

**CONTRIBUCIÓN AL MODELO DE EVOLUCIÓN DE AMBIENTES
SEDIMENTARIOS Y DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS
FACIES SEDIMENTARIAS EN LA ZONA NORTE DEL VALLE
MEDIO DEL MAGDALENA A PARTIR DE LA INTERPRETACIÓN DE
REGISTROS DE POZO Y MUESTRAS DE ZANJA**

ESNEIDER ALVAREZ GÓMEZ
ESTEBAN GONZÁLEZ CARVAJAL

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GEÓLOGO

Asesor

ALEJANDRO IVÁN BELTRÁN-TRIVIÑO

Co-asesor

CARLOS ALBERTO ROMERO GARZÓN

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN**

2021

CONTENIDO

1. RESUMEN.....	12
2. INTRODUCCIÓN.....	13
3. OBJETIVOS.....	16
GENERAL.....	16
ESPECÍFICOS.....	16
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN:.....	17
HIPÓTESIS:.....	17
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
5. JUSTIFICACIÓN.....	19
6. MARCO TEÓRICO.....	20
EVOLUCIÓN TECTÓNICA.....	20
ESTRATIGRAFÍA.....	23
Formación Rosa Blanca.....	23
Formación La Paja.....	24
Formación Tablazo.....	25
Formación Simití.....	25
Formación La Luna.....	25
Formación Umir.....	25
Formación Lisama.....	25
Formación La Paz.....	26
Formación Esmeraldas.....	26
Formación Mugrosa.....	26

Formación Colorado	26
Formación Real	27
Formación Mesa	27
7. METODOLOGÍA	28
INTERPRETACIÓN REGISTROS DE POZO	29
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DE ZANJAS	33
8. RESULTADOS	37
POZO ACORDIONERO-10	37
Intervalo Estratigráfico A1	37
Intervalo Estratigráfico A2	40
Intervalo Estratigráfico A3	43
Intervalo Estratigráfico A4	44
Intervalo Estratigráfico A5	48
Intervalo Estratigráfico A6	50
Intervalo Estratigráfico A7	53
Intervalo Estratigráfico A8	55
Intervalo Estratigráfico A9	57
Intervalo Estratigráfico A10	58
POZO MONOARAÑA-1	60
Intervalo Estratigráfico M1	60
Intervalo Estratigráfico M2	63
Intervalo Estratigráfico M3	65
Intervalo Estratigráfico M4	67
Intervalo Estratigráfico M5	69

Intervalo Estratigráfico M6	72
Intervalo Estratigráfico M7	74
Intervalo Estratigráfico M8	76
Intervalo Estratigráfico M9	77
Intervalo Estratigráfico M10	79
9. DISCUSIÓN.....	81
10. CONCLUSIONES	95
11. REFERENCIAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Círculos de colores verde y rojo indican la ubicación de los pozos estudiados en este trabajo.	15
Figura 2. Evolución tectónica esquemática del VMM (modificado de Sarmiento-Rojas, 2011).	22
Figura 3. Estratigrafía general del norte de la cuenca del VMM (modificado de Prince et al. 2018).	24
Figura 4. Cuadro resumen de las principales características de las electrofacies identificadas a partir de GR y Resistividad (modificado de Uličný et al. 2009).	32
Figura 5. Clasificación de las geometrías de los registros GR (modificado de Nazeer et al. 2016).	33
Figura 6. Clasificación del tamaño de grano basado en Wentworth (1922), Udden (1898) y Folk (1980). (Modificado de Farrell et al. 2009).	34
Figura 7. Escala de selección de clastos de arena (modificado de Compton, 1962).	35
Figura 8. Tabla comparativa para la clasificación del grado de redondez y esfericidad de arenitas. Basado en Powers (1953). (Tomado de Corbí y Martínez., 2015).	35

Figura 9. a) Registro GR (unidades API) del intervalo estratigráfico A1 entre los 3400ft y 3900ft (la línea roja marca el cambio de la electrofacies) **b)** Registro GR (unidades API) entre 3900ft y 4450ft cambio entre el intervalo A1 y A2 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo estratigráfico A1 y A2) **c)** Fotografía intervalo A1 en 3800ft **d)** Fotografía intervalo A2 en 4000ft. 39

Figura 10. a) Registro GR (unidades API) entre los 3990ft y 4540ft cambio del intervalo estratigráfico A1 y A2 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A1 y A2) **b)** Registro GR (unidades API) del intervalo estratigráfico A2 entre los 4480ft y 5030ft (la línea roja marca el cambio de la electrofacies) **c)** Registro GR (unidades API) entre 4990ft y 5530ft. cambio entre el intervalo estratigráfico A2, A3 y A4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A2, A3 y A4.). **c)** Fotografía del intervalo A2 en 4300ft **d)** Fotografía del intervalo A2 en 4900ft. 42

Figura 11. a) Fotografía intervalo A3 en 5300ft **b)** Fotografía intervalo A3 en 5430ft. 44

Figura 12. a) Registro GR (unidades API) entre los 5550ft y 6040ft intervalo A4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A4 y A5. Mientras, la línea roja el cambio de las electrofacies) **b)** Registro GR (unidades API) entre los 6000ft y 6540ft intervalo A4 **c)** Registro GR entre los 6480ft y 7030ft intervalo A4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A4 y A5. Mientras, la línea roja el cambio de las electrofacies). **d)** Fotografía intervalo A4 en 5560ft **e)** Fotografía intervalo A4 en 6400ft. 47

Figura 13. a) Registro GR (unidades API) entre los 6870ft y 7450ft intervalos estratigráficos A4, A5 y A6 (las líneas negras marcan los cambio aproximado entre los intervalos A4, A5 y A6. Mientras la líneas rojas el cambio de electrofacies) **b)** Fotografía intervalo A5 en 7030ft. **c)** Fotografía intervalo A5 en 7080ft. 49

Figura 14. a) Registro GR (unidades API) entre los 7400ft y 7950ft intervalo estratigráfico A6 **b)** Registro GR (unidades API) entre los 7870ft y 8420ft intervalo A6 y A7 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A6 y A7. Mientras la línea roja marca el cambio de electrofacies). **c)** Fotografía intervalo A6 en 7210ft **d)** Fotografía intervalo A6 en 7910ft. 52

Figura 15. a) Registro GR (unidades API) entre los 8270ft y 8830ft intervalos estratigráficos A7 y A8 (las líneas negras marcan el cambio aproximado entre el intervalo A7 y A8) **b)** Registro GR (unidades API) entre los 8660ft y 9200ft intervalos A7, A8 y A9 (las líneas negras marcan el cambio aproximado entre los intervalos estratigráficos A7, A8 y A9. Mientras las líneas rojas el cambio de electrofacies). **c)** Fotografía intervalo estratigráfico A7 en 8410ft **d)** Fotografía intervalo estratigráfico A7 en 8660ft. 54

Figura 16. a) Fotografía intervalo estratigráfico A8 en 8880ft. **b)** Fotografía intervalo estratigráfico A9 en 9200ft..... 57

Figura 17. a) Registro GR (unidades API) entre los 8980ft y 9420ft intervalos estratigráficos A8, A9 y A10 (las líneas negras marcan el cambio entre los intervalos A8, A9 y A10). **b)** Fotografía intervalo A10 en 9320 ft. **c)** Fotografía intervalo A10 en 9420ft. 59

Figura 18. a) Registro GR (unidades API) entre los 1500ft y 1910ft Intervalo estratigráfico M1 **b)** Registro GR (unidades API) entre los 2000ft y 2410ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo M1 y M2) **c)** Fotografía intervalo M1 en 1560ft **d)** Fotografía intervalo M1 en 750ft..... 62

Figura 19. a) Registro GR (unidades API) entre los 2430ft y 2740ft intervalo estratigráfico M2 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo estratigráfico M1 y M2) **b)** Registro GR (unidades API) entre los 3200ft y 3610ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo M2 y M3. Mientras, la línea roja marca el cambio de las electrofacies) **c)** Fotografía M2 en 2730ft **d)** Fotografía M2 en 3540ft. 64

Figura 20. a) Registro GR (unidades API) entre los 3600ft y 4000ft intervalo estratigráfico M3 **b)** Registro GR (unidades API) entre los 4200ft y 4600ft intervalo estratigráfico M3 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo M3 y M4) **c)** Fotografía M3 en 4080ft **d)** Fotografía M3 en 4230ft. 66

Figura 21. a) Registro GR (unidades API) entre los 4500ft y 4900ft intervalo estratigráfico M4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M3 y M4; M4 y M5. Mientras, la línea roja marca el cambio de la electrofacies). **b)** Fotografía M4 en 4820ft **c)** Fotografía M4 en 4680ft. 68

Figura 22. a) Registro GR (unidades API) entre los 4900ft y 5300ft intervalo estratigráfico M5 **b)** Registro GR (unidades API) entre los 5300ft y 5700ft intervalo estratigráfico M5 (la línea negra marca el cambio aproximado entre M5 y M6.

Mientras, la línea roja marca el cambio de las electrofacies) **c)** Fotografía M5 en 4940ft **d)** Fotografía M5 en 5230ft..... 71

Figura 23. a) Registro GR (unidades API) entre los 5660ft y 6080ft intervalo estratigráfico M6 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M5 y M6) **b)** Registro GR (unidades API) entre los 6700ft y 7110ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre M6 y M7) **c)** Fotografía M6 en 6370ft **d)** Fotografía M6 en 6790ft..... 73

Figura 24. a) Registro GR (unidades API) entre los 7100ft y 7510ft intervalo estratigráfico M7 **b)** Registro GR entre los 8700ft y 9110ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M7 y M8) **c)** Fotografía intervalo M7 en 8590ft. 75

Figura 25. Fotografía intervalo M8 en 9280ft..... 77

Figura 26. a) Registro GR (unidades API) entre los 9100ft y 9510ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo estratigráfico M9 y M10. Mientras, las líneas rojas marcan el cambio de las electrofacies) **b)** Fotografía intervalo M9 en 9360ft. 78

Figura 27. a) Registro GR (unidades API) entre los 9350ft y 97600ft intervalo estratigráfico M10 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M9 y M10) **b)** Fotografía intervalo M10 en 9680ft. 80

Figura 28. Interpretación de ambiente sedimentario para Acordionero-10 (punto negro) y Monoaraña-1 (punto rojo) durante el Paleoceno. 83

Figura 29. Correlación de los intervalos estratigráficos para Acordionero-10 y Monoaraña-1 con las unidades estratigráficas presentes en el VMM.	88
Figura 30. Correlación estratigráfica interpretada por este trabajo entre los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1.....	91
Figura 31. Evolución interpretada de los ambientes en la zona de estudio entre el Oligoceno tardío al Mioceno tardío.....	92
Figura 32. Evolución interpretada de los ambientes en la zona de estudio durante el Cretácico tardío.	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información básica de los pozos estudiados.....	28
---	----

1. RESUMEN

La Cuenca del Valle del Magdalena (VMM) es una cuenca intramontana que separa la Cordillera Central al oeste y la Cordillera Oriental al este. Su evolución está ligada al origen de los Andes colombianos, que son producto de la interacción entre las placas Sudamericana, Farallón y del Caribe. Con el fin de determinar la distribución espacial-temporal de las facies y la evolución de ambientes sedimentarios en el Norte del VMM, se interpretaron los registros eléctricos y muestras de zanja de los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1. A partir de los registros de los pozos estudiados se clasificó un conjunto de electrofacies; que relacionadas con las muestras de zanja fueron descritas como una asociación de litofacies y electrofacies continuas y homogéneas con características físicas similares denominados intervalos estratigráficos. Con base en los 10 intervalos estratigráficos descritos para cada uno de los pozos se logró correlacionar la continuidad lateral de los mismos, dentro de las Formaciones; La Luna, Umir, Lisama, Mugrosa, Colorado, y el Grupo Real; todas presentes en el norte del VMM. Evidenciando la ausencia de las Formaciones La Paz y Esmeralda en el registro litológico estudiado. Mediante relaciones estratigráficas e información bibliográfica disponible para el VMM, se identificó que en Acordionero-10 todos los intervalos estratigráficos pertenecen al Cenozoico formados en ambientes fluviales. Mientras en Monoaraña-1 se encontraron intervalos estratigráficos del Cretácico tardío formados en ambientes marinos e intervalos estratigráficos del Cenozoico formados en ambientes fluviales.

Palabras claves: Registros de pozo, muestras de zanja, correlación estratigráfica, norte del Valle Medio del Magdalena, Acordionero-10, Monoaraña-1.

2. INTRODUCCIÓN

La correlación estratigráfica mediante registros eléctricos de pozos es un método común para analizar la estratigrafía de secuencias y facies, y es especialmente útil para la identificación de secuencias de pequeña a intermedia escala (Vail y Mitchum, 1977). Reconociendo las asociaciones de facies es posible establecer las características de ambiente de acumulación, ya que existe un vínculo entre las asociaciones de facies y los ambientes sedimentarios. (Nichols, 2009).

Los registros de pozos son registros geofísicos de diversas propiedades de las rocas perforadas, y pueden utilizarse para interpretaciones geológicas (Catuneanu, 2006). Estos proporcionan información sobre las propiedades físicas de las rocas, pero no son una indicación directa de la litología ya que solo representa datos indirectos de las fases sólidas y fluidas del subsuelo (Catuneanu, 2006; Posamentier y Allen, 1999).

Los registros de los pozos tienen tanto ventajas como deficiencias en relación con lo que los afloramientos pueden ofrecer en la definición de facies. Las principales ventajas de los registros geofísicos sobre los afloramientos son dos: 1) proporcionan información continua en una escala hasta de kilómetros, y 2) permiten identificar tendencias a varias escalas, desde el tamaño de elementos individuales dentro de un sistema sedimentario, hasta rellenos de cuenca enteros (Catuneanu, 2006).

Por esta razón, los datos proporcionados por los registros de pozo pueden considerarse más completas en relación con la información discontinua que puede extraerse de afloramientos. Esto se debe a que las investigaciones del subsuelo

sobre las relaciones de facies y las correlaciones estratigráficas pueden realizarse a escalas mucho mayores que las posibles a partir del estudio de los afloramientos (Catuneanu., 2006).

Sin embargo, nada puede sustituir los estudios de rocas físicos, ya que la riqueza de detalles que pueden obtenerse del análisis de facies en afloramientos no se iguala con el análisis de pozos (Cant, 1992). De ello se deduce que la integración de todos los conjuntos de datos disponibles (núcleos, ripios de pozo, registros de pozo y sísmica) es, por tanto, el mejor enfoque para la correcta identificación de los sistemas de acumulación de sedimentos y los contactos estratigráficos (Catuneanu., 2006).

Nuestra área de estudio (Figura 1) se ubica al norte de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) en un transecto de 19,5 km, que abarca la distancia entre el pozo Acordionero-10 ubicado en el municipio de San Martín y el pozo Monoaraña-1 ubicado entre los municipios de Aguachica, Gamarra y Rio de Oro, en el departamento de Cesar.

Recientemente, Caballero et al (2020) ilustra las facies y sucesiones de facies en las unidades estratigráficas del Eoceno–Oligoceno en el Sinclinal de Nuevo Mundo (norte del VMM). En este trabajo se llama la atención sobre la necesidad de correlacionar eventos, tendencias en la acumulación de sedimentos e historias del registro estratigráfico comunes en los depósitos sedimentarios sinorogénicos en las cuencas del Magdalena, ya que el análisis del registro sedimentario y las correlaciones estratigráficas permiten identificar su historia estratigráfica principalmente entre el Paleoceno y el Oligoceno.

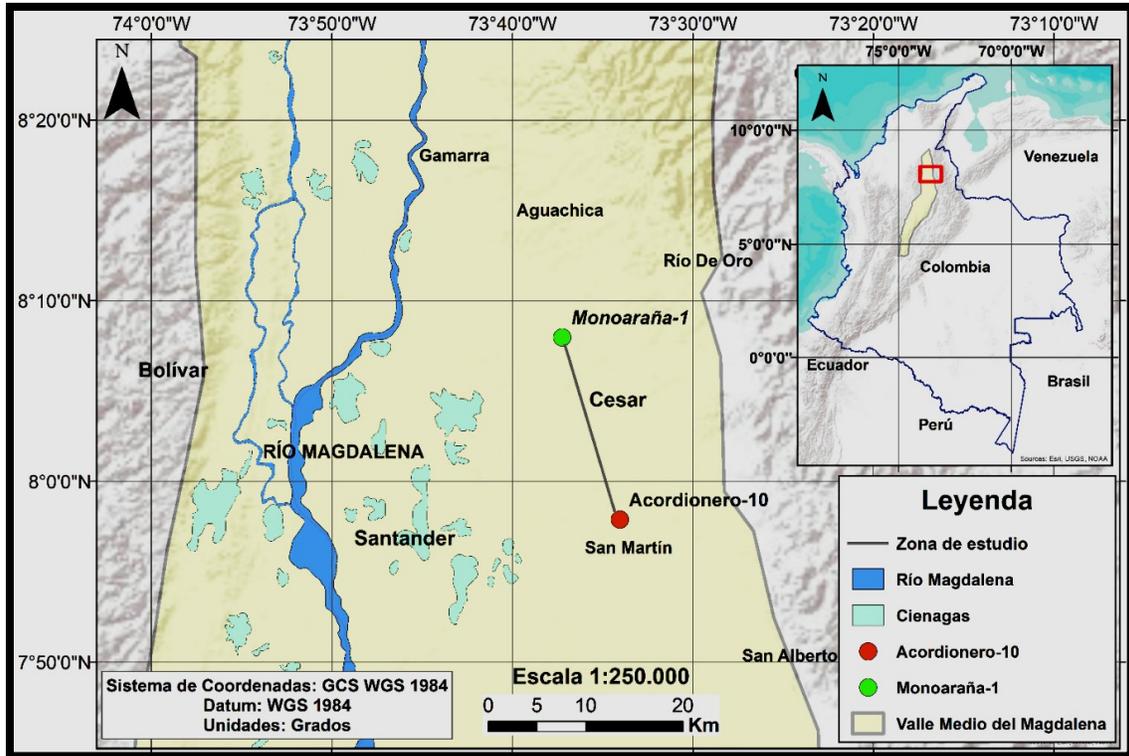


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Círculos de colores verde y rojo indican la ubicación de los pozos estudiados en este trabajo.

Por lo anterior, este trabajo tiene como finalidad construir un modelo de evolución y distribución de las facies sedimentarias formadas durante el Cenozoico en el norte del VMM. Esto a partir del análisis metodológico de registros de pozo y muestras de zanja de los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1.

3. OBJETIVOS

GENERAL

Construir un modelo de evolución de ambientes sedimentarios y de distribución de facies durante el Cenozoico en el norte de la cuenca de Valle Medio del Magdalena mediante el análisis y la interpretación de los registros y muestras de zanja de los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1.

ESPECÍFICOS

- Determinar electrofacies y litofacies a partir del análisis de los registros y muestras de zanja de los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1.
- Caracterizar los intervalos estratigráficos a través de las descripciones de las litofacies y electrofacies.
- Correlacionar los intervalos estratigráficos interpretados entre los pozos estudiados.
- Asociar los Intervalos estratigráficos determinados a partir de los registros y muestras de zanja en ambos pozos con las unidades estratigráficas presentes en el Valle Medio del Magdalena.
- Determinar los ambientes sedimentarios a partir de la interpretación de los patrones de los registros de pozo (electrofacies).

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN:

¿Cuál es la distribución espacial y temporal de las facies sedimentarias en el norte de la cuenca VMM y cómo es la evolución de los ambientes sedimentarios durante el Cenozoico?

HIPÓTESIS:

Las facies sedimentarias formadas durante el Cenozoico interpretadas a partir de los registros eléctricos y muestras de zanjas de los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1 en la cuenca del Valle Medio del Magdalena se dieron por la influencia de ambientes fluviales.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los modelos estratigráficos han sido usados por investigadores en la industria de los hidrocarburos para comprender mejor, los diferentes ambientes de sedimentación que se acumularon en un lapso determinado y que contienen esas características especiales para ser aprovechables (Uličný et al., 2009).

Estos modelos permiten analizar hiatos estratigráficos y establecer tiempos de inundación dentro de una cuenca (Miller et al., 2003; Kietzmann et al., 2008; Uličný et al., 2009). Además, permiten identificar ciclos transgresivos-regresivos, espesores y geometría interna de las secuencias individuales (Arche, 2010; Marengo et al., 2015; Limarino et al., 2017; Minisini et al., 2018)

A través de este modelo se establecen teórica y gráficamente los sucesos que han afectado una cuenca en función del tiempo geológico, con el fin de correlacionar información para conocer el registro sedimentario en posibles hiatos geológicos (Minisini et al., 2018).

Con la aplicación de técnicas como estas se puede conocer de mejor manera la evolución de la arquitectura de una cuenca sedimentaria a través del tiempo, determinando los patrones de sedimentación y ambientes de acumulación. Del mismo modo, permite obtener una visión mucho más clara sobre la información sedimentológica y estratigráfica que las cuencas sedimentarias proporcionan, con el fin de desarrollar aplicaciones tanto con fines investigativos como exploratorios.

Sin embargo, no es fácil encontrar trabajos que permitan hacer un correlación espacio-temporal en una zona determinada en una cuenca petrolera, principalmente

que correlacionen información de registros de pozos con modelos que mejoren el conocimiento de la evolución de las facies sedimentarias y la distribución de los paleoambientes, particularmente por dos razones; la primera, que los datos para el público son muy reducidos debido a los términos de confidencialidad de la información establecido por las compañías operadoras y las herramientas para generar este tipo de estudios son extremadamente costosas y se realiza con fines económicamente productivos.

5. JUSTIFICACIÓN

El Valle Medio del Magdalena es una de las cuencas productoras de petróleo y gas más prolíficas de América del Sur, y contiene varios campos productivos en la historia petrolera de Colombia, sin embargo, también contiene zonas importantes que aún no han sido exploradas (Sarmiento-Rojas, 2011).

Este trabajo busca analizar los registros de pozo disponibles y correlacionar los intervalos estratigráficos caracterizados entre los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1 localizados en el norte de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

La correlación estratigráfica como herramienta permite proyectar la distribución temporal y espacial de facies sedimentarias, establecer la arquitectura estratigráfica de los reservorios y el potencial de varios tipos de trampas en estas cuencas, además de las historias estratigráficas comunes (e.g. Caballero et al, 2020).

6. MARCO TEÓRICO

EVOLUCIÓN TECTÓNICA

La Cuenca del Valle del Magdalena (Figura 1) es una cuenca intramontana, limitada por la Cordillera Central al oeste y la Cordillera Oriental al este. El Valle del río Magdalena se ha dividido en tres cuencas: Cuenca del Alto Magdalena, Cuenca del Magdalena Medio y Cuenca del Bajo Magdalena (Córdoba et al., 2001; Sarmiento-Rojas, 2011).

La historia geológica del VMM comenzó en el Mesozoico (Figura 2). Su evolución está ligada al origen de los Andes colombianos, que son producto de las interacciones entre las placas Sudamericana, Farallón (Nazca, Cocos) y las placas del Caribe (Sarmiento-Rojas, 2011).

Durante el Jurásico tardío y el Cretácico temprano se establece una fase extensional con desarrollo de grabens, debido al proceso de rifting que se generó durante la etapa de separación entre el margen noroccidental de Suramérica y Norteamérica (Etayo et al., 1969; Córdoba et al., 2001; Sarmiento-Rojas, 2011, 2019).

El sistema de grabens fue rellenado por depósitos clásticos de carácter fluvial. Posteriormente, a partir del Berriasiano, se depositan sedimentos marinos someros en dos cuencas de rift separadas por el alto del paleo-macizo de Floresta-Santander (Etayo et al., 1969; Fabre, 1985; Cooper et al., 1995; Sarmiento-Rojas, 2011).

En el Aptiano la subsidencia cesa y las dos cuencas se unen en una sola, en la cual se depositan sedimentos de plataforma media a externa. La sedimentación post-rift

comienza en el Turoniano y se mantiene hasta fines del Cretácico. A partir de allí comienza una fase de tectónica compresiva en respuesta al inicio de la acreción de la Cordillera Occidental. Esto ocasiona un cambio en la sedimentación que durante el Paleoceno temprano pasa a desarrollar ambientes de pantanos y llanuras deltaicas (Etayo et al., 1969; Córdoba et al., 2001).

Desde el Paleoceno hasta el Eoceno la sedimentación estuvo controlada por los pulsos de levantamiento y erosión de la Cordillera Central dando lugar a acumulaciones en ambientes de depósito de carácter fluvial y permitiendo el desarrollo de facies clásticas arenosas en el costado occidental de la cuenca (Etayo et al., 1969; Fabre, 1985; Cooper et al., 1995). Desde el Eoceno temprano a tardío las unidades sedimentarias se depositan bajo nuevas condiciones de cuenca de antepaís en un ambiente predominantemente continental (Córdoba et al., 2005).

A partir del Oligoceno medio hasta el presente, tiene lugar el levantamiento de la Cordillera Oriental, en diferentes pulsos, lo cual se ve reflejado en la migración de facies arenosas hacia el Oriente de la cuenca (Suarez, 1996; Etayo et al., 1969; Córdoba et al., 2001; Sarmiento-Rojas, 2011, 2019). La inversión y levantamiento de la Cordillera Oriental (Colletta et al., 1990; Cooper et al., 1995; Mora et al., 2006), generó depósitos sintectónicos de facies aluviales que van desde ríos meándricos hasta abanicos aluviales (Morales, 1958).

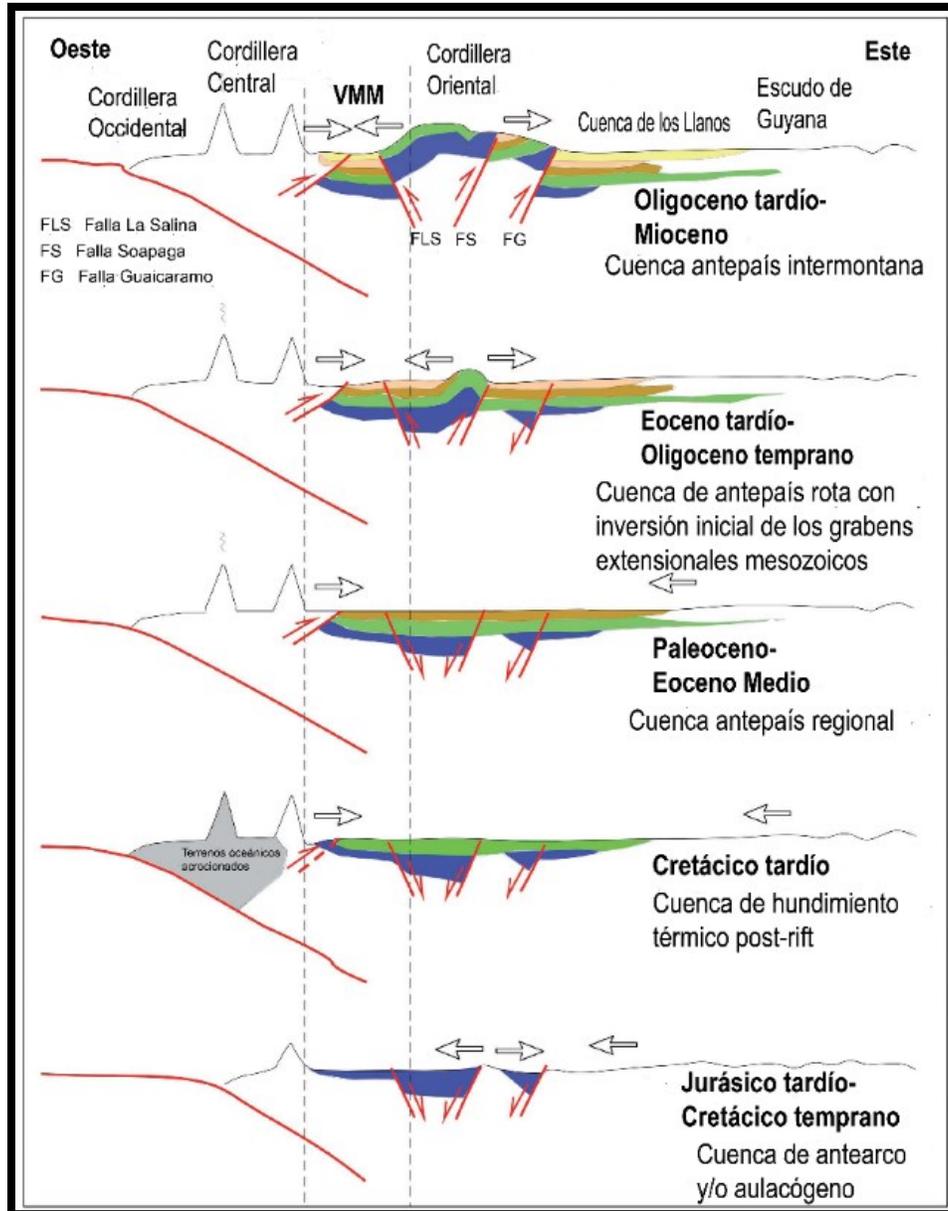


Figura 2. Evolución tectónica esquemática del VMM (modificado de Sarmiento-Rojas, 2011).

ESTRATIGRAFÍA

En el sector norte del VMM se inicia la sedimentación Cretácica en el Berriasiano al tiempo que la actividad ígnea prácticamente desaparece, migrando hacia el occidente. El Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM), estructura aflorante al sur de la prolongación de la Falla de Cimitarra, muestra una excelente exposición de las rocas del Cretácico y Cenozoico, de ahí la localización de la mayor parte de las secciones tipo aplicables al norte y al sur del VMM (Sarmiento-Pérez et al., 2015).

La Serranía de San Lucas SSL constituye la prolongación occidental del VMM sector norte por cuanto las unidades del Cretácico reposan discordantemente sobre este complejo de rocas ígneas intrusivas y volcánicas Jurásicas. La relación entre las unidades del Cretácico y las rocas precretácicas para el sector norte del VMM es inconforme y se caracteriza por un faltante estratigráfico desde final de los depósitos volcano-sedimentarios del Jurásico a los primeros registros del inicio de la sedimentación hacia el Hauteriviano superior (Sarmiento-Pérez et al., 2015). En la Figura 3 se presenta una compilación de la litoestratigrafía regional de la parte norte de la cuenca del VMM.

Formación Rosa Blanca: En general se trata de una unidad fosilífera (predominantemente moluscos en diversos estados de fragmentación), muy cementada de ahí su apreciable dureza, con intercalaciones menores de margas, shales calcáreos y una tendencia a disminuir hacia el techo el contenido y tamaño de los macrofósiles (Sarmiento-Pérez et al., 2015).

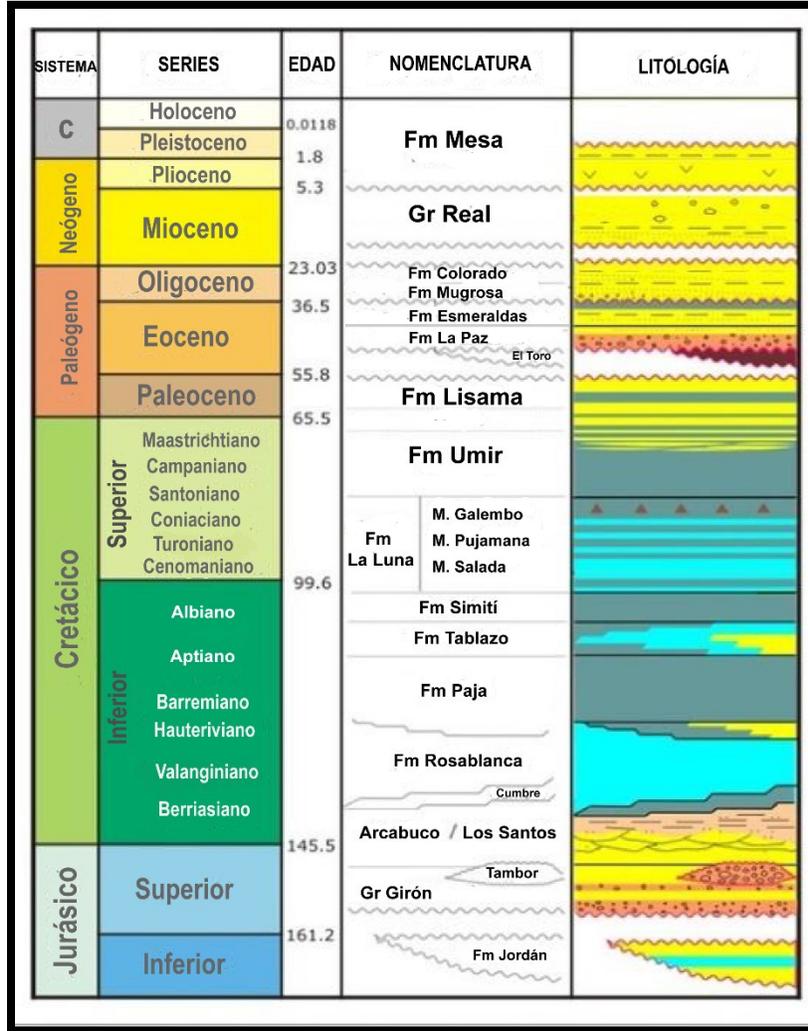


Figura 3. Estratigrafía general del norte de la cuenca del VMM (modificado de Prince et al. 2018).

Formación La Paja: Está constituida por shales grises oscuros a azulosos, fosilíferos, laminados con intercalaciones de areniscas grises amarillentas de grano fino o de calizas fosilíferas grises, localmente arenosas. Se estima que su depósito tuvo lugar en un ambiente de mar abierto, epicontinental con influencia restringida de material terrígeno (Sarmiento-Pérez et al., 2015).

Formación Tablazo: La Formación Tablazo fue propuesta por Morales et al. (1958) para definir un conjunto de capas de calizas fosilíferas masivas (bioesparitas). La edad se estima entre el Aptiano superior y el Albiano inferior, por comparación con las formaciones supra e infrayacentes (Sarmiento-Pérez et al., 2015).

Formación Simití: Según Morales et al. (1958) la Formación Simití consiste en un conjunto de shales carbonosos, grises a negros, laminados y blandos, localmente calcáreos con concreciones comúnmente fosilíferas impregnadas de aceite.

Formación La Luna: La Formación La Luna ha sido considerada como la principal roca fuente de hidrocarburos en la Cuenca VMM por Zumberge (1984), Rangel et al. (1996). Esta unidad consta de lutitas calcáreas y calizas biomicríticas de foraminíferos planctónicos (Sarmiento-Rojas, 2011). La sedimentación de la Formación La Luna ocurrió en una gran rampa de carbonato, con circulación de agua restringida y anoxia (Rangel et al., 2000).

Formación Umir: En forma general se define como un conjunto de shales grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas e intercalaciones cada vez más abundantes hacia el techo de areniscas líticas, limolitas grises y presencia de mantos explotables de carbón (Sarmiento-Pérez et al., 2015). Presenta aportes terrígenos correspondientes a la apertura del levantamiento de la Cordillera Central (Gómez et al. 2003; 2005).

Formación Lisama: La Formación Lisama fue definida en 1925 por Link (en Morales et al. 1958), con localidad tipo en la Quebrada Lisama, tributaria del Río Sogamoso, para agrupar a un conjunto de lodolitas varicoloreadas, rojas, marrón,

moteado gris a gris claro, e intercalaciones de arenitas grises a grises verdosas, localmente estratificación cruzada y de grano más grueso hacia el tope (Sarmiento-Pérez et al., 2015).

Formación La Paz: La Formación La Paz en la zona del Sinclinal Nuevo Mundo está formado por conglomerados de guijarros y guijos con clastos bien redondeados principalmente de cuarcita y chert, el cual reposa en discordancia erosiva sobre niveles de arcillolitas varicoloreadas de la Formación Lisama (Caballero et al., 2010).

Formación Esmeraldas: La Formación Esmeraldas está compuesta por intercalación de paquetes de capas de arenitas gris a gris verdoso de grano fino a medio con alto contenido de líticos y mica, gruesos niveles de arcillolitas. Las arcillolitas son varicoloreadas hacia el flanco E del SNM y grises oscuros con abundante materia orgánica (shales) hacia el flanco E del SNM donde también se intercalan localmente algunos paquetes de arenitas de grano medio a grueso (Caballero, 2010).

Formación Mugrosa: La Formación Mugrosa es una unidad predominantemente lodosa, compuesta de lodolitas varicoloreadas marrón rojizo, gris, amarillento, rojo, amarillo rojizo, en niveles métricos a decamétricos, con estratos de arenitas granuladas blancas limpias, en general no cementadas, con gradación normal y base conglomerática (Caballero et al., 2010).

Formación Colorado: La Formación Colorado yace concordantemente sobre la Formación Mugrosa y consta de areniscas conglomeráticas y conglomerados

intercalados en lodolitas varicoloreadas. Para Caballero et al. (2010) es una sucesión estrato creciente con facies que permiten predecir abanicos aluviales canaliformes (ríos trezados) hacia el SNM.

Formación Real: La Formación Real consta de conglomerados y areniscas suprayacidos por areniscas guijosas con estratificación cruzada e intercalaciones de lodolitas varicoloreadas. Sobre estas se presentan lodolitas varicoloreadas y areniscas subordinadas con estratificación cruzada. Unidad acumulada discordantemente sobre la Formación Colorado en un contacto neto y contrastante (Sarmiento-Pérez et al. 2015).

Formación Mesa: La Formación Mesa son acumulaciones volcano-sedimentarias de areniscas tobáceas, tobas andesíticas, aglomerados e intercalaciones de arcillolitas, limos, conglomerados y depósitos piroclásticos, donde la parte superior de la unidad compuesta por gravas, bloques, arenitas y limos intercalados representa facies de abanicos torrenciales (Sarmiento-Pérez et al. 2015).

7. METODOLOGÍA

Este proyecto se enfocó en la interpretación de las electrofacies y litofacies de algunas de las unidades atravesadas durante la perforación de los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1 ubicados en el norte de la cuenca del VMM (Figura 1). Pozos utilizados para identificar los ambientes sedimentarios, correlación lateral y asociación de las unidades presentes en la zona. Esto a partir del análisis sistemático de los registros de rayos gama (GR) y resistividad de los pozos (Tabla 1), integrado con la descripción de las muestras de zanja de los pozos y complementado con la información geológica disponible.

Tanto los registros de pozo como las muestras de zanjas de Acordionero-10 y Monoaraña-1 utilizados para este proyecto de grado fueron donados por la compañía Gran Tierra Energy a la universidad EAFIT y facilitados por el profesor Alejandro Beltrán-Triviño, para llevar a cabo nuestro trabajo dentro del grupo STENO (semillero de investigación en Tectonoestratigrafía).

Tabla 1. Información básica de los pozos estudiados.

Acordionero-10			
Escala	1:500 TVD	País	Colombia
Compañía	Gran Tierra Energy	Departamento	Cesar
Campo	Acordionero	Municipio	San Martín
Pozo	Acordionero-10	Profundidad Inicial	3396 ft (TVD)
DATUM	MAGNA SIRGAS	Profundidad Final	9474 (TVD)
Latitud	7° 57' 52,7" N	RIG	Tuscany 109
Longitud	73° 34' 2,8" W	JOB#	BG170025
Dec. Mag	-8,05°		

Monoaraña-1			
Escala	1:500 TVD	País	Colombia
Compañía	Vetra Group	Departamento	Cesar
Campo	Monoaraña	Municipio	Aguachica
Pozo	Monoaraña-1	Profundidad Inicial	0 ft (TVD)
DATUM	MAGNA SIRGAS	Profundidad Final	9700 ft (TVD)
Latitud	8° 7' 57.93" N	RIG	SAI 31
Longitud	73° 37' 14,23" W	JOB#	BG120227
Dec. Mag	7,43°		

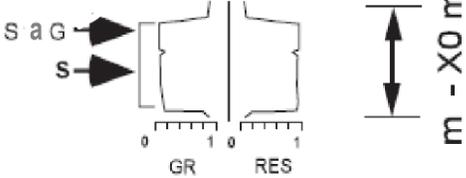
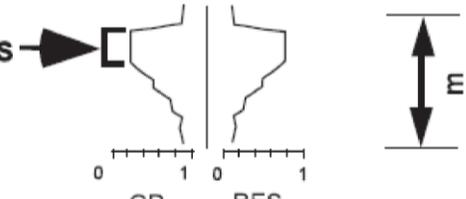
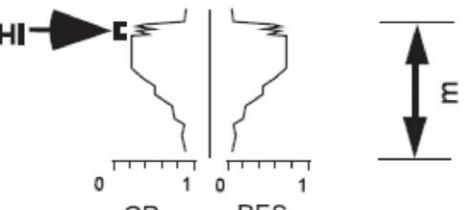
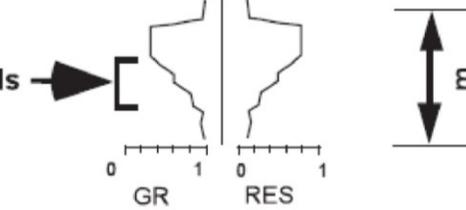
INTERPRETACIÓN REGISTROS DE POZO

Para la interpretación de los registros de pozo se utilizaron los registros obtenidos durante la perforación (LWD logging while drilling) o Wireline. Se utilizaron los registros en profundidad vertical real (TVD, True Vertical Depth) escala 1:500. Con base en estos, se realizó la interpretación de los registros de Gamma Ray (GR); los cuales registran la radiactividad natural de una formación en unidades API (American Petroleum Institute), estas unidades se correlacionan con las intensidades de rayos gamma (Evenick, 2008). Existe una relación general entre el contenido de uranio y, en menor medida, del torio y el tamaño de los gránulos: cuanto más pequeños son, más alto es el contenido de los elementos radiactivos. En consecuencia, cuando hay una abundancia de material arcilloso como en shales, generalmente se observa un alto nivel de radiactividad. En otro caso, el nivel de radiactividad de las rocas arenosas es bajo y viene determinado por su contenido de shale (Liu, 2017).

Adicionalmente, también se utilizaron los registros de Resistividad en ambos pozos, que indican los valores de la resistividad, o resistencia al flujo de electricidad a

través de una formación en metros Ohm (Ωm). La resistividad es el recíproco de la conductividad y está relacionada con la porosidad y la cantidad y el tipo de fluido presente en la roca y en el pozo. Diferentes tipos de registros de resistividad corresponden principalmente a mediciones de penetración (por ejemplo, penetración superficial, media y profunda). Las lecturas someras registran las zonas en donde el fluido de perforación o lodo ha generado una “torta” que mantiene la estabilidad de las paredes del pozo, las lecturas medias se obtienen de la zona de invasión en donde ha logrado ingresar fluido de perforación, mientras que las lecturas profundas corresponden a la resistividad verdadera o zona virgen, no invadida de la formación, donde por convención general según los fluidos que contienen los shales suelen tener una resistividad baja, y las areniscas y los carbonatos tienen una resistividad mayor (Evenick, 2008).

Para identificar y separar las electrofacies de los registros de pozo se utilizaron los criterios planteados por Uličný et al. (2009) y Uličný & Laurin (2004). Los cuales proponen una interpretación litológica de los posibles ambientes de formación de las litofacies sedimentarias, de acuerdo con los valores y los patrones de las formas registradas por las gráficas GR y Resistividad (Figura 4). También se tuvo en cuenta para la clasificación de las electrofacies las geometrías de registros GR propuestas por Nazeer et al. (2016) y Rider (1990) (Figura 5) y también los conceptos de Crombez et al. (2016).

Nomenclatura	Textura	Patrón de registro de pozo
S y S/G (Sandstone/ conglomerate)	Arenisca, libre de lodo, comúnmente mal clasificado, tamaño de grano medio a grueso, tener hasta arenisca conglomerática a conglomerado localmente	Firma monótona; patrones de registro típicamente en bloque; aumento de GR hacia la cuenca y disminución de RES 
	Raramente de grano muy fino	Firma monótona; típicamente partes superiores de patrones en forma de embudo; aumento de GR hacia la cuenca y disminución de RES 
HI (Laminated Heterolithic deposits)	Depósitos heterolíticos laminados; arenisca moderadamente clasificada, de grano fino a medio, con láminas de lodo oscuro de escala mm a sub-mm	Firma irregular; patrón en forma de embudo; es necesario el control del núcleo para una mejor interpretación 
HS (sand dominated)/ HM (mud-dominated)	Depósitos heterolíticos bioturbados; bien clasificados, areniscas típicamente de grano fino y lodolitas grises	Firma más o menos irregular; normalmente las partes medias de los patrones en forma de embudo; aumento de GR hacia la cuenca y disminución de RES 

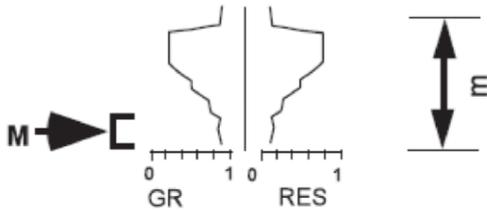
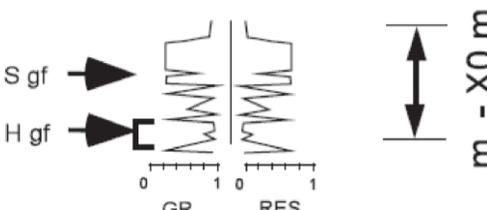
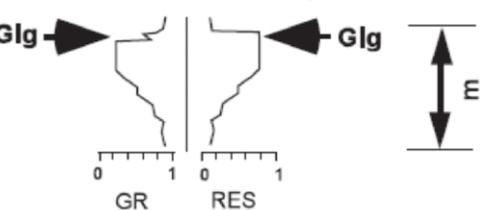
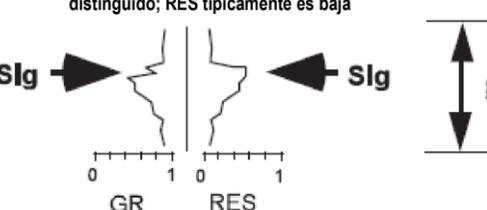
<p>M (mudstone)</p>	<p>Lodolitas grises; Contenido de limo relativamente alto pero variable; puede ser ligeramente calcárea</p>	<p>Firma monótona o irregular; normalmente en las partes bajas de los patrones en forma de embudo; hacia la tierra disminución de GR y aumento de la RES</p> 
<p>Sgf/Hgf (sand fine-coarse grained)</p>	<p>Arenisca, de grano fino a grueso, localmente lodosa o clastos con lodo</p>	<p>Patrones de registros típicamente dentados</p> 
<p>Glg (gravelly sandstone)</p>	<p>Arenisca con grava; mal clasificada; de grano fino a grueso; lodosa</p>	<p>Por lo general, demasiado fino para ser distinguido; RES típicamente es baja</p> 
<p>Slg (muddy sandstone)</p>	<p>Arenisca lodosa; mal clasificada, de grano fino a medio con mezcla de arena gruesa</p>	<p>Por lo general demasiado delgada para ser distinguido; RES típicamente es baja</p> 

Figura 4. Cuadro resumen de las principales características de las electrofacies identificadas a partir de GR y Resistividad (modificado de Uličný et al. 2009).

A partir de los conceptos propuestos por estos autores, se identificaron las zonas o paquetes que representaban patrones similares tanto en las gráficas GR como características resaltables en las gráficas de resistividad (zonas las cuales nosotros denominamos electrofacies). Consecutivamente, con base en el análisis de las zonas homogéneas (electrofacies) identificadas en los registros de pozo, se procedió con la descripción de las muestras de zanjas para las zonas (electrofacies) que presentaron mayor incertidumbre en la interpretación directa para los registros en los pozos estudiados.

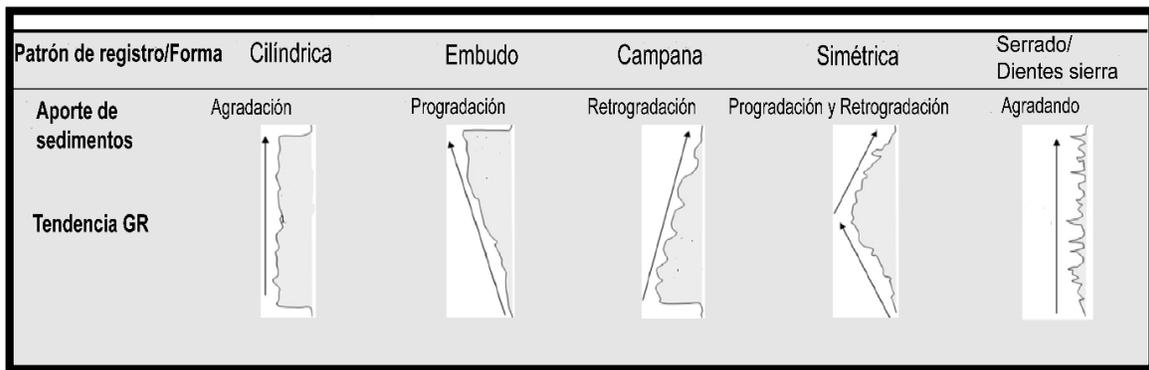


Figura 5. Clasificación de las geometrías de los registros GR (modificado de Nazeer et al. 2016).

DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DE ZANJAS

Para la descripción de las muestras de zanjas fue necesario utilizar un estereomicroscopio binocular, y a partir del cual se utilizaron los conceptos de clasificación de tamaño de grano (Figura 6) basada en Wentworth (1922), Udden (1898) y Folk (1980). De igual modo, también se utilizaron los conceptos de redondez, esfericidad, color, composición y selección de grano.

El grado de selección (Figura 7) mide el rigor con la que un sedimento ha sido re trabajado por los agentes de transporte. Es un indicador valioso de la velocidad y el entorno de acumulación, y se ha utilizado para clasificar las arenitas. La clasificación por tamaño expresa el grado en que los granos se acercan al mismo tamaño. Ésta es la medida de clasificación más utilizada; sin embargo, debe recordarse que los granos pequeños de minerales pesados se clasifican con los granos más grandes de minerales ligeros (Crompton, 1962).

Diámetro del grano			Clasificación de tamaño Wentworth	
Milímetros	Micrones	phi		
— 256		-8.0	Bloque	Grava
— 64		-6.0	Canto	
— 4.0	4000	-2.0	Guijarro	
— 2.0	2000	-1.0	Granulo	
— 1.41	1410	-0.5	Arena muy gruesa	Arena
— 1.0	1000	0.0		
— .71	710	0.5	Arena gruesa	
— 0.5	500	1.0	Arena media	
— 0.35	350	1.5	Arena fina	
— 0.25	250	2.0	Arena muy fina	
— 0.177	177	2.5		Lodo
— 0.125	125	3.0		
— 0.088	88	3.5		
— 0.0625	62.5	4.0	Limo	
— 0.002	2.0	9.0	Arcilla	

Figura 6. Clasificación del tamaño de grano basado en Wentworth (1922), Udden (1898) y Folk (1980). (Modificado de Farrell et al. 2009).

El concepto de redondez indica el grado de suavidad que presenta la superficie de un grano, o en sentido opuesto, la angulosidad de los contornos de la partícula. Por su parte, la esfericidad expresa la forma de la partícula por comparación con tres figuras geométricas simples: disco, esfera y prisma. Para analizar la forma de los granos se propone realizar la comparación visual con la Figura 8. En primer lugar,

se considerará toda la muestra, estableciendo la redondez y esfericidad del conjunto de la población de granos. (Corbí y Martínez., 2015).

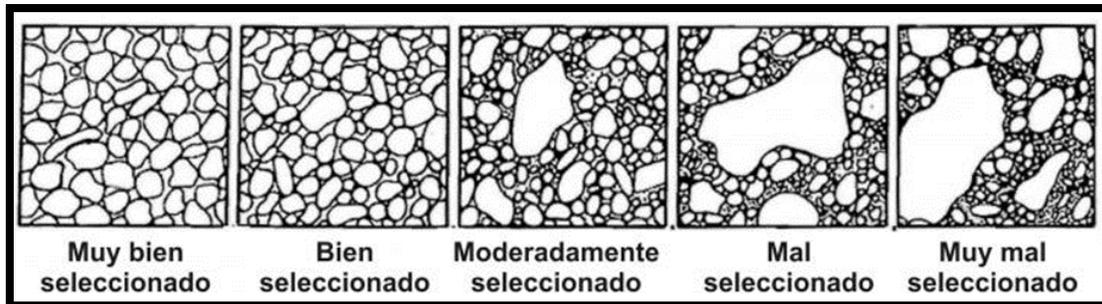


Figura 7. Escala de selección de clastos de arena (modificado de Compton, 1962).

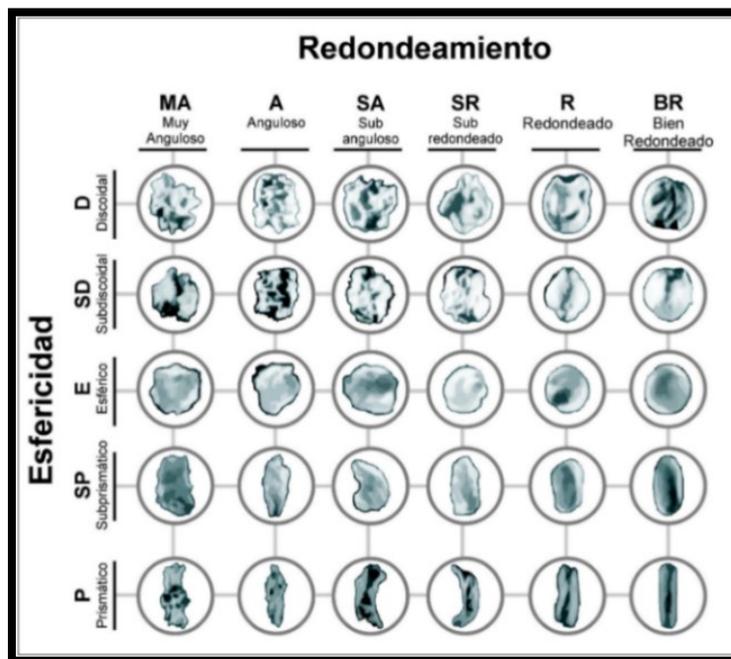


Figura 8. Tabla comparativa para la clasificación del grado de redondez y esfericidad de arenitas. Basado en Powers (1953). (Tomado de Corbí y Martínez., 2015).

Una vez descritas las muestras de zanja, se definió el concepto de litofacies; el cual se limita a la descripción de las características físicas y químicas de las rocas identificadas. Posteriormente, y con base en las electrofacies y litofacies ya descritas, se procedió a definir el concepto intervalo estratigráfico en cada pozo. Intervalos estratigráficos propuestos como asociaciones de litofacies homogéneas y con características petrofísicas similares (electrofacies).

Finalmente, después de tener los intervalos estratigráficos para cada pozo, se relacionó las columnas perforadas y se construyó la correlación final. La cual nos permitió interpretar la continuidad lateral de los intervalos propuestos a lo largo de ambos pozos y correlacionar estos intervalos estratigráficos con las unidades litoestratigráficas del VMM. Además de interpretar los ambientes sedimentarios.

8. RESULTADOS

Los resultados de esta sección se presentarán en términos de intervalos estratigráficos; definidos como una asociación de electrofacies y litofacies continuas (entre ambos pozos) de características similares en términos facies y ubicación estratigráfica. Identificados inicialmente a partir de los patrones de registros de pozo y complementados con las muestras de zanjas, las cuales corroboraron los límites de cada litofacies y por ende la interpretación inicial de las electrofacies para los registros. Donde las litofacies se limitaron a la descripción de las características físicas y químicas de una roca (Nichols, 2009). Mientras que las electrofacies se definieron como patrones caracterizados por presentar comportamientos similares a partir de las gráficas GR y con características de resistividad resaltables.

POZO ACORDIONERO-10

El pozo Acordionero-10 se describió entre los 3410ft y los 9420ft, para el que se identificaron 10 intervalos estratigráficos diferentes denominados (A1 a A10). Las litofacies descritas para este pozo se encuentran principalmente formadas por sedimentos clásticos; arcillolitas de color marrón, arenitas con tamaño de grano fino a medio, limolitas grises y negras y en menor proporción conglomerados. Adicionalmente, con presencia de gran cantidad de materia orgánica y carbón.

Intervalo Estratigráfico A1

Identificado con tope a 3410ft y base 4000ft (Figura 9a, 9b).

A partir de los registros de pozo en la curva GR (Figura 9a, 9b) se clasificó este intervalo estratigráfico como una variante entre el patrón de electrofacies

denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Teniendo en cuenta que la curva GR no presenta una forma definida y se desplaza con un comportamiento intercalado entre variaciones cortas y rugosas típicas del patrón de electrofacies serrada e intercalaciones largas y en forma de pico típicas del patrón de electrofacies Sgf/Hgf. Con valores GR que van generalmente entre 30 API y 75 API, y que excepcionalmente superan los 75 API. Siendo un intervalo que se clasificó con 2 electrofacies diferentes; la primera entre 3410ft-3630ft y la segunda entre 3630ft-4000ft (Figura 9a, línea roja).

Por otra parte, la curva de Resistividad se comporta relativamente constante durante todo el intervalo estratigráfico, con pequeñas variaciones y deflexiones constantes, con valores bajos de lecturas de resistividad. Adicionalmente, las tres curvas de resistividad (superficial, media y profunda) se mueven casi de manera uniforme haciendo que se vean casi como una sola curva.

En las muestras de zanjas (Figura 9c, 9d) se clasificó este intervalo estratigráfico como formado principalmente por litofacies de arcillolitas (50%), arenitas (40%) y limolitas (10%). La litofacies de arcillolitas presenta colores marrón medio a rojizo, marrón claro, rojo claro y en algunos intervalos ligeramente gris, las cuales reaccionan muy poco con ácido clorhídrico (HCl), presencia de contenido calcáreo.

La litofacies de arenitas es generalmente de tamaños finos a medios, mal a moderadamente seleccionadas, subesféricas a subangulares. Formadas principalmente por cuarzo hialino, blanco y algunos de color amarillo, también se observa algunos líticos. Predominan hacia la base del intervalo estratigráfico y disminuye su cantidad hacia el tope de este, en la cual aumenta ligeramente el

porcentaje de arcillolitas. Por último, se observa algunas intercalaciones de litofacies de limolitas con colores verde, marrón claro, blanco a gris claro y gris medio. Adicionalmente, en algunas muestras se observa la presencia de carbón.

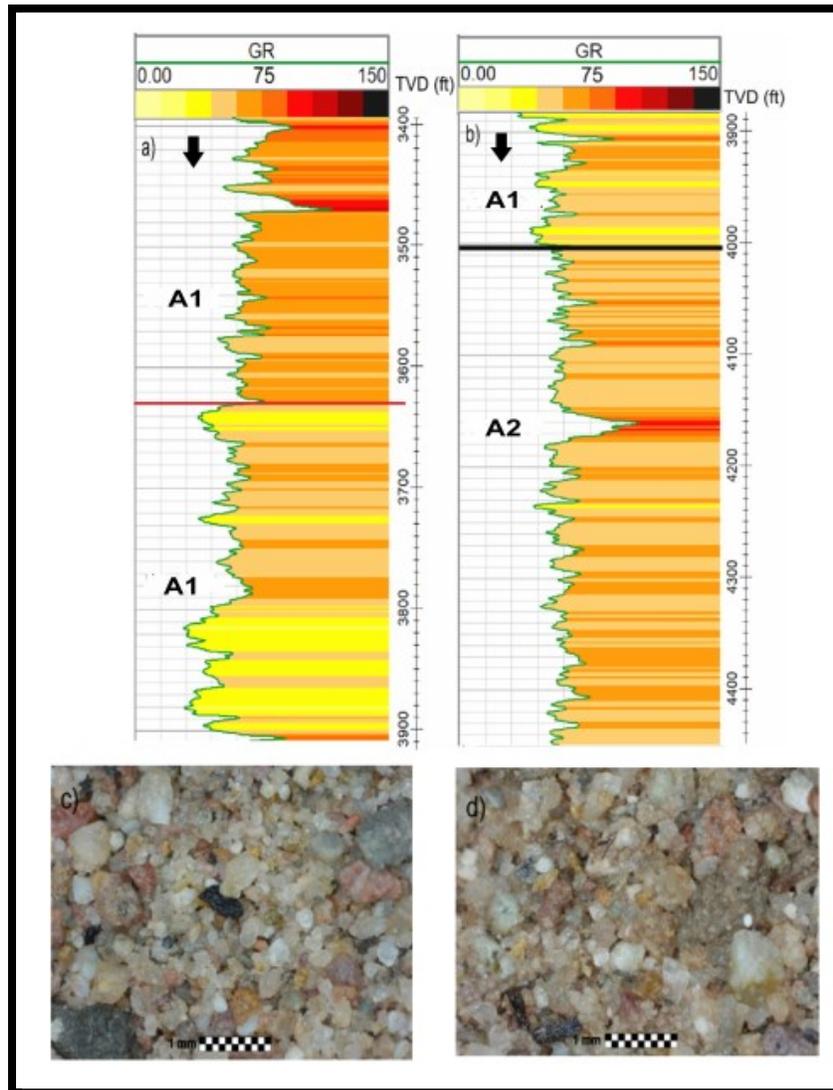


Figura 9. a) Registro GR (unidades API) del intervalo estratigráfico A1 entre los 3400ft y 3900ft (la línea roja marca el cambio de la electrofacies) b) Registro GR (unidades API) entre 3900ft y 4450ft cambio entre el intervalo A1 y A2 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo estratigráfico A1 y A2) c) Fotografía intervalo A1 en 3800ft d) Fotografía intervalo A2 en 4000ft.

Intervalo Estratigráfico A2

Identificado con tope entre 4000ft y base en los 5060ft (Figura 10a, 10b, 10c).

A partir de los registros de pozo en la curva GR (Figura 10a, 10b, 10c) esta electrofacies se clasifican como una variante en el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Sobre la base el comportamiento de la curva GR se caracteriza por electrofacies de patrón de electrofacies dentado, con constantes variaciones e intercalaciones en la curva con terminaciones en forma de pico, que arrojan valores GR que van entre 50 API a 105 API aproximadamente. Pero sobre el tope el patrón de electrofacies cambia a deflexiones más cortas sobre la gráfica, teniendo una disminución en los valores GR, que varían entre 45 a 75 API. Siendo un intervalo que se clasificó con 2 electrofacies diferentes; la primera entre 4000ft-4660ft y la segunda entre 4660ft y 5050ft (Figura 10b, ver la línea roja).

Por otra parte, la curva de Resistividad se comporta relativamente constante durante todo el intervalo estratigráfico, con pequeñas variaciones y deflexiones constantes, con valores bajos en las lecturas de resistividad. Adicionalmente, los radios de investigación (superficial, media y profunda) se mueven casi de manera uniforme haciendo que se vean casi como una sola curva.

Las electrofacies de este intervalo estratigráfico se comportan de manera muy similar al intervalo estratigráfico A1, por lo cual solo fue posible separarlos con las descripciones en las muestras de ripio.

En las muestras de zanjas (Figura 10d, 10e) se definió este intervalo estratigráfico como, formado principalmente por litofacies de arenitas (50%), arcillolitas-limolitas (40%) y conglomerados (10%). La litofacies de arenita está constituida principalmente por granos de tamaños medio a grueso, y otros localmente con tamaños muy gruesos. En general los granos están mal a moderadamente seleccionados, son subangulares a subredondeados y subesféricos, principalmente compuestos por cuarzos translucidos, blancos y en menor medida con presencia de líticos y feldespatos potásicos.

También se observa que hacia el tope disminuye el tamaño de las arenitas predominando los tamaños finos a muy finos, con selección de grano mala a moderada, con granos subesféricos y subredondeados; también la presencia de arenitas con tamaño medio a grueso hacia la base del intervalo estratigráfico composicionalmente similares a las arenitas de tamaño fino.

La matriz está principalmente formada por arcillolitas y limolitas en menor proporción; presenta colores marrón medio a claro, gris claro a medio y marrón rojizo. Reacciona localmente en algunas muestras al HCl infiriéndose la presencia de contenido calcáreo.

La litofacies de conglomerados presenta tamaños granulo (2-4 mm) y localmente tamaños guijarro (mayores a 4 mm). Mal seleccionados, angulares a subangulares y subelongados a subesféricos, principalmente formados por cuarzo y líticos de colores verdes, negros y marrón. Estos conglomerados se encuentran principalmente ubicados en la base del intervalo disminuyendo hacia el tope. Sobre el tope también se observa algo de carbón y limolitas negras.

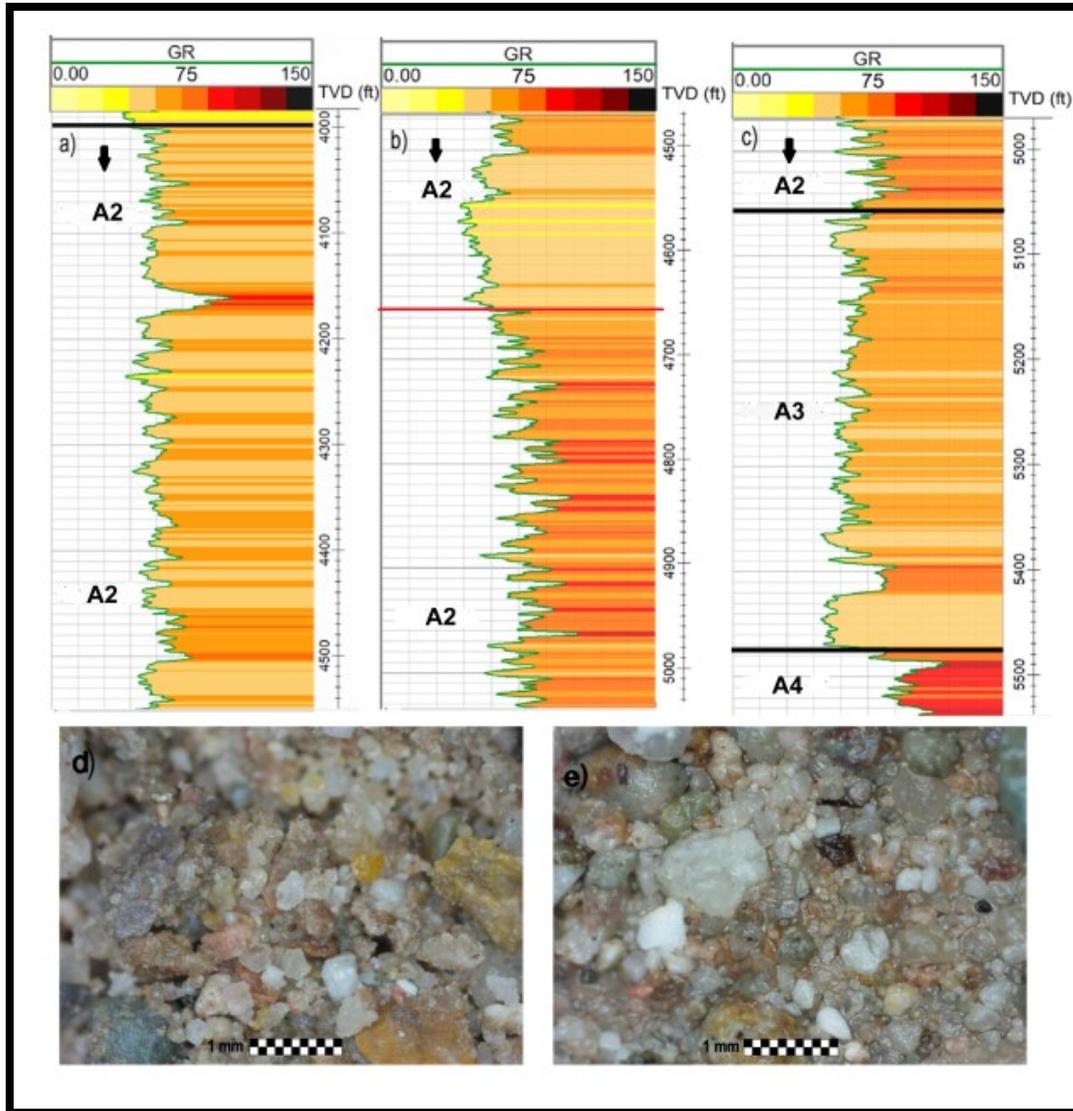


Figura 10. a) Registro GR (unidades API) entre los 3990ft y 4540ft cambio del intervalo estratigráfico A1 y A2 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A1 y A2) b) Registro GR (unidades API) del intervalo estratigráfico A2 entre los 4480ft y 5030ft (la línea roja marca el cambio de la electrofacies) c) Registro GR (unidades API) entre 4990ft y 5530ft. cambio entre el intervalo estratigráfico A2, A3 y A4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A2, A3 y A4.). d) Fotografía del intervalo A2 en 4300ft e) Fotografía del intervalo A2 en 4900ft.

Intervalo Estratigráfico A3

Identificado con tope en 5060ft y base entre los 5480ft (Figura 10c).

A partir de los registros de pozo este intervalo estratigráfico se clasificó como una forma serrada o dientes de sierra (Figura 5). En las curvas tanto de GR (Figura 10c) como de Resistividad se describe como una geometría irregular y de constantes deflexiones entre altos y bajos en trayectos cortos a través del registrocurva en todo el intervalo estratigráfico. Se presentan valores de GR que van entre mínimos de 55 hasta máximos de 80 API, con intercalaciones constantes y cambios irregulares.

Por otra parte, la curva de Resistividad arroja valores bajos y con un comportamiento en la forma de la curva irregular similar al GR, pero la variación es más corta. Adicionalmente, las tres curvas de resistividad los radios de investigación (superficial, media y profunda) se mueven casi de manera uniforme haciendo que se vean casi como una sola curva.

En las muestras de zanjas (Figura 11a, 11b) se definió este intervalo estratigráfico como formado principalmente por litofacies de arenitas (60%), arcillolitas (30%), y limolitas en menor medida (10%). La litofacies de arenitas presenta tamaños de grano predominantemente de muy finos a finos y localmente con tamaños medios a gruesos. Moderadamente a bien seleccionadas, redondeadas y esféricas predominantemente, formada en su mayoría por granos de cuarzo translucido y hialino, feldespato potásico y líticos en menor proporción.

La matriz arcillosa varía en un aproximado de 10-30% dependiendo de la profundidad, de colores entre marrón rojizo, marrón ligeramente gris y marrón medio, la matriz reacciona poco en la mayoría de las muestras con HCl. Matriz arcillosa que se hace más predominante hacia la base del intervalo estratigráfico mientras hacia el tope disminuye y las arenitas se vuelven más limpias y homogéneas. Adicionalmente, se observan limolitas negras y carbón de manera local en algunas muestras.

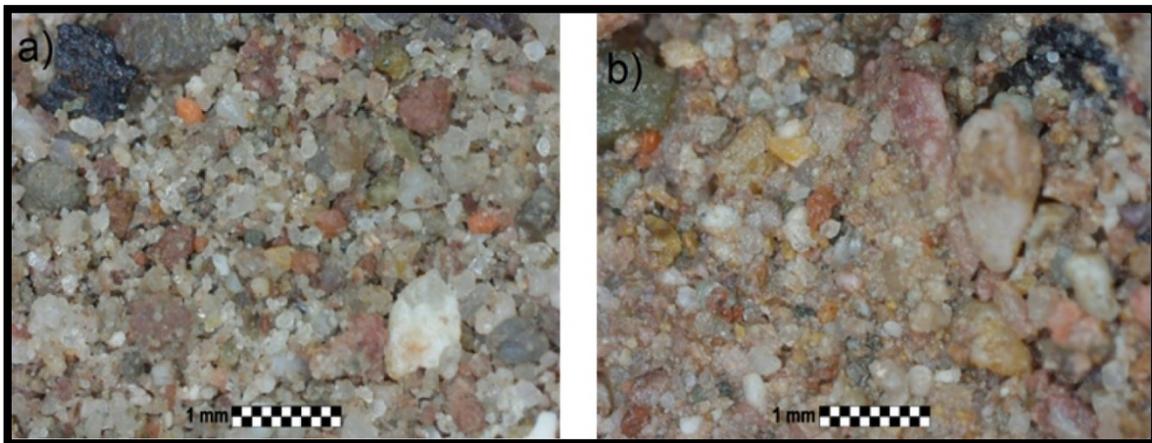


Figura 11. a) Fotografía intervalo A3 en 5300ft **b)** Fotografía intervalo A3 en 5430ft.

Intervalo Estratigráfico A4

Identificado con tope entre 5480ft y base entre los 6960ft (Figura 12a 12b, 12c).

A partir de las electrofacies de pozo para este intervalo estratigráfico se clasificaron tres patrones con base en la curva GR (Figura 12a 12b, 12c); un primer patrón de electrofacies predominante en forma serrada o dientes de sierra (Figura 5), el cual se extiende por todo el intervalo y se encuentra intercalada con los otros dos patrones, el segundo se observa en dos segmentos específicos (entre 5960-6070ft y 6230-6270ft en las Figuras 12a, 12b) denominado como patrón de electrofacies o

forma simétrica (Figura 5). El tercero se denomina patrón de electrofacies o forma de campana (Figura 12a) ubicado en el tope del intervalo estratigráfico (5680-5720 ft).

El primer patrón de electrofacies en forma serrada (Figura 12a) se describe como una geometría irregular y de constantes deflexiones entre altos y bajos en intervalos cortos a través de la curva en todo el intervalo. Se presentan valores de GR que van entre mínimos de 90 hasta máximos de 105 API, con intercalaciones constantes y cambios irregulares, pero en general la curva mantiene los valores sobre los 90 API.

El segundo patrón de electrofacies denominado simétrico (Figura 12a, 12b), se da en una especie de geometría simétrica, donde la base pasa de una forma con valores GR altos (95 API) a bajos (45 API), para posteriormente aumentar nuevamente de valores GR hacia el tope del patrón de electrofacies en una forma simétrica.

En el tercer patrón de electrofacies o forma denominada en campana, los valores de la GR aumentan de forma constante hacia arriba desde el valor mínimo de la lectura del registro que se ubica (40 API) hasta alcanzar en el tope del patrón de electrofacies los valores más altos (90 API), formando una especie de geometría en campana. En este sentido este intervalo se clasificó como una intercalación cíclica de 7 electrofacies (Figura 12a y 12b, ver líneas rojas).

Por otro lado, la curva de Resistividad se comporta relativamente constante en el intervalo estratigráfico con valores que van de bajos a medios y solo teniendo los

mayores aumentos en la curva para las zonas donde se ubican los patrones en forma simétrica y campana.

En las muestras de zanjas (Figura 12d, 12e) se definió este intervalo estratigráfico como formado principalmente por litofacies de arcillolitas (60%), arenitas (35%), y algunos intervalos de limilitas en menor proporción (5%). La litofacies de arcillolitas presenta colores principalmente entre marrón claro a rojizo, gris claro y naranjados a amarillos, la matriz reacciona moderadamente en la mayoría de las muestras con HCl.

La litofacies de arenitas es predominantemente de tamaños fino a medio y algunas zonas con tamaños muy finos, formadas principalmente por cuarzo hialino y traslucido y algunos líticos. La selección en general es mala a moderada y moderada a buena localmente en algunos intervalos, los granos son generalmente subredondeados y subesféricos a subangulares.

Adicionalmente, se pudo evidenciar que en las zonas en que se observan los patrones en forma simétrica y campana en los registros GR hay una ligera disminución de matriz arcillosa y aumenta la proporción de arenitas, con tamaño de granos que van de finos a medios. Donde además se mejora la selección, esfericidad y redondez de los granos.

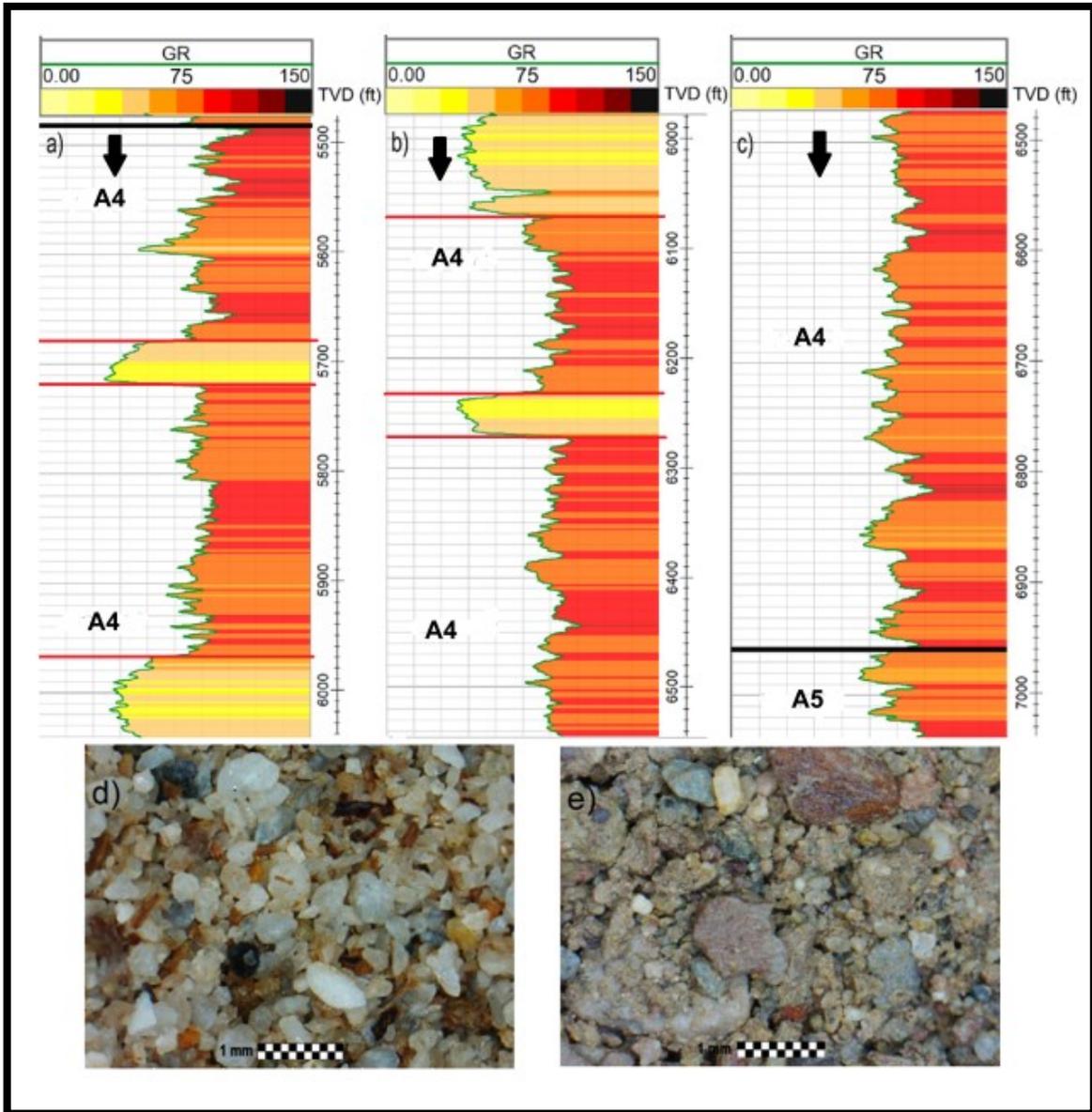


Figura 12. a) Registro GR (unidades API) entre los 5550ft y 6040ft intervalo A4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A4 y A5. Mientras, la línea roja el cambio de las electrofacies) b) Registro GR (unidades API) entre los 6000ft y 6540ft intervalo A4 c) Registro GR entre los 6480ft y 7030ft intervalo A4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A4 y A5. Mientras, la línea roja el cambio de las electrofacies). d) Fotografía intervalo A4 en 5560ft e) Fotografía intervalo A4 en 6400ft.

Intervalo Estratigráfico A5

Identificado con tope entre 6960ft y base entre 7090ft (Figura 13a).

A partir de los registros de pozo no fue posible clasificar este intervalo (Figura 13a), ya que tiene un comportamiento muy confuso. Su variación en la curva se asemeja a un patrón de electrofacies en forma serrada (Figura 5), pero este es mucho más irregular con deflexiones más amplias entre altos y bajos, sus valores GR van entre 75 y 105 API. De igual forma, la curva de Resistividad ofrece poca información para interpretar este intervalo, la cual inicia con unas ligeras irregularidades sobre el inicio del intervalo mostrando valores bajos de resistividad, para después comenzar a aumentar de manera constante sobre el final del intervalo, llegando a valores de resistividades medios.

Adicionalmente se observa que, en la curva de Resistividad sobre el inicio del intervalo, las tres curvas resistivas (superficial, media y profunda) se alcanzan a separar ligeramente.

En las muestras de zanjas (Figura 13b, 13c) se pudo identificar plenamente este intervalo como litofacies intercaladas de materia orgánica y carbón con litofacies de arcillolitas y limolitas, con algunas litofacies de arenitas muy locales. El carbón presenta colores negros, gris oscuro a negro y marrón oscuro, moderadamente duro; intercalado con arcillolitas de colores oscuros (gris oscuro, marrón oscuro, negro) a ligeramente medios y con presencia de mucha materia orgánica. La litofacies de limolitas y arcillolitas presenta de igual forma colores oscuros a medios (gris oscuro, negro, marrón oscuro a medio, gris medio). También se observa que

la matriz limosa-arcillosa reacciona fuertemente con HCl indicando la presencia de carbonatos.

Adicionalmente, se observó algunos clastos de arenita con granos tamaño fino a medio, moderadamente seleccionados, subesféricos y subredondeados a subangulares, con granos principalmente formados por cuarzos y en menor medida algo de calcita y líticos.

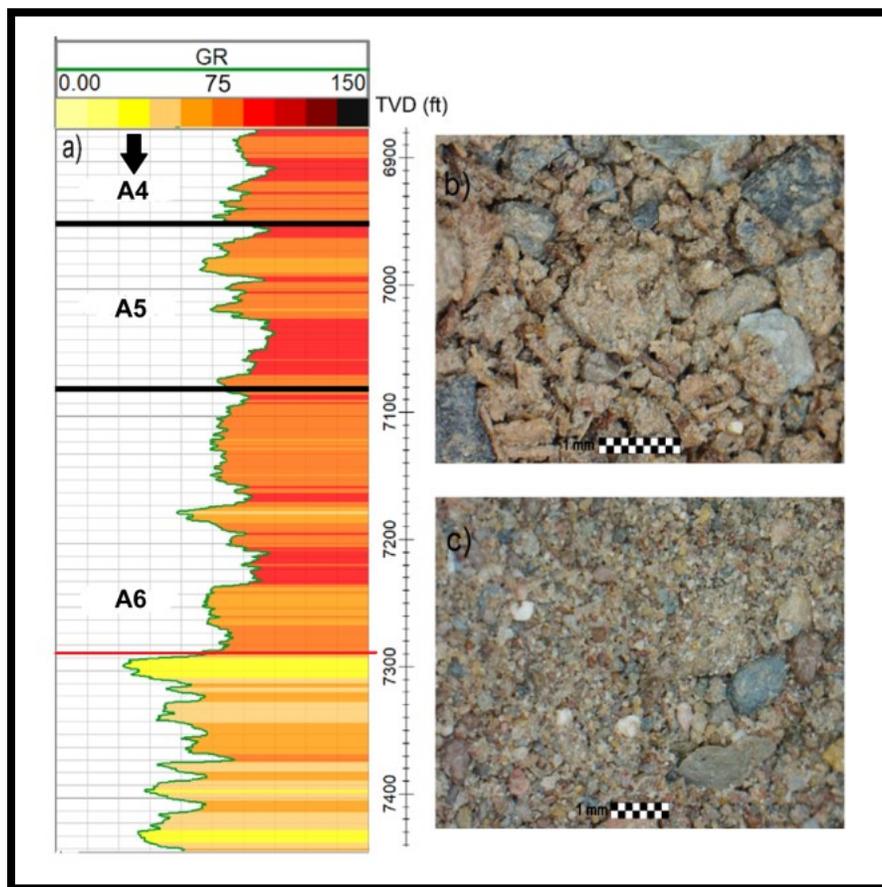


Figura 13. a) Registro GR (unidades API) entre los 6870ft y 7450ft intervalos estratigráficos A4, A5 y A6 (las líneas negras marcan los cambio aproximado entre los intervalos A4, A5 y A6. Mientras la líneas rojas el cambio de electrofacies) **b)** Fotografía intervalo A5 en 7030ft. **c)** Fotografía intervalo A5 en 7080ft.

Intervalo Estratigráfico A6

Identificado con tope entre 7090ft y base entre los 8290ft (Figuras 13a, 14a, 14b).

A partir de los registros de pozo en la curva GR (Figuras 13a, 14a, 14b). se clasificaron tres patrones diferentes para este intervalo estratigráfico. El primero y más predominante (7450-7600ft, 7790-8290ft, Figura 14a); llamado forma cilíndrica (Figura 5) o también denominado S y S/G (Figura 4), el cual presenta una ligera combinación del patrón de electrofacies serrado o dientes de sierra, ya que si bien este sector se caracteriza por tener una firma monótona y en forma de bloque con unos límites nítidos en los límites superior e inferior con lecturas GR relativamente consistentes que indican una litología constante, también hay una ligera componente de variaciones y rugosidades en el registro cilíndrico.

Adicionalmente, también se evidencia que en el registro de Resistividad hay rápidos aumentos de los valores de resistividad en los puntos en que se genera este patrón de electrofacies en forma cilíndrica, que después decae rápidamente en el momento que finaliza el patrón de electrofacies en los registros. Mostrando que en promedio la resistividad presenta valores medios a altos. Donde las tres curvas de resistividad (superficial, media y profunda) se separan en casi todo el trayecto del patrón de electrofacies.

El segundo patrón de electrofacies identificado en la curva GR se denomina Sgf/Hgf (Figura 4) ubicado entre 7290-7450ft, 7600-7780ft (Figura 14a), se caracteriza por ser un patrón de electrofacies dentado, con constantes variaciones e intercalaciones en el GR y terminaciones en forma de pico, las cuales presentan valores que van desde 35 API hasta los 105 API lo cual conlleva un rango de valores muy amplio

para los GR. Por otro lado, la curva de Resistividad se comporta de manera irregular con constantes deflexiones de valores medios a altos de resistividad y con marcadas separaciones en las tres curvas de resistividad (superficial, media y profunda).

El tercer patrón de electrofacies identificado presenta una forma serrada o dientes de sierra (Figura 5). Fue identificado 7090-7290ft (Figura 13a) y describe una geometría irregular y de constantes deflexiones entre altos y bajos en intervalos cortos a través de la gráfica, con valores GR que van desde 60 hasta 105 API. La curva de Resistividad se comporta relativamente uniforme con valores predominantemente medios, y solamente sobre el final de la curva se ve que la resistividad aumenta rápidamente. Siendo así, este intervalo se clasificó en cuatro electrofacies diferentes; una intercalación de patrones cilíndricos con serrados y Sgf/Hgf (Figuras 13a, 14a, 14b, ver líneas rojas).

En las muestras de zanjas (14c, 14d), este intervalo estratigráfico inicia hacia el tope (7080-7090ft hasta 7240-7250ft aproximadamente) con una aparente zona de transición entre las litofacies de arcillolitas y de limolitas ricas en materia orgánica con carbón del intervalo anterior (intervalo estratigráfico A5). Donde se presentan colores grises medios a oscuros, marrón claro a medio, marrón rojizos y negros por lo cual se podría decir que esta zona de transición corresponde a lo que en el registro de pozo (Figura 13a) se clasificó como un patrón de electrofacies en forma serrada.

Desde los 7310-8290ft aproximadamente, se observan una litofacies de arenitas con colores marrón medio a ligeramente gris, principalmente con tamaños de grano

muy fino a fino y localmente con algunos tamaños de granos medios, bien seleccionadas, esféricas y redondeadas. Formadas principalmente por granos de cuarzo y algunos líticos.

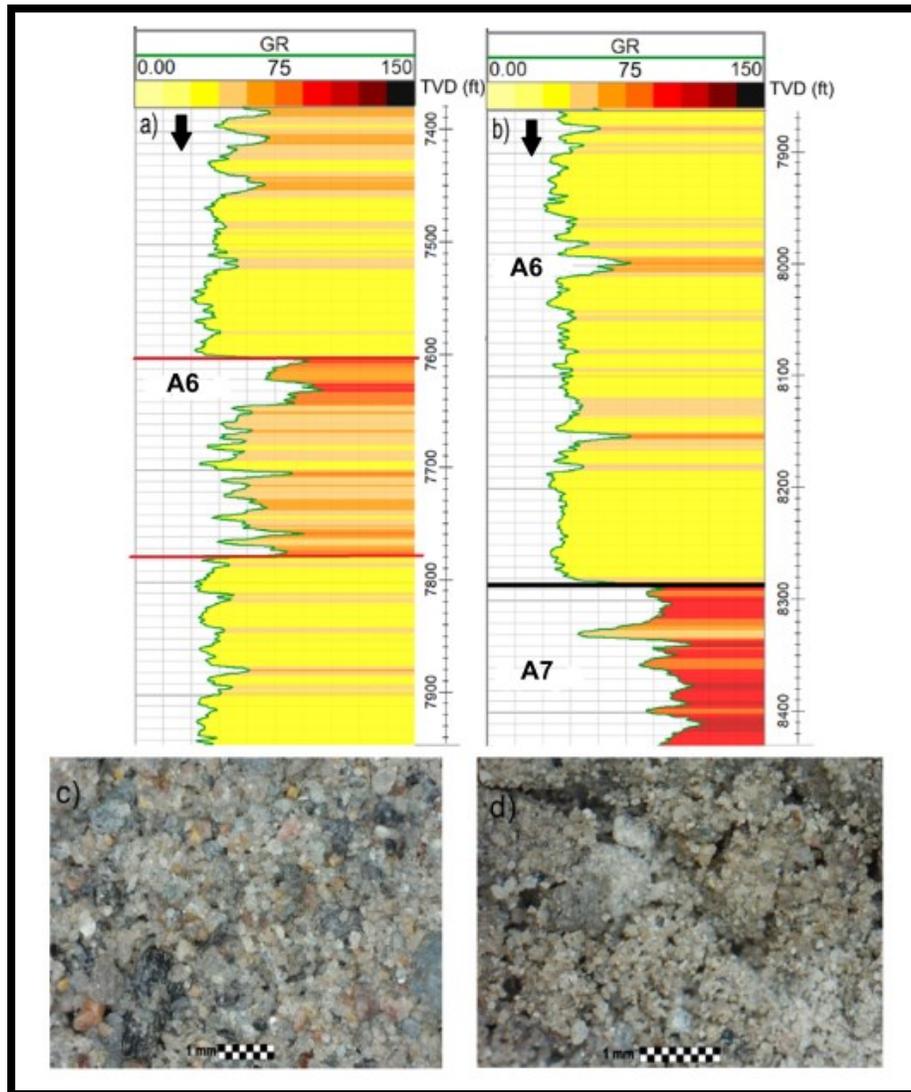


Figura 14. a) Registro GR (unidades API) entre los 7400ft y 7950ft intervalo estratigráfico A6 b) Registro GR (unidades API) entre los 7870ft y 8420ft intervalo A6 y A7 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo A6 y A7. Mientras la línea roja marca el cambio de electrofacies). c) Fotografía intervalo A6 en 7210ft d) Fotografía intervalo A6 en 7910ft.

También se observan litofacies de arcillolitas y limolitas, ambas presentan colores entre marrón oscuro a medio, grises claros a medios, verdes, negros y ligeramente naranja. Los cuales reaccionan localmente con HCl (principalmente hacia la base), con presencia de carbón y materia orgánica en algunas muestras.

Intervalo Estratigráfico A7

Identificado con tope entre 8290ft y base entre los 8720ft (Figuras 14b, 15a, 15b).

A partir de los registros de pozo en la curva GR (Figuras 14b, 15a, 15b), la electrofacies de este intervalo estratigráfico se clasificó como una combinación del patrón de electrofacies en forma serrada o dientes de sierra (Figura 5) con una variante del patrón de electrofacies denominado Slg (Figura 4).

El patrón de electrofacies serrada se describe como una geometría irregular y de constantes deflexiones entre altos y bajos en intervalos cortos a través de la curva, mientras que el patrón de electrofacies Slg se describe en las terminaciones cortas en forma de picos en valores altos de GR. Valores GR que van entre mínimos de 55 hasta máximos de 120 API con valores medios que fluctúan entre los 105 API (Figura 15a).

La curva de Resistividad se comporta de manera muy irregular y con constantes variaciones y deflexiones muy espaciadas a través del registro. Sin embargo, la curvas se mantiene en valores bajos de resistividad a pesar de las constantes variaciones a través del intervalo estratigráfico.

En las muestras de zanjas (15c, 15d) este intervalo estratigráfico se describió como formado principalmente por litofacies de arcillolitas (50%), arenitas (40%) y en menor proporción limolitas (10%).

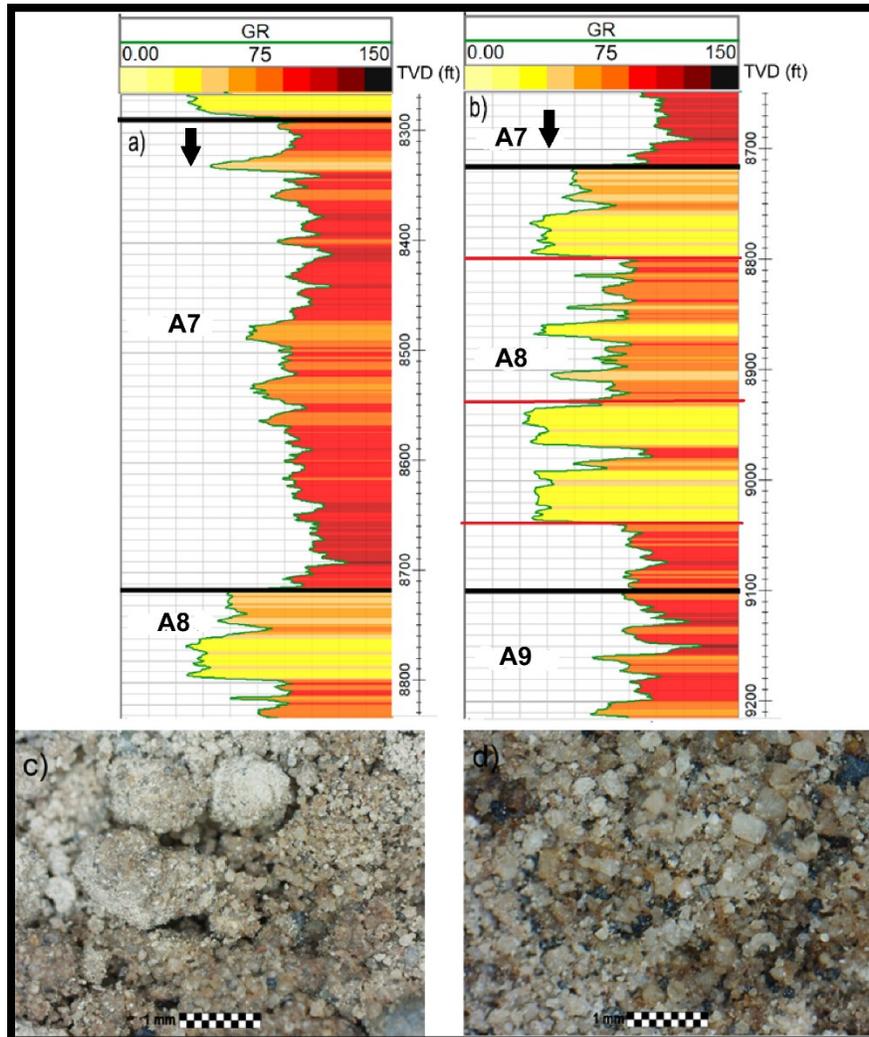


Figura 15. a) Registro GR (unidades API) entre los 8270ft y 8830ft intervalos estratigráficos A7 y A8 (las líneas negras marcan el cambio aproximado entre el intervalo A7 y A8) b) Registro GR (unidades API) entre los 8660ft y 9200ft intervalos A7, A8 y A9 (las líneas negras marcan el cambio aproximado entre los intervalos estratigráficos A7, A8 y A9. Mientras las líneas rojas el cambio de electrofacies). c) Fotografía intervalo estratigráfico A7 en 8410ft d) Fotografía intervalo estratigráfico A7 en 8660ft.

La litofacies de arcillolitas se presenta principalmente en colores grises (claro, medio, oscuro), y en menor medida marrón grisáceas, marrón oscuras, grises verdosas y localmente negras con presencia de materia orgánica y carbón.

La litofacies de arenitas se observa predominantemente hacia el tope del intervalo estratigráfico, con tamaños de grano fino a muy fino, bien seleccionadas, subesféricas a esféricas y subredondeadas, principalmente formadas por cuarzos translucidos a ligeramente amarillos y en menor medida hialinos.

La litofacies de limolitas es de colores grises claro y medio, algunas veces marrón medio a negros con algo de materia orgánica y carbón. Adicionalmente, las arcillolitas y limolitas reaccionan localmente con HCl.

Intervalo Estratigráfico A8

Identificado con tope entre 8720ft y base entre los 9100ft (Figuras 15a, 15b).

A partir de los registros de pozo en la curva GR (Figuras 15a, 15b), la electrofacies de este intervalo estratigráfico fue clasificado con dos patrones diferentes; el primero en forma cilíndrica (Figura 5) o también denominado por otro autor como S y S/G (Figura 4). El segundo patrón de electrofacies identificado se denomina Sgf/Hgf (Figura 4).

El patrón de electrofacies en forma cilíndrica se caracteriza por tener una firma monótona y en forma de bloque con unos límites nítidos en los límites superior e inferior con lecturas GR relativamente consistentes que indican una litología constante. Sin embargo, en este caso el patrón de electrofacies no es completamente homogéneo y presenta algunas irregularidades en los valores más

bajos del GR (por ejemplo 8750-8800ft, 8990-9040ft) (Figura 15b). Valores GR que en este patrón de electrofacies llegan a mínimos de 35 API y máximos de 75 API.

El patrón de electrofacies Sgf/Hgf se caracteriza por ser un patrón de electrofacies dentado, con constantes variaciones e intercalaciones en el GR y terminaciones en forma de pico espaciadas verticalmente en la gráfica (por ejemplo, Figura 15b, 8800-8850ft y 8870-9000ft). Siendo así, este intervalo se clasificó con 4 electrofacies diferentes; una intercalación de patrones cilíndricos con Sgf/Hgf (Figura 15b, ver líneas rojas).

Con respecto a la Resistividad en este intervalo estratigráfico, se comporta de manera muy irregular y con constantes fluctuaciones. Sin embargo, se puede notar claramente que hay una respuesta en la curva de rápido aumento en la resistividad en las zonas donde se presenta el patrón de electrofacies Sgf/Hgf (Figura 4).

En las muestras de zanjas (Figura 16a) se clasificó este intervalo estratigráfico como formado predominantemente por litofacies de arenitas (80%), arcillolitas (15%) y limolitas (5%). La litofacies de arenitas es de colores gris claro a medio y blanco con tamaños de grano fino a muy fino, bien seleccionadas, subesféricas a esféricas y subredondeadas, formadas principalmente por cuarzo. Estas son más predominantes en el tope (hasta los 9040ft), hacia la base aumenta la proporción de arcillolitas y limolitas con respecto a las arenitas que disminuyen en cantidad.

Las litofacies de arcillolitas y limolitas son colores gris claro a medio, marrón oscuro, marrón grisáceo y localmente negros, marrón amarillento y gris verdoso. Se

observa, adicionalmente que reaccionan localmente con HCl, además con la evidencia de la presencia de pequeñas cantidades de carbón.

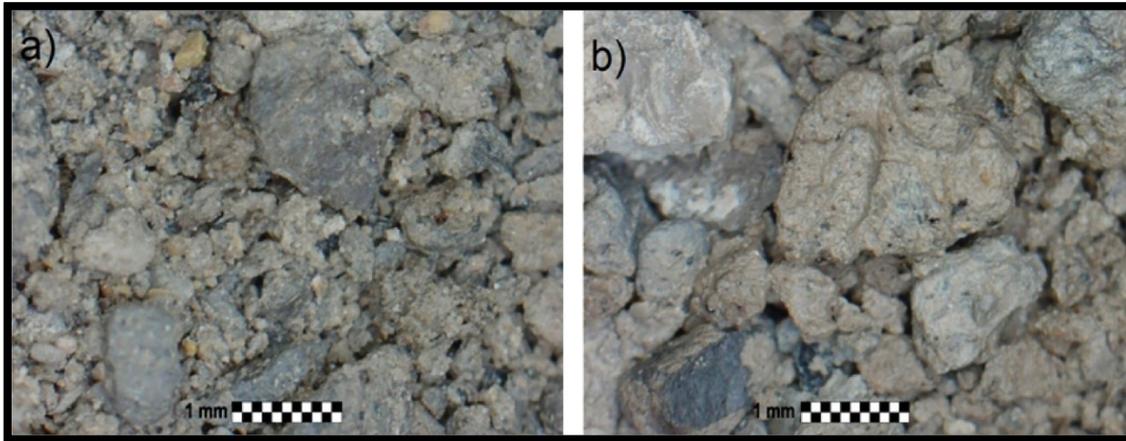


Figura 16. a) Fotografía intervalo estratigráfico A8 en 8880ft. b) Fotografía intervalo estratigráfico A9 en 9200ft.

Intervalo Estratigráfico A9

Identificado con tope entre 9100 ft y base entre los 9270ft (Figuras 15b. 17a).

A partir de los registros de pozo en la curva GR (Figuras 15b. 17a) la electrofacies de este intervalo estratigráfico se clasificó como un patrón de electrofacies Sgf/Hgf (Figura 4), el cual se caracteriza por ser un patrón de electrofacies dentado, con constantes variaciones e intercalaciones en el GR y terminaciones en forma de pico. En cual se presentan valores GR que van desde mínimos de 60 hasta máximos que llegan a 125 API. Intervalo al que se le identificó dos electrofacies diferentes; la primera entre 9100ft-9190ft y otra entre 9190ft-9270ft (Figura 17a, ver líneas rojas)

En las muestras de zanjas (Figura 16b) este intervalo estratigráfico se identificó como un paquete formado casi en su totalidad por litofacies de arcillolitas (70%) con intercalaciones de litofacies de limolitas en menor proporción (20%) y algunas

litofacies muy locales con intercalaciones de arenitas (10%). La litofacies de arcillolitas es de colores grises claros a medios, marrón oscuro, marrón amarillento, gris amarillento, marrón rojizo.

La litofacies de limolitas es de colores gris oscuro, marrón oscuro, gris verdoso, gris amarillento y localmente negros con algo de presencia de carbón. Limolitas las cuales reaccionan puntualmente en algunas zonas con HCl. La litofacies de arenitas tiene tamaños de grano fino, bien seleccionadas, subesféricas y subredondeadas, están formadas principalmente por cuarzo blanco a translucido y algunas inclusiones de líticos verdes, marrón y negros.

Intervalo Estratigráfico A10

Identificado con tope entre 9270ft y base entre los 9420ft (Figura 17a).

A partir de los registros de pozo en la curva GR (Figura 17a) la electrofacies de este intervalo estratigráfico se clasificó como un patrón de electrofacies Sgf/Hgf (Figura 4), el cual se caracteriza por ser un patrón de electrofacies dentado, con constantes variaciones e intercalaciones en el GR y terminaciones en forma de pico. En el cual se presentan valores GR que van desde mínimos de 45 hasta máximos que llegan a 95 API (Figura 17a).

En las muestras de zanjas (Figura 17b, 17c) este intervalo estratigráfico se clasificó como principalmente formado por litofacies de arenitas (50%), arcillolitas (40%) y en menor medida de limolitas (10%).

La relación entre arenitas y arcillolitas es más evidente hacia el tope del intervalo estratigráfico y disminuye hacia la base hasta el final del registro de pozo (9430ft),

donde se hacen casi totalmente predominante la cantidad de arenitas con respecto a las arcillolitas. La litofacies de arenitas está formada por tamaños de grano fino a muy fino, bien clasificadas, subesféricas a esféricas y subredondeadas principalmente formadas por cuarzos blancos, translucidos, grises y ligeramente marrón.

La litofacies arcillolitas principalmente presenta colores gris claro, gris oscuro, marrón grisáceos, marrón amarillento y en menor medida marrón rojizo, ligeramente naranjados y grises verdosos. Las cuales reaccionan localmente con HCl.

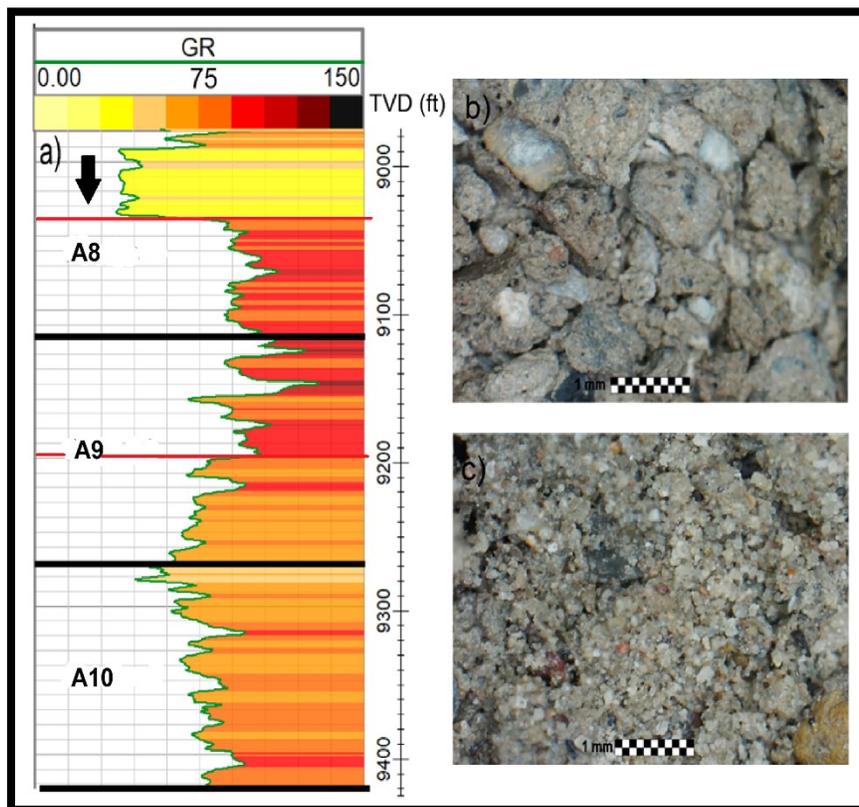


Figura 17. a) Registro GR (unidades API) entre los 8980ft y 9420ft intervalos estratigráficos A8, A9 y A10 (las líneas negras marcan el cambio entre los intervalos A8, A9 y A10). **b)** Fotografía intervalo A10 en 9320 ft. **c)** Fotografía intervalo A10 en 9420ft.

La litofacies de limolitas presenta colores marrón oscuros, naranjados a amarillos y en menor medida grises oscuros a medios y localmente negros. Por último, también se identifica la presencia de materia orgánica y carbón localmente.

POZO MONOARAÑA-1

Para el pozo Monoaraña-1 se describió entre los 0ft hasta 9700ft, para el cual se identificaron 10 intervalos estratigráficos diferentes (M1 a M10). Las litofacies descritas para este pozo se encuentran principalmente formadas por sedimentos clásticos; arcillolitas de color marrón, arenitas con tamaño de grano fino a medio, limolitas grises, negras y en menor medida conglomerados. Adicionalmente, con presencia de gran cantidad de materia orgánica y carbón.

Intervalo Estratigráfico M1

Identificado desde superficie a 2360ft (Figura 18a, 18b)

A partir de los registros de pozo en la curva de Gamma Ray, la electrofacies de este intervalo está definida por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Desde la base hasta el tope se encuentran variaciones suaves sobre la curva del GR en forma serrada (Figura 5) que oscilan entre 60 API a 85 API aproximadamente. Se muestra una curva bastante homogénea sin cambios bruscos, mostrando un patrón de electrofacies de litología contundente.

En relación con la curva de resistividad tiene un comportamiento variado durante el intervalo identificado, con cambios cada 50 ft donde la línea de resistividad muestra

un aumento en el valor, llegando aproximadamente a tocar valores de 20 ohm-metros.

Mediante las muestras de zanjas (Figura 18c, 18d) se definió esta litofacies, principalmente formada por arenitas (60%), arcillolitas (30%) y conglomerados (10%). Este intervalo está compuesto principalmente por arenitas de granos de tamaño medio a fino, predomina medio y localmente tamaño grueso. La forma de los granos es subangular a subredondeado, subesférico; pobre a moderada selección. Compuesta por un alto contenido de cuarzo translúcido (70%), en menor cantidad blanco lechoso (10%) y por líticos (20%). Estas arenitas disminuyen su concentración en la parte final hasta llegar a la base del intervalo, en 2300ft a 2350ft aproximadamente.

Las arcillolitas con variedad de colores, entre ellos el marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente limosa; la cual reacciona localmente en algunas muestras al HCl. Las arcillolitas se encuentran intercalada con las arenitas, desde los 1500ft aumentan su concentración hacia la base.

Los conglomerados compuestos por fragmentos de roca, grueso a muy grueso; mal seleccionados, angulares a subangulares y subesféricos. Formados por fragmentos de colores gris verdoso, marrón oscuro y ocasional verde oscuro; en menos cantidad cuarzo blanco translúcido, Estos conglomerados se encuentran principalmente ubicados en el tope del intervalo.

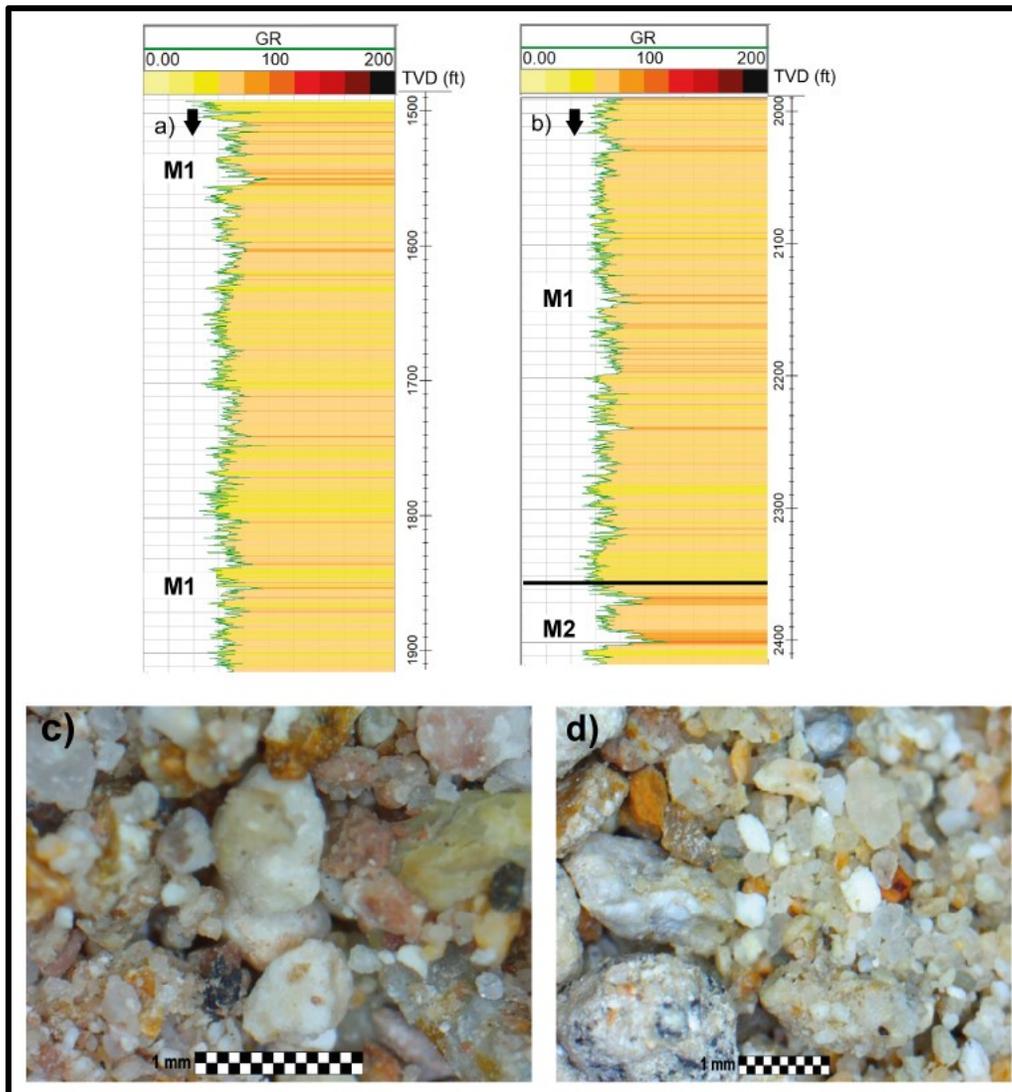


Figura 18. a) Registro GR (unidades API) entre los 1500ft y 1910ft Intervalo estratigráfico M1 b) Registro GR (unidades API) entre los 2000ft y 2410ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo M1 y M2) c) Fotografía intervalo M1 en 1560ft d) Fotografía intervalo M1 en 750ft.

Intervalo Estratigráfico M2

Identificado con tope en 2360ft y base en los 3550ft-3600ft (Figura 19a, 19b)

A partir de los registros de pozo la curva de Gamma Ray, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) combinado con el patrón Sgl (Figura 4) o forma de campana. El intervalo se clasificó con una electrofacies interna diferente entre los 3390ft y 3480ft; un de patrón con forma Sgf/Hgf (Figura 19b, ver líneas rojas). Desde la base hasta el tope se encuentran variaciones marcadas sobre la línea del GR en forma de campana (Figura 5) que oscilan entre 40 API a 120 API aproximadamente. Se muestra una curva heterogénea con cambios bruscos, mostrando un patrón de electrofacies de litología cambiante.

En relación con la curva de resistividad, esta tiene un comportamiento variado durante el intervalo identificado, con cambios cada 50ft donde la línea de resistividad muestra un aumento en el valor, llegando aproximadamente a tocar valores de 20 ohm-metros.

Mediante las muestras de zanjas (Figura 19c, 19d) se definió esta litofacies, principalmente formada por arcillolitas (50%), arenitas (40%) y conglomerados (10%). Este intervalo está compuesto principalmente por arcillolitas con variedad de colores, entre ellos el marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente limosa; la cual reacciona localmente en algunas muestras al HCl. Las arcillolitas se encuentran en intercalaciones con las arenitas, desde los 2350ft va aumentando su concentración hacia la base.

Las arenitas con granos de tamaño medio a fino, predomina medio y localmente tamaño grueso. La forma de los granos es subangular a subredondeado, subesférico; pobre a moderada selección. Compuesta por líticos (30%) y alto contenido de cuarzo translúcido (50%), en menor cantidad blanco lechoso (20%).

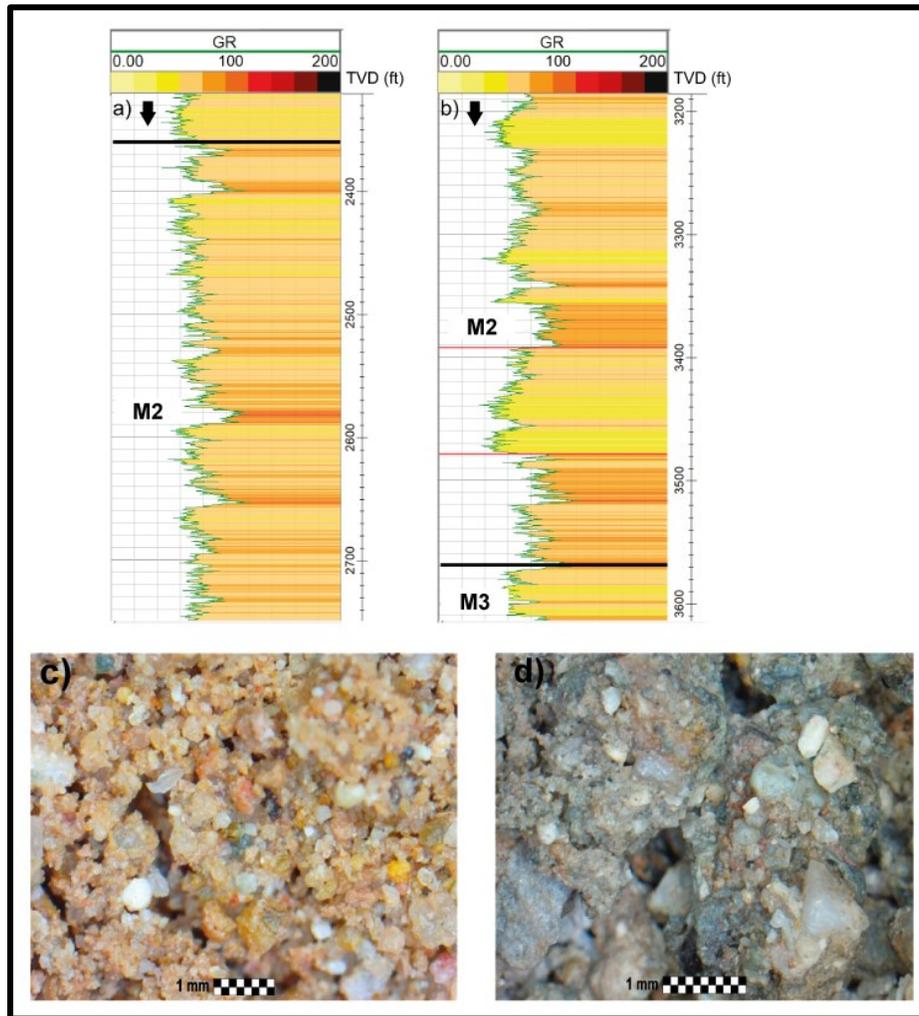


Figura 19. a) Registro GR (unidades API) entre los 2430ft y 2740ft intervalo estratigráfico M2 (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo estratigráfico M1 y M2) **b)** Registro GR (unidades API) entre los 3200ft y 3610ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo M2 y M3. Mientras, la línea roja marca el cambio de las electrofacies) **c)** Fotografía M2 en 2730ft **d)** Fotografía M2 en 3540ft.

Los conglomerados compuestos por líticos, grueso a muy grueso; mal seleccionados, angulares a subangulares y subesféricos. Formados por fragmentos de colores gris verdoso, marrón oscuro y ocasional verde oscuro; en menos cantidad cuarzo blanco translúcido. Su concentración aumenta hacia la base y disminuye en el tope.

Intervalo Estratigráfico M3

Con tope en 3550ft-3600ft y base en los 4530ft-4600ft (Figura 19b, 20a, 20b)

A partir de los registros de pozo en la curva de Gamma Ray, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Sobre la base se encuentran deflexiones constantes sobre el registro de GR que varían entre 60 API a 120 API aproximadamente. Hacia la parte media del intervalo se encuentran variaciones mucho más marcadas por la curva del GR, formando patrones en forma de campana (Figura 5), que van desde los 35 API y suben hasta los 110 API. Sobre el tope del intervalo se vuelve a formar el patrón de electrofacies de forma serrado con variaciones en la curva GR más cortas que fluctúan entre los 60 API a 100 API.

En relación con la curva de resistividad, tiene un comportamiento constante durante el intervalo identificado, con algunas pequeñas variaciones en profundidades de 3600ft, 4000ft y 4200ft donde la línea de resistividad muestra una disminución en los valores.

Mediante las muestras de zanjas (Figura 20a, 20b) se definió esta litofacies, principalmente formada por arcillolitas (50%), arenitas (40%) y conglomerados

(10%). Este intervalo está compuesto principalmente por arcillolitas de varios de colores, entre ellos el marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente limosa; la cual reacciona localmente en algunas muestras al HCl.

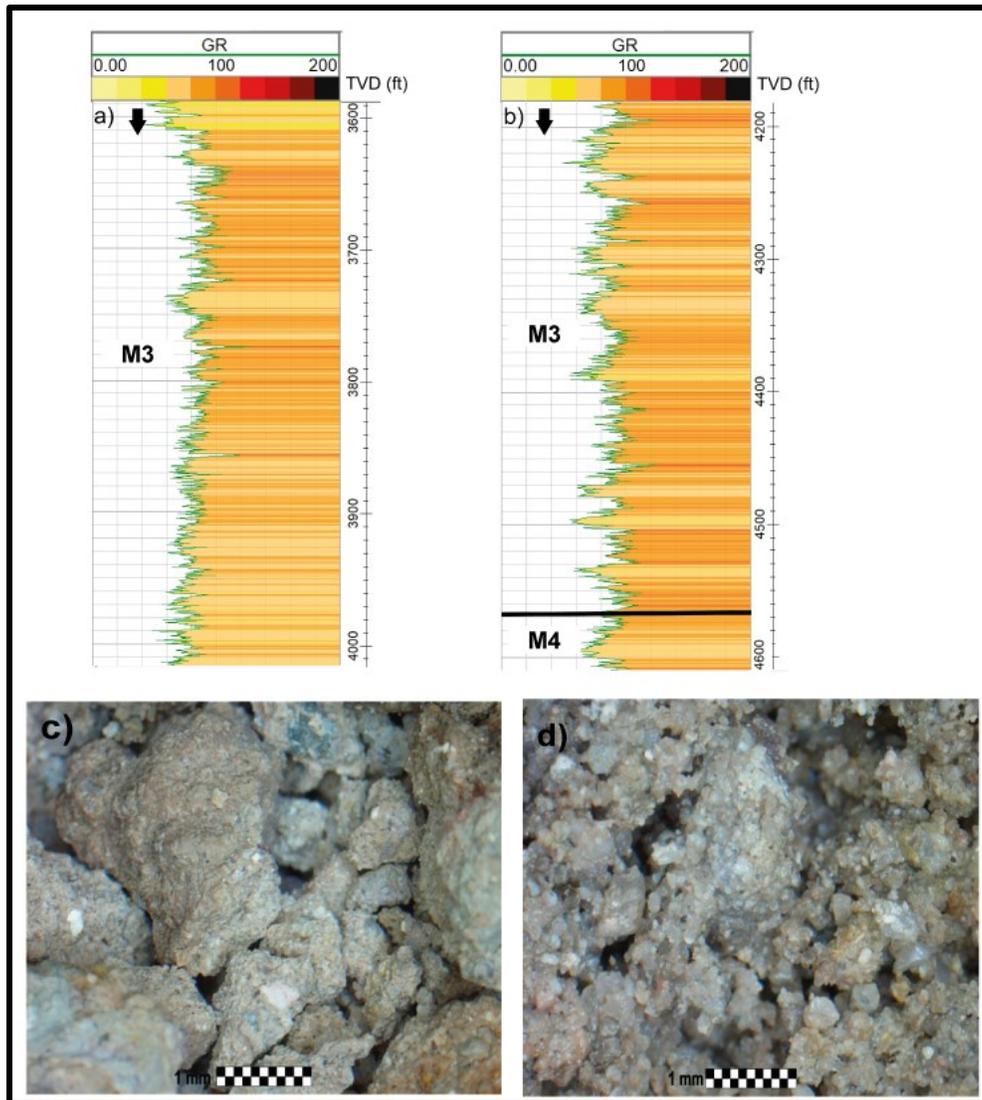


Figura 20. a) Registro GR (unidades API) entre los 3600ft y 4000ft intervalo estratigráfico M3 b) Registro GR (unidades API) entre los 4200ft y 4600ft intervalo estratigráfico M3 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo M3 y M4) c) Fotografía M3 en 4080ft d) Fotografía M3 en 4230ft.

Las arenitas están formadas por granos de tamaño medio a grueso, predomina medio, y en algunas partes localmente tamaño grueso. La forma de los granos es subangular a subredondeado, y subesférico, moderadamente seleccionados. Compuesta por líticos y alto contenido de cuarzo translúcido, en menor cantidad blanco lechoso. Estas arenitas se encuentran principalmente ubicadas en la base del intervalo disminuyendo su concentración hacia el tope.

Los conglomerados compuestos por líticos, fragmentos gruesos a muy gruesos; mal seleccionados, angulares a subangulares y subesféricos. De colores gris verdoso, marrón oscuro y ocasional verde oscuro; estos conglomerados se encuentran ubicados en la base del intervalo disminuyendo hacia el tope.

Intervalo Estratigráfico M4

Con tope en 4530ft-4600ft y base en los 4800ft-4820ft (Figura 21a)

A partir de los registros de pozo en la curva de Gamma Ray, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Sobre la base se encuentran deflexiones constantes mostrando una forma cilíndrica/en caja (Figura 5) o también denominado S y S/G (Figura 4), el cual presenta una ligera combinación del patrón de electrofacies serrado o dientes de sierra, esta parte del intervalo tiene un registro de GR que varía entre 80 API a 140 API aproximadamente. Sobre el tope del intervalo se vuelve a encontrar el patrón de electrofacies de forma serrado con variaciones en la línea GR más contundentes que fluctúan entre los 60 API a 120 API.

En relación con la curva de resistividad tiene un comportamiento variado durante el intervalo identificado, con algunas variaciones en profundidades de 4600ft, 4640ft y 4750ft donde la línea de resistividad muestra un aumento en el valor de está llegando aproximadamente a tocar valores de 20 ohm-metros.

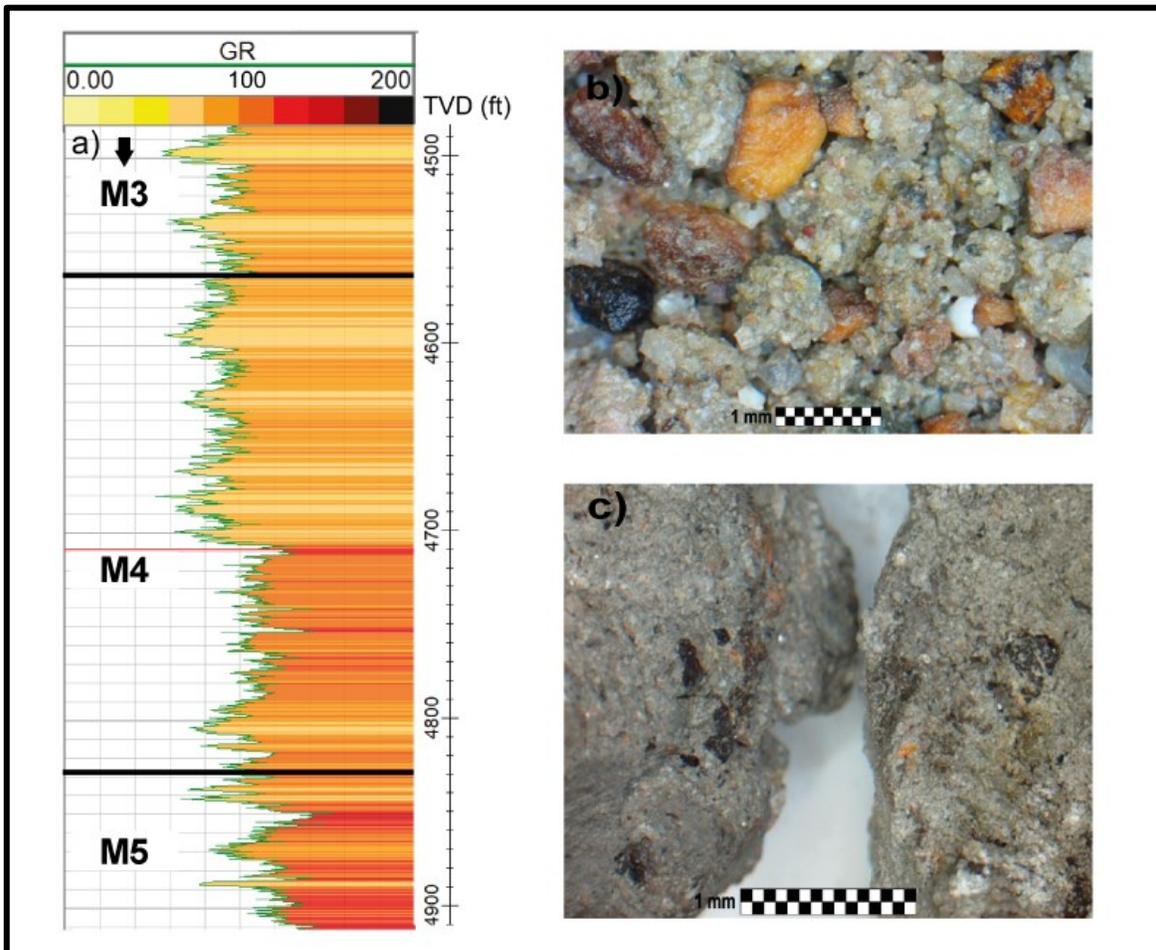


Figura 21. a) Registro GR (unidades API) entre los 4500ft y 4900ft intervalo estratigráfico M4 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M3 y M4; M4 y M5. Mientras, la línea roja marca el cambio de la electrofacies). **b)** Fotografía M4 en 4820ft **c)** Fotografía M4 en 4680ft.

Mediante las muestras de zanjas (Figura 21b, 21c) se definió esta litofacies, principalmente formada por arcillolitas (60%) y arenitas (40%). Este intervalo está

compuesto principalmente por una arcillolita de variedad de colores, entre ellos el marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente limosa; la cual reacciona localmente en algunas muestras al HCl.

Las arenitas están formadas por granos de tamaño fino a medio, predomina fino, y en algunas partes localmente tamaño medio. La forma de los granos es subangular a subredondeado, y subesférico, mal a moderadamente seleccionados. Compuesta por líticas y alto contenido de cuarzo translúcido, en menor cantidad blanco lechoso. Estas arenitas se encuentran ubicadas durante todo el intervalo, ya que son intercalaciones que se dan entre estas dos litologías predominantes de arcillolitas y arenitas.

Durante la descripción de este intervalo se observaron abundantes fragmentos de carbón de color marrón oscuro a negro, moderadamente firmes

Intervalo Estratigráfico M5

Con tope en 4820ft-4840ft y base en los 5670ft-5700ft (Figura 21a, 22a, 22b)

A partir de los registros de pozo en la curva de Gamma Ray, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Este intervalo se clasificó con dos electrofacies diferentes; intercalación de patrones cíclicos con Sgf/Hgf (Figura 22b, ver las líneas rojas). Sobre la base se encuentran variaciones bastantes marcadas sobre la línea del GR en forma de campana (Figura 5) que oscilan entre 40 API a 140 API aproximadamente. Sobre el tope del intervalo se vuelve a encontrar el patrón de electrofacies de forma serrado o dientes de sierra

con variaciones en la línea GR mucho más suaves que fluctúan entre los 80 API a 110 API.

En relación con la curva de resistividad tiene un comportamiento variado durante el intervalo identificado, con cambios importantes en 5400ft y 5500ft donde la línea de resistividad muestra un aumento en el valor, llegando aproximadamente a tocar valores de 200 ohm-metros.

Mediante las muestras de zanjas (Figura 22c, 22d) se definió esta litofacies, principalmente formada por arcillolitas (60%) y arenitas (40%). Este intervalo está compuesto principalmente por una arcillolita de variedad de colores, entre ellos el marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente limosa; la cual reacciona localmente en algunas muestras al HCl. Las arcillolitas se encuentran en el tope del intervalo, desde los 4820ft hasta los 5200ft aproximadamente y va disminuyendo su cantidad hacia la base.

Las arenitas están formadas por granos de tamaño fino a muy fino, predomina fino. La forma de los granos es redondeada, y subesférico, bien seleccionados. Compuesta por líticos y alto contenido de cuarzo translúcido, en menor cantidad blanco lechoso. Estas arenitas aumentan su concentración en la parte final hasta llegar a la base del intervalo, en 5300ft a 5700ft aproximadamente. Además, se observaron algunos pequeños fragmentos de carbón de color marrón oscuro a negro, moderadamente firmes.

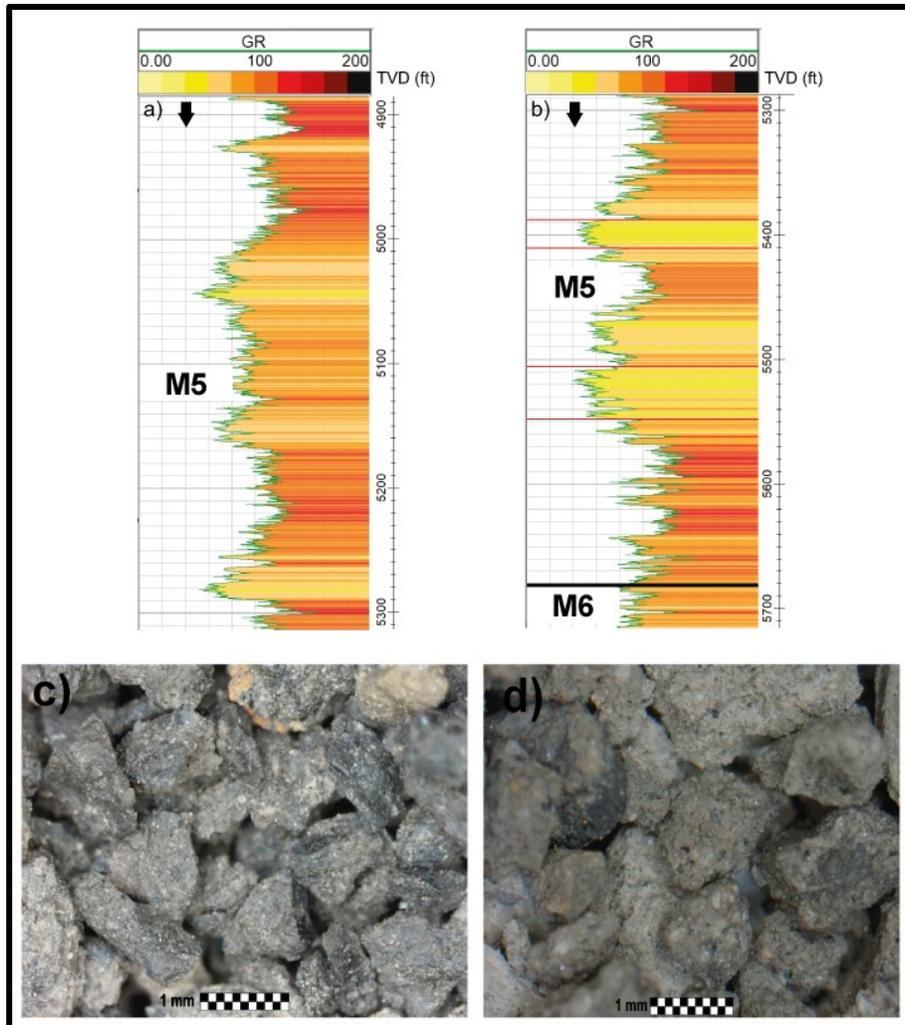


Figura 22. a) Registro GR (unidades API) entre los 4900ft y 5300ft intervalo estratigráfico M5 b) Registro GR (unidades API) entre los 5300ft y 5700ft intervalo estratigráfico M5 (la línea negra marca el cambio aproximado entre M5 y M6. Mientras, la línea roja marca el cambio de las electrofacies) c) Fotografía M5 en 4940ft d) Fotografía M5 en 5230ft.

Intervalo Estratigráfico M6

Identificada con tope en 5700ft y base en los 7030ft-7050ft (Figura 23a, 23b)

A partir de los registros de pozo en la curva de Gamma Ray, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5) combinado con el patrón de electrofacies Sgl (Figura 4) o forma de campana. En el tope del intervalo se encuentran variaciones marcadas sobre la línea del GR que oscilan entre 65 API a 140 API aproximadamente. Desde los 6350ft y hasta la base, la línea del GR tiene un comportamiento más suavizado, aunque conserva el patrón de electrofacies serrado las deflexiones van entre 110 API y los 155 API. Se muestra una curva bastante heterogénea, mostrando un patrón de electrofacies de intercalaciones en la litología.

En relación con la curva de resistividad tiene un comportamiento continuo durante el intervalo identificado, con cambios importantes solo en dos profundidades, en 6330 ft y 6370 ft donde la curva de resistividad muestra un aumento en el valor, llegando aproximadamente a tocar valores de 20 ohm-metros. Además, que en estas dos profundidades el GR baja hasta los 60 APPI, valores establecidos para arenitas.

Mediante las muestras de zanjas (Figura 23c, 23d) se definió esta litofacies, principalmente formada por arcillolitas (70%) y arenitas (30%). Este intervalo está compuesto principalmente por arcillolita con variedad de colores, entre ellos el marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente limosa; la cual reacciona localmente en algunas muestras al HCl.

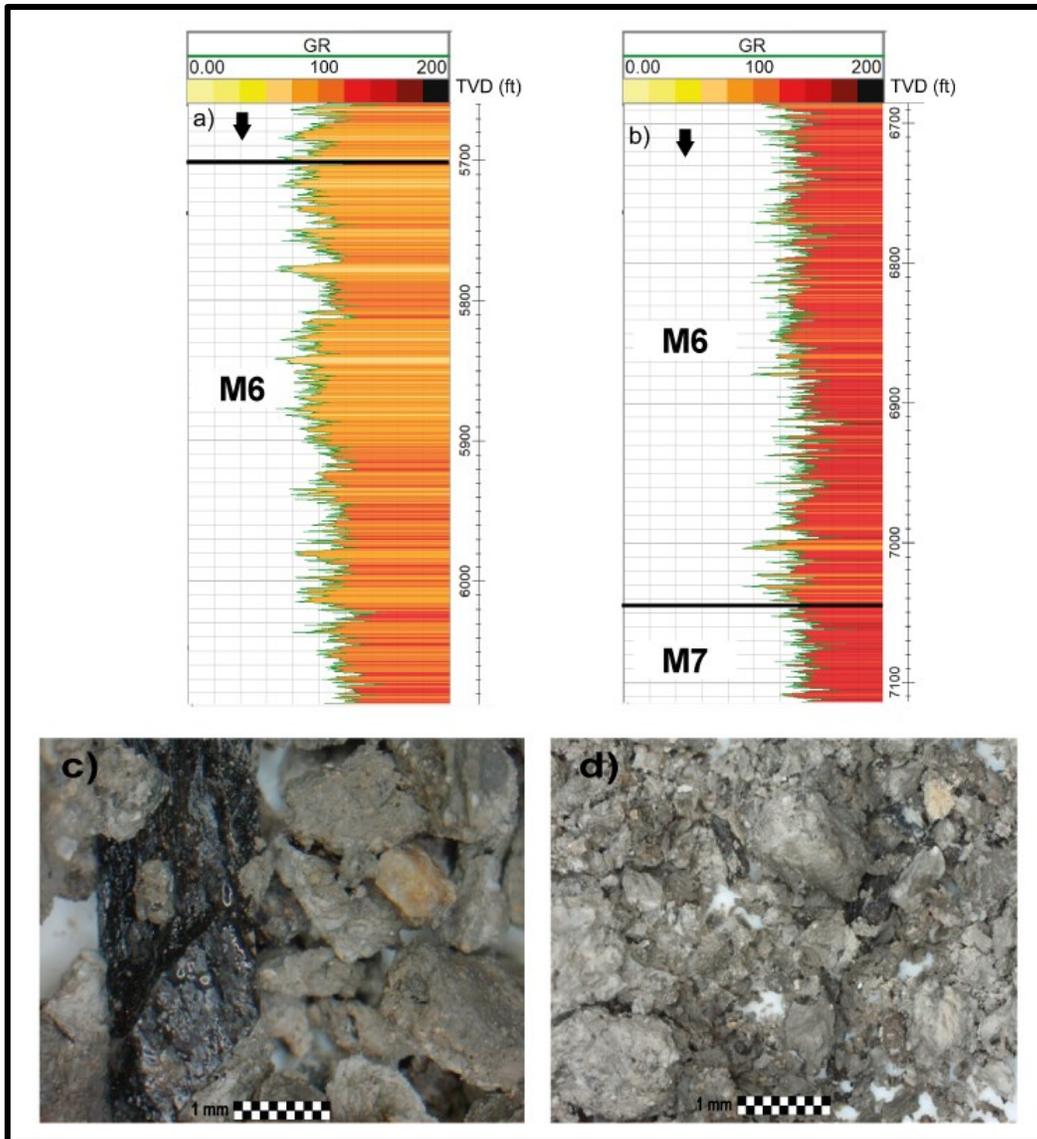


Figura 23. a) Registro GR (unidades API) entre los 5660ft y 6080ft intervalo estratigráfico M6 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M5 y M6) **b)** Registro GR (unidades API) entre los 6700ft y 7110ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre M6 y M7) **c)** Fotografía M6 en 6370ft **d)** Fotografía M6 en 6790ft.

Las arcillolitas se encuentran localmente en algunos intervalos intercalada con las arenitas. Además, algunas limolitas que se ven localmente de color gris oscuro, gris medio, de composición firme, calcáreo.

Las arenitas con granos de tamaño fino a muy fino, predomina fino y localmente tamaño medio. La forma de los granos es subangular a subredondeado, subesférico; buena a moderada selección. Compuesta por líticos (30%) y alto contenido de cuarzo translúcido (50%), en menor cantidad blanco lechoso (20%). Estas arenitas aparecen muy localmente solo en algunas partes del medio al tope del intervalo.

Intervalo Estratigráfico M7

Identificada con tope en 7050ft y base en los 9000ft-9100ft (Figura 23b, 24a, 24b)

A partir de los registros de pozo en la curva de Gamma Ray, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Desde el tope del intervalo hasta la base de este la línea del GR tiene variaciones pequeñas que oscilan entre 120 API a 160 API aproximadamente. Durante este intervalo se muestra una curva bastante homogénea mostrando una litología con límites bien definidos. Sin embargo, en algunas profundidades específicas ocurren cambios bruscos que ocurrieron debido a problemas durante la adquisición, atribuidos a posibles derrumbes durante la perforación.

En relación con la curva de resistividad tiene un comportamiento continuo durante el intervalo identificado, relativamente constante durante todo el intervalo con pequeñas variaciones y deflexiones constantes, con valores bajos en las lecturas de resistividad.

Mediante las muestras de zanjas (Figura 24c) se definió esta litofacies, principalmente formada por arcillolitas (60%) y limolitas (30%) y carbón (10%). Este intervalo está compuesto principalmente por arcillolita con variedad de colores, entre ellos el marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente limosa; de composición firme, la cual reacciona localmente en algunas muestras al HCl. Las arcillolitas se encuentran en algunos intervalos intercalada con arenitas muy finas.

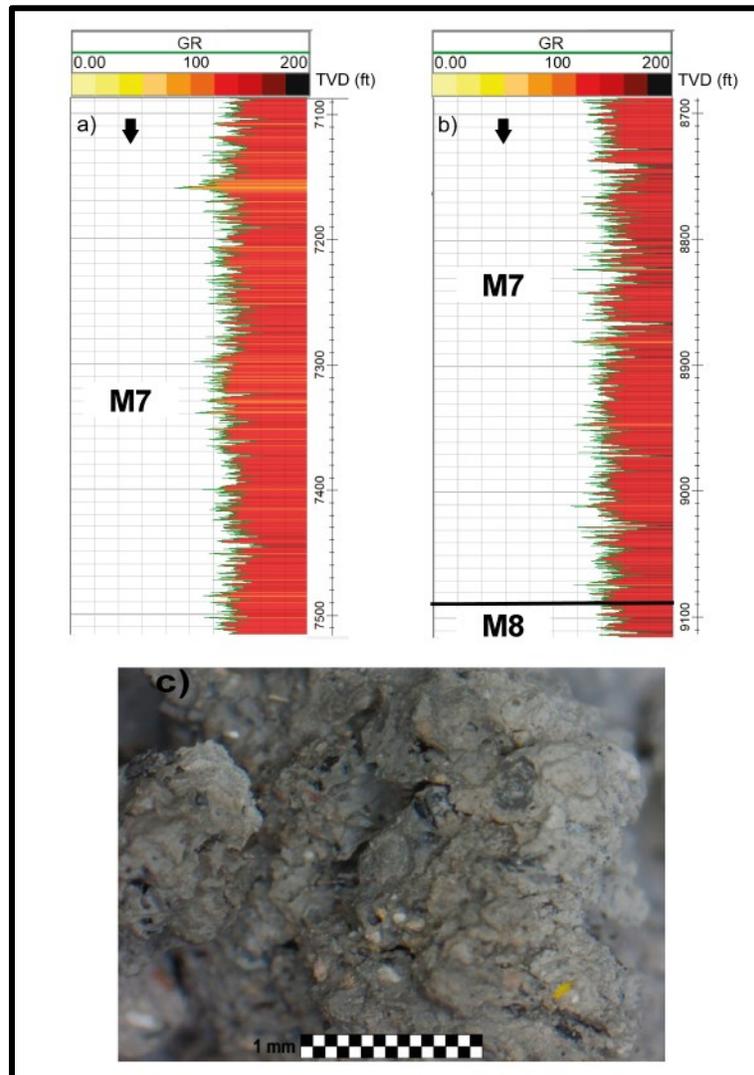


Figura 24. a) Registro GR (unidades API) entre los 7100ft y 7510ft intervalo estratigráfico M7 b) Registro GR entre los 8700ft y 9110ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M7 y M8) c) Fotografía intervalo M7 en 8590ft.

Las limolitas caracterizadas por un color por un gris oscuro, gris medio y en algunas partes localmente gris oliva, de composición gomosa, con alto contenido calcáreo, estas limolitas aumentan su porcentaje hacia la base del intervalo. Durante la descripción de este intervalo se observaron algunos pequeños fragmentos de tamaño medio a fino de carbón de color marrón oscuro a negro brillante, moderadamente firmes.

Intervalo Estratigráfico M8

Identificada con tope en 9100ft y base en los 9300ft (Figura 26a)

A partir de los registros de pozo en la curva de Gamma Ray, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Este intervalo se clasificó con dos electrofacies diferentes; intercalación de patrones cíclicos con Sgf/Hgf (Figura 26a, ver las líneas rojas). Desde el tope del intervalo hasta la base de este, la línea del GR tiene variaciones pequeñas que oscilan entre 40 API a 100 API aproximadamente. Además, este intervalo muestra una curva denominada cilíndrica o en forma de caja (Figura 5) que sube hasta los 125 API mostrando una litología con una composición diferente.

En relación con la curva de resistividad tiene un comportamiento continuo durante el intervalo identificado con valores bajo de 2 ohm-m, relativamente constante hasta los 9190ft donde aumenta rápidamente llegando a los 200 ohm-m y va disminuyendo progresivamente hacia la base de la litofacies marcada.

En las muestras de zanjas (Figura 25) se definió esta litofacies como, principalmente formada casi en su totalidad de arcillolitas con intercalaciones de limolitas y algunas partes locales materia orgánica. Las arcillolitas son de colores grises claros a medios, marrón oscuro, marrón amarillento, gris amarillento, marrón rojizo. Limolitas de colores gris oscuro, negro grisáceo, negro; textura gomosa. Contenido de carbonatos en la muestra en gran proporción, reacciona fuertemente con el HCl.

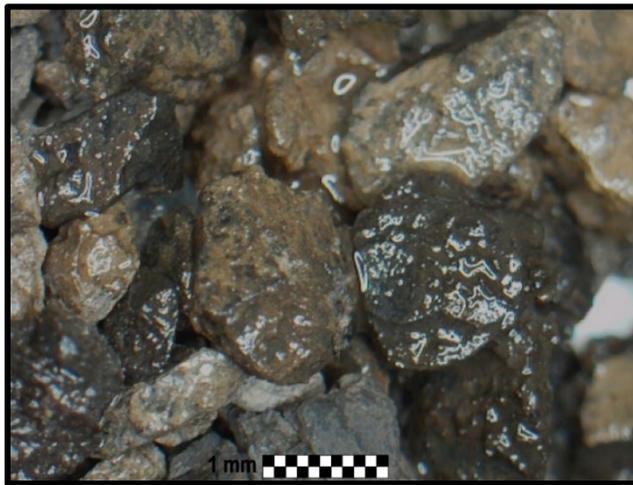


Figura 25. Fotografía intervalo M8 en 9280ft.

Intervalo Estratigráfico M9

Identificada con tope en 9300ft y base en los 9500ft (Figura 26a)

A partir de los registros de pozo en la curva de GR, este intervalo no se pudo clasificar por ningún patrón de electrofacies (Figura 4) ni formas (Figura 5). Desde el tope del intervalo hasta la base de este la línea del GR tiene un comportamiento muy irregular, es tal, que los valores obtenidos superan la escala de la gráfica, y retoma su aparición por el lado izquierdo de la gráfica. Es un comportamiento muy extraño que termina justo en los 9500ft donde fue definido el tope del intervalo M10.

En relación con la curva de resistividad tiene un comportamiento continuo durante el intervalo identificado con valores medios de 20 ohm-m, relativamente constante, donde no muestra esa irregularidad que tiene los valores del GR.

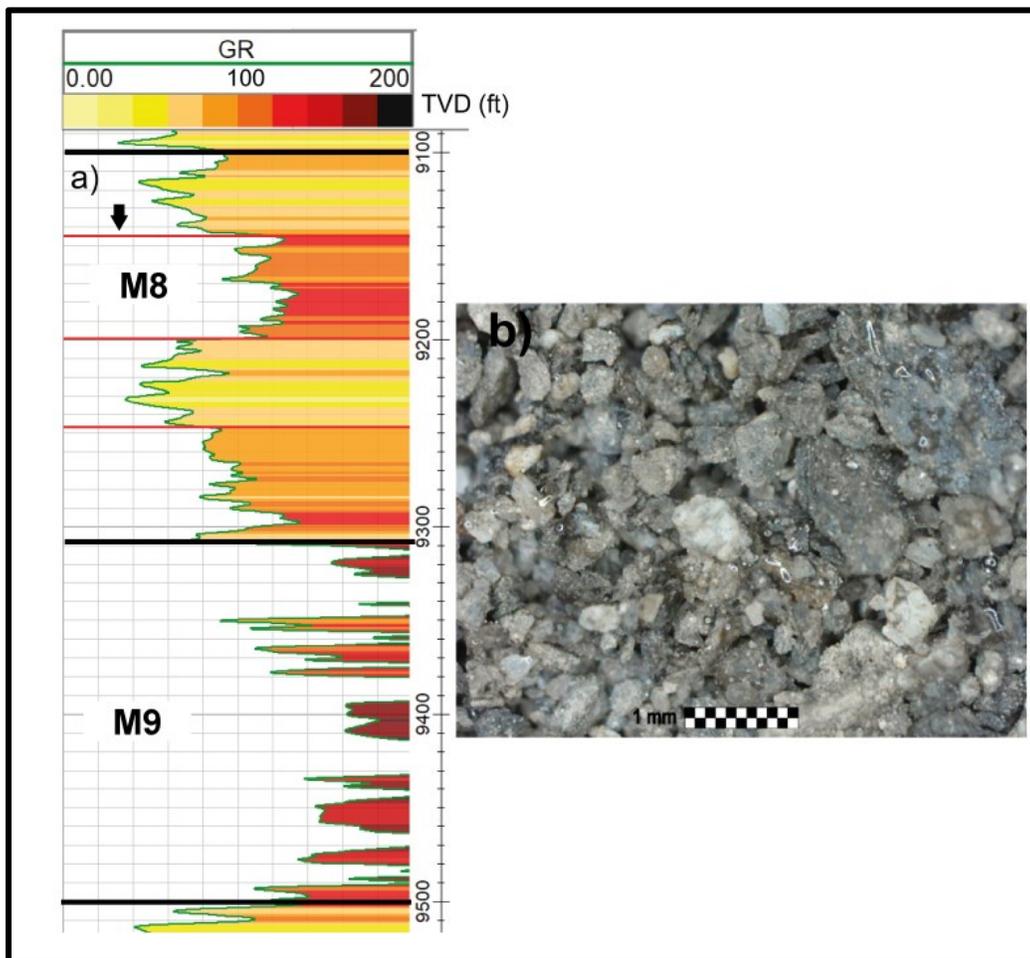


Figura 26. a) Registro GR (unidades API) entre los 9100ft y 9510ft (la línea negra marca el cambio aproximado entre el intervalo estratigráfico M9 y M10. Mientras, las líneas rojas marcan el cambio de las electrofacies) **b)** Fotografía intervalo M9 en 9360ft.

En las muestras de zanjas (Figura 26b) se definió esta litofacies como, formada casi en su totalidad de limolitas y algunas partes locales materia orgánica. Las limolitas

de colores gris oscuro, negro grisáceo, negro; textura gomosa. Contenido de carbonatos en la muestra en gran proporción, reacciona fuertemente con el HCl.

Intervalo Estratigráfico M10

Identificada con tope en 9500ft y base en los 9700ft (Figura 27a)

A partir de los registros de pozo en la curva de GR, este intervalo está clasificado por el patrón de electrofacies denominado Sgf/Hgf (Figura 4) y el patrón de electrofacies en forma serrado o dientes de sierra (Figura 5). Desde el tope del intervalo hasta la base de este la línea del GR tiene variaciones pequeñas que oscilan entre 40 APPI a 80 APPI aproximadamente. Una línea de GR bastante homogénea no muestra cambios significativos. Esta es la última electrofacies y donde termina el registro en una profundidad de 9770ft.

En las muestras de zanjas (Figura 27b) se definió esta litofacies como, formada casi en su totalidad de limolitas y arcillolitas. Las limolitas de colores gris oscuro, negro grisáceo, negro; textura gomosa. Contenido calcáreo en la muestra en gran proporción, reacciona fuertemente con el HCl.

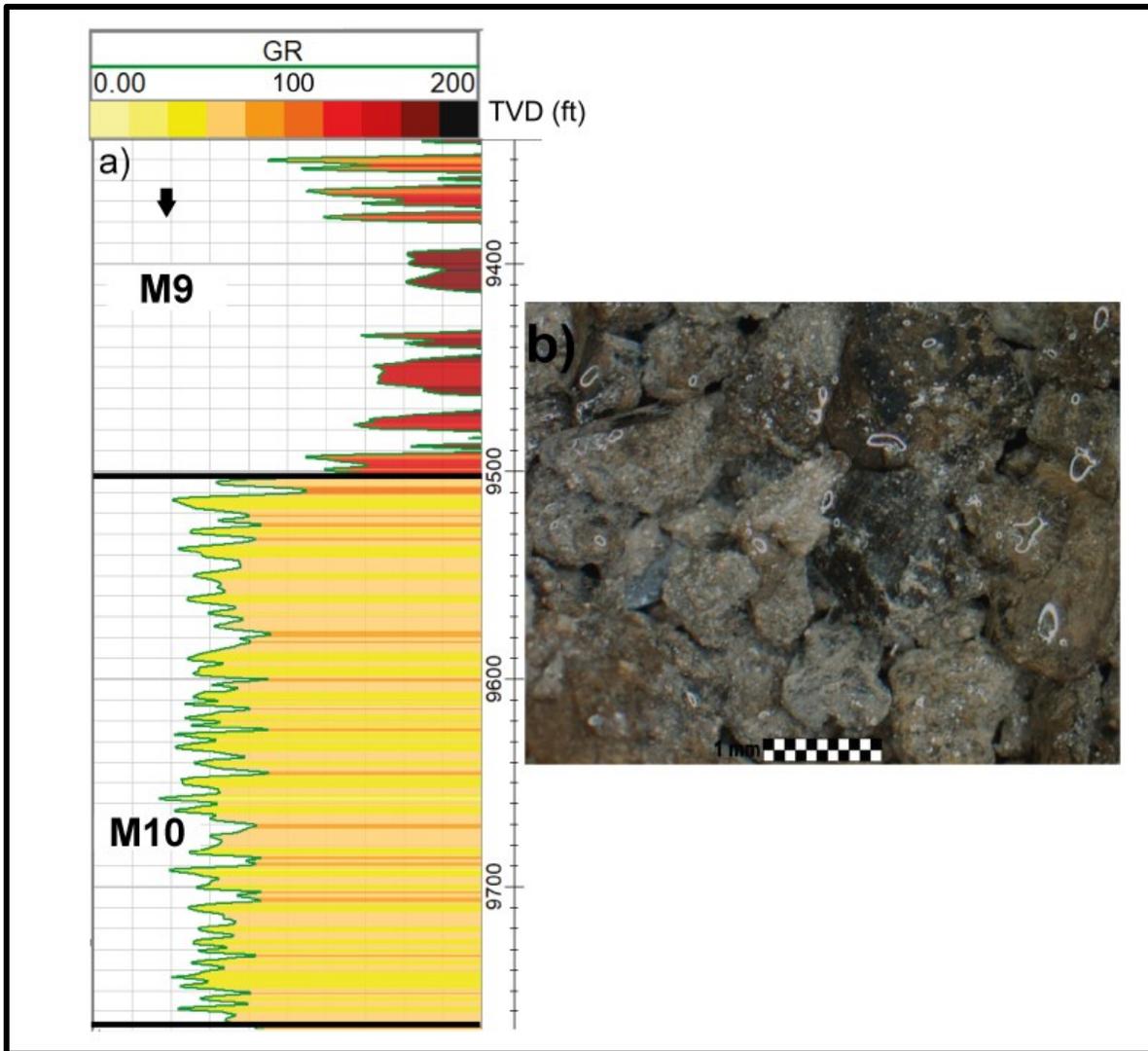


Figura 27. a) Registro GR (unidades API) entre los 9350ft y 97600ft intervalo estratigráfico M10 (la línea negra marca el cambio aproximado entre intervalo estratigráfico M9 y M10 b) Fotografía intervalo M10 en 9680ft.

9. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo, fundamentados en el análisis de los registros de pozos y la descripción de las muestras de zanjas nos permitieron identificar 10 intervalos estratigráficos tanto para Acordionero-10 como para Monoaraña-1. A partir de estos resultados se generó una correlación de los intervalos descritos entre ambos pozos, buscando identificar la continuidad lateral de los intervalos en cada pozo y asociando cada intervalo con las unidades litoestratigráficas y paleo-ambientes ya descritos en el VMM.

La cuenca del Valle Medio del Magdalena soportó transiciones ambientales durante el Mesozoico de continentales a marinas, y nuevamente de marinas a continentales a principios del Cenozoico (Sarmiento-Rojas, 2011). Esta transición de régimen se evidencia en la sección superior de la Formación Lisama que registra el cambio de ambiente de acumulación marina a continental (Gómez et al., 2005; Nie et al., 2009). La Formación Lisama, del Paleoceno con un contacto transicional registra una sedimentación regresiva en llanuras deltaicas y aluviales (Figura 28) y se superpone a la Formación Umir, de origen marino somero, del Maastrichtiano, (Ramírez, 1988; Gómez, 2001).

Con base en los resultados obtenidos encontramos que la Formación Lisama (Figura 29) en el pozo Acordionero-10 se encuentra ubicada entre los 5480ft y 9420ft (final del registro de pozo) correspondiente a los intervalos estratigráficos A4, A5, A6, A7, A8, A9 y A10, mientras que en el pozo Monoaraña-1 fue identificada entre los 4820ft y 5700ft correspondiente al intervalo estratigráfico M5. En Monoaraña-1 Lisama se caracteriza por la presencia de arcillolitas de colores

marrón rojizo, marrón amarillento a ligeramente gris predominantes hacia el tope, mientras hacia la base predominan arenitas cuarzosas de tamaño de grano fino a muy fino, bien seleccionadas y homogéneas.

En Acordionero-10, Lisama presenta un mayor espesor que en Monoaraña-1. En el tope está compuesta por arcillolitas de colores marrón claro, marrón rojizo y naranjados amarillentos y arenitas finas, por debajo de este nivel hay una capa muy rica en materia orgánica, carbón y arcillolitas de color marrón oscuro y negro. A partir de allí y hasta la base del registro, se presenta una constante intercalación de capas con diferentes espesores de arenitas cuarzosas de tamaños de grano fino a muy fino, bien seleccionadas y homogéneas con arcillolitas y limolitas de colores grises claros a medios, grises y marrón oscuros.

No obstante, consideramos que, para ambos pozos, Lisama solo es lateralmente continuo y correlacionable, entre los intervalos estratigráfico A4 (Acordionero-10) y M5 (Monoaraña-1) (Figura 29 y 30). Que corresponde a la asociación de litofacies formada por arcillolitas de color marrón a rojizas y arenitas finas. Los intervalos estratigráficos A5, A6, A7, A8, A9 y A10 de Acordionero-10 no se evidencian en Monoaraña-1.

La Formación Lisama en Acordionero-10 ofrece mucha información sobre los posibles ambientes sedimentarios en que depositó; en el intervalo A6 (Figuras 14a, 14b) e intervalo A8 (Figura 15b) se observa que los registros de pozo forman patrones de electrofacies cilíndricos (Figura 5). Autores como Nazeer et al. (2016), proponen este tipo de patrones de electrofacies GR para ambientes agradacionales

y Uličný et al. (2009) los relaciona con facies en frentes de delta someros a profundos.

Por consiguiente, relacionamos que, en este punto Lisama (Acordionero-10) se acumuló en un frente deltaico (Figura 28). Un ambiente transicional de sistema regresivo que culminó con el predominio de la sedimentación marina, tal y como lo describe Prince et al. (2018). Donde la intercalación sobre la base de las litofacies de limolitas y arcillolitas con arenitas finas podrían corresponder a llanuras mareales (limolitas y arcillolitas) y llanuras intermareales o depósitos de barrera cerca a la desembocadura de río (arenitas). Las litofacies ricas en carbón y materia orgánica (intervalo A5) podrían pertenecer a sistemas pantanosos. Mientras que, Monoaraña-1 se pudo haber acumulado en un ambiente más cercano al mar, que evitó la acumulación de los gruesos niveles de arenitas y arcillolitas que evidencia Acordionero-10.

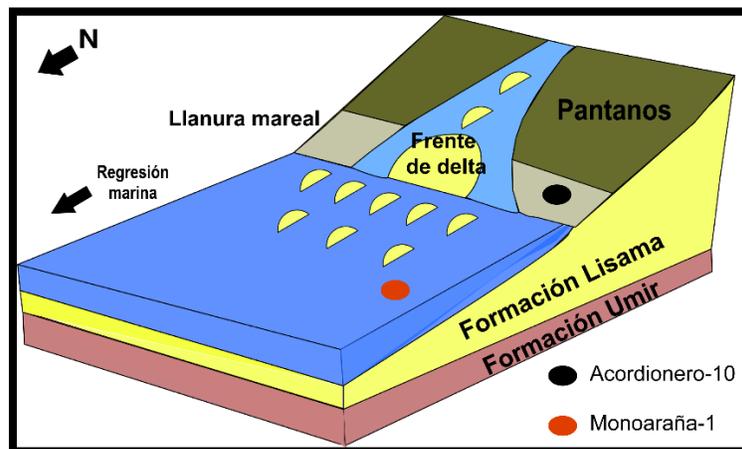


Figura 28. Interpretación de ambiente sedimentario para Acordionero-10 (punto negro) y Monoaraña-1 (punto rojo) durante el Paleoceno.

Durante el Eoceno medio-tardío al Oligoceno temprano en la estratigrafía del VMM (Figura 3), se depositaron las Formaciones La Paz y Esmeraldas formalizadas por Morales *et al.* (1958) y agrupadas por sus autores como Grupo Chorros (Sarmiento-Pérez *et al.*, 2015). La presencia de alguna de estas formaciones en los intervalos descritos para los pozos ha sido descartada. Ya que, según Gómez (2001) y Gómez *et al.* (2005) la Formación La Paz está restringida en extensión a la parte oriental de la cuenca en un depósito de abanico aluvial. Con una acumulación correlativa más occidental en el VMM denominadas informalmente areniscas de Cantagallo (Suárez, 1997).

Sumado a la evidencia que entre los intervalos descritos a profundidades correlacionables con esta formación (aproximadamente 5480ft Acordionero-10 y 4820ft Monoaraña-1). No se identifican litologías asociadas con conglomerados de guijarros y gránulos o areniscas gruesas a finas, correspondientes a ambientes de alta energía asociadas a abanicos aluviales canaliformes y a ríos trezados (Sarmiento-Pérez *et al.* 2015), tal y como se ha descrito la Formación La Paz.

La Formación Esmeraldas, del Eoceno superior al Oligoceno inferior, está más ampliamente distribuida y es en todas partes más joven que La Paz y en la mayor parte del norte del VMM está separada de La Paz por una inconformidad (Gómez *et al.*, 2005). La Formación Esmeraldas corresponde a ambientes de sistemas fluviales de llanuras aluviales y ríos meándricos que varían hacia el norte a llanuras bajas lacustres afectadas al parecer por influencia marina (Caballero *et al.* 2010).

Pese a esto, consideramos que la Formación Esmeraldas tampoco es correlacionable con ningún nivel de los intervalos descritos, formación que es descrita como una intercalación con paquetes de capas de arenitas gris a gris verdoso de grano fino a medio con alto contenido de líticos y gruesos niveles de arcillolitas, donde las arcillolitas son varicoloreadas y grises oscuros con abundante materia orgánica (shales) (Caballero et al, 2010).

Mientras, nuestros resultados arrojan que los intervalos correlacionables a estas profundidades (5480ft Acordionero-10 y 4820ft Monoaraña-1 aproximadamente), se asocian con litofacies de arenitas y areniscas cuarzosas y feldespáticas con tamaños de grano finos a medios, arcillolitas marrón rojizas con poca presencia de materia orgánica, Por lo que consideramos lo propuesto por Mesa (1995), donde afirma que las areniscas feldespáticas en el VMM son más relacionables con las Formaciones Mugrosa y Colorado. Proponemos que la Formación Esmeralda tampoco se encuentra presente entre los intervalos estratigráficos descritos.

La cuenca está afectada por la discordancia del VMM, dada por la migración hacia el este del levantamiento de la Cordillera Central durante el Cretácico tardío al Eoceno temprano, que transformó una cuenca marina del Maastrichtiano en un área de acumulación continental en el Paleoceno (Gómez, 2001). Luego de este ciclo, que está delimitado por la discordancia principal del VMM, se inició el desarrollo de una “cuenca sucesora” (Enachescu M., Divestco Inc. 2014), con la acumulación de las Formaciones La Paz-Esmeraldas del Eoceno medio a tardío (Prince et al., 2018).

Estos sedimentos se depositaron a lo largo de la cuenca aumentando de espesor en dirección sureste. Por esto, el contacto discordante entre la Formación Lisama y La Paz revela este hiato sedimentario que puede evidenciarse en la parte noreste del VMM. Que afecta el Paleoceno tardío al Eoceno medio, donde este fuerte periodo de erosión se extiende en la cuenca, suprimiendo el registro estratigráfico entre la Formación Lisama y La Paz (Gomez et al., 2005). Este episodio se reconoce en la cuenca como una inconformidad regional denominada "Inconformidad del Eoceno medio" (Ramon y Cross., 1997). A la presencia de esta discordancia se puede asociar la ausencia de las Formaciones La Paz y Esmeraldas dentro del registro estratigráfico de la zona de estudio.

Las Formaciones Mugrosa y Colorado formalizadas por Morales *et al.* (1958) y agrupadas por sus autores como Grupo Chuspas (Sarmiento-Pérez et al, 2015). Mugrosa del Oligoceno superior (Nie et al, 2009), es una unidad predominantemente lodosa, compuesta de lodolitas varicoloreadas marrón rojizo, gris, amarillento, rojo, amarillo rojizo, con estratos de arenitas granulosas blancas limpias, con gradación normal y base conglomerática (Caballero et al, 2010). Donde las unidades ricas en arena fueron depositadas predominantemente por sistemas fluviales trenzados y los intervalos ricos en lodo predominantemente por sistemas fluviales meandriformes (Jordan y Gómez, 1996).

De acuerdo con los resultados de nuestra correlación (Figura 29 y 30) hemos identificado que la Formación Mugrosa se ubica en el intervalo estratigráfico A3 de Acordionero-10 y la ubicamos entre los 5060ft hasta 5480ft. Mientras que en

Monoaraña-1 se interpretó en el intervalo estratigráfico M4 que se encuentra entre los 4600ft hasta 4820ft. Los dos intervalos entre ambos pozos están predominantemente formados por arcillolitas de colores marrón rojizo, marrón medio y marrón ligeramente amarillas. Arenitas cuarzosas con presencia de líticos y ligeramente feldespáticas, moderadamente seleccionadas y tamaños de grano fino a medio. Por lo que, consideramos que la Formación Mugrosa es continua lateralmente en los intervalos estratigráficos identificados para esta formación en ambos pozos.

La Formación Colorado del Mioceno temprano a medio presenta un contacto de transición con la Formación Mugrosa (Nie et al, 2009). Para Caballero et al. 2010, consta de arenitas conglomeráticas marrón rojizo, conglomerados marrón rojizos y lodolitas marrón rojizas. Depositada en ambientes de abanico aluvial proximal y medio que varía hasta facies distales de abanico y fluviales en clima árido (Caballero et al, 2010).

Dentro de los intervalos estratigráficos descritos hemos encontrado que el intervalo A2 en el pozo Acordionero-10 (4000ft y 5060ft) y el intervalo M3 en el pozo Monoaraña-1 (3500ft y 4600ft), son dos intervalos correlacionables entre sí y continuos lateralmente, asociables a la Formación Colorado (Figura 29 y 30) en ambos pozos. Intervalos principalmente formados por arenitas cuarzosas y ligeramente feldespáticas con tamaños de grano predominantemente medio y

localmente grueso, mal a moderadamente seleccionadas. Con presencia de arcillolitas marrón rojizo, marrón medio, gris y base conglomerática en ambos pozos.

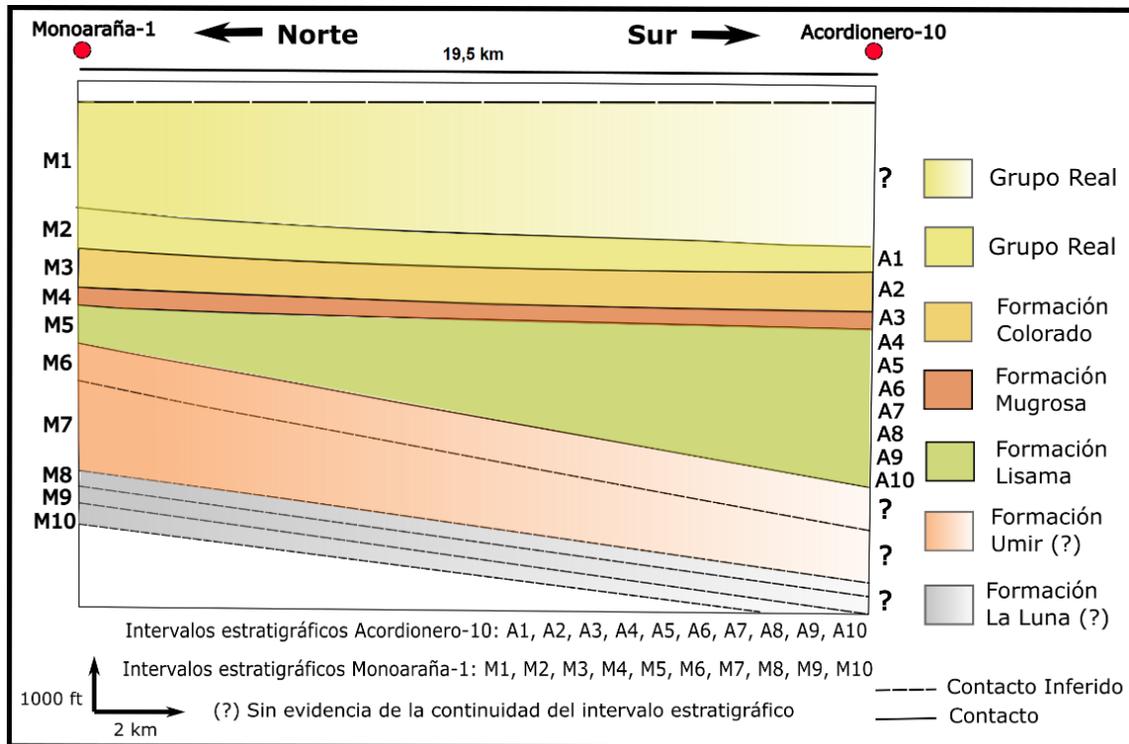


Figura 29. Correlación de los intervalos estratigráficos para Acordionero-10 y Monoaraña-1 con las unidades estratigráficas presentes en el VMM.

El Grupo Real tiene una edad Mioceno medio a superior y se superpone de manera discordante a la Formación Colorado. Está compuesta principalmente por conglomerados, areniscas conglomeradas y arcillolitas (Rubiano, 1995). Para Caballero et al. (2010), depositada en ambientes de abanico aluvial proximal a medio y que varía lateralmente hacia facies de canales trenzadas.

Dentro de nuestros resultados hemos asociado el Grupo Real con el intervalo estratigráfico A1 en Acordionero-10 entre los 3410ft (inicio del registro de pozo)

hasta los 4000ft. Mientras en Monoaraña-1 se asoció con los intervalos estratigráficos M1 y M2 desde 0 ft hasta 3600ft (Figura 29 y 30). Intervalos entre ambos pozos principalmente formados por arcillolitas marrón rojizo, marrón claro a medio y ligeramente grises intercalas con areniscas cuarzosas con tamaños de grano fino a medio y mal a moderadamente seleccionadas. No obstante, en Monoaraña-1 se observó la presencia de niveles de conglomerados y areniscas conglomeráticas los cuales no se encontraron en Acordionero-10.

Para el Grupo Real consideramos; que solo los intervalos estratigráficos A1 (Acordionero-10) y M2 (Monoaraña-1) son correlacionables y continuos lateralmente entre ambos pozos (Figura 29 y 30). Puesto que, el intervalo estratigráfico M1 no se encontró en Acordionero-10. No obstante, los resultados con respecto a la ubicación del tope del Grupo Real en Acordionero-10 tuvieron que ser limitados al inicio del registro de pozo (3410ft), por lo que consideramos que este grupo tendría un mayor espesor hacia superficie como lo demuestra Monoaraña-1.

Las Formaciones Mugrosa (A3-M4), Colorado (A2-M3) y Grupo Real (A1-M2) en las gráficas GR para ambos pozos (Figura 9 y Figura 10), se comportan de manera muy similar con patrones de registros (electrofacies) predominantemente serrados (Figura 5). Sin embargo, para Acordionero-10 en los GR hay ligeros comportamientos de patrones (electrofacies) en forma de campana (por ejemplo, intervalo A1, Figura 9a e intervalo A3, Figura 10c), y embudo (por ejemplo, intervalo A2, Figura 10b).

El patrón de electrofacies GR en campaña es relacionado por autores como Nazeer et al. (2016) con ambientes retrogradacionales, y formados en canales o barras de punto en ambientes fluviales para Rider (1990). Mientras el patrón de electrofacies GR en embudo, Nazeer et al. (2016) lo propone para ambientes progradacionales. Con base en esto y los resultados obtenidos por las descripciones de muestras de zanjas; donde estas tres unidades estratigráficas están formadas por litofacies asociadas con ambientes continentales consideramos que; Mugrosa en la zona de estudio se depositó en un ambiente fluvial de ríos meándricos (Figura 31), predominantemente formada por litofacies de arenitas finas y arcillolitas asociable a ambientes con menor energía. Mientras Colorado y Real (Figura 31) pudieron haber sido formadas en ambientes de ríos trenzados a llanuras aluviales al presentar litofacies conglomeráticas que son asociables con eventos de mayor energía.

Por otra parte, en Monoaraña-1 se identificaron los intervalos estratigráficos M6, M7, M8, M9, M10 (Figura 29 y 30). Los cuales no fue posible correlacionar con ningún intervalo descrito para Acordionero-10 ya que subyacen a la Formación Lisama. Además, consideramos que estos son intervalos estratigráficos sin evidencia de continuidad lateral. Por consiguiente, planteamos que estos intervalos no se acumularon durante el Cenozoico. Por asociación estratigráfica y composicional con las formaciones presentes en el VMM consideramos que estos intervalos estratigráficos (Figura 29 y 30) son del Cretácico superior y que más exactamente pertenecen a las Formaciones Umir y La Luna.

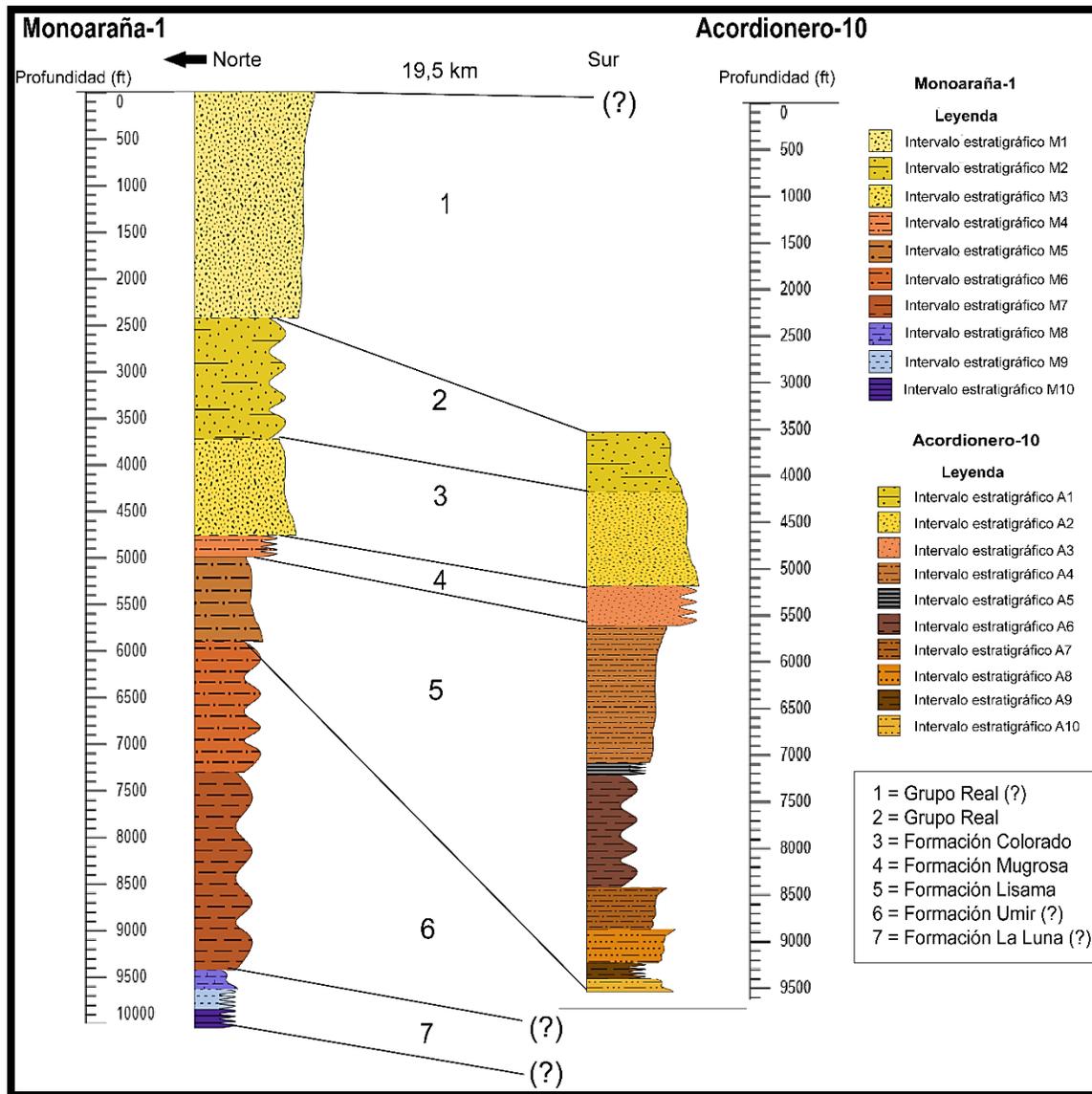


Figura 30. Correlación estratigráfica interpretada por este trabajo entre los pozos Acordionero-10 y Monoaraña-1.

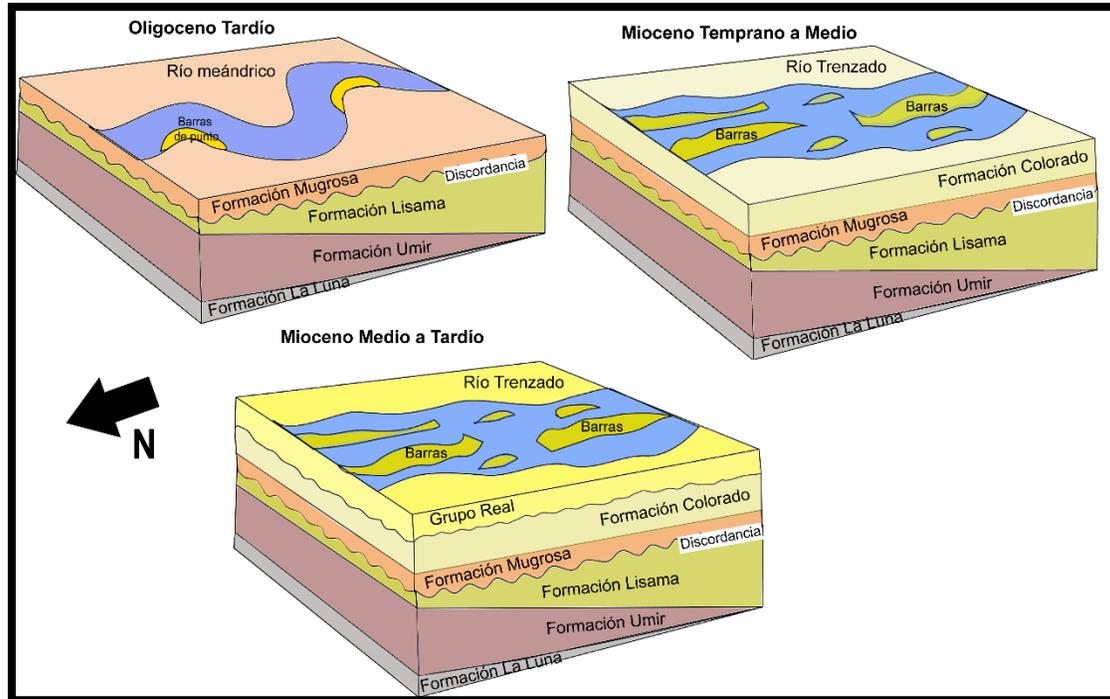


Figura 31. Evolución interpretada de los ambientes en la zona de estudio entre el Oligoceno tardío al Mioceno tardío.

La Formación Umir del Campaniano-Maastrichtiano superpone a la Formación La Luna. Litológicamente consiste en una secuencia de arcillolitas intercaladas con niveles de areniscas, lodolitas y delgadas de capas carbón (Gómez et al, 2005). Depositada ambientes marinos poco profundos a ambientes de llanuras aluviales y deltaicas (Ramírez, 1988; Gómez, 2001).

De acuerdo con los resultados, la Formación Umir solo fue identificada para el pozo Monoaraña-1 (teniendo en cuenta que este se perforó más profundo que Acordionero-10). Identificada en los intervalos estratigráficos M6 y M7 (Figura 29 y 30), que se encuentran entre 5700ft hasta 9100ft. Compuesta principalmente por arcillolitas de colores marrón rojizo, marrón amarillento y gris claro; ligeramente

limosa. Hacia el tope del intervalo se encuentran intercaladas con arenitas de tamaños finos y hacia la base empiezan aparecer intercalaciones con limolitas y aumento en el contenido de carbón. Por consiguiente, consideramos que Umir se acumuló en un ambiente muy similar al interpretado para Lisama durante el Paleoceno (Figura 28), pero con Acordionero-10 y Monoaraña-1 sumergidos en un mar poco profundo (Figura 32).

La Formación la Luna (Figura 29 y 30) se depositó durante el período Turoniano – Santoniano, y es la última formación reconocible en este trabajo. Está compuesta principalmente por calizas de color marrón a negra, con intercalaciones de arcillolitas y lutitas con coloraciones que van desde marrón a gris oscuro, muy fisibles. La deposición de esta secuencia se registró en regresiones y progradaciones de plataforma exterior, siendo ésta la que representa el nivel de máxima inundación marina en todo el Cretácico (Patarroyo-Camargo et al, 2021).

La Formación La Luna sólo es identificada en Monoaraña-1 (Figura 29 y 30) en los intervalos M8, M9 y M10; va desde 9100ft hasta 9700ft (fin del registro de pozo). Se describió como un intervalo estratigráfico formado principalmente por limolitas de colores gris oscuro, negro grisáceo, negro; textura gomosa. Localmente se observa intercalados con arcillolitas. El contenido de carbonatos en la muestra es de gran proporción, reaccionando fuertemente con el HCl, lo que muestra una fuerte asociación con ambientes calcáreos. Por lo que, en nuestra zona de estudio interpretamos que la Formación La Luna (Figura 32) se acumuló en un ambiente marino aún más profundo que Umir, de plataforma continental.

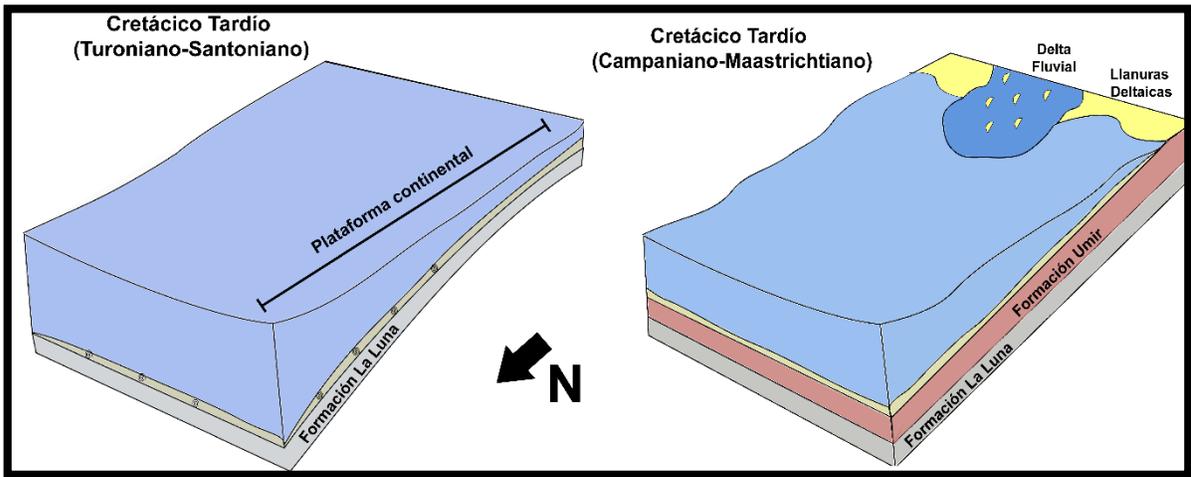


Figura 32. Evolución interpretada de los ambientes en la zona de estudio durante el Cretácico tardío.

10. CONCLUSIONES

- La correlación de facies sedimentarias a partir de la interpretación de registros de pozo es una poderosa técnica que permite la identificación de volúmenes de sedimentos en escalas de kilómetros. Pero siempre debería ir acompañada por la aplicación de otras técnicas (Por ejemplo, muestras de zanjas, sísmica, datos de afloramiento), ya que por sí sola puede inducir errores o malas interpretaciones en los datos obtenidos.
- A través de este trabajo se identificaron diez intervalos estratigráficos diferentes tanto para Acordionero-10 como para Monoaraña-1. Los cuales fue posible asociar y correlacionar en ambos pozos con cuatro unidades estratigráficas descritas para el VMM (Lisama, Mugrosa, Colorado, Real), depositadas todas durante el Cenozoico.
- Consideramos que el Grupo Chorros (Formaciones La Paz y Esmeraldas) no es asociable ni correlacionable con ningún intervalo estratigráfico descrito para alguno de los pozos debido a la discordancia del VMM entre el Paleoceno tardío y Eoceno medio. Por el contrario, la evidencia sugiere que de los intervalos estratigráficos descritos y correlacionables a estas profundidades, son asociables (A3-M4, A2-M3) con el Grupo Chuspas (Formaciones Mugrosa y Colorado).

- Los intervalos estratigráficos inferiores (M6, M7, M8, M9, M10) encontrados en el pozo Monoaraña-1 no son correlacionables, ni presentan continuidad lateral con ninguno de los intervalos descritos para Acordionero-10. Estos intervalos subyacen la Formación Lisama que representa el límite entre el Cenozoico y el Mesozoico en el norte del VMM. Por lo tanto, se considera que estos intervalos estratigráficos son de edad Cretácico superior y pertenecen a las Formaciones Umir y La Luna.
- De los intervalos estratigráficos identificados para el pozo Acordionero-10 se considera que todos se acumularon durante el Cenozoico desde el Paleoceno (Lisama) hasta el Mioceno medio a tardío (Real) en ambientes continentales predominantemente fluviales y deltaicos.
- Monoaraña-1 presenta intervalos estratigráficos que se acumularon desde el Cretácico tardío hasta el Cenozoico (Mioceno medio a tardío), en ambientes marinos que van desde plataformas continentales (La Luna) y marino somero (Umir) hasta ambientes continentales predominantemente fluviales y deltaicos (Lisama, Mugrosa, Colorado y Real).

11. REFERENCIAS

- Arche, A., 2010. Sedimentología Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Facies, sedimentología y análisis de cuencas sedimentarias. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Volumen 46, p 15-52. Madrid, España
- Caballero, V. M., 2010. Evolución tectono-sedimentaria del Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena Colombia, durante el Oligoceno – Mioceno, MSc Tesis: Universidad Industrial de Santander, 148 p.
- Caballero, V. M., Parra, M., Mora, A. R., 2010. Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno Tardío – Oligoceno Temprano: Procedencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena. Boletín de Geología. 32(1), 45-77.
- Caballero, V. M., Rodríguez, G., Naranjo, J.F., Mora, A. De La Parra, F., 2020. From facies analysis, stratigraphic surfaces, and depositional sequences to stratigraphic traps in the Eocene – Oligocene record of the southern Llanos Basin and northern Magdalena Basin. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 283–330. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.10>
- Cant, D., 1992. Subsurface facies analysis. *In Facies Models: Response to Sea Level Change* (R. G. Walker, and N. P. James, Eds.), pp. 27–45.

Geological Association of Canada, GeoText 1.

Catuneanu, O., 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy (Developments in Sedimentology) (English Edition)* (1.^a ed.). Elsevier Science.

Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., Rudkiweicz, J. L., 1990.

Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera, Colombia from a balanced cross section, in Letouzey, J., ed., *Petroleum y Tectonics in Mobile Belts*: Paris, Editions Technip, p. 81-100.

Córdoba, F., López, C., Rolón, I., Buchelli, F., Sotelo, C., 2001. *Proyecto evaluación regional del Valle Medio del Magdalena y Cordillera*. Ecopetrol, informe interno: Bogotá.

Córdoba, F., Lopez, C., Rolón, L. F., Gomez, L. A., Bucheli, F., Sotelo, C. I., 2005. Proyecto Evaluación Regional Cuenca Valle Medio del Magdalena - Cordillera Oriental, Colombia, Fase 1., in -Cor, G. d. P.-C. V., ed.: Bogotá, Suarez, M., p. 228.

Corbí, H., Martínez, J., 2015. Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenitas como actividad didáctica de Ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 23. 242-252.

Cooper, M.A., Addison, F.T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A.B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A.J., Taborda, A., 1995. Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern

Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 79, 1421-1443.

<https://doi.org/10.1306/7834d9f4-1721-11d7-8645000102c1865d>

Crombez, V., Rohais, S., Baudin, F., Euzen, T., Caplan, M., 2016. Facies, well-log patterns, geometries and sequence stratigraphy of a wave-dominated margin: insight from the Montney Formation (Alberta, British Columbia, Canada). *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 64(4), 516–537.

<https://doi.org/10.2113/gscpgbull.64.4.516>

Compton, R.R., 1962. *Manual of Field Geology*. John Wiley & Sons, New York, p. 378.

Enachescu, M. E., Prince, M. A., Negut, D. D, Edie, I. C., Romanescu F., T. Keedwell., 2015. A holistic approach to petroleum exploration in Colombia: Acordionero Oil Field, Middle Magdalena Valley Basin, CSPG Geoconvention, 2015, Calgary, Canada

Etayo, F., Renzoni, G., Barrero, D., 1969. Contornos sucesivos del mar Cretáceo en Colombia. *Memoria Primer Congreso Colombiano de Geología*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 217-252.

Etayo, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, I., Forero, H., Ramírez, C., Zambrano–Ortiz, F., Duque–Caro, H., Vargas, R., Núñez, A., Álvarez, J., Ropaín, C., Cardozo, E., Galvis, N., Sarmiento, L., Alberts, J.P., Case, J.E., Singer, D.A., Bowen, R.W., Berger,

- B.R., Cox, D.P., Hodges, C.A., 1983. Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas 14(1), p. 1–235. Bogotá.
- Evenick, J.C., 2008. Basic well logs and log signatures. Pennwell Corp (2nd Ed.), introduction to well logs and subsurface maps (pp. 17–31).
- Fabre, A., 1985. *Dinámica de la sedimentación Cretácica en la región de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia)*. Proyecto Cretácico, contribuciones. Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá.
- Fabre, A. 1987. Tectonique et génération d'hydrocarbures: un modèle de l'évolution de la Cordillère Orientale de Colombie et du bassin des Llanos pendant le Crétacé et le Tertiaire. Archives des Sciences Genève, 40: 145–190.
- Folk, R.L., 1980. Petrology of Sedimentary Rocks: Austin, Texas, Hemphill Publishing Company, 182 p.
- Gómez, E., 2001. Tectonic controls on the late Cretaceous to Cenozoic sedimentary fill of the Middle Magdalena Valley basin, Eastern Cordillera and Llanos basin, Colombia: New York, Cornell University.
- Gomez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., Kelley, S., Heizler, M., 2003. Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. GSA Bulletin, v. 115, p. 131–147.

- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., Kelley, S., 2005. Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes: Geological Society of America Bulletin, v. 117, no. 5-6, p. 547-569.
- Jordan, T., Gómez, E., 1996. Proposal of Middle Magdalena Valley stratigraphic study of Tertiary sediments to Ecopetrol. Introduction.: Bogotá, Ecopetrol, 12 p.
- Kietzmann, D.A., Palma, R.M., Bressan, G.S., 2008. Facies y microfacies de la rampa tithoniana-berriasiana de la Cuenca Neuquina (Formación Vaca Muerta) en la sección del Arroyo Loncoche-Malargüe, provincia de Mendoza. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (4): 696-713
- Limarino, C.O., Marensi, S.A., Ciccioli, P.L. y Tedesco, A.M., 2017. Estratigrafía cenozoica de las cuencas deantepaís de las Sierras Pampeanas Noroccidentales y Precordillera de La Rioja. En: Muruaga, C.M. y Grosse, P. (Eds.), Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán: 269-290.
- Liu, H., 2017. Principles and Applications of Well Logging (2.a ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54977-3>
- Marengo, H. G., 2015. Neogene Micropaleontology and Stratigraphy of Argentina: The Chaco-Paranense Basin and the Península de Valdés. Springer Briefs in Earth System Sciences, 218 pp.

- Mesa, A.G., 1995. Diagénesis y calidad del reservorio Campo La Cira, Formaciones Mugrosa y Colorado, Valle Medio del Magdalena: Ecopetrol-Instituto Colombiano del Petróleo, Informe Final, 44 p.
- Minisini, D., Eldrett, J., Bergman, S., Forkner, R., 2018. Chronostratigraphic framework and depositional environments in the organic-rich, mudstone-dominated Eagle Ford Group, Texas, USA. *Sedimentology*, 65(5), 1520-1557.
- Miller, K.G., Sugarman, P.J., Browning, J.V., Kominz, M.A., Hernández, J.C., Olsson, R.K., Wright, J.D., Feigenson, M.D. and Van Sickel, W., 2003. Late Cretaceous chronology of large, rapid sea-level changes: glacioeustasy during the greenhouse world. *Geology*, 31, 585–588.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Kammer, A., Dimaté, C., y Rodríguez, F., 2006. Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia: *Tectonics*, v. 25, no. 2.
- Morales, L. G., Colombian petroleum Industry., 1958. General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia, in Weeks, L. G., ed., *Habitat of Oil: A Symposium: Tulsa, AAPG*, p. 641-695.

Nazeer, A., Abbasi, S. A., Solangi, S. H., 2016. Sedimentary facies interpretation of Gamma Ray (GR) log as basic well logs in Central and Lower Indus Basin of Pakistan. *Geodesy and Geodynamics*, 7(6), 432–443.

<https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.06.006>

Nichols, G., 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Science Ltd., London.

Nie, J., Horton, B.K., Saylor, J.E., Mora, A., Mange, M., Garziona, C.N., Basu, A., Moreno, C.J., Caballero, V., and Parra, M., 2012. Integrated provenance analysis of a convergent retroarc foreland system: U-Pb ages, heavy minerals, Nd isotopes, and sandstone compositions of the Middle Magdalena Valley Basin, northern Andes, Colombia: *Earth-Science Reviews*, v. 110, p. 111–126.

Patarroyo-Camargo, G.D., Alarcón-Gómez, C.M., Torres-Parada, J.M., Díaz-Villamizar, J.S., Gómez-Coronado, J.S., Márquez-Prada, J.J., Pontón-Parada, L.A., Barragán-Martinez, D.M., 2021. Reconocimiento geológico de la Formación La Luna en el sector de Matanza (Oeste del Macizo de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 43(1), 35-51.

<https://doi.org/10.18273/revbol.v43n1-2021002>

Petronorte 2015, internal report by Divestco Inc. “Midas centro 3D processing report & Interpretation Report”.

Posamentier, H. W., Allen, G. P., 1999. Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology No. 7, p. 210.

Prince, M., Cáceres, C., Rodríguez, M., Sánchez, C., Murillo, M., Daza, D., Enachescu, M., 2018. Acordionero Oil Field Discovery, Middle Magdalena Basin, Colombia: An Unusual Large Stratigraphic Trap within the Paleocene Lisama Formation. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, pp 1-19.

Powers, M. C., 1953. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. SEPM Journal of Sedimentary Research, Vol. 23, 117-119.

<https://doi.org/10.1306/d4269567-2b26-11d7-8648000102c1865d>

Ramírez, R.E., 1988. Stratigraphy of the Tertiary of the Middle Magdalena Basin (Colombia), central and northern parts, [M.S. Thesis]: Austin, University of Texas, 199 p.

Ramon, J. C., Cross T., 1997. Characterization and prediction of reservoir in fluvial channel sandstones, Middle Magdalena Basin, Colombia Revista CT&F Vol. 1 N°.

- Rangel, A., Parra, P., Nino, Christian., 2000. The La Luna formation: Chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. *Organic Geochemistry*. 31. 1267-1284. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00127-3).
- Rangel, A., Giraldo, B., Magoon, L., Sarmiento, L., Bartels, H., Mora, C., Córdoba, F., Luna, O., Reyes, J., 1996. Oil potential of the cretacic megasequence and associated oil families in the Middle Magdalena Valley-Colombia. In: *Memorias del V Congreso Latinoamericano de Geoquímica Orgánica*, Cancún, México, p. 105.
- Reading, H.G. Levell, B.K., 1996. Controls on the sedimentary record in: *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (Ed. Reading, H.G.). Blackwell Science, Oxford; 5–36.
- Rider, M. H. (1990). Gamma-ray log shape used as a facies indicator: critical analysis of an oversimplified methodology. *Geological Society, London, Special Publications*, 48(1), 27–37.
<https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1990.048.01.04>
- Rubiano, J. L., 1995. Modelo estratigráfico y estructural del Campo Provincia, Valle Medio del Magdalena, Santander Colombia: *Memorias VI Congreso Colombiano del Petróleo*, Bogotá, Colombia, p. 235-242.

- Sarmiento-Pérez, G., Puentes, J., Sierra, C., 2015. Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. *Geologia Norandina*. 12.
- Sarmiento-Rojas, L. F., 2011. Geology and hydrocarbon potential Middle Magdalena Basin. In: Cediél, F., and Ojeda, G. Y. (Eds.). *Petroleum geology of Colombia*. Volume 11: Medellín, ANH, Fondo editorial Universidad EAFIT, p. 15-193.
- Sarmiento-Rojas, L. F., 2019. Cretaceous Stratigraphy and Paleo-Facies Maps of Northwestern South America. In: Cediél, F., Shaw, R.P (eds) *Geology and tectonics of Northwestern South America: the Pacific-Caribbean-Andean junction*. Springer, Cham, p 673-747.
- Suarez, M.A., 1996. Facies analysis of the upper Eocene La Paz Formation, and regional evaluation of the post-middle Eocene stratigraphy, northern middle Magdalena Valley basin, Colombia: Boulder. *University of Colorado*, 88.
- Suárez, M.A., 1997. Facies analysis of the Upper Eocene La Paz Formation, and regional evaluation of the Post-middle Eocene stratigraphy, Northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia [M.S. thesis]: Boulder, University of Colorado, 88 p
- Udden, J. A., 1898. Mechanical composition of wind deposits: Augustana Library Publication 1, p. 1–69.

Uličný, D., Laurin, J., Čech, S., 2009. Controls on clastic sequence geometries in a shallow-marine, transtensional basin: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology*, 56(4), 1077–1114.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.01021.x>

Vail, P. R., Mitchum, R. M., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 1. Overview. In *Seismic stratigraphy –Applications to hydrocarbon exploration (AAPG Memoir 26)*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.

<https://doi.org/10.1306/M26490C3>

Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments: *Journal of Geology*, v. 30, p. 377–392.

Zumberge, J., 1984. Source Rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley, Colombia. In Palacas J. (Ed.). *Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks*. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology No.18, pp. 127-133