

**Definición de elementos sedimentológicos, estratigráficos y estructurales de la Formación Ciénaga de Oro (Oligoceno-Mioceno temprano, pozo Bonga-1, Valle Inferior del Magdalena), a partir de la interpretación de imágenes microresistivas.**

JAVIER ALEJANDRO GIRALDO GOMEZ

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
MEDELLIN, COLOMBIA  
NOVIEMBRE 18, 2020.

**Definición de elementos sedimentológicos, estratigráficos y estructurales de la Formación Ciénaga de Oro (Oligoceno-Mioceno temprano, pozo Bonga-1, Valle Inferior del Magdalena), a partir de la interpretación de imágenes microresistivas.**

**TRABAJO DE GRADO**



Por:

**JAVIER ALEJANDRO GIRALDO GOMEZ.**

Trabajo de grado presentado como requisito

para optar al título de Geólogo.

Director: Helman Duque.

Co director: Alejandro Beltrán.

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
MEDELLIN, COLOMBIA  
NOVIEMBRE 18, 2020.

**Definición de elementos sedimentológicos, estratigráficos y estructurales de la Formación Ciénaga de Oro (Oligoceno-Mioceno temprano, pozo Bonga-1, Valle Inferior del Magdalena), a partir de la interpretación de imágenes microresistivas.**

**PROYECTO DE PREGRADO**

Por:

**JAVIER ALEJANDRO GIRALDO GOMEZ.**

Proyecto de grado presentado como requisito

para optar al título de Geólogo.

---

Director: Hellman Duque.

Co director: Alejandro Beltrán.

---

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
MEDELLIN, COLOMBIA  
NOVIEMBRE 18, 2020.

Nota de Aceptación

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

## Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a mi papá, porque sin él nada de esto hubiese sido posible. Gracias a mi mamá y a mis abuelas por ese apoyo incondicional a distancia. Gracias a estas 4 personas principalmente estoy cumpliendo esta anhelada meta.

En segundo lugar, quiero dar mi sincero agradecimiento a mis directores de proyecto de grado: Helman Duque, Henry Lara y Alejandro Beltrán, sin olvidar a Aralis Villarreal y Paula Meléndez (parte fundamental de este proyecto), gracias a ellos, que me instruyeron con sus conocimientos y experiencias, he podido aprender y aplicar innumerables herramientas tanto a nivel personal como profesional.

A Ecopetrol, Halliburton y Hocol, gracias por el apoyo en cuanto al acceso a información se refiere, gracias por facilitarme el poder estar en sus instalaciones, sin ustedes la logística con los directores de este proyecto de grado tampoco hubiese sido posible.

A mi primera casa y siempre recordada, la Universidad de los Andes-Venezuela, la cual me impartió enseñanzas que me hacen ser la persona que soy hoy en día. Gracias a ti ilustre casa de estudio por todos esos momentos que me regalaste, gracias a todos los profesores que ayudaron a que mi formación en la rama de la geología fuese creciendo año tras año en los que pertenecí a esta Universidad.

A la Universidad Eafit, por ser mi segunda casa universitaria, gracias por recibirme en el año 2018, y permitirme seguir creciendo como estudiante y como persona, gracias a esta institución pude continuar con mis estudios de la mejor manera que hubiese podido imaginar.

No fue fácil, pero el día de hoy sin duda alguna puedo decir: no fue imposible y valió la pena.

Gracias a todos.

## Tabla de Contenido

<b>Resumen.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>2. Planteamiento del problema.....</b>	<b>14</b>
<b>3. Hipótesis .....</b>	<b>16</b>
<b>4. Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Objetivo General: .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 Objetivos Específicos:.....</b>	<b>17</b>
<b>5. Geología regional.....</b>	<b>18</b>
<b>5.1 Tectónica.....</b>	<b>18</b>
<b>5.2 Estratigrafía .....</b>	<b>20</b>
<b>5.3 Geología Estructural .....</b>	<b>25</b>
<b>6. Localización .....</b>	<b>29</b>
<b>6.1 Geología local.....</b>	<b>29</b>
<b>6.1.2 Pozo Bonga 1 .....</b>	<b>29</b>
<b>7. Metodología general.....</b>	<b>33</b>
<b>8. Herramientas .....</b>	<b>34</b>
8.1 Borehole Imaging Studio.....	34
8.2 X-tended Range Micro Imager (XRMI™) Tool .....	34
8.3 Quasar Trio ® (Triple Combo).....	36
<b>9. Interpretación de elementos estructurales y sedimentológicos con registros de imágenes microresistivas.....</b>	<b>41</b>
9.1 Estructurales .....	41
9.2 Sedimentológicos.....	46
9.3 Rasgos texturales de rocas:.....	49
<b>10. Resultados de elementos estructurales y sedimentológicos en la Formación Ciénaga de Oro y basamento .....</b>	<b>52</b>
<b>10.1 Estructurales.....</b>	<b>52</b>
10.1.1 Formación Ciénaga de Oro .....	52
10.1.2 Basamento .....	61
<b>10.2 Sedimentológicos .....</b>	<b>65</b>
10.2.1 Formación Ciénaga de Oro .....	65
<b>11. Análisis de resultados.....</b>	<b>71</b>

11.1 Estructurales: .....	71
11.2 Sedimentológicos: .....	72
11.3 Descripción e interpretación de facies.....	74
11.4 Ambientes de acumulación.....	76
<b>12. Discusiones .....</b>	<b>92</b>
<b>13. Conclusiones .....</b>	<b>94</b>
<b>14. Bibliografía .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

### Lista de figuras

Figura 1. Reconstrucción tectónica del margen colombiano del Caribe desde el Paleógeno temprano hasta el Mioceno medio (Tortoniano).....	18
Figura 2. Localización de la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena..	19
Figura 3. Sección esquemática de la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena.....	20
Figura 4. Tabla cronoestratigráfica del Valle Inferior del Magdalena. Tomada de (Arminio et al., 2011). .....	22
Figura 5. Intervalos de tiempo de la secuencia sedimentaria de la cuenca del Valle Inferior del Magdalena.....	22
Figura 6. Columna estratigráfica de la cuenca del Valle Inferior del Magdalena..	23
Figura 7. Paleontología, facies y modelo paleoambiental para las formaciones El Floral – Ciénaga de Oro..	24
Figura 8. Columna estratigráfica de la Formación Ciénaga de Oro, vía La Ye –Ciénaga de Oro..	24
Figura 9. Mapa de profundidades del basamento pre-Terciario..	26
Figura 10. Marco tectónico, configuración de basamento y cuencas sedimentarias del margen noroeste de América del Sur, con base en perfiles sísmicos y datos de pozos..	27
Figura 11. Localización del Bloque Samán y bloques aledaños.....	29
Figura 12. Ubicación del Bloque Samán..	29
Figura 13. Localización del pozo Bonga-1 y sus pozos aledaños.....	30
Figura 14. Metodología general.....	33
Figura 15. X-tended Range Micro Imager (XRMI™) Tool..	34
Figura 16. Imágenes tomadas con la herramienta XRMI™, cargadas en el programa Borehole Imaging Studio.....	36
Figura 17. Servicio de triple combinación Quasar Trio®.....	37
Figura 18. Respuesta típica de Gamma Ray en rocas sedimentarias.....	38
Figura 19. Registro de resistividad..	39
Figura 20. Registro de densidad.....	40
Figura 21. Representación de azimut y buzamiento en un registro de imágenes..	41

Figura 22. a) Fractura conductiva de superficie semiplanar. b) Fractura conductiva de superficie vugular. ....	42
Figura 23. Imagen eléctrica con fracturas cerradas. ....	43
Figura 24. Imagen microresistiva representativa de una falla. ....	43
Figura 25. Ejemplo de interpretación de la imagen de un pozo. Las fracturas abiertas (azul) y las fracturas abiertas parciales (rojo). ....	44
Figura 26. Imagen eléctrica con fracturas resistivas (círculos azules) por carbonatos en coloración blanca. ....	44
Figura 27. Imagen eléctrica con fracturas inducidas. ....	45
Figura 28. Imagen eléctrica exhibiendo un breakout. Tomada de. ....	46
Figura 29. Imagen resistiva con su respectiva interpretación de laminaciones. ....	47
Figura 30. Ejemplo de interpretación de la imagen de un pozo con definición de estratificación cruzada. ....	47
Figura 31. Superficie de erosión. ....	48
Figura 32. Contacto discordante. ....	48
Figura 33. Imagen de pozo mostrando laminación plano-paralela. ....	49
Figura 34. Arena de grano grueso. ....	49
Figura 35. Nódulos de Pirita. ....	50
Figura 36. Conglomerados. ....	50
Figura 37. Bioturbación. ....	51
Figura 38. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando dips estructurales e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	52
Figura 39. Dips estructurales de la Formación Ciénaga de Oro. ....	53
Figura 40. Dips Estructurales dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	53
Figura 41. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando breakouts e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	54
Figura 42. Breakouts dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	55
Figura 43. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando 2 fracturas conductivas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	55
Figura 44. Fracturas conductivas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	56
Figura 45. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fallas e identificación de patrones de buzamiento. ....	56
Figura 46. Fallas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	57
Figura 47. Falla identificada en la Formación Ciénaga de Oro. ....	57
Figura 48. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fracturas inducidas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	58
Figura 49. Fractura Inducida en la Fm Ciénaga de Oro. ....	58
Figura 50. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fracturas parciales e identificación de patrones de buzamiento. ....	59
Figura 51. Fracturas Parciales dentro en un intervalo de la Formación Ciénaga de Oro, parte superior de la imagen. ....	59
Figura 52. Fracturas Parciales dentro en un intervalo conglomerático de la Formación Ciénaga de Oro, parte inferior de la imagen. ....	60

Figura 53. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fracturas resistivas y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	60
Figura 54. Fracturas resistivas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	61
Figura 55. Estadística estructural del basamento, indicando fracturas parciales e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	62
Figura 56. Fracturas Parciales dentro en un intervalo del basamento.....	63
Figura 57. Estadística estructural del basamento, indicando fracturas conductivas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	63
Figura 58. Fracturas conductivas dentro en un intervalo del basamento.....	64
Figura 59. Estadística estructural del basamento, indicando fracturas resistivas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento. ....	64
Figura 60. Fracturas resistivas dentro en un intervalo del basamento. ....	65
Figura 61. Estadística estratificación cruzada de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas. ....	65
Figura 62. Estratificaciones cruzadas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	66
Figura 63. Superficies de erosión de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas. ....	66
Figura 64. Superficies de erosión dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	67
Figura 65. Laminaciones de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas. ....	68
Figura 66. Laminaciones dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro. ....	68
Figura 68. Laminaciones plano-paralelas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.....	69
Figura 69. Discordancia de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas. ....	69
Figura 70. Discordancia dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.....	70
Figura 71. Columna estratigráfica con las respectivas facies establecidas para la Formación Ciénaga de Oro (tope-10350 pies.).....	75
Figura 72. Columna estratigráfica con las respectivas facies establecidas para la Formación Ciénaga de Oro (10350 pies-base.).....	76
Figura 73. Resumen de los principales ambientes sedimentarios.....	77
Figura 74. Las zonas geomorfológicas en sistemas aluviales y fluviales: en general, los ríos trezados tienden a ocurrir en áreas más proximales y los ríos serpenteantes ocurren más abajo.. ....	77
Figura 75. Modelos de Miall (1977) de sedimentos fluviales trezados. Modelo tipo Scott y tipo Donjek.....	78
Figura 76. Modelos de Miall (1977) de sedimentos fluviales trezados: Modelo tipo Platte y tipo Bijou Creek.....	78
Figura 77. Geometría general de un abanico aluvial. ....	79
Figura 78. Tipos de abanico aluvial: canales dominados por flujo de escombros, por inundaciones y por canales de corriente.. ....	79
Figura 79. Registros sedimentarios esquemáticos a través de depósitos de abanico aluvial de flujo de detritos, inundaciones y canales de corrientes.. ....	80
Figura 80. Modelo de facies para el ambiente de corriente trezada y sucesión típica que consta de conglomerados clasificados lenticulares y areniscas gruesa.. ....	80
Figura 81. Zonación vertical típica de las llanuras mareales.....	81

Figura 82. Secuencia estratigráfica de una llanura mareal..	82
Figura 83. Modelo de facies para el medio marino deltaico.....	82
Figura 84. Ciclos delta: la sucesión de facies conservada depende de la ubicación del perfil vertical en relación con el lóbulo deposicional de un delta.).....	83
Figura 85. Registro sedimentario esquemático de un delta arenoso prograding en aguas poco profundas.....	84
Figura 86. Modelo de plataforma marina mixta. ....	85
Figura 87. Intervalos correspondientes a la asociación 1 (abanico aluvial). ....	85
Figura 88. Intervalos correspondientes a la asociación 2 (abanico aluvial). ....	86
Figura 89. Intervalos correspondientes a la asociación 3 (llanura aluvial).....	86
Figura 90. Intervalos correspondientes a la asociación 4 (llanura mareal).....	87
Figura 91. Intervalos correspondientes a la asociación 5 (llanura mareal).....	87
Figura 92. Intervalos correspondientes a la asociación 6. ....	88
Figura 93. Intervalos correspondientes a la asociación 7 (prodelta).....	88
Figura 94. Intervalos correspondientes a la asociación 8 (prodelta).....	89
Figura 95. Intervalos correspondientes a la asociación 9 (prodelta).....	89
Figura 96. Intervalos correspondientes a la asociación 10 (plataforma mixta terrígena –calcárea). .....	89
Figura 97. Columna estratigráfica del pozo Bonga-1 (tope-1399pies).....	90
Figura 98. Columna estratigráfica del pozo Bonga-1 (1399pies-base).....	91

### Lista de tablas

Tabla 1. Principales características de los pozos aledaños al pozo estudio (Bonga-1). Tomada de Presentación interna, Ecopetrol. ....	30
Tabla 2. Principales características del pozo Bonga 1. Elaboración propia, tomado de datos Tomadas de Presentación interna, Ecopetrol. ....	31
Tabla 3. Características principales de la herramienta XRFI™. Tomada de (Halliburton, 2012). .....	35
Tabla 4. Breakouts de la Formación Ciénaga de Oro. ....	54
Tabla 5. Fracturas Resistivas de la Formación Ciénaga de Oro. ....	61
Tabla 6. Fracturas Parciales del basamento. ....	62
Tabla 7. Superficies de erosión de la Formación Ciénaga de Oro.....	67
Tabla 9. Facies establecidas para la formación Ciénaga de Oro.....	74
Tabla 10. Asociaciones de facies.....	85

## Resumen

A través de la interpretación de imágenes microresistivas (XRMI) con el programa Borehole Imaging Studio adquiridas en el pozo Bonga-1, en el Valle Inferior del Magdalena, se definieron ambientes de acumulación y patrones de orientación de fracturas para la Formación Ciénaga de Oro (Oligoceno-Mioceno). Dicha interpretación se basa en la selección manual de elementos estructurales (dips, fallas, fallas resistivas, abiertas, cerradas, conductivas, etc.) directamente sobre las imágenes, acoplado con interpretaciones de las curvas de los registros de Gamma Ray, Densidad-Neutrón y Resistividad. De esta manera se caracterizó a la Formación Ciénaga de Oro, como una sucesión de dominio limoso, variando entre limolita arenosa a arcillolita, localmente con cantidades variables de cemento calcáreo y esporádicamente intercalaciones de margas y arenitas calcáreas en capas delgadas y masivas. A lo largo de todo el intervalo, dicha secuencia presenta estratificación masiva y gradacional y un rango de ambientes de acumulación, que contiene abanicos aluviales, sistemas fluviales dominados por ríos trezados, llanuras mareales con lagunas y marismas, sistemas deltaicos y plataforma mixta (terrígena-carbonatada), interpretación que concuerda con resultados obtenidos en trabajos que fueron realizados con base en información de afloramientos. Por otra parte, el análisis de las imágenes y de los registros de pozo permiten establecer que el basamento infrayacente presenta fragmentos calcáreos gruesos a medios de formas irregulares, así como también exhibe un alto grado de fracturamiento y meteorización esferoidal.

## 1. Introducción

En Colombia, se han realizado varios estudios de caracterización de yacimientos, en los cuales el uso de imágenes de pozos ha sido un factor clave para cumplir los objetivos de dichos proyectos. Desde hace más de dos décadas, se ha venido incrementando el uso de imágenes resistivas en Colombia, llegando a ser registros rutinarios en la mayoría de los pozos exploratorios y de desarrollo (García, 2004; Trujillo, 2014; Sue, 2016). Entre algunos ejemplos de los muchos que existen, se puede citar a Leal (2013), en la Cuenca del Catatumbo, el cual, las emplea para modelar de manera automática intervalos con presencia de fracturas naturales abiertas en cada pozo con el fin de evitar pérdidas de fluidos de perforación e infiltraciones no deseadas.

En el Piedemonte Llanero, los registros de imágenes de pozo han servido para deducir la capacidad de flujo total (matriz-fractura), lo cual permite afinar la expectativa de producción de los pozos y ajustar la estrategia de completamiento (Cifuentes, 2016). Adicionalmente, en el Valle Superior del Magdalena se han utilizado, para caracterizar los ambientes sedimentarios de la Formación Honda, con el objetivo de identificar características geológicas análogas para que de esta forma pudiesen ser replicables en otros sectores de áreas aledañas, dando paso a la identificación de nuevos sistemas petrolíferos (Gómez, 2009).

Por su parte, la Cuenca del VIM, ha sido objeto de estudios realizados por compañías petroleras, las cuales han usado dichas imágenes para la interpretación de ambientes sedimentarios, pero estos estudios no han sido publicados hasta el momento.

A través de un análisis de las condiciones tectónicas y estratigráficas interpretadas en la Cuenca del VIM, se indica que a partir del Oligoceno se comporta como un conjunto de cuencas transrotacionales que se forman como resultado de los esfuerzos oblicuos que resultan del choque entre la esquina noroccidental de la placa suramericana y la placa Caribe, cuya dirección relativa de desplazamiento es variable a través de la historia geológica. Esta actividad genera fracturamiento del basamento en bloques que se comportan de manera particular e independiente según su ubicación (Reyes et al., 2004).

Estudios sobre reconstrucciones paleogeográficas en la Formación Ciénaga de Oro, han logrado reconstruir paleoambientalmente una sección estratigráfica entre los municipios de Montería y Planeta Rica, cuyos resultados muestran que el ambiente sedimentario varía entre marino somero y continental, por medio de la definición de facies deltaicas. El tipo de secuencia está gobernado

por la naturaleza del delta, ya sea dominados por ríos, olas o mareas, o si crecen en aguas superficiales o profundas (Castillo, 2017).

Los ambientes de acumulación de la Formación Ciénaga de Oro son variados. Implican desde condiciones cercanas a la costa, probablemente asociadas con un frente de un delta y la presencia de lechos de carbón, areniscas de canales, microfósiles marinos, polen y esporas, polen de manglar (*Lanagiopollis crassa*, relacionado con *Pelliciera rhizophorae*) y palinomorfos marinos en conjunción con la abundancia local de conchas de moluscos e icnofósiles (por ejemplo, *Ophiomorpha*), hasta condiciones marinas deltaicas y poco profundas (Osorio et al., 2019).

Por su parte Bermúdez et al (2009), a partir del estudio y análisis de más de 6.000 metros de corazones, perforados para la ANH, presenta un esquema estratigráfico y evolutivo para el Cinturón Plegado de San Jacinto (CPSJ), donde determina que la Formación Ciénaga de Oro, registra la acumulación de lodolitas y arenitas, respectivamente, durante un evento transgresivo ocurrido a finales del Oligoceno, que permite la sedimentación en ambientes marinos someros y deltaicos, sobre el límite entre el VIM y el CPSJ. La bioestratigrafía es clara en asociar estas dos unidades a un mismo evento de sedimentación, que se extiende hasta el Mioceno medio.

## 2. Planteamiento del problema

Los análisis estratigráficos, de facies y sedimentológicos, son métodos de fundamental importancia para evaluar el potencial de un reservorio no convencional, que permiten predecir la distribución espacial de facies, identificar las zonas con las propiedades petrofísicas más favorables para la prospección y explotación de hidrocarburos, además de poder estimar con un mayor grado de certeza el volumen de hidrocarburos in situ y la óptima terminación de un pozo (González et al., 2014). Las imágenes resistivas ofrecen una herramienta para poder interpretar in situ muchos de estos parámetros sin necesidad de tomar muestras de núcleo o zanjas de pozo (García, 2004; Trujillo, 2014; Sue, 2016).

En la actualidad, la principal cuenca productora del país es la de los Llanos Orientales, en donde se produce el 68,9% del crudo total del país, seguida de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (15,2%), la Cuenca del Valle Superior del Magdalena, luego la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena con un 2,8% (Malagón, 2016). Del porcentaje mencionado para el Valle Inferior, se pueden nombrar los principales campos (los más conocidos) petrolíferos, como lo son El Difícil, San Ángel, Jobo, Cinuco, Chinú, Boquete, Ligia (Arminio et al., 2011), Bonga y Mamey (Hocol, 2017).

Dada la importancia que tiene la Cuenca del VIM, considerada una cuenca frontera por la ANH, ha tenido estudios geológicos de gran importancia (e.g. Montes et al., 2010; Arminio et al., 2011, Bermúdez, 2016; Mora et al., 2017; 2018, Manco et al, 2020), sin embargo dichos estudios sobre definición de facies y reconstrucción de ambientes sedimentarios aún no son distribuidos ampliamente en toda la cuenca. Lo anterior, se ve reflejado, si se realiza una simple búsqueda de bibliografías que contenga información geológica de esta área y se compara con las demás cuencas del país.

Este trabajo busca definir las facies y reconstruirlos ambientes sedimentarios de la Fm Ciénaga de Oro en la cuenca del VIM, definiendo elementos sedimentológicos, estratigráficos y estructurales de la Formación Ciénaga de Oro, a través de imágenes microresistivas adquiridas en el pozo Bonga-1. Particularmente, se pretende determinar cuál es la distribución vertical de las facies deltaicas en el pozo Bonga-1 y que han sido descritas por otros autores que han realizado trabajos a partir de afloramientos (Bermúdez, 2009; Castillo, 2017; Osorio, et al., 2019) con el objetivo de establecer la coherencia de los datos interpretados a partir de la imágenes de

resistividad en profundidad con la geología estructural y los modelos sedimentarios establecidos previamente para la Fm Ciénaga de Oro.

### **3. Hipótesis**

La Formación Ciénaga de Oro presenta facies que representan ambientes deltaicos, los cuales a su vez pueden subdividirse, como por ejemplo, prodelta, llanura deltaica, frente deltaico, entre otros (Bermúdez, 2009; Castillo, 2017; Osorio, et al., 2019). Esta subdivisión de ambientes puede determinarse a través de la interpretación de las imágenes microresistivas (XRMI), así como es posible identificar y analizar el patrón de fracturas naturales de la roca en profundidad.

## 4. Objetivos

### 4.1 Objetivo General:

Definir los elementos estructurales, sedimentológicos y estratigráficos de la Formación Ciénaga de Oro en el pozo Bonga-1, en el Valle Inferior del Magdalena, a partir de la interpretación de imágenes de microresistividad (XRMI), por medio del programa Borehole Imagen Studio (BIS).

### 4.2 Objetivos Específicos:

- Identificar los elementos estructurales (fracturas, fallas y breakouts) en el pozo Bonga-1, a partir de las imágenes microresistivas (XRMI).
- Definir las facies sedimentarias, a partir de la observación y descripción de imágenes XRMI, curvas de Gamma Ray, densidad neutrón y resistividad de la Formación Ciénaga de Oro.
- Asociar y agrupar las facies identificadas.
- Interpretar los ambientes de acumulación de la Formación Ciénaga de Oro.
- Comparar los resultados obtenidos con los de trabajos postulados de reconstrucciones paleoambientales de la Formación Ciénaga de Oro, realizados en superficie.

## 5. Geología regional

En este capítulo presentamos una compilación de la geología regional del VIM para contextualizar la evolución tectónica y estratigráfica de la Formación Ciénaga de Oro.

### 5.1 Tectónica

El margen continental del Caribe Colombiano hace parte del frente de deformación originado por la subducción de la Placa Caribe bajo la Placa Suramericana. Las características tectónicas, dominadas por la interacción de estas placas, determinan los patrones estructurales y estratigráficos que se presentan en las provincias geológicas del norte colombiano. La evolución del norte colombiano resulta en bloques que se presentan como regiones tectónica y estratigráficamente diferenciadas entre sí (Reyes et al., 2004).

En la Figura 1, se puede observar la evolución tectónica del margen colombiano, donde las flechas negras muestran la dirección de la placa del Caribe a través del tiempo en relación con una placa fija de América del Sur (Bernal et al., 2015).

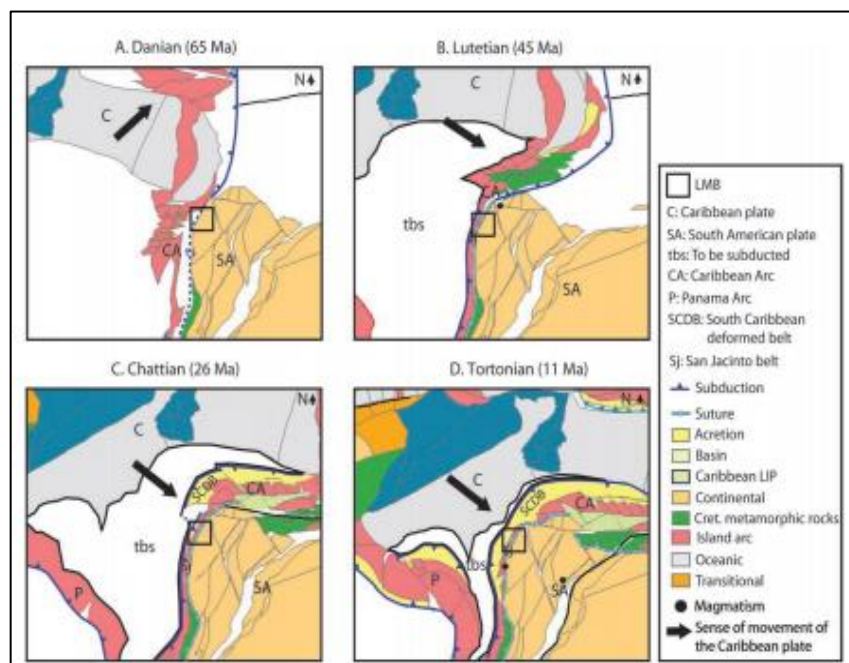


Figura 1. Reconstrucción tectónica del margen colombiano del Caribe desde el Paleógeno temprano hasta el Mioceno medio (Tortoniano). Esta reconstrucción fue modificada de reconstrucciones anteriores por Escalona y Norton (2010). A. Reconstrucción del margen colombiano a 65 Ma (Daniano): el área blanca alrededor de la placa del Caribe y América del Sur representa el área que se subducirá debajo del Gran Arco del Caribe que se muestra en áreas rojas y la placa sudamericana se muestra en color amarillento. B. Reconstrucción a 45 Ma (Luteciano): el gran arco del Caribe ha sufrido una inversión de la polaridad de

subducción con la corteza del Caribe subducida hacia el sureste debajo del margen colombiano. Los polígonos blancos identifican las áreas a ser subducidas. C. Reconstrucción a 26 Ma (Chattiano): continuación de la subducción de la placa del Caribe debajo de América del Sur. Los polígonos blancos identifican las áreas a ser subducidas. D. Reconstrucción a las 11 Ma (Tortoniano): muestra un límite de placa del Caribe - América del Sur fuertemente arqueado. Se propone que el margen arqueado induce un patrón radial de fallas normales en la placa predominante de América del Sur en Colombia.). Tomada de (Bernal et al., 2015).

Sin embargo, en otras áreas del margen continental, como el VIM, no hay informes de actividad ígnea, por lo tanto; No se ha considerado como parte de la historia geodinámica. Este es un hecho peculiar dado que para muchos autores (Duque-Caro, 1979; Flinch, 2003; López y Barrero, 2003; Cerón et al., 2007), esta área está ubicada en el límite transpresivo que conectaba los terrenos del Gran Arco del Caribe, el límite frontal de la placa del Caribe y la margen norte de América del Sur (Silva et al., 2016).

La Cuenca del Valle Inferior del Magdalena (VIM) se localiza en la esquina noroccidental de Sur América (Figura 2). Geológicamente está limitada al Este por la Falla de Bucaramanga – Santa Marta que la separa de las rocas cristalinas de los macizos de Santa Marta y Santander; al Sur, por la Cordillera Central y la Falla de Palestina (cubierta por sedimentos cuaternarios); hacia el Norte y Oeste, con la Cuenca del Caribe Colombiano. Operacionalmente, la Empresa Colombiana del Petróleo (Ecopetrol) caracteriza la cuenca por las depresiones de Plato y San Jorge separadas por el Arco de Magangué (Reyes et al., 2004).

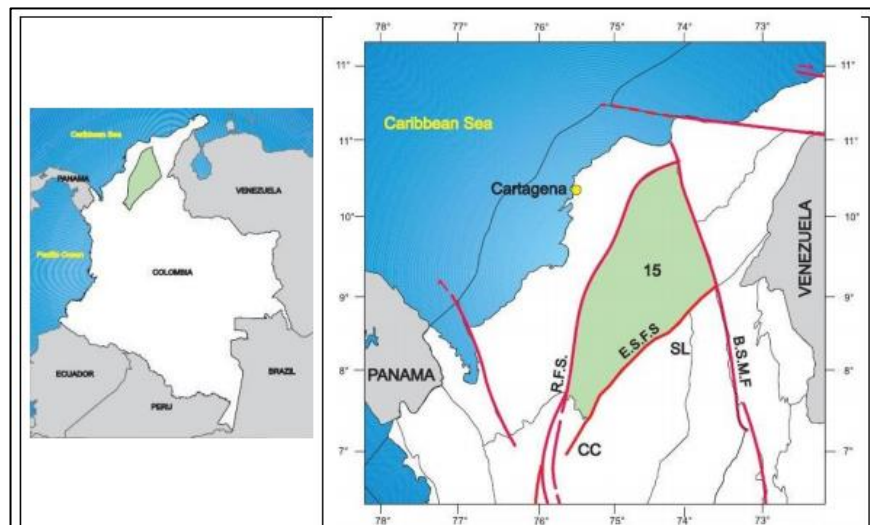


Figura 1. Localización de la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena. CC: Cordillera Central, SL: Serranía de San Lucas, E.S.F.S: Sistema de Fallas Espíritu Santo, R.F.S: Sistema de Fallas Romeral, B.S.M.F: Falla Santa Marta-Bucaramanga. Tomada de (Lozano & Zamora, 2014).

La evolución de la cuenca VIM puede dividirse en 3 etapas o fases:

- A. Oligoceno tardío-Mioceno temprano a lo largo del oeste-norte: compuesto por fallas normales acompañadas de cuñas sintectónicas controladas por fallas y rocas sedimentarias marinas. Durante esta etapa, la inclinación de los bloques de falla normales condujo a formación de inconformidades múltiples e historias erosivas complejas de los flancos de la cuenca (Mata, 2014).
- B. Mioceno medio, este-oeste: caracterizado por el cese de extensión y el inicio de una convergencia regional, inversión de falla normal y levantamiento de cuenca regional. Durante esta etapa, la inclinación hacia el norte de la cuenca favoreció la deposición continental de sedimentos en la cuenca de San Jorge y sedimentación marina profunda en la Cuenca de Plato (Mata, 2014).
- C. Mioceno tardío, noroeste-sureste: la presencia de afloramientos Mioceno medio a tardío en el norte de la Cuenca del Valle Inferior, sugiere un régimen de compresión actual en una cuenca sobrellenada (Mata, 2014).

La evolución estructural de la cuenca originó la siguiente distribución de unidades ilustrada en la Figura 3:

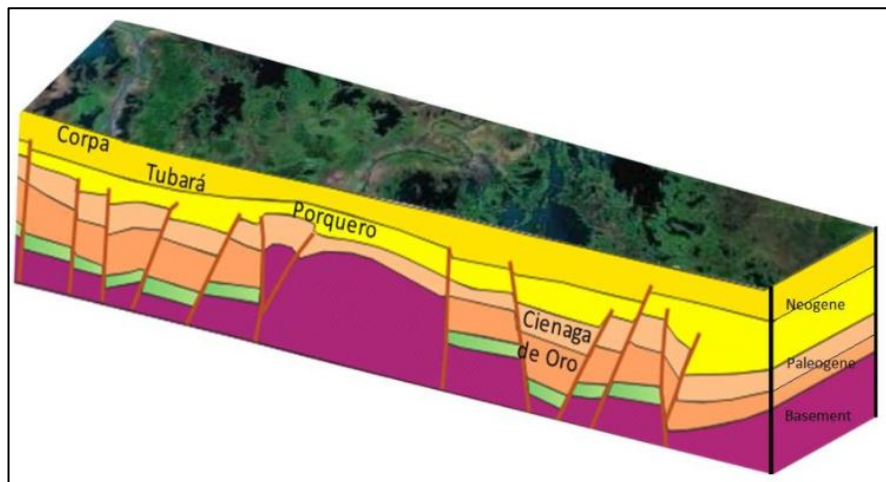


Figura 2. Sección esquemática de la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena. Tomado de (Vargas, 2012).

## 5.2 Estratigrafía

El relleno sedimentario de la cuenca del VIM inicia su acumulación en Cretácico, durante la colisión de la corteza oceánica del Caribe con el continente América del Sur; debido a la subsidencia y el levantamiento de la Cordillera Central esta sucesión ha sufrido deformaciones y procesos de erosión (Lozano & Zamora, 2014).

En el Cretácico Superior (Campaniano) la cuenca del VIM se desarrolla dentro de una cuenca intra-arco que se genera a raíz de la subducción de la protocorteza del Caribe y de la colisión que la continuó; se depositan sedimentos marinos que debido al posterior levantamiento de la Serranía de San Lucas y Valdivia-Cajamarca, fueron erodados; en muy pocas áreas de la cuenca se conservan los sedimentos depositados. Durante el Paleoceno-Eoceno, se depositan sedimentos de tipo continental que son erosionados debido al levantamiento de la Cordillera Central, generando una disconformidad sobre la que se depositan sedimentos del Oligoceno (Formación Ciénaga de Oro) (Lozano & Zamora, 2014).

Seguidamente en el Oligoceno-Mioceno temprano debido a esfuerzos extensionales la cuenca del VIM sufre un hundimiento que produce los depocentros de San Jorge y Plato, estos son afectados por fallas normales y rellenos con depósitos calcáreos (Formación Ciénaga de Oro). Luego en el Mioceno medio a tardío continúa la deposición de carbonatos a lo largo del recorrido del paleo-río del Magdalena, donde esfuerzos compresivos empiezan a afectar la cuenca, reactivando fallas normales, detenido el proceso de hundimiento e iniciado el levantamiento de la cuenca; esto da espacio a la deposición de sedimentos continentales (Formación Porquero) (Lozano & Zamora, 2014).

Posteriormente en el Mioceno medio a tardío continúan la subsidencia y la acumulación de sedimentos marinos en la cuenca (Formación Tubará). La cuenca comienza a sufrir esfuerzos transpresivos que reactivan fallas de tipo normal del sistema de fallas de San Jacinto, las cuales producen el levantamiento del cinturón plegado de San Jacinto, lo que genera la disminución de la velocidad de hundimiento y la deposición de sedimentos continentales (Lozano & Zamora, 2014).

En el Plioceno el proceso de subsidencia es completamente interrumpido por los procesos de subducción y traslación de las placas continental y oceánica, que también han dado forma al cauce del río Magdalena y generaron una antifosa que fue rellenada con una espesa sucesión de sedimentos de origen continental (Formación Corpa) (Lozano & Zamora, 2014).

La litoestratigrafía de esta cuenca puede observarse en la Figura 4, la cual presenta la historia litoestratigráfica de la cuenca del VIM.

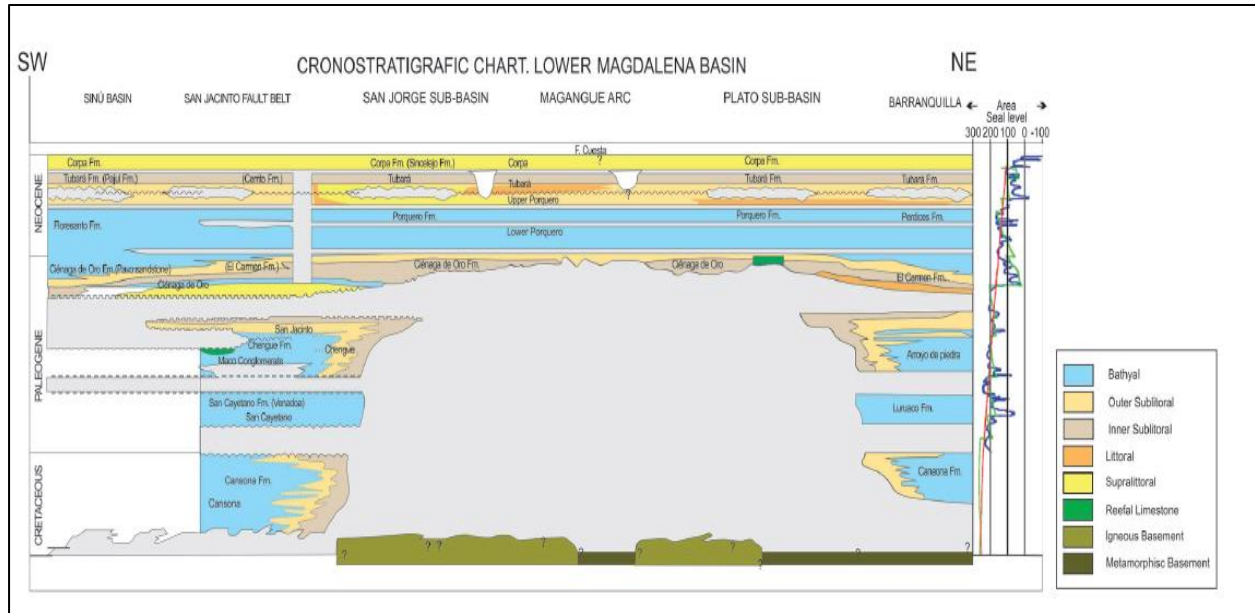


Figura 3. Tabla cronoestratigráfica del Valle Inferior del Magdalena. Tomada de (Arminio et al., 2011).

Tomando como referencia lo pautado por Lozano & Zamora (2014), se puede resumir la secuencia sedimentaria de la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena en la Figura 5, sabiendo que la deposición empieza en un ambiente marino, posteriormente transicional y por último continental.

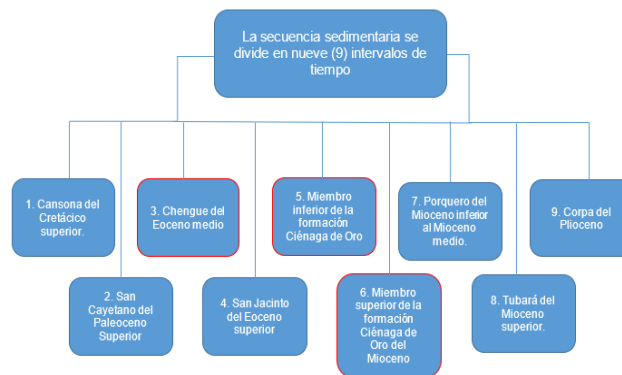


Figura 4. Intervalos de tiempo de la secuencia sedimentaria de la cuenca del Valle Inferior del Magdalena. Los intervalos que poseen borde rojo son aquellos en los que sus límites tuvieron influencia de procesos erosivos. Tomada de (Lozano & Zamora, 2014).

Estos 9 intervalos de tiempo se ven reflejados en la Figura 6, en la cual se observan las unidades estratigráficas que exhibe la cuenca de estudio (formaciones: Ciénaga de Oro, Porquero, Tubará y Corpa).

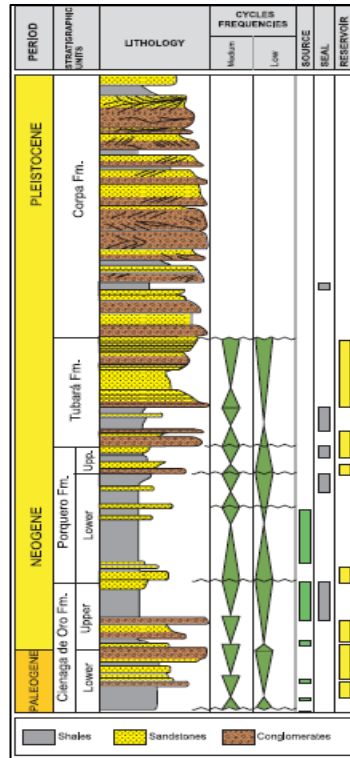


Figura 5. Columna estratigráfica de la cuenca del Valle Inferior del Magdalena. Tomada de (Barrero et al., 2007).

La existencia del Arco Magmático de Magangué de edad Cretácico Tardío (84-74 Ma), está compuesto por cuerpos ígneos de composición félsica a intermedia que intruyen la corteza continental del VIM, originados en un ambiente de subducción. El origen de la corteza continental del VIM parece estar ligada a la colisión continente-continente (consolidación de Pangea) durante el Pérmico (300Ma), y al evento de extensión post-Alleganiano de edad Triásica (232Ma) (Silva et al., 2016). El basamento (Pre-Paleógeno) está conformado por rocas de la Cordillera Central, constituido por rocas ígneas y metamórficas (bajo grado de metamorfismo) y de afinidad continental (Di Luca, 2016).

Según Bermúdez et al (2009), la Formación Ciénaga de Oro (Oligoceno-Mioceno Temprano) se compone principalmente de arenitas líticas laminadas (laminación plano paralela, ondulosa, flaser, wavy y lenticular), arenitas líticas y cuarzo arenitas masivas a bioturbadas de grano muy fino a fino y secuencias grano-decrecientes de arenitas líticas, de grano muy grueso a medio, localmente conglomeráticas con abundantes restos fósiles, pellets fecales glauconitizados, muscovita, láminas y fragmentos carbonosos. Los segmentos lodosos se componen de capas muy gruesas de lodolitas laminadas (laminación plano paralela, ondulada, lenticular y fláser), y masivas, localmente

bioturbadas (madrigueras horizontales). Para la Formación Ciénaga de Oro de acuerdo al análisis facial y paleoambiental realizado, así como la abundancia de macrofósiles de zona litoral, sumado a la presencia de dinoflagelados, material vegetal degradado, se interpreta que la acumulación de estas rocas tuvo lugar en ambientes deltaicos a marinos someros (Figuras 7 y 8).

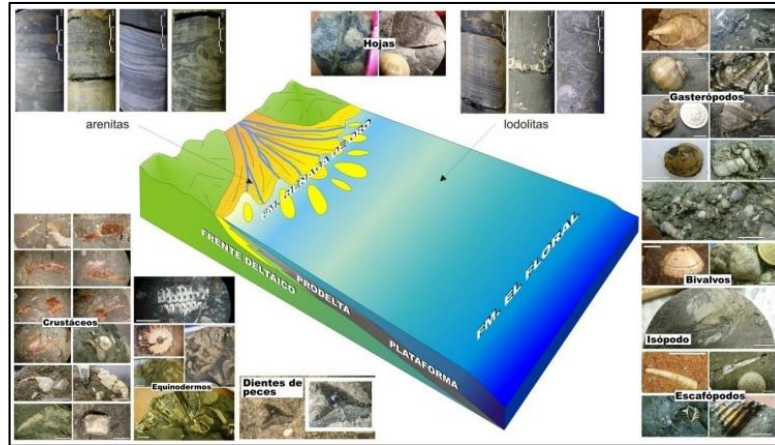


Figura 6. Paleontología, facies y modelo paleoambiental para las formaciones El Floral – Ciénaga de Oro. Tomada de (Bermúdez et al., 2009).

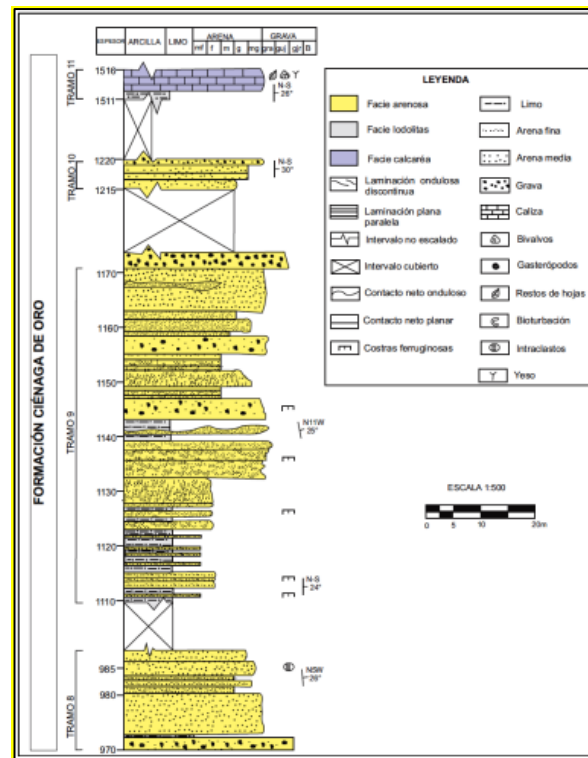


Figura 7. Columna estratigráfica de la Formación Ciénaga de Oro, vía La Ye –Ciénaga de Oro. Tomada de (Rodríguez et al., 2013).

Por su parte la Formación Porquero (Mioceno temprano-Mioceno tardío) se subdivide en Porquero Inferior y Porquero Superior. Porquero Inferior consiste de lutitas marinas de color gris oscuro, masivas y fosilíferas, que en la subcuenca Plato presentan un considerable desarrollo de turbiditas, depositadas en ambiente marino nerítico externo a batial y Porquero Superior consiste de lutitas fosilíferas con intercalaciones de arenas de ambiente deltaico (Di Luca, 2016).

La Formación Tubará (Mioceno tardío) consiste en arenas conglomeráticas y arcillas fosilíferas depositadas en ambiente fluvio-deltaico y la Formación Corpa (Plioceno-Pleistoceno) conglomerados y aluviones poco consolidados y arcillas depositados en ambiente fluvio-deltaico (Di Luca, 2016).

### **5.3 Geología Estructural**

La tectónica de la cuenca del VIM, se ha caracterizado por presentar fallas normales y de empuje de bajo ángulo, asociados, con sus respectivos pliegues, la mayoría de ellos en el límite de la cuenca con el cinturón de San Jacinto y dentro de la subcuenca de Plato, incluyendo los diapirismos de lodo generados a lo largo de la la cuenca del VIM (Arminio et al., 2011).

#### **5.3.1 Estructura del Basamento**

A lo largo de la mayor parte de la cuenca, la inconformidad de la base del Oligoceno se extiende sobre el basamento ígneo félsico a intermedio (Arminio et al., 2011), el cual consiste en rocas ácidas, asociadas a la placa continental y a bordes convergentes, que en algunas zonas presentan bajo grado de metamorfismo y registran los procesos transtensivos de la Cordillera Central (UPME, 2018). En la figura 9, se puede observar un mapa de profundidades del basamento de la cuenca estudio, el cual exhibe como el basamento es afectado por fallas y este aflora hacia los límites E y W de la cuenca.

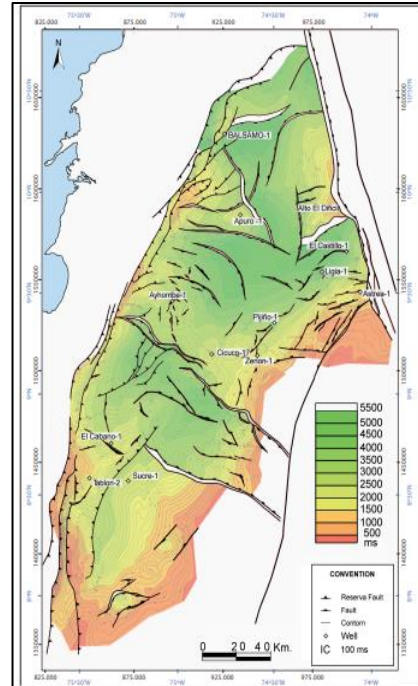


Figura 8. Mapa de profundidades del basamento pre-Terciario. Tomada de (Arminio et al., 2011).

### 5.3.2 Zona de Fallas de San Jacinto

Este sistema de fallas tienen su origen en los procesos extensivos que sufrió la Cordillera Central, lo que también produjo fallas normales y una cuenca transtensiva sobre fallas de desgarre (UPME, 2018).

### 5.3.3 Sub Cuenclas Plato y San Jorge

Se caracterizan por tener varios depocentros como Tirón y Bálsamo y una espesa cubierta sedimentaria que tienen su origen en los procesos extensivos que sufrió al Cordillera Central, lo que también produjo fallas normales y una cuenca transtensiva sobre fallas de desgarre, (UPME, 2018).

### 5.3.4 Altos y arcos estructurales

En el Oligoceno, el esfuerzo de empuje de la Placa Caribe produce rotación sobre el Bloque Macizo de Santa Marta y cizalla en las Fallas de Romeral y Palestina (Figura 10), generando distensión, de bloques conformando los Altos de Cicuco, El Difícil y Apure (UPME, 2018).

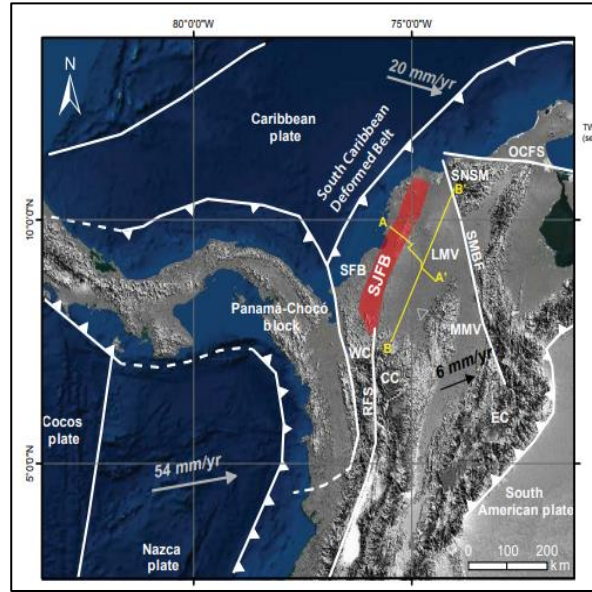


Figura 9. Marco tectónico, configuración de basamento y cuencas sedimentarias del margen noroeste de América del Sur, con base en perfiles sísmicos y datos de pozos. (Osorio et al., 2019).

CC - Cordillera Central; CE - Cordillera Oriental; WC - Cordillera Occidental; SJFB - Cinturón plegable San Jacinto; SFB - Cinturón plegado Sinú; LMV - Valle Inferior del Magdalena; MMV - Valle del Magdalena Medio; Sistema de fallas RFS Romeral; SMBF - Sistema de fallas Santa Marta - Bucaramanga; OCFS - sistema de fallas Oca; SNSM - Sierra Nevada de Santa Marta; SJD - Depocentro San Jorge; MCH - Alta Magangué-Cicuco; P: depocentro platónico; EDH - El Difícil alto; TWT: tiempo de viaje de ida y vuelta (Osorio et al., 2019).

### 5.3.5 Estructuras invertidas

Debido a los esfuerzos tectónicos que la cuenca sufrió durante el Cenozoico, las fallas normales que fueron reactivadas e invertidas generaron estructuras plegadas, reflejándose en los sedimentos y en el cauce y delta del río Magdalena; las principales estructuras son: sistemas de fallas Jobo-Tablón, Betulia, Tirón, Chinú, San Jacinto, San Jorge y El Balsamo y se encuentran en las subcuencas de San Jorge y Plato (Lozano & Zamora, 2014).

### 5.3.6 Estructuras de rumbo

Como consecuencia de esfuerzos extensionales que primero afectaron la cuenca del VIM, se originaron grandes sistemas fallados de rumbo que fueron reactivados en el último periodo del

Cenozoico, de las cuales sus principales estructuras son la zona de fallas de Santa Marta, de las que hacen parte las fallas de Santa Marta, Algarrobo, el graben Ariguaní y zona de fallas Canoas (UPME, 2018).

### 5.3.7 Estructuras diapíricas

5.3.7.1 Diapiros de Shale: los diapiros y los volcanes de lutita/lodo son abundantes en la subcuenca San Jorge, donde más de un centenar se han trazado en mapas geológicos publicados. Por el contrario, los diapiros de barro solo se conocen en el flanco oriental del depresión de Plato, donde un diapiro de lodo estuvo representado en la exploración (Arminio et al., 2011). Algunos de estos diapiros se originaron a partir de unidades estratigráficas de esquisto masivas, como las que se encuentran en la Formación Porquero (Lozano & Zamora, 2014).

## 6. Localización

### 6.1 Geología local

#### 6.1.2 Pozo Bonga 1

El área de estudio, que corresponde al Pozo Bonga-1, está situada en la zona Suroccidental del Valle Inferior de Magdalena, específicamente en el Bloque Samán (Figura 11 y 12). Los pozos que se encuentran dentro de este Bloque están en los departamentos Sucre y Bolívar (Carrera, 2011).

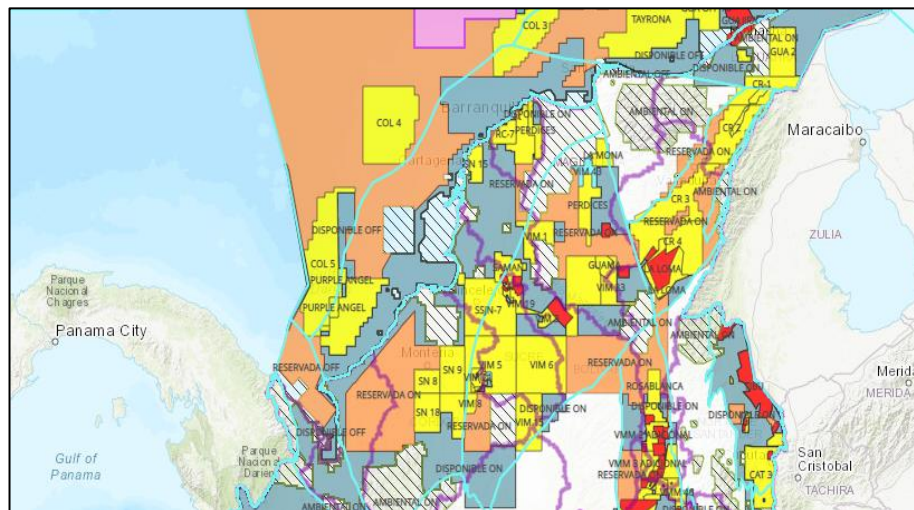


Figura 10. Localización del Bloque Samán y bloques aledaños. Tomada de (ANH, 2020a).

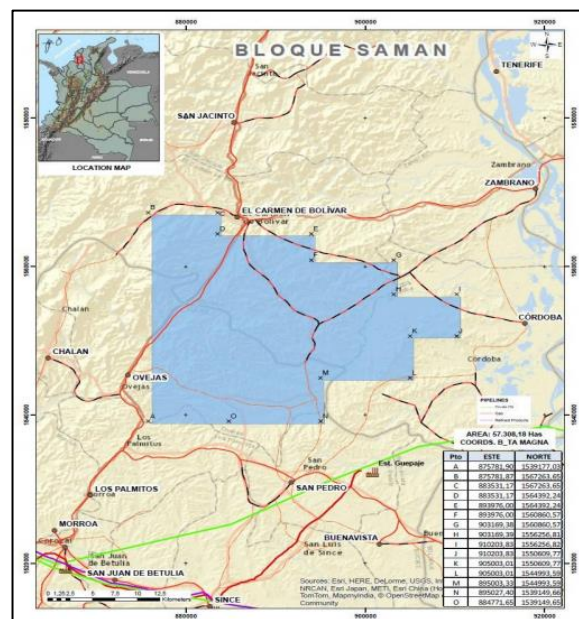


Figura 11. Ubicación del Bloque Samán. Tomada de (Hocol, 2017).

Para tener una posible noción sobre geología del área de estudio (pozo Bonga-1), se deben estudiar las características geológicas de los pozos aledaños (Figura 13) a dicha área.

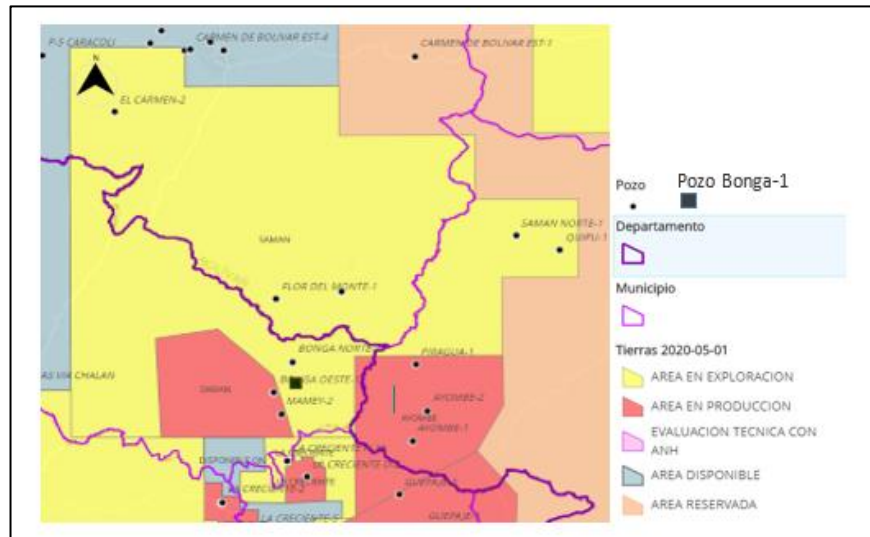


Figura 12. Localización del pozo Bonga-1 y sus pozos aledaños. Tomada de (ANH, 2020b).

La tabla 1, muestra una compilación de la estratigrafía de los pozos cercanos a Bonga-1, lo cual hace posible definir la geología local. Conociendo las propiedades litológicas principalmente (formaciones) de los pozos aledaños, las cuales fueron descritas en la geología regional de este proyecto, se reduce la dificultad para la interpretación sedimentaria del área de estudio.

Pozo	Coordenadas (Bogotá)	Profundidad alcanzada (pies)	Formaciones (profundidad)
AY HOMBE	Este: 898.897,76 Norte: 1.5328.819,90	11060	Corpa (superficie-4300) Turbará (4300-6385) Porquero (6385-10532) Ciénaga de Oro (10532- 10960) Basamento (10960)
GUAPAJE 1	Este: 899.547,40 Norte: 1.532.496,45	10800	Corpa (superficie-1230) Turbará (1230-5825) Porquero (5825-10346) Ciénaga de Oro (10346- 10660) Basamento (10660)
GUEPAJE 3	Este: 899.343 Norte: 1.528.513	11070	Corpa (superficie-1890) Turbará (1890-6640) Porquero (6640-9950) Ciénaga de Oro (10500- 11000) Basamento (11055)
PIRAGUA 1	Este: 899.150 Norte: 1.544.350	10870	Corpa (superficie-3100) Turbará (3100-5125) Porquero (5125-9930) Ciénaga de Oro (9930- 10800) Basamento (10800)

Tabla 1. Principales características de los pozos aledaños al pozo estudio (Bonga-1). Tomada de Presentación interna, Ecopetrol.

Se puede observar un comportamiento unimodal de las formaciones presentes durante la exploración de cada pozo, teniendo como factores comunes a las formaciones Corpa, Turbará, Porquero y Ciénaga de Oro y basamento en pozos aledaños al pozo Bonga-1.

De la tabla 1, se puede determinar que la información suministrada de los pozos aledaños discrepa de cierta forma de el pozo Bonga-1 puesto que las 4 formaciones mencionadas, no se encuentran en la información obtenida de el pozo, ya que este último contiene solamente la Formación Ciénaga de Oro y el basamento. El pozo Bonga-1 presenta una serie de características (tabla 2), que lo hacen ser un pozo de gran importancia en el área de exploración.

<b>Atributo</b>	<b>Pozo Bonga-1</b>
<b>Coordenadas</b>	Este: 891.037,9375 Norte: 1.542.994
<b>Cuenca Sedimentaria</b>	Valle Inferior del Magdalena
<b>Departamento</b>	Sucre
<b>Municipio</b>	Ovejas
<b>Tipo de pozo</b>	Vertical
<b>Profundidad alcanzada</b>	11060

Tabla 2. Principales características del pozo Bonga 1. Elaboración propia, tomado de datos Tomadas de Presentación interna, Ecopetrol.

Las unidades litológicas contenidas en el área de estudio son:

- A. Basamento: de acuerdo con algunas conclusiones establecidas es en el trabajo de Silva et al., (2016), el basamento está compuesto por granitoides y gabros. La presencia de gabros en una corteza continental se destaca ya que son de naturaleza metalúmica, que corresponde a un ajuste de subducción.
- B. Formación Ciénaga de Oro: para Marín et al., (2010) esta formación está compuesta por una secuencia espesa de areniscas de origen fluvial a deltaico, las cuales están intercaladas con rocas de grano fino (lutitas) de origen fluvial a transicional marino y está caracterizada por presentar pliegues compresivos relacionados con el sistema de fallas de Romeral; Truncamientos del reservorio por fallas asociadas a eventos compresivos y extensivos en la cuenca; Sobrelape del reservorio contra el basamento; Altos de basamento. De manera detallada, se puede decir que la Formación Ciénaga de Oro está depositada en un ambiente deltaico transicional, por compuesta de areniscas conglomeráticas, alternadas con areniscas de grano fino, limolitas bioturbadas, en capas

plano-paralelas, grises, shales ligeramente calcáreos, carbonáceos y carbón (Lozano & Zamora, 2014).

## 7. Metodología general

Existen diferentes tipos de herramientas que permiten obtener estas imágenes y así poder conocer aspectos estructurales y sedimentarios de las rocas, entre ellas está X-tended Range Micro Imager (XRMI™), la cual proporciona registros de alta resolución que muestran una imagen de las paredes del pozo semejante a la ofrecida por una muestra de núcleo. Los principios básicos consisten en mapear la conductividad de la pared del pozo mediante un arreglo denso de electrodos (imágenes microresistivas), o el tiempo de viaje de una onda sonora, más su reflectancia acústica mediante un transductor (imágenes acústicas), permitiendo caracterizar texturas sedimentarias, estructuras, facies, secuencias y ambientes de sedimentación, dirección de paleocorrientes, establecer límites de las formaciones y buzamientos, diagnosticar y analizar breakouts (estabilidad del hoyo) y optimizar la estimación de las reservas (Zarabia, 2013). Estas imágenes se han convertido en un elemento clave para la industria del petróleo, ya que han permitido mejorar significativamente la calidad de los modelos del reservorio (Gómez, 2009). La metodología de este proyecto se basa principalmente en la interpretación de dichas imágenes (Figura 14).

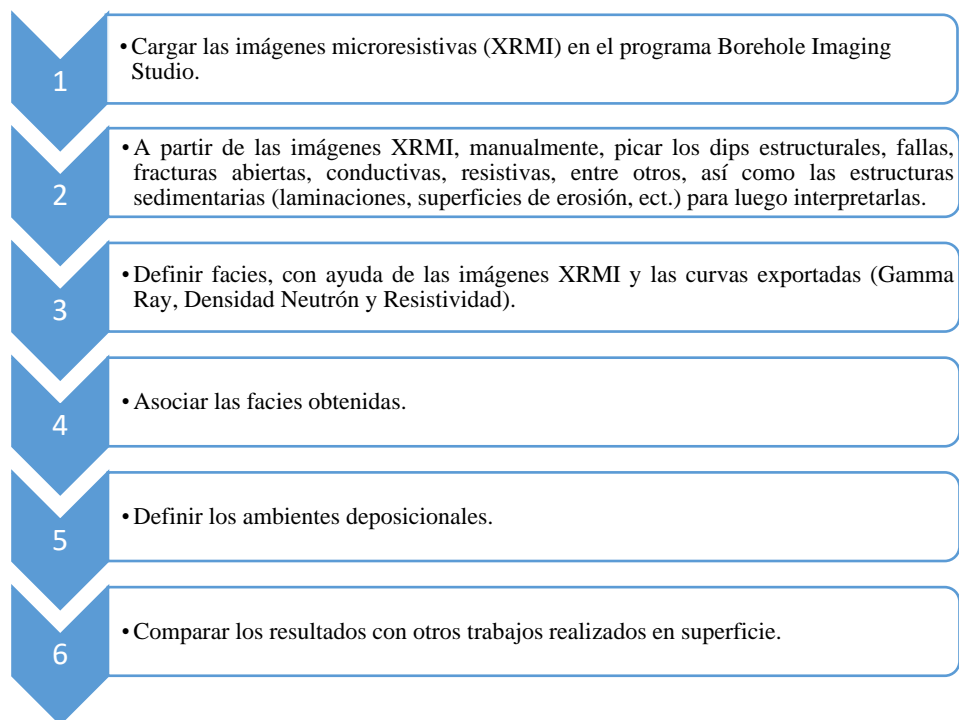


Figura 13. Metodología general.

## 8. Herramientas

El pozo estudio (Bonga-1), tuvo un registro X-tended Range Micro Imager (XRMI™) y Triple Combo, en el cual se establecieron diferentes parámetros, Gamma Ray (DGR), resistividad tipo laterolog y densidad-neutrón. El registro XRMI, fue interpretado gracias al programa al software Borehole Imaging Studio.

### 8.1 Borehole Imaging Studio

Este programa presenta una tecnología, la cual permite visualizar claramente la geología de fondo de pozo. Estas imágenes también pueden proporcionar información sobre el estado del pozo, la tensión y la mecánica de la roca alrededor del pozo, y ayudar en la determinación de la porosidad. Estos registros le permiten cuantificar información estructural y estratigráfica importante como buzamiento y azimuth de fallas, fracturas, estratos y estructuras. Además, las imágenes también ayudan en la visualización y análisis de contactos, estrés in situ, variaciones de textura, vugs, facies, crossbedding y más (Halliburton, 2020).

### 8.2 X-tended Range Micro Imager (XRMI™) Tool

La herramienta X-tended Range Micro Imager (XRMI™) (Figura 15), es una herramienta de adquisición de imágenes de pozos con cable, está diseñada para obtener imágenes de calidad incluso en entornos con una alta relación de resistividad de formación a resistividad del lodo (Halliburton, 2012).

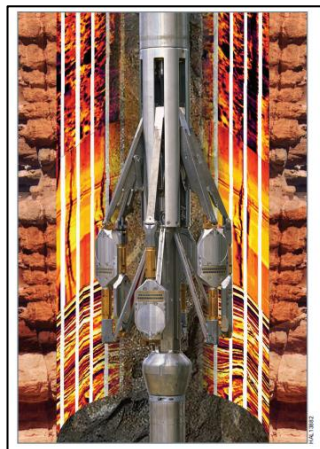


Figura 14. X-tended Range Micro Imager (XRMI™) Tool. Obtenida de (Halliburton, 2012).

La medición de XRMI se basa en el contraste de microresistividad de la roca. Se llama herramienta "X-tended R-ange M-icro I-maging", porque proporciona imágenes de pared de pozo de muy buena calidad incluso en formaciones altamente resistivas ( $> 2000$  ohm-m) y lodos salados de resistencia relativamente baja ( $<0.1$  ohm-m). Gracias a la alta resolución vertical de las mediciones, esta herramienta brinda la posibilidad de interpretar las superficies de asiento con información sobre su ángulo de inclinación y azimut y reconocer pliegues, fallas y microfallas, fracturas, disconformidades angulares (Presentación Interna, Halliburton).

En las imágenes se aprecian estructuras, que aparecen como resultado de la perforación del pozo: fracturas inducidas, roturas, marcas de barrena. Las mediciones XRMI tienen aplicación tanto en interpretación estructural como sedimentológica y pueden proporcionar información geomecánica útil en la perforación de pozos y la fracturación hidráulica (Romaniuk, 2013).

Entre las principales características de la herramienta (tabla x) XRMI <sup>TM</sup>, están:

XRMI <sup>TM</sup> Tool Dimensions and Ratings			
<b>Maximum Temp:</b>	350°F (177°C)	<b>Maximum Press:</b>	20,000 psi (137 MPa)
<b>Maximum OD:</b>	5 in. (12.7 cm)	<b>Minimum Hole Size:</b>	6 in. (15.24 cm)
<b>Length:</b>	24.18 ft (7.37 m)	<b>Maximum Hole Size:</b>	21 in. (53.34 cm)
<b>Weight:</b>	496 lb (225 kg)	<b>Borehole Coverage:</b>	57% in. 8.5 in hole
Borehole Conditions			
<b>Borehole Fluids:</b>	Salt <input checked="" type="checkbox"/>	Fresh <input checked="" type="checkbox"/>	Oil <input type="checkbox"/> Air <input type="checkbox"/>
<b>Tool Positioning:</b>	Centralized <input checked="" type="checkbox"/>	Eccentralized <input type="checkbox"/>	

Tabla 3. Características principales de la herramienta XRMI <sup>TM</sup>. Tomada de (Halliburton, 2012).

Según Halliburton (2012), la herramienta XRMI <sup>TM</sup>, puede:

- Optimizar la ubicación de los pozos de compensación evaluando las características estructurales y estratigráficas y la orientación del lecho
- Mejorar las estimaciones de neto a bruto en arenas lutitas laminadas y carbonatos mediante la delimitación de capas delgadas y laminaciones.

- Racionalizar las decisiones de prueba de formación y estimulación de pozos caracterizando la porosidad secundaria (por ejemplo, fracturas y cavidades) en reservorios.
- Optimizar la eficiencia de la perforación evaluando y orientando la ruptura del pozo
- Optimizar las tácticas de terminación y la gestión del yacimiento proporcionando la caracterización de la textura de la roca y electrofacies.

En la Figura 16, se pueden observar dos imágenes. La primera pista de imagen muestra la imagen con ecualización estática y la segunda pista de imagen muestra la imagen de alta resolución con textura mejorada (Romaniuk, 2013).

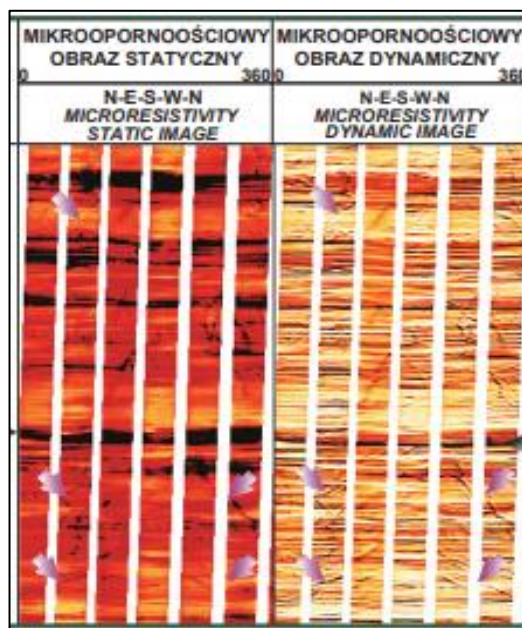


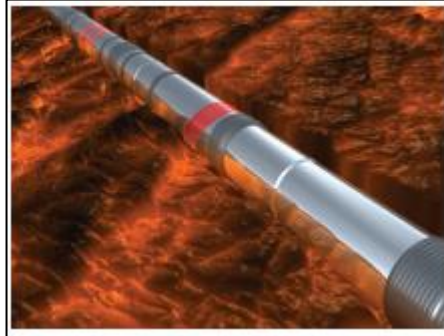
Figura 15. Imágenes tomadas con la herramienta XRMI™, cargadas en el programa Borehole Imaging. Tomada de (Romaniuk, 2013).

El azimut del pozo se lee de izquierda a derecha en la imagen rectangular así: Norte, Este, Sur, Oeste y Norte nuevamente. Las imágenes adquiridas en el pozo Bonga-1 son de buena calidad, permitiendo la identificación de numerosos eventos estratigráficos y estructurales a lo largo de la sección registrada (Presentación Interna, Halliburton).

### 8.3 Quasar Trio® (Triple Combo)

El servicio de triple combinación Quasar Trio® (Figura 17) de medición durante la perforación/ registro durante la perforación (M / LWD) está diseñado para temperaturas extremadamente altas [200 ° C (392 ° F)] y alta presión [172MPa (25,000 psi)]. Su conjunto completo de mediciones

petrofísicas y datos de evaluación de formaciones en tiempo real ayuda a los operadores a mejorar la comprensión del yacimiento, evaluar reservas previamente inaccesibles y reducir el tiempo y los costos de los pozos (Halliburton, 2018b).



*Figura 16. Servicio de triple combinación Quasar Trio®. Tomada de (Halliburton, 2018).*

La interpretación de registros de Triple Combo consiste generalmente de un conjunto herramientas, con diferentes principios y aplicaciones desde la adquisición hasta la interpretación de los datos, representados gráficamente en curvas particulares de cada registro para definir diferentes propiedades petrofísicas de un reservorio en los pozos de petróleo y gas (Pinto, 2017).

Los sensores resistentes y de alta calidad del sistema están diseñados para resistir la vibración en el fondo del pozo y se prueban rigurosamente para garantizar la confiabilidad operativa en las condiciones de perforación más duras (Halliburton, 2018a). Los sensores que hacen parte de este sistema son:

8.3.1 Gamma Ray: la mayor parte de la actividad de rayos gamma deriva de los minerales de arcilla. El material radiactivo natural más común, potasio con un componente atómico peso de 40 se encuentra generalmente en lutitas y arcillas, y se encuentra raramente en areniscas limpias o calizas. Además, el Torio, y en menor medida, el Uranio, y sus elementos hijos son también se encuentran frecuentemente en las lutitas. En general, las lutitas son naturalmente radiactivas, mientras que las porosas y permeables no lo son. Hay algunas excepciones notables. Sin embargo, el GR es un detector de lutitas útil, y es el indicador cuantitativo de lutitas más utilizado. (Pinto, 2017).

Para el registro de rayos gamma natural, la unidad que se usa es el API (American Petroleum Institute). Se emplea una calibración de campo estándar para normalizar cada herramienta según el estándar de API y los registros se calibran en unidades API. La curva de GR total (estándar) se

registra y se presenta en la pista y las escalas son de 0-100 API y de 0-150 API generalmente (Morales, 2007).

Los valores de gamma en una arcilla suelen ser de 80 a 140 unidades de API aproximadamente, por otro lado una arenisca limpia puede arrojar valores de ~ 10 a 30 unidades de API, sin embargo hay algunas excepciones en esto, ya que hay arenas que contienen feldespatos que tienen alto contenido de potasio que pueden arrojar valores altos de Gamma Ray de aproximadamente 150 API, la arenisca también puede contener proporciones altas de minerales de arcilla el cual aumenta la lectura del gamma, las calizas leen bajo gamma (10 unidades de API), pero al igual que las areniscas estas pueden contener minerales de arcilla en proporciones variables, la sal (halita - NaCl) lee gammas inusualmente bajos (<10 unidades de API) y la anhidrita también lee bajo gamma (Figura 18) (Ricco, 2012).

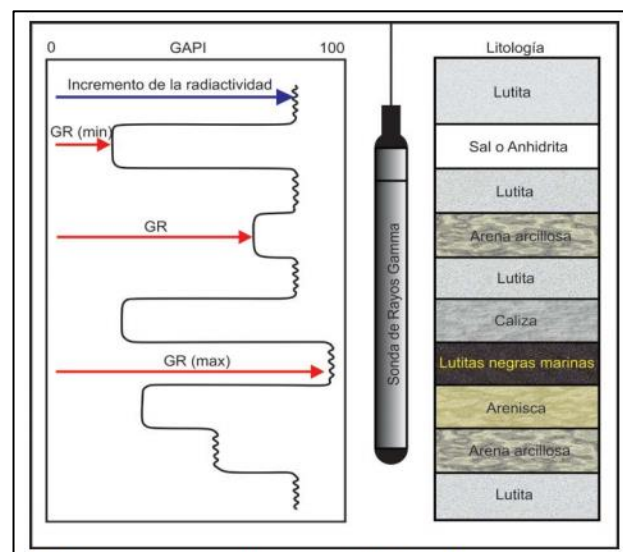


Figura 17. Respuesta típica de Gamma Ray en rocas sedimentarias. Tomada de (Ricco, 2012).

8.3.2 Sensor de resistividad: la resistividad es la capacidad que tiene cualquier material de oponerse al paso de corriente eléctrica inducida y es inverso a la conductividad. Las herramientas de resistividad responden de acuerdo al tipo de fluido de formación y son usadas en la industria del petróleo para caracterizar las propiedades petrofísicas en medios porosos, es decir, si la formación contiene hidrocarburos (petróleo o gas) indicara una alta resistividad ya que estos son aislantes y no permiten el paso de corriente eléctrica, por el contrario, si la formación contiene

agua y dependiendo de su salinidad mostrara baja resistividad debido a su alta conductividad (Gómez, 2009).

Las mediciones de resistividad de lectura profunda proporcionan una estimación de la resistividad real de la formación, y las mediciones a múltiples profundidades de investigación dan una indicación del perfil de invasión (Halliburton, 2018b).

El principal uso del registro de resistividad es el cálculo de saturación de agua utilizando diferentes modelos, también es usado para la localización de hidrocarburos como se muestra en la Figura 19, la identificación de zonas impermeables, diferenciar agua dulce y salada, analizar el perfil de invasión del filtrado del lodo y la correlación con otros registros. Se utiliza la resistividad para calcular la saturación de hidrocarburos y por lo tanto el volumen de reservas. La resistividad de las rocas que están llenas de líquido depende tanto de la resistividad y volumen de los fluidos presentes en la roca (Sue, 2016).

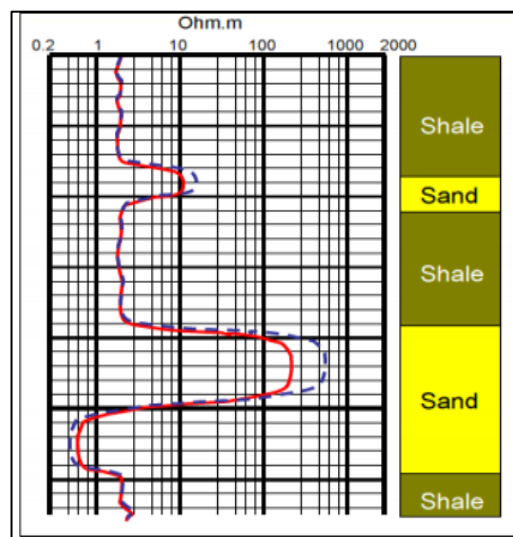


Figura 18. Registro de resistividad. Tomada de (Sue, 2016).

8.3.3 Sensor de densidad: las mediciones de densidad de formación de alta calidad son críticas para un análisis petrofísico preciso. Las mediciones se adquieren azimutalmente alrededor del pozo, proporcionando una imagen datos para mediciones de buzamiento de formación e interpretación de estructuras geológicas (Halliburton, 2018a).

La unidad de medida empleada son los gramos por centímetro cúbico (gr/cc) la lectura en la carta del registro se hace de izquierda a derecha con rango de valores 1.96 – 2.96 gr/c (Figura 20).

Si la densidad es baja entonces la porosidad es alta, si la densidad es alta la porosidad es baja. Dentro de las ventajas en utilizar este registro se incluyen la no necesidad de hacer correcciones por compactación, el traslape de las curvas neutrón - densidad es ideal para indicar presencia de gas, se puede distinguir fácilmente la transición de un tipo de roca a otra. El registro es ideal para determinar porosidad, identificar minerales (evaporitas), detección de gas junto con el registro neutrón, determinación de la densidad de los hidrocarburos, evaluación de areniscas arcillosas y litologías complejas, determinación de arcillas generadoras, cálculos de presión de sobrecarga y propiedades mecánicas de las rocas (Sue, 2016).

Resumiendo, la intensidad de rayos gamma registrada por el detector será inversamente proporcional a la densidad de la formación. En el registro de densidad compensado, mediante una calibración de la sonda con materiales de densidad conocida, se logra que en el registro se obtengan valores directos de la densidad de la formación, en vez de valores de radioactividad (Morales E. , 2007).

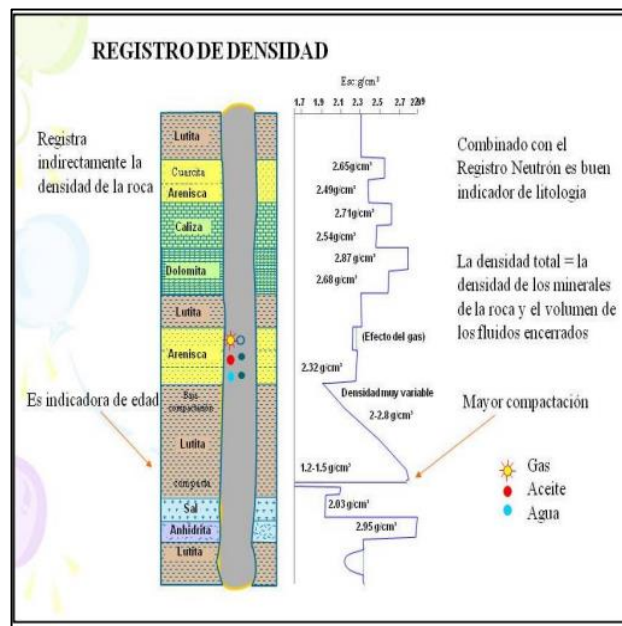


Figura 19. Registro de densidad. Tomada de (Morales, 2007).

## 9. Interpretación de elementos estructurales y sedimentológicos con registros de imágenes microresistivas

La observación y análisis de las imágenes microresistivas XRMI provee información directa relacionada con la estructura, estructuras sedimentarias (mecánicas y biogénicas), espesores, geometría de capas, mineralizaciones, procesos diagenéticos, fracturas, fallas, inconformidades, litología, porosidad secundaria, variaciones texturales, gradaciones, dirección de los esfuerzos, fluidos, etc. Este registro de imágenes muestra la pared del pozo en dos dimensiones. Si los estratos son sub paralelos, la imagen mostrará una línea recta, pero si el estrato está inclinado en la imagen se visualizará una línea sinusoidal (Figura 21) (Oleas, 2017).

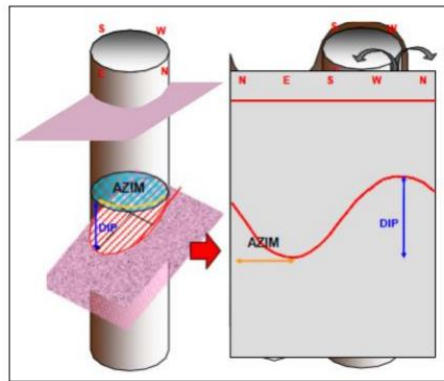


Figura 20. Representación de azimut y buzamiento en un registro de imágenes. Tomada de (Oleas, 2017).

Es decir, la herramienta XRMI de imágenes de pozo permite la observación continua de las variaciones laterales y verticales de las formaciones con un detalle que se encuentra por debajo del centímetro (0.2 pulgadas), permitiendo estudios tanto estructurales (rasgos naturales y artificiales) como estratigráficos (Zarabia, 2013).

### 9.1 Estructurales

El registro de imágenes microresistivas permite identificar rasgos estructurales artificiales o inducidos y naturales, que son identificados debido a las características conductivas del relleno de la fractura: mineralización y lodo de perforación base agua (Zarabia, 2013).

#### 9.1.2 Rasgos naturales

### 9.1.2.3 Fracturas Abiertas/Conductivas

Se identifican fácilmente en los registros de imágenes ya que las aperturas se encuentran rellenas de lodo de perforación, estas aparecen como trazas más oscuras (Figura 22), es decir más conductivas que la roca que las contiene; las fracturas si son altas permiten una representación simétrica con una senoide continua a lo largo de la pared del hueco (Gómez, 2019).

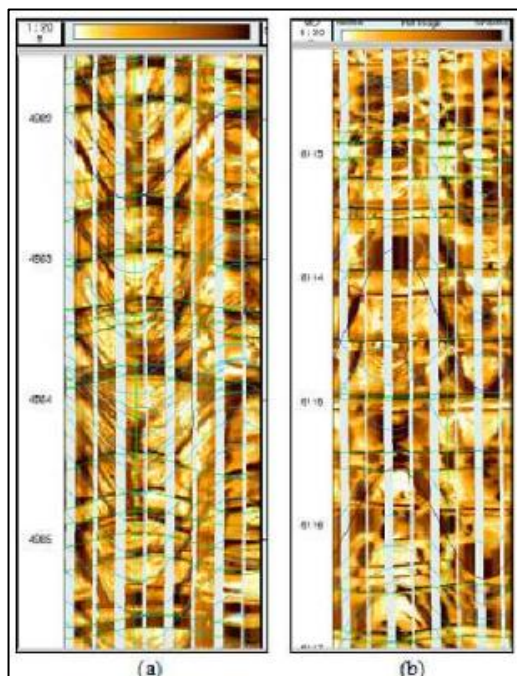


Figura 21. a) Fractura conductiva de superficie semiplanar. b) Fractura conductiva de superficie vugular. Tomada de (Ptolomeo, 2011).

### 9.1.2.4 Fracturas Cerradas/No Conductivas

Son fracturas que están rellenas por mineralizaciones secundarias; estos procesos pueden hacerlas más resistivas cuando se rellenan con minerales resistivos como calcita, cuarzo, etc. Las fracturas cerradas generalmente aparecen como trazas más brillantes (Figura 23) que las rocas que las contienen, son simétricas y pueden ser representadas con una senoide, sin embargo, las fracturas cerradas pueden lucir conductivas cuando se encuentran rellenas con minerales conductivos como pirita, arcillas, etc. (Gómez, 2019).

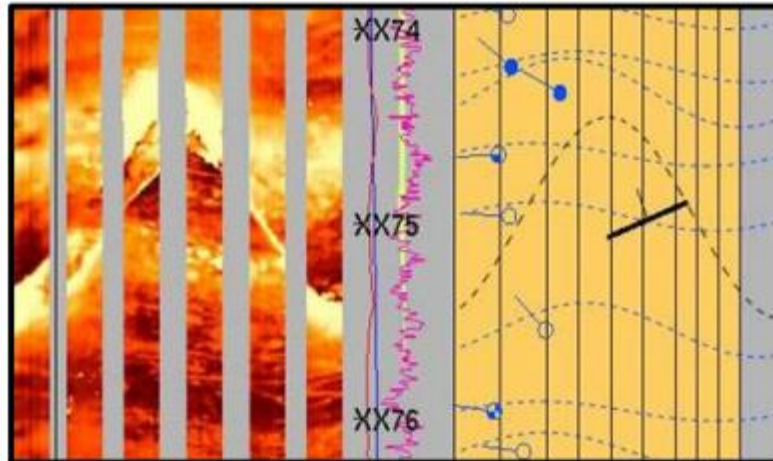


Figura 22. Imagen eléctrica con fracturas cerradas. Tomada de (Zarabia, 2013).

#### 9.1.2.5 Fallas

Las capas pueden truncarse en el plano de falla, con una posible yuxtaposición de diferentes facies. Frecuentemente hay cambios en la dirección de las capas, por encima/debajo de la falla y en algunos casos es característico la presencia de fracturas naturales en la cercanía de la falla, o ambos eventos muy cerca (Figura 24) (Zarabia, 2013).



Figura 23. Imagen microresistiva representativa de una falla. Tomada de (Zarabia, 2013).

#### 9.1.2.6 Fracturas Parciales/Semi-Conductivas

Describen fracturas con trazos discontinuos (Figura 25) tanto resistivos como conductivos, los cuales sugieren ruptura o mineralización parcial (Gómez, 2019).

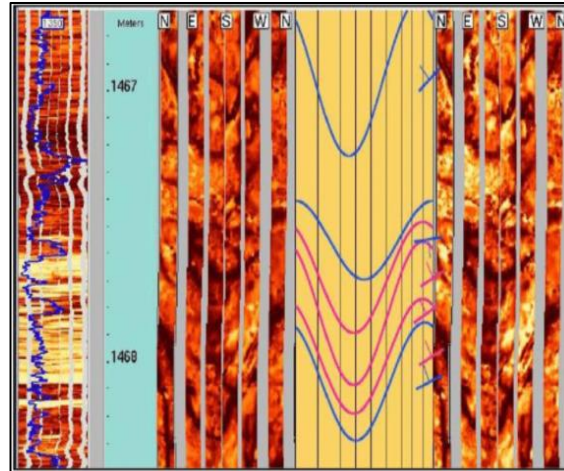


Figura 24. Ejemplo de interpretación de la imagen de un pozo. Las fracturas abiertas (azul) y las fracturas abiertas parciales (rojo). Tomada de (Wahyuddin et al., 2019).

#### 9.1.2.7 Fracturas resistivas

Su origen es de tipo diagenético las cuales al ser naturalmente abiertas en algún proceso geológico fueron rellenadas por algún cementante el cual generalmente es algún carbonato lo cual las hace resistivas; en las imágenes se observan en una coloración blanca, estas fracturas resultan ser más resistivas que el medio que las rodea, por lo que resaltan con gran facilidad en las imágenes (Figura 26). Este tipo de fracturas son de tipo natural e indican que la formación fue sometida a esfuerzos que provocaron fracturas abiertas o parcialmente abiertas las cuales en eventos posteriores fueron rellenadas por fluidos ricos en sales (Ptolomeo, 2011).

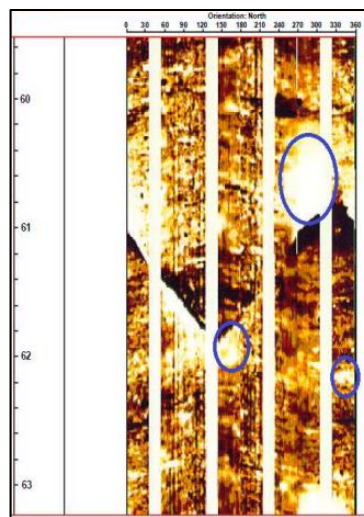


Figura 25. Imagen eléctrica con fracturas resistivas (círculos azules) por carbonatos en coloración blanca. Tomada de (Ptolomeo, 2011).

### 9.1.3 Rasgos artificiales

#### 9.1.3.1 Fracturas Inducidas o por tracción.

Fracturas creadas por esfuerzo mecánico o fracturas inducidas, esto quiere decir que se forman durante el proceso de perforación por fracturamiento hidráulico, en las imágenes siempre se observa como dos líneas semiparalelas (Figura 27), estas fracturas siempre son abiertas y su orientación es probable que sea por métodos convencionales de echado, el rumbo de la fractura representa la principal dirección del esfuerzo (Ptolomeo, 2011)

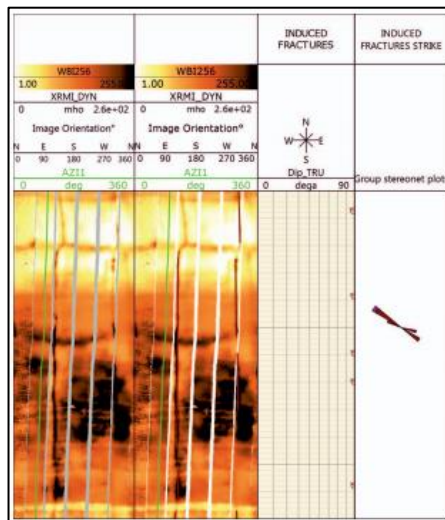


Figura 26. Imagen eléctrica con fracturas inducidas. Tomada de (Kaczmarczyk & Lis-Śledziona, 2017).

#### 9.1.3.2 Breakouts (derrumbe del pozo)

Los Breakouts son evidencia de esfuerzos en el plano normal al hoyo. Se forman como el resultado de un desequilibrio en los esfuerzos y ocurre en la dirección del mínimo esfuerzo horizontal (Figura 28). Sin embargo, no son un signo de colapso completo de la estructura a menos que el breakout se desarrolle de manera descontrolada (Zarabia, 2013).

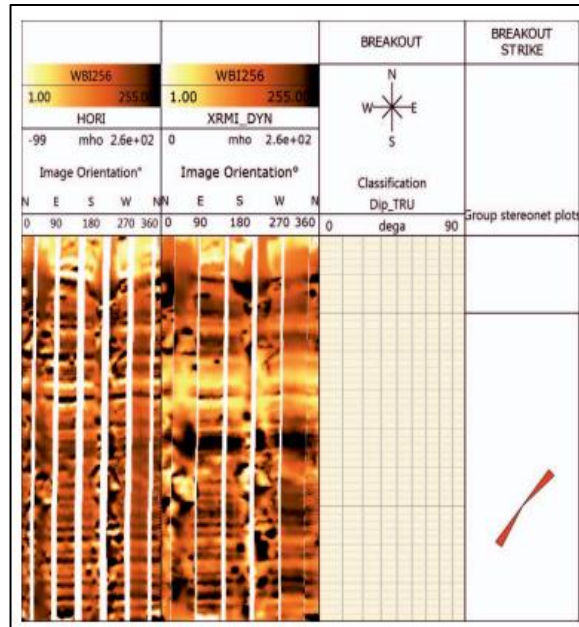


Figura 27. Imagen eléctrica exhibiendo un breakout. Tomada de (Kaczmarczyk & Lis-Śledziona, 2017).

## 9.2 Sedimentológicos

El análisis detallado de las características geológicas en los registros de imágenes resistivas, permite obtener parte de la información necesaria para definición de los cuerpos y elementos sedimentarios debido a que aporta información significativa para la definición de facies en largos intervalos de la secuencia e informa sobre patrones de buzamiento estratigráfico que derivan en la definición de direcciones de paleocorrientes y de engrosamiento de esos elementos sedimentarios (laminación cruzada, superficies de erosión, inconformidades, etc) (García, 2004).

### 9.2.1 Laminaciones

Se observan como planos que marcan límites de capas (Figura 29) evidenciados por diferencias significativas en la resistividad de la imagen (Ponce et al., 2018).

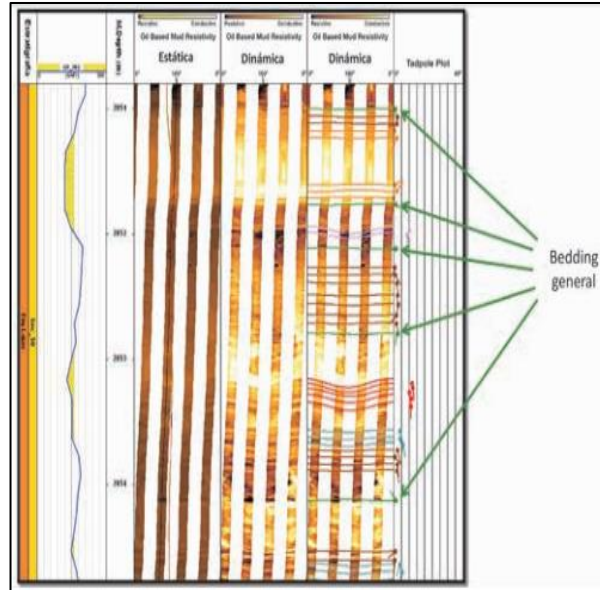


Figura 28. Imagen resistiva con su respectiva interpretación de laminaciones. Tomada de (Ponce, et al., 2018).

### 9.2.2 Estratificación cruzada

Planos inclinados con respecto a los límites de capa (Figura 30), característicos de zonas de alta resistividad (depósitos arenosos), presentan una orientación subparalela y un ángulo menor a  $15^\circ$  (estratificación cruzada de bajo Angulo) o mayores a  $15^\circ$  (estratificación cruzada de alto Angulo) (Ponce et al., 2018). En muchas ocasiones esta estructura es separada por superficies de erosión o de no deposición, esta estructura consiste en una serie de láminas o estratos que se inclinan hacia la superficie de sedimentación principal (Gómez, 2019).

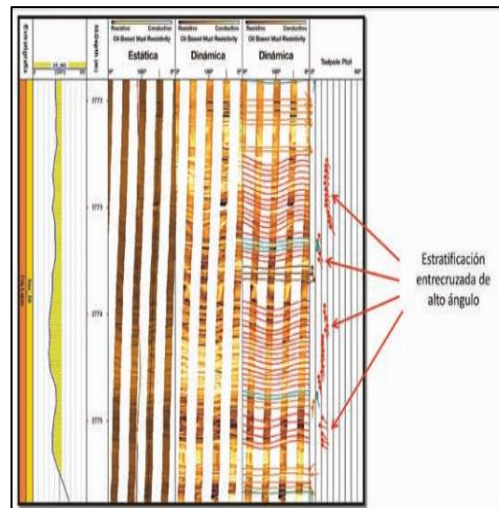


Figura 29. Ejemplo de interpretación de la imagen de un pozo con definición de estratificación cruzada. Tomada de (Ponce et al., 2018).

### 9.2.3 Superficies de erosión

Superficie inclinada y/o irregular que marca una truncación o cambio significativo de la litología (Figura 31) , y por ende de la energía del ambiente deposicional (Ponce et al., 2018).

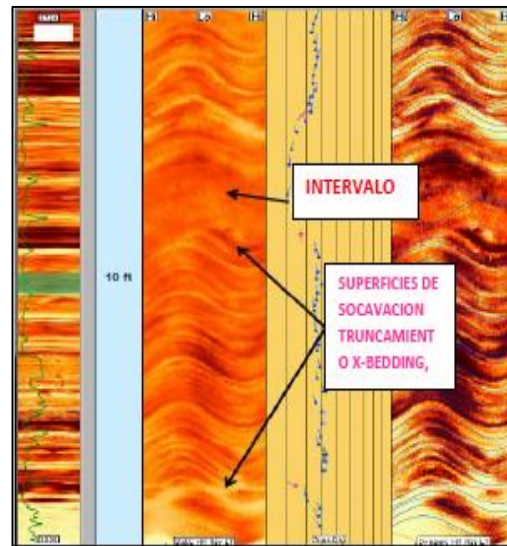


Figura 30. Superficie de erosión. Tomada de (Gómez, 2009).

### 9.2.4 Discordancia

Corresponde a un límite abstracto (Figura 32), con geometría de contacto neto o irregular que indica el contraste de eventos de erosión o sedimentación. La discordancia representa un hiato en el registro geológico. Este tipo de superficie puede ser el resultado de una discontinuidad en la deposición de los sedimentos, posiblemente en combinación con un proceso de erosión o de deformación (García, 2004).



Figura 31. Contacto discordante. Tomada de (García, 2004).

### 9.2.5 Laminaciones plano-paralelas:

Por su parte Ponce et al (2018), expone que la laminación plano-paralela es una estructura sedimentaria que se puede producir en granulometrías que van desde arcillas hasta arenas gruesas. Este tipo de lineación aparece como surcos elongados con un relieve frecuentemente menor a 1 mm, son indicativas de la dirección (pero no del sentido) de la paleocorriente, y son diagnósticas de condiciones de alto régimen de flujo (Figura 33).

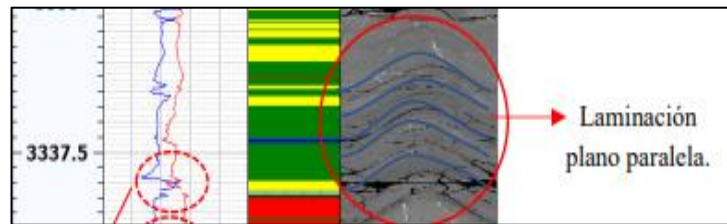


Figura 32. Imagen de pozo mostrando laminación plano-paralela. Tomada de (De Arco & Marlon, 2018).

### 9.3 Rasgos texturales de rocas:

9.3.1 Arena de tamaño grueso y gravas: es posible identificar en registros de imágenes los diferentes tamaños de los clastos en este caso podemos identificar arena de tamaño grueso y grava. El término Grava se refiere a un tamaño de grano determinado ( $>2$  mm) y no implica una escasa compactación de un sedimento grueso. Este término se aplica a granos mayores que la arena gruesa y más pequeños que los cantos (Figura 34) (Rodríguez , 2015).

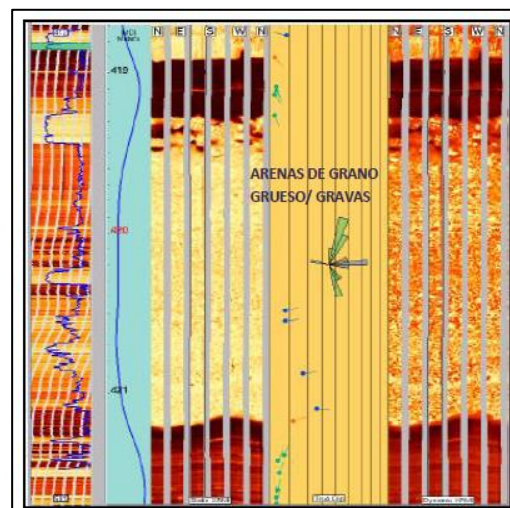


Figura 33. Arena de grano grueso. Tomada de (Rodríguez, 2015).

Según, López (2002), los siguientes rasgos texturales se pueden identificar a través de las imágenes microresistivas:

9.3.2 Fragmentos de lignito o carbón: se observan como estructuras elongadas irregulares y resistivas. El análisis de fluidos puede ayudar en la determinación de la existencia de carbón o gas.

9.3.3 Pirita: se observa en cuerpos pequeños y en ocasiones en secciones cuadradas, muy conductivos. Se presenta en formaciones con alto contenido de uranio (Figura 35).

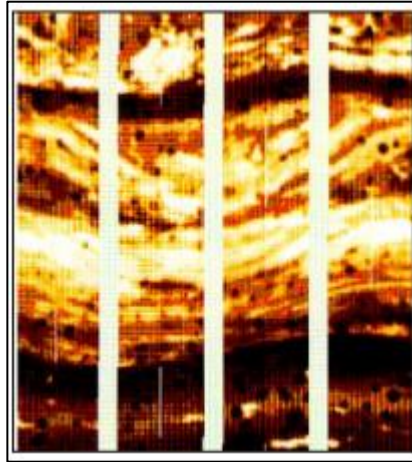


Figura 34. Nódulos de Pirita. Tomada de (López, 2012).

9.3.4 Conglomerados: se observan como una roca formada por fragmentos redondeados con tamaño de gravas en una matriz de partículas finas (Figura 36) (Rodríguez , 2015).

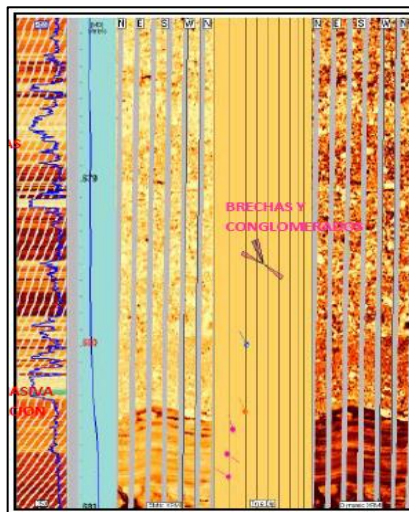


Figura 35. Conglomerados. Tomada de (Rodríguez, 2015).

9.3.5 Bioturbación: en imágenes lo más observado son las galerías y raíces de plantas, se presentan como canales subverticales u oblicuos (Figura 37) (Rodríguez , 2015).

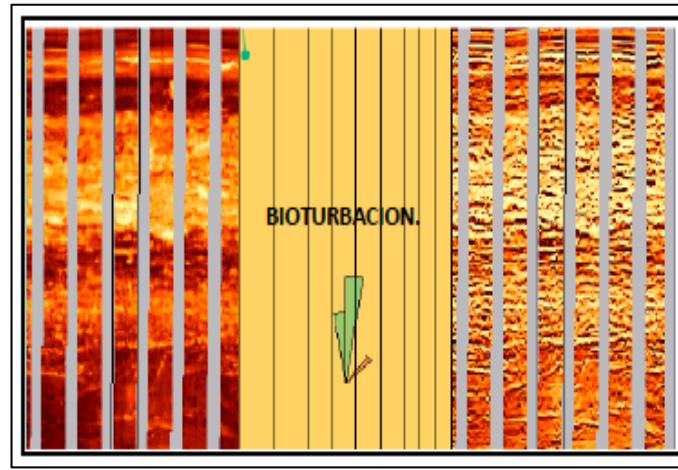


Figura 36. Bioturbación. Tomada de (Rodríguez, 2015).

## 10. Resultados de elementos estructurales y sedimentológicos en la Formación Ciénaga de Oro y basamento

### 10.1 Estructurales

#### 10.1.1 Formación Ciénaga de Oro

10.1.1.1 Dips Estructurales (inclinación estructural de las capas; comúnmente se relaciona a estratos asentados por suspensión): fueron determinados 245 dips estructurales con azimut promedio de 205 grados y un orientación preferencial de SW.

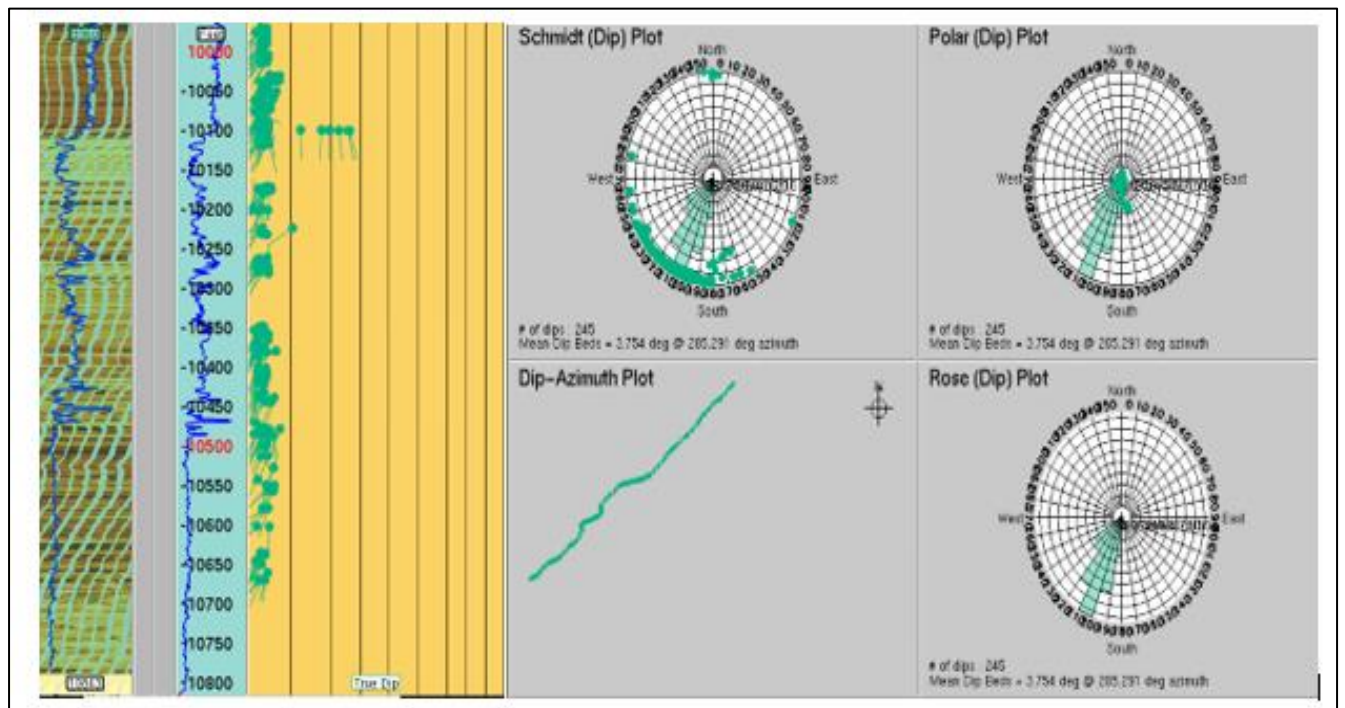


Figura 37. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando dips estructurales e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

Depth Column	True Dip Azimuth	True Dip Mag	Borehole Dip Azimuth	H Inclination	Dip Name	Dip direction	Unidad Litológica
9969,792192	195,6186	3,053907	182,6004	1,382016	Structural Dip	SW	FormacionCO
9970,140625	188	3,040203	182,5424	1,397387	Structural Dip	SW	FormacionCO
9971,005859	232,64	4,490048	183,4816	1,376142	Structural Dip	SW	FormacionCO
9971,384766	235,52	4,487383	180,371	1,344429	Structural Dip	SW	FormacionCO
9971,841797	221,12	3,032615	179,2131	1,292886	Structural Dip	SW	FormacionCO
9972,198242	244,16	3,036333	182,101	1,258672	Structural Dip	SW	FormacionCO
9972,766598	216,5577	2,958442	181,8615	1,355778	Structural Dip	SW	FormacionCO
9973,060904	223,4377	4,476865	181,6315	1,353658	Structural Dip	SW	FormacionCO
9975,350586	186,2	3,430283	184,0235	1,316873	Structural Dip	SW	FormacionCO
9975,795028	195,1777	1,728651	182,3015	1,345552	Structural Dip	SW	FormacionCO
9976,761719	199,52	4,344673	180,3765	1,32521	Structural Dip	SW	FormacionCO
9977,058034	191,4029	4,401935	183,2705	1,36461	Structural Dip	SW	FormacionCO
9978,351563	190,88	2,896631	182,1527	1,280125	Structural Dip	SW	FormacionCO
9982,979492	192,32	4,515773	180,4316	1,325858	Structural Dip	SW	FormacionCO
9985,920898	228,32	4,371632	179,1893	1,339154	Structural Dip	SW	FormacionCO
9987,809722	201,2505	2,938291	182,5259	1,351073	Structural Dip	SW	FormacionCO
9990,533338	229,2097	4,443923	182,6532	1,381149	Structural Dip	SW	FormacionCO
9990,991604	220,0419	2,919806	182,8195	1,369596	Structural Dip	SW	FormacionCO
9994,089489	202,0721	2,81559	183,3085	1,379348	Structural Dip	SW	FormacionCO
9994,659738	202,4	3,311206	181,9694	1,321458	Structural Dip	SW	FormacionCO
9995,235495	220,1042	2,937758	183,0005	1,305929	Structural Dip	SW	FormacionCO
9996,746094	231,2	3,441183	181,8727	1,329547	Structural Dip	SW	FormacionCO

Figura 38. Dips estructurales de la Formación Ciénaga de Oro.

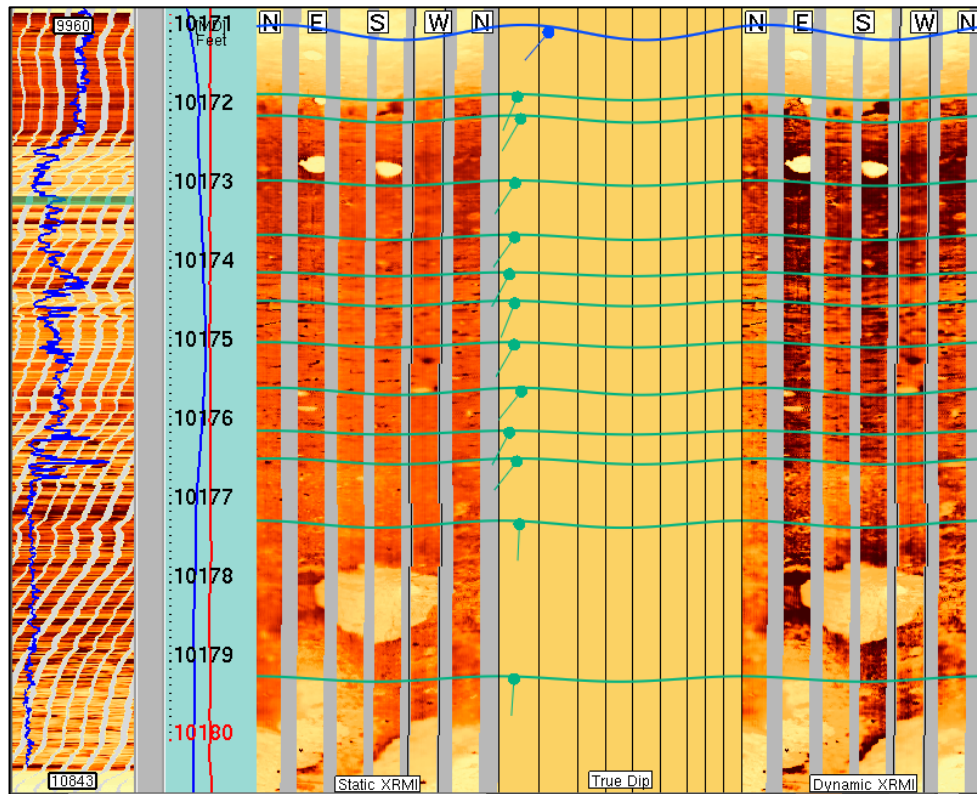


Figura 39. Dips Estructurales dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

10.1.1.2 Breakouts (derrumbe del pozo): se determinaron 10 breakouts con rumbos variados, pero con un promedio de 225 grados y NW-SE como sus direcciones predominantes de orientación.

Depth Column	True Dip Azimuth	True Dip Mag	Borehole Dip Azimuth	H Inclination	Dip Name	Dip direction	Unidad Litologica
10446,09971	233,4317	88,99392	166,1809	0,6499204	Breakout	SW	FormacionCO
10450,03488	245,7945	89,18998	167,8867	0,623469	Breakout	SW	FormacionCO
10482,91008	281,0284	87,7611	200,481	0,5405806	Breakout	NW	FormacionCO
10493,08816	300,2652	66,03576	191,7523	1,908044	Breakout	NW	FormacionCO
10525,6762	99,88	89,50576	186,7477	0,7273811	Breakout	SE	FormacionCO
10530,91515	101,4767	89,08317	190,3499	0,601316	Breakout	SE	FormacionCO
10533,14403	101,8211	89,66529	179,9573	0,5808198	Breakout	SE	FormacionCO
10533,36625	278,1658	88,89195	182,2294	0,5845113	Breakout	NW	FormacionCO
10535,57157	90,91283	89,48468	187,4739	0,5144576	Breakout	SE	FormacionCO
10540,02892	103,8681	89,99499	180,1001	0,6318275	Breakout	SE	FormacionCO

Tabla 4. Breakouts de la Formación Ciénaga de Oro.

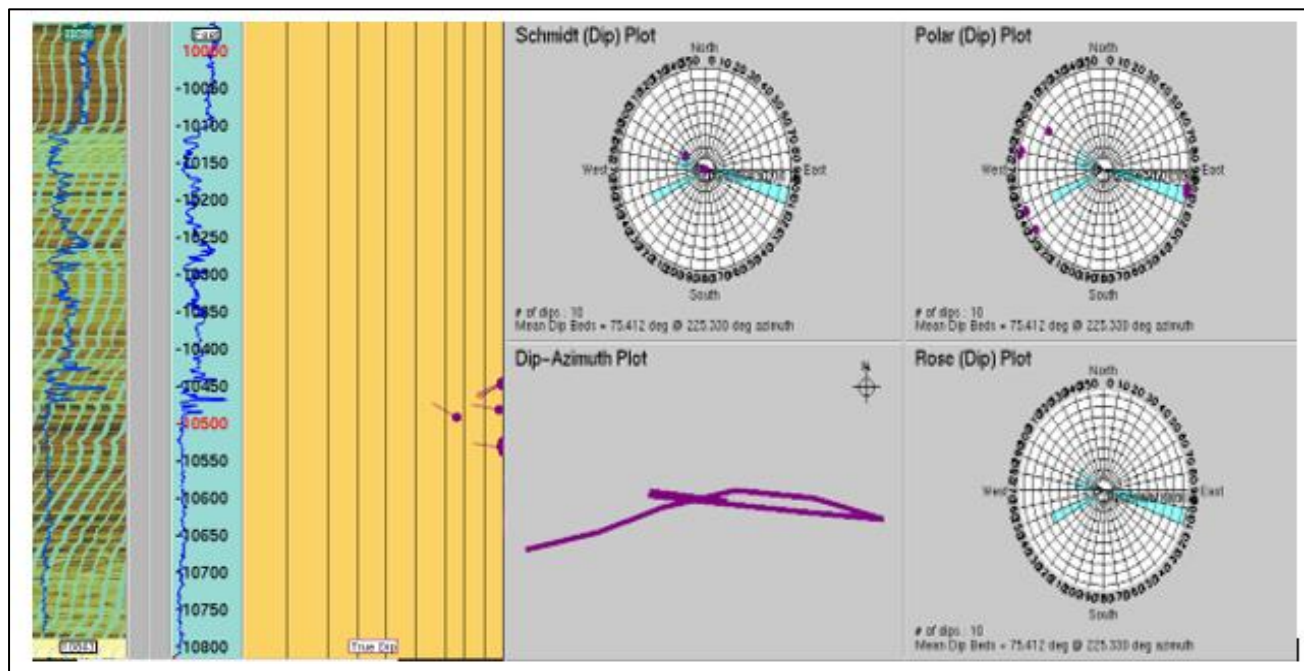


Figura 40. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando breakouts e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

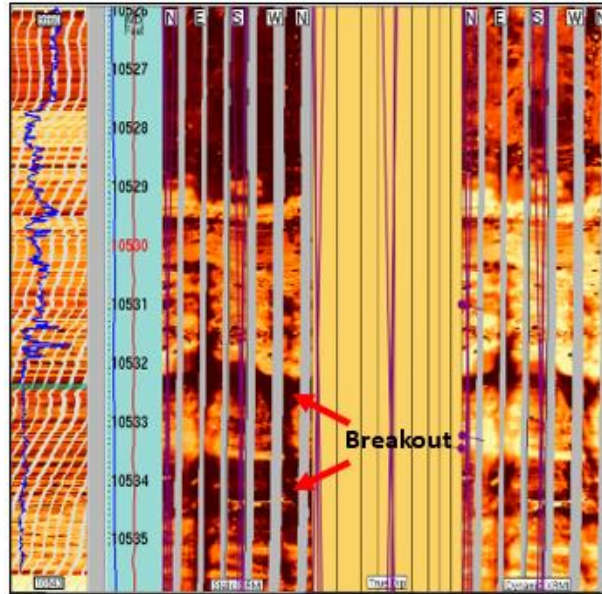


Figura 41. Breakouts dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

10.1.1.3 Fracturas conductivas: con orientaciones SE y SW fueron determinadas 2 fracturas conductivas con rumbo promedio de 282 grados.

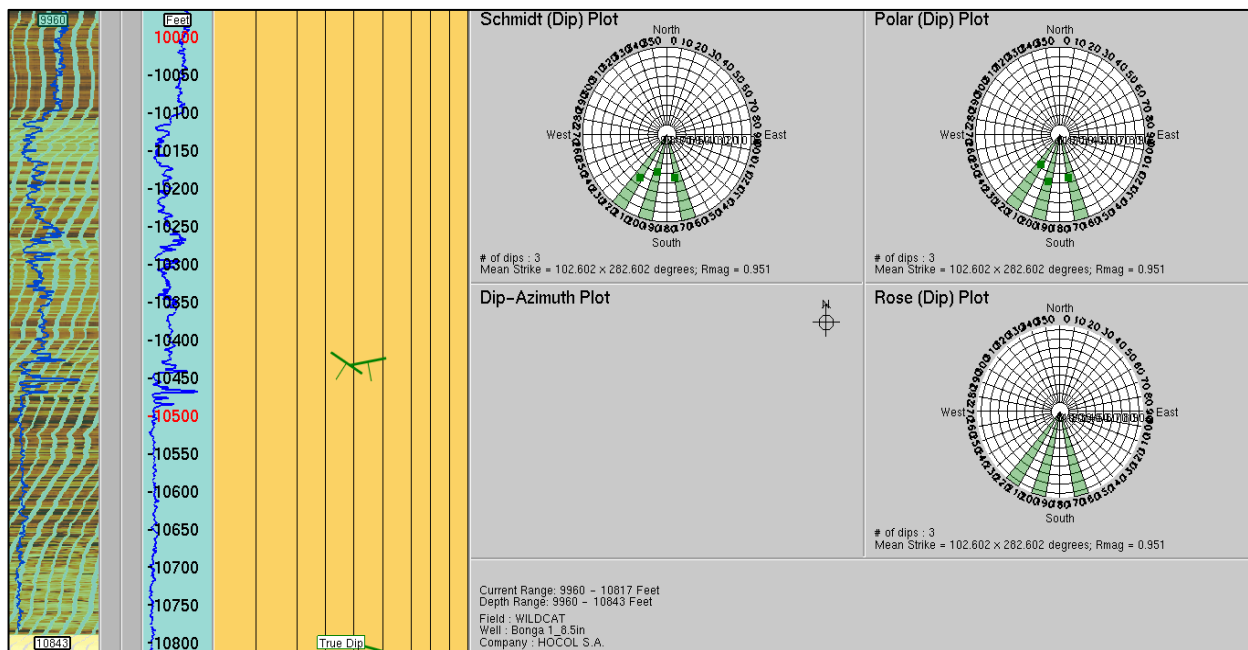


Figura 42. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando 2 fracturas conductivas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

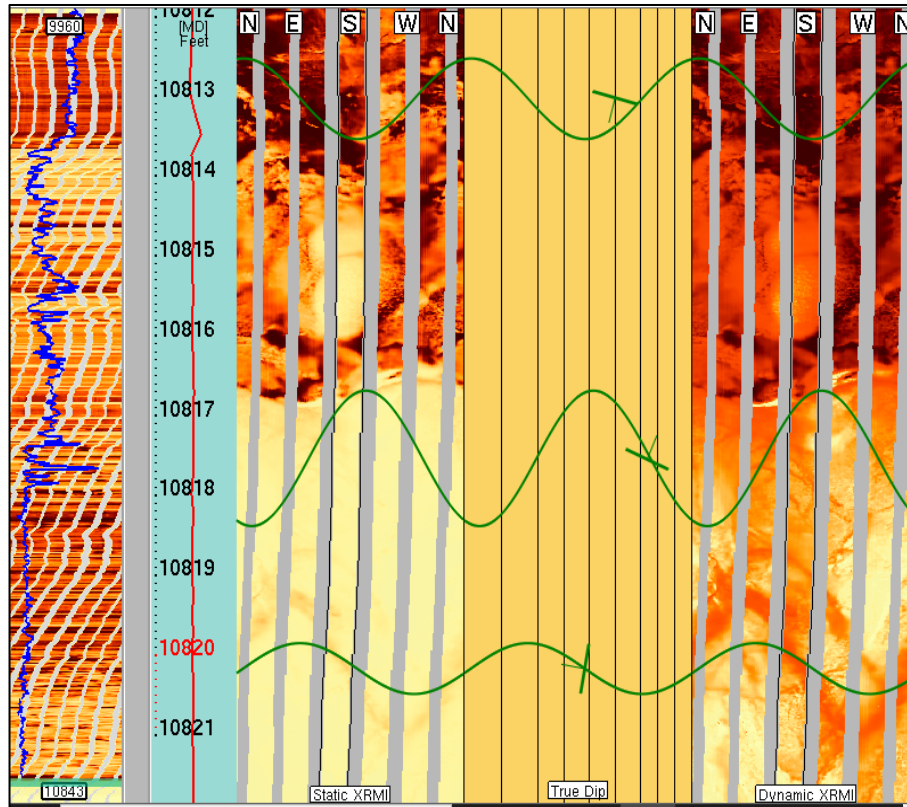


Figura 43. Fracturas conductivas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

10.1.1.4 Fallas: se establecieron 5 fallas en la Formación Ciénaga de Oro, con un rumbo promedio de 347 grados y orientaciones variantes.

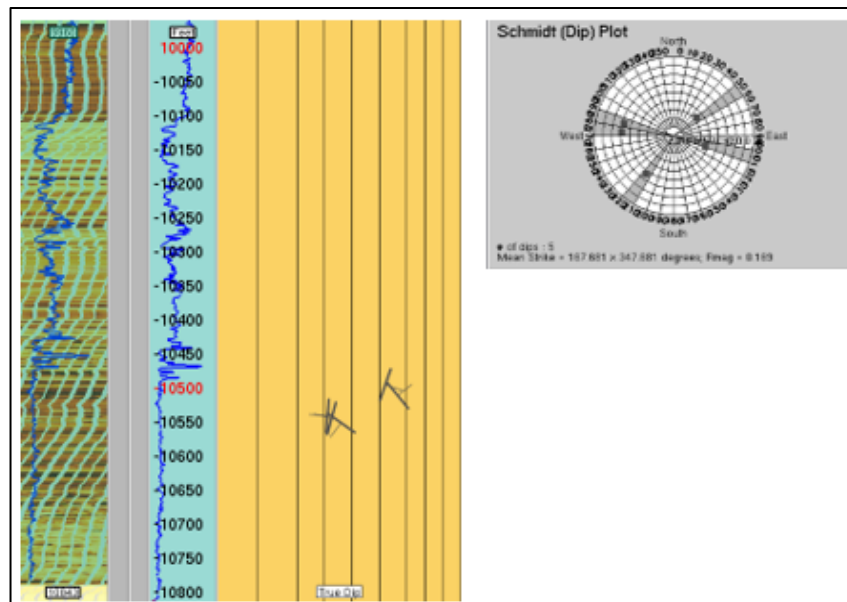


Figura 44. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fallas e identificación de patrones de buzamiento.

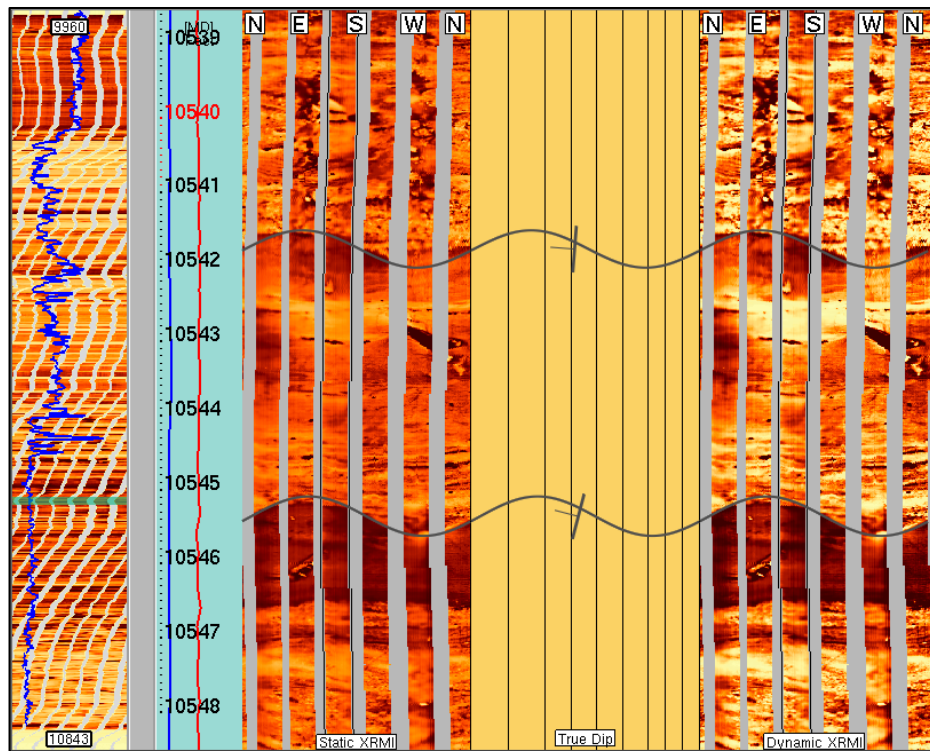


Figura 45. Fallas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.



Figura 46. Falla identificada en la Formación Ciénaga de Oro.

10.1.1.5 Fracturas Inducidas: fue determinada 1 fractura inducida, con un rumbo de 259 grados y orientación NE.

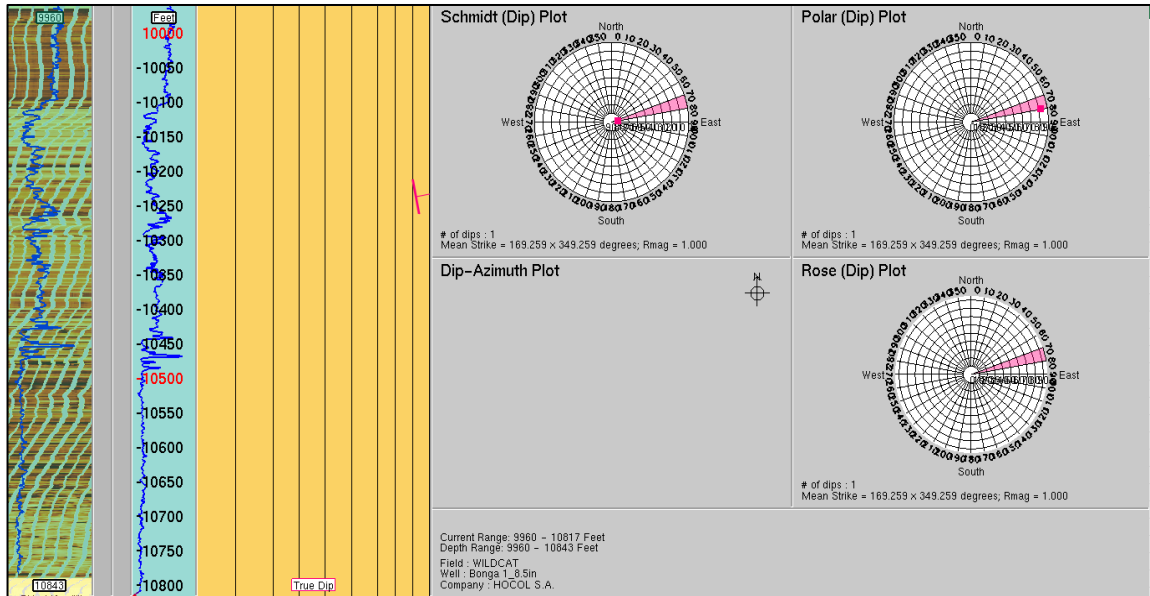


Figura 47. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fracturas inducidas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

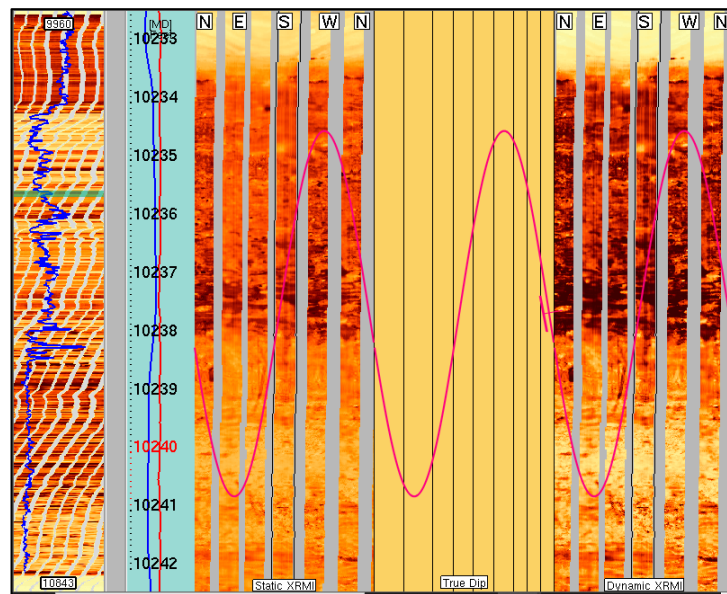


Figura 48. Fractura Inducida en la Fm Ciénaga de Oro.

10.1.1.6 Fracturas Parciales: 497 fue el número de fracturas parciales que se estableció en la Formación Ciénaga de Oro, con un rumbo promedio de 223 grados y orientaciones variables.

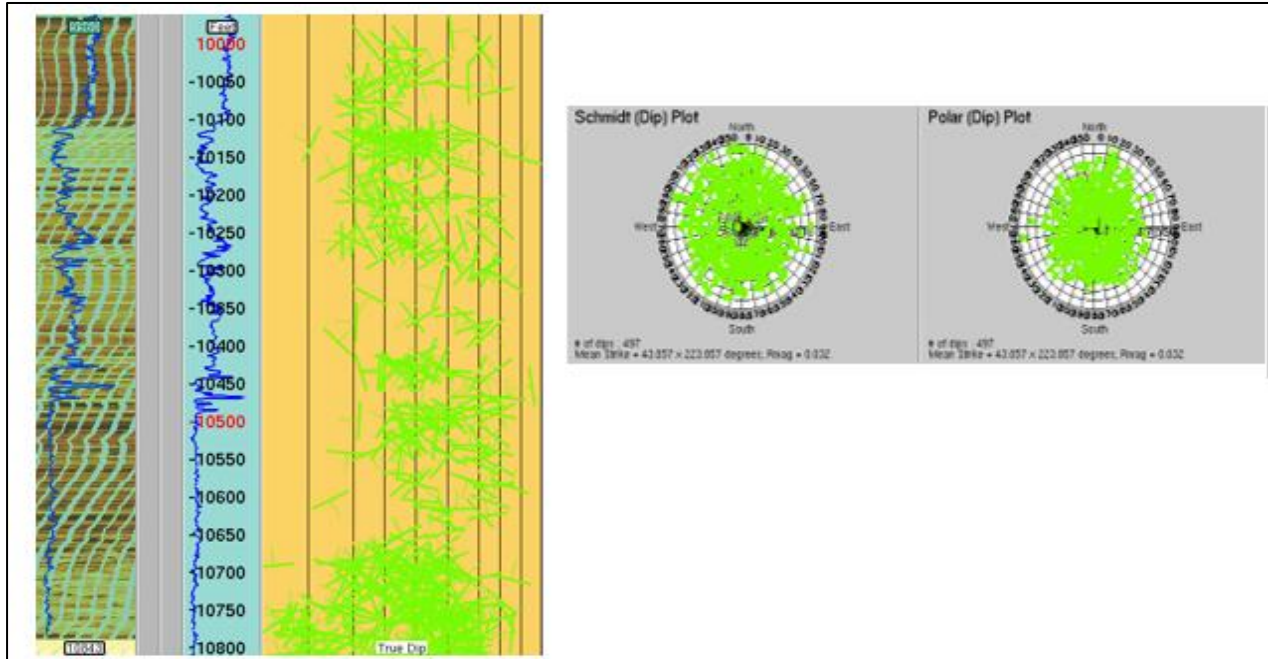


Figura 49. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fracturas parciales e identificación de patrones de buzamiento.

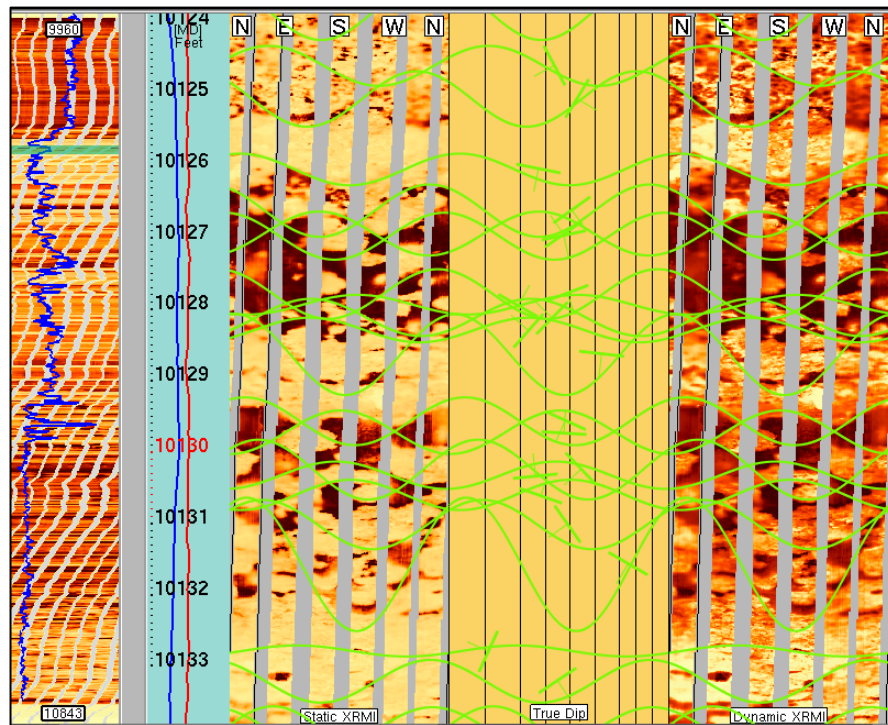


Figura 50. Fracturas Parciales dentro en un intervalo de la Formación Ciénaga de Oro, parte superior de la imagen.

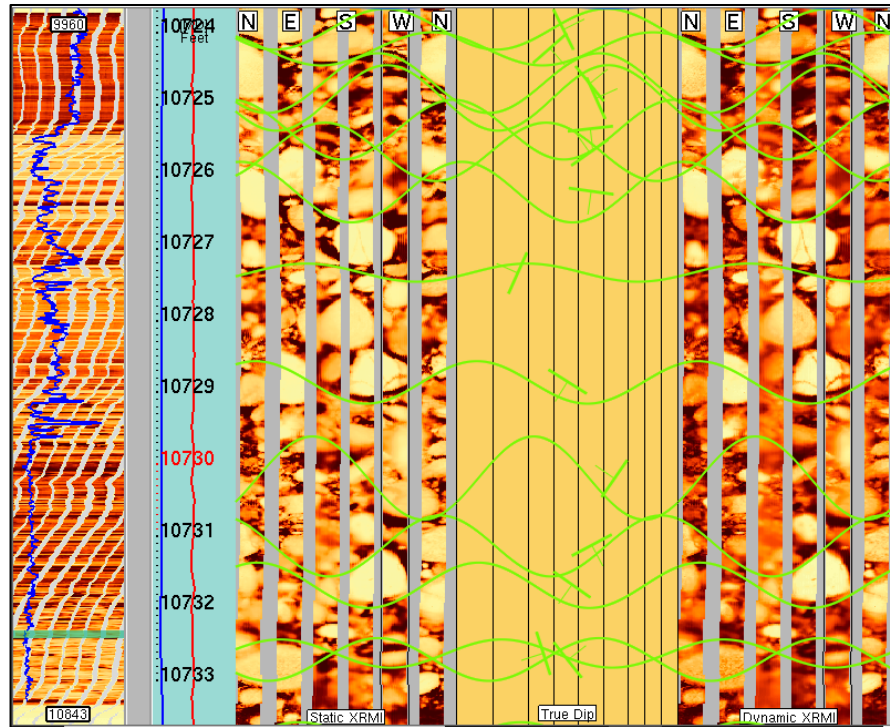


Figura 51. Fracturas Parciales dentro en un intervalo conglomerático de la Formación Ciénaga de Oro, parte inferior de la imagen.

10.1.1.7 Fracturas resistivas: con un rumbo promedio de 183 grados y orientación preferencial SE, se determinaron 17 fracturas resistivas.

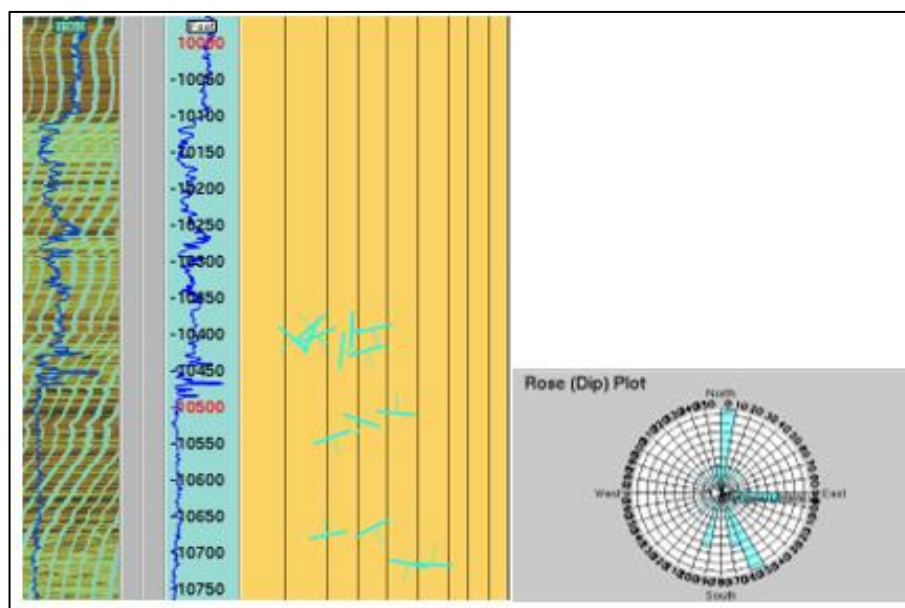


Figura 52. Estadística estructural de la Formación Ciénaga de Oro, indicando fracturas resistivas y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

Depth Column	True Dip Azimuth	True Dip Mag	Borehole Dip Azimuth	H Inclination	Dip Name	Dip direction	Unidad Litológica
10390,77619	317,84	16,08615	170,5382	1,110843	Resistive Fracture	NW	FormacionCO
10395,00107	45,59109	16,77226	172,8948	1,094747	Resistive Fracture	NE	FormacionCO
10403,40806	156,8805	17,87503	166,6776	0,9475592	Resistive Fracture	SE	FormacionCO
10404,02675	111,7463	16,28725	166,0502	0,968177	Resistive Fracture	SE	FormacionCO
10408,05358	220,9904	11,91945	166,7039	1,020255	Resistive Fracture	SW	FormacionCO
10423,34189	96,81469	24,93055	162,9682	0,8276805	Resistive Fracture	SE	FormacionCO
10424,55762	163,477	33,10381	164,7592	0,9086271	Resistive Fracture	SE	FormacionCO
10508,65326	5,131849	42,67356	184,3487	0,5967521	Resistive Fracture	NE	FormacionCO
10520,79785	199,4535	31,18424	184,6767	0,6758441	Resistive Fracture	SW	FormacionCO
10543,6109	158,9809	21,55353	185,7766	0,6843551	Resistive Fracture	SE	FormacionCO
10667,89633	150,7914	35,14584	113,5474	0,5506719	Resistive Fracture	SE	FormacionCO
10676,06778	347,386	20,02294	106,3207	0,5213002	Resistive Fracture	NW	FormacionCO
10717,03553	3,814058	55,0926	100,3241	0,529255	Resistive Fracture	NE	FormacionCO
10717,18826	192,1914	46,53884	101,1733	0,4716252	Resistive Fracture	SW	FormacionCO
10812,48238	335,0492	4,128535	150,8739	0,8693275	Resistive Fracture	NW	FormacionCO
10815,39735	10,74634	53,96405	147,4725	0,9794115	Resistive Fracture	NE	FormacionCO
10816,74209	108,7517	26,30856	147,649	0,9854162	Resistive Fracture	SE	FormacionCO

Tabla 5. Fracturas Resistivas de la Formación Ciénaga de Oro.

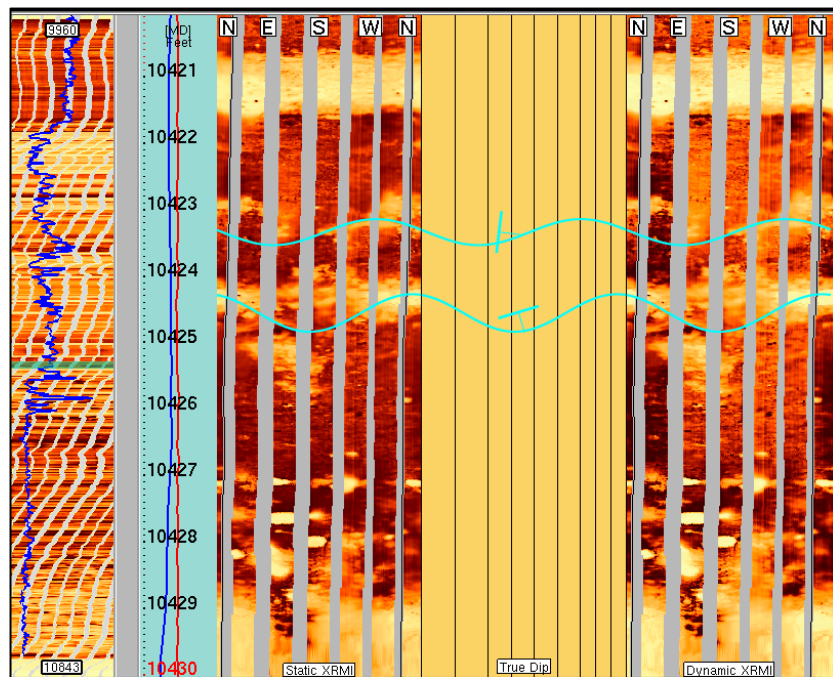


Figura 53. Fracturas resistivas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

## 10.1.2 Basamento

10.1.2.1 Fracturas Parciales: fueron establecidas un total de 21 fracturas parciales en el basamento, con orientación predominante SW y un rumbo medio de 322 grados.

Depth Column	True Dip Azimuth	True Dip Mag	Borehole Dip Azimuth	H Inclinatio	Dip Name	Dip directi	Unidad Litologica
10817,31431	217,8968	30,39697	144,3013	1,036698	Partial Fractur	SW	Basamento
10817,53711	23,84	63,79902	147,7783	0,988632	Partial Fractur	NE	Basamento
10818,63867	300,32	28,90195	149,1847	1,025646	Partial Fractur	NW	Basamento
10818,78223	131,84	55,24832	148,4931	1,04677	Partial Fractur	SE	Basamento
10819,38845	301,1875	64,4304	144,3467	1,108436	Partial Fractur	NW	Basamento
10820,1709	280,16	37,66101	142,8064	1,188813	Partial Fractur	NW	Basamento
10820,3533	85,75603	27,13388	141,8283	1,197573	Partial Fractur	NE	Basamento
10821,59473	120,32	14,06909	143,1266	1,156765	Partial Fractur	SE	Basamento
10821,99902	247,4	19,80485	143,6109	1,131587	Partial Fractur	SW	Basamento
10822,86105	181,4725	62,91755	142,7052	1,16751	Partial Fractur	SW	Basamento
10823,13477	251,36	29,83642	142,4031	1,158198	Partial Fractur	SW	Basamento
10823,35352	332	33,73247	141,5746	1,177953	Partial Fractur	NW	Basamento
10823,50908	192,9045	56,57768	140,9886	1,18286	Partial Fractur	SW	Basamento
10824,1543	85,76	25,64352	143,9973	1,143371	Partial Fractur	NE	Basamento
10824,4248	92,96	45,87455	145,4469	1,157487	Partial Fractur	SE	Basamento
10824,70898	265,76	13,04987	145,8176	1,14209	Partial Fractur	SW	Basamento
10824,81841	193,246	43,0568	145,903	1,160411	Partial Fractur	SW	Basamento
10824,84863	357,92	39,45433	145,9728	1,173127	Partial Fractur	NW	Basamento
10825,1282	355,6887	8,849566	145,6545	1,221624	Partial Fractur	NW	Basamento
10826,107	6,429867	54,78714	144,8473	1,239603	Partial Fractur	NE	Basamento
10826,90997	210,0357	72,10403	140,9029	1,247416	Partial Fractur	SW	Basamento
10827,49512	215,36	50,58965	141,019	1,303407	Partial Fractur	SW	Basamento
10827,52344	48,32	7,949434	141,0937	1,295008	Partial Fractur	NE	Basamento
10827,75045	84,1291	36,51906	141,589	1,204665	Partial Fractur	NE	Basamento
10827,76563	226,88	26,82061	141,6203	1,213253	Partial Fractur	SW	Basamento
10827,7776	194,1545	56,39429	141,6359	1,217548	Partial Fractur	SW	Basamento
10827,93405	186,0308	27,54009	141,9335	1,299137	Partial Fractur	SW	Basamento
10828,83942	229,1028	39,68439	139,8303	1,229603	Partial Fractur	SW	Basamento
10829,21973	276,2	16,43931	140,8662	1,259569	Partial Fractur	NW	Basamento
10829,97995	12,34039	74,00496	142,4616	1,254206	Partial Fractur	NE	Basamento
10830,22559	177,92	70,18371	141,6982	1,283666	Partial Fractur	SE	Basamento

Tabla 6. Fracturas Parciales del basamento.

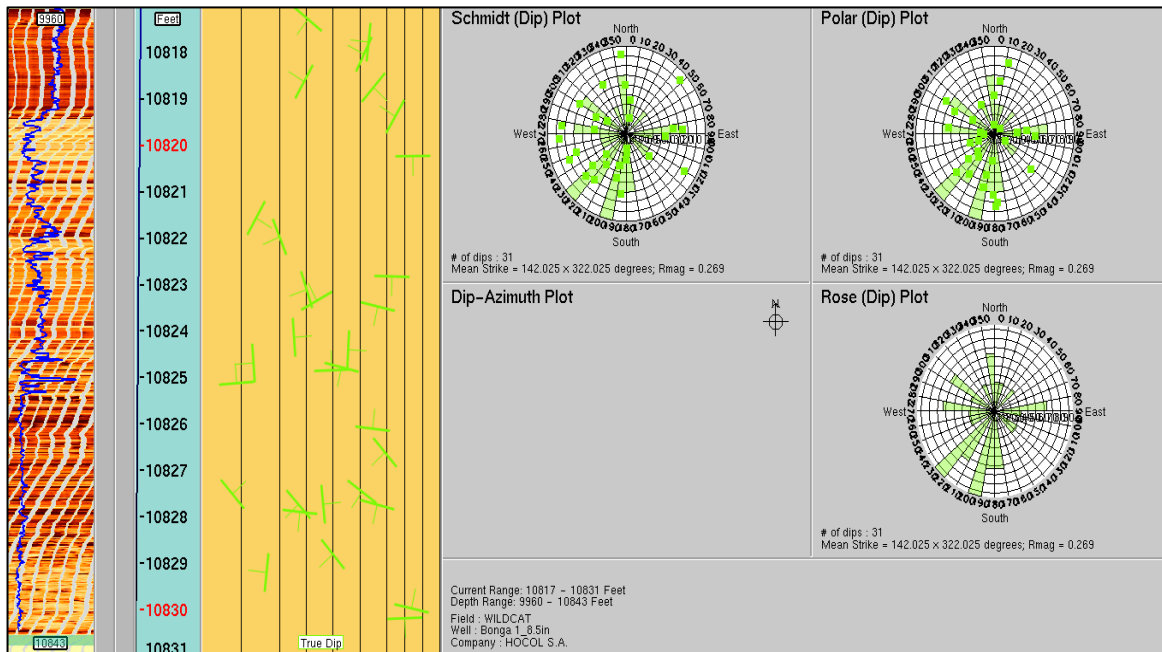


Figura 54. Estadística estructural del basamento, indicando fracturas parciales e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

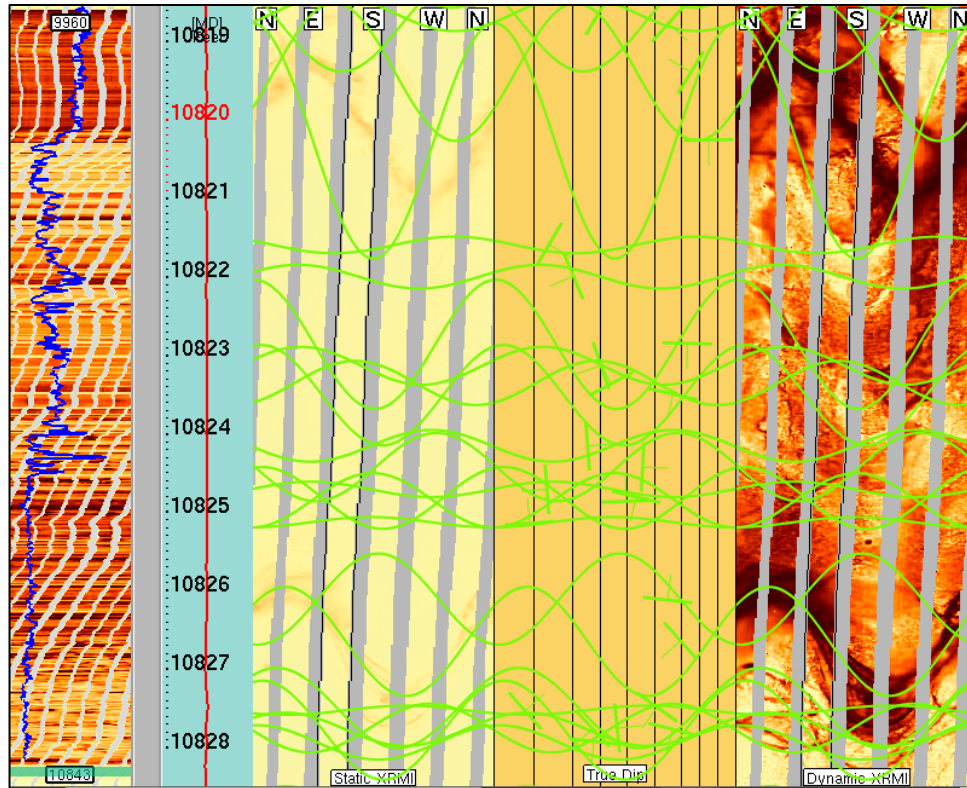


Figura 55. Fracturas Parciales dentro en un intervalo del basamento.

10.1.2.2 Fracturas Conductivas: cómo se puede observar en la Figura 57, 3 fracturas conductivas fueron determinadas en el basamento con un rumbo promedio de 191 grados y orientación preferencial SW.

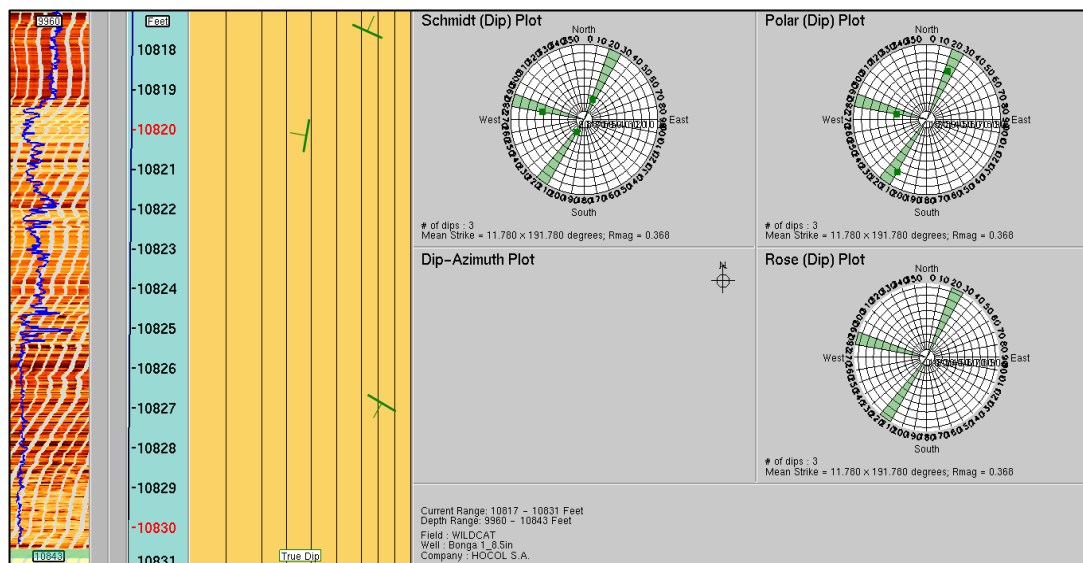


Figura 56. Estadística estructural del basamento, indicando fracturas conductivas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

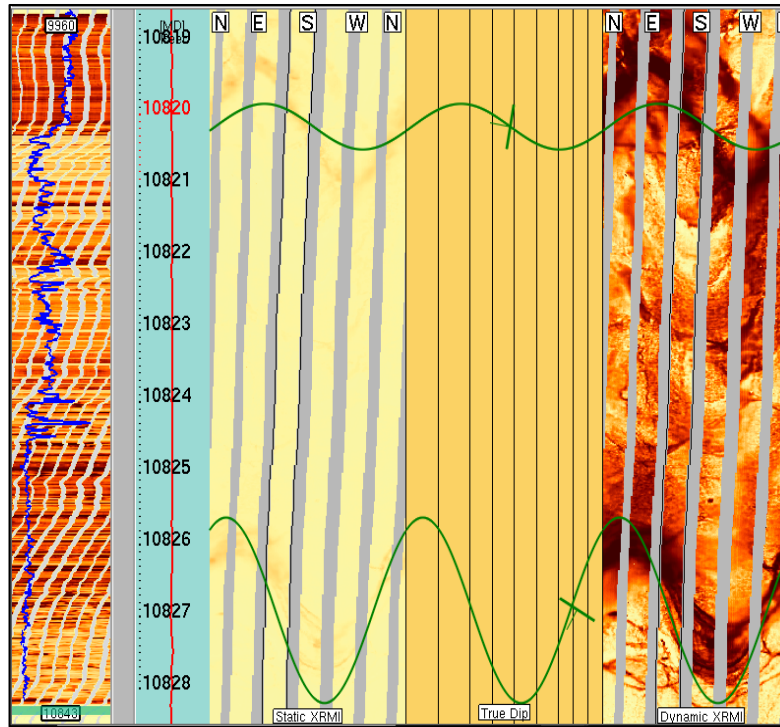


Figura 57. Fracturas conductivas dentro en un intervalo del basamento.

10.1.1.3 Fracturas Resistivas: con rumbo promedio de 293 grados, se establecieron 3 fracturas resistivas con orientación preferencial SE.

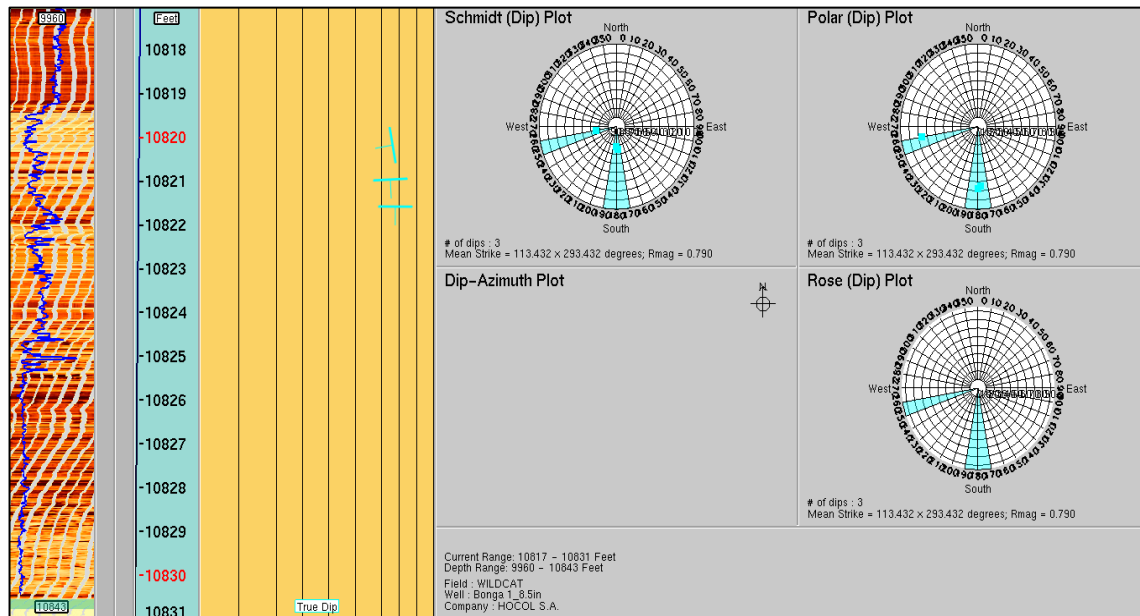


Figura 58. Estadística estructural del basamento, indicando fracturas resistivas e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento.

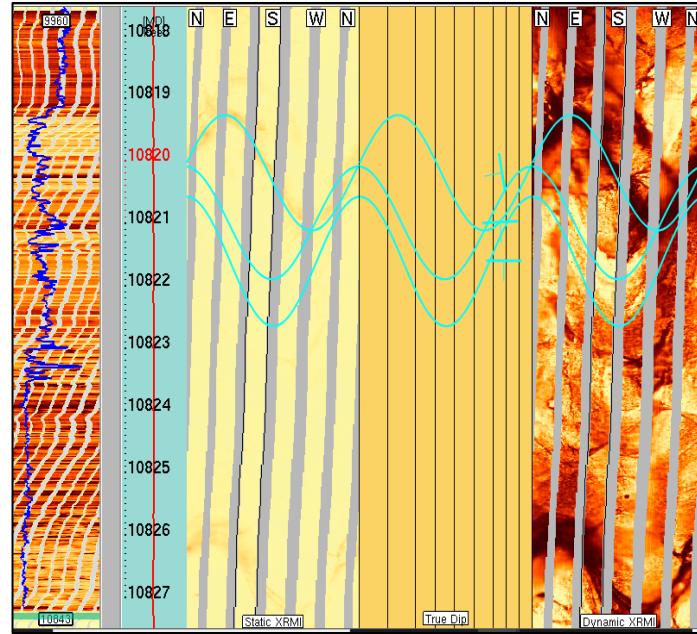


Figura 59. Fracturas resistivas dentro en un intervalo del basamento.

## 10.2 Sedimentológicos

### 10.2.1 Formación Ciénaga de Oro

10.2.1.1 Estratificación cruzada: con una dirección de buzamiento preferencial SW y en menor cantidad NW, fueron determinadas 638 estratificaciones cruzadas en la Formación Ciénaga de Oro, con un rumbo promedio de 204 grados.

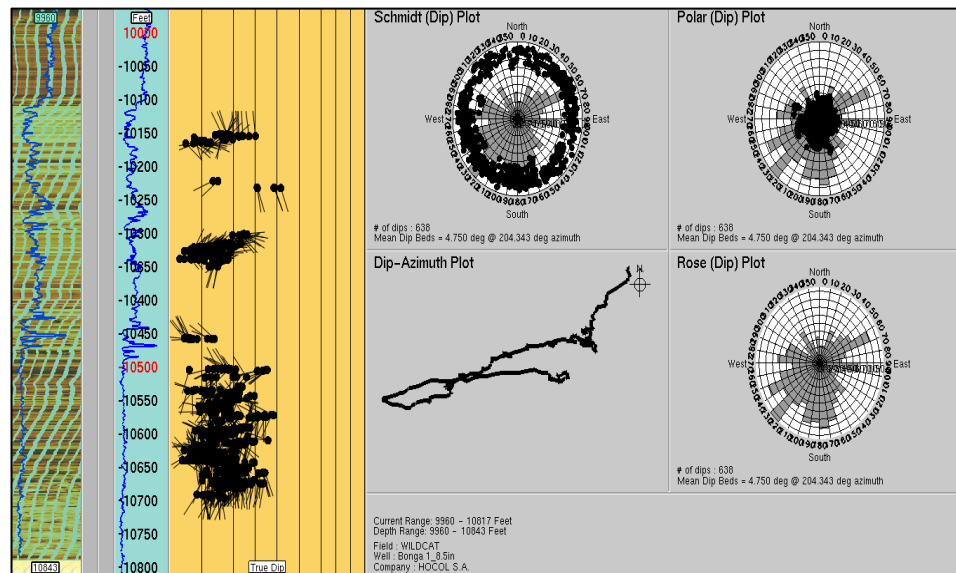


Figura 60. Estadística estratificación cruzada de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas.

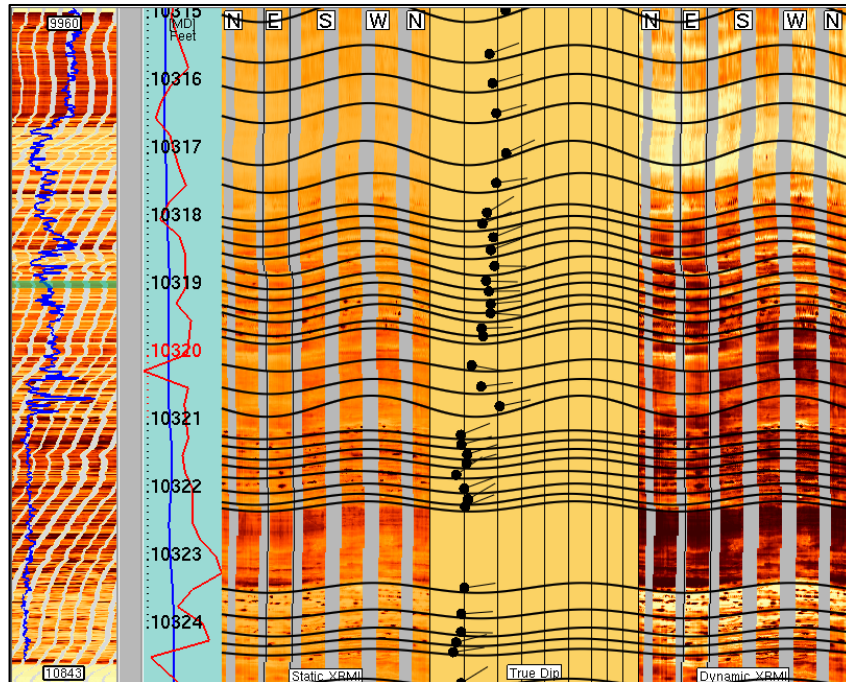


Figura 61. Estratificaciones cruzadas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

10.2.1.2 Superficies de erosión: fueron identificadas 48 superficies de erosión durante el intervalo de la formación Ciénaga de Oro, con azimuth promedio de 195 grados y un buzamiento dominante SW y en menos proporción N.

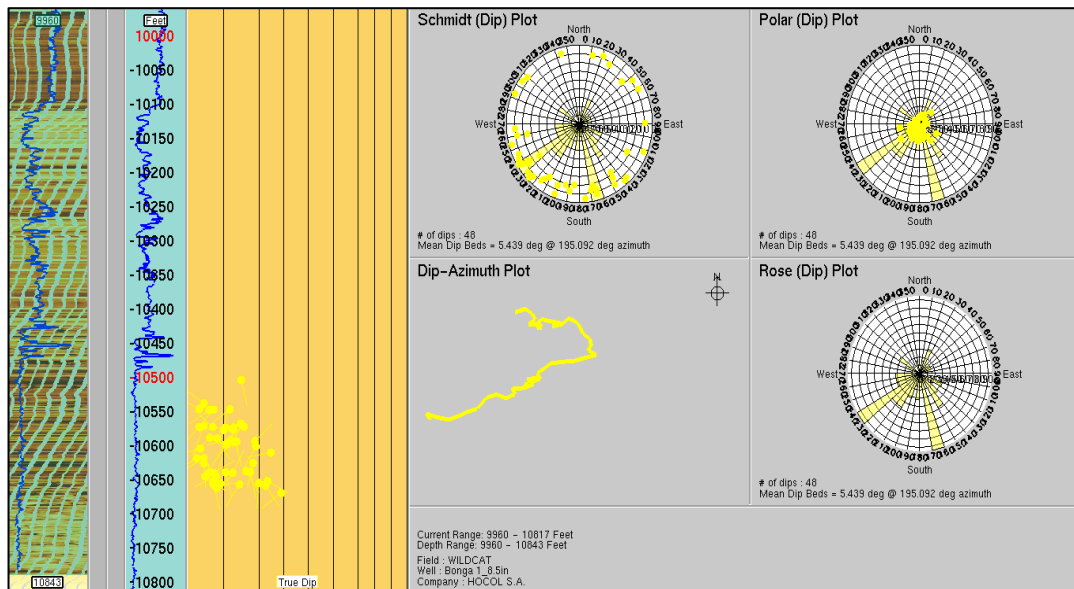


Figura 62. Superficies de erosión de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas.

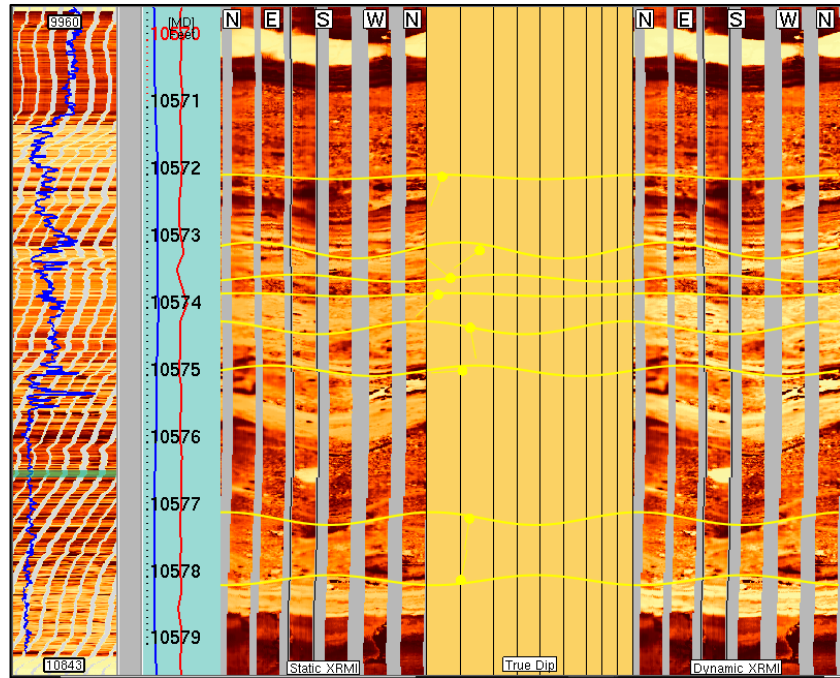


Figura 63. Superficies de erosión dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

Depth Column	True Dip Azimuth	True Dip Mag	Borehole Dip Azimuth	H Inclination	Dip Name	Dip direction	Unidad Litológica
10504,8635	165,7414	14,979	187,8351	0,5548354	Erosional surface	SE	FormacionCO
10505,26953	199,52	6,132664	183,5194	0,5293496	Erosional surface	SW	FormacionCO
10539,1995	304,6489	4,536695	179,5892	0,6017292	Erosional surface	NW	FormacionCO
10546,83425	293,5417	3,335813	187,6682	0,7107284	Erosional surface	NW	FormacionCO
10547,69926	234,0939	11,83785	181,0076	0,6653849	Erosional surface	SW	FormacionCO
10548,64381	223,414	7,240717	181,9383	0,6335531	Erosional surface	SW	FormacionCO
10548,96128	237,2659	6,056801	184,2149	0,6381595	Erosional surface	SW	FormacionCO
10568,91016	200,96	14,86827	175,2501	0,7019514	Erosional surface	SW	FormacionCO
10572,46114	208,4641	37,56441	178,4767	0,5483154	Erosional surface	SW	FormacionCO
10573,20849	191,1183	13,14157	189,9829	0,8966317	Erosional surface	SW	FormacionCO
10573,79688	225,44	3,314021	177,5874	0,6278157	Erosional surface	SW	FormacionCO
10574,28764	169,3378	12,89674	176,5866	0,5086834	Erosional surface	SE	FormacionCO
10574,92945	266,1591	10,61075	180,9841	0,5534183	Erosional surface	SW	FormacionCO
10577,1332	189,103	12,68214	164,6678	0,5067278	Erosional surface	SW	FormacionCO
10578,05033	11,8571	10,07945	160,5595	0,2611638	Erosional surface	NE	FormacionCO
10589,49215	228,5512	6,199664	171,0695	0,5567618	Erosional surface	SW	FormacionCO
10590,2636	147,7988	8,326397	175,3878	0,4743058	Erosional surface	SE	FormacionCO
10593,01986	260,2098	12,15112	162,9898	0,4662096	Erosional surface	SW	FormacionCO
10594,44118	47,33895	18,87912	160,644	0,4700734	Erosional surface	NE	FormacionCO
10595,1199	236,4209	13,72145	155,5528	0,4651631	Erosional surface	SW	FormacionCO
10595,54883	164,521	13,29725	161,3904	0,481753	Erosional surface	SE	FormacionCO
10599,20571	215,8716	10,75384	149,031	0,5548952	Erosional surface	SW	FormacionCO
10602,12891	211,04	19,08481	147,7401	0,5249275	Erosional surface	SW	FormacionCO
10605,0495	254,1062	3,629173	155,7304	0,5412588	Erosional surface	SW	FormacionCO
10605,00195	152	14,97161	150,0845	0,4815322	Erosional surface	SE	FormacionCO
10611,31282	259,9207	24,7253	150,2327	0,5632645	Erosional surface	SW	FormacionCO
10619,39746	238,4	2,494925	149,6288	0,5864359	Erosional surface	SW	FormacionCO
10619,65918	241,28	4,527353	146,556	0,584472	Erosional surface	SW	FormacionCO
10620,19434	139,04	4,536977	153,4373	0,5531841	Erosional surface	SE	FormacionCO
10626,48914	147,0692	12,14961	141,1702	0,6551332	Erosional surface	SE	FormacionCO
10626,99902	175,04	4,52649	144,1346	0,5847269	Erosional surface	SE	FormacionCO
10638,1696	146,4149	16,30278	138,7761	0,6533222	Erosional surface	SE	FormacionCO
10639,60538	167,3421	17,54289	133,216	0,6264672	Erosional surface	SE	FormacionCO
10640,06047	164,4825	10,57249	136,2088	0,6787663	Erosional surface	SE	FormacionCO
10640,78137	119,1282	3,912894	139,3334	0,588451	Erosional surface	SE	FormacionCO
10641,14738	318,0441	5,078603	140,3446	0,6010687	Erosional surface	NW	FormacionCO
10645,57211	245,2864	7,973327	124,05	0,5074187	Erosional surface	SW	FormacionCO
10645,91848	111,8943	4,878734	124,94	0,5089233	Erosional surface	SE	FormacionCO
10652,8982	118,5208	23,38959	130,7104	0,5763261	Erosional surface	SE	FormacionCO
10653,94009	20,937	7,347076	132,5588	0,5676472	Erosional surface	NE	FormacionCO
10655,62016	344,2166	6,976685	132,0921	0,4716718	Erosional surface	NW	FormacionCO
10656,15368	185,2501	19,96496	122,7074	0,5038064	Erosional surface	SW	FormacionCO
10656,8447	89,31665	9,23785	122,4272	0,5176414	Erosional surface	NE	FormacionCO
10657,9253	213,9374	14,4898	116,4185	0,5480404	Erosional surface	SW	FormacionCO
10658,71875	164,96	7,29984	122,2301	0,607413	Erosional surface	SE	FormacionCO
10659,38685	145,0341	22,61687	122,9952	0,5449787	Erosional surface	SE	FormacionCO
10663,3096	52,61642	8,184958	124,2585	0,5287761	Erosional surface	NE	FormacionCO
10670,28597	233,5792	28,94391	119,0359	0,4859502	Erosional surface	SW	FormacionCO

Tabla 7. Superficies de erosión de la Formación Ciénaga de Oro.

10.2.1.3 Laminaciones: se establecieron 433 laminaciones, con buzamiento preferencial SW y en menos proporción SE, con un azimut promedio de 212 grados.

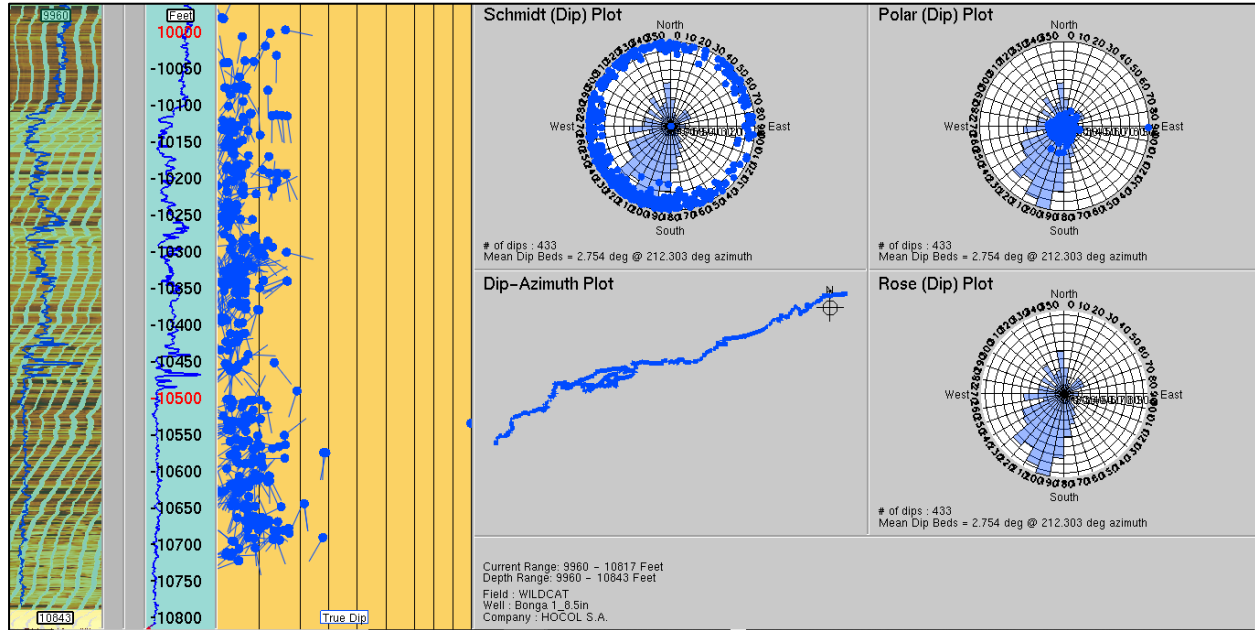


Figura 64. Laminaciones de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas.

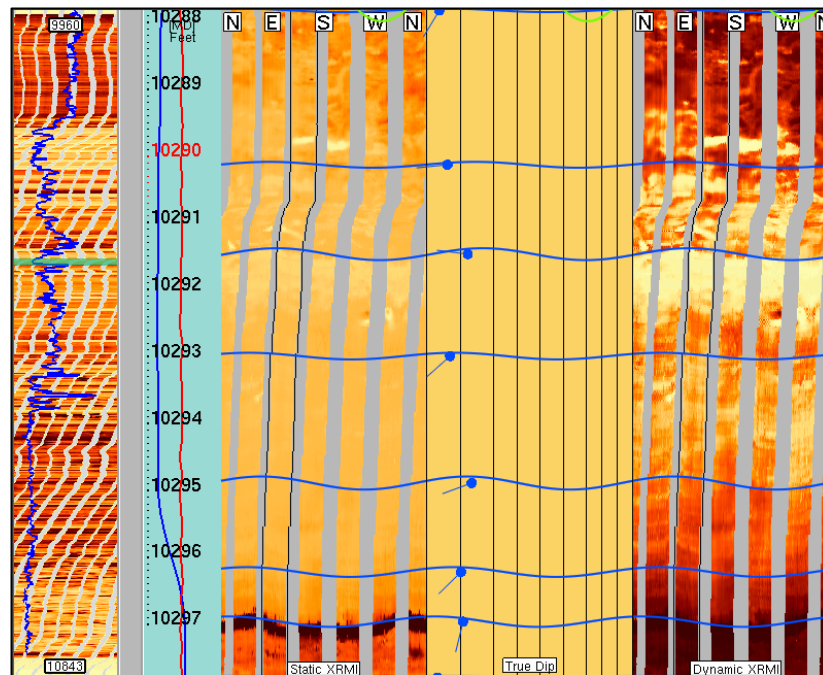


Figura 65. Laminaciones dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

10.2.1.4 Laminaciones plano-paralelas: fueron determinadas 245 laminaciones plano-paralelas, con un azimuth promedio de 52 grados y con una dirección preferencial de buzamiento NE.

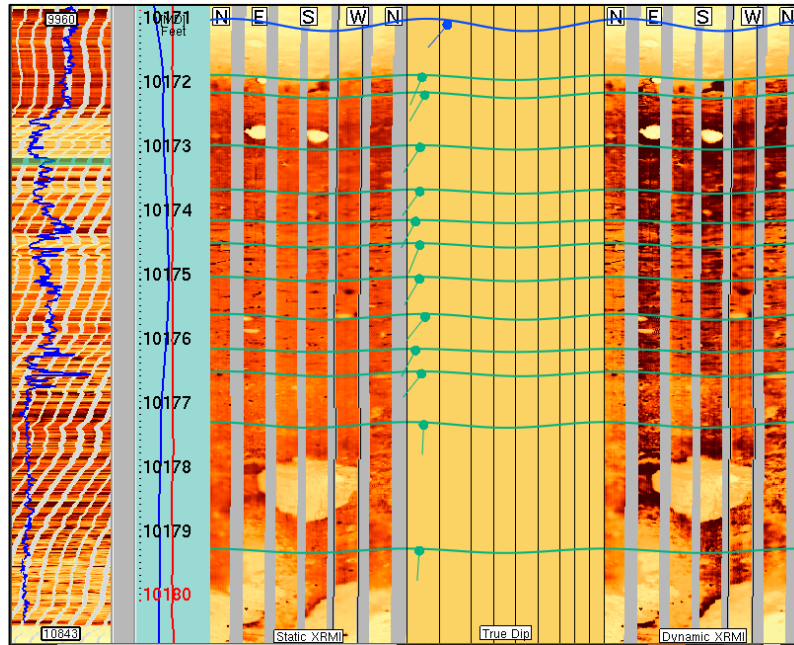


Figura 66. Laminaciones plano-paralelas dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro

10.2.1.5 Discordancia: fue identificada 1 discordancia, a los 10808,33 pies de profundidad, correspondiente al intervalo de la Ciénaga de Oro, con un rumbo de 176 grados y un buzamiento SE.

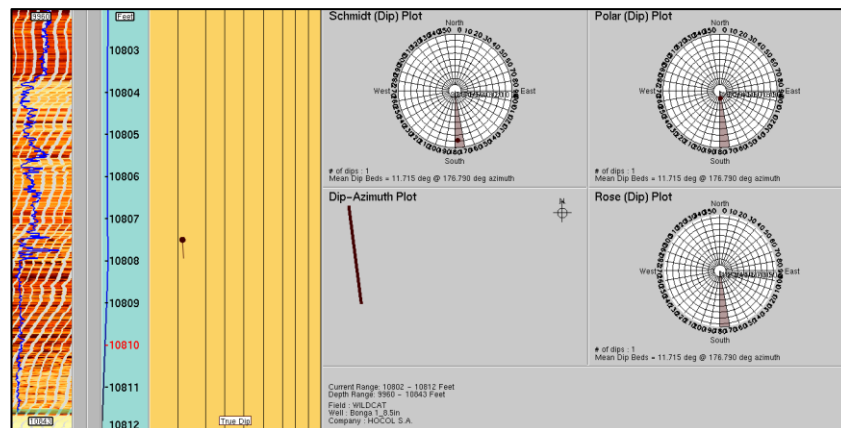


Figura 67. Discordancia de la Formación Ciénaga de Oro e identificación de patrones de buzamiento y diagrama de rosas mostrando dirección preferencial de buzamiento de las capas.

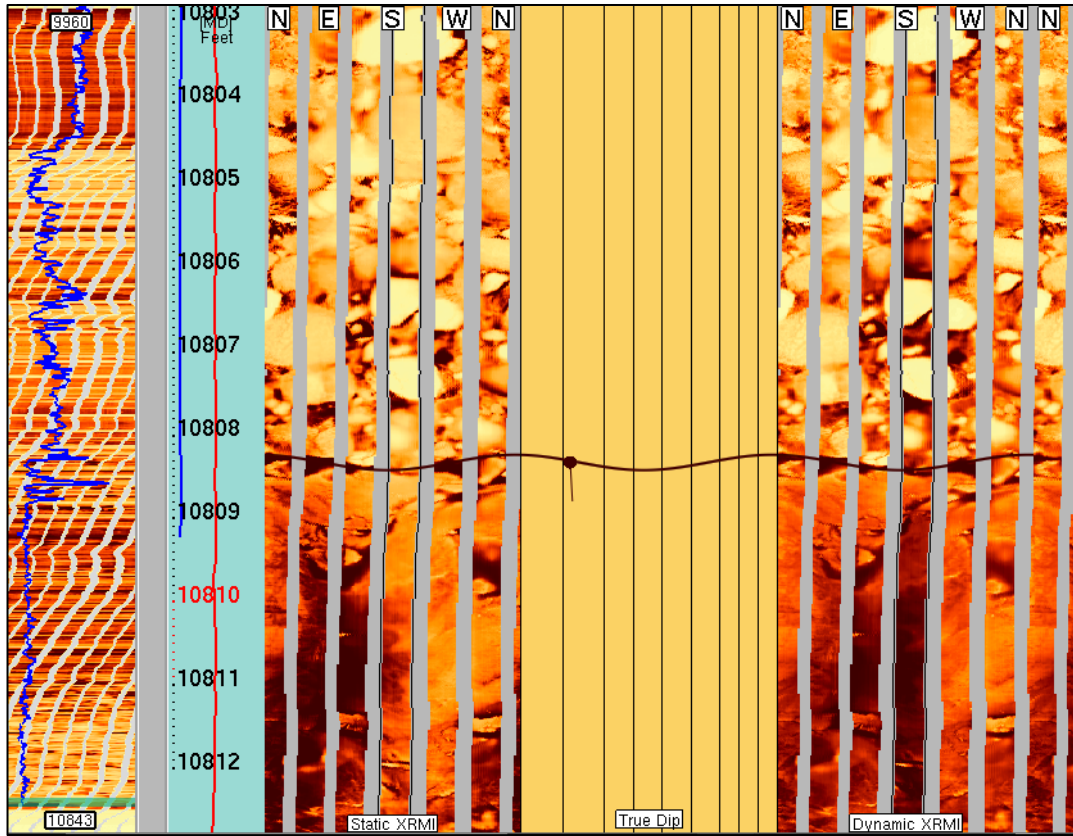


Figura 68. Discordancia dentro en un intervalo de la Fm Ciénaga de Oro.

## 11. Análisis de resultados

Con base en el análisis de las imágenes, se propone definir el tope del basamento ígneo a la profundidad de 10817' MD y el tope de la Fm Ciénaga de Oro (zona de interés) a 9969' MD.

### 11.1 Estructurales:

- Se interpretaron un total de 5 fallas a lo largo de los dos intervalos registrados con imágenes en este pozo. En 3 de estas fallas, las cuales ocurren en el intervalo de 10541,76' a 10552,86' no se observan cambios estructurales asociados a estos eventos, por lo que se interpreta como eventos de desplazamiento corto.
- Las fracturas naturales ocurren de manera sistemática en el basamento ígneo, en el conglomerado basal y en algunos niveles calcáreos de la Fm Ciénaga de Oro. En estos intervalos la densidad de fracturas moderada a alta; en el resto de la secuencia la densidad de fracturas es baja, siendo virtualmente nula en algunos intervalos. Las fracturas en la mayoría de los casos muestran bajo contraste de resistividad y trazo discontinuo de la sinusoide, por lo que se clasificaron en su mayoría como fracturas parciales. Las fracturas en el conglomerado basal se interpretan en su mayoría asociadas a los procesos de meteorización esferoidal observados en este intervalo. La mayoría de las fracturas en los niveles calcáreos muestran una orientación aleatoria y parecen estar asociadas a procesos de diagénesis calcárea. Las fracturas tectónicas por su parte muestran una tendencia preferencial en la orientación de las con rumbo SE-NW y direcciones de buzamiento tanto al NE como al SW.
- La fractura inducida se restringe a un evento aislado encontrado a 10237' respectivamente. Este evento muestra un rumbo promedio de 259 grados en azimut e indican de manera aproximada la dirección del máximo esfuerzo horizontal. Se observan breakouts bien definidos en diferentes niveles limoarenosos entre 10445' y 10540' MD; estos tienen una dirección promedio de 225 grados.

## 11.2 Sedimentológicos:

- Intervalo de 10817' a 10678': sobre el basamento ígneo reposa discordantemente un conglomerado basal compuesto por clastos y bloques de hasta 40 cm de diámetro provenientes del basamento ígneo infrayacente. Este conglomerado es clastosoportado hacia la base, la matriz contiene alto porcentaje de minerales arcillosos, clastos finos y probablemente arena. Los clastos no presentan imbricaciones, son redondeados a subredondeados y subesféricos y muchos de estos muestran un alto grado de meteorización esferoidal y un alto grado de fracturamiento. De la parte media hacia el tope se observan intervalos de matriz soportados. Aproximadamente a los 10724' el conglomerado comienza a mostrar variaciones texturales e intercalaciones de arenitas delgadas, limolitas y arcillolitas; algunos de los niveles arenosos presentan estratificación cruzada en artesa. La relación de arenas-limos/conglomerados aumenta gradualmente a partir de 10724' hasta 10678', profundidad a la cual terminan los bloques grandes.
- El intervalo de 10678' a 10650.5': corresponde a secuencias de arenas conglomeráticas con matriz limo-arcillosa en capas de dos a tres pies de espesor con marcada tendencia granodecreciente, pasando a arenitas de grano fino y limolitas. Estratificación cruzada es la estructura dominante.
- De 10650.5' a 10496': se presentan intercalaciones de arenas limosas, en ocasiones ligeramente conglomeráticas, con estratificación cruzada, con conglomerados finos con matriz de limo y arena que muestran estratificación cruzada de poco desarrollo y de bajo ángulo. Con frecuencia se interponen entre las capas arenosas y conglomeráticas, paquetes de arenitas más limpias con estratificación cruzada bipolar, y en ocasiones se presentan cadenas de lentes arenosos finos dentro de las arenitas arcillosas. De 10529' hasta 10496' predominan arenas arcillosas y limosas masivas en capas muy gruesas, con intercalaciones esporádicas de capas delgadas de arenitas con estratificación cruzada en artesa y planar, algunas de estas con intraclastos arcillosos en la base; el paquete más superior tiene apariencia de contener laminaciones de carbón y pirita diseminada.
- De 10496' a 10440,2': se define una secuencia heterolítica compuesta por arenitas de grano fino con intercalaciones de limolitas, arcillolitas, posibles niveles de margas y tres capas delgadas de carbón a 10441', 10454.5' y 10464'. En este intervalo predomina la estratificación plana-paralela y masiva; con menor frecuencia ocurren laminaciones

lenticulares y cruzadas de ángulo bajo. También se observa esporádicamente niveles con intraclastos arcillosos lo mismo que pirita diseminada.

- El intervalo de 10440,2' a 10355,5': corresponde a una secuencia compuesta por intercalaciones de limolitas arenosas, margas y calcarenitas; hacia la parte inferior predomina la estratificación masiva y gradacional, y hacia la parte superior laminación plana paralela poco desarrollada. Se observan con frecuencia nódulos calcáreos pequeños a lo largo de todo el intervalo y pirita diseminada hacia el tope.
- De 10355,5' hasta 10281,8': se define una secuencia granocreciente que comienza hacia la base con arenitas limosas masivas intercaladas con arenitas calcáreas; estas son suprayacidas por secuencias de arenitas de grano fino con estratificación interna principalmente cruzada planar de ángulo bajo y en menor proporción laminación plana paralela. Se observa con frecuencia laminaciones lenticulares y pirita diseminada abundante; estas arenitas muestran una dirección constante de paleocorrientes hacia el NE. Hacia la parte superior se interponen dos paquetes gruesos de arenas limpias con estratificación cruzada planar bien desarrollada, las cuales están separadas por un paquete de arenitas arcillosas laminadas.
- De 10281,8' a 10116': corresponde a una secuencia granocreciente que inicia con un paquete de limolita arenosa, seguida por intercalaciones rítmicas de calcarenitas, margas, arenitas de grano fino con laminación plana paralela y lenticular. Son comunes los nódulos calcáreos pequeños y con menor frecuencia de pirita. Los 20 pies superiores corresponden calizas arenosas y limolitas calcáreas que muestran textura vugular y rasgos de disolución bien desarrollados en algunos niveles.
- El intervalo de 10116' hasta el tope, se interpreta como una secuencia de dominio limoso, que puede variar de limolita arenosa a arcillolita, con algún contenido de materiales calcáreos y con frecuentes intercalaciones de margas y arenitas calcáreas en capas delgadas y masivas. Estratificación masiva y gradacional se presenta a lo largo de todo el intervalo.
- A lo largo de todo el intervalo de la Formación Ciénaga de Oro se presenta con frecuencia nódulos de pirita. El contacto con la unidad infrayacente es neto.

### 11.3 Descripción e interpretación de facies

Las litofacies fueron definidas en función de sus características litológicas distintivas, que incluían composición, tamaño de grano y estructuras sedimentarias, a continuación, se muestran las facies, junto con las asociaciones de facies y los ambientes que fueron identificados por medio de las imágenes microresistivas (Gómez, 2009).

Cada una de las facies descritas en este reporte es representada por una letra (Tabla 9). Un total de 13 facies fueron identificadas en el intervalo de la Fm Ciénaga de Oro (Figura 71 y 72).



*Tabla 8. Facies establecidas para la formación Ciénaga de Oro.*



Figura 69. Columna estratigráfica con las respectivas facies establecidas para la Formación Ciénaga de Oro (tope-10350 pies). Modificada de (Presentación Interna, Hocol)



Figura 70. Columna estratigráfica con las respectivas facies establecidas para la Formación Ciénaga de Oro (10350 pies-base). Modificada de (Presentación Interna, Hocol)

#### 11.4 Ambientes de acumulación.

Para Nichols (2019), las características de un medio ambiente están determinadas por la combinación de procesos que ocurren allí. Una laguna, por ejemplo, es un área de poca energía, agua poco profunda con afluencias periódicas de arena del mar, y es un nicho ecológico específico donde solo viven ciertos organismos debido a la salinidad aumentada o reducida. Las facies producidas por estos procesos serán lodos depositados en agua estancada, arenas con ondas

formadas por el viento sobre aguas poco profundas y una biofacies de fauna restringida. Estas diferentes facies forman una asociación de facies que refleja el entorno de deposición, es decir las facies se agrupan en asociaciones de facies que reflejan combinaciones de procesos y, por lo tanto, entornos de deposición. La figura 73, muestra un resumen de todos los ambientes deposicionales que pueden encontrarse a nivel general en cualquier zona.

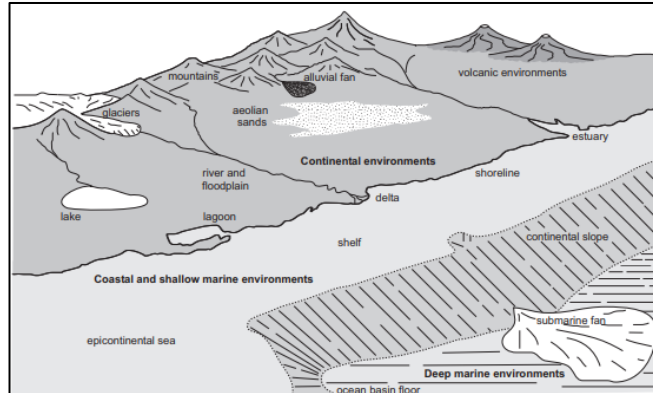


Figura 71. Resumen de los principales ambientes sedimentarios. Tomada de (Nichols, 2009).

Para una correcta definición de ambientes deposicionales, se debe tener en cuenta las principales características de dichos ambientes:

#### 11.4.1 Ambiente Aluviales (abanico aluvial y llanura aluvial)

Las principales características de los ambientes fluviales son:

- Los depósitos de abanico aluvial (Figura 74) están ubicados cerca de los márgenes de las cuencas sedimentarias y están limitados en extensión lateral a unos pocos kilómetros del margen (Nichols, 2009).

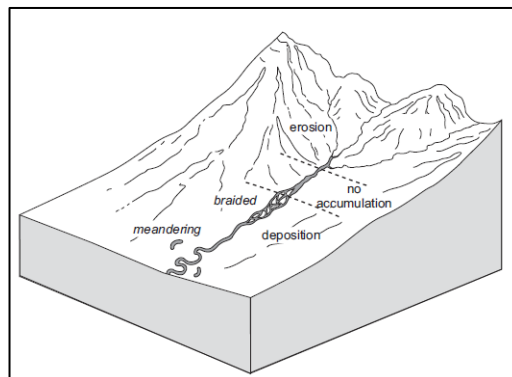


Figura 72. Las zonas geomorfológicas en sistemas aluviales y fluviales: en general, los ríos trezados tienden a ocurrir en áreas más proximales y los ríos serpenteantes ocurren más abajo. Tomada de (Nichols, 2009).

- Las facies son predominantemente conglomerados y pueden incluir capas con soporte de matriz depositadas por flujos de escombros, gravas bien estratificadas y arenas depositadas por procesos de inundación en canales que migran lateralmente a través de la superficie del abanico (Nichols, 2009). La sedimentación dentro de los ríos trenzados se da en la porción proximal con los modelos tipo Scott y Donjek y en la planicie distal con las secuencias tipo Platte y Bijou Creek (Figura 75 y 76) (Gómez, 2009). El modelo Scott muestra un conglomerado basal no cíclico, Donjek consta de conglomerados y areniscas que muestran una forma aproximada de cíclico, mientras que Platte se compone de arenisca con conjuntos apilados de lechos cruzados y Bijou Creek está compuesto por depósitos de láminas de inundación superpuestas horizontalmente estratificadas (Cant, 1982).

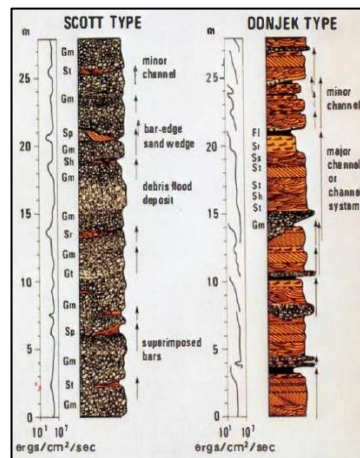


Figura 73. Modelos de Miall (1977) de sedimentos fluviales trenzados. Modelo tipo Scott y tipo Donjek. Tomada de (Cant, 1982).

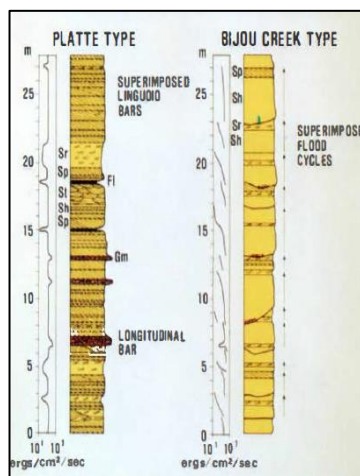


Figura 74. Modelos de Miall (1977) de sedimentos fluviales trenzados: Modelo tipo Platte y tipo Bijou Creek. Tomada de (Cant, 1982).

- Los depósitos aluviales (Figura 77) generalmente coincidirán con las facies lacustres y / o eólicas, dependiendo del paleoclima, y muchos (pero no todos) (Nichols, 2009). Las facies L y K son las que exhiben las características de dicho ambiente.

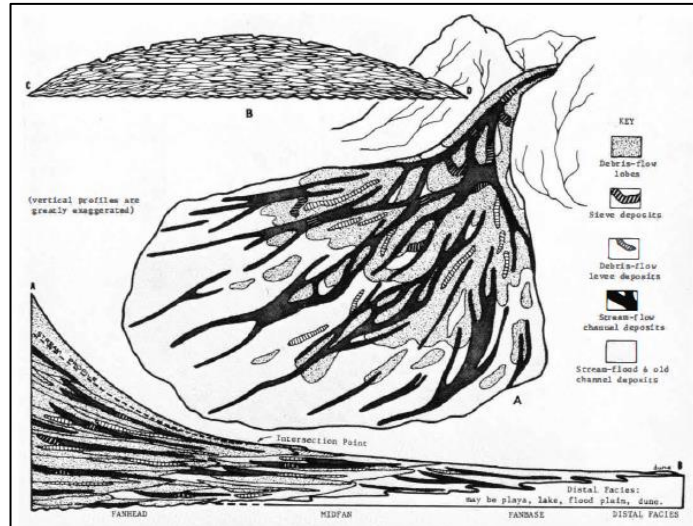


Figura 75. Geometría general de un abanico aluvial. Tomada de (Nilsen, 1985).

- Ausencia de fauna marina, la presencia de fósiles de plantas terrestres, rastros de fósiles y perfiles de paleosuelos en depósitos de llanuras aluviales (Nichols, 2009).
- Estructuras sedimentarias: estratificación y laminación en depósitos de canales (Nichols, 2009).
- Asociaciones de facies: los depósitos de abanico aluvial pueden estar asociados con lagos efímeros y dunas eólicas, los ríos pueden estar asociados con facies de lagos, deltas o estuarios (Nichols, 2009).
- Existen 3 tipos de abanicos aluviales: por canales dominados por flujo de detritos o escombros, por inundaciones y por canales de corriente, pero hay que tener en cuenta que pueden producirse mezclas de estos procesos en un solo abanico (Figura 78 y 79) (Nichols, 2009).

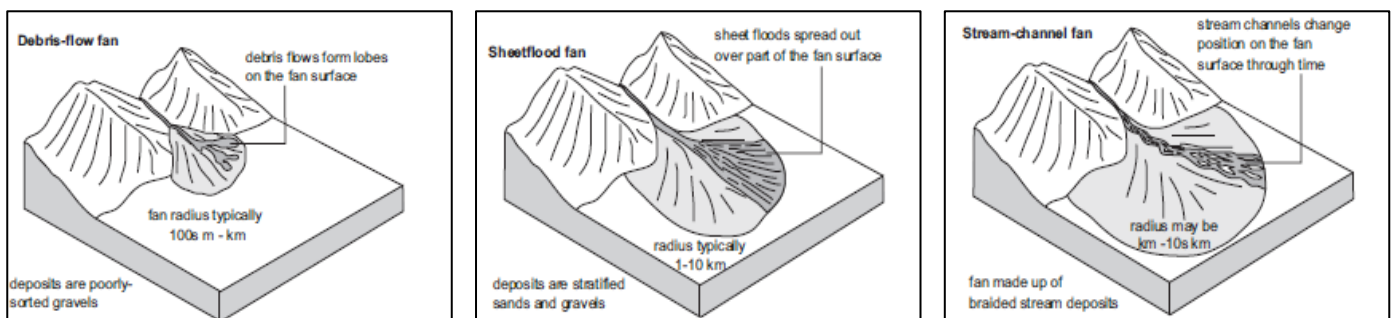


Figura 76. Tipos de abanico aluvial: canales dominados por flujo de escombros, por inundaciones y por canales de corriente; Tomada de (Nichols, 2009).

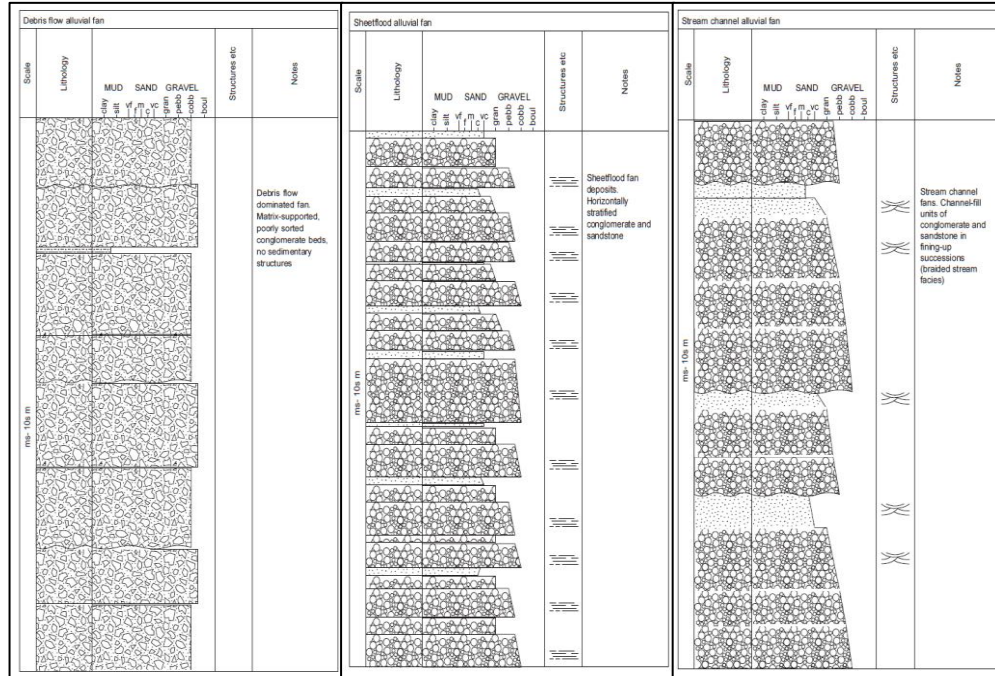


Figura 77. Registros sedimentarios esquemáticos a través de depósitos de abanico aluvial de flujo de detritos, inundaciones y canales de corrientes. Tomada de (Nichols, 2009).

Mientras que para llanuras aluviales, las cuales son mas cercanas a la zonas marinas, pueden tener litologías de tamaño de grano mas finas (Tucker, 2003). Es así como los ríos trenzados en estas áreas pueden tener la siguiente estructura:

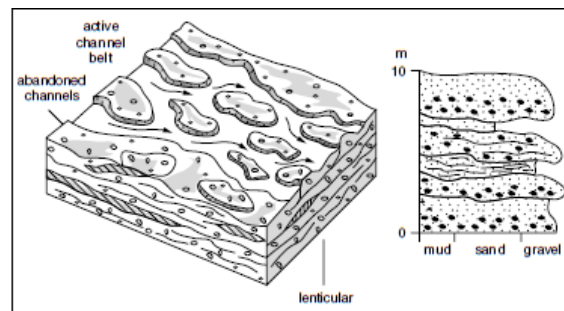


Figura 78. Modelo de facies para el ambiente de corriente trenzada y sucesión típica que consta de conglomerados clasificados lenticulares y areniscas gruesa. Tomada de (Tucker, 2003). Este ambiente es característico de las facies M, L y K.

#### 11.4.2 Ambiente de deposición de llanura mareal

Según Monico (2016), las principales características de las llanuras mareales son:

- Superficies de baja pendiente localizadas en la zona de influencia directa de las corrientes mareales, entre la pleamar y la bajamar, mejor desarrolladas en zonas macrotidales con

estabilidad relativa del nivel del mar. Pueden aparecer como medio sedimentario propio en costas abiertas, cuando la actuación del oleaje es mínima, o como submedio asociado a otros medios sedimentarios. Su potencial de preservación es máximo tras aumentos rápidos del nivel del mar.

- En regiones de clima templado, son sistemas predominantemente terrígenos, mientras que en las zonas de latitudes bajas y de poco aporte terrígeno, se generan llanuras de marea carbonatadas.
- Generalmente, presentan una transición de facies desde arenosas a facies fangosas en la porción más interna o continental (relación inversa a otros medios). Se ve frecuentemente interrumpida por canales perpendiculares a la costa (llegando a ser meandriformes), que canalizan las corrientes de flujo y refluo marea, por lo que están permanentemente sumergidos.
- Se distinguen tres zonas (Figura 81) : zona submareal que se encuentra por debajo del nivel medio de la bajamar viva, queda expuesta durante mareas extremas; zona intermareal: se encuentra entre la bajamar viva y la pleamar media de tal modo que está sometida a alternancias de exposición y sumersión, lo que provoca distintos niveles de oxidación-reducción (alternancia de láminas rojizas y negruzcas) y la zona supramareal: se encuentra por encima de la pleamar media de tal modo que únicamente se inunda durante la pleamar viva y temporales.

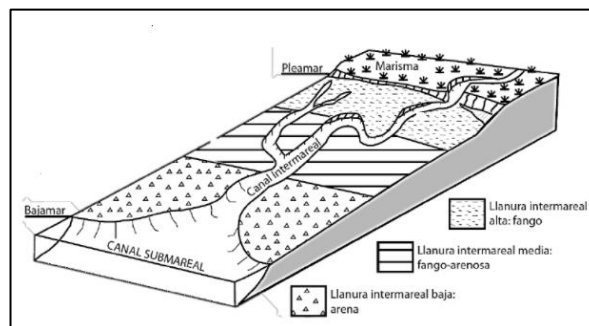


Figura 79. Zonación vertical típica de las llanuras mareales. Tomada de (Morales et al., 2009).

- Tanto la zona intermareal como la supramareal están surcadas por canales de mareas. Existe una gradación vertical y horizontal del tamaño de grano (Figura 82), debido al carácter de las corrientes de mareas, de tal modo que el material más grueso se deposita en dirección a la zona submareal y el material más fino hacia la zona supramareal.

- Otras estructuras características de este ambiente y que aparecen asociadas son lenticular flaser y o ndulosa (proporciones de ambas litologías similares). Pueden presentar grietas de desecación y bioturbaciones que aumentan hacia las zonas más altas.

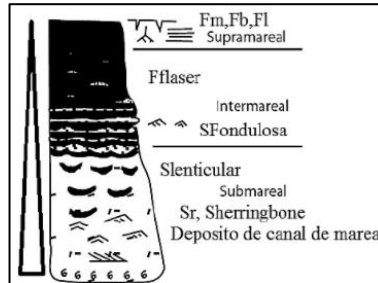


Figura 80. Secuencia estratigráfica de una llanura mareal. Tomada de (Monico, 2016). Este ambiente es característico de la facies K.

#### 11.4.3 Ambientes deltaicos

Tucker (2003), caracteriza a los deltas de la siguiente forma:

- Deposición: compleja; existen varios tipos de delta (especialmente lobulados y alargados) y muchos subambientes deltaicos (canales y diques distributarios, pantanos y lagos, desembocadura y barras distales, bahías interdistributarias y talud prodelta). En la Figura 83 se exhiben dos sucesiones típicas, siendo (a) unidad de engrosamiento hacia arriba producida por progradación delta durante un estancamiento al nivel del mar y cubierta por carbón y (b) unidad cortada por un canal distributivo de arenisca.

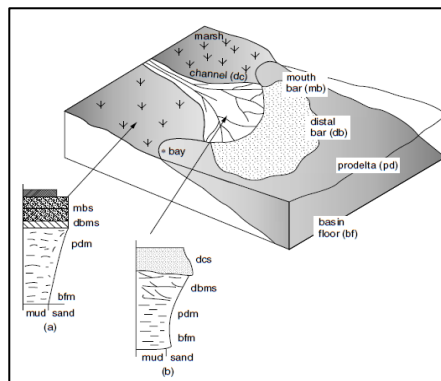


Figura 81. Modelo de facies para el medio marino deltaico. Tomada de (Tucker, 2003).

- Litologías: principalmente areniscas (de composición inmadura a madura, comúnmente líticas) a través de areniscas fangosas, de lodos arenosos a lodosos; también vetas de carbón.

- Estructuras: estratos cruzados de varios tipos en las areniscas, los sedimentos más finos muestran lechos intermitentes y ondulados y son heterolíticos. Algunos sedimentos contienen bioturbación y rastros de fósiles comunes.
- Fósiles: fósiles marinos en algunas rocas de barro y areniscas, otros con fósiles no marinos, especialmente bivalvos.

La carga suspendida del río ingresa al agua relativamente quieta del lago o del mar para formar una columna de sedimentos frente al delta. El agua dulce del río con una carga suspendida puede tener una densidad más baja que el agua de mar salina y la columna de partículas finas en suspensión flotará y se extenderá lejos de la desembocadura del río. A medida que se produce la mezcla, se produce la deposición fuera de la suspensión, con las partículas más finas y más flotantes viajando más lejos del frente delta antes de depositarse en la región del prodelta. Las corrientes de gravedad también pueden llevar sedimentos más gruesos por el frente delta y depositar material en forma de turbiditas (Figura 84 ) (Nichols, 2009).

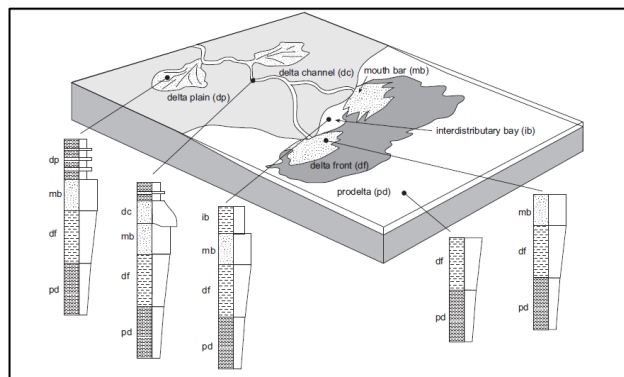


Figura 82. Ciclos delta: la sucesión de facies conservada depende de la ubicación del perfil vertical en relación con el lóbulo deposicional de un delta. Tomada de (Nichols, 2009).

La definición de delta incluye el concepto de progradación, es decir, la deposición da como resultado que el cuerpo de sedimentos se acumule en el lago o el mar. Por lo tanto, la sucesión sedimentaria formada consistirá en facies progresivamente menos profundas a medida que el prodelta esté cubierto por el frente del delta. La sucesión formada por la progradación de un delta, por lo tanto, tiene un patrón de hundimiento, una serie de estratos que muestra de manera consistente evidencia de que los lechos más jóvenes se depositan en aguas menos profundas que los lechos más viejos. En el subambiente del frente del delta, las facies de agua más profundas,

los depósitos de prodelta, son los de grano más fino ya que se depositan en la configuración de energía más baja. En una sucesión poco profunda, estarán cubiertos por sedimentos de la pendiente del delta, que tenderán a ser un poco más gruesos (Figura 85), y las facies menos profundas serán las de las barras de boca, que suelen ser sedimentos arenosos o incluso gravosos. Los lechos formados por la progradación delta mostrarán por tanto un patrón de engrosamiento (Nichols, 2009).

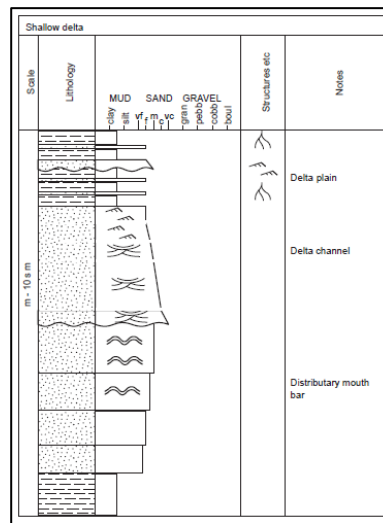


Figura 83. Registro sedimentario esquemático de un delta arenoso prograding en aguas poco profundas. Tomada de (Nichols, 2009). Las facies C, D, E, F, G, H, I y J hacen parte de este ambiente.

#### 11.4.4 Ambiente deposicional de plataforma carbonatada mixta

Según Nichols (2009) este ambiente presenta un registro estratigráfico en el que existen muchas sucesiones que consisten en mezclas de calizas, areniscas y lutitas (Figura 86). Estos suelen ocurrir en entornos marinos poco profundos. Los cambios de deposición de carbonato a no carbonato y viceversa son el resultado de variaciones en el suministro de material clástico terrígeno y esto a su vez está determinado por factores tectónicos o climáticos, o fluctuaciones en el nivel del mar. En condiciones más húmedas, el aumento de la escorrentía en la superficie terrestre hace que los ríos transporten más sedimentos, que son ellos mismos más vigorosos y, por lo tanto, entregan más sedimentos a los mares adyacentes. La alternancia de lechos de piedra caliza con lechos de lutita o arenisca puede deberse a fluctuaciones climáticas periódicas de condiciones alternas más secas y más húmedas.

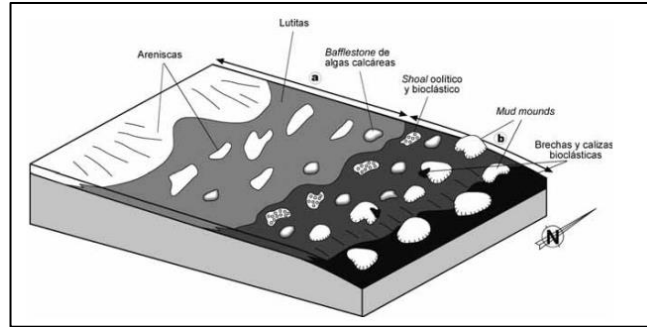


Figura 84. Modelo de plataforma marina mixta. a) Dominio silicioclástico; b) Dominio carbonatado. Tomada de (Corrochano & Barba, 2016). Las facies A, B y C caracterizan este ambiente de acumulación.

Con respecto a la información obtenida del pozo Bonga-1, se estudió cada capa por separado para determinar ambientes deposicionales. Datos como la respuesta del Gamma Ray, dips estructurales, estratos cruzados, modelos de ambientes deposicionales (ya descritos) se estudiaron para determinar las direcciones de acumulación, obteniendo así 10 asociaciones en total (Tabla 10).



Tabla 9. Asociaciones de facies.

Asociación 1: se interpreta como depósitos de flujos de escombros detritos (Figura 87) . Dado su espesor y características sedimentológicas, debido a su pendiente alta que varía de menos de  $1^\circ$  y  $25^\circ$  ( $0^\circ$  - $6^\circ$ ) este depósito más posiblemente representan facies proximales de abanicos aluviales (Nichols, 2009).

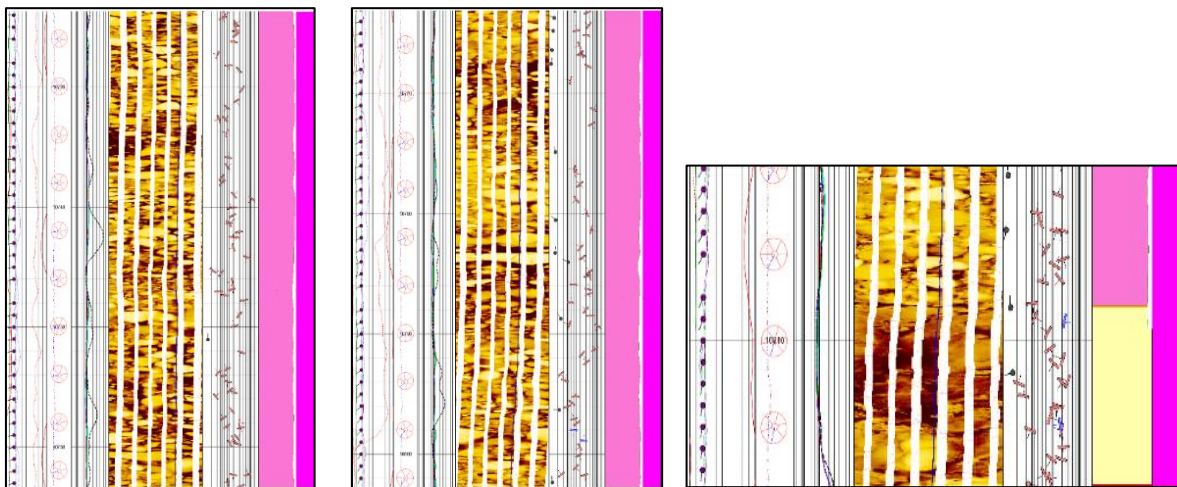


Figura 85. Intervalos correspondientes a la asociación 1 (abanico aluvial).

Asociación 2: se interpreta como depósitos de ríos trenzados de alta energía, conformados por intercalaciones de flujos de escombros y depósitos de barras y canales pequeños (Figura 88) (Cant, 1982).

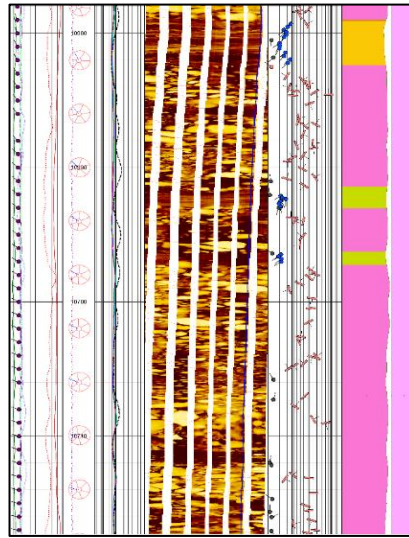


Figura 86. Intervalos correspondientes a la asociación 2 (abanico aluvial).

Asociación 3: esta asociación (Figura 89) se interpreta como una secuencia granodecreciente constituida por depósitos de barras y canales de un sistema aluvial de ríos trenzados, pertenecientes a una llanura aluvial (Tucker, 2003).

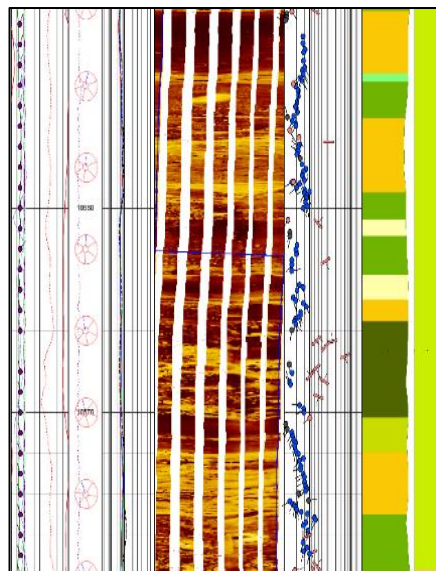


Figura 87. Intervalos correspondientes a la asociación 3 (llanura aluvial).

Asociación 4: se interpreta como depósitos principalmente de canales y barras localizados en la planicie deltaica inferior, cerca del límite de inundación efectiva por mareas (llanura mareal) (Figura 90) (Monico, 2016).

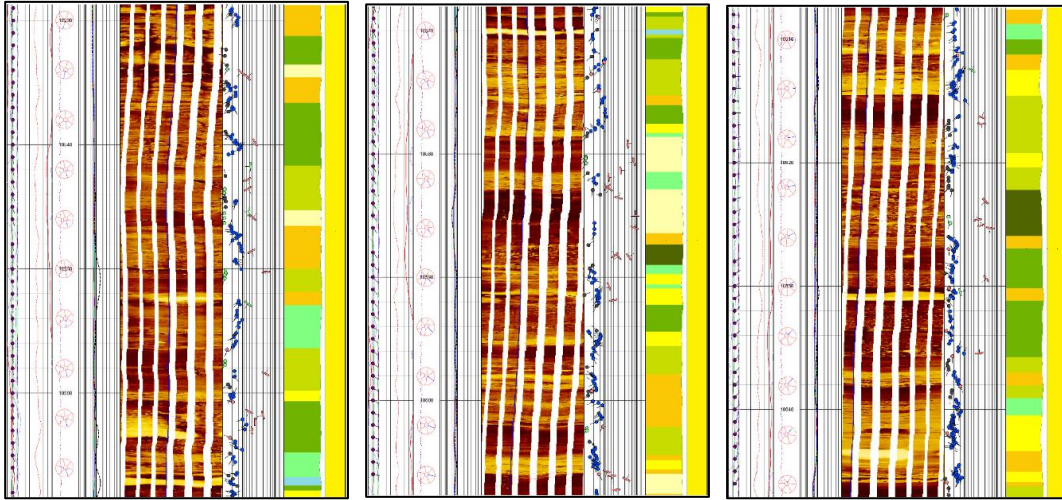


Figura 88. Intervalos correspondientes a la asociación 4 (llanura mareal).

Asociación 5: los sedimentos dentro de esta asociación muestran un ligero carácter granodecreciente (Figura 91) y se interpretan como depósitos de desbordamiento en la planicie deltaica inferior por encima de la zona intermareal (Monico, 2016).

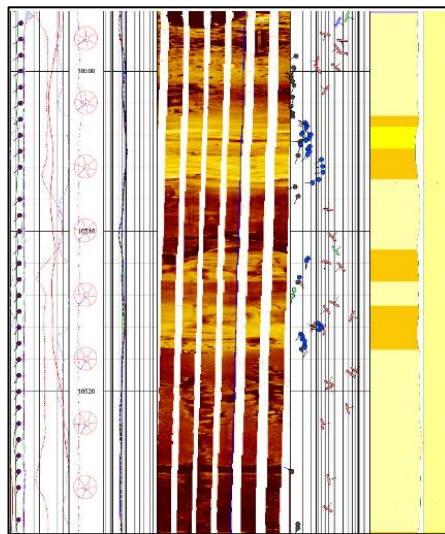


Figura 89. Intervalos correspondientes a la asociación 5 (llanura mareal).

Asociación 6: esta asociación representa depósitos de lagunas y pantanos de isla barrera (Figura 92). Las capas delgadas de carbón ponen de manifiesto la presencia de marismas (Monico, 2016).

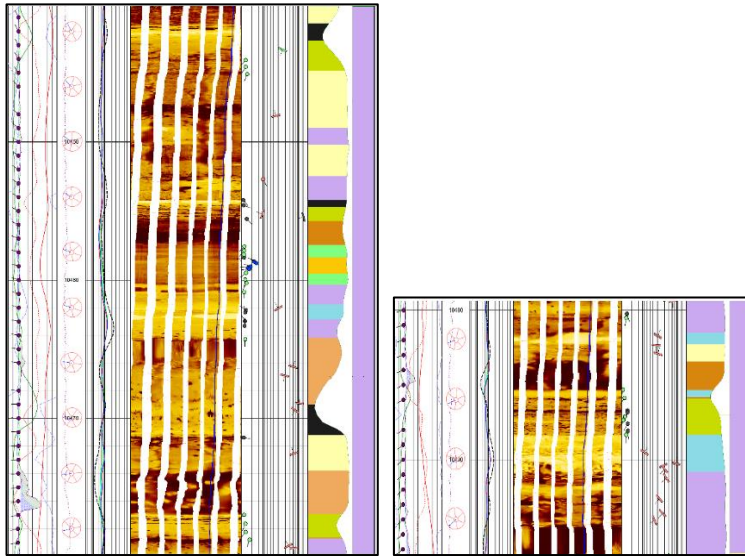


Figura 90. Intervalos correspondientes a la asociación 6.

Asociación 7: esta asociación (Figura 93) es interpretada como depósitos de prodelta (Tucker, 2003).

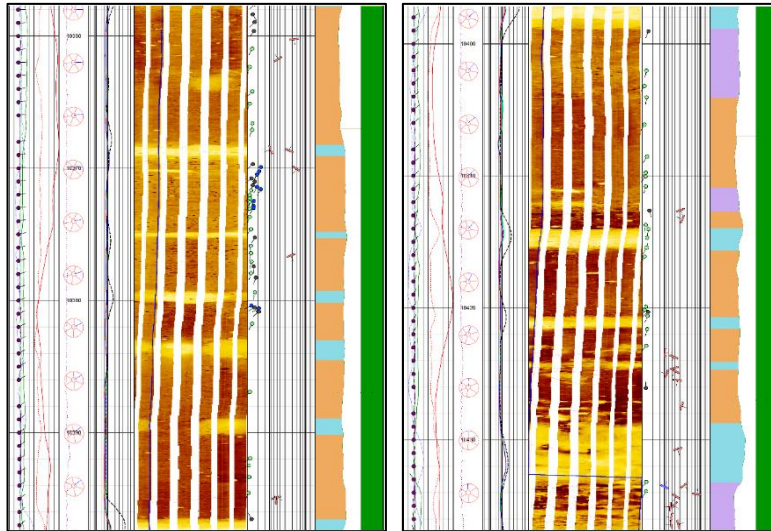


Figura 91. Intervalos correspondientes a la asociación 7 (prodelta).

Asociación 8: se interpreta como barras distales (Figura 94) localizadas en la zona submareal deltaica (Tucker, 2003).

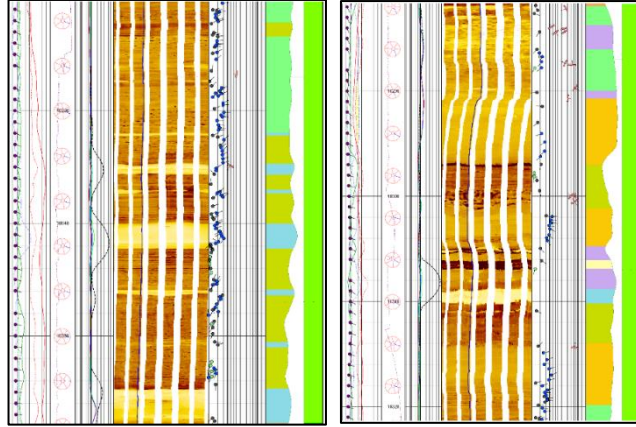


Figura 92. Intervalos correspondientes a la asociación 8 (prodelta).

Asociación 9: Es interpretada como una secuencia granocreciente que comienza con limolitas y arenitas del prodelta (Figura 95) pasando rápidamente a barras distales y canales submareales (Nichols, 2009).

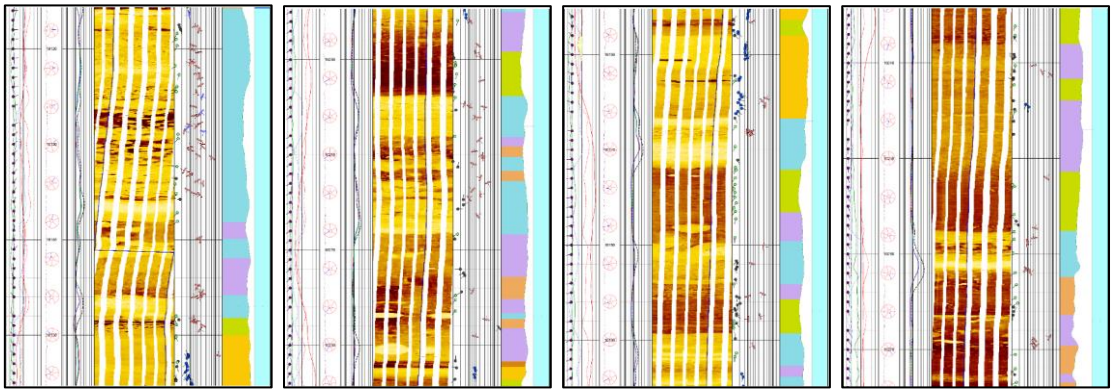


Figura 93. Intervalos correspondientes a la asociación 9 (prodelta).

Asociación 10: corresponde a limolitas y shales de plataforma somera mixta terrígena –calcárea (Figura 96) (Nichols, 2009).

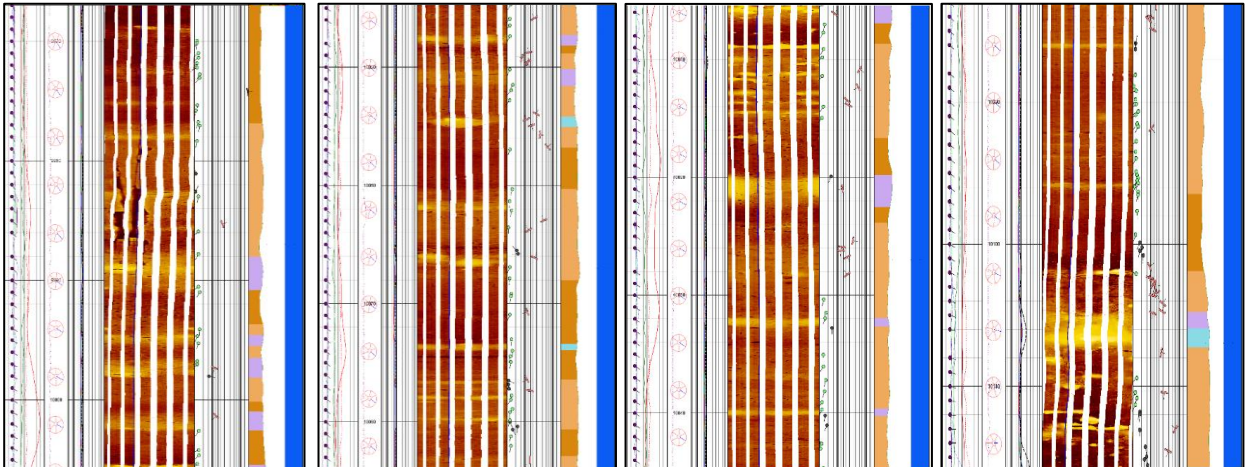


Figura 94. Intervalos correspondientes a la asociación 10 (plataforma mixta terrígena –calcárea).

Las Figuras 97 y 98 resumen el análisis de facies y la interpretación de los ambientes de acumulación del pozo Bonga-1, correspondiente a la Formación Ciénaga de Oro.

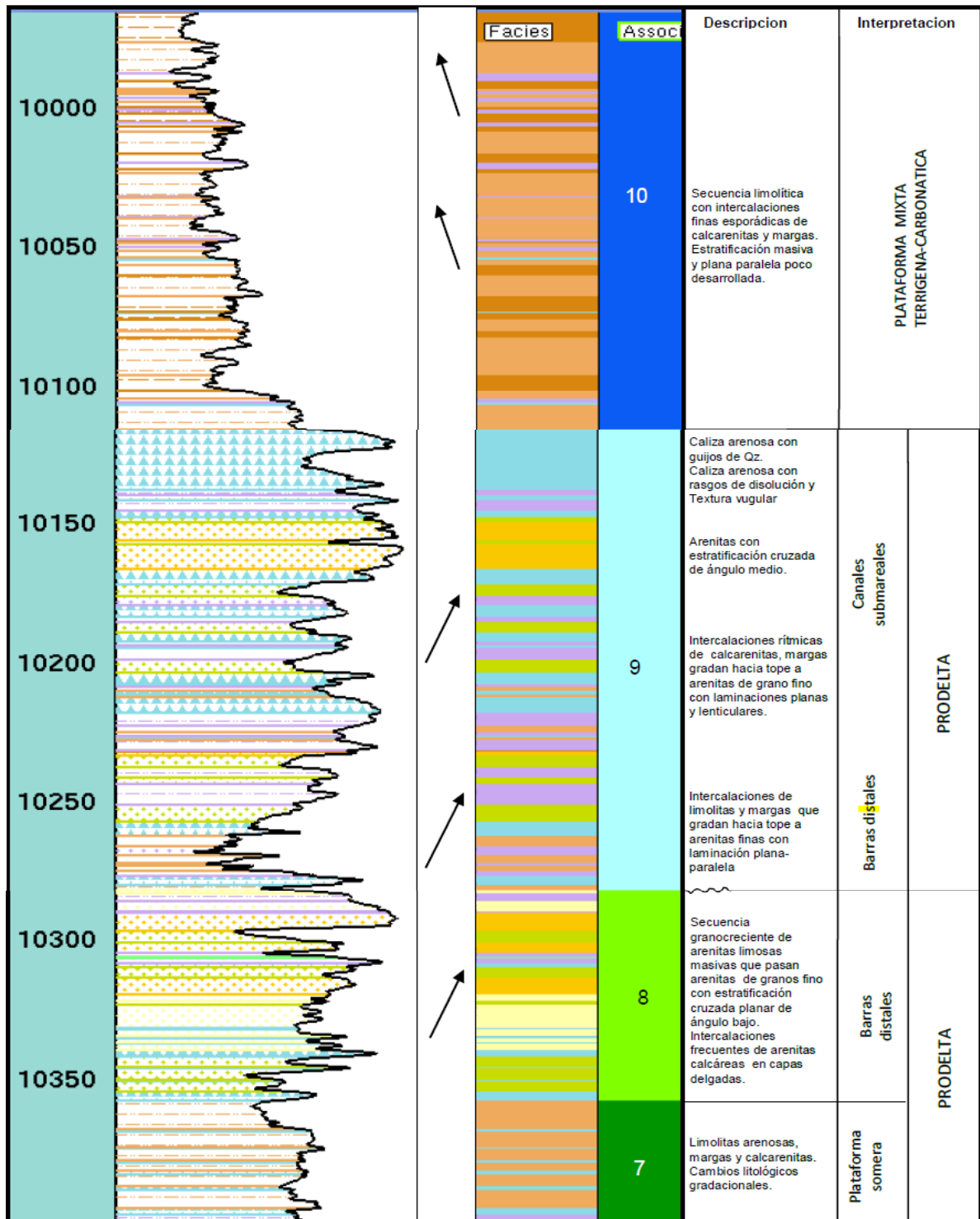


Figura 95. Columna estratigráfica del pozo Bonga-1 (tope-1399pies). Modificada de (Presentación Interna, Hocol)

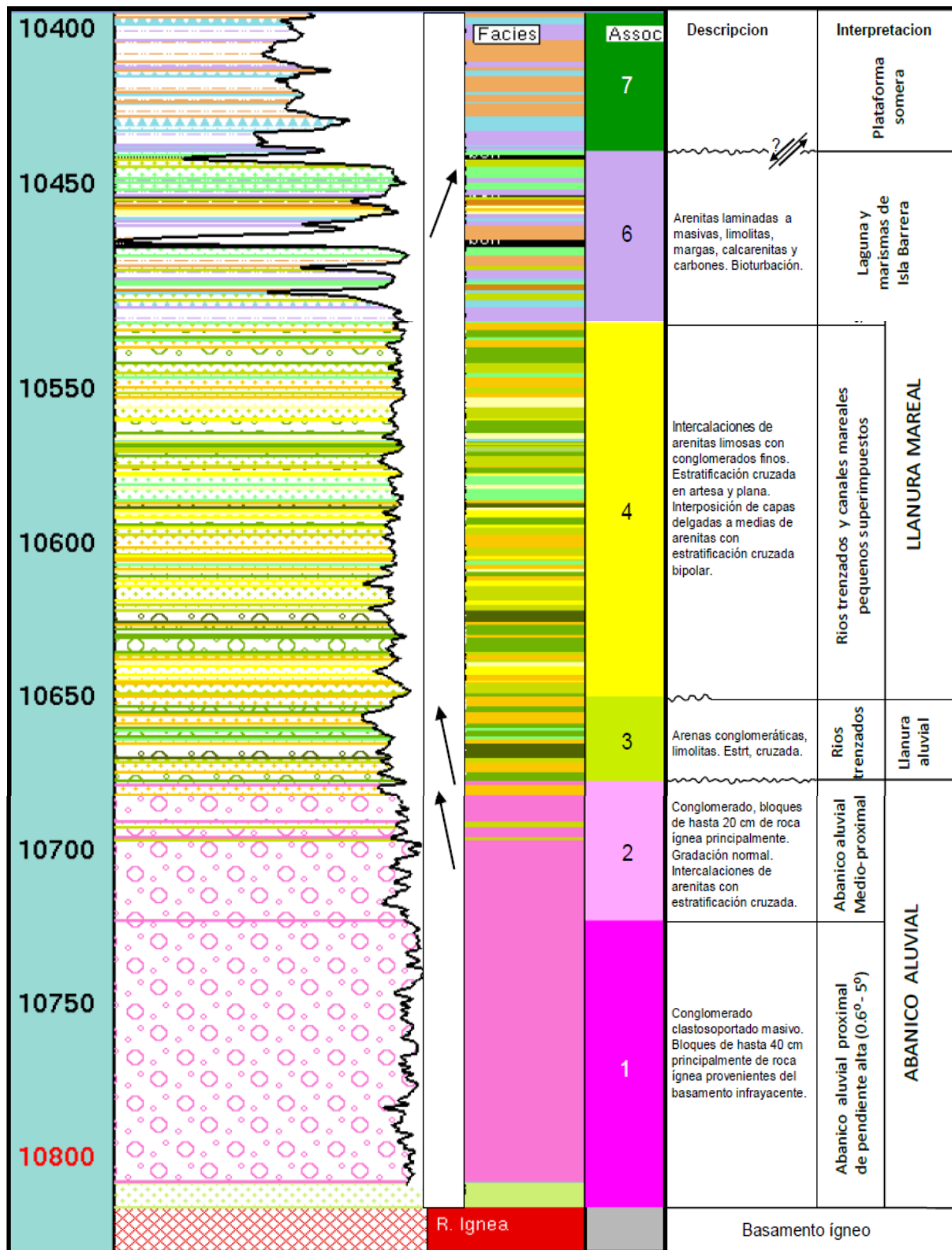


Figura 96. Columna estratigráfica del pozo Bonga-1 (1399pies-base). Modificada de (Presentación Interna, Hocol)

## 12. Discusiones

La asociación 1, empieza con una secuencia de conglomerados gruesa, los cuales se acumularon en ambientes controlados por algunos procesos gravitacionales y debido a todas sus características (esfericidad, redondez, etc.) indican poco transporte, probablemente el abanico aluvial, el cual representa dicha asociación tiene una pendiente alta ( $0.6^\circ - 5^\circ$ ), por lo que se plantea unir dicha asociación con la asociación 2 y así tener un ambiente deposicional general, sabiendo que esta última asociación presenta un carácter granodecreciente que indica factiblemente una modificación tectónica que da como resultado un cambio de la pendiente de depósito y la aparición de procesos fluviales, los cuales poco a poco van actuando como factor principal en el sistema de acumulación.

El conjunto de facies que se observan en la asociación 3 y el notable cambio (abrupto) de facies que hay entre las asociaciones 2 y 3, sugiere un nuevo cambio en el sistema de acumulación, ya que los sedimentos en la asociación 3 representan depósitos de ríos trezados de llanura aluvial.

Para la asociación 4, según las características litológicas y estructuras sedimentarias, indican un sistema de ríos trezados constituido por canales y barras principalmente. Por su parte, la facies J (amarillo), se exhibe de manera independiente dentro de las demás facies que hacen parte de la asociación 4, lo cual indica incursiones mareales esporádicas, lo que caracteriza a un sistema de ríos trezados, pero ya de planicie deltaica inferior, aledaño al límite de inundación efectiva por mareas.

Por la ausencia de la facies J y el decrecimiento del tamaño de grano de los sedimentos que se observaron en la asociación 5, se plantea que dicha asociación hace parte de depósitos limoarenosos de llanura supramareal.

Una amplia gamma litológica exhibe la asociación 6, con un espesor relativamente pequeño, el cual incluye arenas finitas, calizas, limolitas y capas finas de carbón (presencia de marismas). Todas las características observadas en dicha asociación (litológicas y estructuras sedimentarias) indican probablemente ambientes de lagunas y pantanos de isla barrera. El contacto con la asociación suprayacente corresponde a una posible falla interpretada a 10496,6' MD, pero se presenta una pérdida en la resolución a esta profundidad, lo cual impide resolver con claridad y certeza la naturaleza de este evento. El contacto ya mencionado, concuerda con un cambio abrupto entre las asociaciones 6 y 7, lo que indica un cambio en el ambiente de deposición.

La asociación 7 está caracterizada por una secuencia de dominio limoso con características litológicas y estructuras sedimentarias que permiten plantear esta asociación como depósitos de plataforma somera. Por su parte la asociación 8 presenta una secuencia granocreciente que gracias a la relación con la asociación 7 se enmarca dentro de un evento de progradación y que correspondería a secuencias de barras distales dentro de un delta submareal. El cambio existente entre las asociaciones 7 y 8 indica una interrupción de un sistema transgresivo y la interposición de algunas fases progradacionales, probablemente como resultado de un aumento del nivel relativo del mar.

Seguidamente la asociación 9, presenta una secuencia granocreciente, la cual es interpretada como sedimentos finos de plataforma somera que gradan hacia el tope a arenas acumuladas por barras distales y canales submareales deltaicos. Esta asociación indica un nuevo episodio de aumento relativo del mar, dando como resultado el apilamiento de facies progradacionales deltaicas.

Por último la asociación 10, la cual está caracterizada por una secuencia de materiales calcáreos, se interpreta como depósitos de plataforma somera, que junto con el contacto con la asociación 9 (abrupto) hace que se pueda interpretar como el inicio de un ciclo transgresivo regional.

Los depósitos de la Formación Ciénega de Oro registrados en el pozo Bonga-1 y analizados en este trabajo presentan un amplio rango de ambientes de depósito, que incluye abanicos aluviales, sistemas fluviales dominados por ríos trenzados, llanuras mareales con lagunas y marismas, sistemas deltaicos y plataforma somera. Todo lo anterior permite corroborar la información obtenida en trabajos anteriores (Bermúdez, 2009; Castillo, 2017; Osorio, et al., 2019), pero de una forma más detallada, los cuales, en su mayoría, fueron realizados en superficie (estudios de afloramientos), ya que los autores de dichos trabajos plantean que los ambientes de acumulación de la Formación Ciénega de Oro se encuentran desde ambientes continentales a ambientes marinos poco profundos.

### 13. Conclusiones

Las imágenes adquiridas con la herramienta XRMI™ en el pozo Bonga-1 después de ser procesadas con el programa Borehole Imaging Studio, muestran un gran nivel de detalle de las estructuras sedimentarias y características litológicas y texturales de las unidades registradas, lo mismo que fracturas y fallas, las cuales se resumen a continuación:

- El intervalo registrado entre 10832' a 10817' corresponde a una roca ígnea intrusiva que constituye el basamento en este sector. Este intervalo contiene fracturas abiertas y parcialmente abiertas que localmente puede alcanzar hasta 4 eventos por pie.
- La Formación Ciénaga de Oro corresponde en las imágenes al intervalo entre 9969' a 10817' MD. Este intervalo se interpreta como una secuencia de dominio limoso, variando entre limolita arenosa a arcillolita, localmente con cantidades variables de cemento calcáreo. Se presentan con frecuencia intercalaciones de margas y arenitas calcáreas en capas delgadas y masivas. Adicionalmente, a lo largo de este intervalo se presenta estratificación masiva y gradacional. La base de esta unidad se caracteriza por mostrar un incremento del ángulo de las capas y por contener fragmentos calcáreos medianos y grandes de formas irregulares. También, se observa con frecuencia meteorización esferoidal y un alto grado de fracturamiento. La parte basal de este intervalo se encuentra constituida por un paquete de arenita arcillosa masiva de 9 pies de espesor.
- Trabajos anteriores (Bermúdez, 2009; Castillo, 2017; Osorio, et al., 2019), definen los ambientes de acumulación de la Formación Ciénaga de Oro, con variaciones entre ambientes marinos deltaicos y poco profundos y continentales, por medio de facies deltaicas con presencia de lechos de carbón. condiciones marinas deltaicas y poco profundas. Se puede apoyar la información ya descrita mediante los resultados obtenidos en este trabajo, puesto que estos mismos permitieron llegar a la conclusión de que los ambientes deposicionales de la Formación Ciénaga de Oro varían desde ambientes continentales (abanico aluvial, llanura aluvial y mareal) a ambiente marinos poco profundos (prodelta y plataforma mixta).

## 14. Bibliografía

- Aguayo, J. (2016). *Procesos sedimentarios y diagenéticos recientes y su importancia como factores de interpretación de sus análogos antiguos*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. Sociedad Geológica Mexicana.
- ANH. (2020a). ANH. <http://www.anh.gov.co/>
- ANH. (2020b). ANH. <https://geovisor.anh.gov.co/tierras/>
- Arango, A. (2014). *Análisis Sismoestratigráfico de la Formación Carbonera Miembro C7 (Municipios de Orocué y San Luis de Palenque, Cuenca de los Llanos Orientales), Colombia*. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magister en Ciencias-Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Arminio, F., Yoris, F., Porras, L., Garcia, E., & Diluca, M. (2011). ANH. (F. Cediél, Ed.). [https://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Metodos-de-Visualizacion/PETROLEUM%20GEOLOGY%20OF%20COLOMBIA/VOLUMEN\\_10\\_LOWER-MAGDALENA\\_BASIN.pdf](https://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Metodos-de-Visualizacion/PETROLEUM%20GEOLOGY%20OF%20COLOMBIA/VOLUMEN_10_LOWER-MAGDALENA_BASIN.pdf)
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martínez, J. (2007). *Colombian Sedimentary Basins*. Bogotá: ANH.
- Bermúdez, H., Alvarán, M., Grajales, J., Restrepo, L., Rosero, J., Guzmán, C., . . . Jose, O. (2009). *Estratigrafía y evolución geológica de la secuencia sedimentaria del cinturón plegado de San Jacinto*. Paipa.
- Bernal, R., Mann, P., & Escalona, A. (2015). Cenozoic Tectonostratigraphic Evolution of the Lower Magdalena Basin, Colombia: An Example of an Under- to Overfilled Forearc Basin. AAPG, 345-398.
- Cant, D. (1982). *Fluvial Facies Models and Their Application*.
- Carrera, D. (2011). *Prezi*. <https://prezi.com/qbks7jhhyap/verificacion-y-validacion-de-los-modelos-geomecanicos-en-el-bloque-saman-valle-inferior-del-magdalena/>
- Castillo, S. (2017). *Reconstrucción paleambiental de la Formación el Floral-Ciénaga de Oro a partir de una sección estratigráfica entre los Municipios de Montería y Planeta Rica*. Proyecto de Grado, Universidad EAFIT, Medellín.
- Chaparro, W. (2009). *Análisis de facies y secuencias sedimentarias*. Técnico, Tecana American University, Santa Cruz de Tenerife.
- Cifuentes, H. (2016). *Estimación de la capacidad de flujo del sistema matriz-fractura de la formación Miradoren la estructura Miche del complejo Pauto en pozos de Piedemonte*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Corrochano, D., & Barba, P. (2016). *Estratigrafía, sedimentología y evolución isotópica del tránsito Podolskiense-Myachkoviense (sector Lois-Ciguera, Cuenca carbonífera central, zona Cantábrica)*. Universidad de Salamanca, Salamanca.
- De Arco, O., & Marlon, M. (2018). *Definición de ambientes sedimentarios y caracterización de tipo de roca vinculando el uso de tomografía computarizada de roca. Caso estudio aplicado a un campo colombiano*. Proyecto de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Di Luca, M. (2016). *Caracterización Geofísica de Yacimientos Heterogéneos de la Formación Porquero, Área Piloto Bloque A, Cuenca del Valle Inferior del Magdalena*. Tesis magister, Bogotá. <http://bdigital.unal.edu.co/56617/7/MarioDiLucaVingelli.2016.pdf>
- García, M. (2004). *Evaluación estructural y estratigráfica en el Miembro Punta Gorda de la Formación Misoa con base en registros de imágenes, campo la concepción. Estado Zulia*. Universidad Central de Venezuela.
- Geney, G. (2000). *Aplicaciones de los sistemas de registro LWD en operaciones de perforación de pozos*. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. [http://www.bdigital.unal.edu.co/806/1/71745175\\_2000.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/806/1/71745175_2000.pdf)
- Gomez, A. (1987). *Avanicos Aluviales, aportación teórica a sus aspectos mas significativos*. Universidad de Leon, Leon.
- Gómez, V. (2009). *Arquitectura estructural, estratigráfica y sedimentológica a partir de la interpretación de imágenes de resistividad (AFR) del Grupo Honda (Mioceno) en el pozo Dina K-R, Valle Superior del Magdalena*. Proyecto de Grado, Eafit, Medellín.
- González, F., Kietzmann, D., Fantín, M., Crousse, L., & Reijenstein, H. (2014). *Estratigrafía y análisis de facies de la Formación Vaca Muerta en el área de El Trapial*. Mendoza. <http://www.petrotecnica.com.ar/1-2015/pagsCONpublic/separadosXnotas/78-89.pdf>
- Gonzalo, L., Juan, S., & Claudio, T. (2012). *Universitas Major Pacensis Divi Andre AE*. <https://registrosdepozosumsa.files.wordpress.com/2012/05/expo-registro-de-imagen-modo-de-compatibilidad.pdf>
- Halliburton. (2012). *Halliburton*. [https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/lp/contents/Data\\_Sheets/web/H/H03629.pdf?nav=en-US\\_solutions\\_public](https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/lp/contents/Data_Sheets/web/H/H03629.pdf?nav=en-US_solutions_public)

- Halliburton. (2017). *Halliburton*.  
[https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/lp/contents/Books\\_and\\_Catalogs/ResInnov-10.pdf](https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/lp/contents/Books_and_Catalogs/ResInnov-10.pdf)
- Halliburton. (2018a). *Halliburton*.  
[https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/ss/contents/Data\\_Sheets/web/ald-azimuthal-lithodensity-lwd-service-data-sheet.pdf](https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/ss/contents/Data_Sheets/web/ald-azimuthal-lithodensity-lwd-service-data-sheet.pdf)
- Halliburton. (2018b). *Halliburton*.  
[https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/ss/contents/Data\\_Sheets/web/quasar-trio.pdf?nav=en-US\\_sperry\\_public](https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/ss/contents/Data_Sheets/web/quasar-trio.pdf?nav=en-US_sperry_public)
- Halliburton. (2020). *Halliburton*. <https://www.halliburton.com/en-US/ps/solutions/formation-evaluation/borehole-imaging/default.html>
- Hocol. (2017). *Realidades y Perspectivas de Hocol en el Valle Inferior del Magdalena*. Informe Técnico, Cartagena. <http://www.promigas.com/Es/Noticias/Documents/3.X%20Foro%20de%20Operaciones%20-%20Hocol%20170817.pdf>
- Kaczmarczyk, W., & Lis-Śledziona, A. (2017). *Adaptation of methodology of Discrete Fracture Network (DFN) model building for selected lower Paleozoic intervals*. Oil and Gas Institute-National Research Institute.
- Leal, J. (2013). *Identificación y modelado de fracturas naturales en pozos de un yacimiento de hidrocarburos ubicado en la cuenca del Catatumbo, Departamento Norte de Santander, Colombia, utilizando registros de imágenes resistivas y datos de dimensión fractal*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- López, A. (2012). *Interpretación estructural de alta resolución con registros de imágenes de pared de pozo*. Proyecto de grado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lozano, E., & Zamora, N. (2014). Bogotá.  
<http://recordcenter.sgc.gov.co/B20/23008100024725/Documento/Pdf/2105247251113000.pdf>
- Lozano, E., & Zamora, N. (2014). *Anexo K Compilación de la Cuenca Sinú-San Jacinto*. Técnico, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Malagón, J. (2016). *La competitividad del sector del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia*. Cuadernos PNUD. <https://www.undp.org/content/dam/colombia/docs/MedioAmbiente/undp-co-La%20competitividad%20del%20sector%20de%20hidrocarburos%20en%20las%20diferentes%20regiones%20de%20Colombia-2016.pdf>
- Manco-Garcés, A., Marín-Cerón, M., Sánchez-Plazas, C., Escobar-Arenas, L., Beltrán-Triviño, A., & von Quadt, A. (2020). *Provenance of the Ciénaga de Oro Formation: unveiling the tectonic evolution of the Colombian Caribbean margin during the Oligocene - Early Miocene*. Medellín.
- Marín, J., Bermúdez, H., Roberto, A., Jaramillo, J., Rodríguez, J., Ruiz, E., & Cerón, M. (2010). *Evaluación geológica y prospectividad Sector Sinú-Urabá*. Técnico, Universidad de Caldas, Caldas.
- Mata, O. (2014). *cenozoic structure, stratigraphy, and paleogeography of the Lower Magdalena Basin, Colombia*. University of Houston. Houston: Department of Earth and Atmospheric Sciences.
- Monico, B. (2016). *Estuarios y llanuras*. Universidad de Salta, Salta.
- Montes, S. (2012). *Reevaluación petrofísica del campo petrolero Big Bow del Estado de Kansas, Eua. En base de registros geofísicos de pozo para la búsqueda de posibles zonas productoras de hidrocarburos*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- Mora, J., Oncken, O., Le Breton, E., Mora, A., Veloza, G., Vélez, V., & De Freitas, M. (2018). *Controls on forearc basin formation and evolution: Insights from Oligocene to Recent tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena Valley basin of northwest Colombia*.
- Morales, D., & De la Torre, J. (2018). *Evaluación de la saturación promedio de los fluidos del "pozo a" con los datos obtenidos de la herramienta rst, en el área sur del campo Castilla*. Fundación Universidad de América, Bogotá. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6682/2/5112765-2018-1-IP.pdf>
- Morales, E. (2007). *Metodología para la Evaluación de Formaciones en arenas arcillosas usando Registros Geofísicos de Pozo*. Proyecto de Grado, Insituto Politécnico Nacional, México D.F. <https://docplayer.es/45245726-Metodologia-para-la-evaluacion-de-formaciones-en-arenas-arcillosas-usando-registros-geofisicos-de-pozo.html>
- Morales, J., Borrego, J., Gracias, F., & Peralta, G. (2009). *Llanuras mareales*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*.
- Nilsen, T. (1985). *Alluvial Fan Deposits*.
- Oil Production. (2009). *Oil Production*. <http://oilproduction.net/files/Perfilaje%20de%20pozos.pdf>
- Oleas, C. (2017). *Determinación de facies sedimentarias necesarias para optimizar un modelo geológico mediante la correlación de facies obtenidas de un núcleo de corona del pozo a y electrofacies de registros convencionales e imágenes de pozos b, c, d de la Cuenca Oriente*. Proyecto de grado, Universidad Central de Ecuador, Quito.
- Osorio, E., Pardo, A., Restrepo, S., Gallego, F., Muñoz, J., Plata, A., . . . Kamenov, G. (2019). *Provenance of Eocene–Oligocene sediments in the San Jacinto Fold Belt: Paleogeographic and geodynamic implications for the*

*northern Andes and the southern Caribbean*. Paper, Manizales.

[https://watermark.silverchair.com/210.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kKhW\\_Ercy7Dm3ZL\\_9Cf3qKAc485ysgAAAnQwggJwBgkqhkiG9w0BBWagggJhMIICXQIBADCCAIYGCSqGSib3DQEHATAeBgIghkgBZQMEAS4wEQQMwgVr1HQItI-vEDR0AgEQgIICJ8mhhMLXSu72EBuGzFOMv31r\\_IQvSqAIPmyM2eITHnMbjazZF9ZV](https://watermark.silverchair.com/210.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kKhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qKAc485ysgAAAnQwggJwBgkqhkiG9w0BBWagggJhMIICXQIBADCCAIYGCSqGSib3DQEHATAeBgIghkgBZQMEAS4wEQQMwgVr1HQItI-vEDR0AgEQgIICJ8mhhMLXSu72EBuGzFOMv31r_IQvSqAIPmyM2eITHnMbjazZF9ZV)

- Pinto, V. (2017). *Análisis de los resultados de producción mediante la correlación de unidades de flujo distintas con registros avanzados dinámicos y estáticos en el reservorio Hollín del pozo x*. Proyecto de grado, Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito. [http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/16903/1/69920\\_1.pdf](http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/16903/1/69920_1.pdf)
- Ponce, J., Carmona, N., & Montagna, A. (2018). *Atlas de estructuras sedimentarias inorgánicas y biogénicas*. Fundación YPF. <https://fundacionypf.org/Documents/Publicaciones/ATLAS-ESTRUC-SEDIM-INORGANICAS-BIOGENICAS-.pdf>
- Ptolomeo. (2011). *Ptolomeo UNAM*. Obtenido de Ptolomeo UNAM: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/111/A4%20II.%20Interpretacin%20del%20registro%20de%20imagenes%20electricas%20FMI.pdf?sequence=7>
- Quijano, E., & Valcarcel, E. (2015). *Interpretación de registros geofísicos de pozo, pozo a, b y c, Cuenca de los Llanos Orientales*. Proyecto de Grado, Facultad Seccional Sogamoso, Sogamoso.
- Reyes, H., Montenegro, M., & Gomez, P. (2004). Tectonoestratigrafía y evolución geológica del Valle Inferior del Magdalena. *Universidad de Santander*.
- Ricco, G. (2012). *Principios de medición de los registros geofísicos de pozos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Rodríguez, D. (2015). *Azimuthal Focused Resistivity "Interpretation" Borehole logs*. Internal Presentation, Halliburton Sperry, Venezuela.
- Rodríguez, G., Bermúdez, J., Zapata, G., Arango, M., & Arenas, J. (2013). *Cartografía Geológica de la Plancha 62 La Ye Departamentos de Córdoba y Sucre*. Servicio Geológico Colombiano, Medellín.
- Romaniuk, W. (2013). *Pomiarz XRF w uworach cechsztynu*. Geology, Geophysics & Environment. Szczecin: AGH. <http://journals.bg.agh.edu.pl/GEOLOGY/2013.39.3/geol.2013.39.3.291.pdf>
- Silva, A., Páez, L., Rincón, D., Tamara, J., Gomez, P., López, E., . . . Valencia, V. (2016). Características del basamento en el valle inferior del magdalena y cinturones plegados de sinú y san jacinto: evidencias de un arco magmático del cretácico tardío en el caribe sur colombiano. *CT&F*, 5-36.
- Sue, C. (2016). *Corrección en la medición de resistividad tomado con Logging While Drilling (LWD), para tres pozos donde se representan ambientes de alta resistividad*. Poroyecto de Grado, Facultad de Ingenierías, Bogotá.
- Trujillo, D. (2014). *Análisis estratigráfico mediante la aplicación de registros de imágenes eléctricas de pared de pozo*. Proyecto de Grado, Universidad Autónoma de Guerrero, México D.F.
- Tucker, M. (2003). *Sedimentary rocks in the field*. University of Durham, UK.
- UPME. (2018). *Evaluación de las cuencas y estructuración de escenarios de oferta de hidrocarburos convencionales y no convencionales*. Bogotá D.C.
- Vargas, C. (2012). Evaluating total Yet-to-Find hydrocarbon volume in Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, Volume 16.
- Wahyuddin, D., Shanti, R., A, S., & Yunus, D. (2019). *Fault-related fractures characteristic of Kijang fault at Wayang Windu Geothermal field*. Physics Department, Universitas Indonesia., Jakarta.
- Zarabia, A. (2013). *Caracterización petrofísica avanzada de las areniscas Napo U y T del campo "Vate" mediante la aplicación del registro de resonancia magnética (mril-prime)*. Tesis de grado, Universidad Central de Ecuador, Quito.