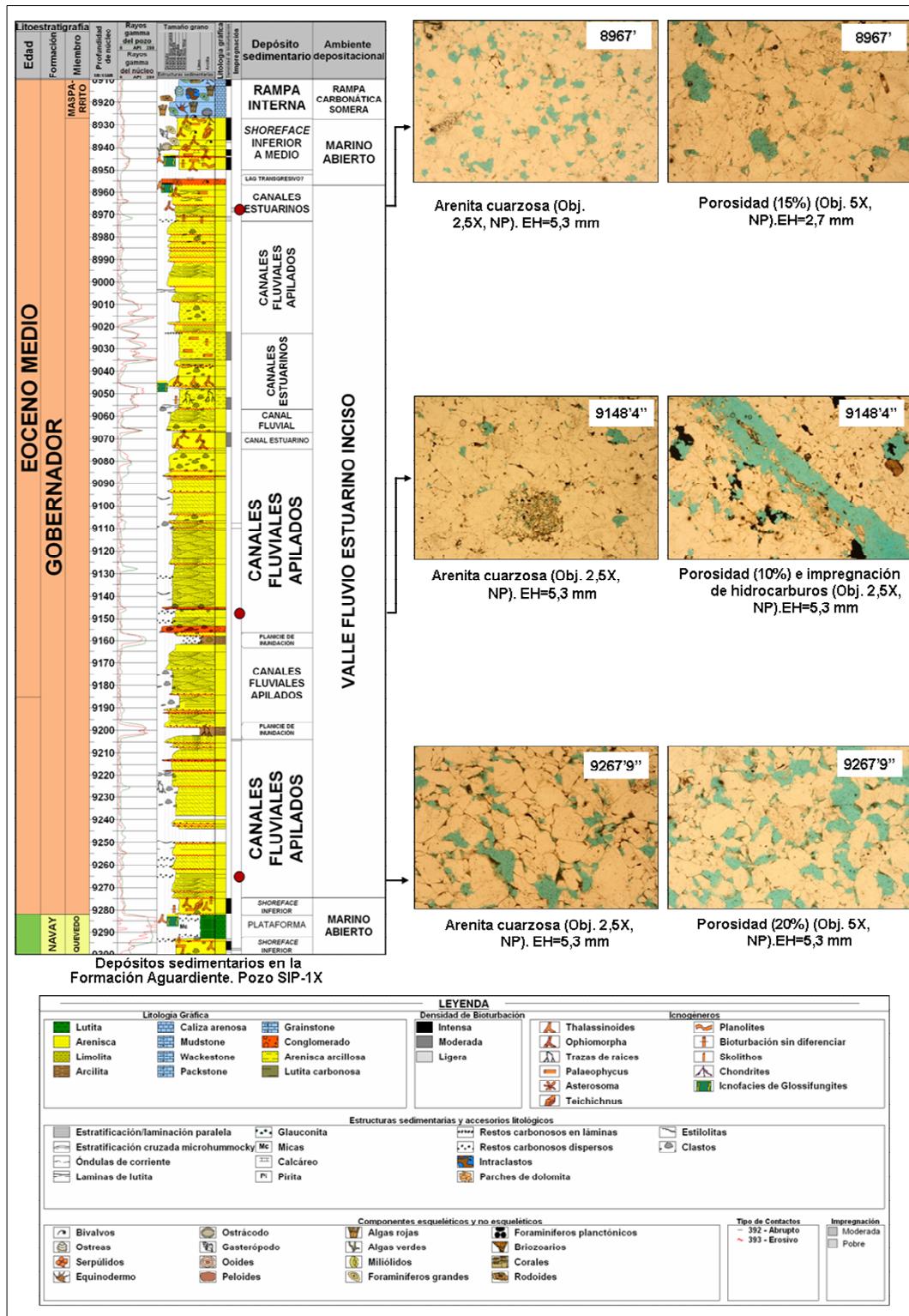


Figura 5.35. Aspectos texturales y composicionales de la sección siliciclastica de la Formación Gobernador (pozo SIP-1X).

En las microfacies de carbonatos de mezcla el principal ortoquímico es la micrita, (10-15%). Los aloquímicos (12-29%) están representados por pelecípodos, foraminíferos bentónicos, equinodermos e intraclastos. La fracción siliciclástica está compuesta por cuarzo monocristalino entre 39 y 53%, con tamaño de grano muy fino a muy grueso. La porosidad es de 1 a 10%.

En cuanto al potencial como rocas reservorio, los cuerpos arenosos de canales fluviales y canales distributarios (pozos SIP-1X, BEJ-1X, BOR-31 y SAB-1X), representan las facies de mayor calidad, con porosidades de origen primario y secundario (disolución de matriz arcillosa y feldespatos) que alcanzan hasta un 25% (Figura 5.36). En los pozos BEJ-1X y BOR-31, estos depósitos presentan moderada a intensa impregnación de hidrocarburos.

Sin embargo, los depósitos de *shoreface* (anteplaya) inferior (pozo SIP-1X) y localmente los canales distributarios (pozo LLM-2X), poseen baja a moderada calidad como rocas reservorios, con porosidades de 1 a 10%. La abundante matriz arcillosa, la cementación de calcita así como la intensa actividad de organismos infaunales, con destrucción de la fábrica primaria, son factores que disminuyeron considerablemente la calidad como reservorios de estos depósitos.

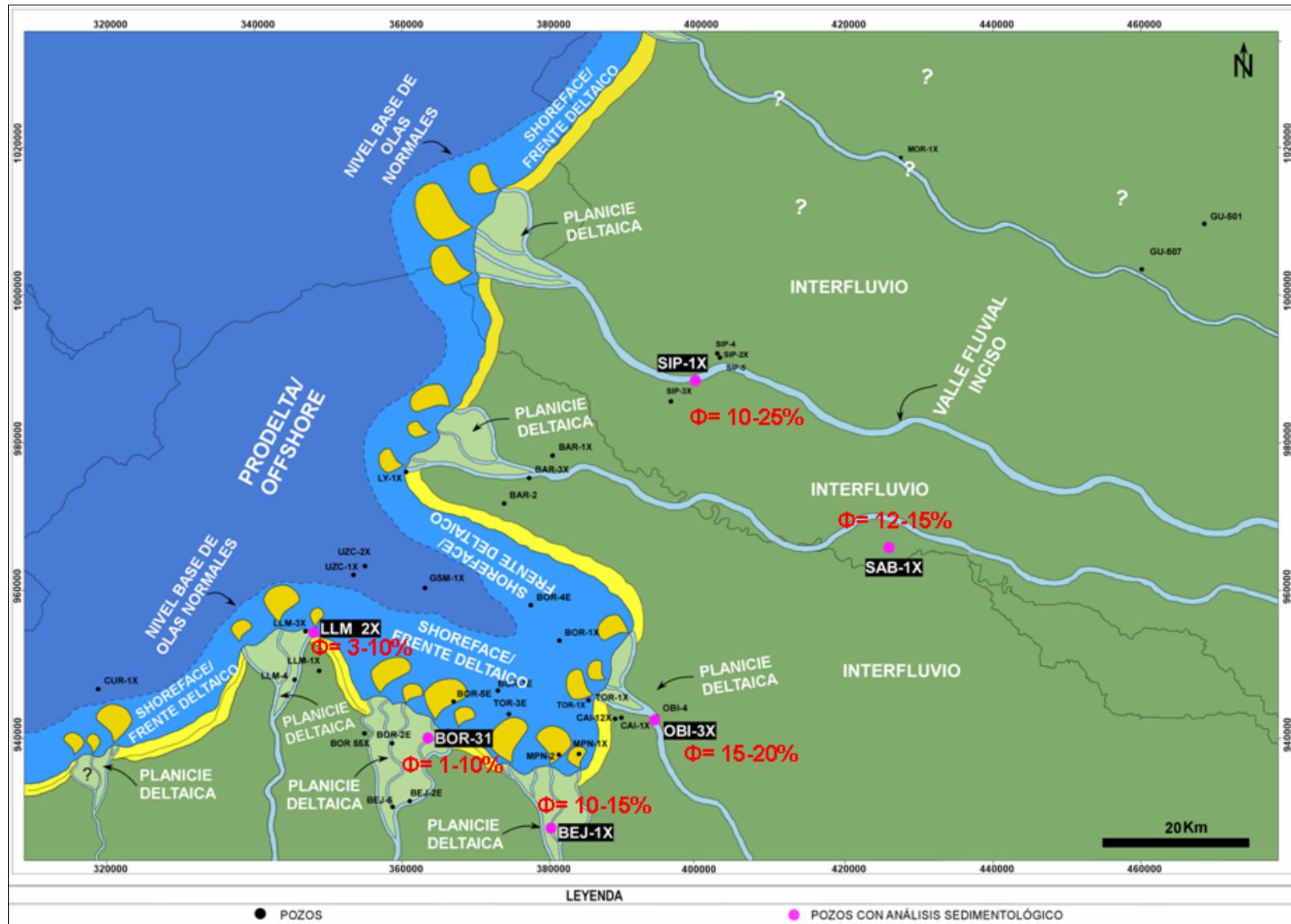


Figura 5.36. Porosidades visuales (indicadas en números rojos) y su relación con los depósitos en la sección siliciclástica de la Formación Gobernador.

5.20. Asociaciones de facies del Miembro Masparrito de la Formación Gobernador (sección carbonática)

El Miembro Masparrito de la Formación Gobernador está caracterizada por una alternacia de calizas masivas de texturas principalmente tipo *packstone* y *wackestone* de foraminíferos, algas rojas que ocasionalmente forman rodolitos y moluscos indeterminados (bivalvos, ostreas y gasterópodos). La fracción silicástica es escasa a moderada, siendo más abundante en el tramo inferior de la unidad. Presenta un espesor variable de 8 (pozo BOR-31) a 233 pies (pozo SAB-1X). Se reconocieron dos (2) asociaciones de facies sedimentarias: 1) rampa carbonática interna; 2) rampa carbonática media (Anexos 2, 6, 8, 9 y 10).

5.20.1. Rampa carbonática interna

Se disponen sobre depósitos estuarinos y comprenden calizas arenosas de grano medio a grueso y aspecto masivo (**Facies F32**), con abundantes bivalvos indeterminados (Figura 5.37) y escaso a moderado contenido de algas rojas (**Facies F33**) que ocasionalmente forman rodolitos, foraminíferos grandes, miliólidos y briozoarios. Los bioclastos se disponen sin orientación preferencial, generalmente flotando en la matriz micrítica, y se presentan comúnmente desarticulados y fragmentados, con tamaños mayores a 2 mm. Localmente se observa dolomitización y abundante porosidad móldica y tipo *vug* (rellenas de hidrocarburos). La base es neta o erosiva, delineada por *Thalassinoides* en icnofacies de *Glossifungites*.

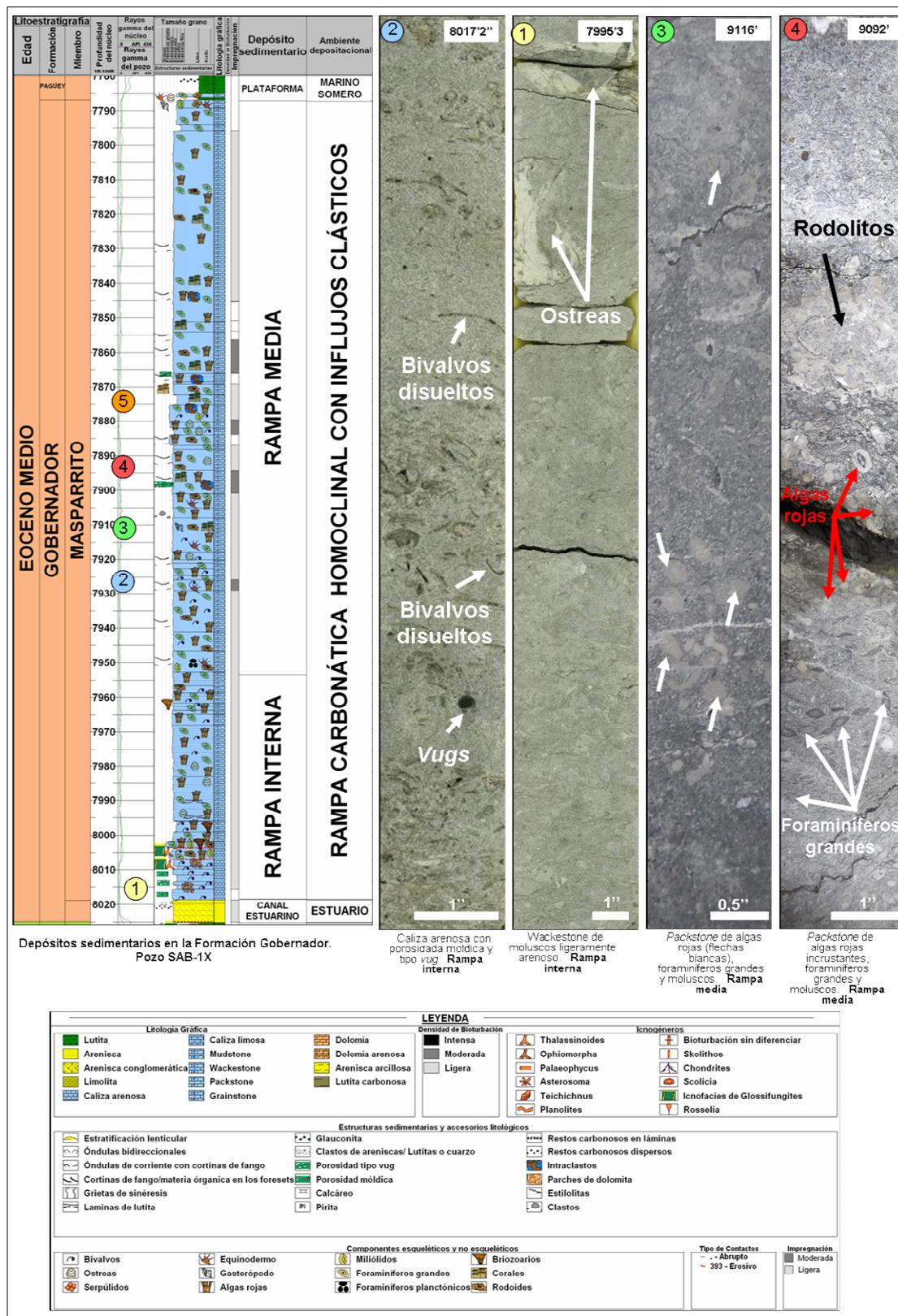


Figura 5.37. Aspectos texturales y composicionales de los depósitos de rampa interna a media del Miembro Masparrito de la Formación Gobernador (pozo SAB-1X).

Interpretación: La abundancia de clásticos gruesos en una matriz carbonática (ocasionalmente dolomitizada), indica un ambiente de deposición de rampa carbonática fangosa, interrumpida en ocasiones por influjos clásticos de alta energía de un sistema marino marginal o por eventos de tormentas. La relativa abundancia de miliólidos (pozo SAB-1X) sugiere sedimentación en condiciones de aguas someras. El carácter desarticulado y fragmentado de los bioclastos, indica retrabajo y transporte por corrientes o eventos de tormentas. La base erosiva de estos depósitos, delineada por icnofacies de sustratos firmes (icnofacies de *Glossifungites*) y su disposición sobre ambientes marinos marginales, se interpreta como el producto del ravinamiento del oleaje durante una retrogradación de la línea de costa (Buatois *et al.*, 2011).

5.20.2. Rampa carbonática media

Están constituidos dominanteamente de calizas masivas de textura tipo *packstone* y *wackestone* de foraminíferos y algas rojas (**Facies F37, F38 y F39**) que ocasionalmente forman rodolitos y, de forma subordinada, bivalvos, ostreas y gasterópodos (**Facies F35, F42 y F43**). Entre los foraminíferos, destaca la abundancia de foraminíferos grandes (principalmente de los géneros *Nummulites*, *Lepidocyclusina*, *Discocyclusina*, *Amphistegina* y *Operculinoides*) y, de forma subordinada, miliólidos y foraminíferos planctónicos. Las algas pertenecen principalmente a los géneros *Lithothamnium*, *Archeolithothamnium* y *Sporolithon*. Otras partículas carbonáticas esqueletales presentes de forma subordinada son: equinodermos, serpúlidos, ostrácodos, briozoarios y fragmentos de corales (**Facies F40 y F41**). Los intraclastos, peloides y cortoides son los componentes carbonáticos no esqueletales más abundantes (Figura 5.37). La fracción clástica es escasa a moderada, así como el contenido de glauconita. Los bioclastos se disponen sin orientación preferencial, frecuentemente flotando en la matriz micrítica, y se presentan comúnmente fragmentados (algas y moluscos) y bioerosionados. La fracción clástica es moderada a abundante (pozos LLM-2X, SIP-1X, BOR-31 y base de SAB-1X). La bioturbación

es escasa, localmente con trazas de *Thalassinoides*. Se observan comúnmente estilolitas de baja amplitud.

Interpretación: El dominio de calizas con abundante lodo calcáreo, sin estructuras sedimentarias tractivas, sugiere deposición en un ambiente de baja energía. La asociación de organismos bentónicos, dominada por constituyentes oligofóticos tales como los rotálicos grandes (mixótrofos) y algas rojas (autótrofos), indica sedimentación en zonas de rampa carbonática fangosa (rampa media) por debajo del nivel base de olas de buen tiempo (Pomar, 2001). El carácter desarticulado y fragmentado de los bioclastos, indica retrabajo y transporte por corrientes o eventos de tormentas. Los rotálicos grandes formaban bancos (*shoals*) carbonáticos alargados y relativamente estrechos en las plataformas, por acumulación de muy pocas especies y asociados a otros organismos como algas calcáreas, briozoarios, entre otros (Molina, 2004), tal como es el caso del área de estudio durante el Eoceno Medio. La presencia localizada de foraminíferos plactónicos sugiere condiciones de mar abierto. Por otro lado, el material terrígeno sugiere la coexistencia de una rampa carbonática interrumpida ocasionalmente por influjos clásticos proveniente de áreas emergidas, posiblemente durante eventos de tormentas o por descarga de un sistema marino marginal.

5.21. Modelo sedimentológico del Miembro Maspalito de la Formación Gobernador (sección carbonática)

Durante el avance de la transgresión en el Eoceno Medio, los depósitos de ambientes estuarinos y marinos abiertos (*shoreface*) de la sección clástica de la Formación Gobernador, pasan verticalmente a depósitos acumulados en una rampa carbonática somera correspondiente al Miembro Maspalito (Figura 5.38), con generación de bancos carbonáticos con abundantes foraminíferos grandes, algas rojas y moluscos. Este sistema carbonático se caracterizaba por una sedimentación dominante en zonas de rampa media (entre el nivel base de olas normales y de tormentas), que de

forma episódica recibía influjos clásticos de áreas emergidas adyacentes, posiblemente durante eventos de tormentas o por descarga de un sistema clástico marino marginal, siendo más importante (más cercano a la costa) hacia el suroeste del área (pozos LLM-2X y BOR-31), generando una sedimentación de tipo mixta siliciclástica-carbonática. Hacia el noreste (pozos SAB-1X y SIP-1X), donde la influencia siliciclástica fue menor, se caracterizó por una sedimentación dominanteamente carbonática con desarrollos de los mayores cuerpos carbonáticos. No se observaron depósitos generados por flujos gravitativos de sedimentos, siendo los cambios verticales de facies relativamente graduales, sugiriendo una depositación en ambientes carbonáticos de bajo gradiente, típicamente de rampa homoclinal (Red, 1982).

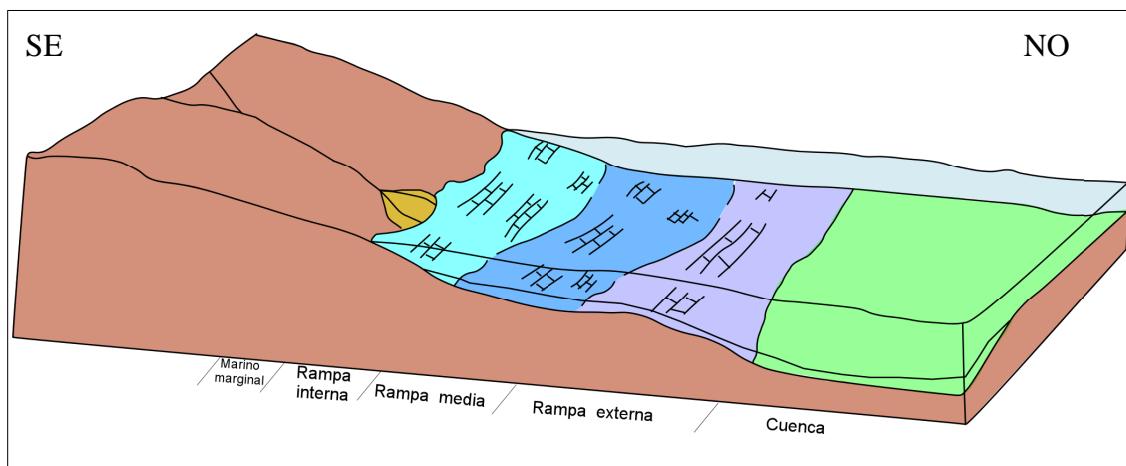


Figura 5.38. Modelo sedimentológico conceptual para el Miembro Masparrito de la Formación Gobernador. Dominan los ambientes de rampa media.

La Figura 5.39 muestra la distribución de facies sedimentarias a nivel del Miembro Masparrito de la Formación Gobernador, donde se observa una sedimentación dominante en una rampa carbonática media, con desarrollo de depósitos principalmente de bancos carbonáticos en los campos Sipororo (SIP-1X), Bejucal (BEJ-1X) y Sabaneta (SAB-1X), donde alcanza su mayor desarrollo. Hacia el sur y suroeste (pozos LLM-2X y BOR-31), los depósitos del Miembro Masparrito se caracterizan por una sedimentación de tipo mixta, donde coexiste el desarrollo de una rampa carbonática interrumpida frecuentemente por influjos siliciclásticos.

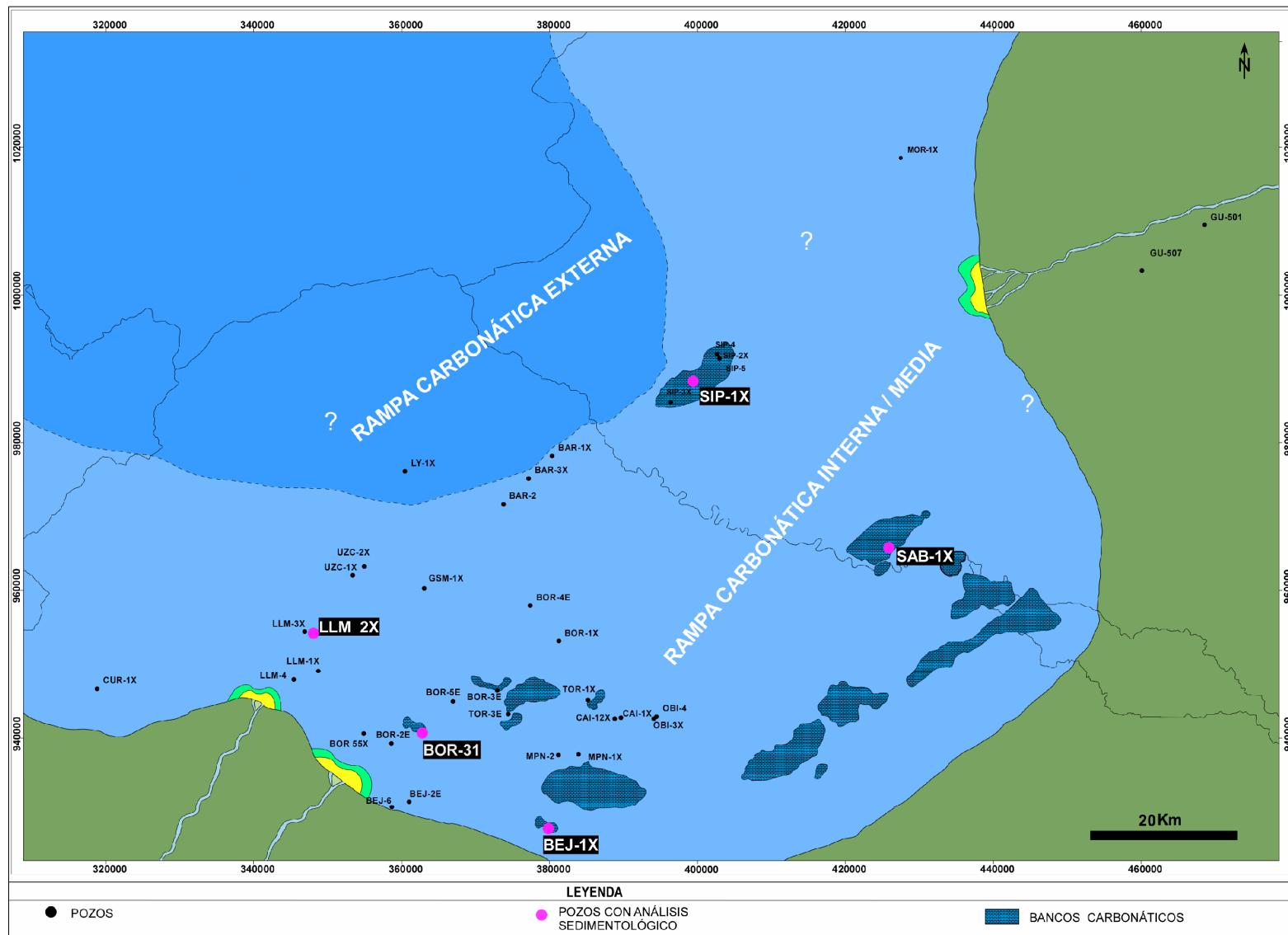


Figura 5.39. Mapa de distribución de facies al tope del Miembro Masparrito de la Formación Gobernador, acumulada principalmente en ambiente de rampa media.

Para la determinación de la geometría y extensión de estos bancos se utilizó el análisis de atributos sísmicos realizado por Baptista *et al.* (2015), donde las altas amplitudes y alta impedancia, fueron asociadas a cuerpos carbonáticos (Figura 5.40)

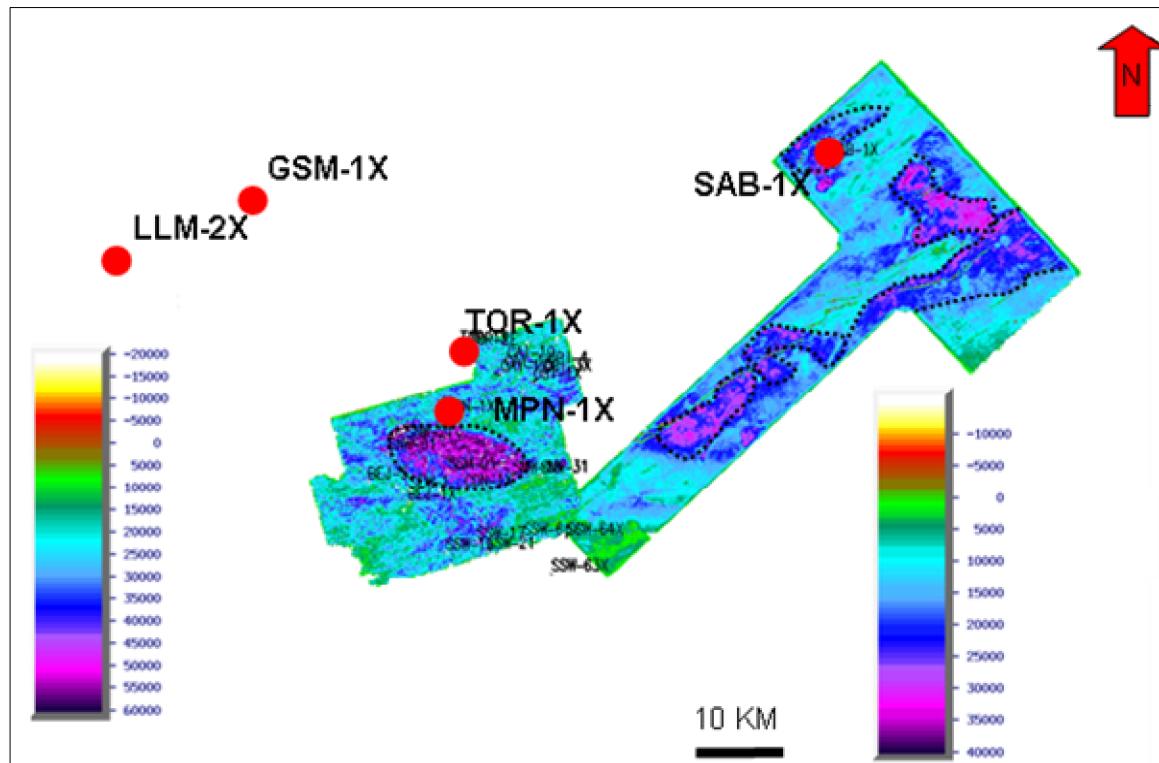


Figura 5.40. Extracción de Amplitud (máximo positivo) al tope del Miembro Masparrito de la Formación Gobernador. Las zonas de altas amplitudes (en líneas punteadas), se asocian con bancos carbonáticos (Baptista *et al.*, 2015).

5.22. Caracterización petrográfica del Miembro Masparrito de la Formación Gobernador

Para esta unidad se realizó el análisis petrográfico de 65 muestras de núcleos pertenecientes a los pozos SAB-1X, BOR-31, SIP-1X, LLM-2X y BEJ-1X (Apéndices 2, 4, 5, 6 y 11). Se identificaron tres (3) microfacies de carbonatos puros: *wackestone/packstone* y muy ocasionalmente *grainstone* de foraminíferos grandes, algas rojas y moluscos, *wackestone* de algas rojas y peloides, y *wackestone/packstone*

de algas rojas, foraminíferos grandes y corales según Dunham (1962); tres (3) microfacies de carbonatos de mezcla: arenisca de aloquímicos, caliza de aloquímicos arenosa/lodosa y arenisca micrítica (dolomitizada) según la clasificación de Mount (1985); y tres (3) microfacies siliciclásticas: waca cuarzosa, waca lítica y arenita cuarzosa de acuerdo a la clasificación de Pettijhon, Potter & Siever (1972).

En las microfacies carbonáticas, los aloquímicos (34-92%) más abundantes corresponden a rotálicos grandes (*Nummulites*, *Lepidocyclina*, *Discocyclina* y *Amphistegina*), algas rojas (*Lithothamnium*, *Archeolithothamnium* y *Sporolithon*) y bivalvos. De forma subordinada presenta equinodermos, gasterópodos, ostreas, corales, foraminíferos planctónicos, peloides e intraclastos. El principal ortoquímico es la micrita (5-45%). Presenta cuarzo de grano fino, glauconita, fosfato y pirita como componentes no carbonáticos en porcentajes que no superan el 5%. La porosidad observada varía de 1 a 3%, ocasionalmente alcanza el 12%, principalmente de tipo intrapartícula, móldica y por disolución de matriz micrítica (Figura 5.41).

En las microfacies de carbonatos de mezcla el principal ortoquímico es la micrita (11-40%). Los aloquímicos están representados principalmente por rotálicos grandes (*Nummulites*, *Lepidocyclina*, *Discocyclina* y *Amphistegina*) y bivalvos. De forma subordinada presentan gasterópodos, algas rojas y equinodermos. La fracción siliciclástica está compuesta por cuarzo monocristalino (10-66%), con tamaño de grano que varía entre arena muy fina a muy gruesa. En el pozo SAB-1X, la matriz micrítica se encuentra dolomitizada. En el pozo SAB-1X, la porosidad oscila entre 15 a 30% y es de tipo vugular (oquedad) y móldica, comúnmente con impregnación residual de hidrocarburos; mientras que en los pozos SIP-1X y LLM-2X, la porosidad es baja y oscila entre 1 a 3%.