



**MODELO GEOLÓGICO 3D A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE  
ATRIBUTOS SÍSMICOS EN AMBIENTES DE DEPÓSITO FLUVIALES**

**ERIKA ZARAY CALDERON GOYENECHÉ  
WENDY JAHEL CABALLERO MALAVER**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**MODELO GEOLÓGICO 3D A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE  
ATRIBUTOS SÍSMICOS EN AMBIENTES DE DEPÓSITO FLUVIALES**

**ERIKA ZARAY CALDERON GOYENECHÉ  
WENDY JAHEL CABALLERO MALAVER**

**Trabajo de grado presentado como requisito  
Para optar al título de Geóloga**

**Director del Proyecto  
Física. Msc. Zayra Milena Pérez Guzmán  
ECOPETROL-ICP**

**Codirector del Proyecto  
Geólogo. Msc. Alberto Ortiz Fernández  
ECOPETROL-ICP**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2009**

## DEDICATORIA

*A Dios por ser la fuerza divina que ilumina mi camino, colmándome de bendiciones y sabiduría en todo momento.*

*A mis padres Clara Inés y Gabriel quienes con su esfuerzo, sacrificio y apoyo han hecho posible que alcance uno de los triunfos más importantes de mi vida.*

*A mis hermanas: Sandra Juliana, María del Mar y Laura Katherine quienes siempre me apoyaron y me motivaron para seguir adelante.*

*A mi sobrino Samuelito por llenar aún más de luz nuestro hogar.*

*A Mi Adrian por su amor y apoyo incondicional en esta etapa tan importante de mi vida.*

*A mis amigos por los excelentes momentos compartidos y por los que vendrán.*

**Erika Zaray**

*A Dios Padre Celestial, fuerza divina.*

*A mis padres María Azucena y Juan José, por su amor, paz, cariño, comprensión, fortaleza, ternura, sabiduría y por dar incluso lo que no tienen por vernos felices.*

*A mis hermanitos, Lina María y Alan Farith, por abrazarme incluso cuando las preocupaciones no me dejan dormir.*

*Al amor de mi vida, Jesús, por llenar mi vida de amor y de felicidad, lo cual hace que todo sea posible.*

*A mis amigos por ser quienes son.*

*A mí misma, por demostrarme que un gran dolor es necesario, para lograr grandes cosas.*

**Wendy Jahel**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Msc. Zayra Milena Pérez, directora de nuestro proyecto de grado, por su tiempo, sus aportes y su interés en la realización del proyecto.

A Msc. Alberto Ortiz Fernández, codirector de nuestro proyecto por sus aportes y por sus valiosos consejos, han sido de gran ayuda tanto en lo profesional y personal.

Al Geólogo Germán Meza por su tiempo, sus enseñanzas y sus grandes aportes en la realización del proyecto.

Al Doctor José Fernando Gamboa por su colaboración y cada uno de los valiosos aportes indispensables en la realización de este proyecto.

A nuestros calificadores: Miguel Jiménez y Jorge Monsegny, por cada uno de sus aportes en aras de mejorar nuestro trabajo.

A nuestros amigos: Clarita, Diana Aillen, Cristhian, Sergis, Nestor, Kelly, Andrea

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma estuvieron involucrados en el proyecto.

## RESUMEN

### **TITULO: MODELO GEOLÓGICO 3D A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE ATRIBUTOS SISMICOS EN AMBIENTES DE DEPÓSITO FLUVIALES<sup>1</sup>**

**Autor (es):** Calderón Goyeneche Erika Zaray\*\*; Caballero Malaver Wendy Jahel\*\*

**Palabras Claves:** Canales Fluviales, Atributos Sísmicos, Modelo Geológico

Este estudio busca determinar la dirección, ancho y sinuosidad de canales fluviales mediante la interpretación de un cubo sísmico en 3D, que se integró a la descripción de 228 pies de núcleos disponibles, al ajuste con registros eléctricos y a correlaciones estratigráficas previas. De este amarre, se interpretaron dos electrofacies, de canal y de llanura de inundación, con sus tamaños de grano característico. El cubo sísmico se procesó con el software de uso libre Opendtect, versión 3.2.2 en un sector de aproximadamente 36 Km<sup>2</sup>, caracterizado por la presencia de facies fluviales y para el que se seleccionaron tres horizontes, a los que se les aplicaron cuatro atributos sísmicos: coherencia, extracción de amplitud, descomposición espectral y convolución Laplaciana. Se destaca el uso del atributo descomposición espectral en un rango de 30 a 60 hertz y coherencia para detectar los sistemas de fallas, mientras que para la orientación y distribución de canales funciona mejor el atributo de extracción de amplitud, así como el atributo de coherencia que también resalta características de los canales. Se hicieron medidas del ancho tomando tres transectas a cada canal, y se determinó un promedio. Para la sinuosidad se utilizó la ecuación sugerida por Miall A. D; por último se determinó la dirección directamente de los horizontes a los cuales se le calcularon los atributos, obteniendo como resultado una dirección NW- SE y NE-SW.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado Modalidad Investigación. Convenio de Cooperación Tecnológica UIS-ICP 005 de 2007.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-químicas, Escuela de Geología. Directores Física MsC. Zayra Milena Pérez Guzmán y Geólogo MsC. Alberto Ortiz Fernández (ECOPETROL-ICP)

## ABSTRACT

### **TITLE: 3D GEOLOGICAL MODELING FROM THE APPLICATION OF SEISMIC ATTRIBUTES IN FLUVIAL DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS<sup>1</sup>**

**Authors:** Calderón Goyeneche Erika Zaray\*\*; Caballero Malaver Wendy Jahel\*\*

**Keywords:** Fluvial Channels, Seismic Attributes, Geological Model

This study looks forward to determine the direction, width and sinuosity of the fluvial channels by means of the interpretation of a 3D seismic cube, which was integrated to the description of 228 ft. of available cores, electric registries and previous stratigraphic correlations. From this relation, two electrofacies were interpreted; channel and flood plain, with their characteristic grain size. The seismic cube was processed with the Opendtect software, version 3.2.2, in a sector of approximately 36 Km<sup>2</sup>, characterized with the presence of fluvial facies, also three horizons were determined, for those horizons four seismic attributes were applied: coherence, amplitude extraction, spectral decomposition and Laplacian convolution. The spectral decomposition attribute were used in a 30 to 60 Hz. Range and the coherence attribute for the detection of fault systems. The amplitude extraction attribute works better for the orientation and channel distribution determination, also the coherence attribute stands out the channel characteristics. Width measurements were made taking three cross sections for each channel, with this an average were determined. For the sinuosity the equation proposed by Miall A.D was used; and finally the direction was determined directly from the horizons to which the attributes were calculated, resulting in a NW-SE and NE-SW direction.

---

<sup>1</sup>Undergraduate thesis. Research Work

\*\* Physical Chemistry Engineering College School of Geology. Advisor. Zayra Milena Pérez Guzmán and Alberto Ortiz Fernández

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>4.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>4</b>
<b>4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>4</b>
<b>5. AMBIENTES FLUVIALES</b> .....	<b>5</b>
<b>6. SISTEMAS FLUVIALES</b> .....	<b>7</b>
<b>6.1 Sinuosidad en Canales Fluviales</b> .....	<b>8</b>
6.2 Sistema de Ríos Trenzados.....	10
6.2.1 Procesos de depósito.....	11
6.2.2 Barras Longitudinales.....	12
6.2.3. Barras Transversales .....	12
6.2.4. Barras Laterales.....	12
6.2.5 Características de los sedimentos.....	13
6.3 Sistema de Ríos Meándricos .....	14
6.3.1 Procesos de depósito .....	15
6.3.1.1 Depósitos de canal .....	16
6.3.1.2 Depósitos de Barras de Punta (Point bar deposits) .....	16
6.3.1.3 Depósitos de Borde .....	17
6.3.1.4 Depósitos de Planicies de Inundación .....	17
6.3.1.5 Depósitos de Desborde .....	17
6.3.1.6 Depósitos de Lago Lateral .....	18
6.3.2 Características de los sedimentos .....	19
6.4 Sistema de Ríos Anastomosados .....	20
6.4.1 Procesos de depósito .....	21
6.4.1.1 Características de los sedimentos .....	22
6.4.1.2 Interpretación De Canales .....	22
6.4.1.2.1 Canales de carga de Fondo.....	23
6.4.1.2.2 Canales con Carga Suspendeda .....	23
6.4.1.2.3 Canales de Carga Mixta .....	24
<b>7. SÍSMICA</b> .....	<b>25</b>
<b>7.1 Métodos Geofísicos</b> .....	<b>25</b>
7.1.1 Sísmica De Reflexión.....	26
7.1.1.1 Limitaciones en el Método de Reflexión .....	28
<b>7.2 Sísmica 3-D</b> .....	<b>28</b>
7.2.1 Elementos de la Sísmica 3D .....	29

7.2.1.1	Inline.....	29
7.2.1.2	Crossline .....	29
7.2.1.3	Time Slice .....	29
7.2.2	Ventajas de la Sísmica 3D .....	30
7.2.3	Interpretación Sísmica 3-D .....	31
7.2.4	Ventajas de la Sísmica 3D Sobre la 2D .....	32
<b>7.3</b>	<b>Atributos Sísmicos.....</b>	<b>33</b>
7.3.1	Atributos Morfológicos .....	34
7.3.1.1	Coherencia .....	34
7.3.1.2	Curvatura .....	35
7.3.2	Atributos de Reflectividad .....	37
7.3.2.1	Extracción de Amplitud.....	37
7.3.2.2	Descomposición Espectral .....	38
7.3.2.3	Atributo de Ondícula.....	39
7.3.3	Filtro Convolución .....	39
7.3.4	Aplicación de atributos sísmicos.....	41
7.3.5	Ventajas y desventajas de los Atributos Sísmicos .....	41
7.3.5.1	Ventajas .....	41
7.3.5.2	Desventajas .....	42
7.3.6	Casos de estudio .....	42
7.3.6.1	Visualización de canales en rocas Terciarias.....	42
<b>8.</b>	<b>METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....</b>	<b>47</b>
<b>8.1</b>	<b>Revisión Bibliográfica.....</b>	<b>48</b>
<b>8.3</b>	<b>Fase 2: Correlación con registros .....</b>	<b>49</b>
<b>8.4</b>	<b>Fase 3. Herramientas De Interpretación Sísmica .....</b>	<b>49</b>
<b>8.5</b>	<b>Fase 4: Interpretación De Datos.....</b>	<b>51</b>
<b>9.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>52</b>
<b>9.1</b>	<b>Descripción de los datos sísmicos.....</b>	<b>52</b>
<b>9.2</b>	<b>Análisis Estructural.....</b>	<b>57</b>
<b>9.3</b>	<b>Análisis Estratigráfico.....</b>	<b>61</b>
9.3.1	Ambiente Canal, Facies Arenitas con estratificación cruzada bioturbada (A-x-b).....	61
9.3.2	Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arcillolita (FA).....	62
9.3.3	Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas bioturbadas (FA) .....	62
9.3.4	Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas bioturbadas (FA).....	63
9.3.5	Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas Bioturbadas (A-b) y Friables (A) .....	63
9.3.6	Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas Friables (FA) .....	64
9.3.7	Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas Bioturbadas (A-b).....	65
9.3.8	Ambiente de Canal, Facies Arenitas (A).....	65

9.3.9 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)	66
9.3.10 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas bioturbadas (A-b)	66
9.3.11 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas friables (FA)	67
9.3.12 Ambiente de Canal, Facies de Arenitas con Estratificación Cruzada Bioturbada (A-x-b)	68
9.3.13 Ambiente de Canal, Facies de Arenitas con Estratificación Cruzada Bioturbada (A-x-b)	68
9.3.14 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas Friables Bioturbadas (FA-b)	69
9.3.15 Ambiente de Canal, representado por dos Facies Arenitas Bioturbadas (A-b) y Arenitas con Estratificación Cruzada (A-x-b) mas hacia la base	69
9.3.16 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolita (FL)	71
9.3.17 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Limolita con lentes (FLS-lents)	71
9.3.18 Ambiente de Canal, Facies Arenisca bien seleccionada (FAbs)	72
9.3.19 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)	72
9.3.20 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)	73
9.3.21 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)	73
9.3.22 Ambiente de Canal, Facies Arenisca Lítica subredondeada(LwSs)	74
9.3.23 Ambiente de Canal, Facies (TxCg)	74
9.3.23 Ambiente de Canal, Facies Arenisca Lítica subredondeada (LwSs)	75
<b>9.4 Interpretación de Traversas</b>	<b>78</b>
9.4.1 Traversa de los pozos C-79, C-80, C-30	78
9.4.2 Traversa de los pozos C-37, C-81, C-77, C-97, C-38	78
<b>9.5 Interpretación de Horizontes</b>	<b>83</b>
<b>9.5.1 Horizonte A</b>	<b>83</b>
9.5.1.1 Coherencia calculado sobre el Horizonte A	83
9.5.1.2 Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte A	83
9.5.1.3 Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte A	86
9.5.1.4 Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte A	88
<b>9.5.2 Horizonte B</b>	<b>89</b>
9.5.2.1 Coherencia calculado sobre el horizonte B	89
9.5.2.2 Extracción de Amplitud calculado en el horizonte B	89
9.5.2.3 Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte B	92
9.5.2.4 Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte B	92
<b>9.5.3 Horizonte C</b>	<b>95</b>
9.5.3.1 Coherencia calculada sobre el horizonte C	95

9.5.3.2	Extracción de amplitud calculada sobre el horizonte C.....	95
9.5.3.3	Descomposición Espectral calculada en el horizonte C.....	98
9.5.3.4	Convolución Laplaciana calculada sobre la superficie C.....	98
<b>10.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LOS CANALES.....</b>	<b>102</b>
10.1	Sinuosidad y Ancho Horizonte A.....	103
10.2	Sinuosidad y Ancho Horizonte B.....	106
10.3	Sinuosidad y Ancho Horizonte C.....	109
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>113</b>
<b>12.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>13.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema ilustrativo de los diferentes tipos de canales dentro de los sistemas fluviales .....	7
<b>Figura 2.</b> Esquema representativo de la sinuosidad en canales fluviales señalando las partes representativas tomadas en la formula matemática .....	8
<b>Figura 3.</b> Río Rakaia, Nueva Zelanda, ejemplo de un río trenzado y elementos de un sistema de ríos trenzados. ....	10
<b>Figura 4.</b> Características morfológicas de un sistema fluvial trenzado .....	11
<b>Figura 5.</b> Secuencia tipo Scott, Donjek, Latte, Bijou, Creek.....	13
<b>Figura 6.</b> A la izquierda el Rio Wampool noreste de Inglaterra, ejemplo de un río meándrico, a la derecha esquema ilustrativo señalando las partes que componen este sistema meándrico.....	15
<b>Figura 7.</b> Corte transversal de un canal meándrico con algunas de las partes que lo conforman como el point bar, donde se depositan los sedimentos .....	16
<b>Figura 8.</b> Características morfológicas de un sistema fluvial meándrico .....	18
<b>Figura 9.</b> Secuencia típica de disminución en el tamaño de grano.....	19
<b>Figura 10.</b> Rio Saskatchewan, Canadá. Ejemplo de um Rio Anastomosado. Y elementos morfológicos del sistema de ríos anastomosados.....	20
<b>Figura 11.</b> Modelo arquitectónico de un río anastomosado .....	21
<b>Figura 12.</b> Esquema General de la Sísmica de Reflexión .....	27
<b>Figura 13.</b> La imagen ilustra el esquema de prospección aplicado en tierra y mar.....	27
<b>Figura 14.</b> Elementos Sísmicos 3D. Cuadro rojo <i>Crossline</i> , Cuadro azul, <i>Time Slice</i> , Cuadro Verde <i>Inline</i> . ....	30
<b>Figura 15.</b> Ejemplo de un campo en el Golfo de México donde se muestra cómo ha cambiado el mapa estructural aplicando sísmica 3-D .....	33
<b>Figura 16.</b> Horizonte a 36 ms. de un volumen sísmico al Norte de Alberta a) sin calculo de atributo. b) calculo de coherencia al volumen .....	35
<b>Figura 17.</b> Definición de curvatura 2-D.....	36
<b>Figura 18.</b> La imagen representa dos perfiles sísmicos en a) una curvatura positiva, b) una curvatura negativa en los estratos del cubo. ....	36
<b>Figura 19.</b> La descomposición espectral aplicada a un intervalo derivado de amplitudes de post-apilamiento. ....	38
<b>Figura 20.</b> Fenomenología de la Convolución .....	41
<b>Figura 21.</b> <i>Horizon slice</i> a lo largo del límite del Pliopleistoceno-Pleistoceno a un tiempo de 1.200 s .....	43
<b>Figura 22.</b> <i>Time slice</i> a través de (a) un volumen de datos sísmicos y (b) un volumen de coherencia en el Golfo de México, U.S.A.....	44
<b>Figura 23.</b> <i>Time slice</i> a tiempo de 1440 ms a través de un sistema de canales canibalizado.....	45
<b>Figura 24.</b> <i>Time slice</i> a (a) tiempo de 1.400 s, (b) tiempo de 1.448 s, (c) tiempo de 1464 s .....	46
<b>Figura 25.</b> Flujo diagrama de la Metodología .....	47

<b>Figura 26.</b> Ventana del software Promax donde se visualizan algunos parámetros del procesamiento del cubo sísmico .....	54
<b>Figura 27.</b> Ventana de Velocidades del volumen sísmico.....	55
<b>Figura 28.</b> Subvolumen Sísmico del Campo A. <i>Inline</i> 204 – 485 y <i>Crossline</i> 334 -494 .....	57
<b>Figura 29.</b> Interpretación de Fallas.....	57
<b>Figura 30.</b> Interpretación estructural del área de estudio en un Time slice a 1428 ms calculando el atributo de extracción de amplitud en el software OpendTect 3.2.2 .....	59
<b>Figura 31.</b> Interpretación estructural del área de estudio en un Time Slice a 1428 ms, calculando el atributo de coherencia en el software Opendtect 3.2.2.....	60
<b>Figura 32.</b> Facies A-x-b, ambiente de Canal.....	61
<b>Figura 33.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies arcillolita .....	62
<b>Figura 34.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies A-b, ambiente de Llanura de Inundación.....	62
<b>Figura 35.</b> Porción del núcleo regularmente preservado mostrando las facies A-B de llanura de inundación. ....	63
<b>Figura 36.</b> Porción del núcleo, donde se presenta facies Ab, ambiente de Relleno de Canal.....	63
<b>Figura 37.</b> Porción del núcleo, en el cual el ambiente de Relleno de Canal, se evidencia claramente el color abigarrado del núcleo compuesto por lodo. ....	64
<b>Figura 38.</b> Núcleos tomados de la sección vertical seleccionada. Facies A-b, ambiente de Relleno de Canal.....	65
<b>Figura 39.</b> Núcleos de la sección vertical seleccionada. Facies A, ambiente de Canal.....	65
<b>Figura 40.</b> Imagen representativa de la Facies FL-b, ambiente de Llanura de inundación. ....	66
<b>Figura 41.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies A-b, ambiente de Llanura de Canal.....	66
<b>Figura 42.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FA, ambiente de Llanura de Inundación .....	67
<b>Figura 43.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies A-x-b, ambiente de Canal. ....	68
<b>Figura 44.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FA-b, ambiente de Llanura de Inundación.....	69
<b>Figura 45.</b> Núcleos de la sección vertical escogida ambiente de Canal. a) Facies (A-b), b) Facies (A-x-b).....	70
<b>Figura 46.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FL, ambiente de Llanura de Inundación.....	71
<b>Figura 47.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies (FLS-lentS), ambiente de Relleno de Canal.....	71
<b>Figura 48.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies (FABs) ambiente de Canal.....	72
<b>Figura 49.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FL-b, ambiente de Llanura de Inundación.....	72

<b>Figura 50.</b> Núcleos de la sección vertical escogida, ambiente de Relleno de Canal.....	73
<b>Figura 51.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FL-b, ambiente de Llanura de Inundación.....	73
<b>Figura 52.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies LwSs, ambiente de Canal.....	74
<b>Figura 53.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies TxGg, ambiente de Canal.....	74
<b>Figura 54.</b> En la imagen se observan facies LwSs, ambiente de Canal.....	75
<b>Figura 55.</b> Núcleos de la sección vertical escogida. Facies LwSs, ambiente de Canal.....	75
<b>Figura 56.</b> Porción del núcleo con, Facies LwSs, ambiente de Canal. ....	76
<b>Figura 57.</b> Definición de las diferentes formas asociadas a los ambientes interpretados mediante registros de pozo.....	77
<b>Figura 58.</b> Correlación estratigráfica de los pozos disponibles en la zona de estudio.....	80
<b>Figura 59.</b> Correlación estratigráfica disponible en la zona de estudio.....	81
<b>Figura 60.</b> <i>Inline</i> 250 del subvolumen sísmico del área de estudio, señalando los horizontes interpretados.....	82
<b>Figura 61.</b> Coherencia calculada sobre el Horizonte A.....	84
<b>Figura 62.</b> Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte A.....	85
<b>Figura 63.</b> Descomposición espectral calculado al horizonte A a 40 y 50 hertz respectivamente.....	86
<b>Figura 64.</b> Descomposición espectral calculada sobre el horizonte A a 70 Hertz.....	87
<b>Figura 65.</b> Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte A.....	88
<b>Figura 66.</b> Coherencia calculada sobre el horizonte B (1522 ms).....	90
<b>Figura 67.</b> Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte B.....	91
<b>Figura 68.</b> Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte B a 70 Hertz.....	93
<b>Figura 69.</b> Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte B.....	94
<b>Figura 70.</b> Coherencia calculada sobre el horizonte C.....	96
<b>Figura 71.</b> Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte C.....	97
<b>Figura 72.</b> Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte C a 70 Hertz.....	99
<b>Figura 73.</b> Convolución Laplaciana calculada sobre la superficie C.....	100
<b>Figura 74.</b> Esquema representativo de la sinuosidad en canales fluviales señalando las partes representativas tomadas en la fórmula matemática...	103
<b>Figura 75.</b> El diagrama de barras muestra la distribución del tipo de canal de acuerdo a su sinuosidad, Horizonte A.....	106
<b>Figura 76.</b> El diagrama de barras muestra la distribución del tipo de canal de acuerdo a su sinuosidad, Horizonte B.....	109
<b>Figura 77.</b> El diagrama de barras muestra la distribución del tipo de canal de acuerdo a su sinuosidad, Horizonte C.....	112

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación simplificada de los ambientes de depositación. Tomado de: Boggs 2001 .....	6
<b>Tabla 2.</b> Índices de sinuosidad, Modificado de Morisaw a (1985).....	9
<b>Tabla 3.</b> Tabla de distribución de canales del Horizonte A, basados en la sinuosidad en donde se muestra algunos canales representativos .....	104
<b>Tabla 4.</b> Tabla de distribución de canales del Horizonte A, basados en la sinuosidad. ....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Tabla 5.</b> Tabla de distribución de canales del Horizonte A, basados en la sinuosidad, en donde se muestra algunos canales representativos (canales 1, 7,8, 9 ,10, 12, 13, 14.) .....	107
<b>Tabla 6.</b> Tabla de distribución de canales del Horizonte B, basados en la sinuosidad.....	108
Tabla 7. Tabla de distribución de canales del Horizonte B, basados en la sinuosidad, en donde se muestran algunos canales representativos (1-11) .....	110
Tabla 8. Tabla de distribución de canales del Horizonte B, basados en la sinuosidad.....	111

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del Grupo de Investigación en Estratigrafía el cual pertenece al convenio 05/07 vigente, entre la Universidad Industrial de Santander y el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y teniendo en cuenta las necesidades de ECOPETROL en la exploración y desarrollo de sus campos, se hace necesario desarrollar y aplicar nuevas técnicas que ayuden en la caracterización de yacimientos mediante el uso de modelos geológicos que utilicen herramientas como la sísmica y atributos sísmicos integrados a otras, como los registros eléctricos e interpretación de núcleos.

El trabajo que aquí se presenta como tema de investigación, parte de la aplicación de atributos sísmicos a un ambiente de tipo continental, más exactamente fluvial presente en depósitos Paleógenos, en un cuenca Colombiana; y tiene como objetivo determinar la dirección, ancho y sinuosidad de los depósitos de canal visualizándolos en una perspectiva 3D.

Las herramientas sísmicas proveen información del subsuelo, con las cuales se puede interpretar la estructura que va desde una escala regional hasta la de un yacimiento, que permite la caracterización de trampas ya sean estratigráficas o estructurales.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los depósitos fluviales en el subsuelo presentan ciertas incógnitas tales como: orientación de los canales, amalgamamiento, sinuosidad, extensión, entre otros, los cuales están controlados por el estilo tectónico del área y no se reconocen muy bien mediante sísmica 2D o información de núcleos únicamente.

Mediante la aplicación de la sísmica 3D se puede solucionar muchos de estos problemas. Su importancia radica en el mejor grado de resolución que permite generar una imagen tridimensional del subsuelo, ayudando a determinar mapas estructurales más seguros, determinar la variación lateral de las facies, evaluar los potenciales espesores de reservorio, identificar las potenciales trampas de hidrocarburos, generando un menor grado de incertidumbre en la exploración de hidrocarburos.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

La disponibilidad de sísmica 3D y de herramientas de interpretación, que incluyen el uso de atributos que resaltan cualidades de los depósitos fluviales, permiten una oportunidad de investigación importante que evalúe el uso de ciertos atributos sísmicos en la determinación de la orientación de canales, amalgamamiento, sinuosidad, extensión, entre otros y de esta manera optimizar el desarrollo de yacimientos al contar con una distribución detallada de estos depósitos en el subsuelo.

Esta investigación propone revisar los mejores atributos que se referencian en diferentes publicaciones para probar su efectividad en depósitos fluviales en Colombia. Por lo mismo es una investigación que busca mejorar el flujo de trabajo en la interpretación sísmica orientada a localizar nuevos reservorios de hidrocarburos.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Generar un Modelo Geológico 3D para determinar la dirección, ancho, y sinuosidad de los depósitos de canales fluviales identificables en un cubo sísmico perteneciente a una cuenca Colombiana.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir los horizontes de la sísmica 3D a partir de información de núcleos, datos de pozo, deduciendo la zona que muestra presencia de canales.
- Identificar e interpretar reflectores que con base en la información de pozo tienen canales.
- Evaluar la respuesta de los atributos sísmicos, con el fin de definir su eficiencia a la hora de visualizar canales.

## 5. AMBIENTES FLUVIALES

Un ambiente de depositación está caracterizado por un conjunto geomorfológico particular en el cual un grupo de procesos químicos físicos y biológicos opera para generar un cierto tipo de depósito sedimentario. (Boggs, 2001).

El ambiente físico esta caracterizado por elementos estáticos y dinámicos. Los elementos físicos estáticos incluyen la geometría de la cuenca; materiales siliciclásticos depositacionales como grava, arena y lodo; profundidad del agua; y temperatura. Los elementos físicos dinámicos incluyen factores como la energía y dirección de flujo del fluido (agua, viento, hielo, precipitaciones, nevadas) los cuales influyen las corrientes y olas. Las características químicas de los ambientes (salinidad, pH, Eh, y el contenido de dióxido de carbono y características biológicas) se restringen a las actividades de los organismos (crecimiento de plantas, madrigueras, descanso, alimentación / ingestión de sedimento y extracción de sílice y carbonato de calcio para generar material esquelético) y la presencia de restos orgánicos como material depositacional. Se reconocen tres ambientes depositacionales principales: Continental, Marino Marginal y Marino. Cada uno de estos ha sido subdividido por diferentes autores dentro de variados y numerosos subambientes. La tabla No. 1, ilustra una clasificación que envuelve el conjunto depositacional primario, el ambiente principal y el subambiente. Dentro de los ambientes sedimentarios continentales se encuentran los ambientes fluviales los cuales están definidos principalmente por la energía, acción del agua en movimiento y por el conjunto de erosión, transporte y sedimentación que se llevan a cabo en el mismo; se encuentran controlados y dependen fuertemente de las condiciones climáticas. Además de su papel como receptores de información geológica valiosa los depósitos fluviales también cobran gran importancia en el aspecto económico, ya que

son, desde proveedores de material para la construcción, hasta contenedores o reservorios de yacimientos minerales y de agua subterránea. Existen métodos recientes que intentan clasificar, describir e interpretar los ambientes fluviales de una manera estandarizada basándose en parámetros como: la jerarquía de los estratos y las superficies limítrofes; las litofacies; la asociación de litofacies o elementos arquitecturales; y la geometría de los cuerpos sedimentarios.

**Tabla 1.** Clasificación simplificada de los ambientes de depositación

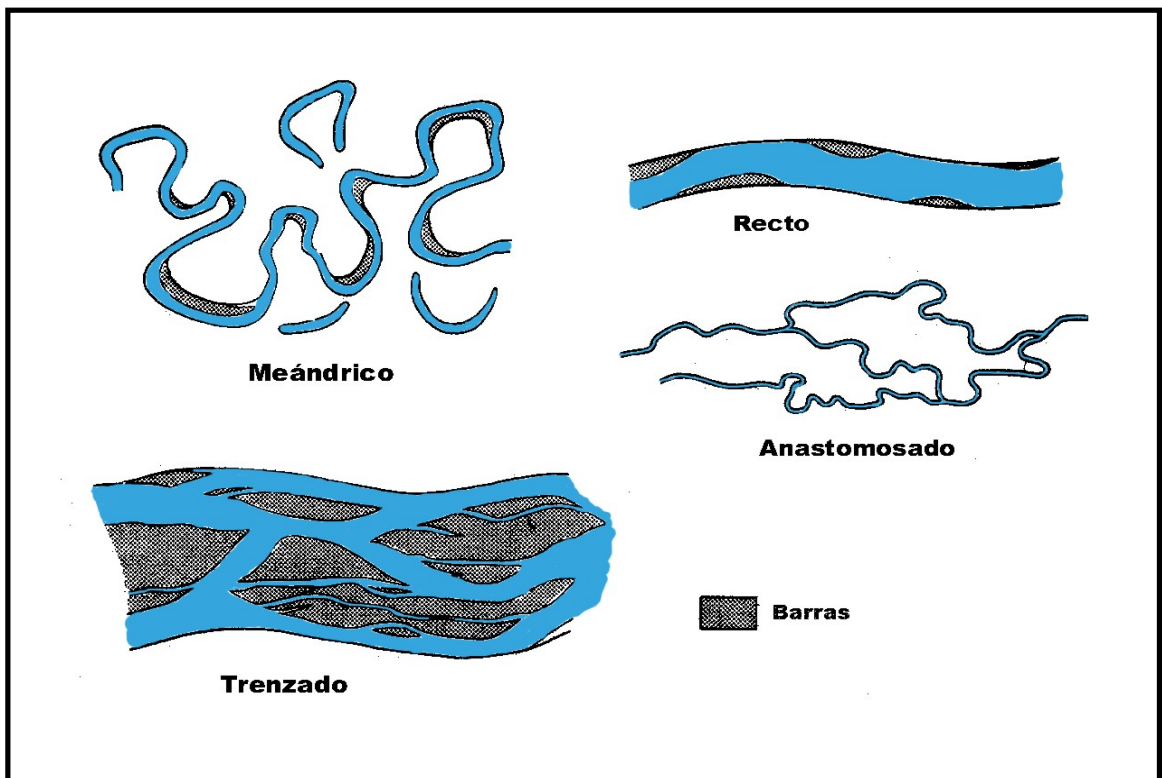
Conjunto Depositacional Primario	Ambiente Principal	Subambiente
*CONTINENTAL	*Fluvial	Abanicos Aluviales
		Corrientes Trenzadas
		Corrientes Meándricos
	Desértico	
	Lacustre	
	Glaciar	
MARINO MARGINAL	Deltaico	Planicie Deltaica
		Frente Deltaico
		Prodelta
	Playa / Islas Barrera	
	Estuario / Lagunal	
	Plataforma mareal	
MARINO	Nerítico	Plataforma Continental
		Arrecife orgánico
	Oceánico	Talud Continental
		Piso oceánico profundo

Fuente Boggs 2001

## 6. SISTEMAS FLUVIALES

Los depósitos fluviales están constituidos por sedimentos que se acumulan a partir de la actividad de los ríos. Estos depósitos se generan en diversas condiciones climáticas, desde desérticas hasta glaciales, sin embargo, en función de su sinuosidad (longitud del canal/longitud del valle) se reconocen tres sistemas fluviales bien definidos: sistema de ríos trezados (*braided*), sistema de ríos meándricos (*meandering*), y sistema de ríos anastomosados (*anastomosing*) (Fig. 1). Se incluyen también dentro de la clasificación de depósitos fluviales a los procesos de deslizamiento por gravedad asociados (sistema de abanicos aluviales).

**Figura 1.** Esquema ilustrativo de los diferentes tipos de canales dentro de los sistemas fluviales



Fuente [www.geologia.uson.mx](http://www.geologia.uson.mx)

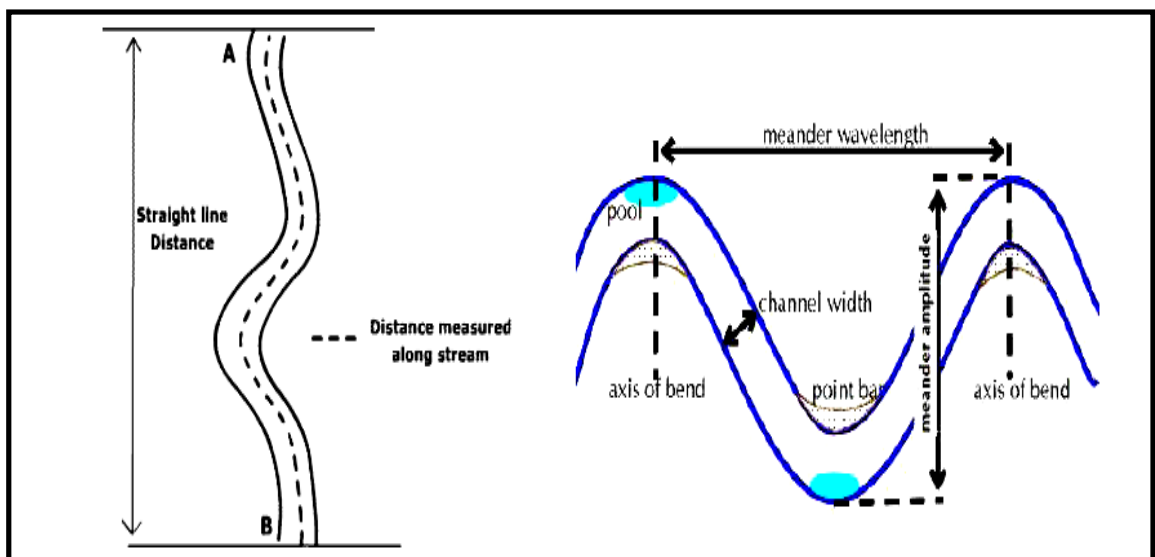
Los sistemas fluviales han sido ampliamente estudiados, una compilación de trabajos importantes pueden ser encontrados en: Collison y Lewin (1983), Miall (1985), Flores y otros (1985), Reading (1986), y Ethridge y otros (1987), Miall (1992), Bridge and Mackey (1993), y Miall (1996), entre otros.

## 6.1 Sinuosidad en Canales Fluviales

La sinuosidad es una característica de los canales fluviales, la cual se presenta en ambientes que van desde condiciones desérticas hasta glaciales, esta ligada íntimamente con la energía del medio.

El conocimiento de la sinuosidad puede aportar datos relevantes con relación tanto a datos históricos como la fuerza de la acción lineal a lo largo del cauce.

**Figura 2.** Esquema representativo de la sinuosidad en canales fluviales señalando las partes representativas tomadas en la formula matemática



Fuente: [www.uwsp.edu/geo](http://www.uwsp.edu/geo)

$$\text{Sinuosidad} = \frac{\text{Distancia medida entre dos puntos (A-B) en el interior del canal}}{\text{Distancia en línea recta entre dos puntos (A-B)}} \quad (\text{ecuación 1})$$

Los factores que afectan directamente esta característica de los canales son la energía y la geología estructural de la zona, este factor es medible matemáticamente mediante la fórmula de la Figura 2. Cuando se tienen áreas con pendientes muy leves, la energía es menor provocando que el agua disminuya su velocidad y se tome el tiempo de moldear el cauce adoptando formas sinuosas o cóncavas y su longitud A-B es menor. Mientras que cuando se tiene áreas con pendientes mayores la energía es mayor, por lo tanto una velocidad mayor y un factor de Sinuosidad (S) menor, en la Tabla 2 se muestra como afecta el tipo de canal en el factor S y su relación ancho profundidad.

**Tabla 2.** Índices de sinuosidad

Tipo de Canal	Índice de Sinuosidad	Relación ancho/profundidad
Rectilíneo	< 1,05	< 40
Entrelazado	1,05 – 1,50	< 40
Sinuoso	> 1,50	< 40
Anastomosado	> 1,80	> 40
Meandriforme	> 2,00	< 10

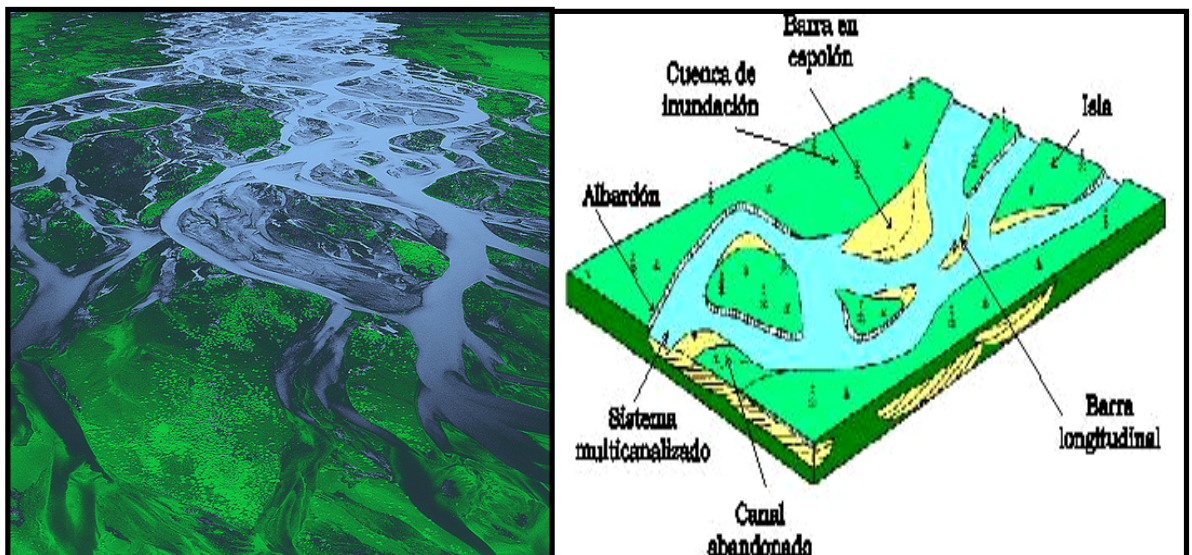
Fuente: Modificado de Morisaw a (1985).

Sin embargo, no siempre que se tenga un canal rectilíneo quiere decir que se tengan altas energías, hay que tener presente el factor estructural de la zona. Por ejemplo una falla con extensión considerable puede establecer una trayectoria rectilínea a lo largo de la falla en un área de baja pendiente

provocando que su estrato rocoso resistente se oponga a la profundización del cauce y solo permita al cauce el seguimiento de algunas fracturas que puedan existir. En áreas montañosas, con frecuencia la longitud media del valle y la longitud del cauce coinciden; entonces el índice de sinuosidad hidráulica es igual o algo superior a 1. Solo en áreas donde el valle se abre y permite el desarrollo de grandes meandros en la llanura de inundación aparecen diferencias entre longitud del valle y longitud del cauce: esto puede ocurrir en cursos bajos de los ríos, donde las llanuras aluviales adquieren mayor amplitud. La medición de la longitud media de un valle resulta complicada cuando gran parte del mismo discurre por áreas abiertas cuyos límites son imprecisos.

## 6.2 Sistema de Ríos Trenzados

**Figura 3.** Río Rakaia, Nueva Zelanda, ejemplo de un río trenzado y elementos de un sistema de ríos trenzados.



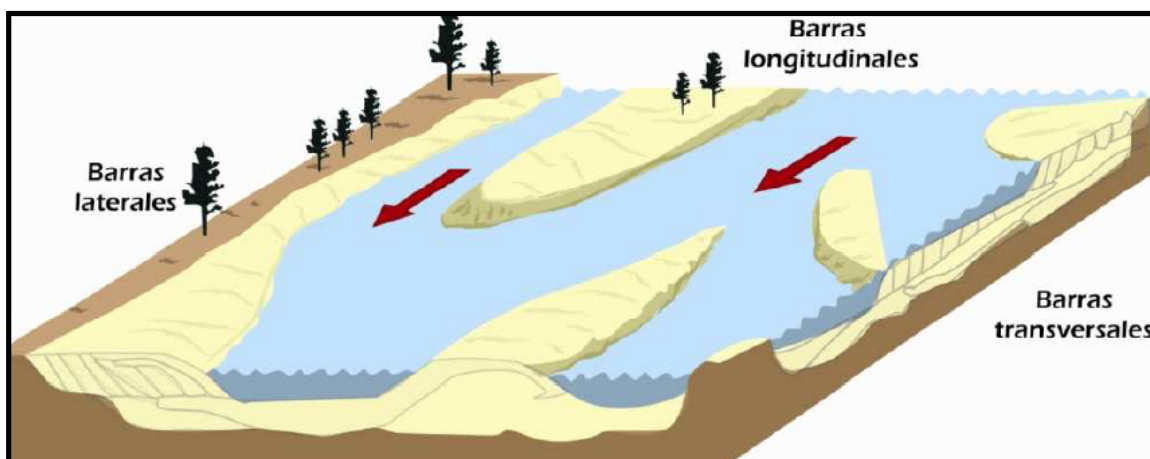
Fuente: [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

### 6.2.1 Procesos de depósito

Este sistema fluvial es caracterizado por muchos canales separados por barras y pequeñas islas (Figura 3.) con una sinuosidad menor que 1.5; comúnmente se encuentran donde los sedimentos son abundantes, las descargas de agua son altas y esporádicas, siendo estos sobrecargados con sedimentos; esto ocurre generalmente en las partes distales de los abanicos aluviales. Durante los períodos de descarga alta, la corriente en los canales es rápidamente sobrecargada de sedimentos gruesos, formando barras alrededor de las cuales la corriente se desvía; desarrollándose repetitivas barras separadas de los canales, generado así, el aspecto trenzado de este sistema fluvial.

Los sistemas de ríos trenzados son definidos a partir de los diferentes tipos de barras que en ellos se generan, y que pueden ser agrupadas en tres tipos básicos (Figura 4.):

**Figura 4.** Características morfológicas de un sistema fluvial trenzado



Fuente: Modificado de Miall A. D, 1996

### **6.2.2 Barras Longitudinales**

Son las barras que se forman en la parte media de los canales cuando los sedimentos más gruesos incluidos en la corriente (gravas y arenas), son depositados debido a la pérdida de competencia en el transporte, orientándose con el eje principal paralelo a la dirección de la corriente. La fracción gruesa del material se concentra a lo largo del eje principal y en la parte basal de la barra, tendiendo a existir una disminución en el tamaño del grano hacia arriba de la misma, y corriente abajo (Figura 4). La estructura interna de las barras longitudinales está representada por una estratificación principalmente masiva, aunque pueden presentarse capas con una estratificación horizontal pobremente desarrollada.

### **6.2.3. Barras Transversales**

Se forman de manera transversal al flujo principal de la corriente, y son muy características en sistemas de ríos trenzados que transportan una mayor carga de detritos de tamaño arena (Figura 4). Las barras transversales presentan formas rómbicas.

### **6.2.4. Barras Laterales**

Son barras muy largas que se desarrollan en áreas de energía relativamente baja a lo largo de las porciones laterales de la corriente principal (Figura 4).



caso, el porcentaje de gravas en los depósitos tipo *Scott* siempre será mayor del 60%. Sin embargo, existen regiones donde los flujos no son tan constantes, lo que permite que la arcilla y el lodo puedan ser depositados sobre estas porciones, y con ello, preservar secuencias verticales donde la proporción de gravas varíe del 10 al 70%; en estas secuencias, llamadas del tipo *Donjek*, la estratificación cruzada plana y cóncava son las estructuras primarias más características de los horizontes arenosos.

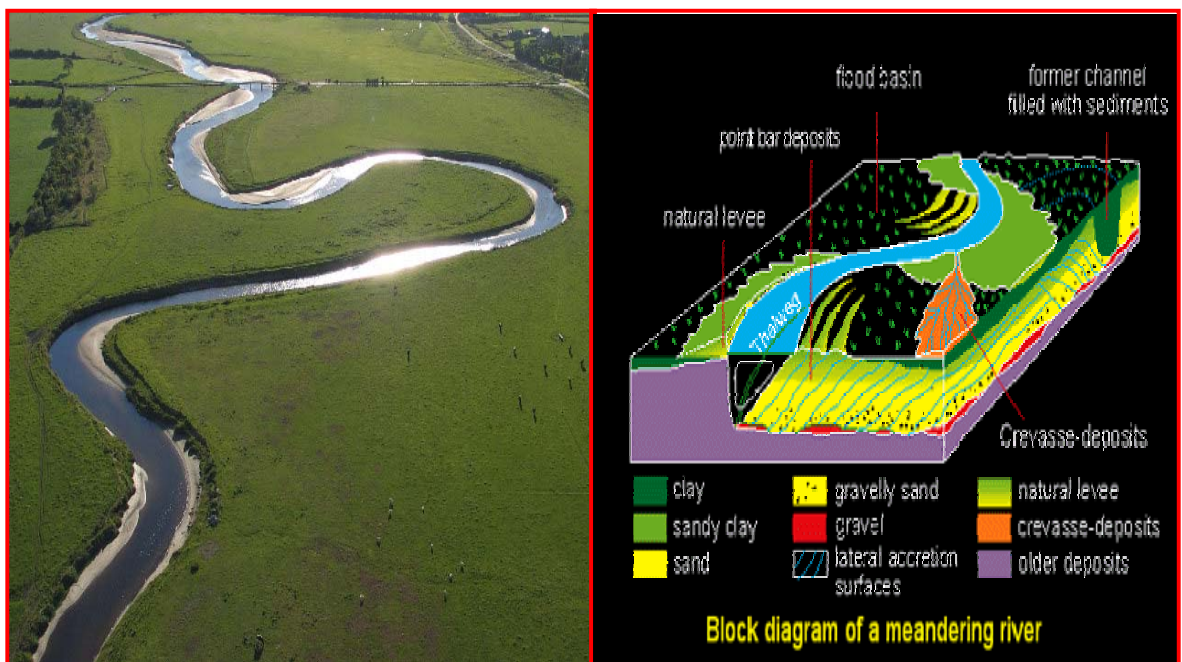
En las planicies distales las corrientes son distribuidas por canales muy someros. Los gradientes en la pendiente y la competencia en el transporte de las corrientes son más bajos que en la porción proximal, por lo que la arena es el producto más característico de sedimentación en estas áreas. Las típicas secuencias verticales que se generan en las planicies distales se conocen como del tipo *Platte*, en donde horizontes de arena con estratificación cruzada plana representan los sedimentos más abundantes; aunque también pueden llegar a desarrollarse horizontes de gravas debido a la formación de barras longitudinales, o bien, depósitos finos de desborde de canal. La secuencia vertical tipo *Bijou Creek* representa planicies distales en donde la canalización es muy incipiente y los canales son muy someros, llegando a depositar arenas muy finas con laminación horizontal.

### **6.3 Sistema de Ríos Meándricos**

Los sistemas de ríos meándricos tienden a ser confinados en un canal principal que presenta una sinuosidad mayor a 1.5. En estos sistemas el gradiente de la pendiente es mucho menor, y los sedimentos involucrados en la carga de las corrientes son más finos. Algunos ocurren como sistemas independientes, otros pueden representar un cambio gradual (corriente abajo) de un sistema de ríos trenzados; comúnmente los grandes sistemas de ríos meándricos desarrollan en su desembocadura sistemas deltaicos de

depósito. Algunos autores prefieren llamar sistema de ríos de alta sinuosidad a este tipo de sistema fluvial (Miall, 1987).

**Figura 6.** A la izquierda el Rio Wampool noreste de Inglaterra, ejemplo de un río meándrico, a la derecha esquema ilustrativo señalando las partes que componen este sistema meándrico



Fuente: Modificado de [www.skyscrapercity.com](http://www.skyscrapercity.com)

### 6.3.1 Procesos de depósito

Los principales elementos morfológicos de un sistema de ríos meándricos son; el canal principal, las barras de punta, los bordes naturales, las planicies de inundación, los lagos laterales, y las áreas de desborde (Figura 6.). Ya que en estos sistemas los sedimentos se acumulan por la acción del canal principal y de la inundación periódica de la planicie adyacente, los depósitos están asociados a estos elementos morfológicos:

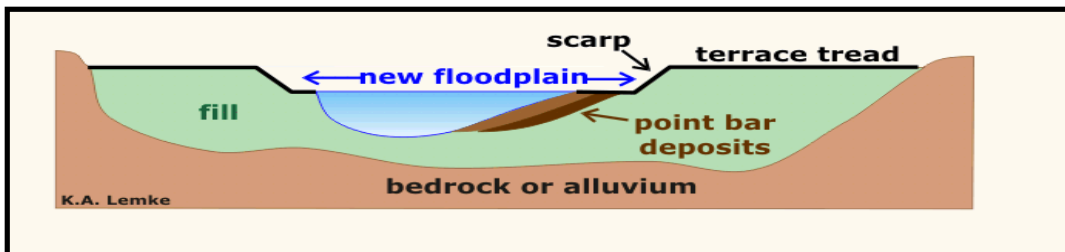
### 6.3.1.1 Depósitos de canal

Son depósitos compuestos generalmente de material grueso que los ríos pueden mover o transportar durante los períodos de máxima energía. Este material incluye gravas, troncos u otro material vegetal de grandes dimensiones, y lodo parcialmente consolidado que ha sido erosionado de las paredes del canal. Tienden a ser depósitos de forma lenticular, en donde lo más característico es la imbricación de clastos.

### 6.3.1.2 Depósitos de Barras de Punta (Point bar deposits)

Estos depósitos se generan en las partes interiores de las curvas del canal a partir de un flujo en espiral que se crea en dicho punto Figura 6. Debido a este flujo, los granos más gruesos tienden a ser depositados en las partes basales de la barra, y los sedimentos finos en la parte superior, dando como resultado una secuencia de disminución de tamaño de grano hacia arriba de barra de punta. La estructura sedimentaria primaria más característica de los depósitos de barras de punta es la estratificación cruzada cóncava, tanto de pequeña como de gran escala.

**Figura 7.** Corte transversal de un canal meándrico con algunas de las partes que lo conforman como el point bar, donde se depositan los sedimentos



Fuente: [www.uwsp.edu](http://www.uwsp.edu)

#### **6.3.1.3 Depósitos de Borde**

Estos depósitos se desarrollan en la parte cóncava de la curva que delimitan los meandros (Figura 8). Son de mayor espesor y de grano más grueso cerca de los canales, y se hacen más finos a medida que se avanza hacia la planicie de inundación. Arenas finas con estratificación horizontal y ondulitas de corriente que subyacen bajo lodos laminados, son muy comunes en los depósitos de barra.

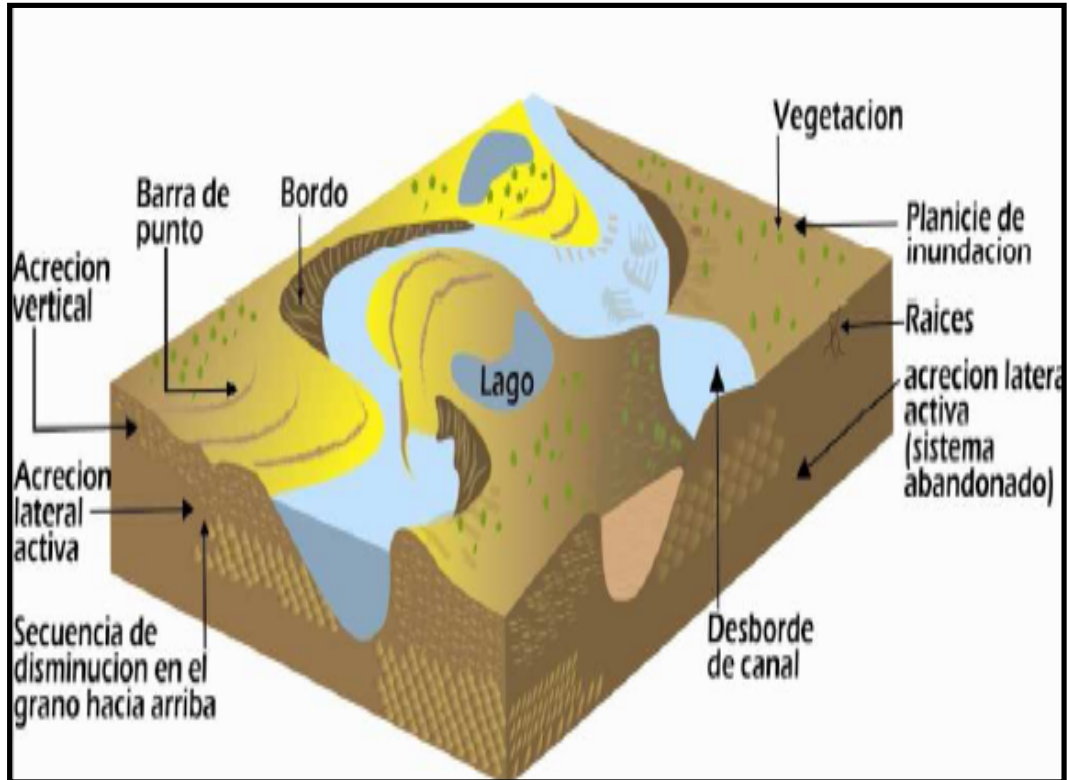
#### **6.3.1.4 Depósitos de Planicies de Inundación**

Están constituidos por sedimentos finos depositados por suspensión a partir de las aguas que inundan la planicie adyacente al canal (Figura 8). Estos depósitos tienden a desarrollar poco espesor, y comúnmente contienen grandes cantidades de material vegetal; así mismo, presentan una bioturbación moderada.

#### **6.3.1.5 Depósitos de Desborde**

Estos depósitos se generan cuando las aguas de la corriente principal logran romper los muros que la confinan (Figura 8). La sedimentación por tracción y suspensión ocurre rápidamente cuando el agua cargada, tanto con material grueso como fino, pierde su capacidad para transportarla, dando como resultado depósitos gradados.

**Figura 8.** Características morfológicas de un sistema fluvial meándrico



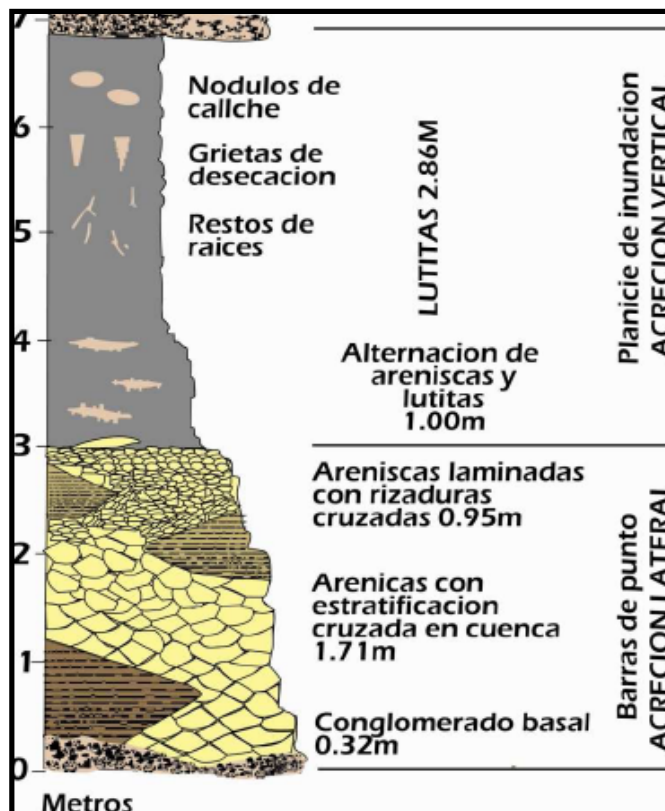
Fuente: modificado de Miall A.D. 1996.

### 6.3.1.6 Depósitos de Lago Lateral

Consisten de sedimentos finos, arcillas y lodo, que han sido introducidos a los lagos laterales durante las épocas de inundaciones. Son comúnmente laminados, y pueden llegar a presentar restos de plantas, así como ostrácodos y moluscos de agua dulce.

### 6.3.2 Características de los sedimentos

**Figura 9.** Secuencia típica de disminución en el tamaño de grano (grano decreciente hacia el tope) en depósitos de sistemas fluviales meándricos



Fuente: modificado de Miall A.D.

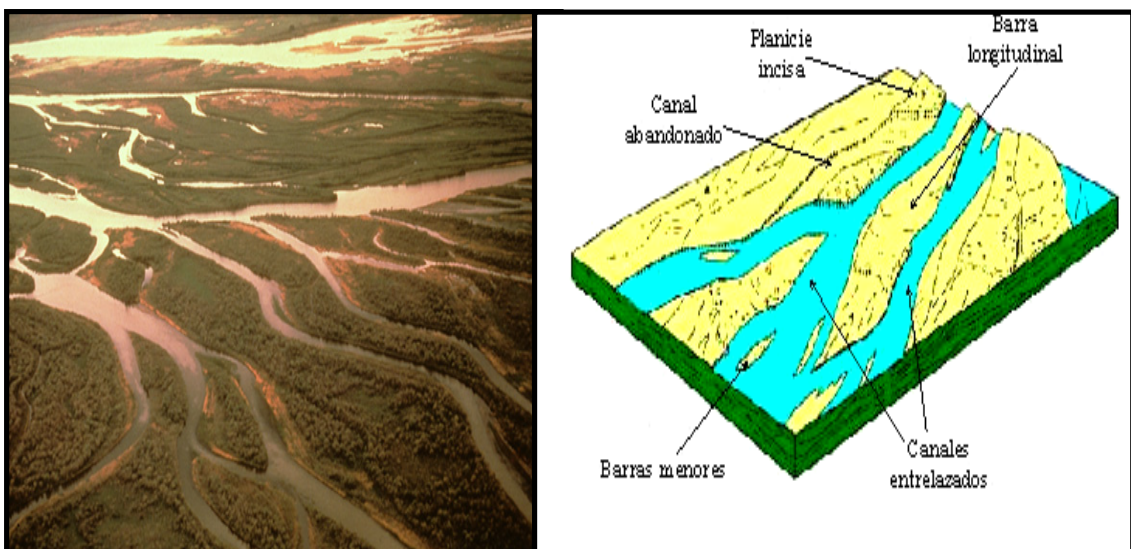
La sedimentación dentro de los sistemas de ríos meándricos se lleva a cabo casi simultáneamente en todos los sitios mencionados con anterioridad, ya sea sobre el canal o sobre la planicie de inundación. Cuando el canal del río migra por su acción erosiva, los diferentes ambientes del sistema migran también lateralmente y los sedimentos depositados en ambientes continuos llegan a sobreponerse. Así, como resultado de la acción meándrica, los depósitos gruesos de los canales tienden a subyacer bajo secuencias arenosas que disminuyen su tamaño de grano hacia arriba (depósitos de barras de punta), los cuales a su vez subyacen a lodos y arcillas de los depósitos de planicie de inundación. A partir de este punto se da el modelo

típico para un sistema de ríos meándricos (Figura 11.) que fue propuesto por Allen (1970), siendo retomado por diversos autores que han realizado trabajos sobre este sistema fluvial (Cant, 1978 y 1982; Walker y Cant, 1984; Galloway, 1985; Fraser, 1989; Boggs, 1989; entre otros).

Este modelo consiste de una secuencia de disminución de tamaño de grano hacia arriba que da inicio con un conglomerado basal sobre una superficie de erosión. Esta unidad basal es reemplazada por arenas con estratificación cruzada cóncava de una barra de punta, cuyo tamaño de grano decrece hacia arriba; algunas arenas con laminación paralela pueden estar presentes como cuerpos lenticulares (acreción lateral). La parte superior del modelo está caracterizada por los lodos y arcillas de los depósitos de la planicie de inundación que contienen restos de raíces, grietas de desecación, y posiblemente estructuras de bioturbación (acreción vertical).

#### 6.4 Sistema de Ríos Anastomosados

**Figura 10.** Rio Saskatchewan, Canadá. Ejemplo de um Rio Anastomosado. Y elementos morfológicos del sistema de ríos anastomosados



Fuente: [www.geo.uu.nl](http://www.geo.uu.nl)

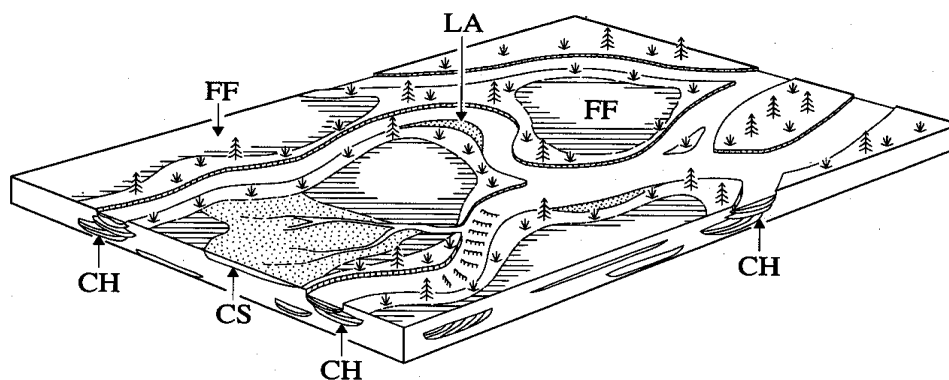
Este sistema ha sido considerado como un tipo especial de los sistemas de ríos meándricos, en donde se desarrolla un sistema de canales de muy alta sinuosidad de manera estable y permanente (Miall, 1977).

#### 6.4.1 Procesos de depósito

Para Smith (1980), el término anastomosado es empleado para describir un complejo de depósito fluvial de gradiente muy bajo ( $0.09 - 0.012 \text{ m/km}$ ), en donde se interconectan una serie de canales de muy alta sinuosidad, angostos y relativamente profundos. Además, en estos sistemas los canales son separados por planicies de inundación que consisten de islas con vegetación, muros naturales y áreas donde pueden desarrollarse depósitos de desborde (Figura 10.).

Los canales en estos sistemas son rellenos con arena y grava, formando depósitos lenticulares, limitados por depósitos areno-arcillosos de muro natural. Por otra parte, en las planicies de inundación, los depósitos característicos los constituyen materiales limo-arcillosos finamente laminados, incluyendo depósitos finos de pantanos con un alto contenido de materia orgánica.

**Figura 11.** Modelo arquitectónico de un río anastomosado



Fuente: [www.geologia.uson.com](http://www.geologia.uson.com)

#### **6.4.1.1 Características de los sedimentos**

Debido a que los depósitos de canal en estos sistemas contienen sedimentos muy similares a los de los otros sistemas fluviales como gravas estratificadas y arenas con estratificación cruzada cóncava (Cant, 1982), no pueden ser tomados como diagnóstico de este tipo de sistemas. Sin embargo, de acuerdo a Smith (1983), las facies distintivas de los sistemas de ríos anastomosados (Figura 11.) son aquellas que se desarrollan en las áreas de intercanales, siendo muy comunes los depósitos de desborde y de canal de desborde. Otra de las características distintivas de los sedimentos finos generados en las planicies de inundación de estos sistemas, es la presencia abundante de raíces y la acumulación de materia orgánica.

Para Nadon (1994), los sedimentos de los ríos anastomosados están representados por cuerpos elongados de arenisca, encajonados entre delgadas capas de areniscas de grano fino y lutitas. Así mismo, Nadon (1994) concluye que para que una secuencia de este tipo de sistema fluvial se preserve, deben de mantenerse las características de bajo relieve y muy bajo gradiente por largos períodos geológicos; y que las cuencas de antepaís y de graben son los sitios que mejor mantienen estas condiciones.

#### **6.4.1.2 Interpretación De Canales**

La determinación de la sección transversal de la carga de fondo suspendida de un paleocanal es difícil, incluso en condiciones óptimas de exposición. Sin embargo, la composición de los canales, geometría y estructura interna proveen las bases necesarias para estudiar los canales modernos para allanar el registro estratigráfico. La clasificación utiliza atributos fundamentales de cualquier depósito antiguo, sistema de composición y geometría de la armazón, elementos que pueden ser definidos en afloramiento o en el subsuelo, o ambas. Los modelos conocidos como modelos fluviales se

pueden colocar dentro de un espectro de sistemas depositacionales análogos, clasificación hecha por Schumm's, donde las secuencias fluviales que no se ajustan fácilmente a los modelos idealizados también pueden ser interpretados. La composición y geometría de un cauce con carga agradacional, cauce mixto, y carga suspendida de los paleocanales rellenos son analizados a continuación.

#### **6.4.1.2.1 Canales de carga de Fondo**

Los canales de carga de fondo son secuencias dominadas por arenas. Comúnmente presentan arenas gruesas y grava, pero no necesariamente son componentes; la secuencia puede consistir exclusivamente de arenas finas a medias. Son caracterizados por tener un ancho y profundidad considerables y una tendencia para erodar estos; dichos factores producen un cuerpo de arena tabular. Canales rectos son caracterizados por profundidad relativamente uniforme a lo largo de la base, esto puede ser reflejado en el relieve de la superficie de la base del cuerpo de arena y por preservación de la continuidad lateral de las capas. El amalgamamiento de los cuerpos de arena multilaterales resulta de una migración lateral rápida de los canales de carga de fondo.

La carga mixta reciente de los canales, la abundancia de finos, la carga suspendida mixta de sedimentos antiguos (89 – 97% de la carga total) de los sistemas fluviales favorecen la depositación y preservación de los lodos de la cuenca de inundación. La carga mixta de los canales es conocida por ser tipificada por tamaño de grano fino, dando lugar a modelos de point-bar y sus múltiples variaciones.

#### **6.4.1.2.2 Canales con Carga Suspendida**

Los paleocanales de carga suspendida tienen un cauce estrecho y son confinados; principalmente sufren erosión hacia la base, en torno a los

sedimentos ricos en arcilla y son establemente tobogán formado en bancos de canales con alguna inclinación. La depositación de los canales ocurre predominantemente a lo largo del banco o borde, y puede haber sido por un lado en segmentos muy sinuosos del canal, o simétrico al segmento de canal recto. El canal dominante de sedimentos varía de arena muy fina a limo y arcilla, pero algunos sedimentos muy gruesos pueden estar presentes. Los cuerpos de arena son lenticulares a través de la sección y tienen forma con patrones sinuosos o anastomosados. Las partes de los canales suelen ser encapsuladas en depósitos de grano fino de la cuenca inundada y tienden a apilarse verticalmente en secuencias de granos finos ascendentemente o bien puede mostrar poca variación vertical si la gama de tamaños de grano se limita. Internamente, las secuencias de canal de carga de fondo reflejan el dominio de la acreción de las unidades longitudinales, transversales, laterales y barras en ladera.

#### **6.4.1.2.3 Canales de Carga Mixta**

Estos depósitos consisten en arenas y en menor proporción limos y arcilla. Estos canales sinuosos con profundidad variable a lo largo de la línea límite de la corriente reflejan el desarrollo de irregularidades o estratificación de arena y en la preservación de lentes, discontinuidades remanentes de llanura de inundación entre secuencias de canales. Un registro de depósitos de bancos mixtos y de capas acrecionadas (depósitos de barra en punto y lagos de canales) son preservados en el canal, y una secuencia repetitiva grano decreciente, tipifica mejor la sección vertical a través de los depósitos en una franja meándrica. Los canales meandriformes y consecuentemente la acreción de las barras en punto, combinadas con el stacking y la amalgamación sucesiva de los canales, comúnmente producen una composición de cuerpos de arena que son mucho más extensos que los canales originales. Los núcleos de los canales proveen el mejor registro de las verdaderas dimensiones de un canal.

## 7. SÍSMICA

### 7.1 Métodos Geofísicos

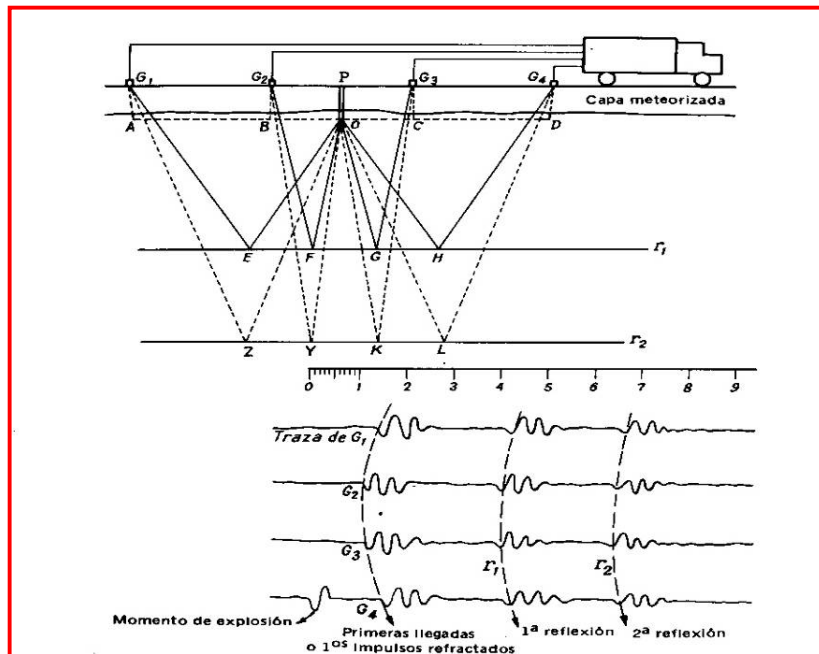
La geofísica es el estudio de la tierra donde se utilizan medidas físicas que proporciona información del subsuelo el cual no puede ser observado directamente. Por ello, es necesario acudir a instrumentos apropiados que se utilizan usualmente desde la superficie o desde el aire ( imágenes satelitales), mientras que la geología basa sus estudios en investigaciones y observaciones hechas directamente en la roca, ya sea expuesta en afloramiento o núcleos de pozos, de donde se obtiene gran cantidad de información como lo es: su estructura, composición e historia (Olaya. L, 2004). Por otra parte, estas dos ciencias depende la una como de la otra y se diferencia principalmente por el tipo de datos que se usan. Estos datos tienen un rango amplio y variado, requiriendo de diferentes tipos de métodos para su análisis. Algunos ejemplos son: magnetometría mide variaciones del campo magnético terrestre, gravimetría; mide variaciones del campo gravitacional terrestre, método eléctrico y electromagnético; mide la intensidad del campo magnético y el campo eléctrico inducido, radiométrico; radioactividad natural de los materiales terrestres y el método sísmico que mide el tiempo de llegada de la refracción y reflexión. Este último método es uno de los más importantes ya que mediante la respuesta de las ondas debido a las interfaces de la roca, permite determinar la geometría y la posición de las capas de roca en el subsuelo, lo cual hace que la técnica sea de gran utilidad para la industria de exploración de hidrocarburos.

### 7.1.1 Sísmica De Reflexión

Este método se ha aplicado con gran éxito en exploraciones para la industria petrolera, localizando determinado tipo de estructuras geológicas con las que a menudo se encuentra asociado el petróleo.

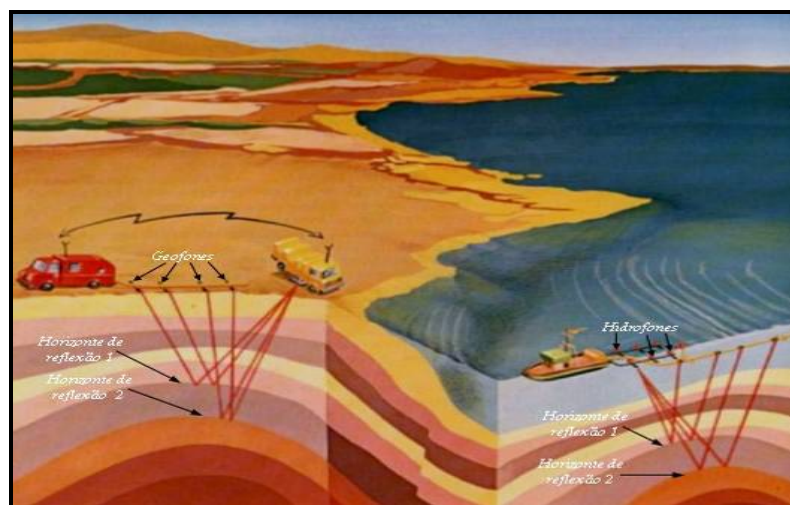
El método de reflexión básicamente involucra lo siguiente: la detonación de un explosivo en un pozo somero o en la superficie del terreno, que se transforma en energía vibratoria la cual se transmite a través del medio elástico hacia la profundidad. Después de un cierto intervalo, esta energía es reflejada por cualquier discontinuidad física o por estratos subyacentes a la superficie terrestre o cambios importantes en el tipo de roca que presenta propiedades acústicas y son definidas por el coeficiente de impedancia acústica ( $Z$ ) que es el producto de la densidad ( $\rho$ ) y la velocidad ( $v$ ). Posteriormente, esta energía retorna a la superficie, provocando el movimiento de un geófono o hidrófono el cual toma el registro de la cantidad de tiempo que tardó la onda en viajar hasta cada una de las capas del subsuelo, así como también captura otras características de la onda como su amplitud, fase y contenido frecuencial (Figura 12). Después, se aplican ciertas correcciones a los tiempos de arribo leídos en los sismogramas de esta manera es factible conocer la velocidad de transmisión de la onda reflejada y esta es medida por el tiempo que tarda en llegar a la superficie, siendo posible inferir la posición y geometría de las diferentes capas obteniendo como producto final una imagen del subsuelo (Olaya. I, 2004). Por otra parte, esta energía con la cual se genera la reflexión a una interfase puede ser medida en términos del coeficiente de reflexión de la interfase, el cual puede ser positivo o negativo, dependiendo si hay rocas más blandas sobre mas duras o viceversa. En una sección sísmica la reflexión es positiva o negativa; si es positiva, adquiere cierta forma, entonces una reflexión negativa tendrá la misma forma pero invertida, es decir, una cresta será un valle y viceversa.

Figura 12. Esquema General de la Sísmica de Reflexión



Fuente: Informe ICP

Figura 13. Esquema de prospección aplicado en tierra y mar



Fuente: [http://histpetroleo.no.sapo.pt/metodo\\_sismico\\_te\\_ma.jpg](http://histpetroleo.no.sapo.pt/metodo_sismico_te_ma.jpg)

### **7.1.1.1 Limitaciones en el Método de Reflexión**

El método Sísmico al igual que otros métodos geofísicos presenta ciertas limitaciones, algunas de ellas son:

- La señal recibida después de la reflexión a una profundidad de varios miles de pies es muy pequeña, teniendo una frecuencia baja, del orden de decenas de hertz siendo ésta muy deficiente provocando que la imagen de los reflectores no conserven una buena calidad, limitando así la resolución vertical y horizontal.
- Una señal puede quedar atrapada entre dos reflectores (incluyendo la superficie del suelo o del mar) y arribar tarde al receptor casi al mismo tiempo de la señal de un reflector más profundo (múltiples), produciendo una copia del reflector original dando lugar a confusión entre la reflexión primaria y el múltiple.
- La velocidad de propagación del sonido varía lateral y verticalmente en la tierra, dando lugar a determinaciones falsas en su espesor al calcular la sección distancia-profundidad.
- El recorrido de la onda no es completamente vertical y puede ser complejo dependiendo de los buzamientos estructurales, provocando incertidumbre en los reflectores.

## **7.2 Sísmica 3-D**

La evolución continua de la corteza terrestre ha llevado consigo, diferentes procesos geológicos complejos, como son: la depositación, sedimentación, plegamiento tectónico y posterior fallamiento, en los cuales se da la acumulación de fluidos, como es el caso del hidrocarburo. Estos depósitos se

encuentran a grandes profundidades del subsuelo, haciendo que su ubicación y acceso sea complejo. En vista de ello, se han desarrollado complejas e interesantes técnicas que han requerido de un alto grado de investigación y experimentación en todas las fases de la geofísica del petróleo, para llegar al desarrollo de la sísmica 3D.

Esta herramienta ha sido de gran ayuda para la geología, su poder de resolución ha proporcionado numerosas y nuevas ideas en los procesos geológicos, ya que permite mapear características estructurales y estratigráficas en tres dimensiones, a un nivel de escala inalcanzable con otros métodos. Esta técnica consta de: un sofisticado equipo de campo, de adquisición sísmica y por último una etapa de procesamiento, estos dos últimos requieren de hardware y software complejo y de alta capacidad. La gran acogida que ha tenido, ha conllevado a mejorar esta herramienta, como ocurre con la gran gama de software que existen en el mercado.

### **7.2.1 Elementos de la Sísmica 3D**

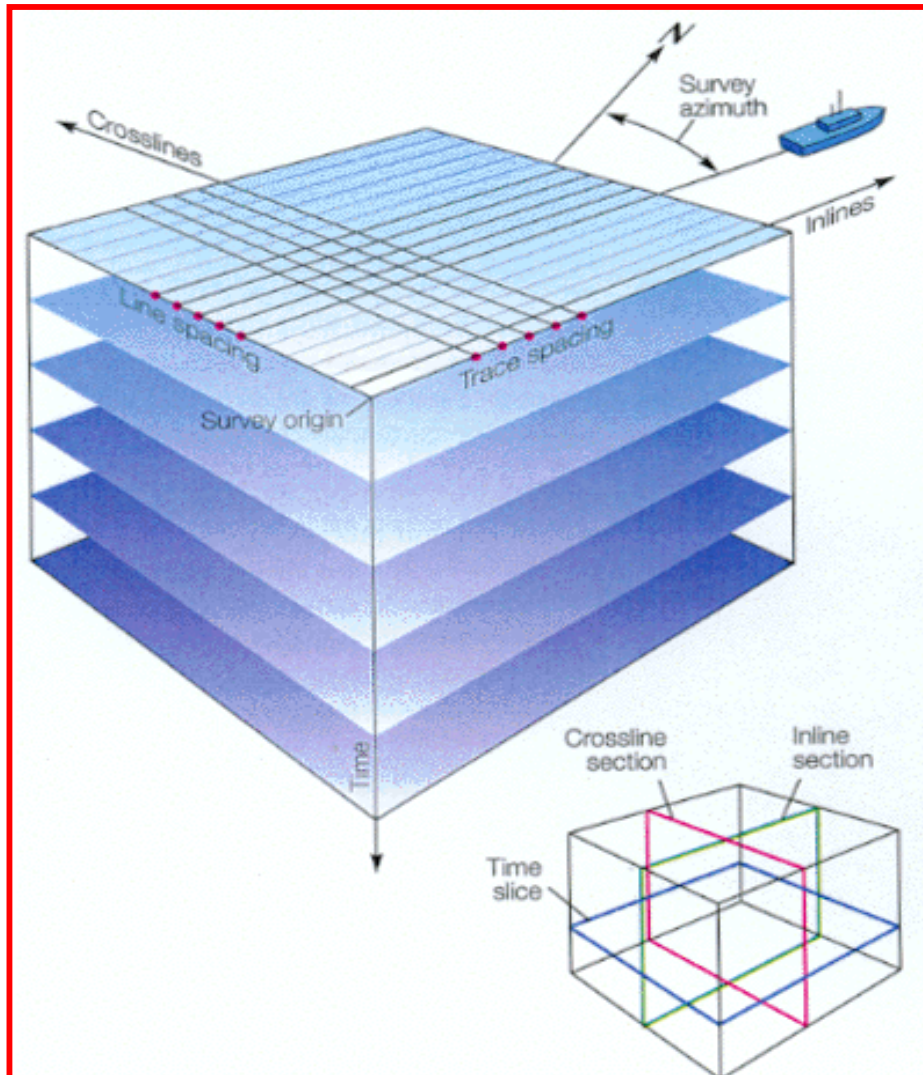
Los elementos de la sísmica 3D proporcionan información importante para la interpretación. Estos son:

**7.2.1.1 Inline:** Línea sísmica en un Survey 3D paralela a la dirección en la cual los datos fueron adquiridos. En sísmica marina, es la dirección en la cual se mueve el bote. (Figura 14)

**7.2.1.2 Crossline:** Línea sísmica en un Survey 3D perpendicular a la dirección en la cual los datos fueron adquiridos. (Figura 14)

**7.2.1.3 Time Slice:** Despliegue horizontal o vista del mapa de datos sísmico 3D a un tiempo en la sísmica, pero diferente momento de depositación. (Figura 14)

**Figura 14.** Elementos Sísmicos 3D. Cuadro rojo *Crossline*, Cuadro azul, *Time Slice*, Cuadro Verde *Inline*.



Fuente: Informe ICP

### 7.2.2 Ventajas de la Sísmica 3D

La ventaja de la sísmica en 3D radica en la enorme cantidad de información que proporciona con respecto a la 2D, con la que se reducen al máximo las incertidumbres con respecto a la geometría y la posición de las capas en el

subsuelo (Figura 15). Esta sísmica hace parte integral de la exploración de hidrocarburos puesto que permite: interpretar la corteza tectónica y los paleoambientes de depositación, identificar las potenciales trampas de hidrocarburos (estructurales, estratigráficos o combinados), evaluar los potenciales de reservorio, evaluar la roca fuente y estimar la carga de petróleo en la cuenca y evaluar la cantidad y naturaleza de los fluidos en reservorios individuales, ayuda a desarrollar estrategias para la planificación de la perforación, mejora significativamente el manejo del riesgo en la exploración del petróleo (Catuneanu, O 2006).

### **7.2.3 Interpretación Sísmica 3-D**

El estudio de la interpretación sísmica utiliza algunos elementos como son: *crossline*, *inline*, *time slice*, *horizon slice* a través del volumen sísmico en la sección vertical. El *time slice* permite hacer un barrido rápido, e identificar zonas de interés como son trazas continuas. La sección sísmica muestra buzamientos registrados en el *inline* como son fallas, que se visualizan como discontinuidades de las trazas. Estos buzamientos pueden ser encontrados mediante un barrido a través de sucesivas secciones sísmicas *inline* o tomando un *crossline* a través del volumen sísmico, identificando de esta manera sistemas depositacionales. Por ejemplo, los canales de ríos, usualmente cortan sus estratos geológicos por donde van cruzando, como sucede con los sistemas meándricos. Dichos modelos pueden ser vistos en un *time slice* mientras que en una sección vertical no, debido a la disposición del área de los canales o planos de falla. Es posible ver estos modelos mediante la interpretación de varios *inline* verticales o *crossline*, debido a que mas de un canal o una falla pueden no ser detectados si únicamente se interpreta la sección vertical. Los *time slice* así como los *horizon slice* son de gran ayuda para tales interpretaciones, dependiendo del objetivo del estudio y de la calidad de los datos, sin embargo es mejor reforzar esta interpretación con el estudio del *inline* y el *crossline*.

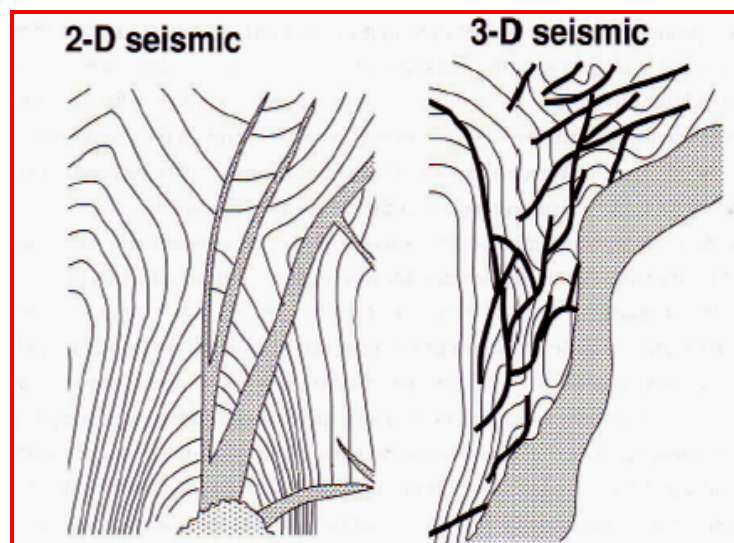
Además de proporcionar detalles estratigráficos y estructurales, la sísmica 3D se ha convertido en un elemento esencial para la descripción de reservorios (Figura 15). Sus usos son particularmente generalizados en diferentes partes del mundo, donde nuevas reservas son generadas por extensión en las perforaciones que están basadas en detalles conocidos de las características del reservorio. Los reservorios muestran un rango de propiedades físicas que pueden ser detectadas como cambios en la respuesta de las propiedades de intervalos de tiempo. El lapso de tiempo en el análisis sísmico evoluciona rápidamente para la identificación de hidrocarburos producidos en un reservorio. Los trabajos sísmicos en tres dimensiones, son realizados a lo largo del reservorio en diferentes tiempos durante la vida del campo. Generalmente el primer trabajo es realizado antes de que se inicie la primera producción, el segundo y subsecuentes trabajos son llevados a cabo después iniciada la producción más relevante. Cambios entre los trabajos de pre-producción y post-producción son calculados y atribuidos a cambios en las propiedades de los fluidos, como saturación y densidad que han tenido lugar entre los tiempos de los trabajos petrofísicos. Así, los datos sísmicos 3-D son usados para identificar partes del reservorio al parecer se han agotado y otras regiones que tienen acumulaciones de hidrocarburos comercialmente viables. Los alcances de la sísmica 3D son interpretados mediante diversas tecnologías, las cuales permiten obtener una descripción potencial del reservorio.

#### **7.2.4 Ventajas de la Sísmica 3D Sobre la 2D**

El uso de los datos de registros de pozo e información sísmica 3D, frecuentemente son utilizadas para mapear tendencias en los reservorios heterogéneos. Dicho mapeo era imposible de realizar mediante la sísmica 2D, debido a que la heterogeneidad de los reservorios resultaba de fallas a pequeña escala, que eran ignoradas en la caracterización de reservorios por

la dificultad de correlacionar fallas y por la distancia de separación entre las líneas sísmicas.

**Figura 15.** Ejemplo de un campo en el Golfo de México donde se muestra cómo ha cambiado el mapa estructural aplicando sísmica 3-D



Fuente: Bacón, 2003

Las tres dimensiones de los datos sísmicos permiten hoy día hacer modelamiento geológico detallado, y construir gráficas eficaces que proporcionan excelentes evidencias visuales para el intérprete. Estos avances permiten disminuir la incertidumbre y localizar los pozos de desarrollo óptimos para ser drenados eficientemente.

### 7.3 Atributos Sísmicos

Un atributo sísmico es una medida de datos sísmicos tomados, que ayuda a visualizar mejor o cuantificar características interesantes del subsuelo, teniendo como base la interpretación. Los atributos sísmicos se dividen en dos grandes categorías; aquellos que permiten cuantificar componentes

morfológicos de los datos sísmicos como por ejemplo: coherencia y curvatura, similaridad; y aquellos que ayudan a cuantificar componentes de reflectividad de los datos sísmicos como extracción de amplitud, descomposición espectral, atributo de ondícula, convolución laplaciana y convolución prewit.

### **7.3.1 Atributos Morfológicos**

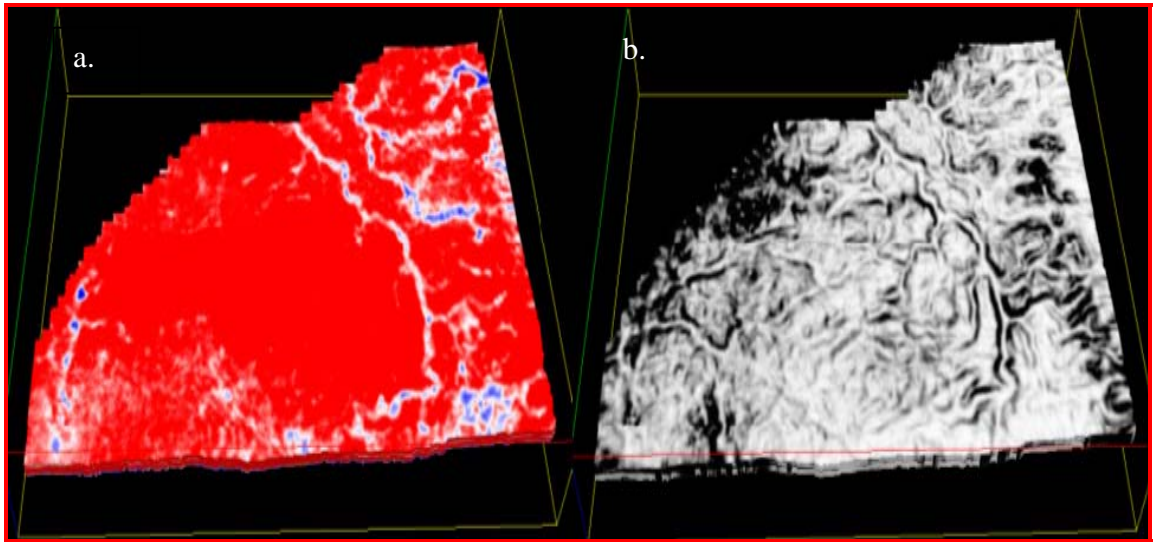
Los atributos morfológicos permiten extraer información sobre el dip y el azimuth del reflector, los cuales a su vez pueden estar relacionados con fallas, canales, fracturas, diapiros y acumulaciones de carbonatos (Chopra y Marfurt 2007). Algunos de ellos son:

#### **7.3.1.1 Coherencia**

La coherencia es una medida de la similaridad entre las trazas, (Neidell and Tanner, 1971) que busca convertir un volumen de continuidad, en un volumen de discontinuidad, acentuando datos estructurales y estratigráficos. (Figura 16.). Al tener una sección sísmica, hay una respuesta de la onda debido a la convolución; esta respuesta cambia en términos de amplitud, frecuencia y fase, dependiendo tanto de, contrastes significativos de impedancia acústica la cual es afectada por la litología, porosidad, densidad y tipo de fluido; como del espesor por encima y por debajo del reflector.

Ciertamente la coherencia es una herramienta útil, para la extracción de información de datos sísmicos, que permite al intérprete mejorar significativamente la habilidad de producir más rápidamente alta calidad, en la interpretación 3D, al incluir fallas exactas y geometría de los canales.

**Figura 16.** Horizonte a 36 ms. de un volumen sísmico al Norte de Alberta a) sin calculo de atributo. b) calculo de coherencia al volumen. Observe la comparación de las amplitudes en el horizonte; la coherencia muestra muy bien el sistema de canales.



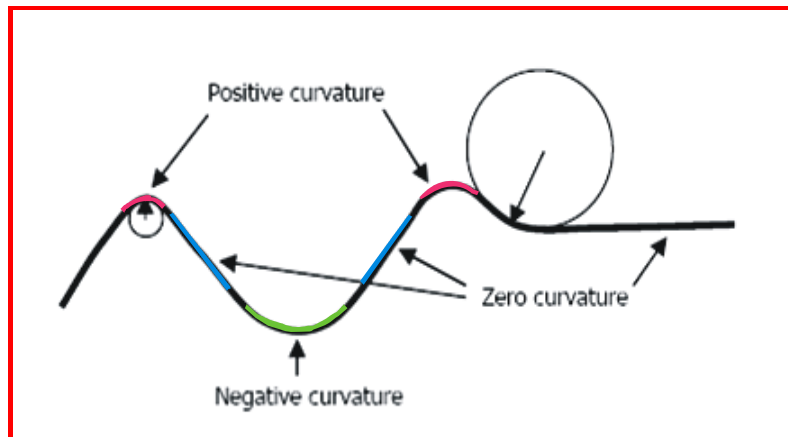
Fuente: Arcis Corporation, Calgary

### 7.3.1.2 Curvatura

Curvatura es una medida de la forma cóncava o convexa de una superficie en un punto en particular. Cuanto más cóncava o convexa es la superficie, mayor es su curvatura. Matemáticamente, la curvatura se define como el recíproco del radio de un círculo que es tangente a la curva dada en un punto (Figura 17). Esto quiere decir, que cuando la curvatura es grande tendrá mayor dobles y será cero para una línea recta.

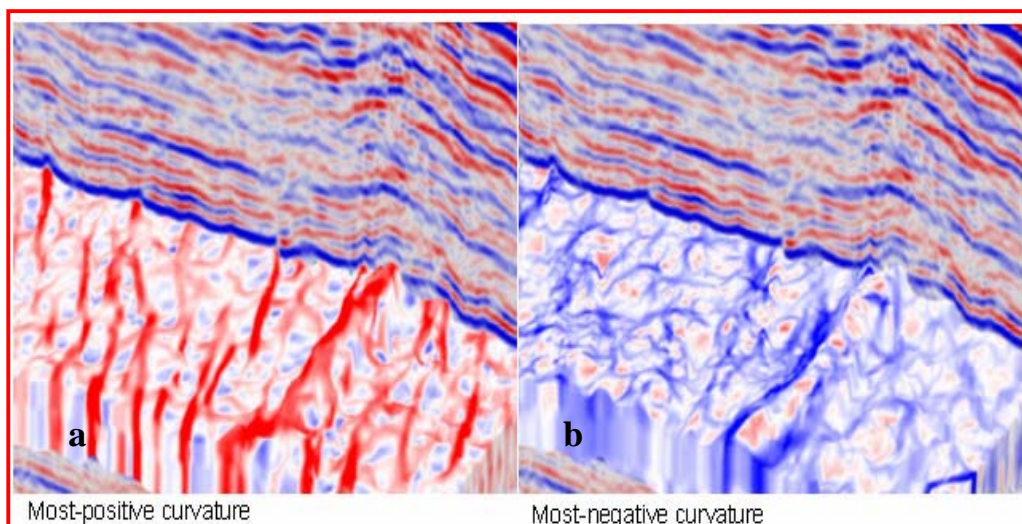
Para los geocientíficos, el análisis de la curvatura, se refiere al estudio de la deformación de los estratos del subsuelo bajo tensión, para predecir fallas y lineamientos de fracturas; a su vez tiene en cuenta características estratigráficas como canales, arrecifes y truncaciones de fallas. (Figura 18)

**Figura 17.** Definición de curvatura 2-D. Las curvas rojas representa una curvatura positiva presente en los anticlinales mientras que la curva verde representa una curvatura negativa propia de los sinclinales las parte totalmente horizontales tienen cero (líneas azules).



Fuente: Modificado de Chopra S., y Marfurt K., 2004.

**Figura 18.** La imagen representa dos perfiles sísmicos en a) una curvatura positiva, b) una curvatura negativa en los estratos del cubo.



Fuente: Chopra S y Marfurt 2008

### **7.3.2 Atributos de Reflectividad**

Los atributos de reflectividad ayudan a extraer información sobre la amplitud en el reflector, frente de onda y la variación del ángulo de iluminación, los cuales pueden estar relacionados con la litología, el espesor del reservorio y la presencia de hidrocarburos (Marfurt J 1999). Este tipo de atributos puede subdividirse en: atributos instantáneos, que se calculan muestra por muestra y representan variaciones instantáneas de diversos parámetros, atributos físicos que se relacionan con las cualidades físicas y cantidad de los datos, atributos de transmisividad que calculan características de las capas en dos interfaces incluyendo velocidad media, promedio de absorción y dispersión, descomposición espectral y extracción de amplitud entre otros.

#### **7.3.2.1 Extracción de Amplitud**

La amplitud de una onda es el desplazamiento máximo desde su posición de equilibrio o de reposo, así, una onda con mayor amplitud transfiere más energía, por lo tanto el atributo de extracción de amplitud a lo largo del horizonte sísmico, revela la presencia de elementos depositacionales gracias a las diferentes características de la impedancia de los elementos depositacionales, relacionados con los estratos.

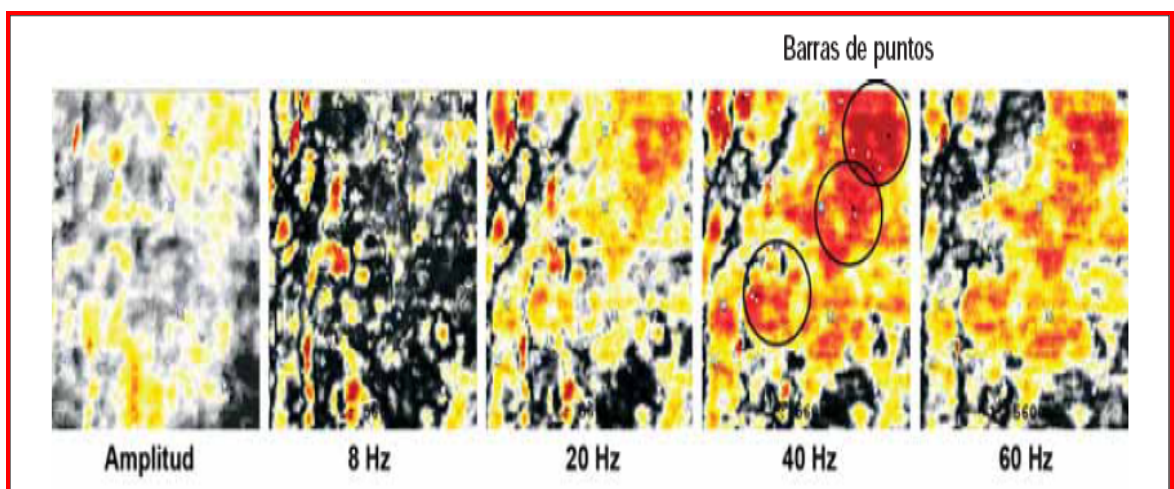
Los cambios laterales en la amplitud se han utilizado en estudios estratigráficos para separar áreas concordantes de la estratigrafía o montículos de capas en un intervalo, donde las capas que son concordantes tendrán amplitud mayor. En general la amplitud puede ser útil en la identificación de acumulación de líquidos, gas, ciertos tipos de arrecifes, canales de arena y deltas, cambios en la secuencia estratigráfica.

### 7.3.2.2 Descomposición Espectral

La descomposición espectral revela la señal sísmica en sus frecuencias, lo que permite ver la amplitud y fase de sintonía con longitudes de onda específicas. Es una herramienta útil para "la resolución por debajo de" la interpretación sísmica, la estimación del espesor de arena, y la mejora de las estructuras de canal como en la figura 19.

La descomposición espectral puede extraer detalles estratigráficos que ayudan a perfeccionar la interpretación geológica de la sísmica. El concepto de la descomposición espectral es; el reflejo de una fina capa tiene una expresión característica en el dominio de la frecuencia el cual es un indicativo temporal del espesor de las capas. En otras palabras, frecuencias altas producen imágenes de capas delgadas y frecuencias más bajas producen imágenes de capas gruesas.

**Figura 19.** Descomposición espectral aplicada a un intervalo derivado de amplitudes de post-apilamiento para generar un cubo sincronizado compuesto de capas de frecuencia. Mediante el desplazamiento a través del dominio de la frecuencia se observan barras de puntos a 40Hz.



Fuente: [www.geomodeling.com](http://www.geomodeling.com)

En general los atributos sísmicos 3-D, facilitan la identificación rápida de características estratigráficas, estructurales y ambientes depositacionales sedimentarios. Sin embargo hay otro tipo de herramientas que realzan la detección de ciertas características estructurales y estratigráficas, como los filtros espaciales, cuyo objetivo es el de modificar la contribución de determinados rangos de frecuencias de la imagen. El término espacial se refiere al hecho de que el filtro se aplica directamente a la imagen y no a una transformada de la misma, es decir, el nivel de gris de un píxel se obtiene directamente en función del valor de sus vecinos. Entre los tipos de filtros se tiene filtros diferenciales que se componen de varios tipos de máscaras (Laplaciano, Prewitt, etc.), y se utilizan para la detección de bordes. El proceso de detección de bordes se basa en realizar un incremento del contraste en las zonas donde hay una mayor diferencia entre las intensidades, y en una reducción de éste donde no tenemos variación de intensidad.

### **7.3.2.3 Atributo de Ondícula**

Este atributo pertenece a la categoría de los atributos instantáneos, los cuales son calculados en el pico de la traza envolvente y tiene una relación directa, con la transformada de Fourier. Por ejemplo, la frecuencia instantánea del pico de la envolvente, es igual a la frecuencia principal del espectro de amplitud de la ondícula. Esta fase instantánea corresponde a la intersección de la fase de la ondícula, también es conocida como "*response attribute*". (Bodine, 1984).

### **7.3.3 Filtro Convolución**

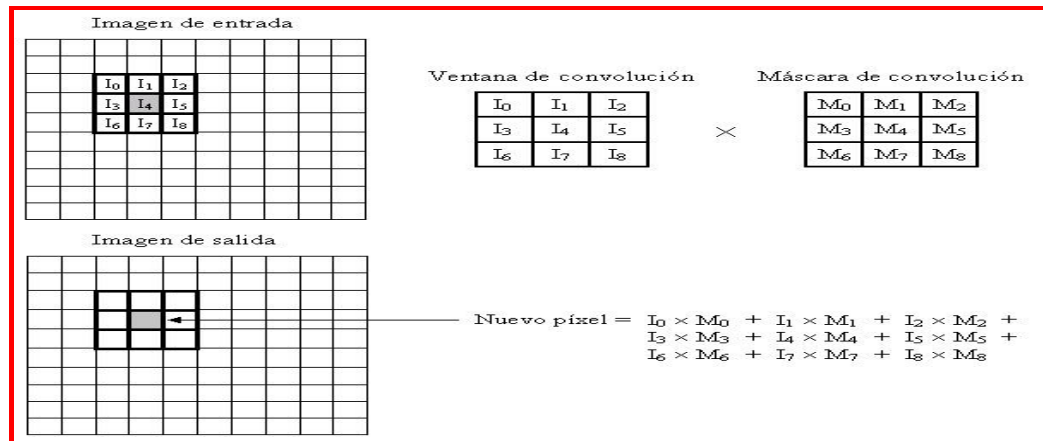
El tratamiento de imágenes más empleado y conocido, es el tratamiento espacial, también conocido como convolución. Las convoluciones discretas se usan en el procesamiento de imágenes para suavizarlas, afinar las

imágenes, y detectar bordes. Mediante este proceso se calcula el valor de un determinado punto en función de su valor y del valor de los puntos que le rodean, aplicando una operación matemática en función de la cual se obtendrá un valor resultante para el punto en cuestión. La operación matemática, en que consiste la convolución es una suma o una multiplicación ponderada de píxeles en el vecindario del píxel fuente.

Los valores son determinados por una pequeña matriz llamada máscara de convolución, que determina los coeficientes a aplicar sobre los puntos de una determinada área. Las dimensiones de la matriz son normalmente impares e iguales, de forma que se pueda determinar el centro de una matriz cuadrada. La posición del valor central de esta matriz corresponde con la posición del píxel de salida que se está evaluando.

Una ventana deslizante, llamada ventana de convolución, se centra en cada píxel de la imagen de entrada y genera nuevos píxeles de salida. Para aplicar la máscara a esa zona, se multiplican los valores de los puntos que rodean al píxel que trata de evaluar por su correspondiente entrada o coeficiente en la máscara y luego se suman esos productos. El resultado es el nuevo valor para el píxel central, como se muestra en la Figura 20. El proceso es bastante repetitivo, algo costoso en tiempo en función del tamaño de la imagen, pero sencillo y eficaz.

**Figura 20.** Proceso de la Convolución



Fuente: [www.des.udc.es](http://www.des.udc.es)

### 7.3.4 Aplicación de atributos sísmicos

Su aplicación cubre un extenso rango de soluciones a la interpretación de la geología del subsuelo esto es:

- Interpretación estructural
- Análisis Estratigráfico
- Identificación de las litologías
- Detección de fluidos en el subsuelo
- Caracterización de reservorios
- Control de calidad en el procesamiento

### 7.3.5 Ventajas y desventajas de los Atributos Sísmicos

#### 7.3.5.1 Ventajas

- Permiten al intérprete realzar los lineamentos sutiles estructurales y estratigráficos que pueden ser pasados por alto usando técnicas de interpretaciones convencionales.

- Permite obtener información y visualización de las características del subsuelo.
- Ayuda a la extracción de las características de un modelo físico o un modelo definido por el intérprete.
- Son un control de calidad en la adquisición de datos, procesamiento, y de imágenes.

### **7.3.5.2 Desventajas**

- Dependen de la adquisición de los datos, procesamiento, interpretación e imágenes.

### **7.3.6 Casos de estudio**

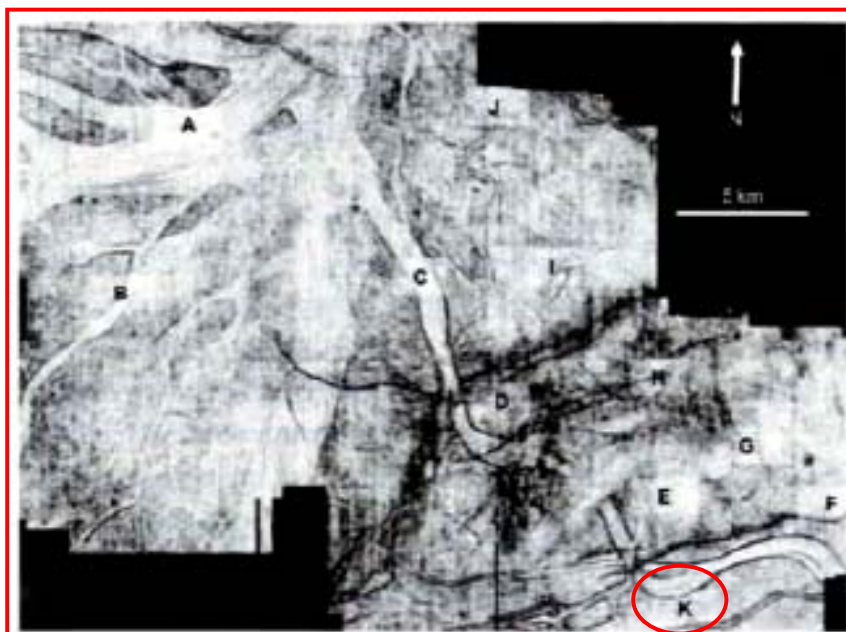
#### **7.3.6.1 Visualización de canales en rocas Terciarias**

Haskell et al. (1995) realizó un estudio en rocas terciarias en el Golfo de México hacia el sur de la Isla Marsh, plataforma continental, donde se logró obtener la interpretación de un sistema de canales, visualizado en el límite del Pleistoceno en un horizon slice aproximadamente a un tiempo de 1200 ms utilizando el atributo de coherencia (figura 21). Haskell et al. Interpretó el ancho del canal A de E-W del Río Paleo-Mississippi, el cual se divide en tres o más canales distributarios.

Los canales B y C son controlados por un buzamiento regional, excepto los canales D y E, donde el canal C es atravesado por dos fallas con un rumbo N60E. Este canal sigue paralelo a la falla y continúa su curso hacia el canal F. La acreción lateral genera barras de punto cerca de donde se une E y F.

Aunque frecuentemente grandes características se reconocen en el *horizon slice* con el atributo de amplitud, Haskell et al. notó que las texturas asociadas de los canales G, H, I, y J eran asociadas a arenas deltaicas y lo confirmó con el control de los pozos, ya que no son fácilmente identificables en la vertical o en el *horizon slice* aplicando extracción amplitud. Ellos notaron que estas zonas consisten en segmentos abundantes y cortos, de meandros. El canal es controlado por una falla en la parte sur de la figura 6, de modo que resulta la forma de una barra de punto (*point bar*), parte K de la imagen (círculo rojo).

**Figura 21.** *Horizon slice* a lo largo del límite del Pliopleistoceno-Pleistoceno a un tiempo de 1.200 s aproximadamente, se aplicó el atributo de coherencia, para visualizar el sistema de Canales distributarios del Rio Mississippi Sur de la Isla Marsh, Golfo de México, U.S.A. After Haskell et al. (1995).



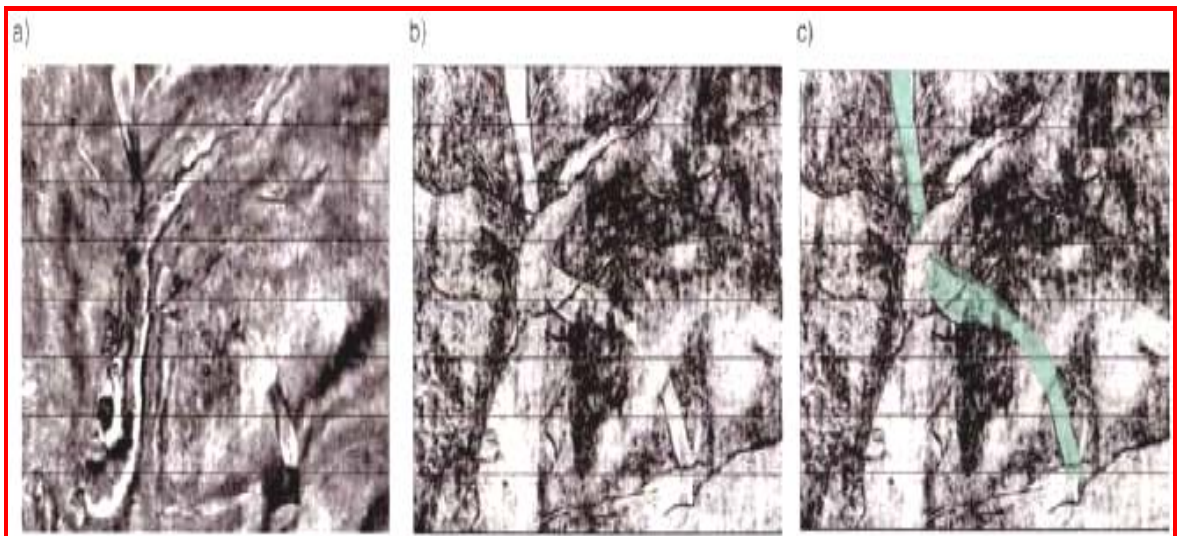
Fuente: Marfurt J., 1999.

En las cuencas de edad Terciaria se iluminan muy bien los canales, en los cuales el contraste de la impedancia es muy fuerte, allí los canales son

dominados por arenas shale. En la Figura 22b, se presenta otro ejemplo del Golfo de México, en el cual se pueden identificar fácilmente la geomorfología de los canales a través de un time slice utilizando el atributo de coherencia.

En la figura 22a no es tan evidente el canal, se puede ver fácilmente un patrón complicado de por lo menos tres canales en imágenes de un time slice de coherencia. En la figura 22c, se interpretó un canal en azul que ha sido atravesado por un canal que se formó posteriormente.

**Figura 22.** Time slice a través de (a) un volumen de datos sísmicos y (b) un volumen de coherencia en el Golfo de México, U.S.A. (El área de trabajo fue de aproximadamente 155 km<sup>2</sup>. (c) Representa un slice de coherencia con la interpretación de un canal.



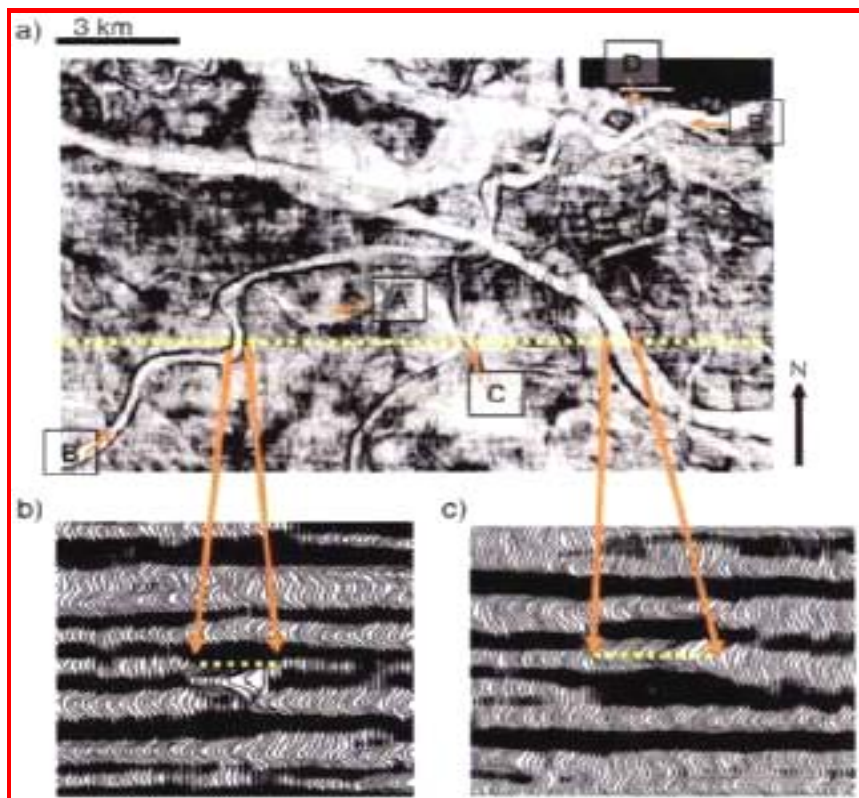
Fuente: Marfurt J 1999

### 7.3.6.2 Offshore del Golfo de México

Una imagen de coherencia en el offshore del Golfo de México muestra la figura 23, en la cual se pueden identificar claramente características sutiles

de los canales en secciones sísmicas verticales (figura 23b y c). Así mismo se interpreta, como el canal A ha sido cortado por el canal B que fue posterior, debido a que no se visualizan preservados los bordes del canal A. A diferencia del canal C y D que si se observan preservados en la región del canal B, lo que implica que los dos canales se encuentran estratigráficamente por encima o por debajo del canal B, pero que parecen combinarse en la actualidad ya sea debido a la longitud de la onda sísmica o a la longitud de las ventanas de tiempo para el atributo de coherencia.

**Figura 23.** Time slice a tiempo de 1440 ms a través de un sistema de canales canibalizado tomado de un trabajo hecho en el offshore del Golfo de México, U.S.A. (B-C) Expresión de estos canales en una sección sísmica vertical.

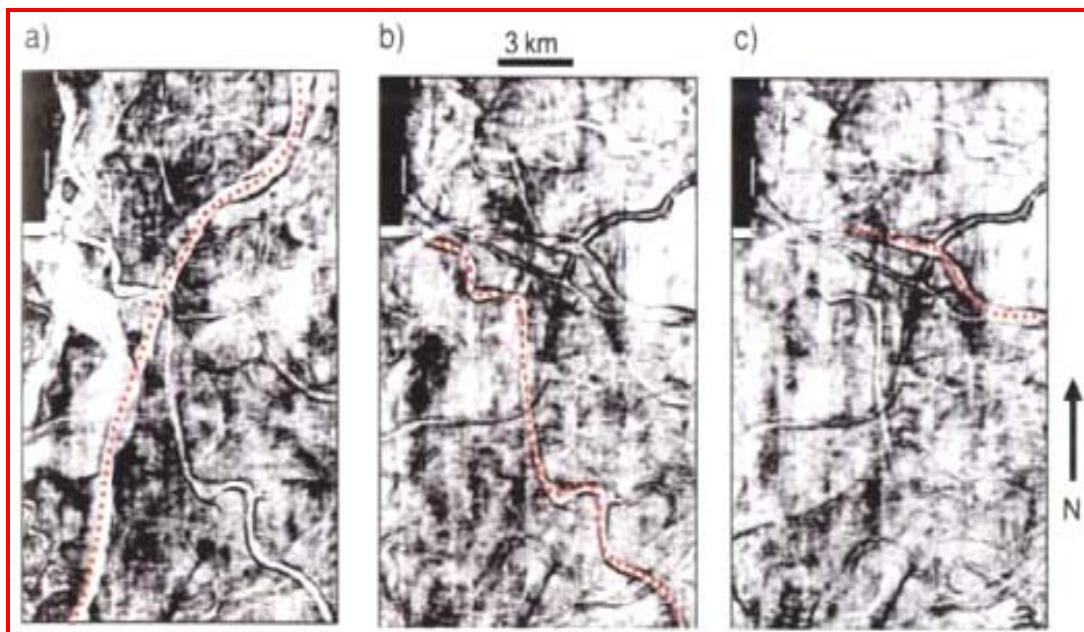


Fuente: Marfurt J., 1999

Idealmente, el análisis estratigráfico puede hacerse en un *horizon slice* o en juego de *time slice* para eliminar la complejidad estructural de los canales por encima y por debajo del *time slice*. Los canales que atraviesan los canales más antiguos, pueden ser identificados ya que remueven los bordes de los canales más antiguos. Así el canal A es probablemente cortado por el canal más reciente (canal B), mientras que el canal C y D se encuentran por encima o por debajo de canal B.

En la figura 24, se muestran *time slice* a diferentes tiempos: de 1.448 s, (figura 24b), 1464 s (figura 24c), y de 1.400 s (figura 24a), para la superficie de la figura 23. En la figura 24 se resalta con una línea roja el canal que mejor se visualiza en los tres *time slice*.

**Figura 24.** *Time slice* a (a) tiempo de 1.400 s, (b) tiempo de 1.448 s, (c) tiempo de 1464 s y para la misma superficie de la Figura 22. En las Figuras 23 se resaltan en cada una el canal que más se resalta con un tiempo diferente.



Fuente: Marfurt J 1999

## 8. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La metodología que se llevó a cabo para alcanzar los objetivos propuestos en el desarrollo del trabajo de investigación contempló cuatro fases:

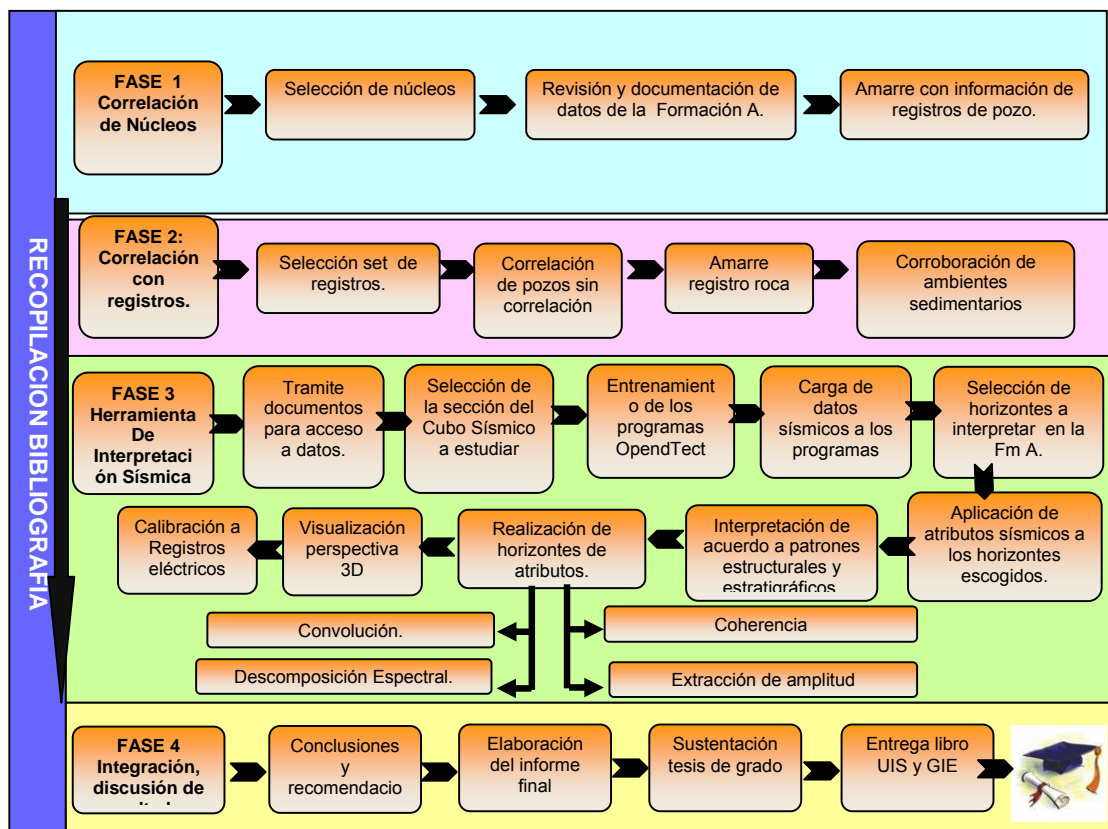
**Fase 1:** Correlación de núcleos.

**Fase 2:** Correlación con registros

**Fase 3:** Herramientas de interpretación sísmica.

**Fase 4:** Integración y discusión de resultados.

**Figura 25.** Diagrama de flujo de la Metodología



## **8.1 Revisión Bibliográfica**

La revisión bibliográfica se llevo a cabo durante todo el proyecto de investigación como se muestra en el flujo de trabajo de la metodología Figura 25., donde se revisaron los fundamentos teóricos del trabajo como son los ambientes fluviales, diferentes parámetros de control de este tipo de ambiente y los procesos que se llevan a cabo en él. Una vez, teniendo las bases teóricas se procedió a la recopilación bibliográfica del área de estudio, en dicho proceso se adquirió información como, mapa de estado de pozos del campo, columnas estratigráficas de pozos, informes estratigráficos de la zona, geología estructural del campo, registros SP de los pozos, información de núcleos, tesis de pregrado, informes de estudios anteriores, artículos geológicos, información de la sísmica 3-D como interpretación y modelamiento, esto con el propósito de conocer más a fondo el área de estudio y así tener mayor dominio en el desarrollo del trabajo. Posteriormente se analizo la información donde se logro definir el tipo de canal existente en el área, siendo esta deducción básica para dicho trabajo. La búsqueda de la información se llevo a cabo en las bibliotecas de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Universidad Nacional de Colombia, (UNAL) en bases de datos como Georef y Elsevier, así como en el Centro de Información Técnica (CIT) del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y la Web.

## **8.2 Fase 1: Correlación de núcleos**

Con información recolectada durante y después de la etapa de revisión bibliográfica y la fase 1, se hizo la selección de los núcleos disponibles, en el cual mediante la profundidad se reviso y documento de base a tope la litología con sus respectivos tamaños de grano, texturas y estructuras sedimentarias como paleosuelos, bioturbación no diferenciada, intraclastos, bioturbación diferenciada, fragmentos de líticos, entre otros, facies

sedimentarias como areniscas bioturbadas, areniscas bioturbadas con estratificación cruzada, areniscas, limolita bioturbada, entre otros, sub-ambientes, y posteriormente se corroboraron los ambientes, de gran interés para el estudio. Dicha información se amarro con la información de los registros de pozo, fase 2. La fase se resume en tres pasos:

- ❖ Selección de núcleos
- ❖ Revisión y documentación de datos sedimentológicos.
- ❖ Amarre con información de registros de pozo.

### **8.3 Fase 2: Correlación con registros**

En esta Fase se realizo la selección del set de registros basados en la información la información recolectada de los registros existentes en la zona. Una vez seleccionados los registros, algunos ya estaban correlacionados, otros fue necesario hacer su correlación. Posteriormente se amarraron en profundidad con los núcleos Fase 2, donde se corroboraron los ambientes sedimentarios. La fase dos se resume a continuación:

- ❖ Selección set de registro
- ❖ Correlación de pozos sin correlación
- ❖ Amarre registro roca

Corroboración de ambientes sedimentarios

### **8.4 Fase 3. Herramientas De Interpretación Sísmica**

Esta es una de las fases más relevantes de este trabajo, debido a que los resultados están íntimamente ligados con la calidad de la sísmica del cubo. Una vez avanzada la fase de revisión bibliográfica, recopilación y análisis, de la información, correlación de núcleos, correlación con registros se continúo con los trámites pertinentes para la adquisición del cubo sísmico

del campo de estudio, en el se definió un subvolumen basados en la información previamente recolectada del área de estudio, donde se concluyo que la mejor zona para trabajar era la que mayor cantidad de información de pozos registraba, esta fue la zona central del cubo sísmico.

Se definió el software que mejor se adaptaría a las necesidades del proyecto el cual fue OpendTect por disponibilidad y uso previo en otros proyectos. El entrenamiento del software se hizo durante la presente fase, donde una vez teniendo las bases del mismo, se cargaron los datos sísmicos al programa, para la definición de los horizontes a interpretar en el cubo sísmico, también se tubo en cuenta la información preexistente de la zona donde se determinaron los núcleos con mayor presencia de canales. Allí se trazo gran cantidad de horizontes donde solo se tomaron tres, los cuales se corrigieron hasta alcanzar la mejor visualización. Una vez terminados, se aplicaron diferentes atributos sísmicos como coherencia, extracción de amplitud, convolución laplaciana, descomposición espectral, energía, amplitud instantánea entre otros.

Luego se procedió a realizar la interpretación de los datos de acuerdo a patrones estructurales y estratigráficos, para posteriormente generar los mapas de atributos, tomando los de mejor resolución. Habiendo ubicado los canales se procedió a medir su ancho, sinuosidad y dirección. El ancho se midió tomando las coordenadas, haciendo un barrido por el canal mediante el software Opendtect, la sinuosidad se determinó con el empleo la formula de sinuosidad y la dirección se determinó directamente sobre la superficie interpretada. La fase de herramientas de interpretación se resume a continuación:

- ❖ Trámite de documentos para acceso a datos.
- ❖ Selección de la sección del cubo sísmico a estudiar.
- ❖ Entrenamiento de los programas OpendTect.

- ❖ Carga de datos sísmicos a los programas.
- ❖ Selección de horizontes a interpretar en el cubo sísmico
- ❖ Aplicación de atributos sísmicos a los horizontes escogidos.
- ❖ Interpretación de acuerdo a patrones estructurales y estratigráficos.
- ❖ Realización de mapas de atributos sísmicos.
- ❖ Visualización perspectiva 3D.
- ❖ Calibración de registros eléctricos.

### **8.5 Fase 4: Interpretación De Datos**

Durante esta Fase se procede a la integración sistemática de toda la información utilizada, como son, los horizontes de atributos sísmicos, (horizonte de coherencia, de extracción de amplitud, de descomposición espectral y horizonte de convolución laplaciana), descripción de núcleos y registros eléctricos del área de estudio, mediante la cual se confirmó la existencia de los canales en el campo, su ancho sinuosidad y dirección, en base a ello se realizaron las conclusiones, recomendaciones y por último la elaboración del informe final. A continuación el resumen de la fase 4:

- ❖ Conclusiones y recomendaciones
- ❖ Elaboración del Informe final.
- ❖ Sustentación tesis de grado.
- ❖ Entrega del libro Universidad Industrial de Santander y Grupo de Investigación en Estratigrafía.

## 9. RESULTADOS

### 9.1 Descripción de los datos sísmicos

La información sísmica disponible y proporcionada por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), está compuesta por 447 líneas *inline*, y enumeradas desde 102 a 549. Las líneas *crossline* (perpendicular a la *inline*) son 421, y están numeradas desde 202 a 623 espaciadas 20 x 40 metros, para un total de 447 *Inlines* y 421 *crossline*, cubriendo un área de 150 km<sup>2</sup>. La longitud en tiempo del registro sísmico es de 96-4000 milisegundos con un intervalo de muestreo de 4 ms; a éstas herramientas al aplicarle atributos sísmicos van a permitir la visualización de canales, para ello fue necesario tener en cuenta la resolución vertical del volumen sísmico.

La resolución vertical de un punto entre dos reflectores del volumen sísmico, aumenta a medida que decrece la longitud de la onda; la máxima resolución es igual a un cuarto de la longitud de onda ( $\lambda/4$ ) teniendo en cuenta que la longitud de onda está dada por el cociente entre velocidad y frecuencia de la onda (ecuación 1). El inconveniente es que existe una relación inversa entre la energía de la emisión, que gobierna la profundidad de penetración de las ondas, y la longitud de onda, que determina la resolución.

$$\lambda = f/V \quad (2)$$

Donde;

$\lambda$ : Longitud de Onda

$f$ : Frecuencia (Hertz)

V: Velocidad (m/s)

En la exploración de hidrocarburos se requiere una alta energía de emisión para alcanzar las profundidades de interés, lo cual obliga a trabajar con frecuencias bajas (5-100 Hz) y resoluciones verticales en el orden de varios metros. A profundidades someras, la energía puede ser menor y la frecuencia mayor. Así, pues, en depósitos poco consolidados, con velocidades de propagación bajas (1-3 km/seg), frecuencias de 100-300 Hz permiten resoluciones verticales menores de 1 metro.

El desarrollo de esta investigación se basa fundamentalmente en la visualización de canales a partir de atributos sísmicos en un volumen sísmico; razón por la cual es necesario determinar la frecuencia y resolución vertical; parámetros que permiten llegar a conocer la zona Fresnel. La Zona de Fresnel es el volumen de espacio entre el emisor de una onda electromagnética y un receptor, de modo que el desfase de las ondas en dicho volumen no supere los 180°. La propagación de la onda depende de la línea de visión y de la zona de Fresnel. Por tanto, para incrementar el alcance en espacio abierto, tanto la línea de visión como la zona de Fresnel deben estar libres de obstáculos. Por ejemplo, para distancias de hasta 300 metros, el diámetro de la zona de Fresnel debería ser de, al menos, 5,4 metros. Claramente, es insuficiente utilizar únicamente la línea libre de visión para medir el alcance en espacio abierto.

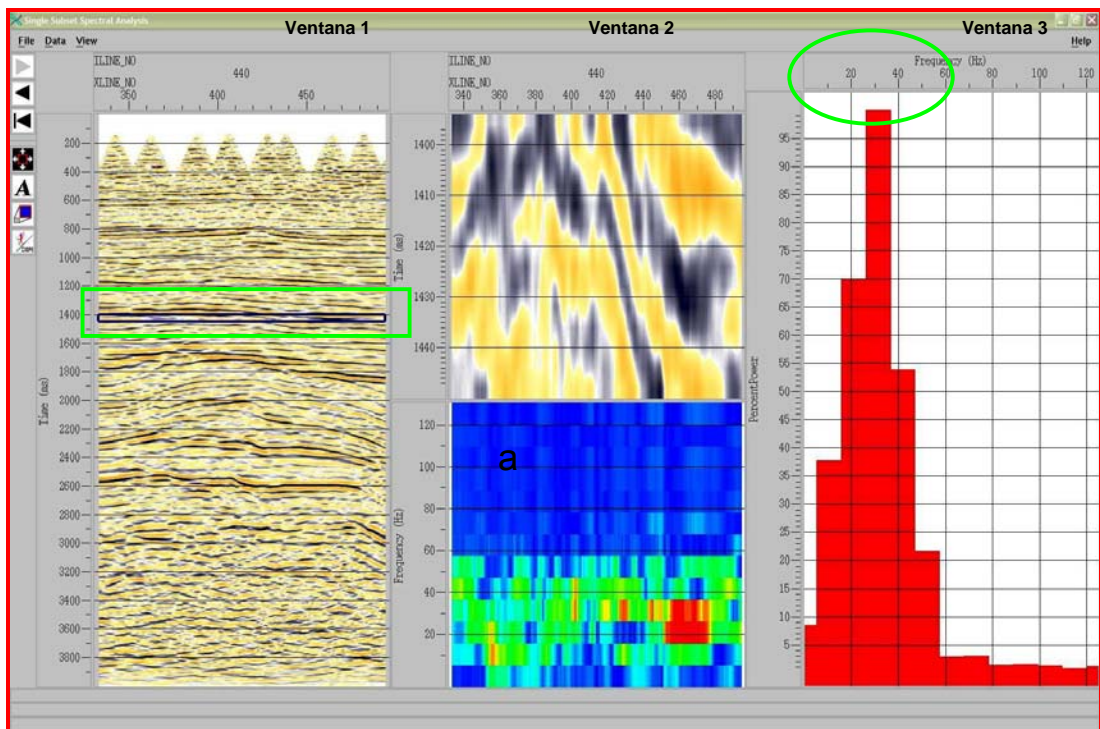
Radio de Fresnel:

$$R = \sqrt{z\lambda/2} \quad (3)$$

Por medio del software Promax el cual fue utilizado para el procesamiento del volumen sísmico, se halló la frecuencia y posteriormente la zona de fresnel, con el fin de determinar la resolución vertical de la sísmica.

Una imagen del software Promax es ilustrada en la figura 26, en el cual se visualizan tres ventanas, donde cada una genera diferentes datos. La primera muestra la sección sísmica del crossline que va desde 334 a 494 en donde se resalta con un cuadro azul el área del volumen sísmico a la cual pertenece el horizonte A en un tiempo de 1400 a 1480 ms. La segunda ventana permite ver la amplitud distribuida en diferentes frecuencias, no obstante la Figura 2.a presenta variaciones en la frecuencia, asignando colores fuertes como el verde a frecuencias entre 10 y 60 Hertz y color rojo que representa máxima amplitud a frecuencias entre 15 y 35 Hertz exhibiendo una mayor distribución de energía. Por último la ventana 3 indica un espectro de frecuencia, la abscisa indica frecuencia y la ordenada amplitud instantánea, estos parámetros generan un histograma permitiendo visualizar el rango de frecuencia del horizonte obteniendo como resultado 30 Hertz (Ventana 3, círculo verde).

**Figura 26.** Ventana del software Promax donde se visualizan algunos parámetros del procesamiento del cubo sísmico



La Figura 27 muestra una ventana de velocidades (tomada de informe ICP) donde se ubicó el número de crossline 420 (abscisa) y el tiempo (1428 ms) en que se encuentra el horizonte A (ordenada). Estos datos ayudaron a determinar la velocidad media efectiva (rms) dando como resultado una velocidad de 2500 m/s. Una vez obtenida esta información, se procede a determinar la longitud de onda (Ecuación 1) del volumen, donde la frecuencia es 30 hertz y la velocidad corresponde a 2500 m/s. Reemplazando de la ecuación (3) se obtiene:

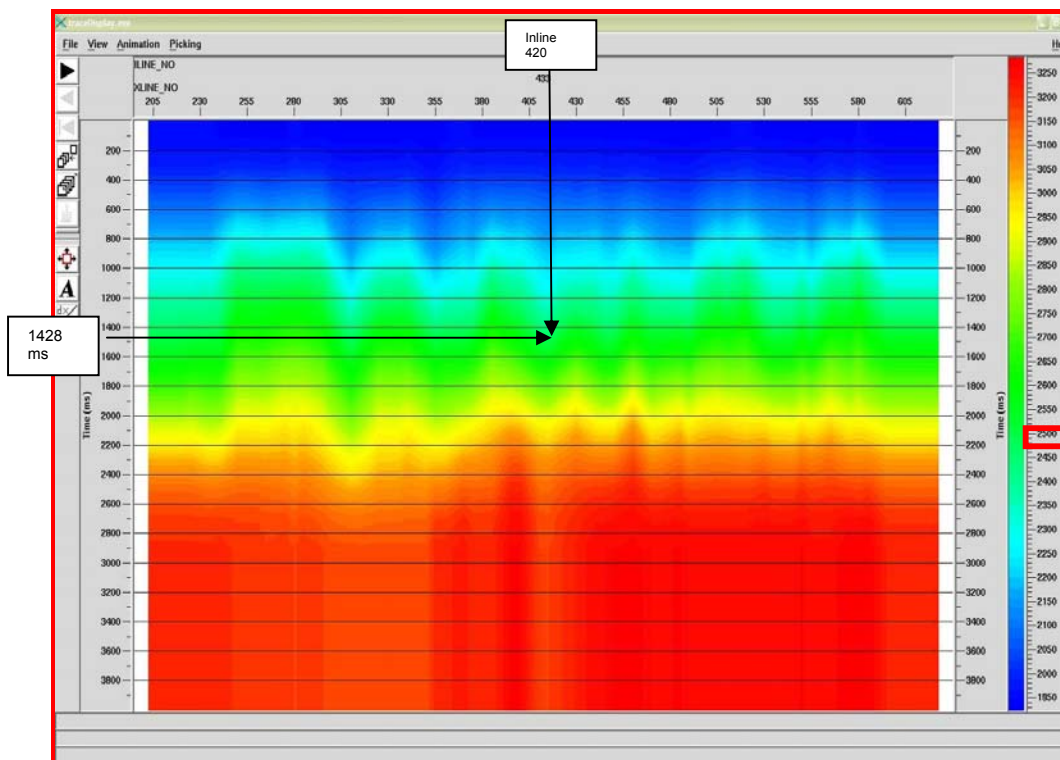
$$\lambda = f/V$$

$$\lambda = 30\text{Hz}/2500\text{m/s}$$

$$\lambda = 83.33\text{m}$$

Teniendo en cuenta que la máxima resolución de la sísmica es igual a  $\lambda/4$  se tiene que, para este volumen  $\lambda/4$  es igual a 21 metros.

**Figura 27.** Ventana de Velocidades del volumen sísmico en el crossline 423



Fuente: Informe ICP

Es decir la capa más pequeña que puede detectar la sísmica a ésta profundidad es de 21 m. Una vez se obtuvo el valor de  $\lambda/4$  se remitió a la ecuación de Fresnel (ecuación 2), para hallar el valor que permita establecer si ha dicha distancia es posible tener visualización de los elementos geomorfológicos y estructurales, dando lugar a los siguientes cálculos:

Reemplazando los datos a una profundidad de 1677 m, (profundidad obtenida de las correlaciones) y longitud de onda igual a 83.3 m se obtiene un valor:

$$r = \sqrt{\frac{z \lambda}{2}}$$

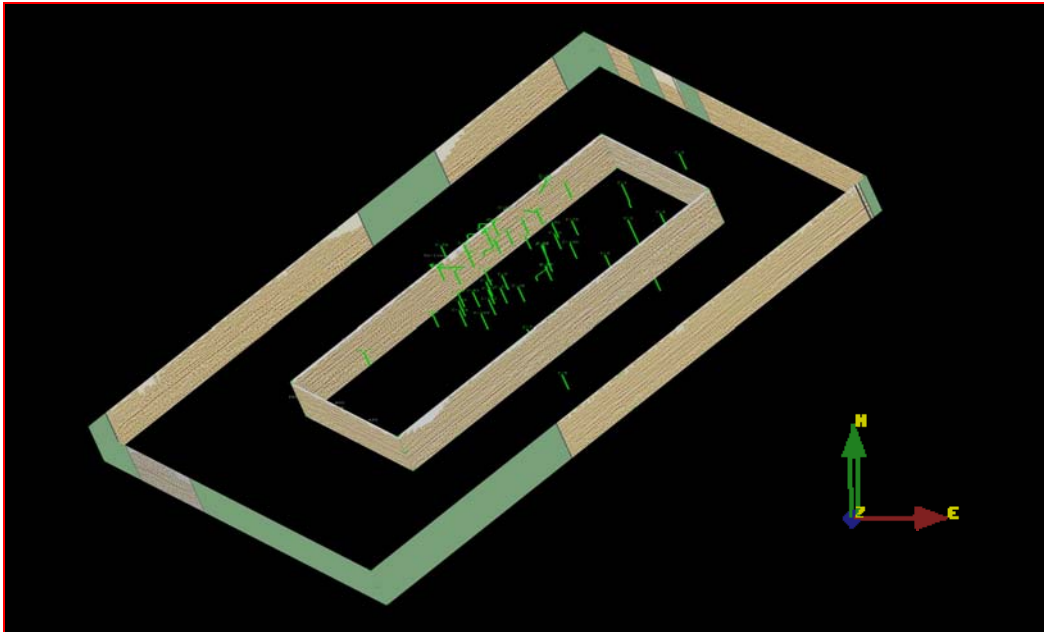
$$r = \sqrt{\frac{1677 \text{ m} * 83.3 \text{ m}}{2}}$$

$$r = 264,28 \text{ m}$$

De acuerdo al radio de Fresnel que es 264,28 m se halla el diámetro, dando como resultado 528,5 m. Estos cálculos indican que valores por debajo de 528,5 m la sísmica percibe las geoformas pero no podrá determinar en qué lugar estratigráficamente hablando inicia o termina una geoforma.

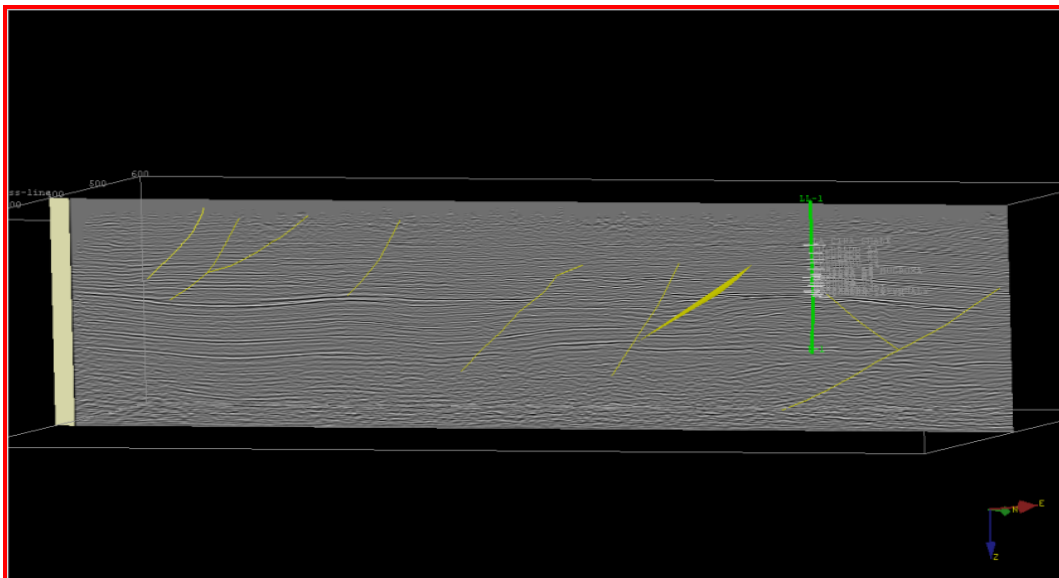
Por otra parte se trabajo con información existente de pozo, (50 pozos) utilizando datos como trayectoria, checkshots, y marcadores que permitieron la ubicación del pozo en el espacio; así como núcleos y registros. Con todo esto y lo anterior se presentó una mayor densidad de pozos hacia la parte central del campo definiéndose así un subvolumen en esta zona con un área de 36 km<sup>2</sup> el cual se tomo de un área de 150 km<sup>2</sup> del volumen total (figura 28.)

**Figura 28.** Subvolumen Sísmico del Campo A. *Inline* 204 – 485 y *Crossline* 334 -494



## 9.2 Análisis Estructural

**Figura 29.** Interpretación de Fallas.

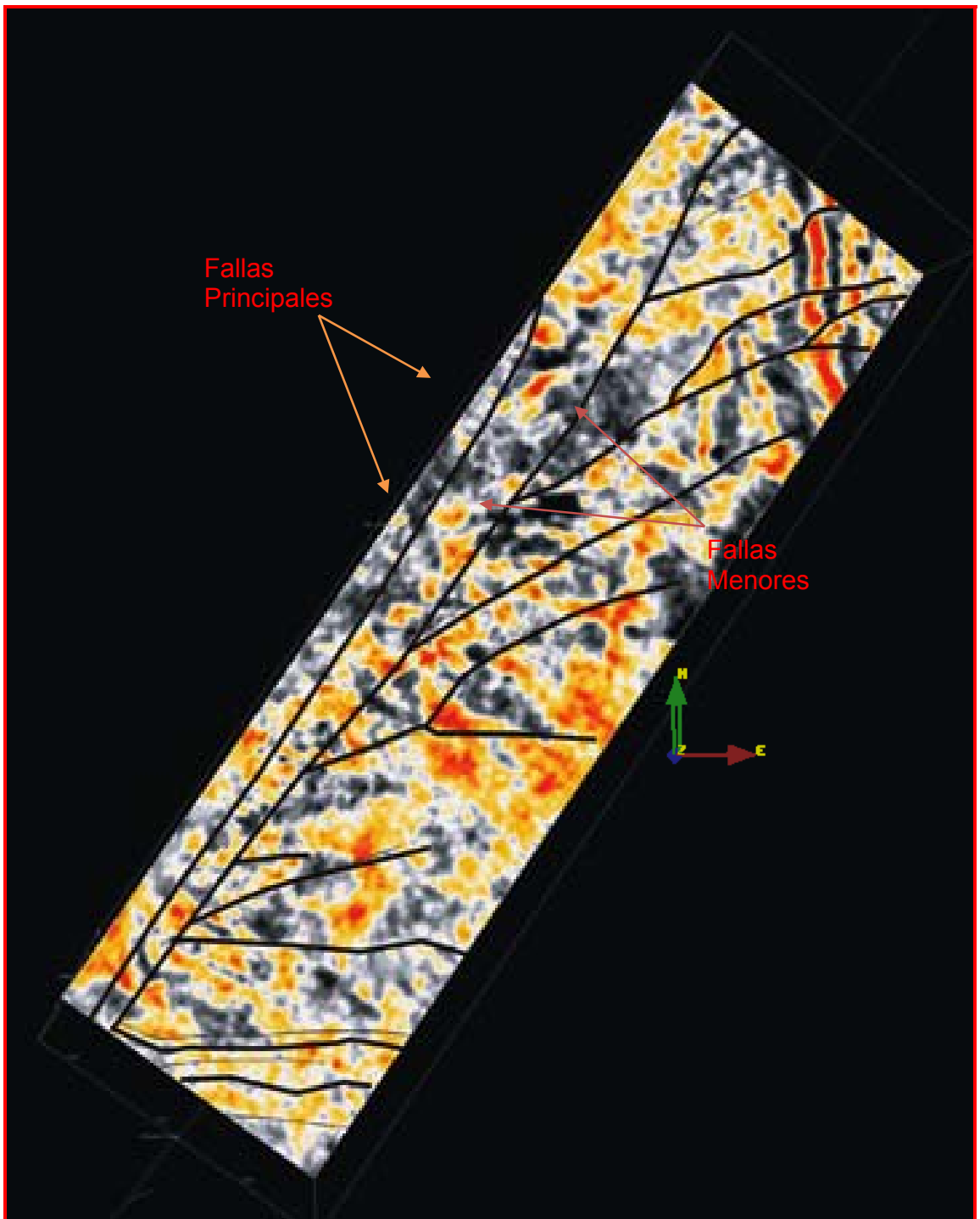


El área de estudio presenta fallas que se hallan sobre una estructura formada por un anticlinal asimétrico, alargado con su eje principal en dirección SW-NE de esta forma, la estructura es controlada por un sistema de fallas de rumbo de dirección SW-NE, de la cual se desprenden fallas menores las cuales en su mayoría tienen una dirección NE, como muestra la Figura 29.

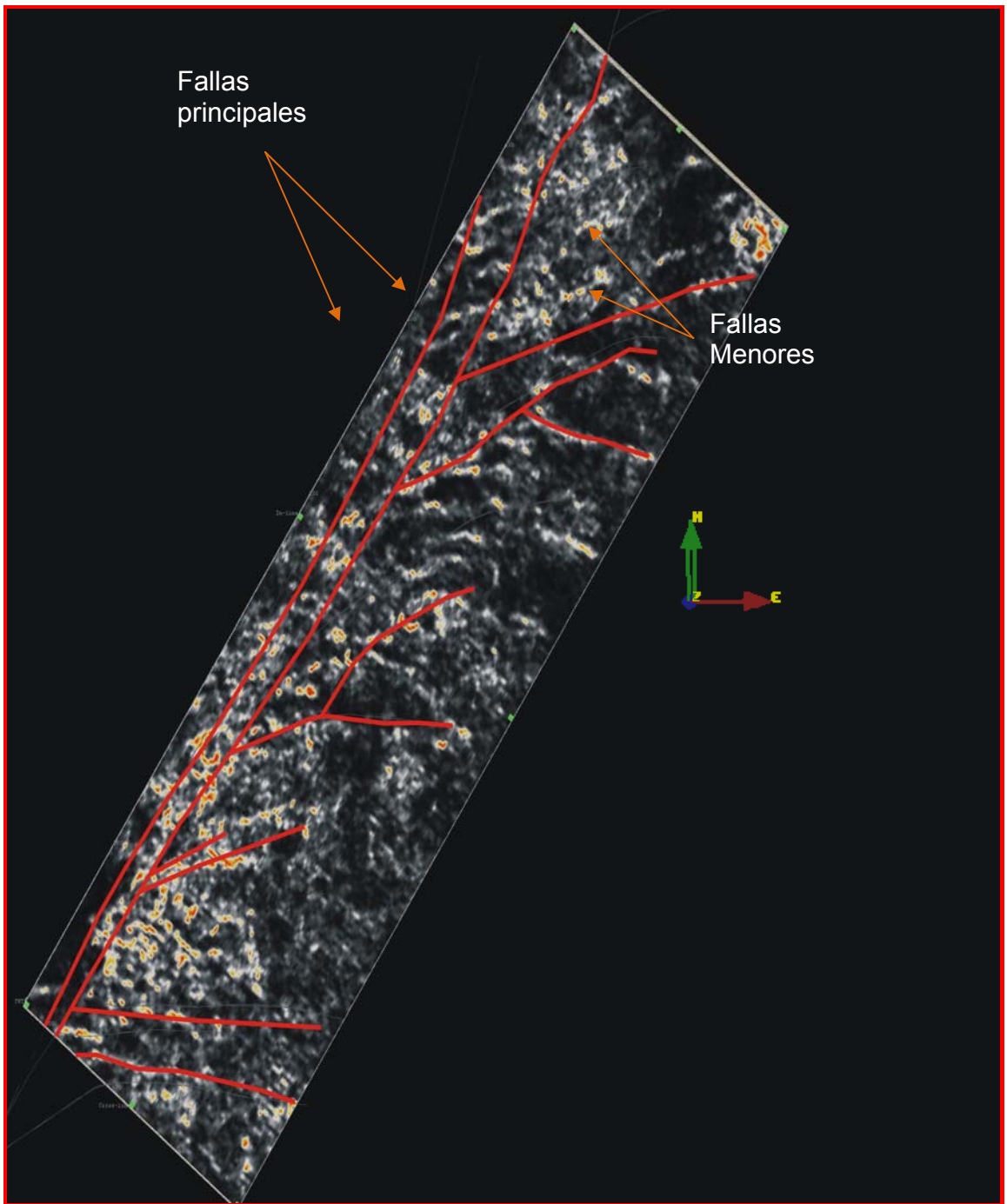
Para evidenciar la presencia de la falla principal y el conjunto de fallas menores se calculó el atributo de extracción de amplitud sobre un Time Slice (1428 ms). La Figura 30 muestra las Fallas principales con flechas naranjas y las Fallas menores con flechas rojas al igual en la Figura 31 donde se utilizó el atributo de coherencia. Estas fallas coincidiendo con el modelo estructural propuesto por ECOPEPETROL para esta área de Estudio.

Fue de suma importancia llevar a cabo el análisis estructural de las fallas puesto que la respuesta sísmica obedece a discontinuidades estratigráficas que se comportan con un estilo sinuoso; y discontinuidades estructurales las cuales presentan linealidad en las fallas.

**Figura 30.** Interpretación estructural del área de estudio en un Time slice a 1428 ms calculando el atributo de extracción de amplitud en el software OpendTect 3.2.2



**Figura 31.** Interpretación estructural del área de estudio en un Time Slice a 1428 ms, calculando el atributo de coherencia en el software Opendtect 3.2.2.



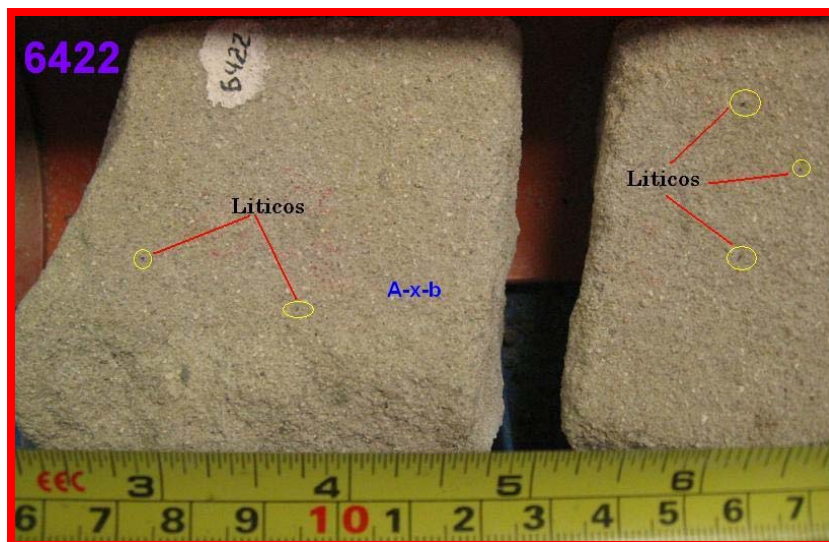
### 9.3 Análisis Estratigráfico

Estudios previos en el área de estudio confirman que prácticamente toda la parte superior del cubo sísmico está constituida por depósitos fluviales. La información de núcleos consultada lo confirma, escogiéndose de aquí un horizonte con distribución de canales mapeables en sísmica.

#### 9.3.1 Ambiente Canal, Facies Arenitas con estratificación cruzada bioturbada (A-x-b)

El tope de de la sección está representado por arenisca feldespática amarillo claro, moderada selección, moderados líticos negros. En la base se observa intraclastos arcillosos, estratificación cruzada y bioturbación baja proporción Figura 32

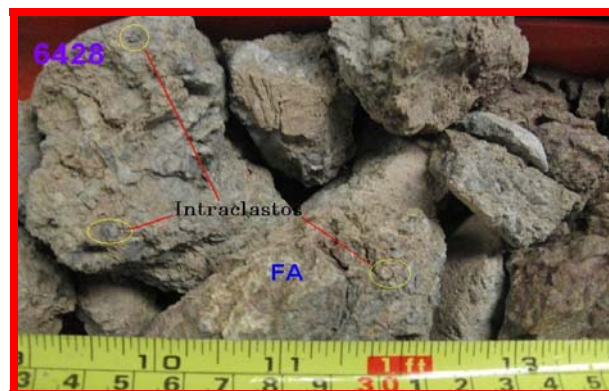
**Figura 32.** Facies A-x-b, ambiente de Canal.



### 9.3.2 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arcillolita (FA)

Hacia el tope de la sección se hallan limolitas arcillosas, localmente arenosa, varía en color de verde grisáceo a varicolorado al tope, ambiente de llanura de inundación Figura 33.

**Figura 333.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies arcillolita



### 9.3.3 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas bioturbadas (FA)

Hacia el tope de la sección se encuentran areniscas feldespáticas de color verde a verde pardo, hacia la base intraclastos arcillosos, grano soportada, perteneciente a un ambiente de Relleno de Canal, Figura 34.

**Figura 344.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies A-b, ambiente de Llanura de Inundación. Se resaltan algunas características de dicha facies como intraclastos, conchas y bioturbación.



#### 9.3.4 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas bioturbadas (FA)

Hacia el tope de la sección de estudio, se presenta arcillolita limosa gris, al tope se vuelve varicoloreada, muy fragmentada, perteneciente a un ambiente de Llanura de Inundación, Figura 35

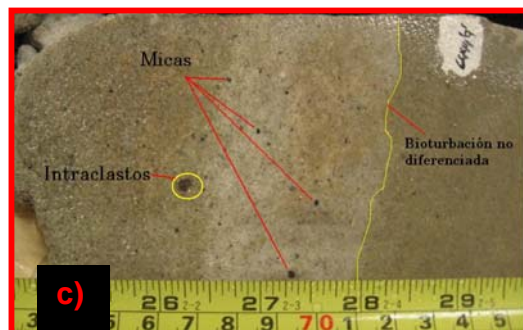
**Figura 355.** Porción del núcleo regularmente preservado mostrando las facies A-B de llanura de inundación.



#### 9.3.5 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas Bioturbadas (A-b) y Friables (A)

Hacia el tope de la sección se presenta una arenisca feldespática matriz lodosa, moderada selección, subangular a subredondeada, abundantes líticos negros, con nivel de conglomerado arcilloso. También presenta procesos de cataclasis y baja bioturbación, formados en un ambiente de Relleno de Canal, Figura 36.

**Figura 366.** Porción del núcleo, donde se presenta facies Ab, ambiente de Relleno de Canal. a) Se resalta un pequeño intraclasto de aproximadamente 0.5 mm, b) se observa claramente bioturbación no diferenciada, c) a mayor profundidad se evidenciaron fragmento de micas, pequeños intraclastos y se mantiene la bioturbación.



### 9.3.6 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas Friables (FA)

Porción de núcleo representado por arcillolita lodosa abigarrada, localmente caliche, pertenece a un ambiente de Llanura de Inundación, Figura 37

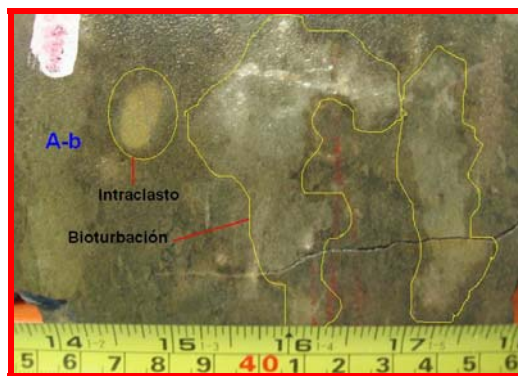
**Figura 377.** Porción del núcleo, en el cual el ambiente de Relleno de Canal, se evidencia claramente el color abigarrado del núcleo compuesto por lodo.



### 9.3.7 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas Bioturbadas (A-b)

Sección representada por arenisca cuarzosa, moderada a buena selección. Matriz arcillosa, abundantes líticos negros, micas, moderada bioturbación, ambiente de Relleno de Canal, Figura 38

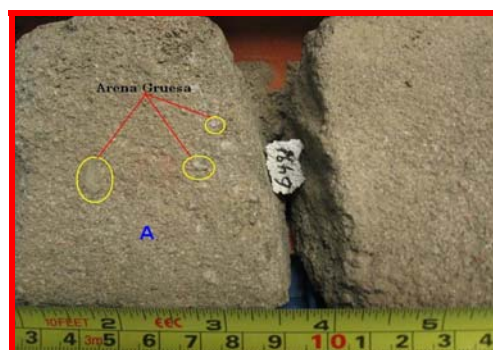
**Figura 38.** Núcleos tomados de la sección vertical seleccionada. Facies A-b, ambiente de Relleno de Canal.



### 9.3.8 Ambiente de Canal, Facies Arenitas (A)

Sección representada por arenisca cuarzosa, moderada a mala selección estructura masiva, subangular a subredondeada, abundantes líticos negros; se presentan niveles de arenisca conglomerática con clastos de cuarzo y chert de hasta de 5 mm. Grano soportada Figura 39.

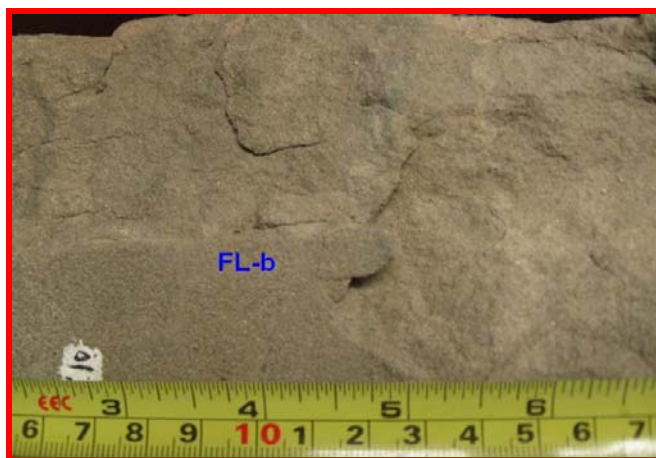
**Figura 39.** Núcleos de la sección vertical seleccionada. Facies A, ambiente de Canal, se resaltan algunos fragmentos de cuarzo y tamaño de grano grueso.



### 9.3.9 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)

El núcleo presenta lodolita arcillosa gris verdosa / amarillo claro, compacta con alto fisuramiento, ambiente de Llanura de Inundación Figura 40.

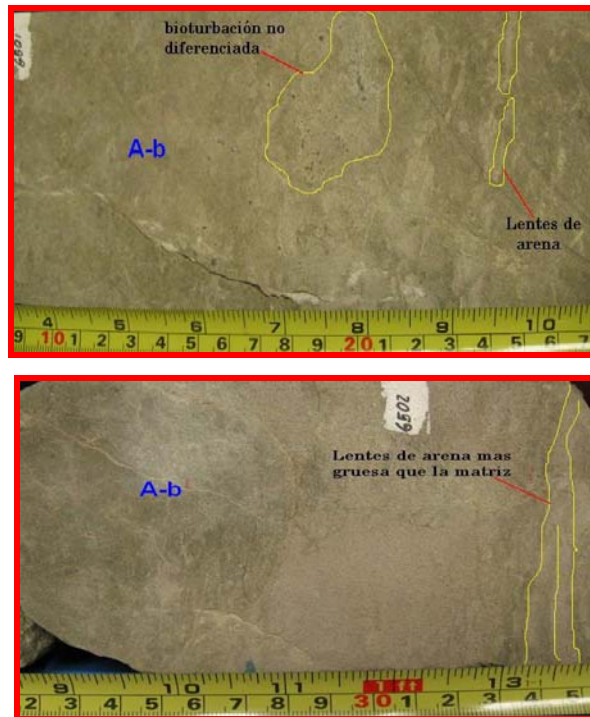
**Figura 40.** Imagen representativa de la Facies FL-b, ambiente de Llanura de inundación.



### 9.3.10 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Arenitas bioturbadas (A-b)

Sección representada por arenisca bien seleccionada, subredondeada, con limolita arenosa verde, contactos de bioturbación. Pequeñas zonas calcáreas, pirita alterada. Moderada bioturbación, ambiente de Relleno de Canal Figura 41.

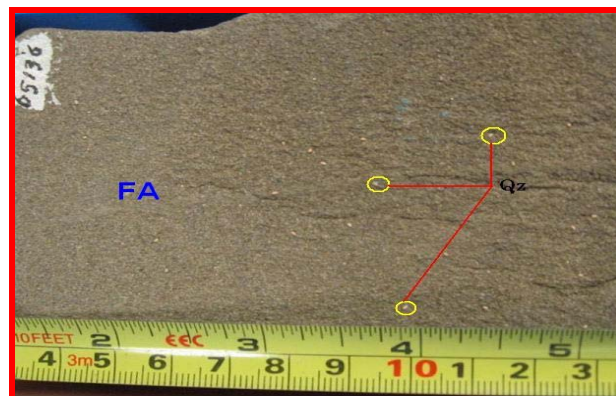
**Figura 41.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies A-b, ambiente de Llanura de Canal. a) Se resaltan algunos pequeños lentes de arena y bioturbación no diferenciada, b) lentes de arena.



### 9.3.11 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas friables (FA)

El núcleo presenta arenas de tamaño de grano fino, de color amarillo oscuro, con fragmentos de cuarzos distribuidos heterogéneamente, en un ambiente de Llanura de Inundación, Figura 42

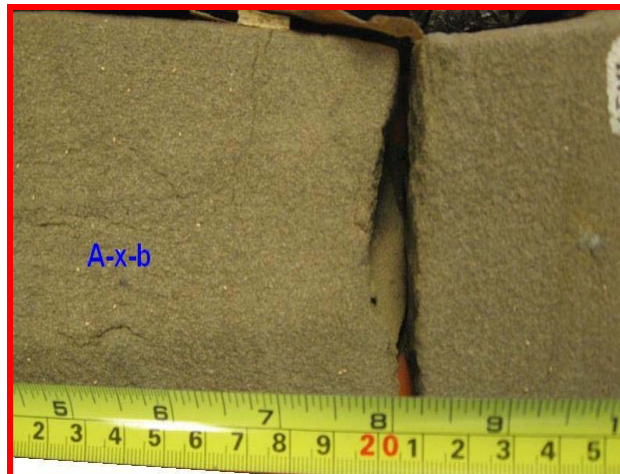
**Figura 42.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FA, ambiente de Llanura de Inundación, sobresalen algunos fragmentos de cuarzo



### 9.3.12 Ambiente de Canal, Facies de Arenitas con Estratificación Cruzada Bioturbada (A-x-b)

Representado por arenisca cuarzosa, matriz lodosa, mala selección, subredondeada, arenosoportada líticos negros esquistosos, localmente pirita. Moderadamente consolidada. Hacia el tope arcillolita limosa verde muy fragmentada, bioturbación no diferenciada, ambiente de Canal, Figura 43.

**Figura 43.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies A-x-b, ambiente de Canal.



### 9.3.13 Ambiente de Canal, Facies de Arenitas con Estratificación Cruzada Bioturbada (A-x-b)

Representado por arenisca cuarzosa, matriz lodosa, mala selección, subredondeada, arenosoportada líticos negros esquistosos, localmente pirita. Moderadamente consolidada. Hacia el tope arcillolita limosa verde muy fragmentada, bioturbación no diferenciada.

### 9.3.14 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Arenitas Friables Bioturbadas (FA-b)

Presenta Arcillolitas lodosas amarillas muy fragmentadas, ambiente de Llanura de Inundación, Figura 44.

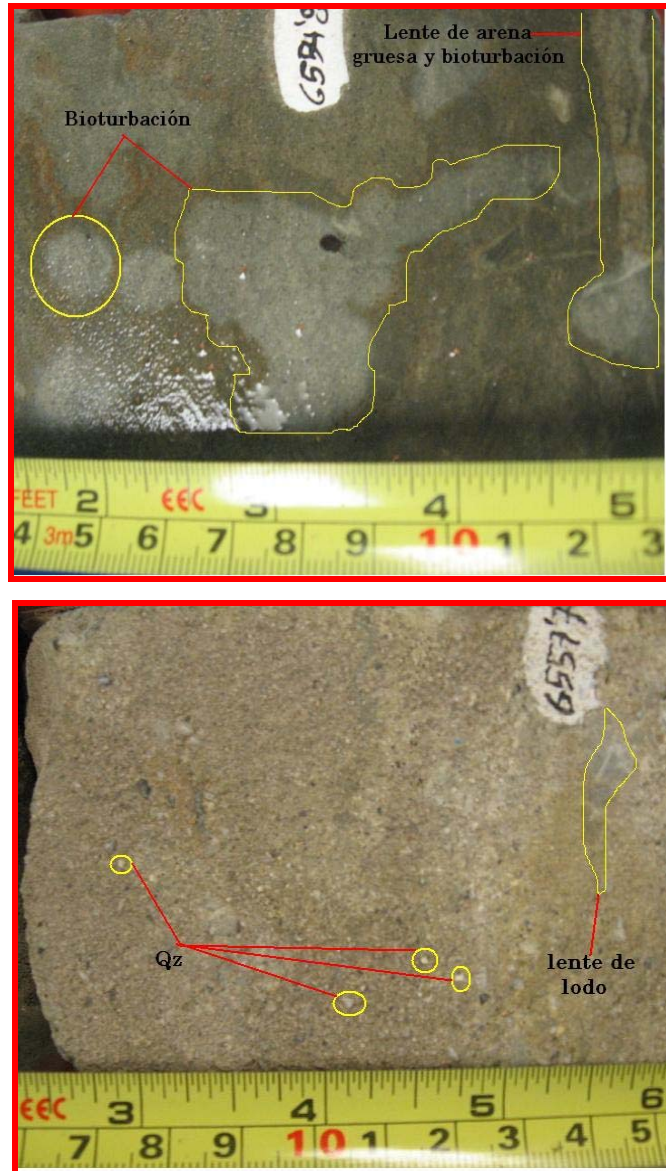
**Figura 44.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FA-b, ambiente de Llanura de Inundación.



### 9.3.15 Ambiente de Canal, representado por dos Facies Arenitas Bioturbadas (A-b) y Arenitas con Estratificación Cruzada (A-x-b) más hacia la base

La primera facies representada por arenisca conglomerática, escaso cemento arcilloso diagenético, mal seleccionada, clastos de 2 a 6 mm con intraclastos arcillosos, areniscas cuarzosas Figura 45. a). La siguiente Facies de (A-x-b) representado por arenisca cuarzosa ligeramente conglomerática, moderada a mala selección. Estratificación en artesa, Figura 45. b).

**Figura 45.** Núcleos de la sección vertical escogida ambiente de Canal. a) Facies (A-b), se resalta la bioturbación y un lente de arena, b) Facies (A-x-b) donde se observan fragmentos de cuarzo y un pequeño lente de lodo.



### 9.3.16 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolita (FL)

Representados por arcillolitas lodosas verdes muy fragmentadas, Figura 46.

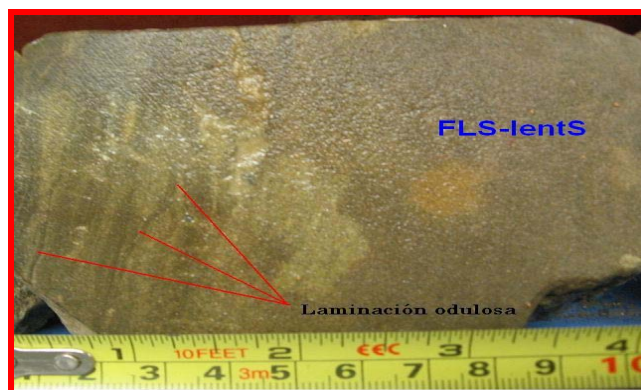
**Figura 46.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FL, ambiente de Llanura de Inundación.



### 9.3.17 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Limolita con lentes (FLS-lentS)

Representada por arenisca lodosa verde, intercalada con limolitas verdes con buena selección, subredondeada. Moderada bioturbación Figura 47.

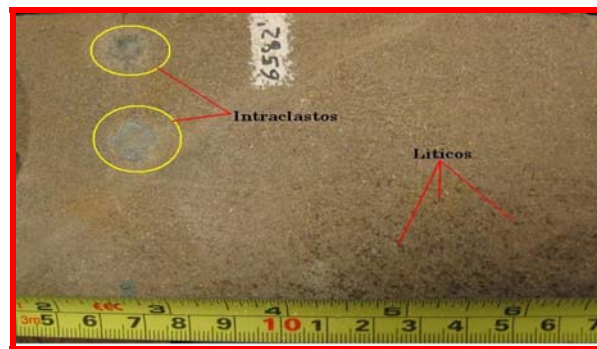
**Figura 47.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies (FLS-lentS), ambiente de Relleno de Canal, señalados se encuentran franjas de laminación ondulosa.



### 9.3.18 Ambiente de Canal, Facies Arenisca bien seleccionada (FABs)

Arenisca cuarzosa, matriz lodosa, moderada a buena selección, subredondeada, abundantes micas, líticos negros verdes esquistosos. Pequeñas zonas con pirita. Moderada a baja selección, Figura 48.

**Figura 48.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies (FABs) ambiente de Canal, en la imagen se resalta dos intraclastos y pequeños fragmentos de líticos.



### 9.3.19 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)

Se presenta arenisca feldespática y cuarzosa, moderada a buena selección, subredondeada, abundantes líticos negros. Localmente arenisca conglomerática con intraclastos arcillosos.

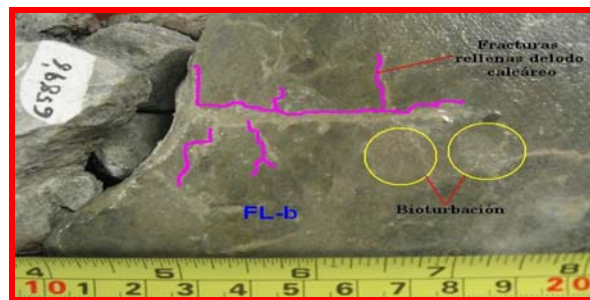
**Figura 49.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FL-b, ambiente de Llanura de Inundación.



### 9.3.20 Ambiente de Relleno de Canal, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)

Representados por intercalaciones de arenisca lodosa, intercalaciones lodosas, buena selección, pequeñas fisuras rellenas con lodo Figura 50, pirita, localmente calcárea, poca a alta bioturbación al tope.

**Figura 50.** Núcleos de la sección vertical escogida, ambiente de Relleno de Canal, en la imagen se encuentra señaladas algunas fisuras que posteriormente fueron rellenas por lodo, también se presenta rasgos de bioturbación.



### 9.3.21 Ambiente de Llanura de Inundación, Facies Limolitas Bioturbadas (FL-b)

Se muestra arcillolita limosa con caliche color gris verdoso, Figura 51, localmente moteados naranjados al tope arcillolita arenosa con pirita y azufre.

**Figura 51.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies FL-b, ambiente de Llanura de Inundación, se resalta en la imagen zonas de arcillolita limosa con caliche.



### 9.3.22 Ambiente de Canal, Facies Arenisca Lítica subredondeada (LwSs)

Representados por arenisca conglomerática cuarzosa, mal seleccionada, subangular a subredondeada, abundantes líticos negros.

**Figura 52.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies LwSs, ambiente de Canal.



### 9.3.23 Ambiente de Canal, Facies (TxCg)

Se encuentra representada por arenisca cuarzosa, inconsolidada, moderada a buena selección con estratificación granulométrica y localmente arenisca, fragmentos de cuarzo organizado en franjas, Figura 53.

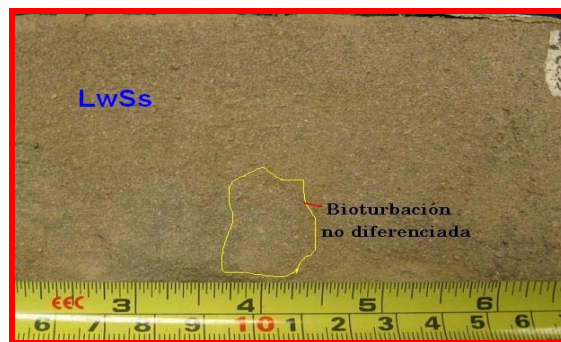
**Figura 53.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies TxCg, ambiente de Canal, en la imagen se resaltan fragmentos de cuarzo distribuido en franjas.



### 9.3.23 Ambiente de Canal, Facies Arenisca Lítica subredondeada (LwSs)

La roca es compuesta por arenisca feldespática, mal seleccionada, subredondeada, color amarillo claro, abundantes líticos negros, pirita. A la base arenisca conglomerática mal seleccionada. Escasa bioturbación, moderada impregnación, Figura 54.

**Figura 54.** En la imagen se observan facies LwSs, ambiente de Canal, se resalta en la imagen la bioturbación presente a dicha profundidad.



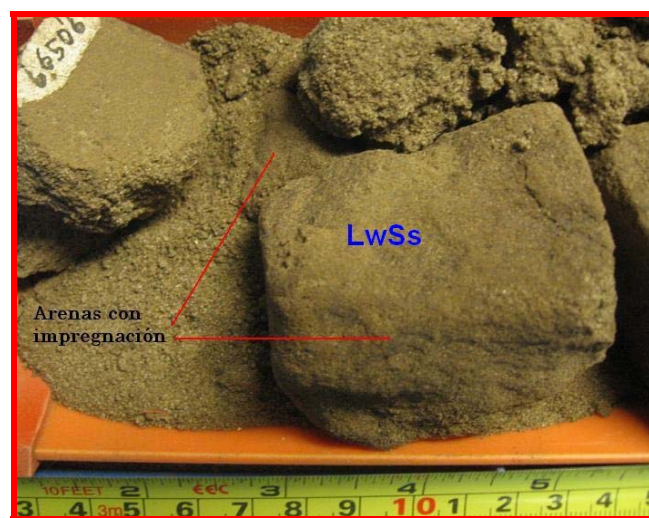
Pies más abajo continúa la misma facies, anteriormente descrita. Arenisca feldespática y cuarzosa, moderada a buena selección, subredondeada, abundantes líticos negros y verdes, mica, pirita, azufre. Poca bioturbación, moderada Impregnación.

**Figura 55.** Núcleos de la sección vertical escogida. Facies LwSs, ambiente de Canal, se resalta en la imagen la bioturbación presente a dicha profundidad.



Continúa con la misma facies anteriormente descrita Arenisca cuarzosa, moderada a buena selección a la base, subangular a subredondeada, abundantes líticos negros, al tope pirita, moderadas a abundantes micas, moderada impregnación Figura 56. Poca bioturbación.

**Figura 56.** Porción del núcleo con, Facies LwSs, ambiente de Canal, se resalta en la imagen la impregnación de la roca.

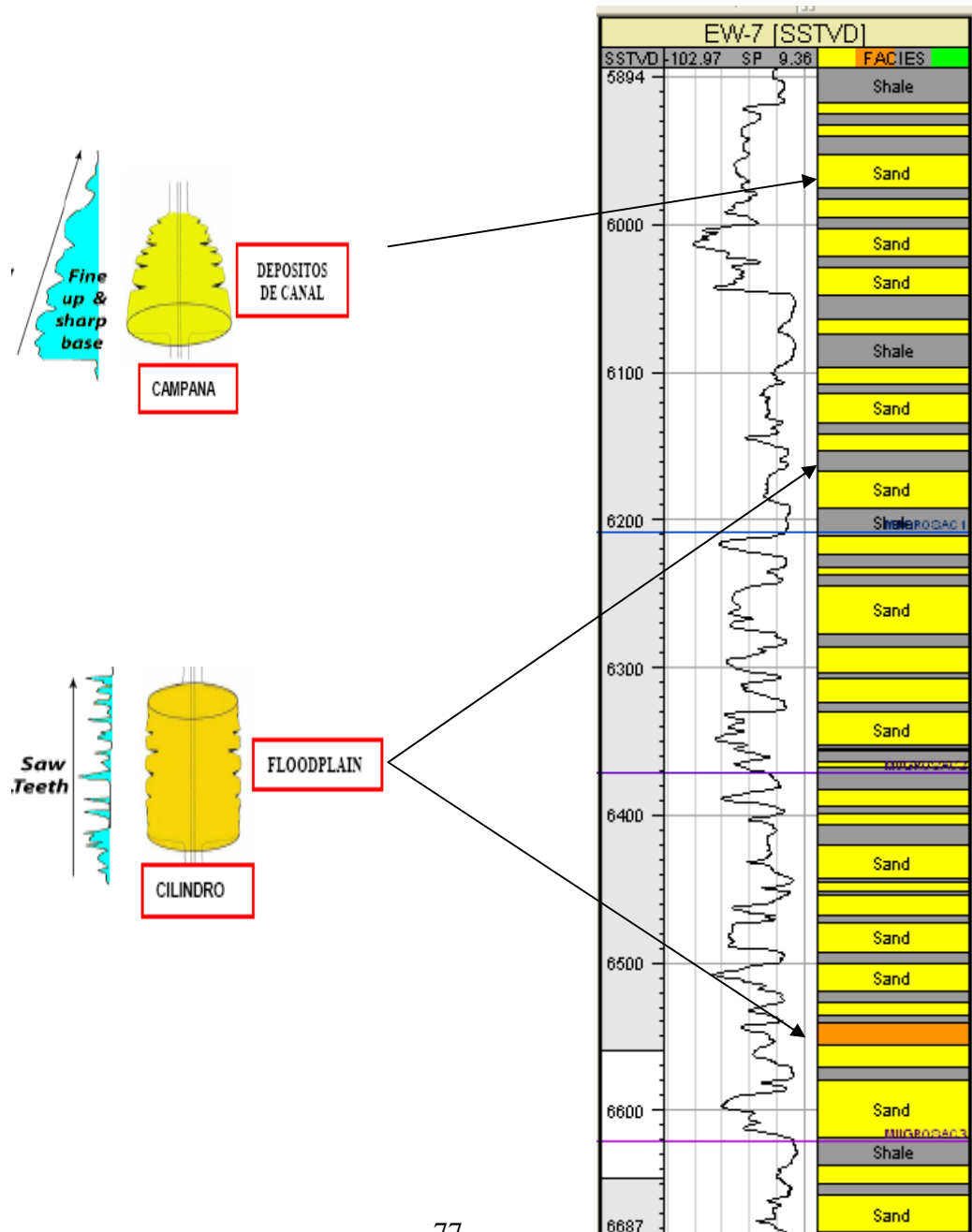


Teniendo en cuenta los anteriores resultados se procedió a correlacionar esta información con los registros de pozo disponibles, recurriéndose al registro de potencial espontáneo, debido a que funciona mejor en litologías fluviales ricas en feldespatos que atenúan la señal de las arenas en registros como el .de rayos gamma.

Según esto, se definen facies ambientalmente, que dependen de la forma que tome el registro; una primera forma corresponde a la forma de cilindro, la cual se interpreta como *Flood Plain* , y generalmente presenta continuidades mayores con tamaño de grano muy fino; y por ultimo esta la forma de embudo que se considera como facies de canal. Estas facies son

consideradas buenos reservorios presentes en depósitos de ambientes continentales, de tipo Fluvial, ya que presentan buenos espesores para almacenar hidrocarburo y tienen buena continuidad lateral. (Nanz 1959) (Figura 57).

**Figura 57.** Definición de las diferentes formas asociadas a los ambientes interpretados mediante registros de pozo.



## **9.4 Interpretación de Traversas**

### **9.4.1 Traversa de los pozos C-79, C-80, C-30**

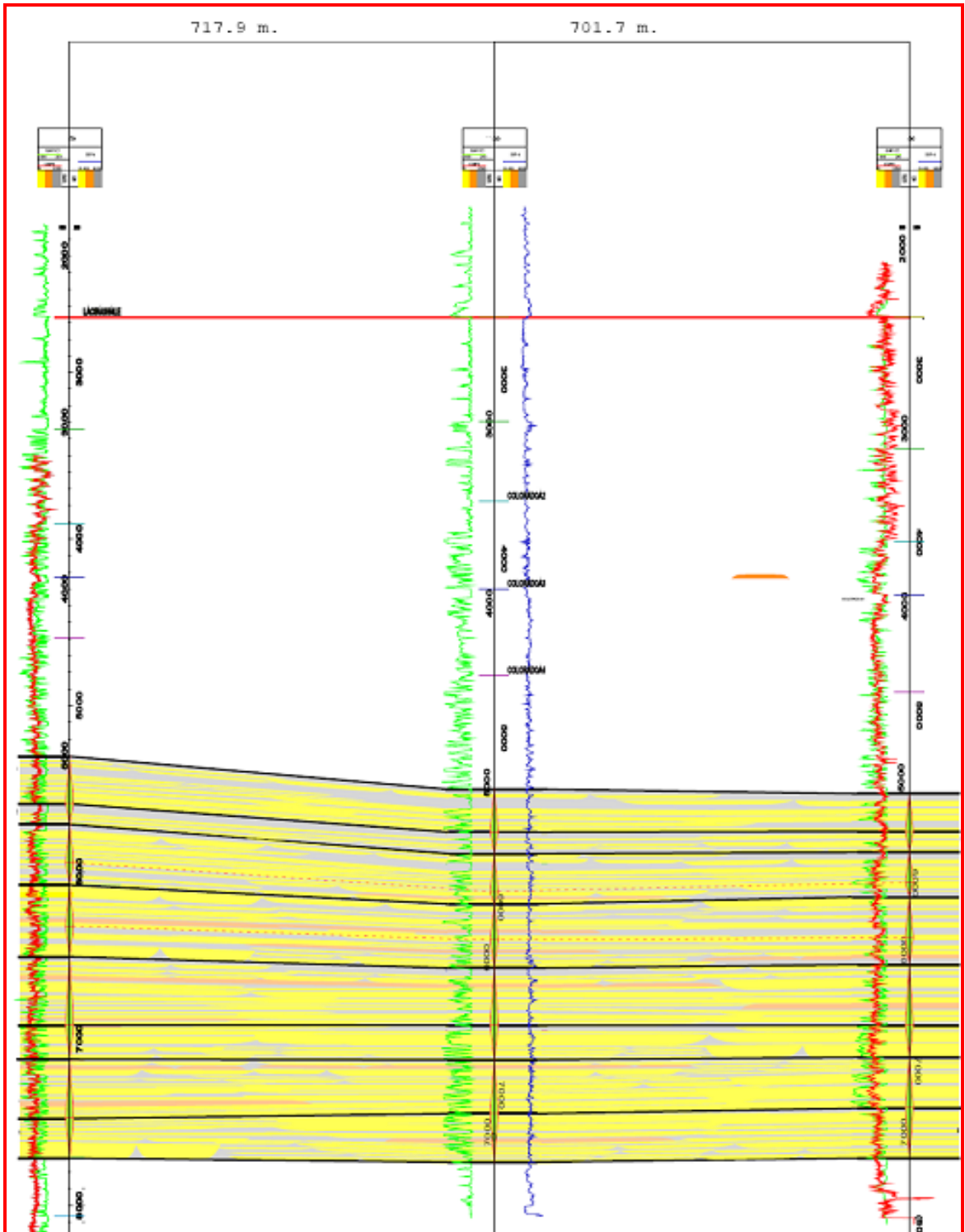
En la Figura 58 se observa la Traversa 1, donde se incluyen registros como el potencial espontáneo y resistivos Normal Corta (SN) de los Pozos C-79, C-30 y C-80 teniendo como datum el horizonte X, se observa que en la parte oeste hay buena continuidad lateral de las facies de canal y hacia el este hay buena continuidad lateral de facies de canal con disminución de espesores. Resaltando que en la parte W en el sector, indicando los canales de buen espesor se encuentran amalgamados. Hay una variación en el incremento de A/S en toda la Formación. Hacia el tope hay presencia de finos, lodolitas de llanura de inundación, en donde se observa una disminución en la continuidad de las facies arenosas, presentando menor espesor en comparación con los paquetes arenosos que se presentan hacia la base de la Formación.

### **9.4.2 Traversa de los pozos C-37, C-81, C-77, C-97, C-38**

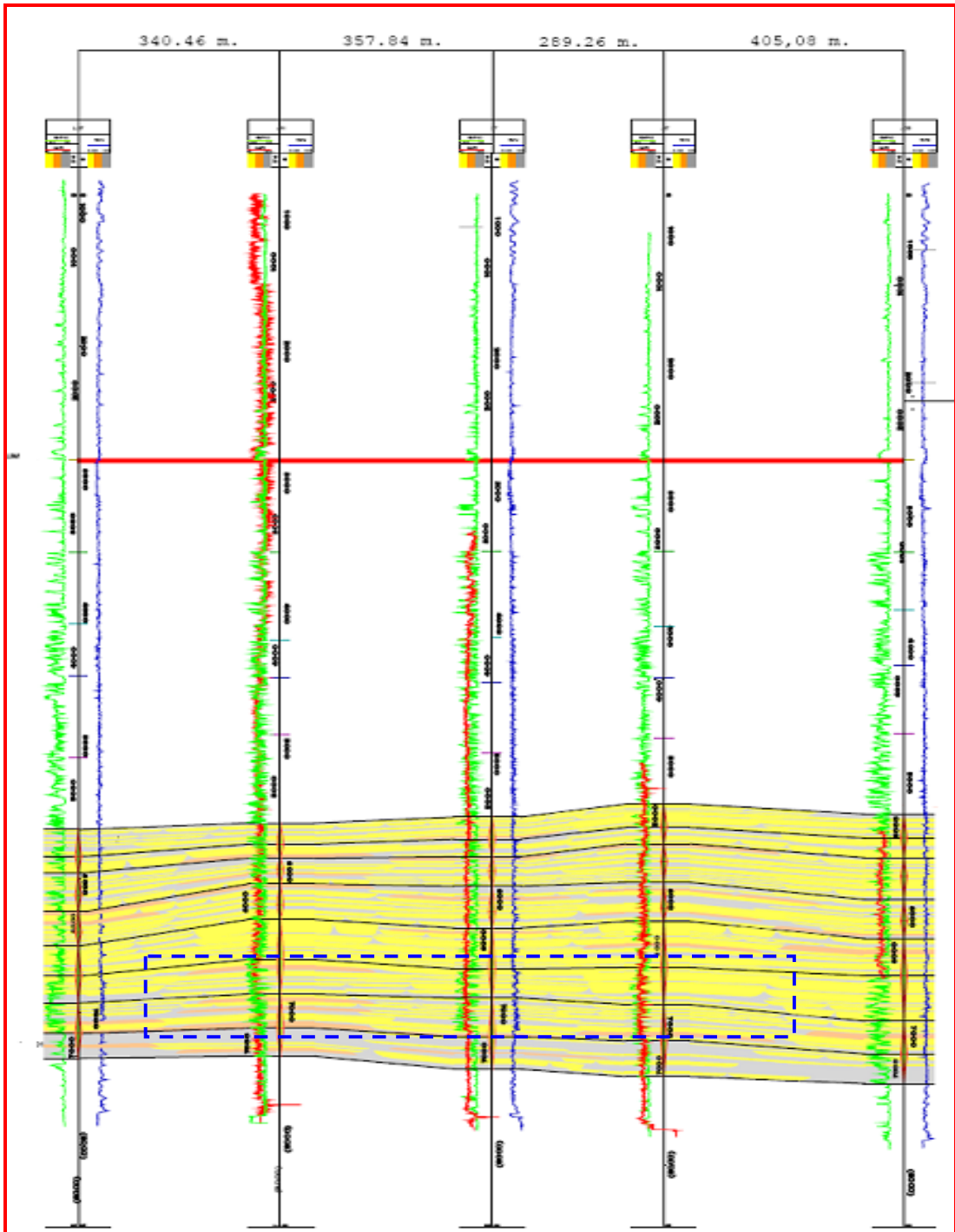
La Figura 59, ilustra una correlación hecha en los pozos C-37, C-81, C-77, C-97, C-38, en la sección de estudio, la cual atraviesa el campo A en dirección SW-NE, en ella se utilizaron los registros SP, los cuales permiten identificar y diferenciar zonas permeables tales como las arenas y zonas impermeables como las arcillas, factores que fueron aprovechados en el presente estudio. Al observar los registros correlacionados, es de resaltar la existencia de un gran número de canales con buena continuidad lateral y buenos espesores de arena Figura 59, representados por intervalos porosos, permeables identificados por el registro SP, con una mínima influencia de arcillas. Debido a ello, los horizontes interpretados se tomaron en las secciones C2, C1 y B3, de base a tope respectivamente, con el fin de disminuir la incertidumbre a la

hora su visualización. En el horizonte C2, se identificaron diferentes canales, entre ellos el canal 3, en cercanías de los pozos C-81, C-77, y C-97, donde mediante la correlación se observó que dicho canal puede corresponder a estos pequeños canales, los demás canales solamente se corroboraron con los mapas de arena debido a su lejanía respecto a pozos perforados. Para el Horizonte C1, también se evidenciaron canales diferentes a los ya vistos en el horizonte C2, de los cuales dos están próximos a pozos perforados, el canal 10 cerca al pozo 77, el canal C12 cerca al pozo C-81. En el Horizonte B3, aumenta el porcentaje de lodolitas de llanura de inundación, el cual con el atributo de extracción de amplitud mostró zonas en parches amarillos, probablemente, de llanura de inundación.

**Figura 58.** Correlación estratigráfica de los pozos disponibles en la zona de estudio. (Patiño, 2008)

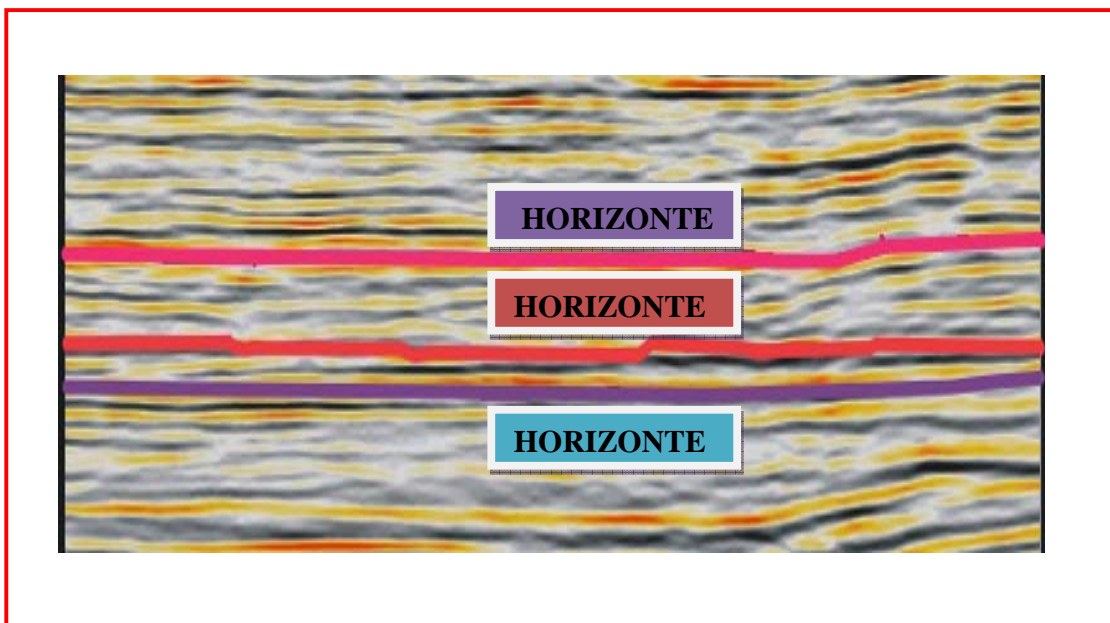


**Figura 59.** Correlación estratigráfica disponible en la zona de estudio. (Patiño, 2008)



Obtenidos los resultados de los núcleos, registros y traversas; se realizó la selección tres horizontes a partir de uno de los pozos que pasa sobre el *inline* 250 teniendo en cuenta que estos presentaran continuidad y alta reflectividad, con el fin de facilitar su interpretación; de esta manera los horizontes interpretados en el software Opendtect 3.2.2 fueron: Horizonte A a 1375 ms., Horizonte B a 1522 ms. y por ultimo Horizonte C a 1594 ms. Como se muestra en la Figura No. 60

**Figura 60.** *Inline* 250 del subvolumen sísmico del área de estudio, señalando los horizontes interpretados.



El siguiente paso dentro de la metodología de este estudio consistió en calcular algunos atributos sísmicos como: coherencia, extracción de amplitud, convolución Laplaciana y descomposición espectral. Con el fin de analizar la respuesta de los canales a estos atributos, en cada uno de los horizontes y de esta manera, determinar que atributo permite describir la geometría de estos canales y las variaciones que estos puedan presentar a medida que se avanza en profundidad.

## **9.5 Interpretación de Horizontes**

### **9.5.1 Horizonte A**

#### **9.5.1.1 Coherencia calculado sobre el Horizonte A**

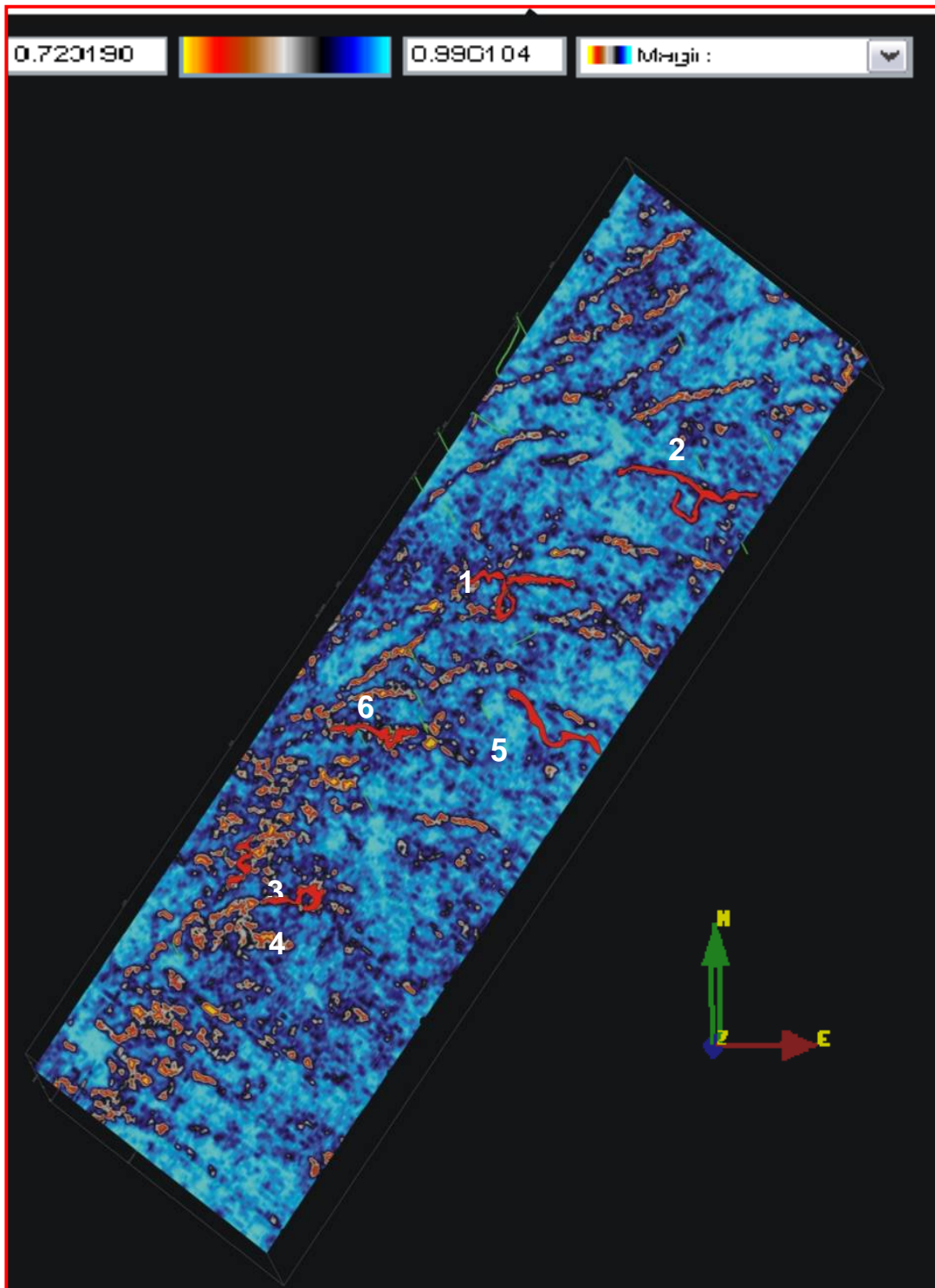
Al aplicar el atributo sísmico de coherencia al horizonte A, se encontró que a un tiempo de 1375 ms (Horizonte al tope de la sección en estudio) se resaltan diferentes tipos de discontinuidades geológicas como fallas y canales. Los canales se resaltan en color naranja y se caracterizan por tener formas sinuosas y en algunos casos rectas. Su dirección al igual que en el mapa de fallas (Figura 61) es SW-NE.

#### **9.5.1.2 Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte A**

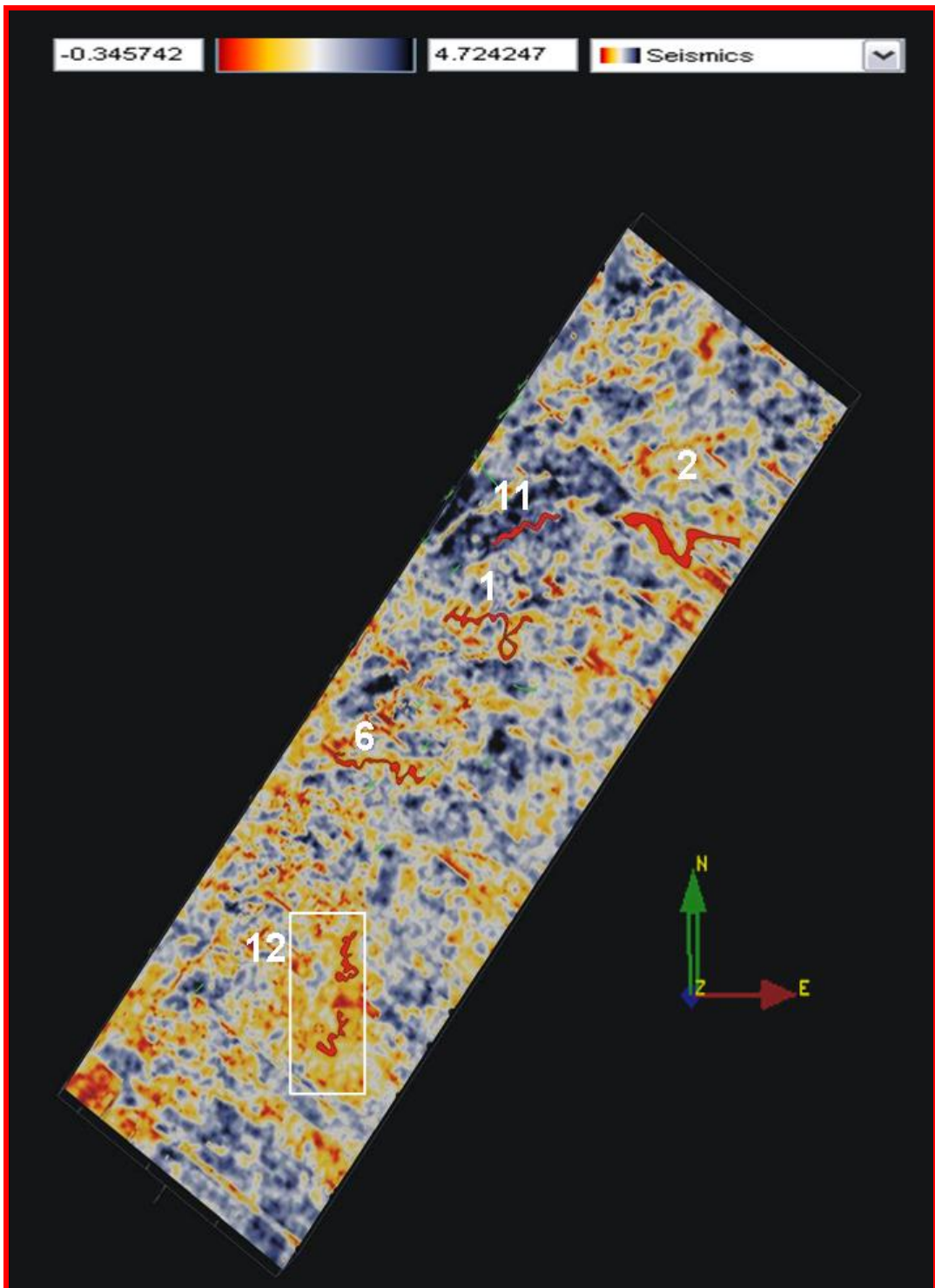
Este atributo sísmico (Figura 62) a diferencia del atributo de coherencia, no resaltó las fallas, pero si resaltó nuevamente los canales (1 y 2) y a su vez permitió visualizar otros canales (6, 11, 12) que no se observaron con el atributo de coherencia. La respuesta de este atributo está relacionada con los cambios litológicos o de sedimentos, los cuales producen variaciones de amplitud que están relacionados con cambios de impedancia acústica.

En la figura 62, los canales se muestran de color naranja, manteniendo la sinuosidad ya vista con el atributo de coherencia. También se observan áreas posiblemente constituidas por sedimentos finos, depositados por suspensión a partir de las aguas que inundan la planicie adyacente al canal; lo anterior se identifica tomando en cuenta la respuesta dada por la amplitud con relación a los colores asignados. Cuando el canal tiene una mayor discontinuidad se acentúa con color rojo, mientras que para áreas menos continuas, se asignan colores amarillos, ubicado en las zonas adyacentes o en abandono del canal.

Figura 61. Coherencia calculada sobre el Horizonte A.



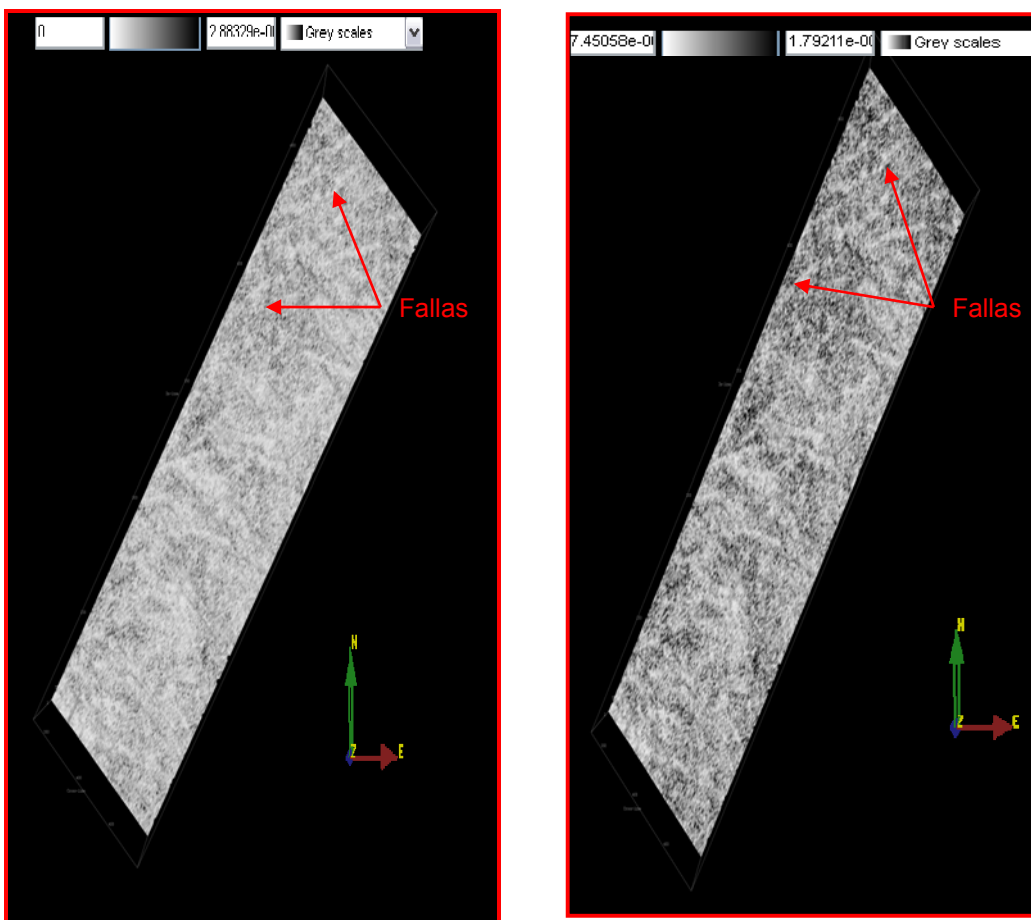
**Figura 62.** Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte A. El cuadro blanco encierra una posible llanura de inundación.



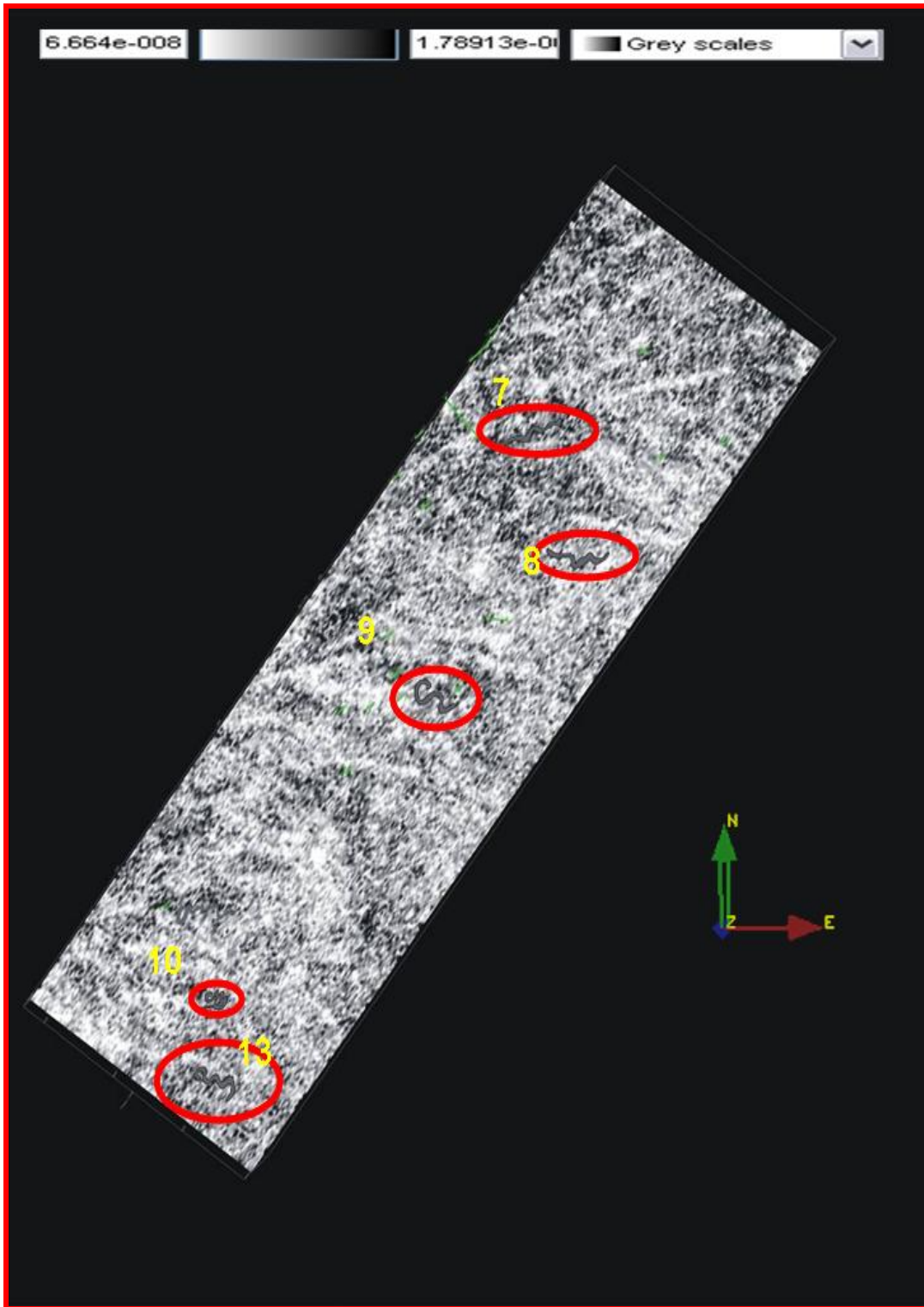
### 9.5.1.3 Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte A

El atributo de descomposición espectral fue calculado en un rango de frecuencias desde 30, 40, 50 y 70 hertz (figura 63) puesto que en este intervalo de frecuencias, es posible visualizar canales. El resultado de la aplicación del atributo sísmico permitió visualizar otros canales a una frecuencia de 70 hertz; y se resaltan con círculos rojos en la figura 64. Estos canales no se visualizaron con los atributos de coherencia y extracción de amplitud; pero si fue posible visualizar algunas fallas que se resaltan con colores claros mostrando una orientación característica.

**Figura 63.** Descomposición espectral calculado al horizonte A a 40 y 50 hertz respectivamente. A frecuencias de 40 y 50 hertz, el atributo calculado permitió visualizar fallas en colores claros como el blanco.



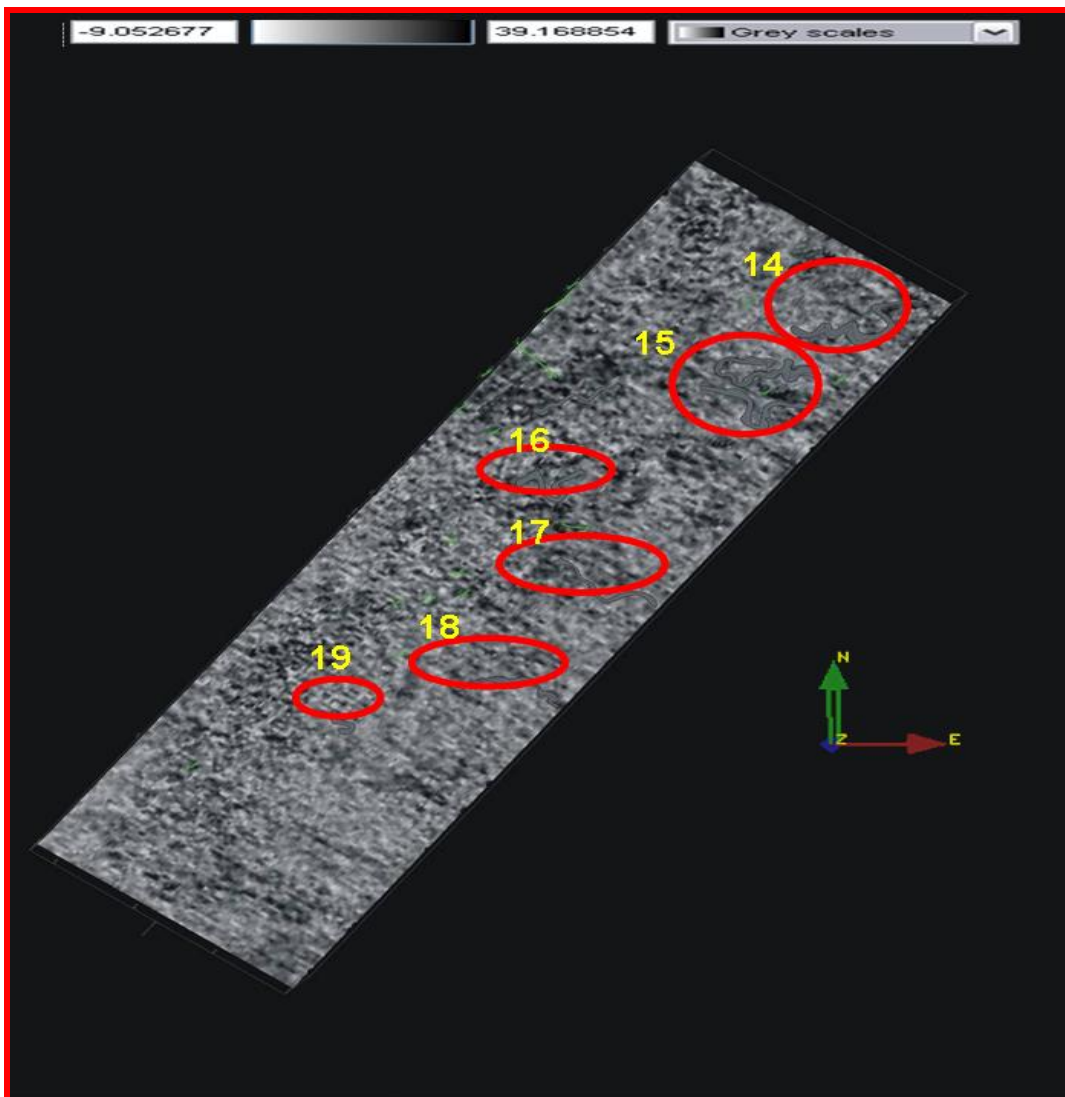
**Figura 64.** Descomposición espectral calculada sobre el horizonte A a 70 Hertz. Los círculos en rojo resaltan los canales.



#### 9.5.1.4 Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte A

El atributo de Convolución Laplaciana aplicado al horizonte A, dio una muy buena respuesta, al realzar los bordes de los canales fluviales. En la figura 65 se observa los canales en colores oscuros enmarcados en círculos rojos y caracterizados por presentar sinuosidad. Es de resaltar, que este atributo no permitió visualizar elementos estructurales como fallas.

**Figura 65.** Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte A.



Una vez se calcularon diferentes atributos sobre el horizonte A y se realizó, la detección de los canales en este horizonte, el siguiente paso consistió en aplicar la misma metodología a los otros dos horizontes, con el fin de detectar posibles variaciones en los canales, como migración lateral de estos.

## **9.5.2 Horizonte B**

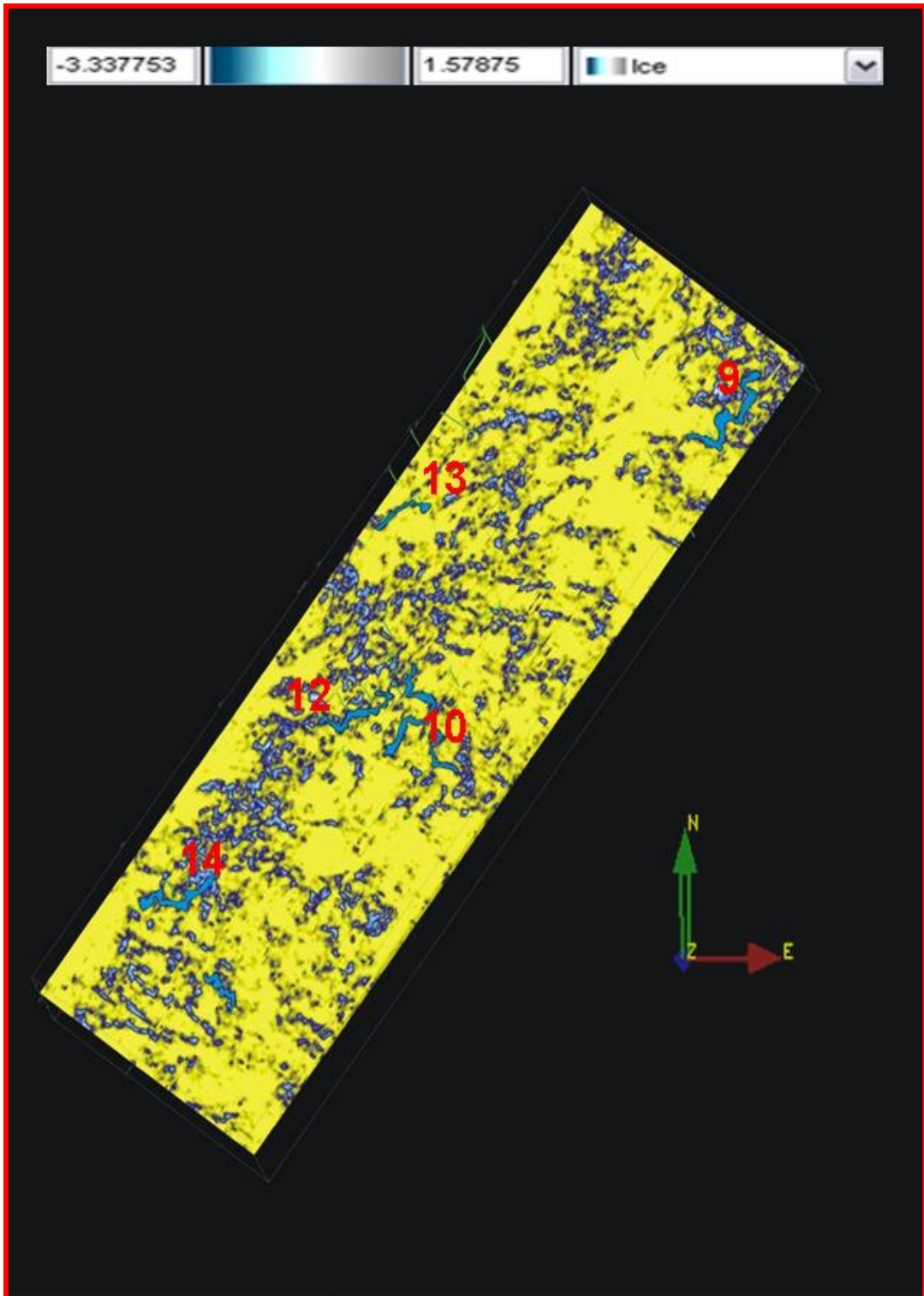
### **9.5.2.1 Coherencia calculado sobre el horizonte B**

Al aplicar el atributo sísmico de coherencia al Horizonte B, se encontró que a un tiempo de 1522 ms, no hay visualización de discontinuidades como las fallas, en comparación con el cálculo del atributo en el Horizonte A, el cual fue el que mejor las resaltó. Los canales visualizados en el Horizonte B (9,10,12,13,14 Figura 66) pertenecen al estilo fluvial meandriforme.

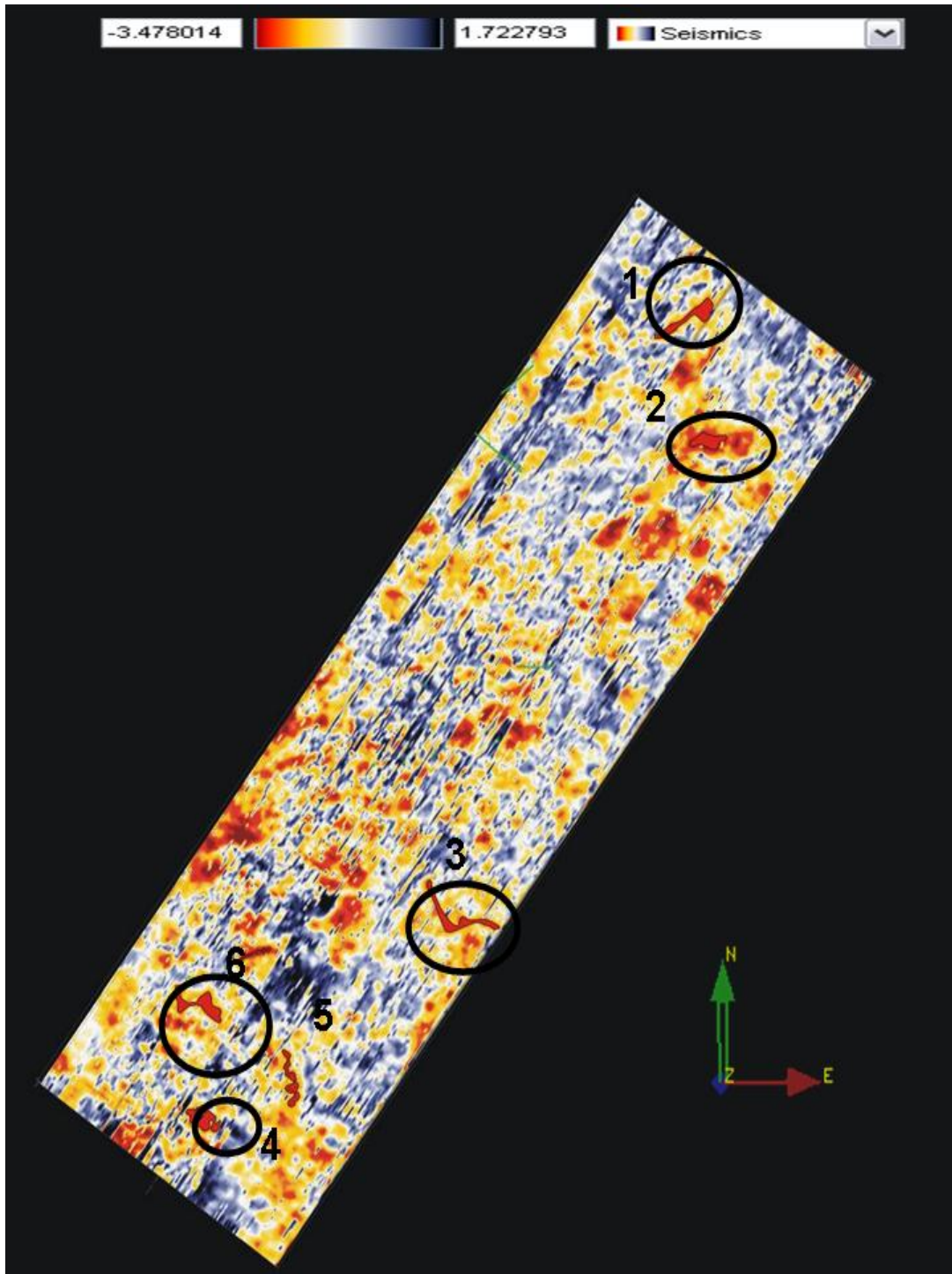
### **9.5.2.2 Extracción de Amplitud calculado en el horizonte B**

El atributo extracción de amplitud presento falencias al tratar de visualizar discontinuidades como fallas y canales, observándose en algunas áreas (centro y Norte) manchas o puntos que varían de naranja a rojo sin ninguna geometría en particular (figura 67). Al parecer, se asemeja a pequeñas llanuras de inundación relacionadas con posibles canales. En la parte SW de la Figura son visibles canales que presentan sinuosidad característica de esta zona.

Figura 66. Coherencia calculada sobre el horizonte B (1522 ms)



**Figura 67.** Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte B. Los círculos negros muestran los canales y posibles llanuras de inundación.



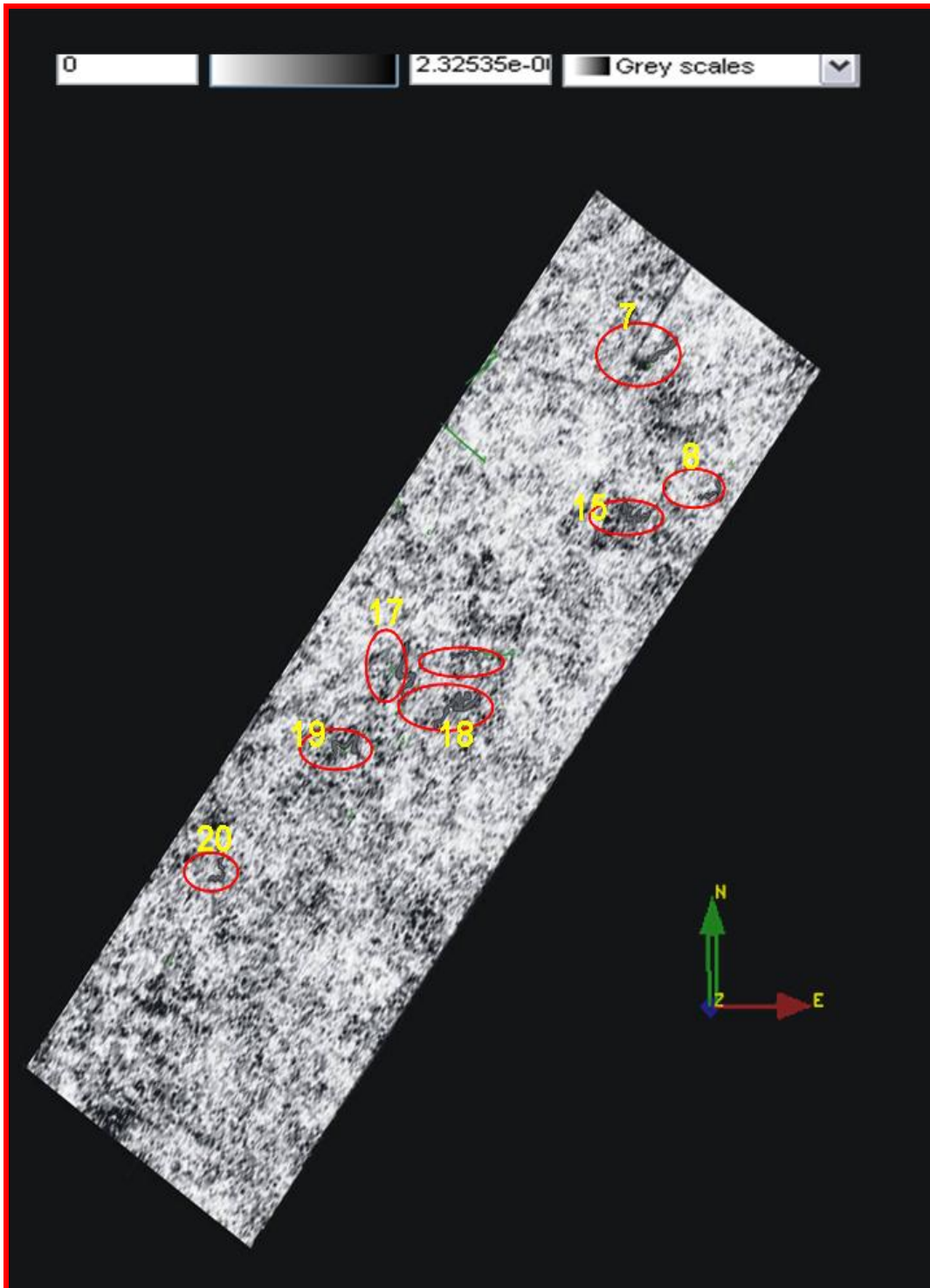
### **9.5.2.3 Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte B.**

El atributo de descomposición espectral fue calculado en el rango de frecuencias de 30 – 70 hertz, dando una mejor respuesta a 70 hertz (Figura 68), puesto que facilitó la visualización de nuevos canales, que mantienen la sinuosidad posiblemente, porque la zona presento bajas energías, provocando así que el flujo del agua modele un cauce de bajas profundidades y formas sinuosas a lo largo del canal.

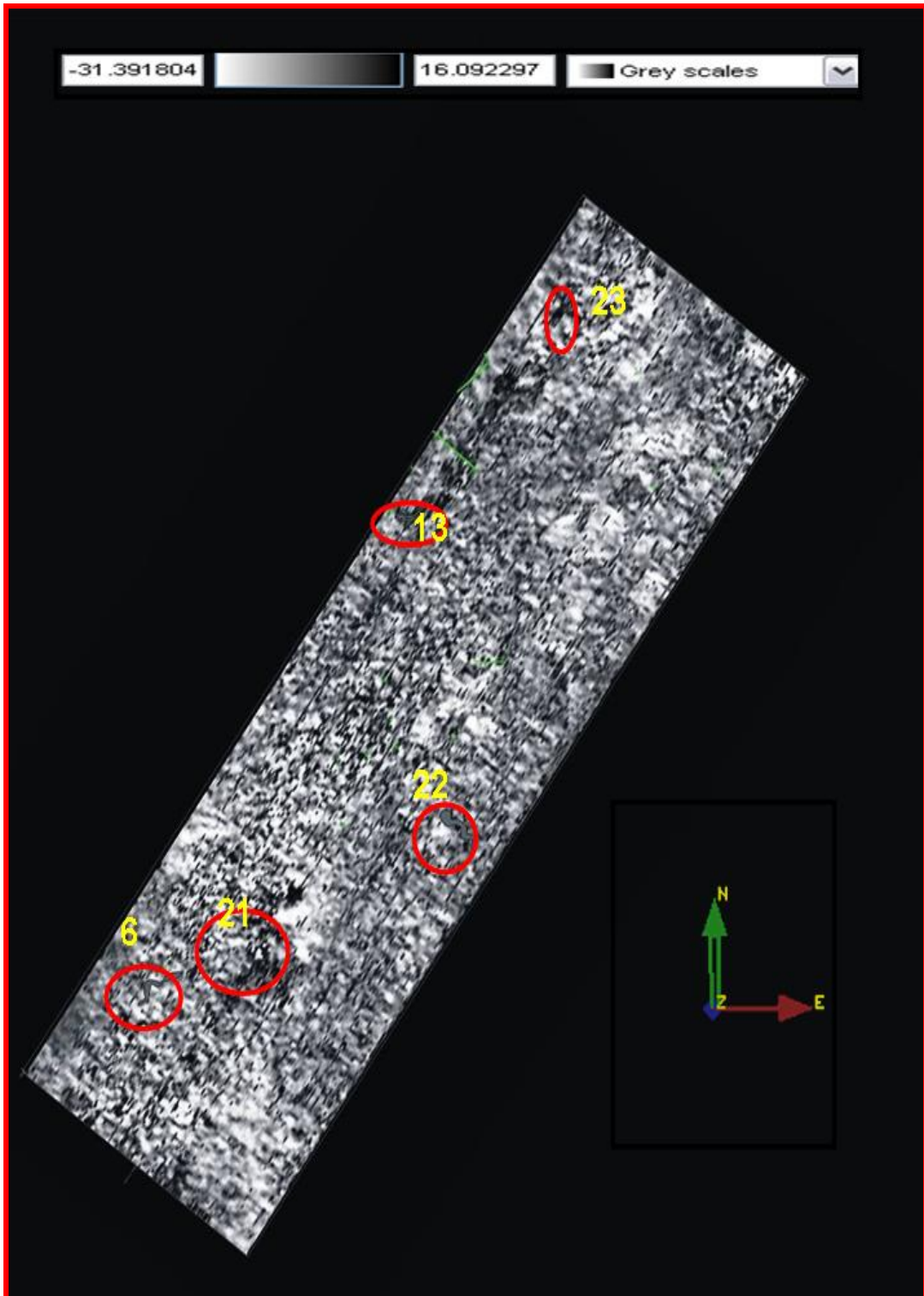
### **9.5.2.4 Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte B**

La convolución Laplaciana en el Horizonte B, fue un atributo que no proporcionó visualización de fallas; sin embargo se visualizaron ciertos canales (Figura 69), los cuales no son muy claros puesto que no muestra bordes definidos y por ende inducen a la confusión con las demás discontinuidades que pueda presentar la superficie.

**Figura 68.** Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte B a 70 Hertz. Los Círculos en rojo muestran los canales interpretados.



**Figura 69.** Convolución Laplaciana calculada sobre el horizonte B.



### **9.5.3 Horizonte C**

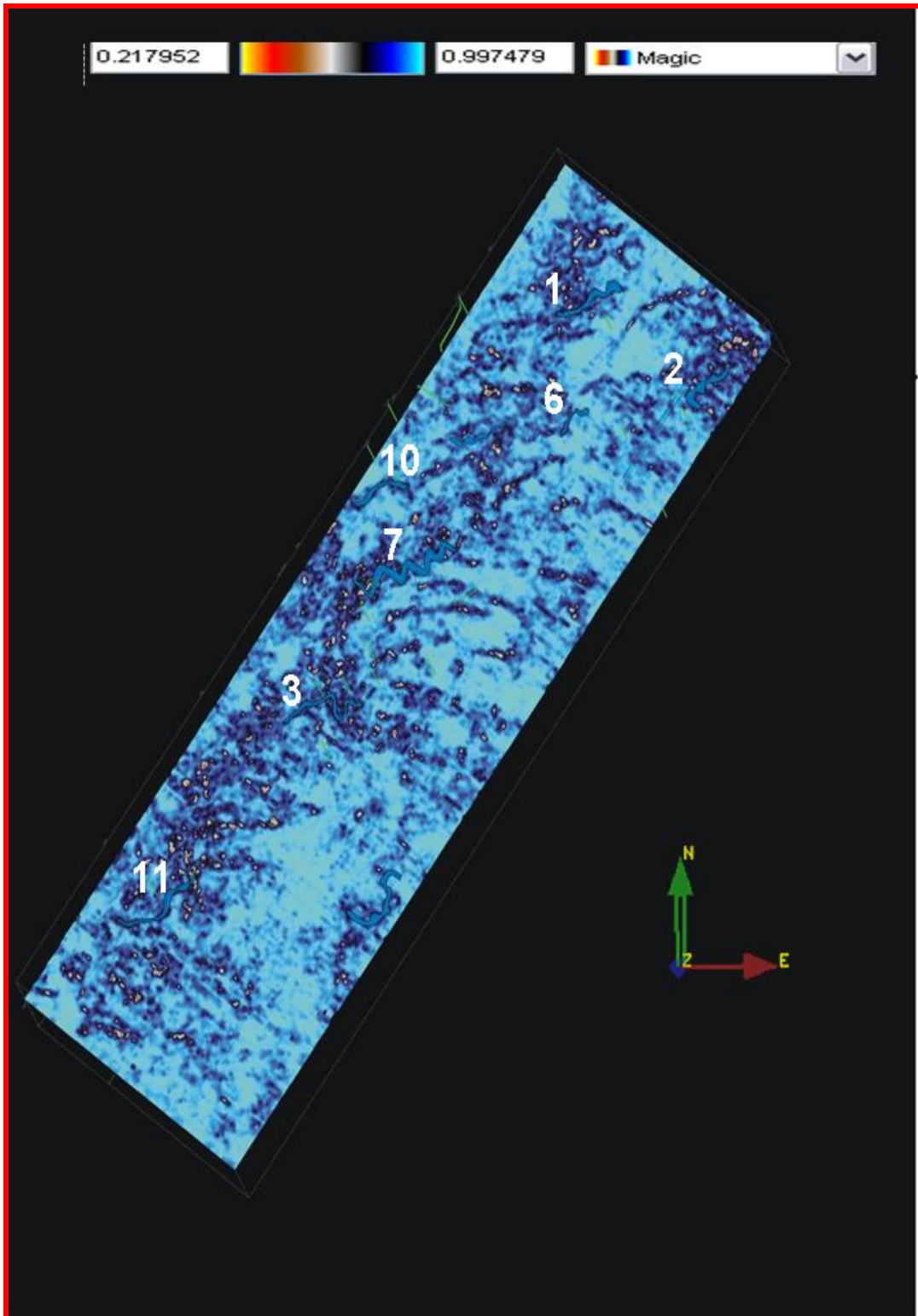
#### **9.5.3.1 Coherencia calculada sobre el horizonte C**

El resultado del cálculo del atributo sísmico de coherencia calculado al Horizonte C, permite resaltar el borde del canal, así como la planicie de inundación y la cadena de canales; los cuales se muestran de color azul en la Figura 70 y son los que mejor se visualizan con dicho atributo. (Figura 70, números 1, 2, 3, 6, 7, 10 y 11)

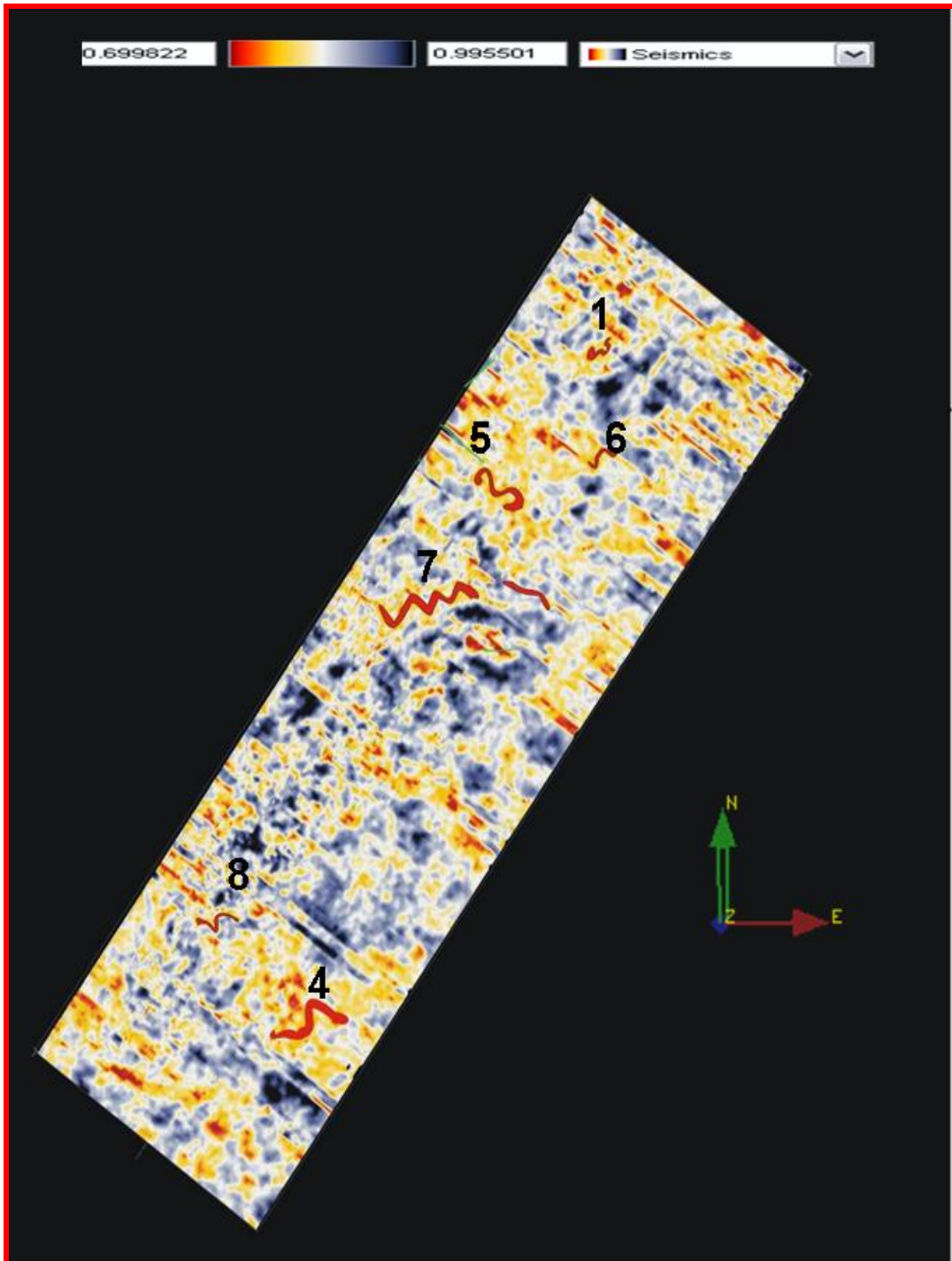
#### **9.5.3.2 Extracción de amplitud calculada sobre el horizonte C**

Este atributo sísmico resaltó nuevamente los canales (1, 6 y 7 ) que se habían observado con el atributo de coherencia; y a su vez permitió visualizar otro canal, que no se observó con el anterior atributo. Al calcular el atributo de extracción de amplitud al Horizonte C se visualizan canales en los cuales se puede apreciar la planicie de inundación (color amarillo) y la cadena del canal (color rojo) (Figura 71). En su mayoría son estilos meandriformes puesto que la sinuosidad que se obtuvo alcanza valores mayores que 2.0 (Tabla 2)

Figura 70. Coherencia calculada sobre el horizonte C.



**Figura 71.** Extracción de Amplitud calculada sobre el horizonte C. Los números indican los canales interpretados en el horizonte, presentando un estilo fluvial meandriforme (1,4, 5 y 6).



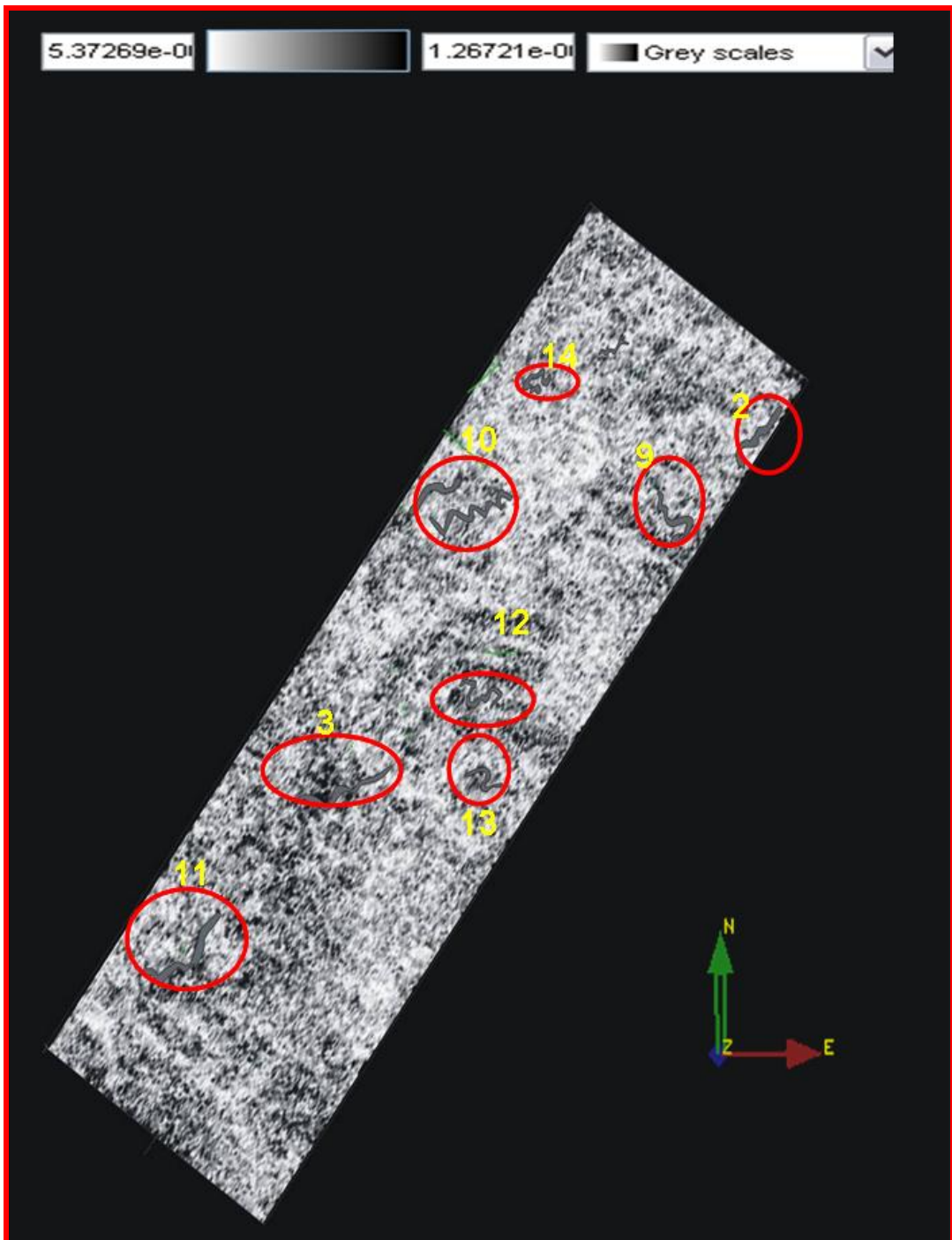
### **9.5.3.3 Descomposición Espectral calculada en el horizonte C**

La descomposición espectral permite la detección de capas delgadas y de características geológicas más allá del análisis sísmico tradicional descomponiendo la señal sísmica en sus componentes de frecuencia. Este mapa de Descomposición espectral a 70 Hertz dio una mejor respuesta que el intervalo 30-50 hertz y mejoro la visualización de los canales resaltando los canales que no fueron vistos aplicando los atributos de coherencia y extracción de amplitud (Figura 72).

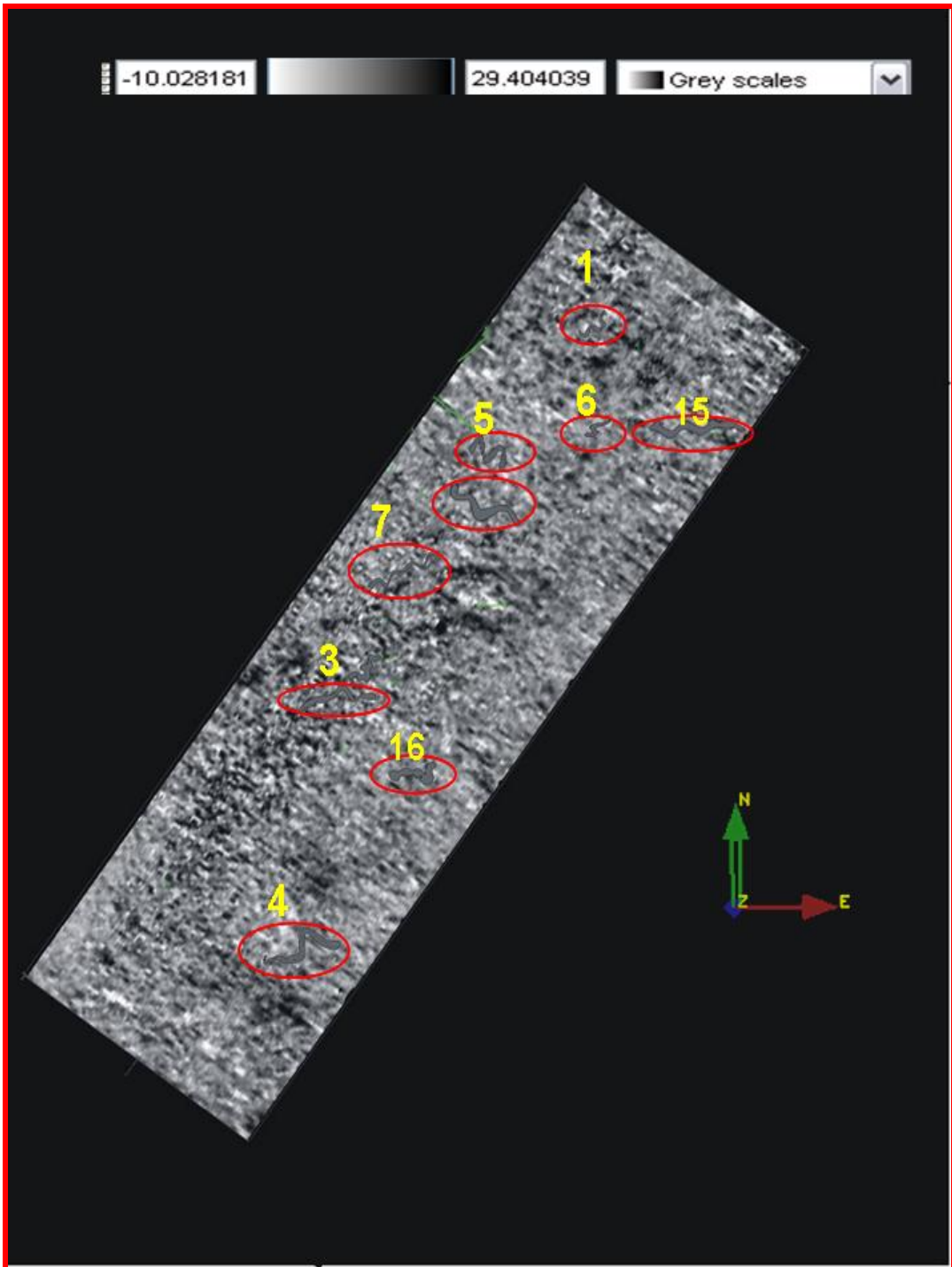
### **9.5.3.4 Convolución Laplaciana calculada sobre la superficie C**

Calculando el atributo de Convolución Laplaciana al Horizonte observado en la Figura 73, permite un realce de los bordes de los canales (gris), generando una mejor visualización de éstos; puesto que opera como un filtro de la imagen incrementando el contraste en las zonas donde hay una mayor diferencia entre las intensidades, y reduciendo éste donde no hay variación de intensidad.

**Figura 72.** Descomposición Espectral calculada sobre el horizonte C a 70 Hertz. Los círculos en rojo muestran los canales interpretados mediante la aplicación del atributo.



**Figura 73.** Convolución Laplaciana calculada sobre la superficie C. Círculos en rojo visualizan los canales interpretados en el horizonte.



Además de los atributos anteriormente mencionados (Coherencia, Extracción de Amplitud, Descomposición espectral y Convolución Laplaciana) se calcularon otros como: Energía, frecuencia, amplitud instantánea, amplitud instantánea primera derivada y convolución prewit, pero estos no presentaron una respuesta que resaltara los canales.

Por otra parte en los horizontes interpretados se visualizan canales con diferentes estilos Fluviales como son; sinusoidales, meandriformes y en menor proporción anastomosado y entrelazados; esto se determino hallando la sinuosidad del canal por medio de la ecuación 1 de la figura 4. Es de resaltar que los canales sinuosos sufren desbordamiento el cual se genera cuando las aguas de la corriente principal logran romper los muros que la confinan provocando que el cauce principal tome otra dirección y de lugar a una sedimentación rápida por tracción y suspensión, el agua cargada tanto con material grueso como fino, pierde su capacidad para transportarla, dando como resultado depósitos gradados de meandros abandonados.

## 10. CARACTERIZACIÓN DE LOS CANALES

Una vez se determinaron los canales, el siguiente paso consistió en caracterizarlos. Para esto se determino el ancho y sinuosidad de los canales, mediante algunas formulas mostradas a continuación. El ancho del canal se determino trazando tres transectas (Figura de canales Tabla 4, 6 y 8) a lo ancho de cada canal, luego se tomaron las dos coordenadas de cada transecta y se hallo la distancia entre puntos mediante la fórmula de distancia euclidiana (Euclides, 1482):

$$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (4)$$

Donde:

$X_2$  = Coordenada del punto 2 en X

$Y_2$  = Coordenada del punto 2 en Y

$X_1$  = Coordenada del punto 1 en X

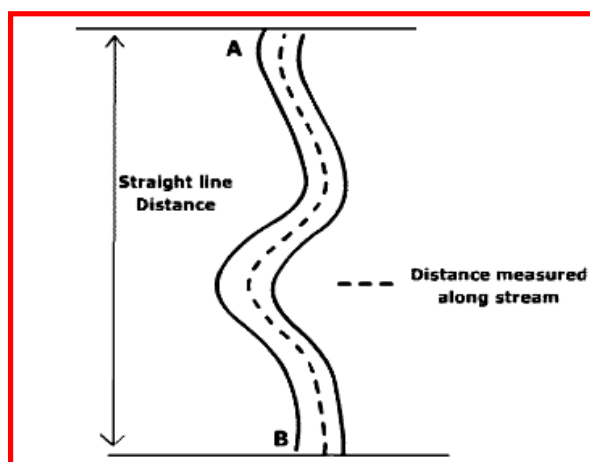
$Y_1$  = Coordenada del punto 1 en Y

Los datos obtenidos se organizaron en la tabla 3, columna 7. Para el horizonte A, los valores oscilan entre 49 y 56 m, para el horizonte B van desde 50 a 202 m y para el horizonte C los valores tienen un rango entre 23 a 61 m.

La relación que existe entre la distancia en línea recta, desde el inicio del canal, hasta el final con la distancia medida desde el inicio del canal hasta el final, Ecuación 1 (Miall, A.D. 1996) pero al interior del cauce, tomando las

geoformas adquiridas a través del tiempo, Figura 74. Una vez el agente principal (agua) a modelado el surco principal de drenaje el conocimiento de la sinuosidad puede aportar datos relevantes con relación tanto a datos históricos como la fuerza de la acción lineal a lo largo del cauce.

**Figura 74.** Esquema representativo de la sinuosidad en canales fluviales señalando las partes representativas tomadas en la fórmula matemática.



Fuente: [www.uwsp.edu/geo](http://www.uwsp.edu/geo)

$$\text{Sinuosidad} = \frac{\text{Distancia medida entre dos puntos (A-B) en el interior del canal}}{\text{Distancia en línea recta entre dos puntos (A-B)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$


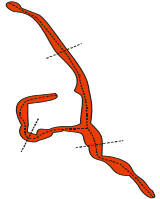
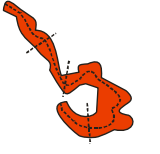
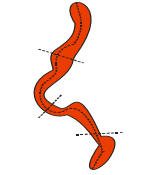
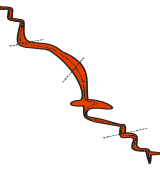
Para este estudio se tomaron las distancias A-B y A---B, en cada cana, con las cuales se realizaron los siguientes cálculos:

### 10.1 Sinuosidad y Ancho Horizonte A

- Para el Horizonte A, se tomaron los datos de los 19 pozos observados mediante el cálculo de atributos, los cuales arrojaron los siguientes resultados

Estos datos se organizaron de acuerdo al tipo de canal identificado, mediante la sinuosidad.

**Tabla 3.** Tabla de distribución de canales del Horizonte A, basados en la sinuosidad en donde se muestra algunos canales representativos (Canales 1, 2, 4, 5 y 6.)

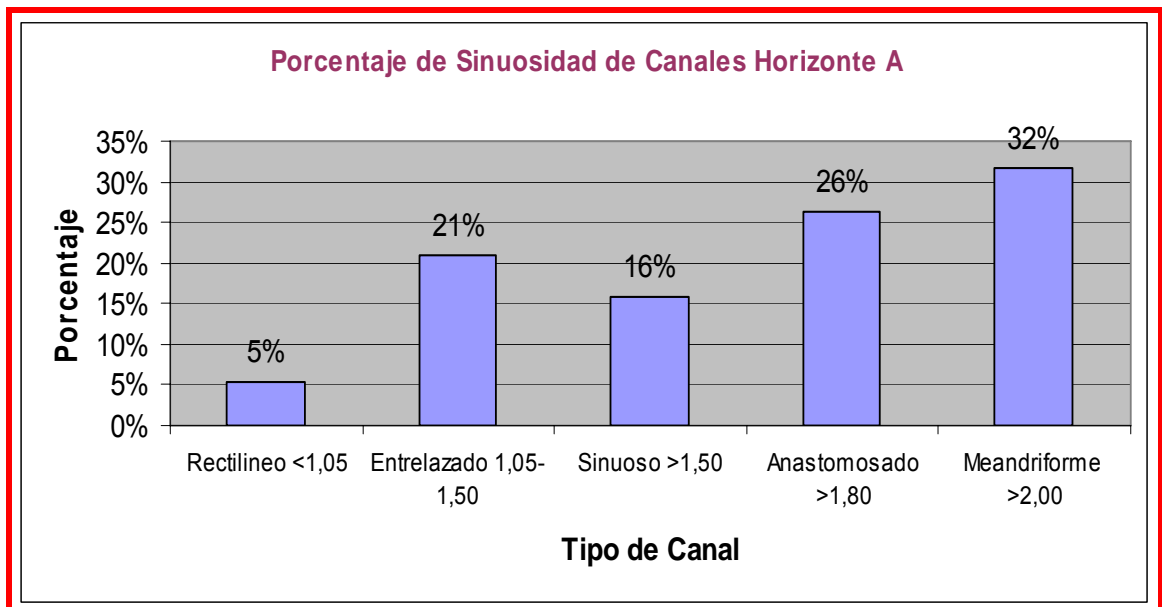
CANALES	Rectilíneo <1,05	Entrelazado 1,05 - 1,50	Sinuoso > 1,50	Anastomosado >1,80	Meandriforme >2,00	Ancho del Canal	Imagen de cada Canal
Horizonte A							
Canal 1				1,86		55,62	
Canal 2				1,8		49,36	
Canal 4				1,83		56,43	
Canal 5			1,5			55,39	
Canal 6				1,82		51,19	

**Tabla 4.** Tabla de distribución de canales del Horizonte A, basados en la sinuosidad.

CANALES	Rectilíneo <1,05	Entrelazado 1,05 - 1,50	Sinuoso > 1,50	Anastomosado >1,80	Meandriforme >2,00	Ancho del Canal
Horizonte A						
Canal 1				1,86		55,62
Canal 2					1,8	49,36
Canal 3				1,88		
Canal 4					1,83	56,43
Canal 5			1,5			
Canal 6				1,82		51,19
Canal 7			1,77			
Canal 8		1,3				45,00
Canal 9				1,99		49,45
Canal 10		1,33				50,22
Canal 11	1,00					43,08
Canal 12				1,98		52,71
Canal 13					2,00	50,00
Canal 14					2,09	54,87
Canal 15					2,2	51,02
Canal 16					2,01	49,5
Canal 17		1,3				48,00
Canal 18		1,22				49,7
Canal 19			1,51			44,6

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la fórmula de sinuosidad, el horizonte A se grafico en el diagrama de barras de la Figura 75, tomando en el eje de la abscisa el tipo de canal y en la ordenada el porcentaje de canales que pertenecen a cada tipo de canal. El estilo de canal meándrico es el que predomina en este horizonte con un porcentaje del 31,57 % seguido por los canales anastomosado con un porcentaje del 26,31 %, Figura 75.

**Figura 75.** El diagrama de barras muestra la distribución del tipo de canal de acuerdo a su sinuosidad, Horizonte A.

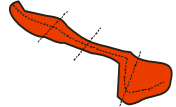

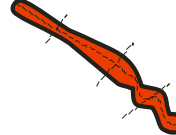
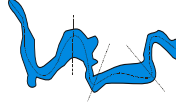
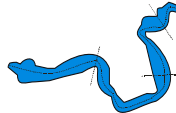
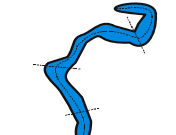
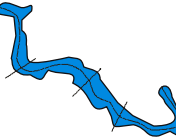



## 10.2 Sinuosidad y Ancho Horizonte B

- Para el Horizonte B, se tomaron los datos de 23 pozos observados mediante el cálculo de atributos, los cuales arrojaron los siguientes datos: Tabla 6

Estos datos se organizaron de acuerdo al tipo de canal identificado, mediante la sinuosidad

**Tabla 5.** Tabla de distribución de canales del Horizonte A, basados en la sinuosidad, en donde se muestra algunos canales representativos (canales 1, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14.)

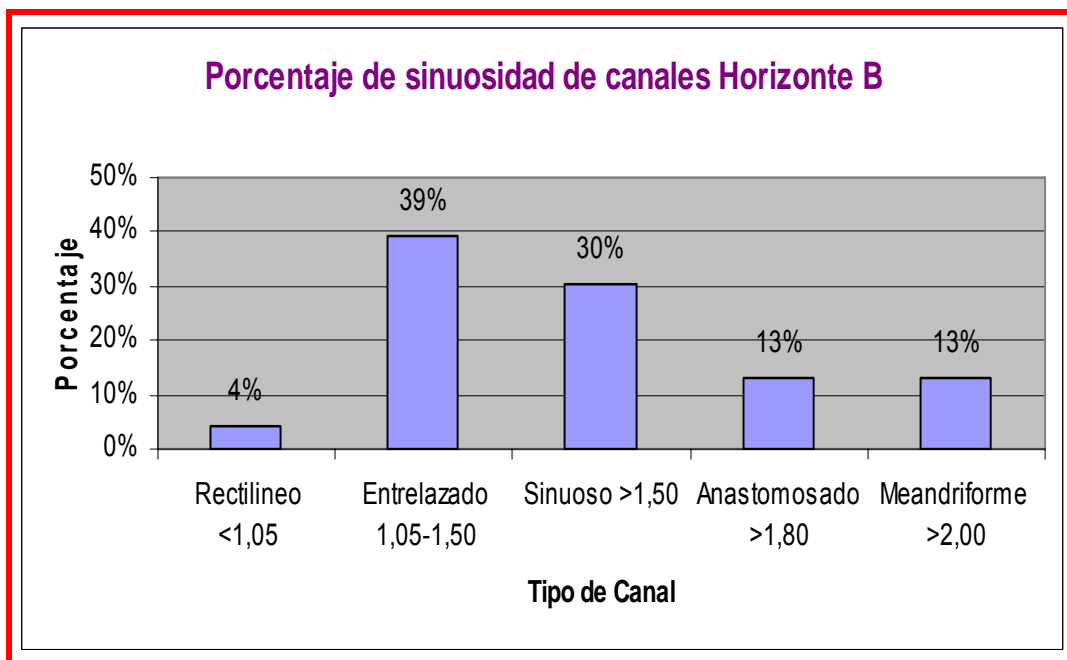
CANALES	Rectilíneo <1,05	Entrelazado 1,05 - 1,50	Sinuoso > 1,50	Anastomosado >1,80	Meandriforme >2,00	Ancho del Canal	Imagen de cada Canal
<b>Horizonte B</b>							
Canal 1		1,09				69,03	
Canal 7					2,09	71,72	
Canal 8		1,34				70,72	
Canal 9				1,82		39,28	
Canal 10					2,15	63,92	
Canal 12			1,59			45,03	
Canal 13			1,55			56,31	
Canal 14		1,076				48,83	

**Tabla 6.** Tabla de distribución de canales del Horizonte B, basados en la sinuosidad

CANALES	Rectilíneo <1,05	Entrelazado 1,05 - 1,50	Sinuoso > 1,50	Anastomosado >1,80	Meandriforme >2,00	Ancho del Canal
<b>Horizonte B</b>						
Canal 1		1,09				79,03
Canal 2			1,54			79,00
Canal 3			1,6			65,09
Canal 4	0,9					69,09
Canal 5			1,55			44,01
Canal 6		1,05				79,56
Canal 7					2,09	71,72
Canal 8		1,34				70,72
Canal 9				1,82		39,28
Canal 10					2,15	63,92
Canal 11			1,54			
Canal 12			1,59			45,03
Canal 13			1,55			56,31
Canal 14		1,076				48,83
Canal 15		1,39				55,09
Canal 16			1,7			57,11
Canal 17					2,15	63,92
Canal 18		1,44				42,1
Canal 19				1,87		45,83
Canal 20		1,38				47,00
Canal 21		1,074				48,00
Canal 22		1,46		1,99		40,49
Canal 23		1,46				39,89

El horizonte B se graficó en el diagrama de barras de la Figura 76 tomando en el eje de la abscisa el tipo de canal y en el eje de la ordenada el porcentaje de canales que pertenecen a cada tipo de canal. El canal entrelazado es el que predomina en este horizonte con un porcentaje de 39,13 % seguido por los canales sinuosos con un porcentaje del 30,43 %, Figura 78.

**Figura 76.** El diagrama de barras muestra la distribución del tipo de canal de acuerdo a su sinuosidad, Horizonte B.



### 10.3 Sinuosidad y Ancho Horizonte C

Para el Horizonte C, se tomaron los datos de los 16 pozos observados mediante el cálculo de atributos, los cuales arrojaron los siguientes datos (Tabla 8).

Estos datos se organizaron de acuerdo al tipo de canal identificado, a partir de la sinuosidad.

**Tabla 7.** Tabla de distribución de canales del Horizonte B, basados en la sinuosidad, en donde se muestran algunos canales representativos (1-11).

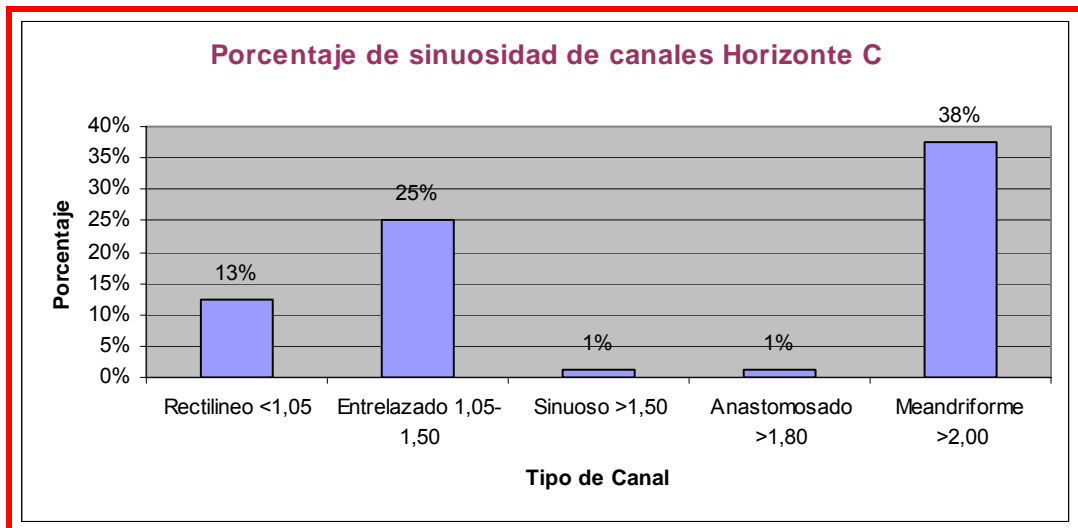
CANALES	Rectilíneo <1,05	Entrelazado 1,05 - 1,50	Sinuoso > 1,50	Anastomosado >1,80	Meandriforme >2,00	Ancho del Canal	Imagen de cada Canal
<b>Horizonte C</b>							
Canal 1		1,09				70,03	
Canal 2		1,45				71,72	
Canal 3				1,6		45	
Canal 4			1,58			58,93	
Canal 5					2,08	54,01	
Canal 6	1					39,05	
Canal 7					2	71,72	
Canal 8				1,97		40,72	
Canal 10	1,08					63,92	
Canal 11		1,2				42,7	

**Tabla 8.** Tabla de distribución de canales del Horizonte B, basados en la sinuosidad

CANALES	Rectilíneo <1,05	Entrelazado 1,05 - 1,50	Sinuoso > 1,50	Anastomosado >1,80	Meandriforme >2,00	Ancho del Canal
<b>Horizonte C</b>						
Canal 1		1,09				70,03
Canal 2		1,45				71,72
Canal 3				1,6		45
Canal 4			1,58			58,93
Canal 5					2,08	54,01
Canal 6	1					39,05
Canal 7					2	71,72
Canal 8				1,97		40,72
Canal 9					2,67	65,92
Canal 10	1,08					63,92
Canal 11		1,2				42,7
Canal 12					2,09	56,99
Canal 13					2,1	202,3
Canal 14					2,76	68,84
Canal 15		1,4				55
Canal 16			1,53			57,93

El Horizonte C representado por el diagrama de barras de la Figura 77 presenta mayor distribución en cuanto los estilos fluviales, iniciando con canales meándricos con una proporción del 37,5% del total, seguido por los canales entrelazados con un porcentaje del 25%, seguido por una igualdad entre los canales rectilíneos, sinuosos y anastomosados con porcentajes de 12,5%.

**Figura 77.** El diagrama de barras muestra la distribución del tipo de canal de acuerdo a su sinuosidad, Horizonte C.



De acuerdo a lo anterior se encontró que en los horizontes A y C el estilo fluvial predominante es el meándrico, característico de un ambiente de baja energía, permitiendo modelar el cauce con formas sinuosas, mientras que en el horizonte B predominó el estilo fluvial entrelazado, característico de una zona con mayor energía, la cual impide que se formen geometrías sinuosas, todo esto lleva a inferir que la zona de estudio no presenta un de estilo fluvial en particular, ya que se hacen presentes todos los estilos fluviales en los tres horizontes, sin embargo los mayores porcentajes los tiene el estilo fluvial meándrico.

## 11. CONCLUSIONES

Las Electrofacies de los registros EW-7, tomados cerca de los horizontes A, B, y C presentan dos subambientes, como es el de canal y el de llanura de inundación, los cuales se correlacionaron con la información de núcleos, y posteriormente se corroboraron con los canales hallados mediante la aplicación de atributos sísmicos.

Los atributos sísmicos permitieron visualizar canales fluviales y algunos rasgos estructurales como fallas en los horizontes interpretados.

Al calcular el atributo de coherencia para el horizonte A se resaltó el tren estructural de fallas presente en la sección de estudio, además se resaltan canales delimitando geometría puesto que es posible determinar que los Canales son meandriformes y algunos presentan meandros abandonados. En los horizontes B y C, se observó en mayor proporción canales que fallas.

El atributo de extracción de amplitud permitió ver la geometría de los canales, en los horizontes A y C; mientras que en el horizonte B las geometrías no fueron muy bien definidas dando lugar a manchas de color amarillo en zonas cercanas a los canales, infiriendo que se pueda tratar de zonas de planicie de inundación las cuales coinciden con los datos de registros de pozo. Entre estos dos atributos el que mejor delimita morfológicamente los canales es la coherencia.

Se calculo el atributo de descomposición espectral a los horizontes A, B y C, en un rango de frecuencias de 30 hasta 70 hertz, encontrándose que a 30, 40, 50 y 60 hertz no se visualizaron canales pero si se visualizaron rasgos

estructurales como fallas con un contraste no muy alto. Este atributo permitió visualizar canales a una frecuencia de 70 Hertz.

El filtro de convolución Laplaciana permitió visualizar en los horizontes A y C, canales nuevos y sinuosos que no se habían visualizado; mientras que en el horizonte B el atributo no delimitó muy bien la geometría de los canales.

Es de resaltar que los canales visualizados en el horizonte A, únicamente se visualizaron allí, mientras que en los horizontes B y C algunos canales coincidieron presentado una pequeña migración.

La dirección preferencial de los canales visualizados mediante los atributos sísmicos, en los horizontes A, B y C es NE-SW y NW-SE.

Al calcular el ancho de los depósitos de los paleocanales, presentes en la sección de estudio, se encontró que para el horizonte A el ancho de canal oscila entre: 49,36 - 56,43 m, para el horizonte B, el ancho de canal oscila entre: 50,02 – 6,84 m, y por último, para el horizonte C, el ancho de canal toma valores entre: 23,00 – 61,64 m.

A partir de la fórmula de sinuosidad (ecuación 1), se definió los tipos de canales presentes en cada horizonte. Para el horizonte A el estilo fluvial que predominó fue de canales meandriformes con un 31,57%, en el horizonte B predominó el estilo fluvial entrelazado con un 39,13% y en el horizonte C el estilo fluvial predominante fue el meandriforme con 37,5% de canales. De acuerdo a los anteriores datos se obtuvo que el tipo de canal predominante en la sección de estudio, es el meandriforme.

Debido a que el procesamiento de la sísmica fue confines estructurales y teniendo en cuenta datos como la frecuencia, con un valor de 30 Hertz, y la longitud de onda, con un valor de 83,33 m se halló el radio de Fresnel, obteniéndose un diámetro de 528,5, el cual indica, que valores por encima de él, el reflector detecta la amplitud, por lo cual permite visualizar canales, pero no los muestra con detalle, desconociendo así detalles como su nacimiento y desembocadura.

## 12. RECOMENDACIONES

Dependiendo del estudio que se quiera realizar se recomienda que la sísmica debe estar procesada de acuerdo a los objetivos buscados por el estudio, es decir, si el objeto del trabajo es visualizar datos estructurales, la sísmica debe estar procesada con fines estructurales preservando frecuencias.

Se recomienda para posteriores estudios bien sea en esta área o en otra, trabajar con el volumen sísmico final, puesto que éste tendrá un procesamiento final el cual permite tener información más detallada .

Al trabajar con atributos sísmicos en el Software Opendtect es necesario aplicar la mayor cantidad de atributos, cambiando los parámetros que obedecen a cada atributo, puesto que dependiendo de factores como el área de estudio, profundidad, litologías no van a responder siempre de la misma manera.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

Bacón, M., Simm R., Redshaw, T., interpretación sísmica 3-D, 2003, universidad de Cambridge.

Boggs, Jr. Sam (2005), Principles of Sedimentology and Stratigraphy, Third Edition, Prentice hall, New Jersey.

Barrero, D., Pardo, A. Vargas, C., Martínez J., 2005, Colombian Sedimentary Basins. ANH.

Chopra, Kurt J. Marfurt, 2008, Seismic Attribute mapping of structure and Stratigraphy.

Chopra S., Arcis and Marfurt K., (2004). Seismic Curvature Attributes for Fault/Fracture Detection, University of Houston.

Chopra S Marfurt K. (2008) Seismic Attributes for Stratigraphic Feature Characterization Arcis Corporation, Calgary, AB

Douglas E. Meyer, Terra E. Bulloch, Elizabeth A. LORENZETTI HARVEY, 2001, Isolating Individual Channel Sequences Using 3d Visualization And Multi-attribute Techniques In Stacked Channel Complex, Ultra Deepwater Brazil

Gómez Et al 2007. Seminario de Ambiente Fluviales

González Et al (2003) Sísmica De reflexión de alta resolución en el estudio del Cuaternario de áreas de pie de monte. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 58 (1): 78-84

H. E. Reineck, I.B. Singh, 1980. Depositional Sedimentary Environments

Kendall C. 2005. Marine Sediments. Analysis subsurfaces

Marfurt J., Atributos sísmicos 3-D para la prospección, identificación y caracterización de reservorios, 2007, Laboratorio de Geofísica, Departamento de Geociencias, Universidad de Houston, developments series; no. 11.

Miall, A. D., (1996). The Geology of Fluvial Deposits, Sedimentary Facies, Basin Analysis, And Petroleum Geology. Springer-Verlang Berlin Heidelberg.

Miall, A. D., (1985). "Principles of Sedimentary Basin Analysis". Springer-Verlag New York Eds.

Olaya. L, Curso Métodos Geofísicos, Mayo de 2004, Universidad Industrial de Santander.

Quilen S., Integración de atributos sísmicos con datos petrofísicos para determinar zonas prospectivas, arena L2M, área de finca – Yopales, Edo. Anzoátegui, Marzo de 2006, Universidad Simon Bolivar

Veeken P.C.H. Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir characterization. Klauss Helbig and Sven Treitel, Editors, Vol 37

Sitios Web.

[www.energia3.mecon.gov.ar](http://www.energia3.mecon.gov.ar)

[www.cbh.org.bo](http://www.cbh.org.bo)

[www.atlas.nrcan.gc.ca](http://www.atlas.nrcan.gc.ca)

[www.scielo.cl](http://www.scielo.cl)

[www.rae.es](http://www.rae.es)

[www.geologia.uson.mx](http://www.geologia.uson.mx)

[www.rageologia.org/seismic2\\_medium.jpg](http://www.rageologia.org/seismic2_medium.jpg)

[www.flickr.com](http://www.flickr.com)

[www.geograph.org](http://www.geograph.org)

[www.uwsp.edu](http://www.uwsp.edu)

[www.geo.uu.nl](http://www.geo.uu.nl)

[www.des.udc.es](http://www.des.udc.es)