



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis Sismoestratigráfico de la Formación Carbonera Miembro C7 (Municipios de Orocué y San Luis de Palenque, Cuenca Llanos Orientales), Colombia

Andrea Juliana Arango Domínguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Maestría en Ciencias Geología
Bogotá, Colombia

2014

Análisis Sismoestratigráfico de la Formación Carbonera Miembro C7 (Municipios de Orocué y San Luis de Palenque, Cuenca Llanos Orientales), Colombia

Andrea Juliana Arango Domínguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias - Geología

Director:

Profesor Ph.D., en Geociencias y Geofísica Luis Antonio Castillo L.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Maestría en Ciencias Geología
Bogotá, Colombia

2014

*A mi esposo, por su apoyo incondicional.
A mis padres, por ser mi guía.
Y a mis hermanos, quienes también han
sido partícipes de esta etapa y ejemplo a
seguir.*

Agradecimientos

El autor expresa los agradecimientos a:

El director de esta tesis, Ph.D Luis Antonio Castillo, docente de la Universidad Nacional de Colombia, por su asesoría, tiempo, colaboración y sus valiosas contribuciones en mi formación profesional y en el desarrollo de este trabajo.

M.Sc.Calfred Bautista; por su asesoría, dedicación y colaboración.

Geóloga Johanna Villamizar, por su gran apoyo y colaboración.

A la compañía Interoil por brindarme el permiso y acceso a los datos requeridos, así como el apoyo para la elaboración de este trabajo.

A la empresa CGG, por la asesoría y el patrocinio con el licenciamiento académico del software utilizado en el procesamiento de los datos sísmicos.

A cada una de las personas que directamente o indirectamente contribuyeron, para que este proyecto concluyera satisfactoriamente.

Resumen

El trabajo describe la estratigrafía secuencial de los depósitos asociados al Miembro C7 de la Formación Carbonera, en la zona centro oriental de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, Municipios de Orocué y San Luis de Palenque (departamento del Casanare). El punto de inicio fue el procesamiento e interpretación de la información disponible (sísmica 3D, registros de pozo, bioestratigrafía) y la definición del marco conceptual dado para el ambiente sedimentario asociado.

La metodología usada está basada en la integración de los resultados de la interpretación de la información disponible, en función de construir un modelo geológico de distribución de arenas para el área de estudio, aprovechando las ventajas de mejorar la resolución de los datos sísmicos a través del método de Inversión Sísmica, y del cálculo de atributos para una ventana de tiempo definida a partir de los datos de pozo.

El análisis sismoestratigráfico de la secuencia asociada a la Miembro C7 de la Formación Carbonera, obtuvo como resultado un modelo de la distribución espacio-temporal de los ambientes y depósitos asociados, contribuyendo al entendimiento de éstos en el área de estudio.

Palabras clave: Estratigrafía de secuencias, Sismoestratigrafía, Formación Carbonera Miembro C7.

Abstract

The thesis describes the sequence stratigraphy of the deposits associated with the C7 Member of Carbonera Formation in the central Eastern part of the Llanos Basin of Colombia, Municipalities of Orocué and San Luis de Palenque (Casanare). The starting point was the processing and interpretation (3D seismic, well logs, biostratigraphy) available information and the definition of the conceptual framework given for the associated sedimentary environment.

The methodology used is based on the integration of the results of the interpretation of available information in order to build a sand distribution model for the study area, taking advantage of improving the resolution of seismic data through seismic inversion method, and calculating attributes for a defined time window from well data.

The seismicstratigraphy analysis associated with the C7 Member of the Carbonera Formation, obtained as a result a model of the environments and associated deposits distribution, contributing to the understanding of these in the study area.

Keywords: Sequence Stratigraphy, Seismic Stratigraphy, Carbonera Formation C7 Member

Contenido

	<u>Pág.</u>
Resumen	V
Abstract.....	VI
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XI
Lista de abreviaturas	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Definición del problema.....	13
1.2 Objetivo General.....	14
1.2.1 Objetivos específicos.....	14
1.3 Área de Estudio	15
1.4 Datos.....	16
1.5 Plataforma de Trabajo	17
1.6 Metodología	18
1.7 Estado del arte.....	21
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	25
2.1 Formación Carbonera.....	29
3. MARCO TEÓRICO.....	32
3.1 Estratigrafía de Secuencias	32
3.2 Sismoestratigrafía.....	35
3.1 Inversión Sísmica	41
3.1.1 Impedancia Acústica	43
3.1.1 Resolución Sísmica Vertical.....	44
3.2 Atributos Sísmicos.....	46
3.2.1 Descomposición Espectral	46
4. RESULTADOS	48
4.1 Análisis Estratigráfico y Secuencial	48
4.1.1 Pozos	48
4.1.2 Sísmica	60
4.2 Análisis Sismoestratigráfico	80
4.3 Discusión de Resultados	85

5. CONCLUSIONES.....	88
A. Anexo: Procesamiento de la sísmica 3D – Inversión Simultánea.....	90
B. Anexo: Glosario.....	93
Bibliografía	94

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1-1: Mapa de localización del área de estudio (departamento del Casanare), Cuenca de los Llanos Orientales.....	15
Figura 1-2: Mapa de localización volumen sísmico y pozos.	17
Figura 1-3: Secuencia metodológica propuesta para el proyecto de investigación.....	20
Figura 2-1: Mapa geológico Llanos Orientales ANH, 2011	25
Figura 2-2: Columna Estratigráfica Generalizada Cuenca de los Llanos Orientales.....	26
Figura 3-1: Control en los cambios del nivel base, transgresiones y regresiones.....	34
Figura 3-2: Modelo de Secuencias para sistemas no marinos.	35
Figura 3-3: Sistema de códigos para la elaboración de mapas A-B/C y tipos de configuraciones internas para definir la variable C en los mapas AB/C	38
Figura 3-4: Patrones de las configuraciones internas de las reflexiones	38
Figura 3-5: Forma externa de las secuencias.....	39
Figura 3-6: Ejemplo superposición “ <i>time slices</i> ”	41
Figura 3-7: Ejemplo de Inversión Sísmica	42
Figura 3-8: Esquema del Proceso de Inversión	43
Figura 3-9: Transmisión y reflexión de un rayo perpendicular a una superficie de contraste de impedancia acústica (Z).	44
Figura 3-10: Variación de la resolución vertical asociada con los diferentes métodos geofísicos	45
Figura 3-11: Descomposición Espectral de una traza sísmica.....	47
Figura 4-1. Correlación Curvas GR, Densidad-Neutron y datos de Imagen Resistiva Pozo Tipo (FMI, Schlumberger)- Definición Paleocorrientes (Escala: 1:500 MD)	48
Figura 4-2. Biozonación Cuenca de los Llanos Orientales	51
Figura 4-3: Electrofacie 1 (EF-1).....	53
Figura 4-4: Electrofacie 2 (EF-2).....	53
Figura 4-5: Electrofacie 3 (EF-3).....	53
Figura 4-6: Electrofacie 4 (EF-4).....	53
Figura 4-7: Modelo de depósito de un río meándrico.....	55
Figura 4-8: Interpretación secuencial Secuencia 1 (S1).	57
Figura 4-9: Correlación Estructural Pozos e Interpretación Secuencial (Datum: Tope Miembro C7 Formación Carbonera).....	59
Figura 4-10. Sismograma Sintético Pozo Tipo.....	60
Figura 4-11. Ejemplo Sección Sísmica Interpretada (Xline) y Sismograma Sintético Pozo Tipo	61

Figura 4-12.	Resolución Vertical Sísmica Vs Registro Pozo Tipo.....	61
Figura 4-13.	Mapa de Sismofacies a la base de la Secuencia 1 (1554 ms)	63
Figura 4-14.	Venta de Tiempo Inversión Sísmica	64
Figura 4-15.	Ejemplo Factibilidad Realizada para la Inversión Sísmica.....	64
Figura 4-16.	Ondícula Calculada para la Inversión Sísmica	65
Figura 4-17.	Amarre Pozo-Sísmica Inversión Simultánea.....	66
Figura 4-18.	Ejemplo Sección E-W volumen de Impedancia Acústica y Amarre Pozo Tipo ..	66
Figura 4-19.	Interpretación Impedancia Acústica - Amarre Electrofacies Pozo Tipo	67
Figura 4-20.	Interpretación Estratigrafía de Secuencias - Amarre Pozo Tipo -IA.....	67
Figura 4-21.	Ejemplos Filtros a Diferentes Rangos de Valores de IA	69
Figura 4-22.	Características Sedimentarias y Geomorfológicas Correspondientes a Canales Fluviales	70
Figura 4-23.	Ejemplo de “Strata-slices” Secuencia 1 y Pozo Tipo Interpretado	70
Figura 4-24:	Interpretación geoformas sobre “ <i>strata slices</i> ”.....	74
Figura 4-25:	Comparación de patrones de drenaje con el sistema presente en el área de estudio en la actualidad.....	74
Figura 4-26:	Sucesión Vertical de canales de Sistema Fluvial de Río Meandroso	75
Figura 4-27:	Ejemplo Strata Slice Cubo de Descomposición Espectral a 16 Hz.....	76
Figura 4-28:	Ejemplo Strata Slices Cubos de Descomposición Espectral, comparados con la sísmica y las impedancias. Todas las imágenes es el mismo strata slice C7_13. (Escala de Colores al final en la Figura 4-29)	77
Figura 4-29:	Escala de Colores para la Figura 4-28 (Sísmica, IA y Descomposición Espectral)	79
Figura 4-30:	Ejemplo Comparación Strata Slice del Cubo de IA y el de Descomposición Espectral a 16 Hz.....	80
Figura 4-31:	Posición Vertical de los sistemas fluviales interpretados en los Strata Salices. ..	82
Figura 4-32:	Localización Cortes Transversales Sucesión Vertical	83
Figura 4-33:	Corte W-E Transversal Sucesión Vertical.....	83
Figura 4-34:	Corte N-S Transversal Sucesión Vertical.....	83
Figura 4-35:	Diagrama de Wheeler.....	84
Figura 4-36:	Mapa Paleoambiental sobre “Strata Slice”.....	85

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1-1: Datos básicos disponibles de los pozos.	16
Tabla 4-1: Definición de Litofacies para el Pozo Tipo.....	49
Tabla 4-2: Resultados Estudio Palinológico Pozo Tipo (Paleoflora, 2010)	50
Tabla 4-2: Identificación de Electrofacies (Serra, 1984)	52
Tabla 4-4: Asociación de Facies y Ambientes de Depósito	54
Tabla 4-5: Caracterización Facies Sísmicas según metodología de Sangree & Widmier (1977).	62
Tabla 4-6: Asociación de Facies y Ambientes de Depósito Secuencia 1 (Escala de colores valores IA al final del cuadro).....	71
Tabla 4-7: Volúmenes de Descomposición Espectral que Permiten Identificar Geoformas	76

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

Km	Kilómetros
Km ²	Kilómetros cuadrados
SW	Suroeste
NE	Noreste
E-W	Este-Oeste
IA	Impedancia Acústica
Mseg	Milisegundos
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
LST	Trato de nivel bajo
TST	Trato de nivel transgresivo
HST	Trato de nivel alto
RST	Trato de nivel regresivo
TWT	Tiempo doble
3D	Tridimensional
Ma.	Millones de años

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del problema

La proliferación de información, el incremento en el uso de tecnologías de adquisición de datos y el análisis estableciendo sólo criterios descriptivos para definir potencialidad de las formaciones, conlleva a un interés en la evaluación netamente litológica y estructural. Esto conduce a imprecisiones sobre la geología del subsuelo, especialmente cuando en estudios regionales se utilizan datos puntuales, de la distribución espacio temporal de las formaciones rocosas con potencial económico, estableciendo generalizaciones a nivel de cuenca.

Según el Plan de Cubrimiento Sísmico de la ANH (2010), es evidente que las trampas estratigráficas no han sido estudiadas ampliamente, a razón del poco conocimiento que se tiene de la estratigrafía del subsuelo. Del detalle de la distribución de las arenas de la Formación Carbonera Miembro C7 en el área de estudio, no se cuenta con la suficiente información para lograr su caracterización en inmediaciones del límite entre los Municipios de Orocué y San Luis de Palenque (Casanare), Cuenca de los Llanos.

Las compañías operadoras han centrado su focal desarrollo de acumulaciones de hidrocarburos en trampas netamente estructurales, y no estratigráficas, en consideración al riesgo geológico asociado. Este riesgo se puede reevaluar en la medida que el conocimiento de la estratigrafía de las formaciones brinde información que disminuya incertidumbres. Otro punto a considerar es que la mayoría de las trampas estructurales reportadas en los campos en el área de estudio ya han sido probadas o están en producción.

Los estudios que definen en detalle el ambiente de depósito y las posibles arquitecturas que generó, en este caso para la Formación Carbonera Miembro C7, contribuyen al

conocimiento geocientífico de estas unidades rocosas y a la disminución del riesgo geológico asociado. Para lograr este conocimiento, se tienen a disposición metodologías de estudio del subsuelo, ligadas al uso de datos sísmicos y de registros de pozo, tales como la estratigrafía sísmica y de secuencias.

Mejorar la caracterización de la distribución de arenas de la Formación Carbonera C7 en el subsuelo del área de estudio, implica realizar una interpretación sísmica en la ventana de tiempo de esta formación, que conlleve a la identificación de facies sísmicas, bases de la generación de mapas paleoambientales que describirán la distribución de arenas, hoy de interés para la industria de los hidrocarburos.

¿Cómo es la distribución de las arenas de la Formación Carbonera C7 en el área de estudio? ¿Se puede definir esta distribución a partir del análisis de estratigrafía sísmica y de secuencias de datos sísmicos y de pozo?

1.2 Objetivo General

Definir la distribución espacio temporal de las arenas asociadas a la Unidad Informal C7 de la Formación Carbonera, a través de la realización de un análisis sismoestratigráfico para el área de estudio.

1.2.1 Objetivos específicos

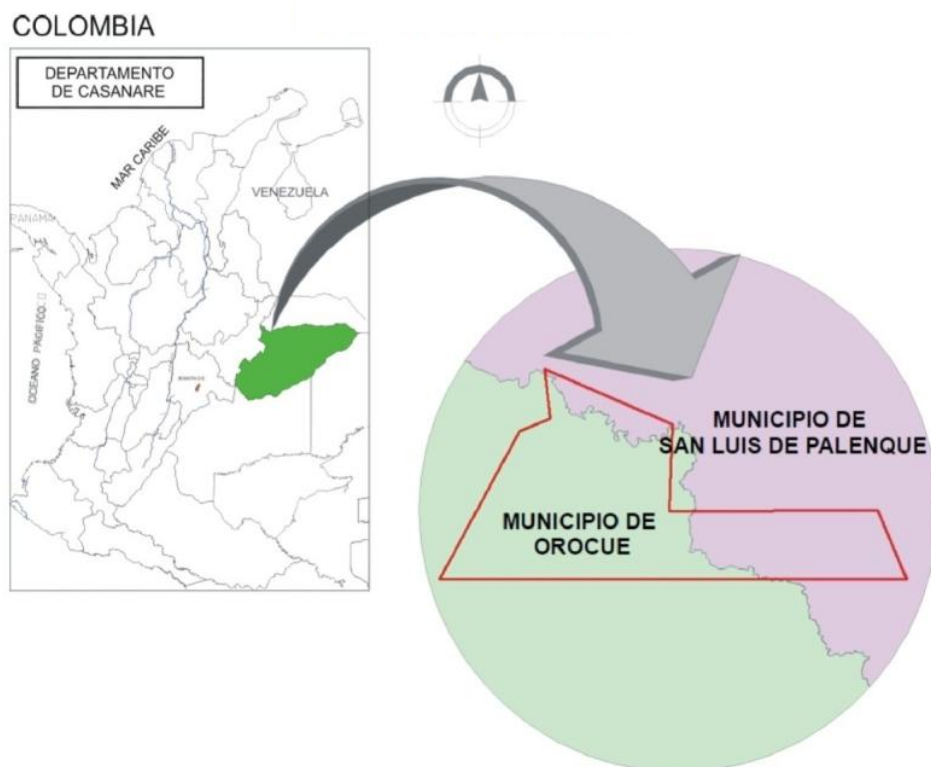
- Realizar control de calidad y preparación de la Información de pozos, para la calibración y correlación con el volumen sísmico a través de la generación de sismogramas sintéticos.
- Implementar la técnica de Inversión Espectral para determinar espesores de capas por debajo de la resolución sísmica vertical en el intervalo de interés del volumen sísmico.
- Interpretar las unidades estratigráficas de la Formación Carbonera C7 a través del análisis de estratigrafía de secuencias, que permita la identificación, análisis y asociación de facies sísmicas.

- Correlacionar las facies sísmicas con la información de los pozos utilizando una aproximación cronoestratigráfica.
- Reconstruir la paleogeografía en la cual se depositó la Formación Carbonera C7 a través de la generación de mapas paleoambientales y la extracción de atributos sísmicos.

1.3 Área de Estudio

El área de estudio está localizada en la Cuenca de los Llanos Orientales, al NE de Colombia, en el límite entre los municipios de Orocué y San Luis de Palenque (Departamento del Casanare), y cubre un área de 15.932 hectáreas, ubicación dada en el Sistema Geográfico de Referenciación Magna Sirgas Origen Este (Figura 1-1).

Figura 1-1: Mapa de localización del área de estudio (departamento del Casanare), Cuenca de los Llanos Orientales.



1.4 Datos

Los datos utilizados comprenden información sísmica, registros de pozo, datos bioestratigráficos e información bibliográfica de estudios anteriores.

La información sísmica 3D, comprende un cubo pre-apilado en tiempo, y presenta 3900 registros y un cubrimiento de 293 km². El 3D tiene un diseño ortogonal con un azimut de 0°, con un intervalo de muestreo de 2 ms en el cual las dimensiones del CDP bin son de 50 m por 25 m. Las líneas de receptores están orientadas en la dirección N-S y las líneas de tiros están orientadas E-W (Figura 1-2).

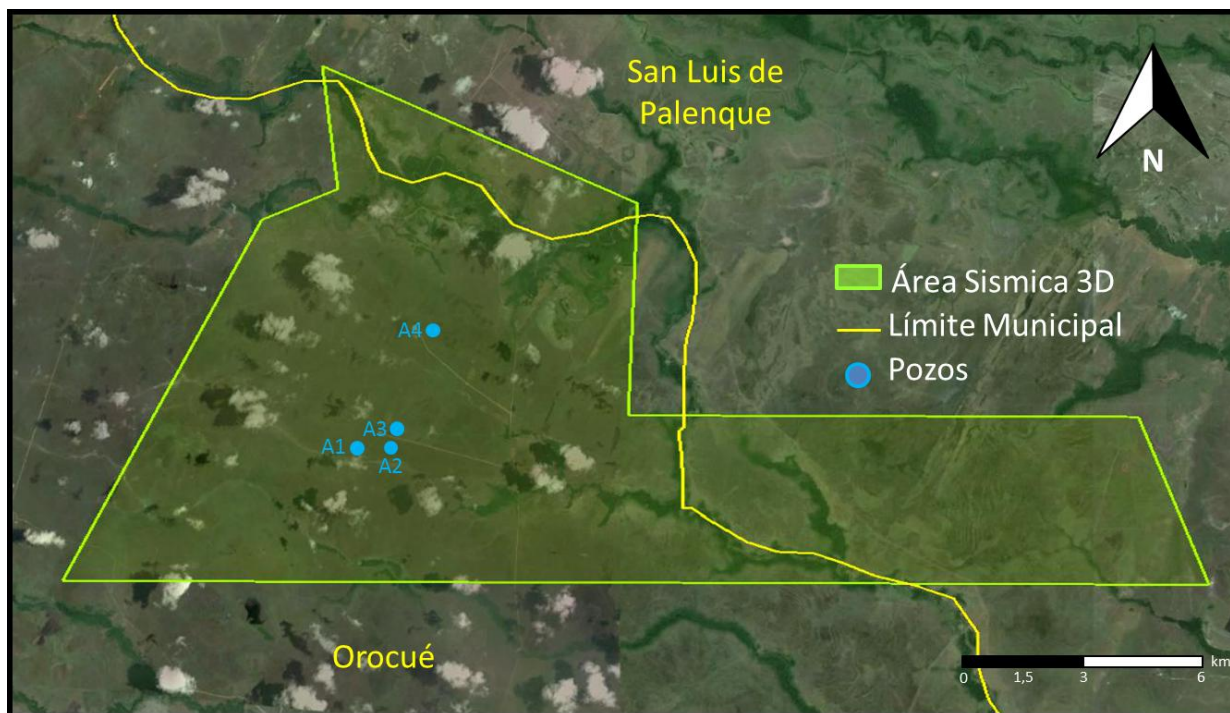
Se trabajaron 4 pozos ubicados dentro de los límites de la data sísmica disponible (Figura 1-2), los cuales contaron con un set de registros básicos (Gamma Ray, Densidad-Neutron, Resistivos y Factor fotoeléctrico), además de información como reportes de perforación y gráficos compuestos (Tabla 1-1). Sólo un pozo cuenta con sísmica de pozo (VSP) y estudio palinológico.

Es importante resaltar que todos los pozos se perforaron direccionados y se encuentran ubicados en la parte centro-occidental del área de estudio.

Tabla 1-1: Datos básicos disponibles de los pozos.

POZO	REGISTROS									
	VSP	DT	FMI	DIP	GR	RHOB	RES	NPHI	SP	CALI
A-1			X	X	X	X	X	X	X	X
A-2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A-3					X	X	X	X	X	X
A-4					X	X	X	X	X	X

Figura 1-2: Mapa de localización volumen sísmico y pozos.



1.5 Plataforma de Trabajo

En la realización de este estudio se utilizaron las siguientes plataformas:

- Se generaron las correlaciones de pozo y el análisis de electrofacies en Geographix® (LMK).
- Petrel® (Schlumberger) fue utilizado para el amarre pozo-sísmica y la reinterpretación del volumen sísmico.
- Jason® (CGG), fue la herramienta utilizada para la realización de la inversión sísmica y la generación de los cubos de atributos.

1.6 Metodología

Inicialmente se definieron litofacies a partir de las descripciones de muestras de zanja, que se correlacionaron a profundidad con los registros eléctricos del pozo A2, seleccionado como pozo tipo, haciendo uso del registro de imagen (FMI) para los datos de estructuras sedimentarias y dirección de paleocorrientes, además de las curvas de “Gamma Ray” (GR) y Densidad (HROB).

A muestras de zanja del pozo A2 se les llevó a cabo un estudio de palinología (Estudio Palinológico Intervalo Analizado: 5000' - 7150', Paleoflora Ltda, 2010). Con el propósito de estudiar la bio-cronoestratigrafía, se procesaron y analizaron palinológicamente de acuerdo al método de Traverse (1988). Para efectos de biozonación y datación relativa, se siguieron los criterios establecidos por Jaramillo & Rueda (2004), Jaramillo et al. (2005), Jaramillo et al. (2009) y Jaramillo et al. (2010). El conjunto de la información obtenida durante el análisis, incluyó el conteo de palinomorfos para cada muestra, como la interpretación bio, crono y litoestratigráfica de los intervalos analizados.

Una vez elaborado un marco bioestratigráfico basado en la palinología y las litofacies descritas, se procedió a integrar esta información con el análisis de los registros eléctricos, generando de esta forma una definición de electrofacies para la sección asociada al Miembro C7 de la Formación Carbonera en el área de estudio. Para esto, se describió el carácter eléctrico de cada litofacie definida, caracterizándola con el ambiente de depósito interpretado a partir del resultado de la integración de la información y de análogos de acuerdo con lo descrito por Galloway & Hobday (1983) y Serra (1984).

Con el resultado de la definición de litofacies, biofacies y electrofacies, se inicia una interpretación en sentido de secuencias de la información de pozos, primero a manera general para toda la sección perforada, y luego enfocándose en la sección objeto de este estudio, aquella que incluye los depósitos definidos como correspondientes a la Formación Carbonera Miembro C7. Se definieron las secuencias y sus límites, así como los tratos de sistema interpretados, con base en el Modelo de Estratigrafía de Secuencias Genética planteado por Galloway (1989). Las conclusiones de este análisis fueron base para la interpretación de la sísmica.

Una vez revisada y con un control de calidad del dato sísmico y de pozos, se realizó la carga de la data en el software de interpretación: volumen sísmico 3D, archivos planos de horizontes y fallas interpretadas, datos de velocidades (VSP), desviaciones pozos, registros eléctricos y topes formacionales. Una vez realizada la carga se procedió con el amarre sísmica-pozo, con la generación de un sismograma sintético partiendo de las curvas de densidad (RHOB), sónico (TD) y velocidades del VSP. Posteriormente, y una vez calibrado en profundidad Horizontes y Topes, se inició con la revisión del horizonte interpretado como Carbonera C7, de acuerdo al amarre sísmica-pozo producto del sismograma sintético realizado.

La sísmica 3D fue interpretada y analizada en sentido de secuencias llevando de los pozos el análisis inicial. Con la anterior información se realizó la estratigrafía sísmica, identificando límites de secuencias sísmicas a través de determinación de superficies siguiendo la metodología de Vail *et al.*, (1977). Posteriormente, se realizó un análisis de sismofacies según metodología de Sangree & Widmier (1977), que permitió generar un mapa A-B/C de facies sísmicas.

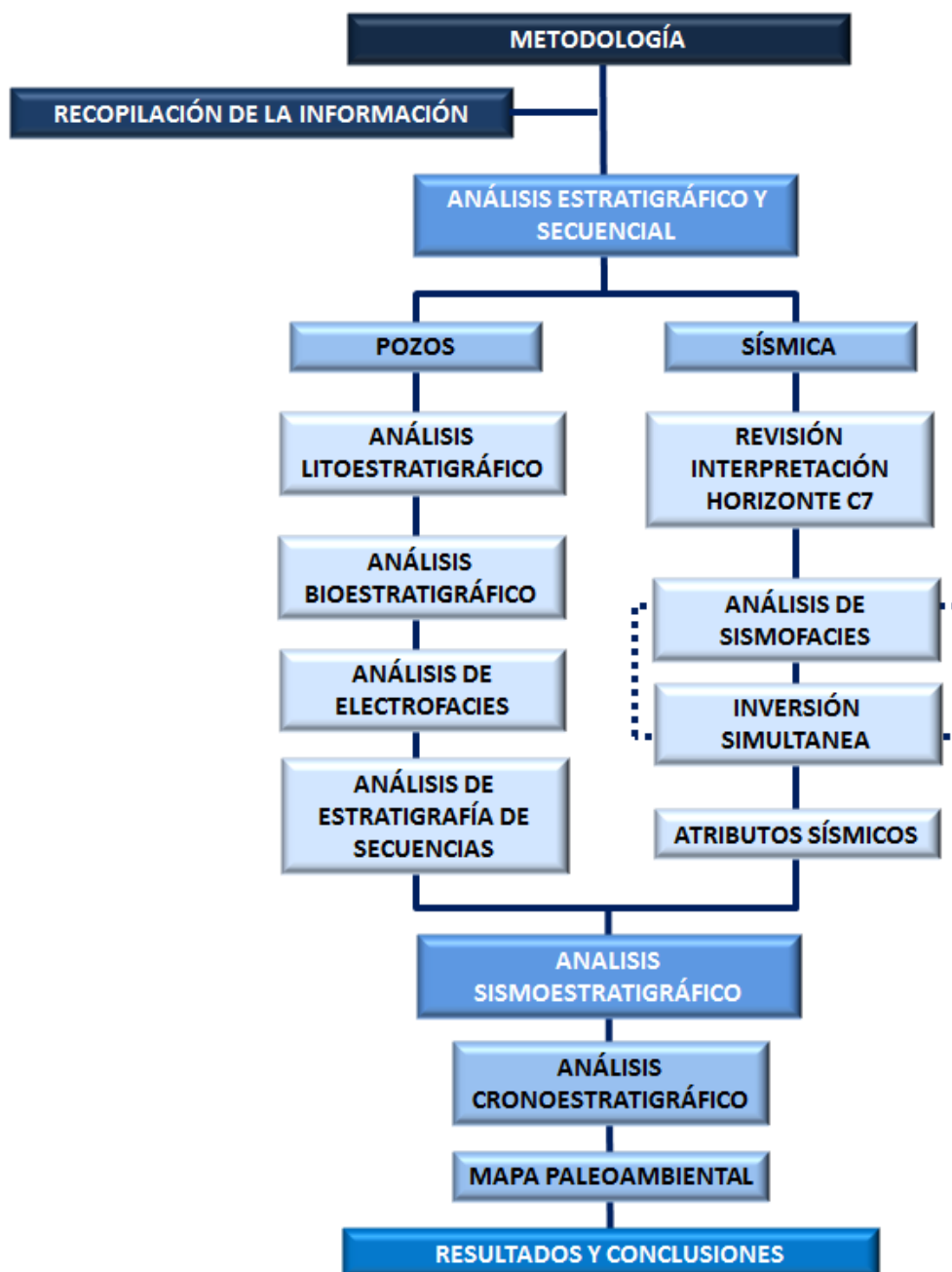
Debido a que la resolución sísmica a nivel de la secuencia definida, no permitió diferenciar elementos de detalle correlacionables con los pozos, se realizó una inversión simultánea que generó un cubo de Impedancia Acústica (IA) para una ventana de tiempo específica (Anexo A).

Una vez correlacionado el cubo de IA con los pozos, se generaron “*horizon slices*” y “*stratal slices*” para mapear posibles geofomas asociadas a los paleoambientes y sus depósitos siguiendo la metodología planteada por Miall (2002).

El cubo de IA se re-procesó utilizando las herramientas de atributos sísmicos, y se generaron nuevos cubos de Descomposición Espectral a diferentes frecuencias. A estos cubos se llevó el análisis realizado en el de volumen de impedancias, y se crearon nuevos “*strata slides*” para completar la interpretación de los ambientes de depósito.

La secuencia de actividades en términos generales se observa en la Figura 1-3.

Figura 1-3: Secuencia metodológica propuesta para el proyecto de investigación.



1.7 Estado del arte

Mucho se ha escrito sobre ambientes de depósito y la mejor forma de caracterizarlos, de técnicas, herramientas y metodologías para acercarse a través de variados datos al entendimiento de depósitos en el subsuelo, en mayor medida por el interés que en este tópico tienen compañías de la industria Minera y de los Hidrocarburos. Dentro del universo de herramientas desarrolladas desde la geología y la geofísica, la estratigrafía de secuencias es una de las más usadas a nivel mundial desde mediados del siglo pasado, existiendo ejemplos de su aplicación alrededor del mundo con gran éxito.

La estratigrafía secuencial fue aplicada inicialmente a ambientes marinos o de transición marina, siendo los ambientes continentales más controvertidos y estudiados en tiempos recientes. Miall (2006) habla de la importancia de tener un mejor entendimiento de los sistemas fluviales, resaltando que la gran dificultad de trabajar en el subsuelo a diferencia de afloramientos, es la calidad y tipo de datos para la interpretación de éstos y de características como su longitud, espesor, movilidad, direcciones de flujo, entre otros; siendo ahí donde la interpretación en términos de modelos secuenciales puede proveer mayor certeza a las aproximaciones de la descripción de sistemas fluviales antiguos en comparación con sus análogos modernos.

La Formación Carbonera en la Cuenca de Los Llanos Orientales de Colombia ha sido objeto de varios estudios, dentro de los cuales el componente estratigráfico ha sido trabajado principalmente desde la Litoestratigrafía detallando parcialmente sus Miembros como es el caso de Bayona *et al.*, (2008).

Entre los estudios públicos que se han analizado a nivel regional para la Cuenca de Los Llanos Orientales, se identificó que buena parte de ellos se centran en la evolución tectónica y conformación de la Cuenca de Antepaís (Bayona *et al.*, (2007 y 2008); Cooper *et al.*, (1995); Fajardo *et al.*, (2000), y Mora *et al.*, (2006)), concluyéndose que los estudios detallados no son de carácter público, ya que sólo se consiguió referenciar estudios de carácter regional que generan un marco de trabajo y una propuesta metodológica para futuros estudios, pero sus conclusiones aunque son generalizadas a nivel de cuenca no permiten establecer las características de una formación en un área

determinada y menos aún establecer la posible distribución de cuerpos arenosos en el subsuelo.

Cooper *et al.*, (1995), describieron a la Formación Carbonera como el resultado de la deposición de cuatro ciclos principales limitados por superficies de inundación máximos generalizados. Cada ciclo consta de un trato de mar alto seguido por un delgado trato retrogradacional, y terminando con un trato transgresivo que culmina con la superficie de máxima inundación. Estas secuencias no son verdaderas secuencias en el sentido de Mitchum *et al.*, (1977), pero son unidades estratigráficas genéticas en el sentido de Galloway (1989). Las unidades pueden ser correlacionadas a lo largo de la Cuenca de los Llanos Orientales y muestran un aumento gradual en el porcentaje de arena en la medida que se acercan al área de procedencia, el Escudo de la Guyana. La cuenca de Antepaís pre-Andina muestra fuertes patrones de ciclos de sedimentación con la alternancia de ambientes de llanura costera, continentales y ambientes marinos marginales. Esto se interpreta como el resultado de la erosión de la baja paleo-pendiente del escudo de la Guyana, que era por lo tanto susceptible a rápidas inundaciones y regresiones. Esto a su vez permitió la rápida migración de facies dentro del área del sistema.

Fajardo *et al.*, (2000), realizaron un modelo estratigráfico para los Llanos y Piedemonte, e identificó dentro de la Formación Carbonera cinco ciclos estratigráficos, en donde interpretó los eventos progradacionales de un trato de mar alto corresponden a las unidades pares (C2, C4, C6, C8 y C10) y los eventos agradacionales y retrogradacionales de un trato transgresivo corresponden a las unidades impares (C1, C3, C5, C7 y C9). Igualmente, expone una interpretación ambiental a partir de análisis bioestratigráficos y propone un ambiente continental, lacustre y de planicie costera.

Reyes *et al.*, (1998), así mismo y con base en información de afloramientos, corazones y registros concluyeron que la deposición de éstos materiales se da en ambientes continentales y transicionales (lagunas costeras, bahías o estuarios). Por otro lado, dentro de ese estudio electrofacial se analizaron los posibles tipos de depósito, identificando electrofacies cilíndricas, cilíndricas un poco aserradas y de campana que se interpretaron como depósitos de canales fluviales o estuarinos. Los intervalos de arenisca también muestran electrofacies de embudo que corresponden a cuerpos

progradacionales como por ejemplo complejos de “*crevasse splay*”, rellenos de lagos y/o rellenos de bahías o estuarios. Los intervalos lodosos son por lo general aserrados, en donde se evidenció tendencias a aumentar o disminuir la lectura del “*Gamma Ray*” y que se interpretaron como una profundización o somerización de los lagos, bahías o estuarios.

Bayona *et al.*, (2008), realizaron un estudio de la estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la Cuenca de Antepaís de los Llanos Orientales, y se enfocó en los Miembro C3, C2 y C1 de la Formación Carbonera de acuerdo con la sección perforada por el pozo Saltaín-1. Sin embargo, planteó que en un sistema continental de antepaís los factores que controlan el relleno de la cuenca son la subsidencia tectónica y el clima. Ambos factores igualmente importantes al controlar la relación entre espacio de acomodación y el suministro de sedimento. El espacio de acomodación en este ambiente puede cambiar debido a la subsidencia flexural, levantamientos locales o el ascenso del nivel base durante una temporada de fuertes lluvias en un clima tropical. La tasa de suministro de sedimentos puede ser afectada por la distancia de los frentes orógenicos, la densidad de vegetación, o la capacidad del sistemafluvial de transportar los sedimentos a la cuenca. También los procesos autigénicos de un sistemafluvio-deltáico varían abruptamente dentro del sistemadeposicional.

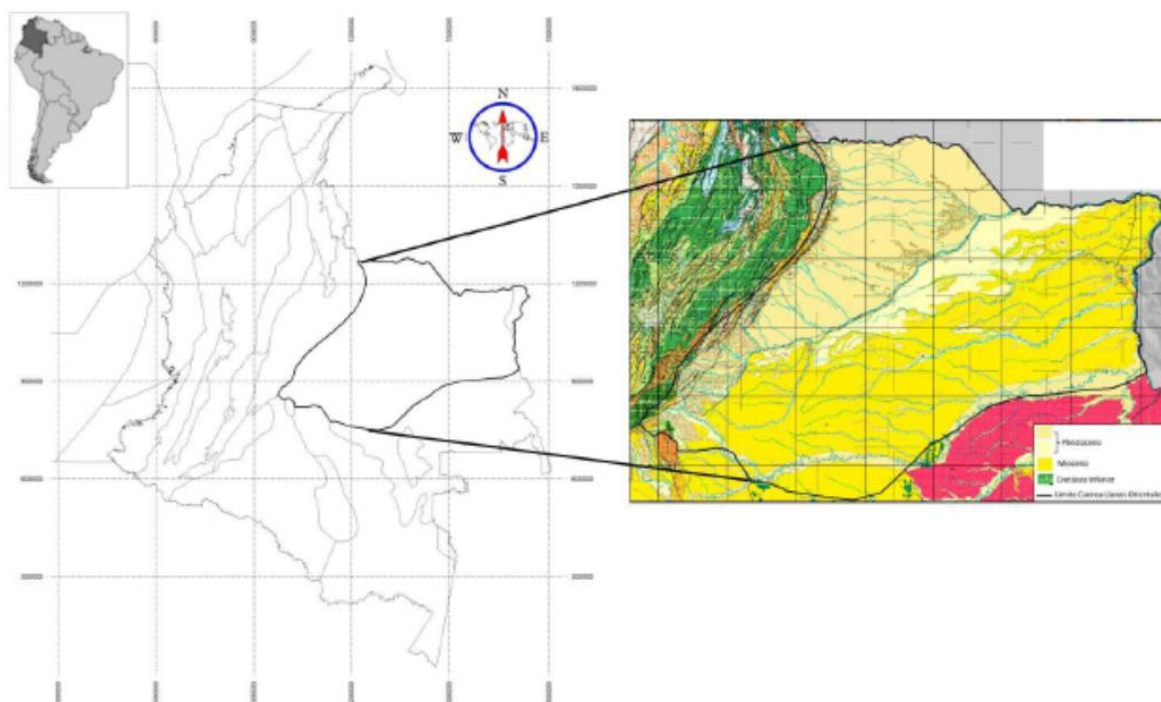
Torrado *et al.*, (2014), realizaron mediante la aplicación de atributos sísmicos la caracterización de la Formación Carbonera para sus Miembros C1, C3, C5 y C7 en 700 km² de sísmica 3D, justo al norte del área de estudio de este trabajo. Su interpretación de cuerpos de arenas fluviales, se enfocó en identificar las geoformas y en diferenciar el material de llenado de los canales caracterizándolos en prospectivos y no prospectivos como yacimientos de hidrocarburos. Sin embargo, sus ejemplos se centran en los Miembros C1, C3 y C5, definiendo los depósitos del C7 como un tipo de canal llenado por arenas, conformada por canales amalgamados con alta extensión lateral. Igualmente concluye que en depósitos homogéneos como las arenas amalgamadas del Miembro C7, el atributo de coherencia no es útil pues no logra diferenciar cambios faciales como resultado de la migración lateral del sistema fluvial.

El presente trabajo busca hacer una caracterización al detalle del Miembro C7 de la Formación Carbonera para un área específica dentro de la Cuenca de los Llanos Orientales, restringiéndolo a ser un estudio local y no regional como la mayoría de los estudios citados anteriormente.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La Cuenca Llanos Orientales está localizada en el noreste de Colombia, siendo una depresión topográfica plana, de orientación suroeste-noreste, con alturas que oscilan entre 200 y 500 metros, que se desarrolló en el flanco occidental del Escudo de Guyana. Cubre una extensión de 225.603 km² (ANH, 2011). Sus límites geomorfológicos son la cuenca Apure-Barinas, al norte (de la cual se separa por el límite internacional de Colombia con Venezuela); la Serranía de La Macarena y el Arco del Vaupés, al sur; el sistema de fallas de Guaicáramo y la Cordillera Oriental, al oeste; y el Escudo de Guyana, al este (Figura 2-1).

Figura 2-1: Mapa geológico Llanos Orientales ANH, 2011



De acuerdo con Cooper *et al.*, (1995), el desarrollo de la cuenca de antepaís de los Llanos Orientales se relaciona con la evolución de las cuencas del Valle Medio del Magdalena y Cordillera Oriental en Colombia, desde el Triásico hasta el Mioceno medio. La evolución estructural puede dividirse en ocho eventos principales:

1. Triásico-Cretáceo temprano: cuencas de “*rift*”, desarrolladas como resultado de la separación de Norte y Sur América por la apertura del Caribe (~ 235-130 Ma.).
2. Barremiano-Maastrichtiano: comprende un período prolongado de esfuerzos extensionales, representado en una serie de fallas de extensión (por ejemplo, el sistema de fallas de Guaicáramo), junto con la subsidencia pasiva regional en una cuenca de retro-arco (~ 125-74 Ma).
3. Maastrichtiano-Paleoceno temprano: se produce el evento final de acreción de la Cordillera Occidental que causa levantamiento y erosión de la Cordillera Central (~ 74-65 Ma.). Este es el inicio de la megasecuencia de cuenca de antepaís pre-andina.
4. Eoceno medio: Se genera un evento temprano de deformación compresiva que afectó el Valle del Magdalena y la margen occidental de la Cordillera Oriental (~ 49-42 Ma.) debido a un aumento en la tasa de convergencia de la placas de Nazca y Suramérica.
5. Eoceno tardío-Oligoceno tardío: se produce una prolongada subsidencia y fallamiento normal localizado, como respuesta a la flexión de la litosfera en la cuenca de antepaís, debido a la carga de deformación de las cordilleras Occidental y Central (~39-29 Ma.).
6. Oligoceno tardío-Mioceno temprano: deformación regional que causó la continuación de la subsidencia en la Cuenca Llanos Orientales (~ 29-16,5 Ma.).
7. Mioceno medio: Se genera una fase de subsidencia rápida debido a la deformación, levantamiento y erosión en la Cordillera Oriental, y donde se estableció el depocentro de la cuenca de antepaís en el piedemonte de Llanos Orientales (~ 16,5-10,5 Ma). Esta es una megasecuencia de cuenca de antepaís.
8. Mioceno tardío–Reciente: se produce la última fase de compresión y de inversión asociados con el plegamiento frontal y cinturón de cabalgamiento de la Cordillera Oriental (10,5 Ma. Hasta el Presente).

Figura 2-2: ColumnaEstratigráfica Generalizada Cuenca de los Llanos Orientales

ERA	PERIODO	EPOCA	FORMACION	LITOLOGIA		
CENOZOICO	TERCIARIO	CUATERNARIO				
		MIOCENO SUPERIOR - PLEOCENO	GUAYABO			
			MIOCENO MEDIO	LEON		
		OLIGOCENO - MIOCENO INFERIOR	CARBONERA	ARENISCAS SUPERIORES	C1	
				LUTITAS	C2	
				CONJUNTO C1	C3	
					C4	
				ARENISCAS DE CARBONERA	C5	
				CONJUNTO C2	C6	
					C7	
				LUTITAS LUTITA 23 LUTITA 24	C8	
		EOCENO	MIRADOR (T2)			
		PALEOCENO	LOS CUERVOS			
			BARCO			
		MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR	GUADALUPE	
GACHETA						
INFERIOR	UNE					
JURASICO						
AMIGALGA (PALEOZOICO)	PRECAMBRICO	BASAMENTO CRISTALINO				

Durante el Cretáceo tardío los sedimentos fueron depositados en una cuenca que se desarrolló de otra de tipo retro-arco, hasta una cuenca de antepaís en el Terciario temprano, cuyo depocentro se movió progresivamente hacia el Este a través del tiempo, presentando sus mayores espesores hacia el Oeste de la cuenca.

El registro litológico en la Cuenca de los Llanos Orientales (Figura 2-2; ANH, 2011) más antiguo está compuesto por rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico. Durante

el Triásico al Cretáceo Inferior, hay ausencia de material rocoso, con excepción de pequeñas secuencias de “*sinrift*”, encontradas en el graben de Arauca. En cuanto a rocas del Cretáceo Superior, se hayan depositadas directamente sobre rocas paleozoicas o sobre el basamento ígneo metamórfico.

La deposición de la megasecuencia de retro-arco, del Cretáceo Tardío, dio su inicio en el Cenomaniano (98-93 Ma.), durante una transgresión regional evidenciada en una sedimentación marina somera poco profunda, de areniscas costeras cretácicas (Formación Une), que cubrió las rocas paleozoicas y parte del escudo de la Guayana.

Durante el Turoniano temprano-Coniaciano (93 - 89 Ma.), existió un aumento global del nivel del mar que permitió la deposición de una sucesión de arcillolitas y lutitas marinas, sílex (chert) y fosfatos.

Durante el Coniaciano-Santoniano temprano (89 a 83 Ma.), se evidencia una caída del nivel relativo del mar, depositando secuencias de areniscas litorales de alta energía ricas en cuarzo, provenientes de aportes del escudo de Guyana (Formación Guadalupe).

A finales del Cretáceo, existe una caída del nivel del mar debido al inicio de la compresión por el evento final de la acreción en la Cordillera Occidental dando paso a un hiato de aproximadamente de 20 Ma.

La sedimentación en el área continuó a finales del Eoceno (~40 Ma. Eoceno tardío), con el inicio de una transgresión que se extendió fuera de la cuenca de antepaís al oeste y al norte. La deposición incluyó relleno de valles ricos en arena y de influencia marina, que cambian hacia el tope a depósitos arcillosos de planicie costera. Al continuar la transgresión sumergió esta planicie aluvial y estableció una plataforma marina poco profunda en toda el área de piedemonte, arcillas de costa afuera y ciclos de progradación, arenosos y bioturbados de frente de costa, marcados por depósitos arenosos fluviales y de relleno de valle de estuario, representan la sedimentación de la parte superior de la Formación Mirador.

Las secuencias depositadas de ~ 34 a 16,5 Ma. (Oligoceno-Mioceno medio) , sugieren cuatro grandes ciclos de depósitos de influencia marina de llanura costera baja y

que corresponden a la tradicionalmente denominada Formación Carbonera. En el Mioceno medio, existe un aumento global del nivel del mar que coincidió con la primera deformación significativa y levantamiento en la Cordillera Oriental, que benefició la formación del trazo de sistema transgresivo, dando como resultado arcillolitas y lutitas de la Formación León.

Finalmente de ~ 10 a 2 Ma, se depositaron una serie de materiales clásticos continentales gruesos que conforman la Formación Guayabo de ~ 10 a 2 Ma. Esta última fase de deposición marca el levantamiento de la Cordillera Oriental inmediatamente al oeste del piedemonte y la migración del eje de cuenca de antepaís a la ubicación actual del piedemonte de la Cordillera Oriental.

En resumen, la cuenca actual de los Llanos Orientales es una cuenca de antepaís (Foreland) desarrollada entre el Escudo de Guyana (el cratón) y la Cordillera Oriental (el orógeno). La historia tectónica de la margen noroccidental de Suramérica empieza con la formación del cratón (supercontinente precámbrico) generado por la unión de microplacas. Desde este tiempo el área sufrió múltiples fases tectónicas durante el Paleozoico y el Mesozoico, sobrepuestas por la deformación terciaria andina, la cual empezó en el Cretáceo tardío (Maastrichtiano) y culminó en el Mioceno-Plioceno, con eventos compresivos que crearon la Cordillera Oriental y su cuenca asociada de antepaís.

Según Beicip et al., (1995), se diferencian cinco provincias estructurales en la Cuenca de los Llanos Orientales: Arauca, Casanare, Vichada, Meta y Piedemonte Llanero. El área de estudio se encuentra ubicada en la Provincia del Casanare (al centro de la cuenca), la que se haya caracterizada por una extensa zona de plataforma con fallas normales, ésta provincia corresponde a un gran monoclinado inclinado hacia el Oeste, con sistemas de fallas normales antitéticas y en menor proporción sintéticas que afectan toda la secuencia sedimentaria.

2.1 Formación Carbonera

Definida por Notestein (1944), del Eoceno tardío al Mioceno temprano se depositan arcillolitas, limolitas y areniscas intercaladas sobre la Formación Mirador

correspondientes a la Formación Carbonera relacionadas con ambientes predominantemente fluviales hacia el sur y el oriente de la Cuenca y transicionales hacia el norte y occidente de la misma. En el área de estudio la Formación Carbonera yace sobre la Formación Guadalupe, ya que en esta zona la Formación Mirador no se depositó.

La Formación Carbonera es considerada de origen no marino, pero contiene algunas capas de origen marino, y está descrita en su sección tipo como una intercalación de arcillitas grises a gris verdoso y pardas con areniscas y con algunos lechos de lignito en su parte inferior y superior; las areniscas se presentan en capas cuyo espesor varía desde menos de 1 m hasta 30 m, el tamaño del grano es variable y con matriz arcillosa. Descansa sobre la Formación Guadalupe e infrayace la Formación León. El límite inferior se coloca dónde terminan las areniscas limpias, de grano grueso de la Formación Guadalupe donde su contacto inferior puede ser inconforme, mientras el límite superior queda marcado por el paso de las areniscas y arcillas arenosas a shales, siendo generalmente un contacto en apariencia concordante con la Formación León (De Porta, 1974).

Para el área del Casanare la Formación Carbonera se ha dividido en ocho conjuntos litológicos (Miembros), los conjuntos designados con números impares (C1, C3, C5, C7) son predominantemente arenosos y los enumerados como pares (C2, C4, C6 y C8) son predominantemente arcillosos y lutíticos que fueron depositados en un ambiente continental a marino somero.

Las unidades más antiguas como C6, C7 y C8 desaparecen hacia el oriente de la cuenca, por lo tanto hacia el este es posible encontrar únicamente la secuencia de C1 a C5. Las areniscas de canales a la base de la unidad C7 conforman cinturones amalgamados con buena continuidad lateral que se convierten en un importante interés exploratorio en la cuenca.

El fin de la deposición de la Formación Carbonera está relacionado con la aparición de un gran cuerpo de agua que cubrió gran parte de la Cuenca, el cual tenía presencia de agua dulce hacia el sur y el oriente y salobre hacia el norte y occidente donde se tendría conexión con ambientes marinos; en este gran cuerpo de agua se depositaron lodolitas con intercalaciones de areniscas correspondientes a la Formación León durante el

Mioceno Medio, el tope de esta Formación está asociado a un evento de máxima progradación cuando desapareció casi totalmente este gran cuerpo de agua.

Fajardo *et al.*, (2000) define a la Formación Carbonera limitada a la base y al tope por superficies de máxima inundación. Con base en la información de afloramientos y coraciones se concluye que la Formación Carbonera se depositó en ambientes continentales y transicionales (Lagunas costeras, bahías o estuarios). A escala regional, considera que la Formación Carbonera muestra una transición de ambientes más continentales al sureste y al este de la cuenca, y ambientes más transicionales al noroeste y oeste de la cuenca.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Estratigrafía de Secuencias

La estratigrafía de secuencias es a menudo considerada como una extensión de la estratigrafía sísmica de los años 70. Sin embargo, a principios del Siglo XX, algunos autores escribieron sobre las relaciones existentes entre sedimentación, discontinuidades y eustasia, que son la base de la estratigrafía secuencial. De acuerdo con Vail *et al.*, (1987), la Estratigrafía de Secuencias es el estudio de las relaciones entre las rocas dentro de un marco cronoestratigráfico de estratos repetitivos relacionados genéticamente y limitados por superficies de erosión o no-depósito o sus conformidades correlativas. Estas relaciones incluyen la distribución de ambientes deposicionales y litofacies dentro de ese marco cronoestratigráfico.

El término de “secuencia”, fue introducido por Sloss *et al.*, (1949) para definir una unidad estratigráfica limitada por dos discontinuidades subaéreas y subrayó la importancia de la tectónica en su génesis. Así mismo una Secuencia está compuesta por una sucesión de sistemas deposicionales relacionados genéticamente, Tratos de Sistema o “System Tracks” (nombre en inglés), los cuales representan la colección de los sistemas sedimentarios depositados durante diferentes fases de cambios del nivel base.

Los Tratos de Sistema son unidades estratigráficas representadas en el registro rocoso como asociaciones de facies tridimensionales. Se definen con base en los límites de secuencias (LS), posición con respecto a la secuencia y su patrón de apilamiento. Se reconocen básicamente tres Tratos de Sistema:

- TMB, Trato de Mar Bajo (Lowstand System Track – LST)
- TMT, Trato Transgresivo (Transgressive System Trak – TST)
- TMA, Trato de Mar Alto (Highstand System Track – LST)

De acuerdo con Catuneanu *et al.* (2011), el continuo desarrollo de la estratigrafía de secuencias en los años 1980 y 1990 dio lugar a una diversificación de enfoques y la definición de varios tipos de secuencias: Secuencias Deposicionales, delimitadas por discordancias subaéreas y sus conformidades correlativas; Secuencias Estratigráficas

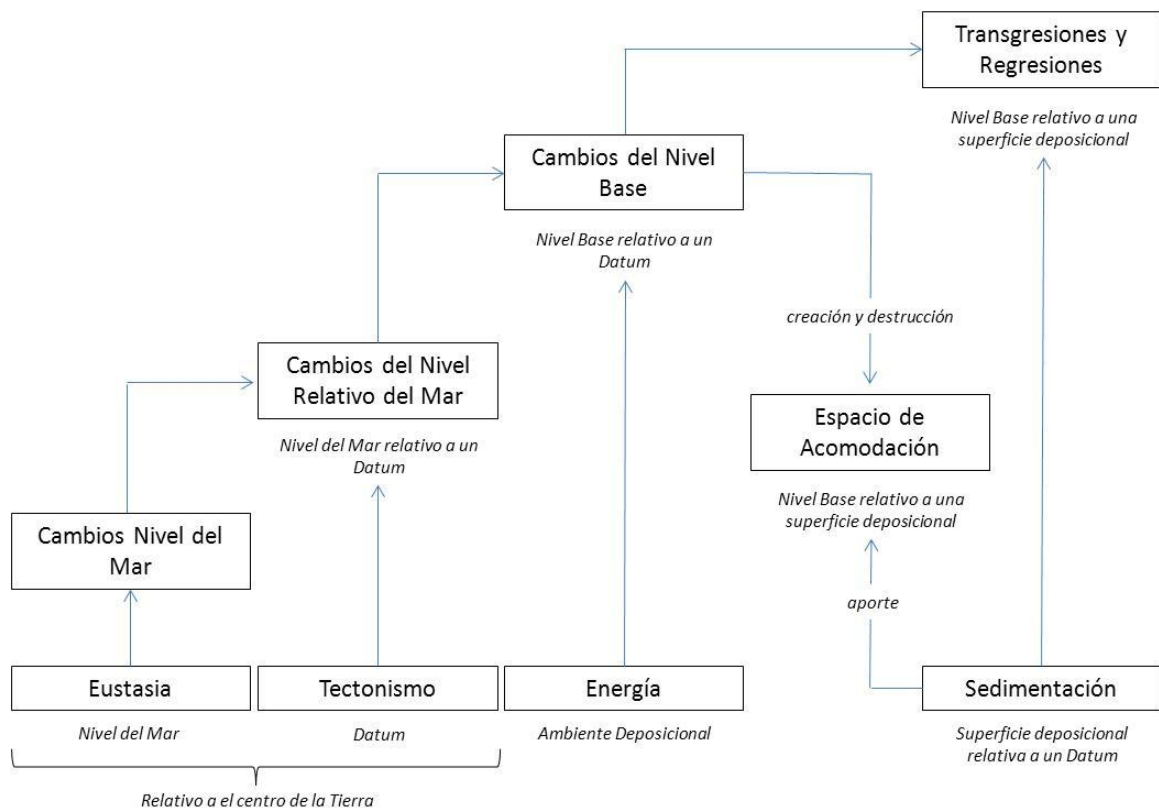
Genéticas, delimitadas por máximas superficies de inundación (MSI); y Secuencias Transgresivas-Regresivas (TR), delimitadas por superficies de máxima regresión (SMR).

Tan importante como el conocimiento de las diferentes propuestas de modelos, son los conceptos de nivel base y de espacio de acomodación. El concepto de nivel base delimita una superficie dinámica de equilibrio entre erosión y sedimentación. El nivel base, que comúnmente se aproxima como el nivel del mar, puede estar por debajo de éste en función de la acción erosiva de las olas y otras corrientes subacuáticas. El espacio de acomodación se define como la cantidad de espacio que está disponible para los sedimentos llenar hasta el nivel base. Un aumento en el nivel base crea espacio de acomodación, mientras que una caída en el nivel base lo destruye.

Cuando el nivel base se aproxima como el nivel del mar, el concepto de "cambio de nivel base" se convierte en equivalente con el concepto de "cambio en el nivel relativo del mar" (Posamentier *et al.*, 1988). La asociación entre el nivel base y el nivel del mar no implica que la aplicabilidad del método de estratigrafía de secuencia sea limitada a los depósitos marinos. De hecho, la metodología se aplica a todos los ambientes sedimentarios. El espacio de acomodación en ambientes fluviales también puede ser modificado por los cambios en el nivel base, donde los ríos están muy lejos del nivel base de influencia, el espacio de acomodación fluvial todavía puede ser creado o destruido por el cambio climático o el tectonismo. En esa medida, el espacio de acomodación es más universal que el nivel de base como control de la ciclicidad estratigráfica en todos los ambientes sedimentarios.

El concepto del nivel base se utiliza generalmente en el contexto de la configuración de ambientes marinos o lacustres (Figura 3-1; Modificado de Catuneanu, 2002). Se ha sugerido que estos dos conceptos pueden amalgamarse en "nivel base estratigráfico" como el concepto que marca la superficie de equilibrio entre la sedimentación y la erosión en todos los ambientes sedimentarios. En el contexto de los sistemas fluviales buzamiento arriba, fuera del alcance de influir en el cambio del nivel del mar, el límite superior del espacio de acomodación fluvial se define por los cambios en los regímenes de descarga y suministro de sedimentos, ya que el control del perfil de equilibrio lo realiza la llanura de inundación.

Figura 3-1: Control en los cambios del nivel base, transgresiones y regresiones

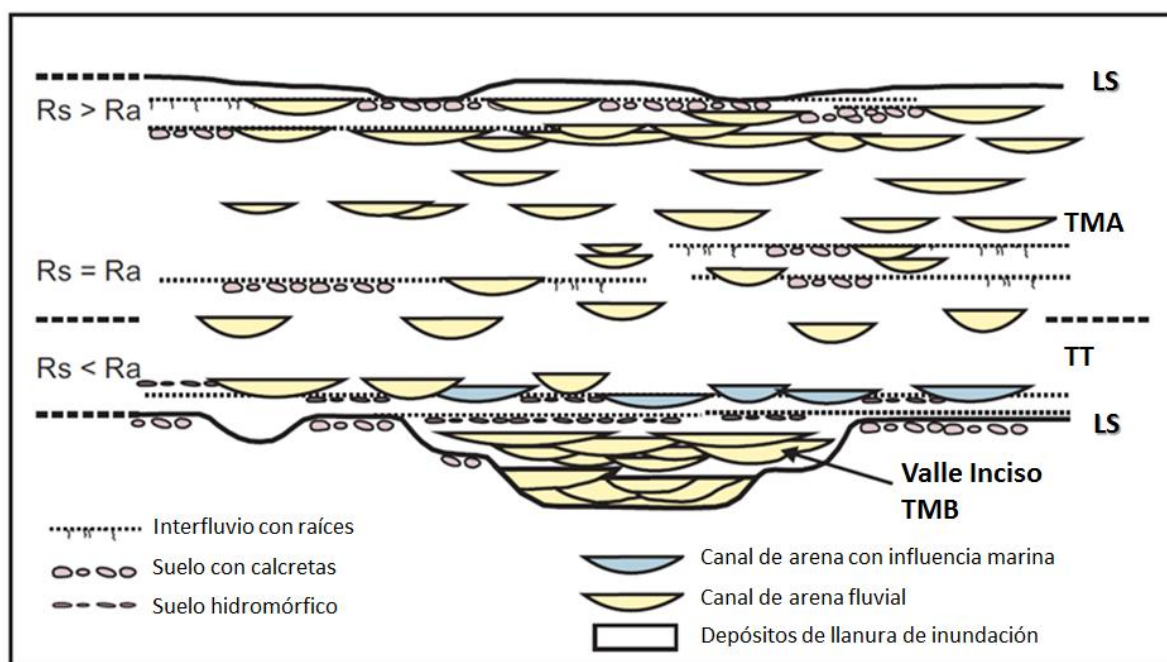


Junto con el concepto de nivel de base, los perfiles de equilibrio fluvial son particularmente importantes para la comprensión de los procesos de sedimentación en las zonas continentales. Para cualquier elevación dada de la zona de aporte, los ríos tienden a desarrollar un equilibrio dinámico en la forma de un perfil longitudinal graduado (Miall, 1996). Este perfil de equilibrio se consigue cuando el río es capaz de transportar su carga de sedimentos sin agradación o degradación de los canales. Respecto a los factores de control de la sedimentación, Posamentier *et al.*, (1993) plantea que las secuencias deposicionales en cuencas antepaís, están controladas por una subsidencia producto de una tectónica activa, que genera dos zonas con tectonosecuencias proximales y distales, con respecto al margen de la cuenca. A medida que la elevación de las áreas de origen cambia debido a factores tales como la denudación, hundimiento o levantamiento tectónico, los ríos empiezan a ajustarse a los nuevos perfiles de equilibrio.

Los cambios del nivel base fluvial son controlados por una combinación de factores, como el clima, la zona de origen tectónico, y cambios en el nivel de base en la costa

(Catuneanu, 2002). Los cambios en el nivel de base en la costa son las que representan los modelos de secuencia para que el control dominante en los procesos fluviales, sobre todo en los tramos aguas abajo de estos sistemas: un aumento del nivel base en la costa tiende a provocar un cambio hacia arriba de los perfiles de equilibrio (agradación fluvial); una caída del nivel base en la costa tiende a provocar un cambio hacia abajo de los perfiles de equilibrio (incisión fluvial). Mientras los controles tectónicos y climáticos sobre los cambios fluviales del nivel base son los más importantes en los tramos aguas arriba de los sistemas fluviales. De acuerdo con Catuneanu *et al.*, (2011) (adaptado de Wright y Marriott, 1993), el modelo de secuencia para los sistemas fluviales se basa en la relación entre la tasa de sedimentación (R_s) y la tasa de generación de espacio de acomodación (R_a) (Figura 3-2; modificado de Catuneanu *et al.*, 2011).

Figura 3-2: Modelo de Secuencias para sistemas no marinos.



3.2 Sismoestratigrafía

La Estratigrafía Sísmica o Sismoestratigrafía, es la parte de la Estratigrafía que se encarga del estudio de los rasgos estratigráficos y de facies sedimentarias a partir de secciones sísmicas de reflexión. Esta es una poderosa herramienta que permite diferenciar superficies significativas, como discontinuidades, a partir del arreglo de

reflectores. Es de gran importancia en el análisis secuencial o estratigrafía secuencial, basada en el reconocimiento de unidades genéticamente relacionadas. La estratigrafía sísmica, permite la identificación de superficies continuas, estilos estructurales, patrones de apilamiento, imágenes de elementos deposicionales, geomorfología y geometría de estratos. Para complementar el análisis que se hace sobre la sísmica, se usan otros tipos de datos como los registros de pozos, que contribuyen en la definición de los patrones de apilamiento vertical, elementos deposicionales, sistemas deposicionales, petrofísica y calibración de la sísmica.

En los primeros días de la estratigrafía sísmica, la resolución vertical era de 20 a 30 metros o más; en la sísmica actual esta resolución puede llegar a ser hasta de 5 metros de resolución vertical o menos, dependiendo de la profundidad de investigación y de las técnicas que actualmente se usan para mejorarla como lo es la inversión del dato sísmico. Características tales como las superficies laterales de acreción en barras fluviales o canales de marea se puede ver ahora en los volúmenes 3D, en diferentes tipos de horizontes (a lo largo del tiempo, el mismo horizonte, un intervalo, o por la superficie de falla). Las últimas técnicas de visualización en 3D permiten realizar viajes virtuales a través de volúmenes sísmicos, a "caminar" a lo largo de inconformidades interpretadas. La Estratigrafía Sísmica convencional ha dado paso a ideas más sedimentológicas de la geomorfología sísmica, que permite la exploración de canales u otros elementos de sedimentación o erosión, o el análisis del tipo de sedimentos por gravedad. A pesar de esta innovación en la tecnología y la ciencia de la imagen estratigráfica sísmica, los conceptos estratigráficos aún no se han incorporado a los códigos estratigráficos o guías.

La unidad básica de análisis en la estratigrafía sísmica, es la secuencia sísmica, la cual corresponde a una secuencia deposicional identificada sobre la sísmica. Mitchum *et al.*, (1977) definieron las facies sísmicas como grupos de reflexiones sísmicas cuyos parámetros (configuración, amplitud, continuidad, frecuencia, y velocidad intervállica) son distintos a las de los grupos contiguos. Las secuencias sísmicas son cronoestratigráficamente significativas y ellas proveen un excelente marco para realizar un análisis estratigráfico.

Según Posamentier *et al.*, (1988), en una secuencia sísmica, se presentan una sucesión de sistemas depositacionales genéticamente relacionados (tratos de sistema), cuya interpretación puede indicar durante cuál o cuáles cambios eustáticos dieron origen a su depósito.

Las principales dificultades con los ambientes fluviales y la estratigrafía sísmica son los rápidos cambios laterales de facies y las capas delgadas, para lo cual se requiere buena resolución vertical en la sísmica y en la información de pozos. Uno de los conceptos básicos detrás de la estratigrafía sísmica es la observación de las reflexiones como líneas de tiempo, es decir, ellas representan un corto período de tiempo con condiciones de sedimentación continuas e incorporan varias litofacies ya que esta línea de tiempo puede estar a lo largo de diferentes ambientes de depósito.

Según Sangree & Widmier (1977), a partir de la interpretación de facies sísmicas se pueden elaborar mapas A-B/C (Figura 3-3), los cuales se basan en el resultado del análisis de propiedades de las reflexiones sísmicas, tomando en cuenta criterios como: amplitud, continuidad, frecuencia, el patrón interno de las reflexiones y la forma externa dominante en la secuencia (Figuras 3-4 y 3-5, Tomado de Mitchum *et al.*, 1977).

- Amplitud (fuerte o débil): Explica el contraste de densidad y la velocidad de propagación de ondas acústicas a través de diferentes litologías, y ayuda a definir variaciones laterales.
- Frecuencia (alta o baja): Es la distancia entre reflectores y depende de la diferencia en distancia entre estratos (espesores), variaciones laterales de velocidad de ondas debido a cambios litológicos.
- Continuidad (buena a discontinua): Está generalmente asociada a la extensión lateral de los estratos.

Figura 3-3: Sistema de códigos para la elaboración de mapas A-B/C y tipos de configuraciones internas para definir la variable C en los mapas AB/C

CODIGOS DEL SISTEMA A-B/C	
TERMINACIONES LIMITE SUPERIOR (A)	
TRUNCACIÓN EROSIONAL (Te)	(Te)
(TOPLAP)	(Top)
CONCORDANTE	(C)
TERMINACIONES LIMITE INFERIOR (B)	
(ONLAP)	(On)
(DOWNLAP)	(Dwn)
CONCORDANTE	(C)
CONFIGURACIÓN INTERNA (C)	
PARALELA	(P)
DIVERGENTE	(D)
CAÓTICO	(C)
ONDULADA	(W)
DIVERGENTE (MOUNDED)	(DM)
(MOUNDEN)	(M)
PROGRADACIÓN OBLICUA	(Ob)
PROGRADACIÓN SIGMOIDAL	(SIG)
REFLEXIONES LIBRES	(Rf)
(SHINGLED)	(Sh)

CONFIGURACIÓN DE REFLECTORES (DENTRO DE LAS SECUENCIAS)	
CONFIGURACIONES PRINCIPALES	
PARALELA	
SUBPARALELA	
DIVERGENTE	
CLINIFORMAS PROGRADACIONALES	
SIGMOIDE	
OBLICUA	
(COMPLEX) SIGMOIDE-OBLICUA	
(SHINGLED)	
CLINIFORMAS (HUMMOKY)	
CAÓTICA	
REFLEXIONES LIBRES	
POR AGRUPACIÓN	
LISAS	(HUMMOKY)
ONDULADAS	LENTICULAR
REGULARES	INTERRUMPIDAS
IRREGULARES	(CONTORTED)
UNIFORMES	
VARIABLES	

Figura 3-4: Patrones de las configuraciones internas de las reflexiones

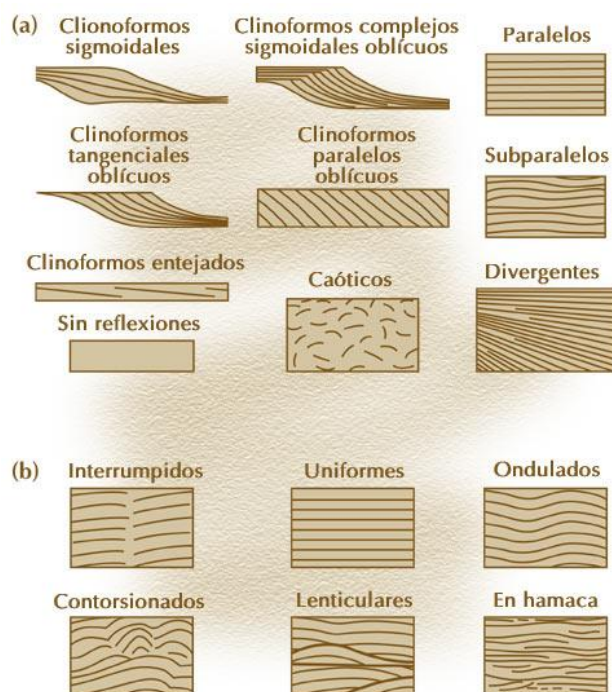
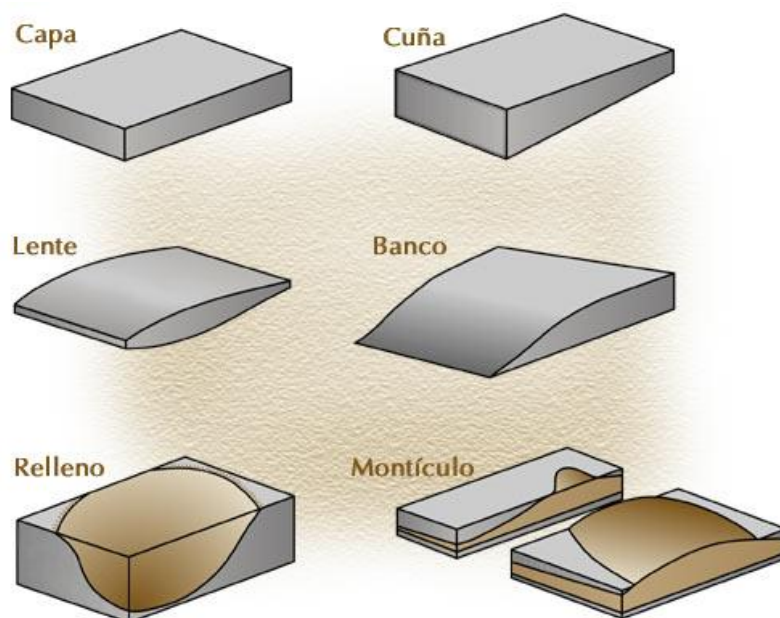


Figura 3-5: Forma externa de las secuencias



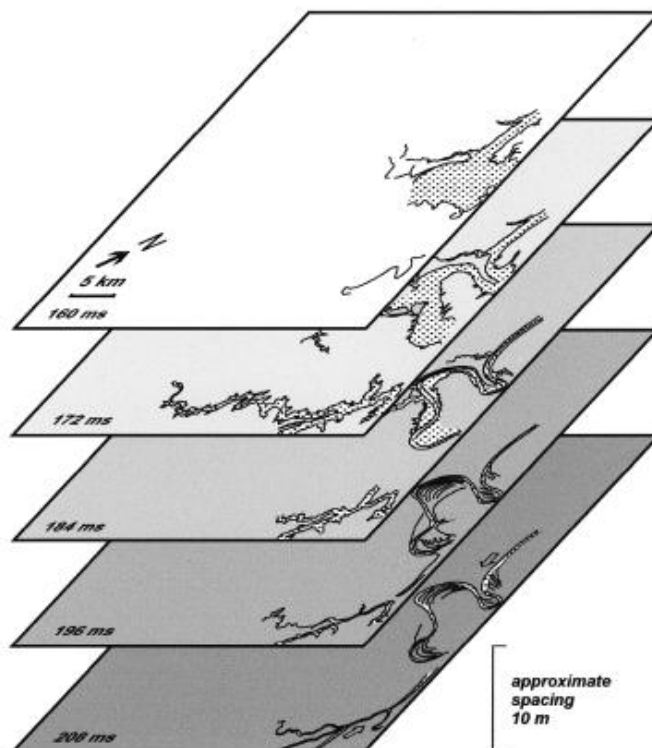
De acuerdo con la metodología propuesta por Miall (2002), la cual propone realizar el análisis basándose en la mejor estimación de la posición vertical de cada sistema fluvial sobre la base de estratigrafía de secuencias realizada con los datos sísmicos y de pozo (Figura 3-6), utilizando los detalles ofrecidos por los “time slices” (“strata slices” para el caso de este estudio).

A primera vista, la gran cantidad de características aluviales visible en estos cortes de tiempo parecen desafiar el análisis; sin embargo, los patrones son susceptibles de análisis cuando tienen debidamente en cuenta los controles que determinan el estilo fluvial. Es para este análisis que los conceptos y previos análisis de estratigrafía de secuencias de los sistemas fluviales proporcionan las herramientas para la generación de modelos secuenciales. Los principios de estratigrafía de secuencias no marinas en los cuales se basará el análisis se resumen así:

- La incisión y el desarrollo de los valles incisos puede ocurrir durante los períodos de acomodación negativo, por ejemplo, durante el levantamiento regional o caídas en el nivel de base. También puede ocurrir durante las épocas de mayor descarga o durante épocas de reducción de la carga de sedimentos.

- Teniendo en cuenta una amplia variación en los estilos fluviales, los sistemas de carga, como en ríos trenzados y ríos de baja sinuosidad con barras de desplazamiento, tienen más probabilidades de ocurrir durante épocas de baja acomodación, inmediatamente después de un episodio de caída de nivel de base.
- Los sistemas fluviales de todo tipo que llenan los valles incisos comúnmente indican el inicio de la inversión en la generación de una acomodación negativa/valle de corte para llenado positivo/relleno de valle. La agradación del valle también puede ocurrir durante los momentos de mayor carga de sedimentos..
- Sistemas fluviales anastomosados son comúnmente asociados con la rápida generación de acomodación, como por ejemplo durante la transgresión.
- Sistemas caracterizados por meandros libres con cinturones de meandro bien desarrollados, comúnmente caracterizan períodos de modesta generación de espacio de acomodación, pero los factores de la descarga, la carga de sedimentos, y la pendiente local también son importantes en la determinación de estilo fluvial.
- Ríos rectos y baja sinuosidad que muestran poca evidencia de la migración lateral son típicas de zonas de muy baja pendiente y baja acomodación, tales como llanuras del delta inferior.
- La evidencia de la influencia marina dentro de un sistema no marino, tales como las características de las mareas, indica episodios de inundación (períodos durante los cuales la generación de espacio de acomodación supera el suministro de sedimentos).

Figura 3-6: Ejemplo superposición “time slices”



3.1 Inversión Sísmica

El principal objetivo de la inversión sísmica es transformar reflexiones sísmicas en propiedades de roca. Esto es posible porque las ondas sísmicas se reflejan en las interfaces existentes entre los materiales que poseen propiedades acústicas diferentes. No obstante, los datos sísmicos tienen información que trasciende la localización del reflector; la onda sísmica lleva toda la información del medio por el cual se propagó, y por medio de la inversión se busca recuperar esta información (Frazer, 2008).

La información de las amplitudes de las reflexiones sísmicas puede ser utilizada para efectuar un proceso de inversión, destinado a determinar las propiedades de los materiales presentes a ambos lados de la interface, mediante la correlación de estas propiedades obtenidas por métodos sísmicos con los valores medidos en el pozo, y que

se puede extender a través de todo el volumen sísmico. La propiedad que controla el cambio en la onda de retorno, en la interface, es el contraste de impedancia.

La inversión comienza con datos medidos reales, la sísmica, y aplica una operación que retrocede a través del experimento físico para reproducir un modelo del subsuelo (Figuras 3-7 y 3-8; Shlumberguer, 2008). Si la inversión se realiza correctamente, el modelo del subsuelo se asemeja al subsuelo real.

Figura 3-7: Ejemplo de Inversión Sísmica

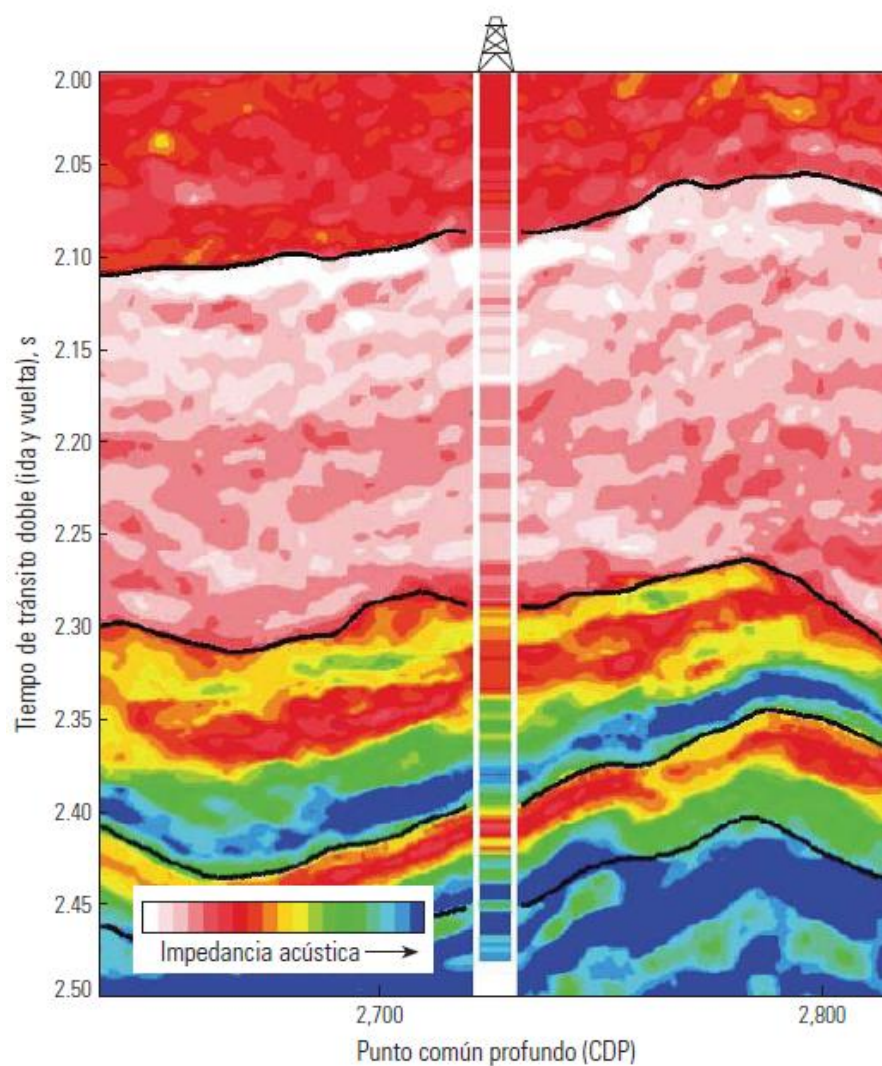
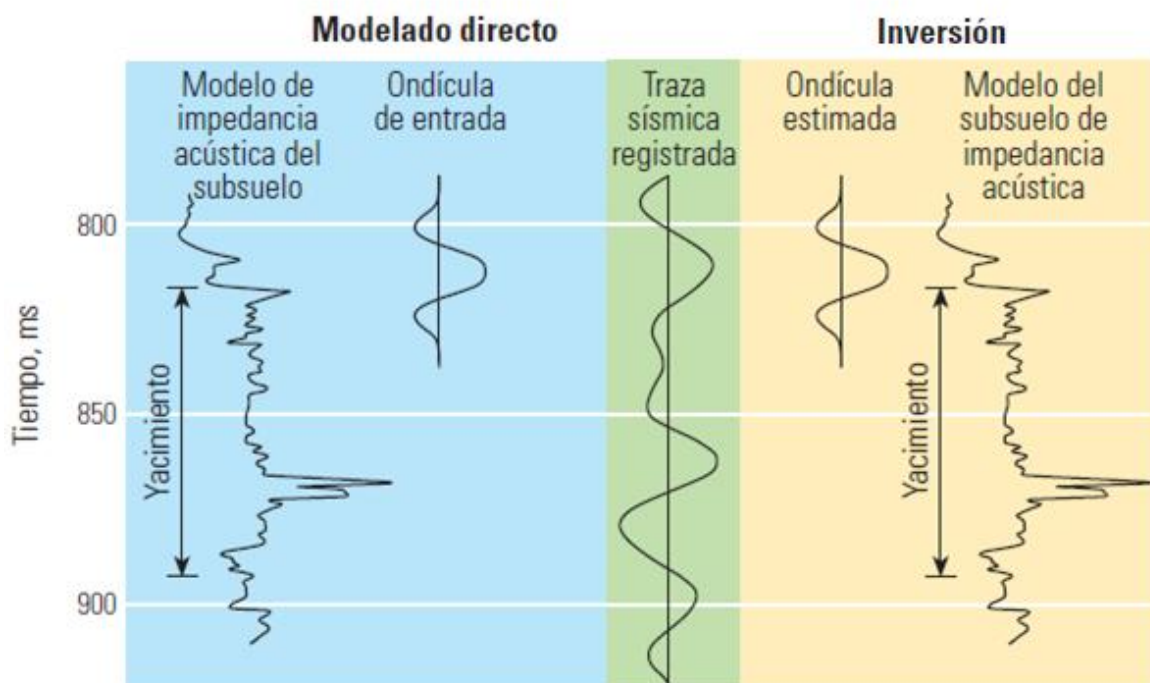


Figura 3-8: Esquema del Proceso de Inversión



3.1.1 Impedancia Acústica

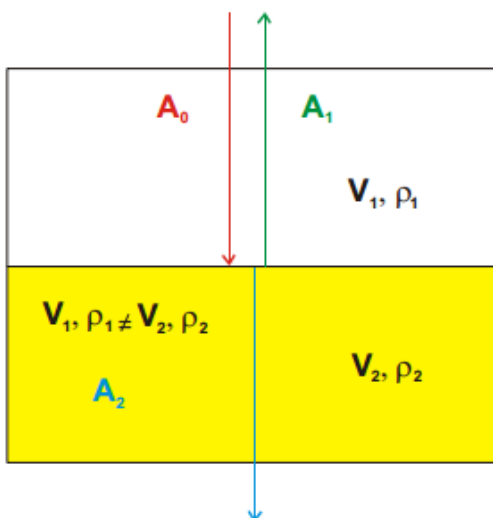
La impedancia acústica (Z) es una propiedad intrínseca de las rocas y se define como el producto entre la densidad de las rocas del subsuelo y la velocidad de las ondas acústicas cuando se propagan a través de ellas (Telford *et al.*, 1976). Cada roca, de acuerdo a su composición mineralógica y contenido de fluidos, posee una impedancia acústica más o menos distintiva (Figura 3-9).

Debido a que la impedancia es función de la densidad y la velocidad, y su vez estos parámetros dependen de la porosidad, litología, tipo de fluido dentro de la roca, saturaciones entre otros, resulta de utilidad para predecir cambios en secciones y mapas de dichos parámetros (producto de inversiones sísmicas), aunque debe ser visto con cuidado ya que más de uno de estos parámetros puede variar al mismo tiempo dentro del cuerpo de roca.

Se puede decir que las impedancias acústicas de las rocas se encuentran “enmascaradas” dentro de la información sísmica y que, mediante el proceso de ‘inversión’ de los datos sísmicos de reflexión, se recuperan las impedancias acústicas individuales de las capas rocosas, a través de la extracción de la componente sísmica u ondícula lo cual permite caracterizar las unidades que se están estudiando con mayor precisión.

$$Z = \rho \cdot V_p \quad (1)$$

Figura 3-9: Transmisión y reflexión de un rayo perpendicular a una superficie de contraste de impedancia acústica (Z).



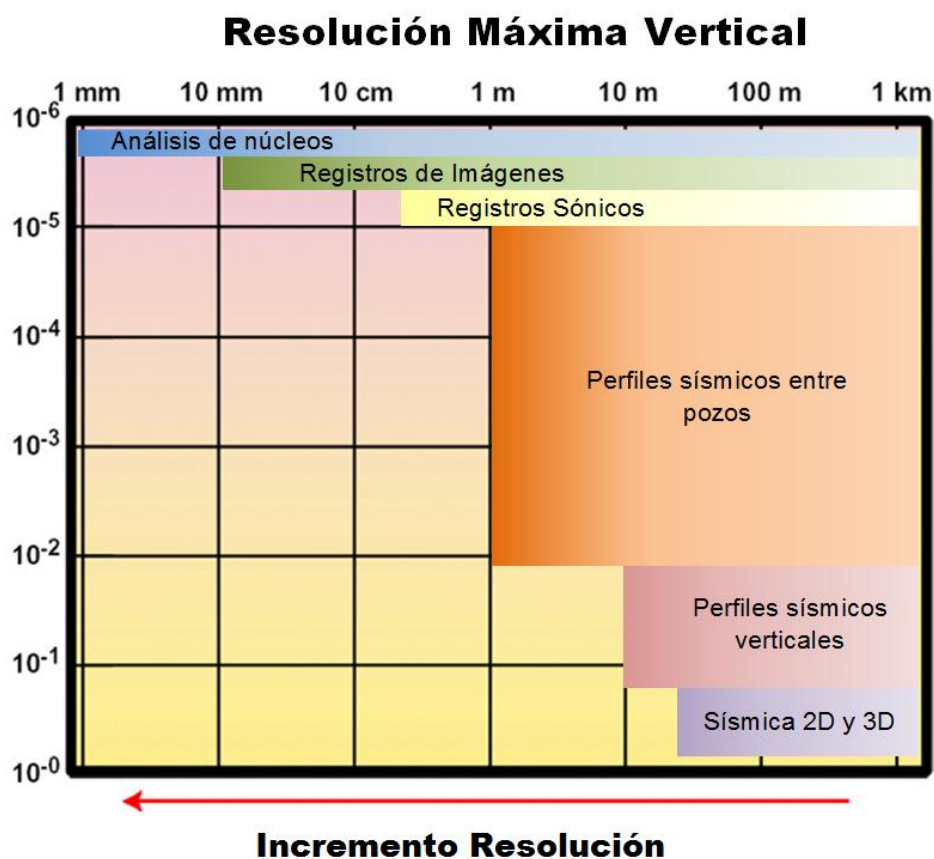
3.1.1 Resolución Sísmica Vertical

Se entiende como resolución sísmica vertical la menor distancia vertical entre dos interfaces litológicas que produce dos reflexiones discretas, las cuales pueden separarse visualmente. En sísmica la resolución vertical concierne al espesor mínimo de una capa, en la cual las reflexiones provenientes de su tope y de su base pueden ser distinguidas. El criterio de Rayleigh establece que el límite de resolución es de un $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda dominante (Sheriff, 1997).

La resolución sísmica es un aspecto clave para la extracción de detalles estratigráficos, el cual involucra dos conceptos elementales: la resolución sísmica vertical, que se refiere a la capacidad de distinguir dos eventos sísmicos cercanos que representan niveles de profundidad diferentes, y la resolución sísmica lateral u horizontal que se refiere a la habilidad de reconocer dos rasgos desplazados lateralmente como dos eventos contiguos bien definidos (Chopra, 2007).

En la Figura 3-10(Harris *et al.*, 1997)se muestran los diferentes métodos geofísicos y su correspondiente resolución vertical, y se muestra como los métodos sísmicosde superficie respecto a los demás observan un volumen mayor de roca, pero con resolución limitada.

Figura 3-10: Variación de la resolución vertical asociada con los diferentes métodos geofísicos



3.2 Atributos Sísmicos

Un atributo sísmico es toda aquella información obtenida a partir de los datos sísmicos, bien sea medida directamente o por razonamiento lógico o experimental (Taner, 2001). Los atributos sísmicos son medidas específicas de características geométricas, cinemáticas, dinámicas o estáticas provenientes de los datos sísmicos. Los atributos pueden presentar información fundamental de la data sísmica: tiempo, amplitud, frecuencia y atenuación. La mayoría de los atributos usados comúnmente son extraídos después del apilamiento, es decir después de que los datos fueron migrados y cargados en las estaciones de trabajo.

Todos los parámetros manejados sísmicamente pueden ser denominados como atributos sísmicos. Los principales objetivos de estos atributos son proveer información detallada al intérprete de los parámetros estructurales, estratigráficos y litológicos del prospecto sísmico (Taner, 2001). Estos atributos pueden ser medidos en un instante de tiempo o sobre una ventana; y pueden ser medidos tanto en una sola traza como en un conjunto de ellas.

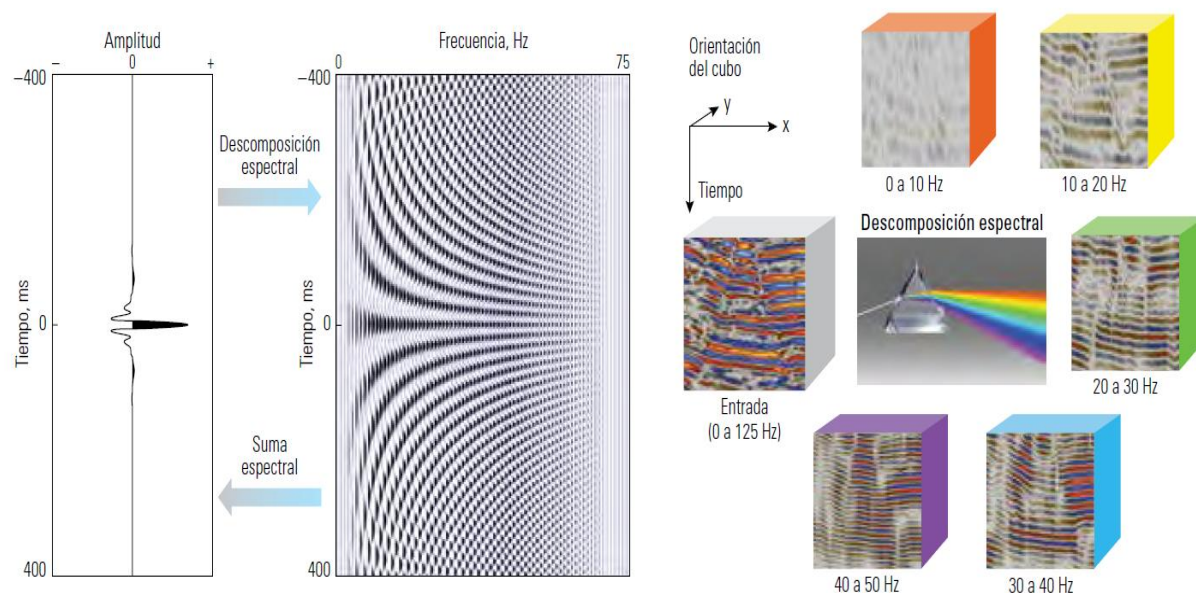
Como una extensa generalización, los atributos derivados de tiempo proveen información estructural, los atributos derivados de amplitud proveen información estratigráfica y de reservorio. Los atributos derivados de la frecuencia, pueden proveer alguna información estratigráfica o de reservorio adicional. Los atributos relacionados a atenuación se usan, sin embargo no con la misma forma de los otros (amplitud, frecuencia).

3.2.1 Descomposición Espectral

La descomposición espectral, es un método de separación de las señales sísmicas en sus componentes de frecuencia (Figura 3-10). El contenido espectral de los datos sísmicos registrados depende de los efectos acumulados de las propiedades sísmicas y de las interfaces de los estratos de rocas que encuentran las señales en proceso de propagación. Mediante el aislamiento de ciertas frecuencias, los intérpretes pueden extraer rasgos sutiles. Por ejemplo, los componentes de frecuencia más altos contienen información acerca de los rasgos estructurales de longitud de onda más corta ocultos en

la señal de longitud de onda predominantemente larga de los datos sísmicos con todas las frecuencias. La descomposición espectral se aplica para el mejoramiento de las imágenes, mejorando la resolución, equilibrando el contenido de frecuencias o eliminando el ruido. También se utiliza para la caracterización de cuerpos rocosos, evaluando estratigrafía secuencial y los rasgos deposicionales, estimando el espesor estratigráfico, determinando las propiedades de fractura y el contenido de fluidos (Aarre, 2012).

Figura 3-11: Descomposición Espectral de una traza sísmica

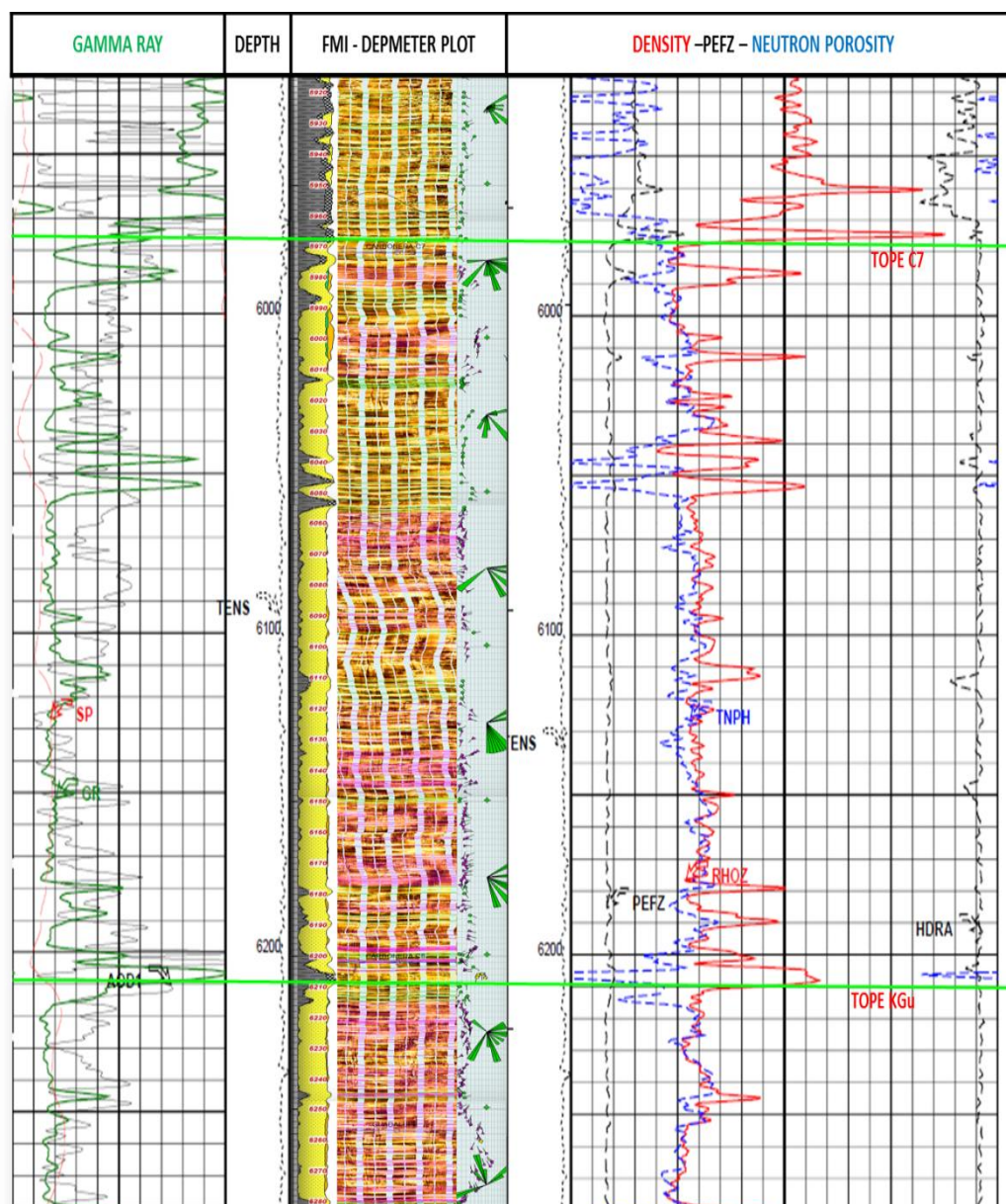


4. RESULTADOS

4.1 Análisis Estratigráfico y Secuencial

4.1.1 Pozos

Figura 4-1. Correlación Curvas GR, Densidad-Neutron y datos de Imagen Resistiva Pozo Tipo (FMI, Schlumberger)- Definición Paleocorrientes (Escala: 1:500 MD)



Como se planteó en la metodología, las litofacies se definieron a partir de las descripciones de muestras de zanja, las cuales se correlacionaron con los registros eléctricos (básicos) y la imagen resistiva interpretada (FMI), permitiendo esta última contar con alguna interpretación de estructuras sedimentarias, buzamientos estructurales y direcciones de paleocorrientes (Figura 4-1). Para esto se seleccionó un pozo tipo, aquel con mayor información dentro de la data disponible (A2).

Dentro de la sucesión sedimentaria estudiada fueron definidas nueve (9) Litofacies para el pozo tipo, las cuales se resumen en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Definición de Litofacies para el Pozo Tipo.

Litofacies	Litología	Espesor Aparente (pies)	Estructuras Sedimentarias
LTF-0	Arcillolitas de color gris clara a media, menor gris verdosa clara; moderadamente firme a firme; predomina subblocosa; moderadamente limosa; ligeramente soluble; no calcárea.	18	
LTF-1	Areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, subredondeado a redondeado, buena selección; intercaladas con niveles de arcillolita limosa gris medio.	34	Las estratificaciones cruzadas presentan ángulos que varían entre 15° - 30° con direcciones de paleocorrientes hacia el Sur (Registro FMI)
LTF-2	Areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, menor grueso, angular a subangular, buena selección; intercaladas con niveles de arcillolita limosa gris medio. Intercalado con delgados niveles de limos carbonosos.	28	Laminaciones lenticulares. La dirección preferencial de los buzamientos es SE. (Registro FMI)
LTF-3	Intercalaciones de arenas de grano medio a grueso, con limolitas marrón medio con laminaciones de materia orgánica, y niveles de carbón negro, blocoso y quebradizo.	20	
LTF-4	Arenas de grano fino a medio, subredondeadas a subangulares, localmente angulares, sorteamiento regular.	50	Estratificación Cruzada.
LTF-5	Arcillolita crema, marrón muy clara, dura, blocosa, silícea, no calcárea. Trazas de arena cuarzosa de grano fino.	10	
LTF-6	Arenas de grano fino a medio, subredondeadas a subangulares, localmente angulares, sorteamiento regular. Trazas de Pirita.	60	Estratificación Cruzada.
LTF-7	Intercalaciones de arenas de grano fino a muy fino, menor medio, con limolita marrón oscura, con laminaciones de materia orgánica, carbobosa, pirítica y arcillolita crema.	20	
LTF-8	Arcillolita crema, marrón muy clara, moderadamente dura, predomina blocosa, silícea; no calcárea.	10	Parcialmente Fracturado.

Las litofacies descritas previamente, caracterizan la sección objeto de estudio como la alternancia de cuerpos de arenas, arcillas y niveles limosos, de espesores variables, donde las arenas se presentan cuarzosas, de regular a bien seleccionadas, y tamaño de grano de fino a grueso (LTF 1, 2, 4, 6 & 7). Sobresale entre el grupo la litofacie LTF-3, que se identifica por el enriquecimiento en materia orgánica, representada en limolitas carbonosas y niveles de carbón negro, blocoso y quebradizo ($\leq 10\%$ en las muestras de zanja).

Las arcillas varían de color en la sección perforada por el pozo tipo, al tope gris verdosas y a la base crema y marrón, pero predominantemente duras, blocosas, silíceas y no calcáreas (LTF 0, 5 & 8).

Adicionalmente, a muestras de zanja del pozo tipo se le realizó un Estudio Palinológico para el intervalo 5000' - 7150' (Paleoflora, 2010), del cual se tomó la descripción del siguiente intervalo cercano a la unidad objeto de este estudio (Tabla 4-2).

Tabla 4-2: Resultados Estudio Palinológico Pozo Tipo (Paleoflora, 2010)

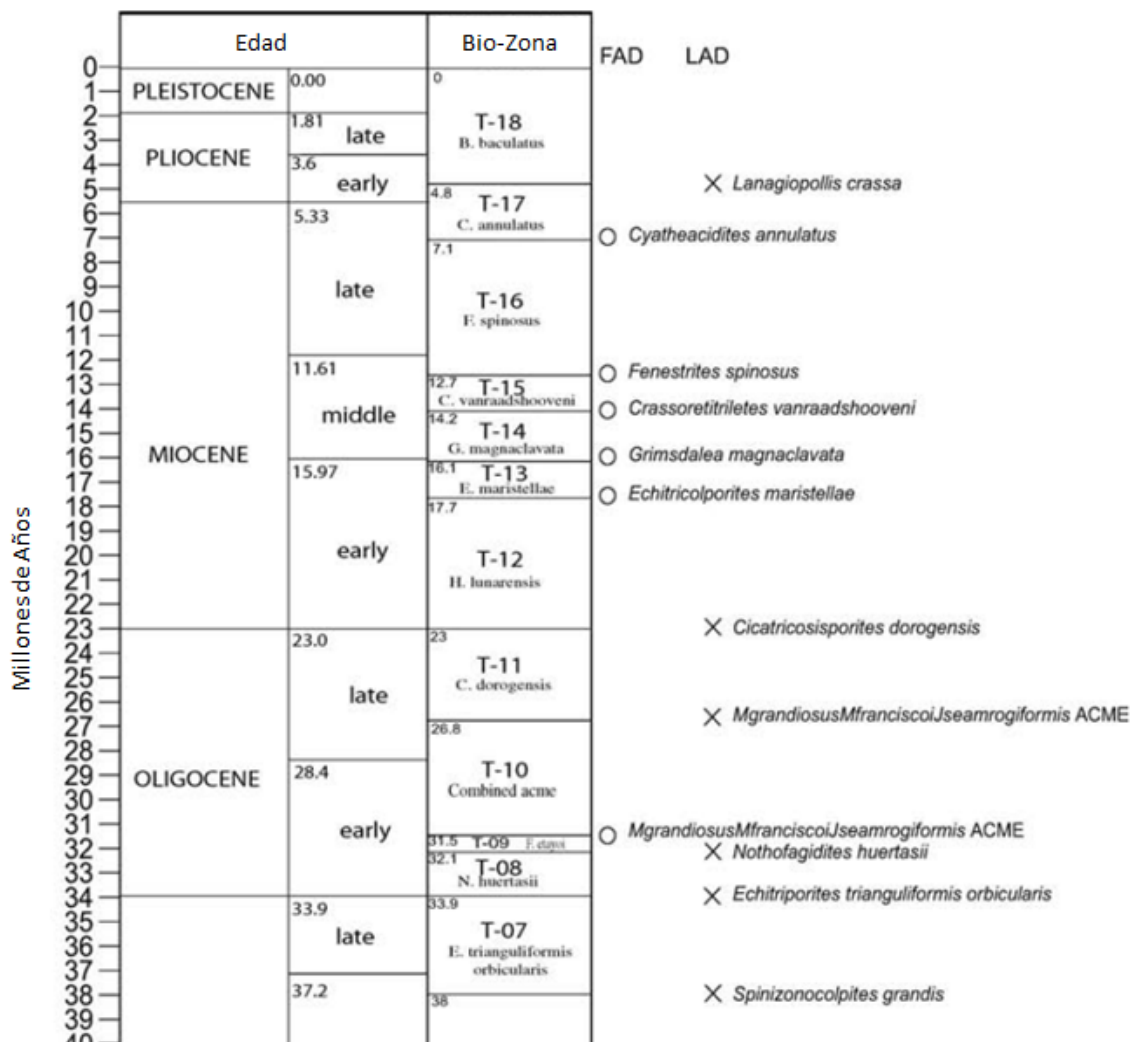
<p>Intervalo: 5900' - 5950'</p> <p>Muestras analizadas (profundidad base): 5950'</p> <p>Biozona: T11 a T10 de Jaramillo <i>et al</i> 2010</p> <p>Cronoestratigrafía: Oligoceno</p> <p>Recobro bueno de palinomorfos y materia orgánica, principalmente polen y esporas, junto con materia orgánica de tipo herbáceo. Se registran frecuencias altas de <i>Laevigatosporites tibuensis</i>, <i>Psilatriletes</i> 25-50μm, <i>Verrucatosporites usmensis</i> y polen de palmas tipo "moriche", representadas por especímenes de <i>Mauritiidites franciscoi minutus</i>.</p> <p>Adicionalmente se recuperaron frecuencias moderadas de <i>Jandufouria seamrogiformis</i>, <i>Cicatricosisporites dorogensis</i> y algunos ejemplares de <i>Cyclusphaera scabrata</i>, <i>Horniella lunarensis</i>, <i>Perisyncolporites pokorny</i>, <i>Retitrescolpites? irregularis</i>, <i>Rhoipites guianensis</i>.</p> <p>Miembros C6 - C7 de la Formación Carbonera.</p>

Según el estudio realizado por Paleoflora (2010), el recuento de palinomorfos se asocia al intervalo de las unidades informales C6 y C7 de la Formación Carbonera, correspondiente a la biozonas T-11 a T-10 (Jaramillo *et al.*, 2010).

La palinología de alta resolución dada por estudios regionales (Jaramillo *et al.*, 2009, 2010, 2011), han proporcionado un marco cronoestratigráfico para la Cuenca de los Llanos Orientales, y por ende para este trabajo (Figura 4-2). De acuerdo con Jaramillo

(2009, 2010 & 2011), la sección de las biozonas T10 y T-11, son de edad Oligoceno (31.5 a 23 Ma).

Figura 4-2. Biozonación Cuenca de los Llanos Orientales

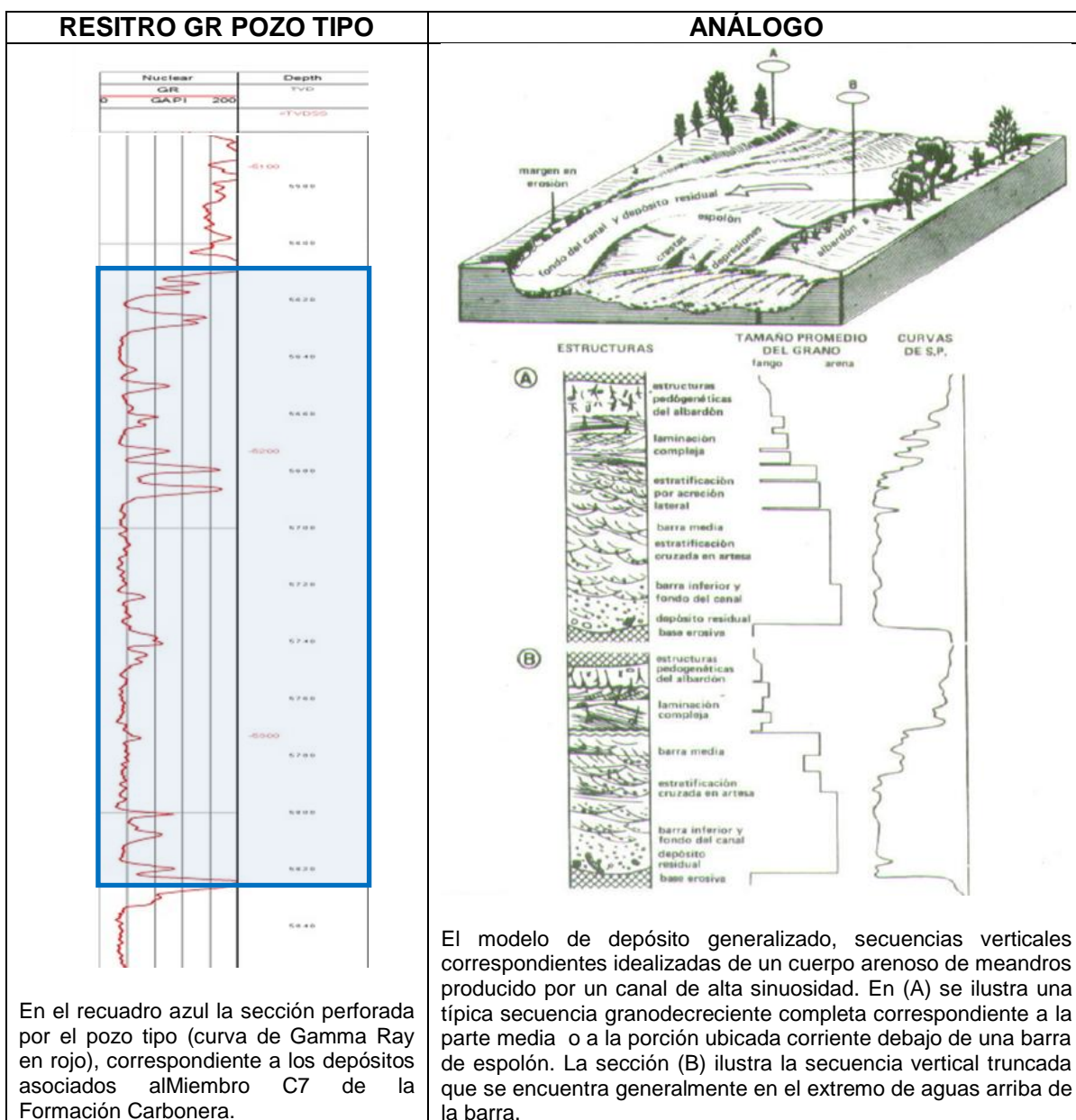


Con base en el marco bioestratigráfico, la asociación palinológica permitió ubicar los depósitos en ambientes continentales; inferida por la materia orgánica de tipo herbácea, palinomorfos típicos continentales como *Psilatritetes* y el polen tipo moriche que nos sitúa en un ambiente asociado con áreas en las riberas de los ríos, llamadas morichales. La Palma Moriche prolifera en terrenos inundables en la Amazonia, la Orinoquia y el piedemonte oriental andino aledaño a menos de 900 msnm formando grandes poblaciones, los Morichales, que constituyen un tipo particular de humedal.

Igualmente, los ejemplares de *Cicatricosisporites dorogensis* son considerados como el palinomorfo más característico del Oligoceno en áreas Tropicales (Dueñas, 2007).

Con la información anterior, y utilizando como base de comparación para el análisis de electrofacies los análogos propuestos por Galloway & Hobday (1983) para ambientes fluviales de ríos meandrosos (Figura 4-3), se identificaron principalmente patrones asociados a zonas de canal y de llanuras de inundación.

Tabla 4-3: Identificación de Electrofacies



La firma de cada segmento de registro de Gamma Ray (GR) se asoció con los patrones de registros descritos por Serra (1984) y Galloway & Hobday (1983), definiendo 4 electrofacies:

Figura 4-3: Electrofacie 1 (EF-1)



Electrofacie 1 (EF-1)

Curva de GR granodecreciente, de valores bajos (>30 unidades API), y aserrada. Espesor de pocos pies (<10 pies). Se asocia con depósitos de desbordamiento de ambiente fluvial (“crevasse play”).

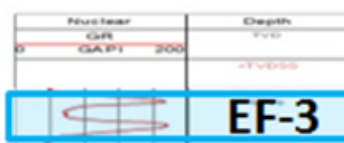
Figura 4-4: Electrofacie 2 (EF-2)



Electrofacie 2 (EF-2)

Curva de GR cilíndrica aserrada a granodecreciente, de valores bajos (≤ 35 unidades API) y espesores en el rango de 5 a 15 pies. Se asocia con depósitos de acreción lateral de ambiente fluvial (barras).

Figura 4-5: Electrofacie 3 (EF-3)



Electrofacie 3 (EF-3)

Curva de GR de valores altos, y aserrada (>100 unidades API). Se asocia con depósitos de finos enllanuras de inundación-humedales-pantanos asociada ambientes fluviales.

Figura 4-6: Electrofacie 4 (EF-4).



Electrofacie 4 (EF-4)

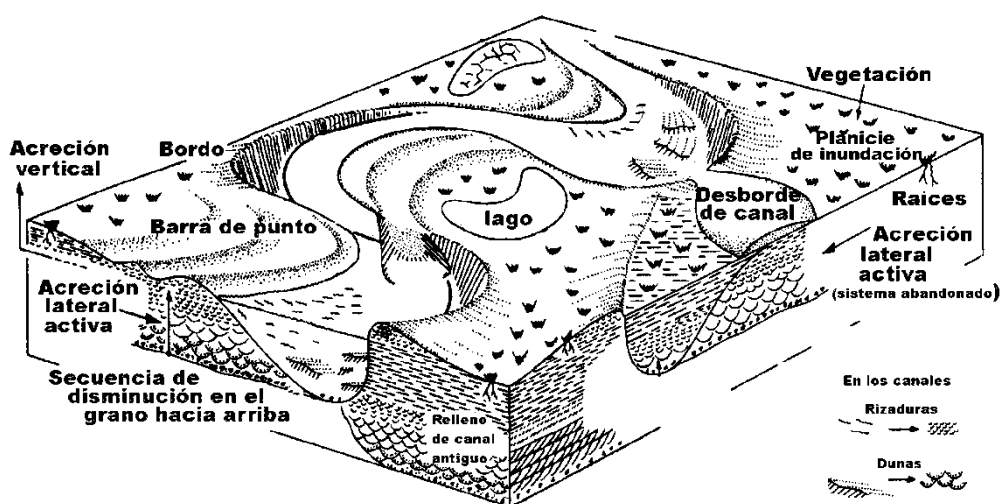
Curva de GR cilíndrica moderadamente aserrada, de valores bajos (≤ 30 unidades API). Contactos netos tope y base. Espesores mayores a 20 pies. Se asocia con depósitos de cuerpos de arena estacados de canal de ríos meandriformes (canales amalgamados).

Tabla 4-4: Asociación de Facies y Ambientes de Depósito

Electrofacie	Litofacies	Litología	Estructuras Sedimentarias	Ambiente de Depósito
EF-1	LTF-0	Arcillolitas de color gris clara a media, menor gris verdosa clara; moderadamente firme a firme; predomina subblocosa; moderadamente limosa; ligeramente soluble; no calcárea.		Paleosuelo
	LTF-1	Areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, subredondeado a redondeado, buena selección; intercaladas con niveles de arcillolita limosa gris medio.	Las estratificaciones cruzadas presentan ángulos que varían entre 15° - 30° con direcciones de paleocorrientes hacia el Sur (Registro FMI)	Depósitos de desborde asociado a sistema fluvial
EF-2	LTF-2	Areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, menor grueso, angular a subangular, buena selección; intercaladas con niveles de arcillolita limosa gris medio. Intercalado con delgados niveles de limos carbonosos.	Laminaciones lenticulares. La dirección preferencial de los buzamientos es SE. (Registro FMI)	Depósitos de acreción lateral - canales fluviales
EF-3	LTF-3	Intercalaciones de arenas de grano medio a grueso, con limolitas marrón medio con laminaciones de materia orgánica, y niveles de carbón negro, blocoso y quebradizo.		Llanura de Inundación - charcas
EF-4	LTF-4	Arenas de grano fino a medio, subredondeadas a subangulares, localmente angulares, sorteamiento regular.	Estratificación Cruzada.	Canales amalgamados – sistema fluvial
	LTF-5	Arcillolita crema, marrón muy clara, dura, blocosa, sílicea, no calcárea. Trazas de arena cuarzosa de grano fino.		Superficie de inundación
	LTF-6	Arenas de grano fino a medio, subredondeadas a subangulares, localmente angulares, sorteamiento regular. Trazas de Pirita.	Estratificación Cruzada.	Canales amalgamados – sistema fluvial
	LTF-7	Intercalaciones de arenas de grano fino a muy fino, menor medio, con limolita marrón oscura, con laminaciones de materia orgánica, carbobosa, pirítica y arcillolita crema.		Superficie de inundación
	LTF-8	Arcillolita crema, marrón muy clara, moderadamente dura, predomina blocosa, sílicea; no calcárea.	Parcialmente Fracturado.	Paleosuelo

La agrupación de las litofacies, el marco bioestratigráfico que nos sitúa en ambientes continentales y el análisis de electrofacies, permitió establecer un modelo facial para los depósitos de la Miembro C7 de la Formación Carbonera e interpretar los ambientes de acumulación, con lo que se estableció en general un sistema deposicional asociado a ambiente fluvial de ríos meandriformes y sus subambientes (llanuras de inundación, depósitos de desbordamientos, humedales). De acuerdo con Fajardo *et al.*, (2000) para el área central del Casanare, el Miembro C7 de la Formación Carbonera presenta en su base cinturones de canales amalgamados de ambientes fluviales de buena continuidad lateral, y hacia el tope depósitos de canales fluviales (arenas) intercalados con arcillolitas de llanuras de inundación asociadas (Figura 4-7; Reading, 2005).

Figura 4-7: Modelo de depósito de un río meándrico



De la integración de la información analizada, se pudo concluir que el intervalo objeto de este estudio es de edad Oligoceno corresponde de las biozonas T-11 a T-10 (Jaramillo *et al.*, 2010), y son depósitos de ambientes continentales (Paleoflora, 2010). Los patrones de los registros sumada a la litología descrita, permiten inferir que tenemos en el área de estudio un Sistema Fluvial Meandriforme e incluye una parte del sistema morfogénico Llanura Fluvial Deltáica consistente de una extensa planicie con escaso relieve ligeramente ondulado formado por aluviones constituidos por arenas de diferente gradación, limos y arcillas con estratificación cruzada y abundante lignito, turba y materia orgánica producto de la acción acumulativa del río y sus tributarios locales (Serra, 1984). Las areniscas y lodolitas del Miembro C7, fueron depositadas principalmente en un

ambiente migratorio de canales meandriformes que cortaban llanuras de inundación fluviales con zonas pantanosas y sectores con exposición sub-aérea que permitieron el desarrollo de paleosuelos (Figura 4-8).

Las variaciones areales de los elementos y factores dentro de un ambiente, denominadas esquema ambiental (Sloss, 1963), provocan una evolución progresiva de las propiedades de los sedimentos creando una secuencia lateral de facies. Por lo tanto, un ambiente estará caracterizado por una secuencia típica de facies, tanto en el espacio como en el tiempo. Según la Ley de Walther, estas secuencias son similares (la sucesión vertical de facies refleja yuxtaposición lateral de ambientes; la secuencia vertical de rocas estratificadas es predecible teniendo en consideración la distribución lateral de los procesos físicos y orgánicos en un ambiente de sedimentación determinado y al tiempo de su depósito).

En un estudio del subsuelo que incluya los perfiles de pozo, el concepto de modelo de electrofacies será equivalente al modelo de facies (Serra, 1984). Por lo tanto, el conocimiento de la secuencia vertical, obtenible a través de los perfiles de pozo, ayuda a predecir el tipo de secuencia lateral y el ambiente sedimentario, aunque en algunos casos no es suficiente.

Específicamente para este trabajo, los datos utilizados no cuentan con buena distribución espacial, de modo que con la correlación de pozos no se resolvió la secuencia lateral de facies, por lo que la información de facies sísmica contribuirá con el componente de distribución lateral que define el ambiente sedimentario de los depósitos del área.

Tres de los pozos disponibles han sido perforados desde la misma plataforma y sin mayor separación en el subsuelo (<700 mts); y el cuarto pozo se encuentra inmediatamente al norte a aproximadamente dos (2) kilómetros. Con la ayuda de software de interpretación se generó una correlación estratigráfica, que incluye los cuatro pozos y “*flatenizando*” al Datum: Tope Miembro C7 de la Formación Carbonera (Figura 4-9).

La interpretación secuencial a partir de registros de pozos (Figura 4-8), definió lo siguiente:

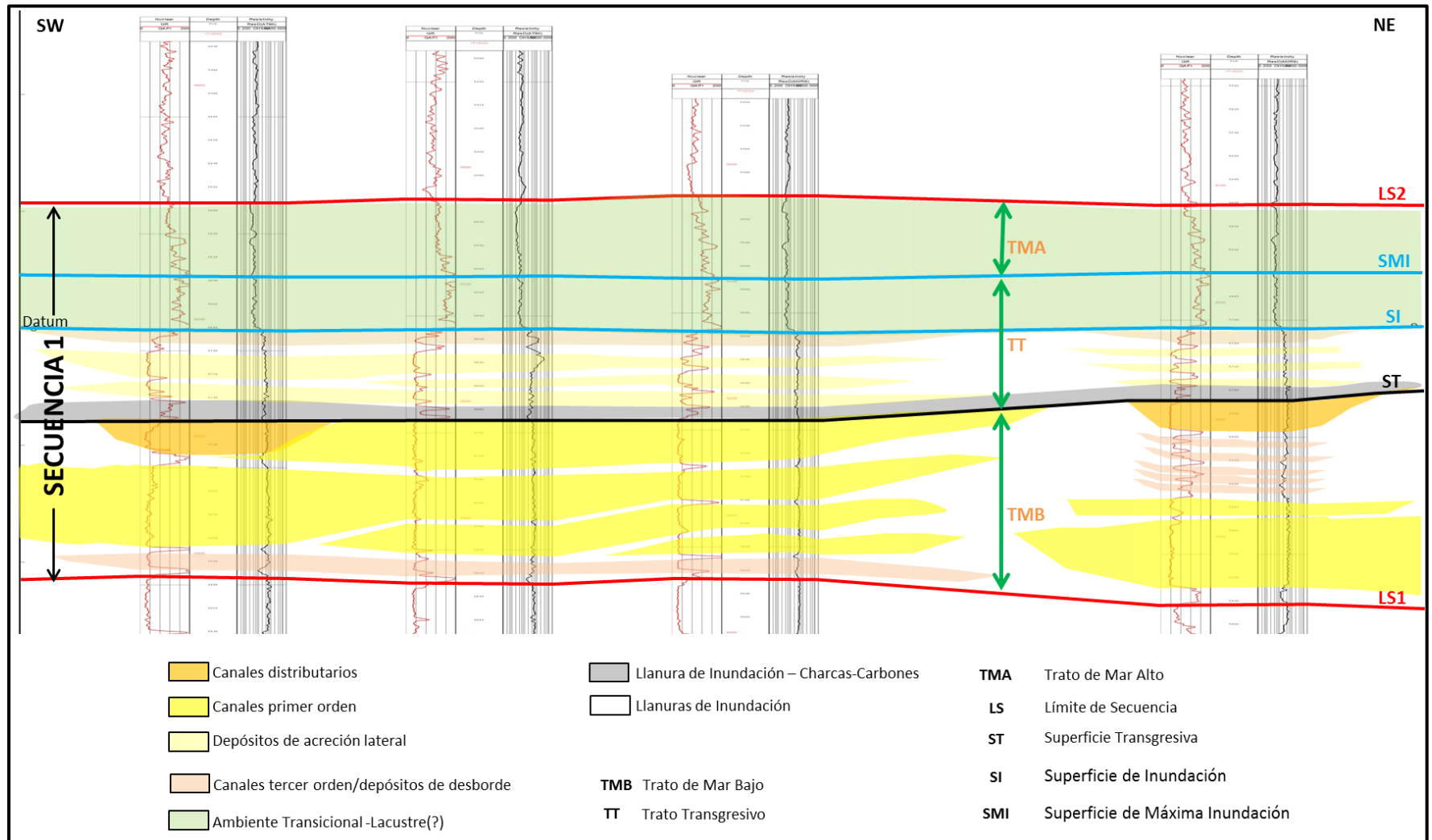
Figura 4-8: Interpretación secuencial Secuencia 1 (S1).

Teniendo como base el marco cronoestratigráfico dado por la palinología, la “Secuencia 1” (S1) comprende un intervalo de tiempo menor a 5 millones de años, por lo que sería una secuencia de tercer orden (Vail, 1977).

Los límites de la S1 están dados por una superficie LS1 en la base, que corresponde a una discordancia, y hacia el tope se encuentra la LS2 representada por una superficie concordante (Strecker, 1999). La superficie LS1 marca el inicio del Trato de Mar Bajo (TMB) conformado por parasecuencias progradantes, con evidencia de canales migrantes en llanuras de inundación amplias de un sistema fluvial de río meandroso, que culmina en una superficie transgresiva (ST) que permite inferir un aumento en el nivel base. El inicio de la transgresión (Trato Transgresivo-TT) dejó depósitos ricos en materia orgánica y carbón asociados a llanuras de inundación (charcas), siguiendo con depósitos de desborde y finalmente con un acrecentamiento en el aporte de finos anunciando el comienzo de un aumento del nivel base que culminó en un Trato de Mar Alto (TMA) interpretado como un ambiente transicional-Lacustrino.

En la Figura 4-9, la correlación Estratigráfica se refleja la interpretación en sentido de secuencias realizada a los pozos A1, A2, A3 y A4 en el área de estudio en dirección SW-NE, asumiendo que no hay una fuerte presencia de tectonismo en la cuenca en el momento de la deposición, por lo que se lleva lo más horizontal posible las líneas de correlación.

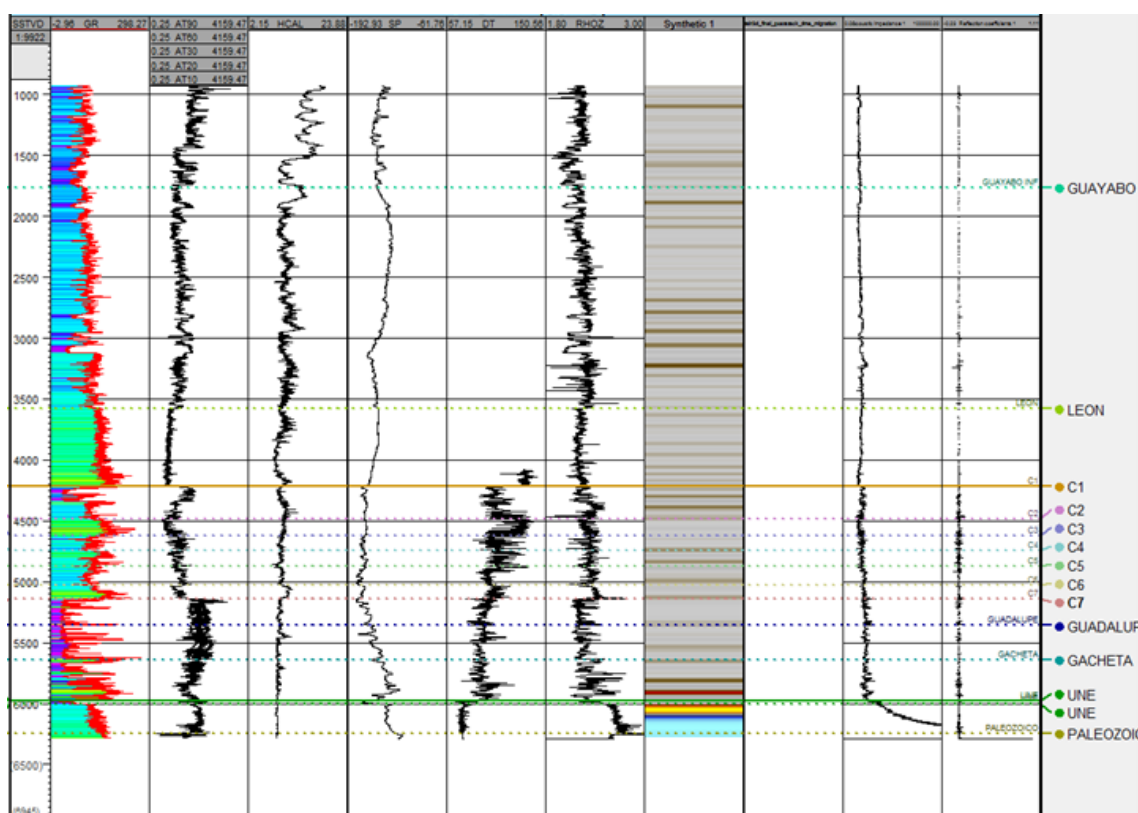
Figura 4-9: Correlación Estructural Pozos e Interpretación Secuencial (Datum: Tope Miembro C7 Formación Carbonera).



4.1.2 Sísmica

Una vez finalizado el análisis secuencial en los pozos, se prosiguió con la carga de la información sísmica en el software de interpretación, una vez hecho el control de calidad de los datos. La calibración de las secciones sísmicas se llevó a cabo mediante los registros eléctricos y marcadores de pozo, para lo cual se generó el cálculo de un sismograma sintético, utilizando los registros sónico (DT), densidad (RHOB) y las funciones de velocidad derivadas de la sísmica de pozo (VSP) adquiridas en el pozo tipo. Una vez hecha la calibración tiempo-profundidad, fueron identificados los marcadores de los topes de las diferentes formaciones (Figura 4-10).

Figura 4-10. Sismograma Sintético Pozo Tipo



El horizonte interpretado como C7 no está muy bien definido, lo cual se puede atribuir a al bajo contenido de amplitudes y frecuencias de la sísmica y/o también a la alta porosidad de esta unidad que reduce la densidad y como consecuencia se produce un

bajo coeficiente de reflexión, perdiendo continuidad y cambiando de fase en algunos sectores del volumen, lo cual no hizo fácil su interpretación y trazado en el volumen sísmico (Figuras 4-11).

Figura 4-11. Ejemplo Sección Sísmica Interpretada (Xline) y Sismograma Sintético Pozo Tipo

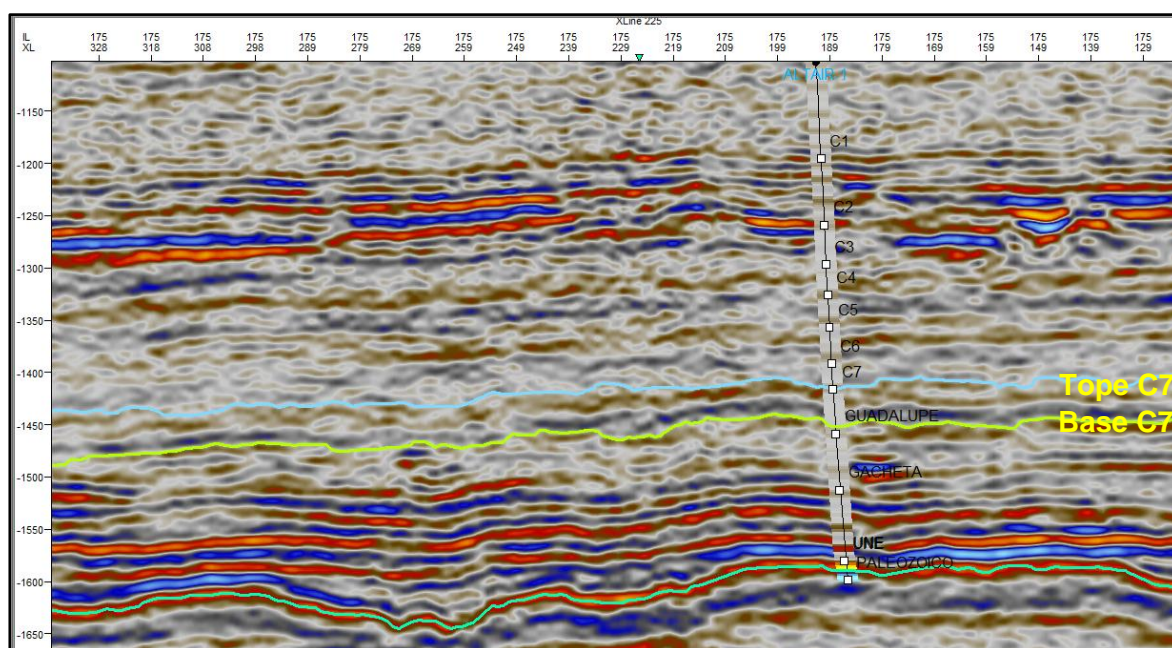
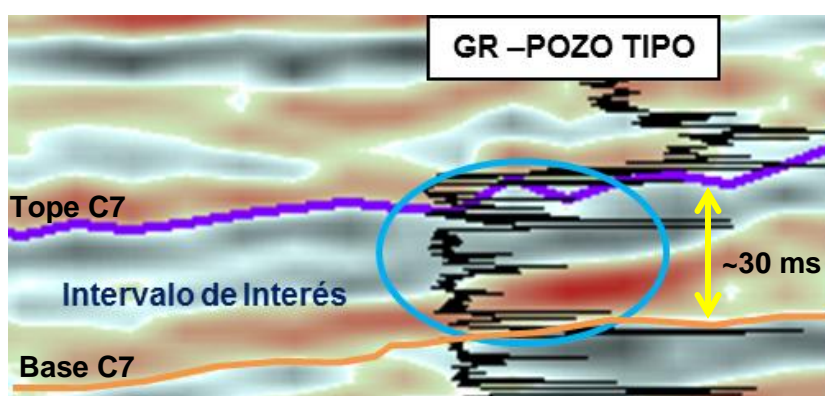


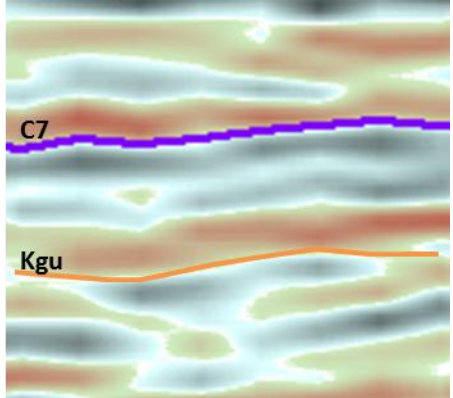
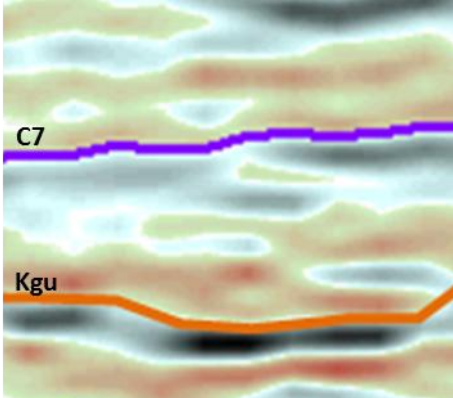
Figura 4-12. Resolución Vertical Sísmica Vs Registro Pozo Tipo



Adicionalmente la sección interpretada en los pozos como correspondiente a la Unidad informal C7 de la Formación Carbonera, corresponde a dos reflectores (promedio aproximado 30 ms) de amplitud variable, como se ilustra en la Figura 4-12.

Una vez interpretado el volumen sísmico, se realizó un barrido por todo el cubo identificando patrones de los reflectores que permitieran hablar de su configuración así como determinar facies sísmicas (Tabla 4-5).

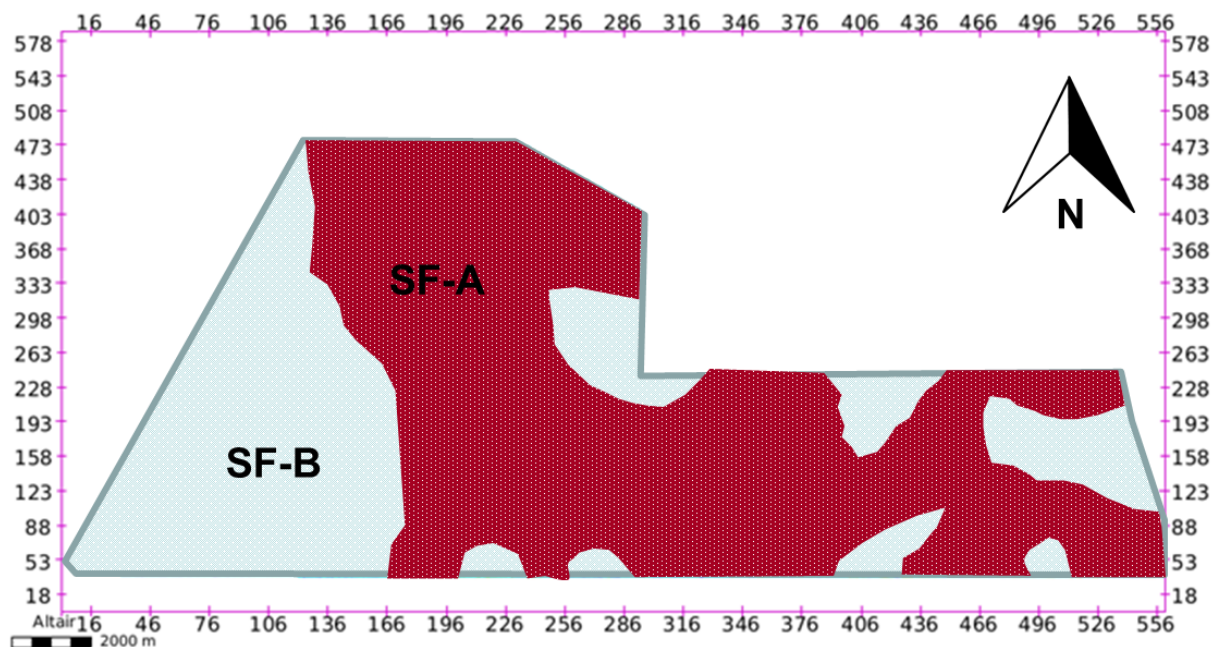
Tabla 4-5: Caracterización Facies Sísmicas según metodología de Sangree & Widmier (1977).

Sismofacie	Configuración interna	Forma Externa	Nomenclatura
	Los reflectores son paralelos, continuos, ondulados y con amplitudes fuertes	Capa $\frac{C+C}{P}$	SF-A
	Subparalelos, contorsionados, reflejan capas interdigitadas. Los reflectores no tienen coherencia, caóticos y contorsionados.	Lente $\frac{C+C}{Cahotic}$	SF-B

Con las sismofacies y mientras se hizo el barrido, se elaboró un Mapa de Sismofacies (Figura 4-13) generalizando la distribución de las sismofacies definidas en el 3D.

En la sísmica la sismofacies SF-A, contiene reflexiones de amplitudes moderadamente altas que preliminarmente puede estar coincidiendo con cuerpos arenosos y que pueden corresponder a canales, probablemente cuerpos más continuos lateralmente y amalgamados, mientras las SF-B se asocian con las llanuras de inundación y/o charcas presentes en el sistema interdigitados con delgados cuerpos arenosos.

Figura 4-13. Mapa de Sismofacias a la base de la Secuencia 1 (1554 ms)



Las amplitudes y la resolución vertical de la sísmica permitieron realizar asociación de electrofacies con facies sísmicas generalizadas. Sin embargo, debido a que no existe suficiente diferenciación en valores de amplitudes sísmicas, sólo se pudieron identificar parcialmente los límites de la secuencia y no fue posible diferenciar las demás superficies y tratos de sistema de la Secuencia 1.

Con el objeto de mejorar la resolución vertical de la sísmica, se realiza una inversión sísmica en la ventana de tiempo definida: entre los horizontes interpretados C5 y Gachetá (Figura 4-14).

Siguiendo la metodología planteada, se cargaron y acondicionaron los datos disponibles para dar inicio al procesamiento de la data. Paso seguido se realizó la factibilidad que arrojó como resultado que a la frecuencia de la sísmica (10-70 Hz) no se diferencia ninguna propiedad elástica de roca con la relación V_p/V_s . Los Xplots elaborados mostraron a nivel de pozo filtrado por la frecuencia de la sísmica se podía diferenciar tres conjuntos de datos relacionados con las electrofacies definidas (Figura 4-15).

Figura 4-14. Venta de Tiempo Inversión Sísmica

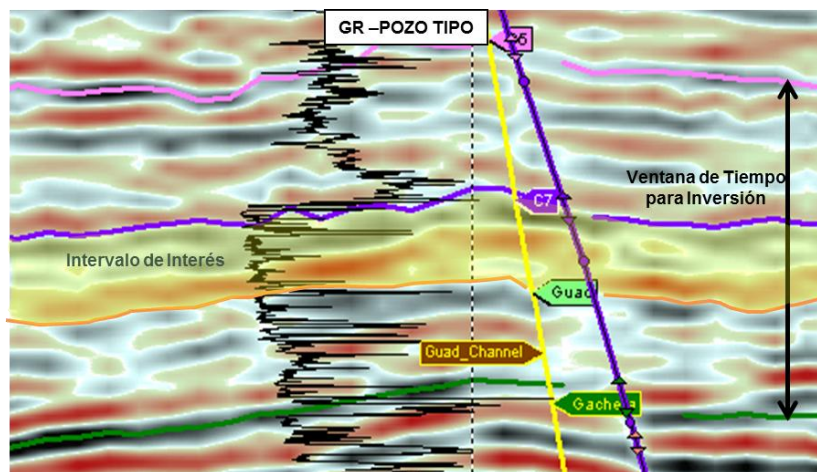
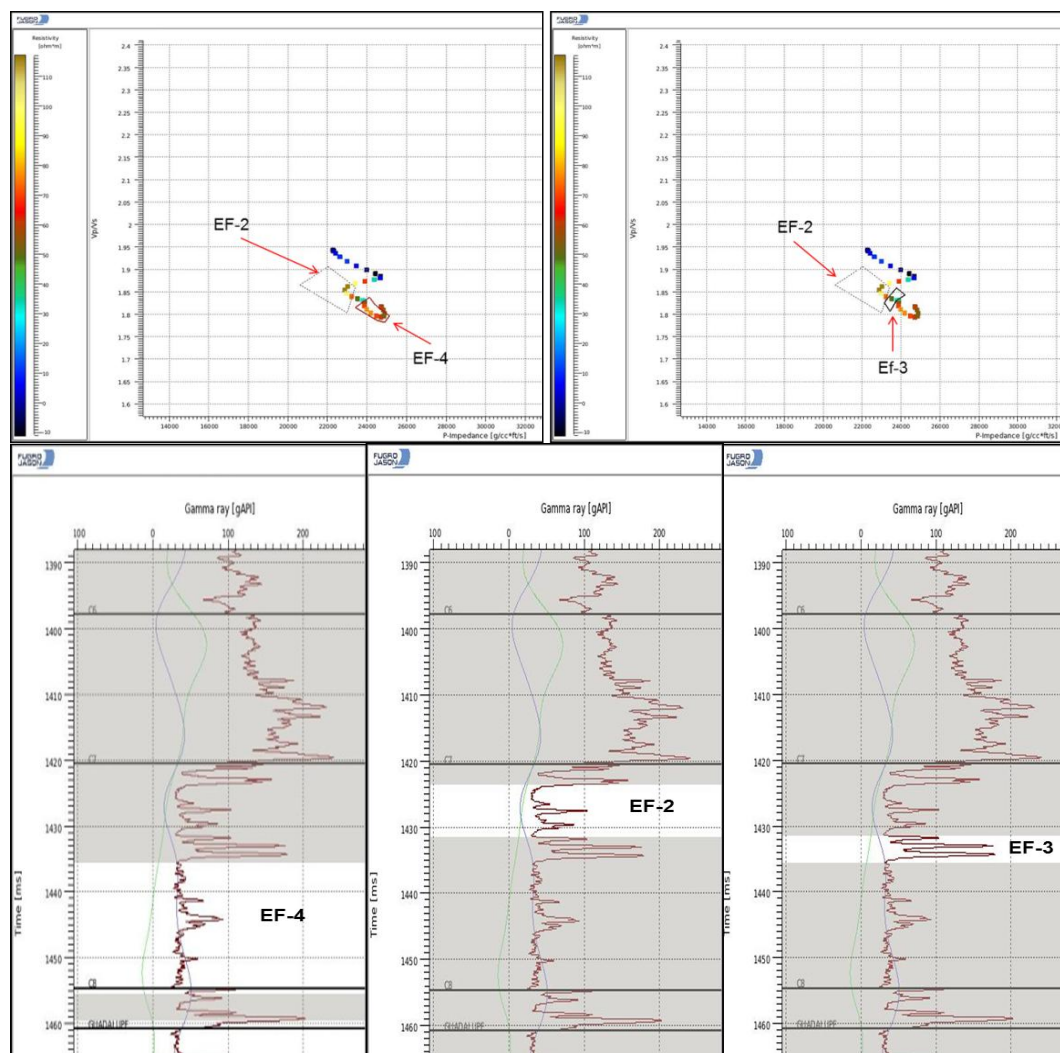


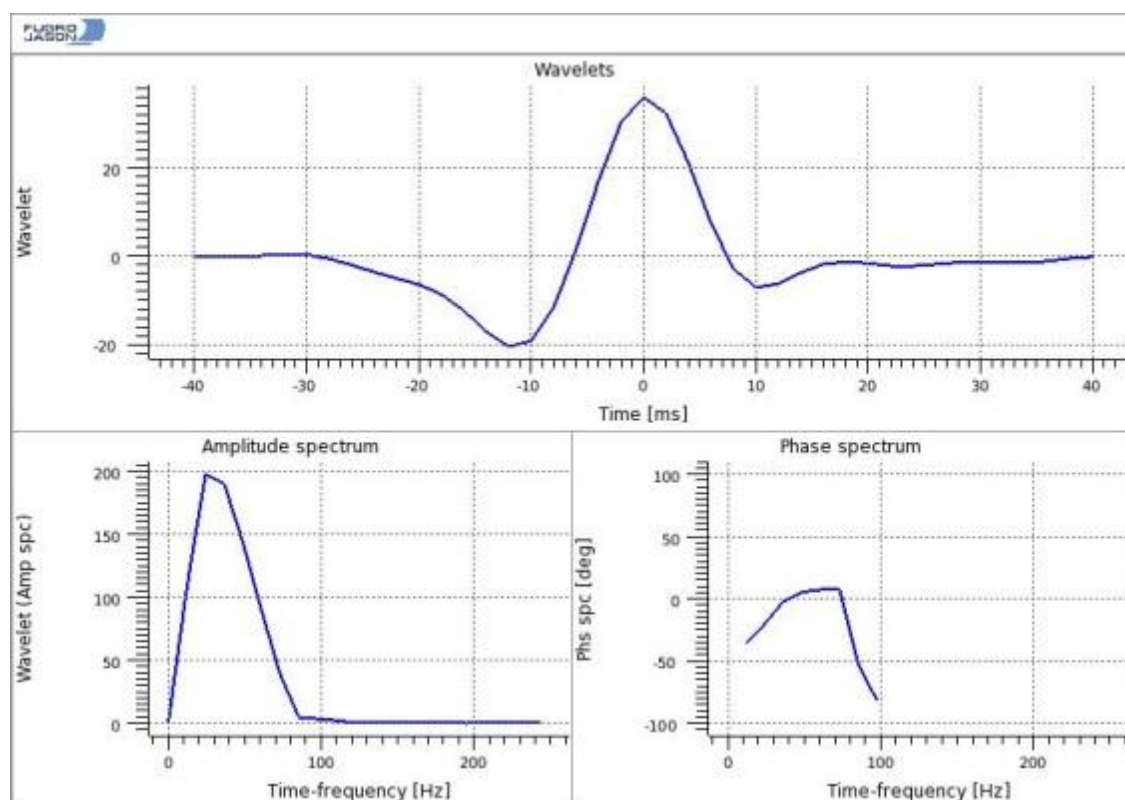
Figura 4-15. Ejemplo Factibilidad Realizada para la Inversión Sísmica



La factibilidad permitió concluir que con los datos de entrada disponibles se podría realizar una Inversión Simultánea que generaría como resultado un nuevo volumen de Impedancia Acústica (Z_p) con mejor resolución vertical que el dato sísmico de entrada.

Existiendo la factibilidad para la Inversión, se realizó el cálculo de la ondícula, escogiendo aquella que mejor representa el pozo (Figura 4-16).

Figura 4-16. Ondícula Calculada para la Inversión Sísmica



Se construyó el Modelo Geológico y el de Bajas Frecuencias (Modelo Sólido). Una vez se parametriza en el software la inversión se trae la impedancia calculada, las velocidades, el sismograma sintético, la ondícula y el modelo sólido, se corrió la Inversión Simultánea, generándose los cubos: Impedancia_P_bandalimitada.sgy; Impedancia_P_fullband.sgy; e Impedancia_P_fullband_depth.sgy. A continuación una imagen que nos muestra el amarre del pozo con el cubo de Impedancia Acústica (IA), de la cual se puede concluir que el pozo está representado en el cubo de IA, y la ondícula seleccionada cumple con

los parámetros establecidos, y que existe buena concordancia en los valores de la impedancia del pozo y el del volumen (Figura 4-17).

Figura 4-17. Amarre Pozo-Sísmica Inversión Simultánea

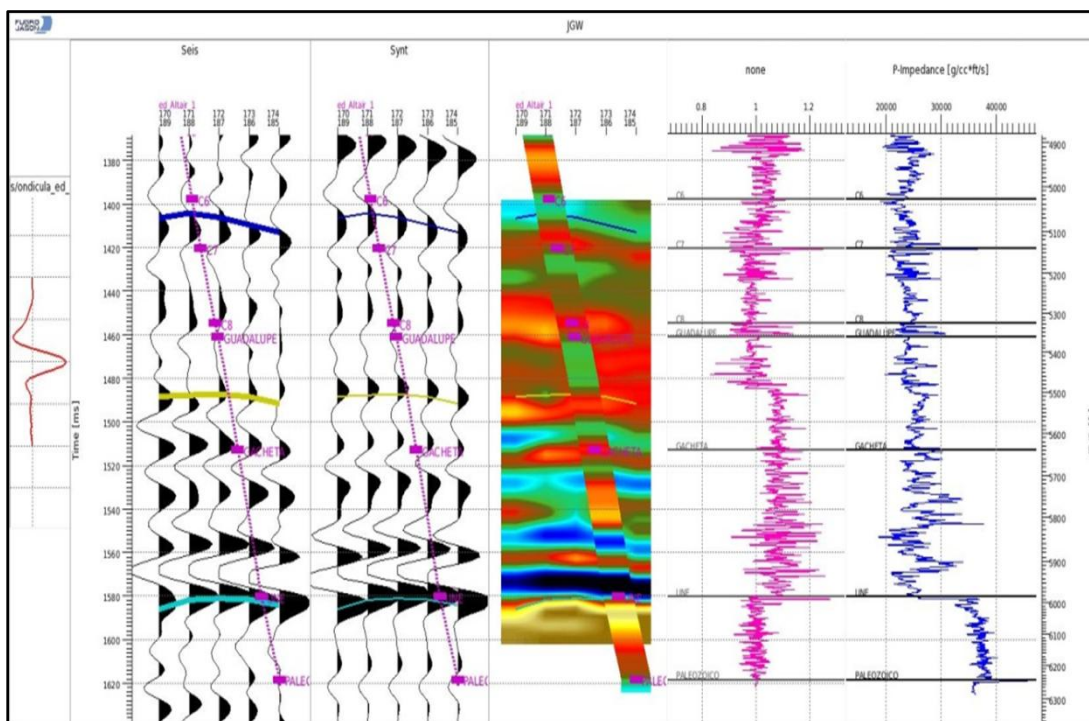
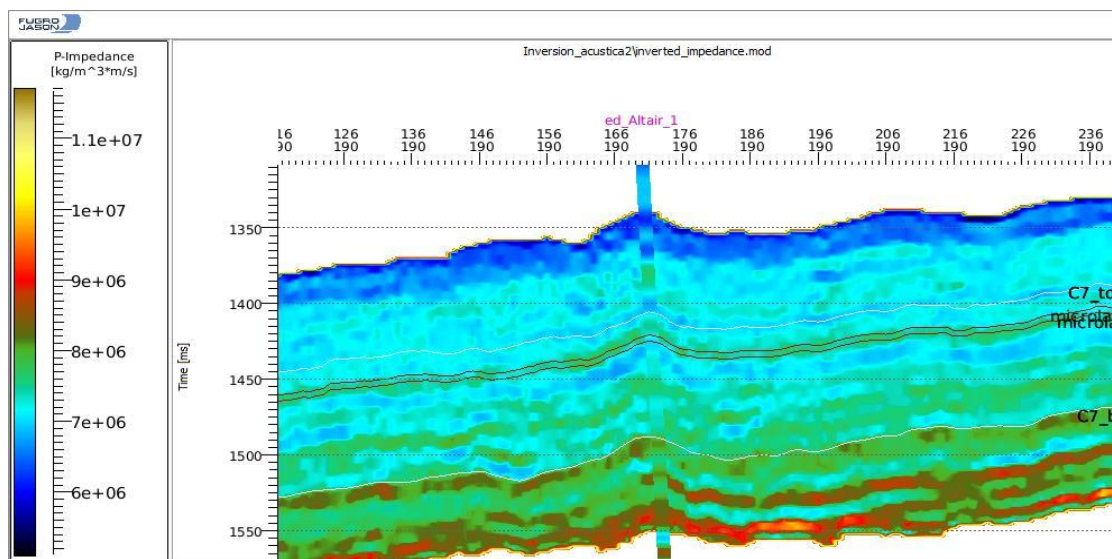


Figura 4-18. Ejemplo Sección E-W volumen de Impedancia Acústica y Amarre Pozo Tipo



Para la interpretación de este volumen (Impedancia_P_fullband_depth.sgy), se partió del punto conocido: el Pozo Tipo (Figura 4-18).

Figura 4-19. Interpretación Impedancia Acústica - Amarre Electrofacies Pozo Tipo

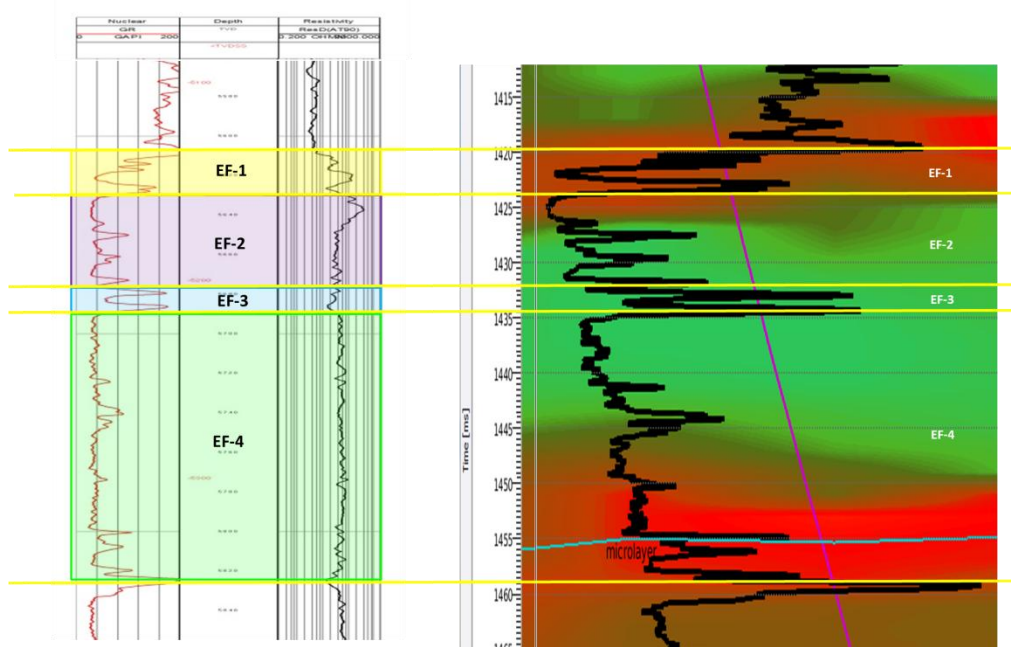
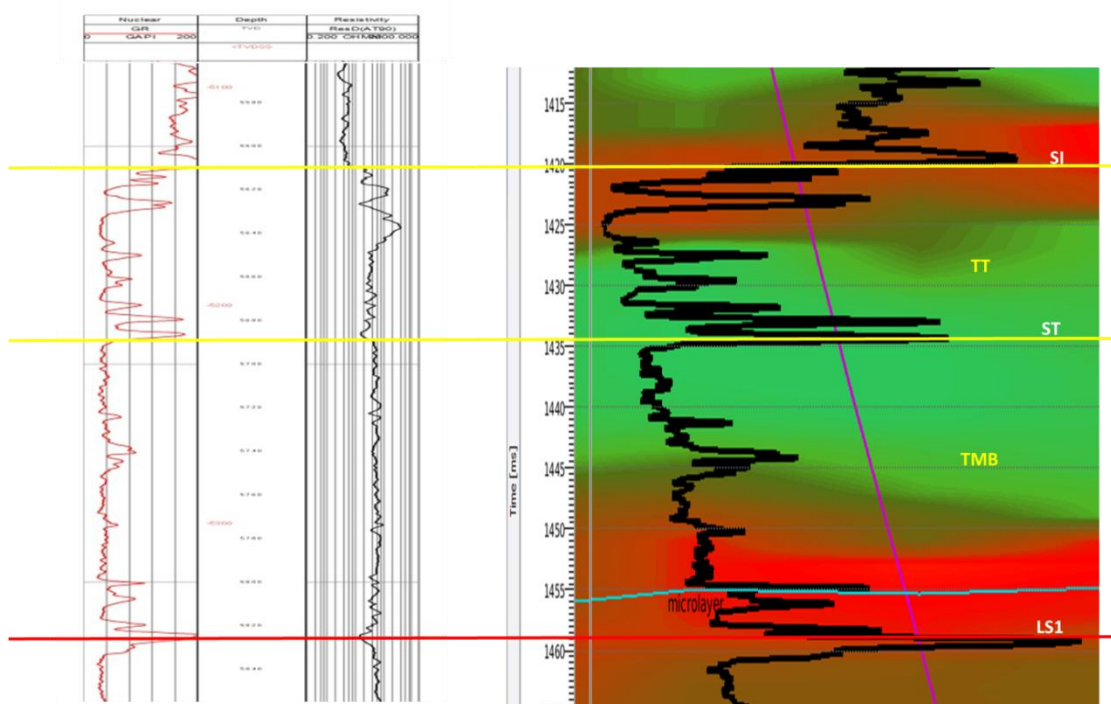


Figura 4-20. Interpretación Estratigrafía de Secuencias - Amarre Pozo Tipo -IA



Al ver el detalle del pozo proyectado sobre una línea sísmica arbitraria que pasa por su trayectoria, se puede concluir que si bien mejoró la resolución vertical, ésta aún no alcanza para diferenciar en las electrofacies y asociarlas a facies sísmicas (Figura 4-19).

Igualmente, al traer la interpretación secuencial, corroboramos que las superficies en la vertical no se pueden identificar sobre el pozo, la resolución vertical del volumen de IA no resuelve el problema, y en la sección vertical no diferencia electrofacies-sismofacies (Figura 4-20).

Con la contribución de las lito, bio y electro facies, se interpretó y definió un modelo de estratigrafía secuencial que se restringe al área donde se perforaron los pozos. Para llevar esta interpretación al detalle de su continuidad lateral o distribución de ambientes y sus depósitos asociados al resto del área de estudio, es necesario involucrar un dato que cuenta no solo con amplia distribución, sino que además refleja las propiedades del subsuelo, como lo es la sísmica. Para el caso de este trabajo, se utilizará el cubo de Impedancia Acústica generado a partir de la Inversión.

Para iniciar con el análisis, se generaron “*strata slices*” cada dos milisegundos (2 ms) entre los horizontes que delimitaron la ventana de tiempo de la Inversión. A partir de la interpretación de la variación lateral de los contrastes de impedancia, se trazaron las sugeridas geoformas que se asocian con el ambiente de depósito descrito por los pozos.

Para garantizar que existieran contrastes de impedancia, se revisaron los resultados de la factibilidad de la inversión y se realizaron diferentes filtros para el volumen de IA (Figura 4-21), resaltándose las anomalías de interés para la interpretación de geoformas restringiendo el rango de valores a mostrar en las secciones en tiempo a interpretar de acuerdo con las características sedimentarias y geomorfológicas correspondientes a canales fluviales (Figura 4-22) planteadas por Galloway & Hobday (1983).

Una vez que se lograron resaltar las geoformas sugeridas por los contrastes de impedancia, se inició la interpretación de los rasgos estratigráficos y deposicionales del ambiente definido por la estratigrafía secuencial (Figura 4-23). Se hace integración de la información del análisis secuencial con la correspondencia con los “*strata slices*” analizados (Tabla 4-6).

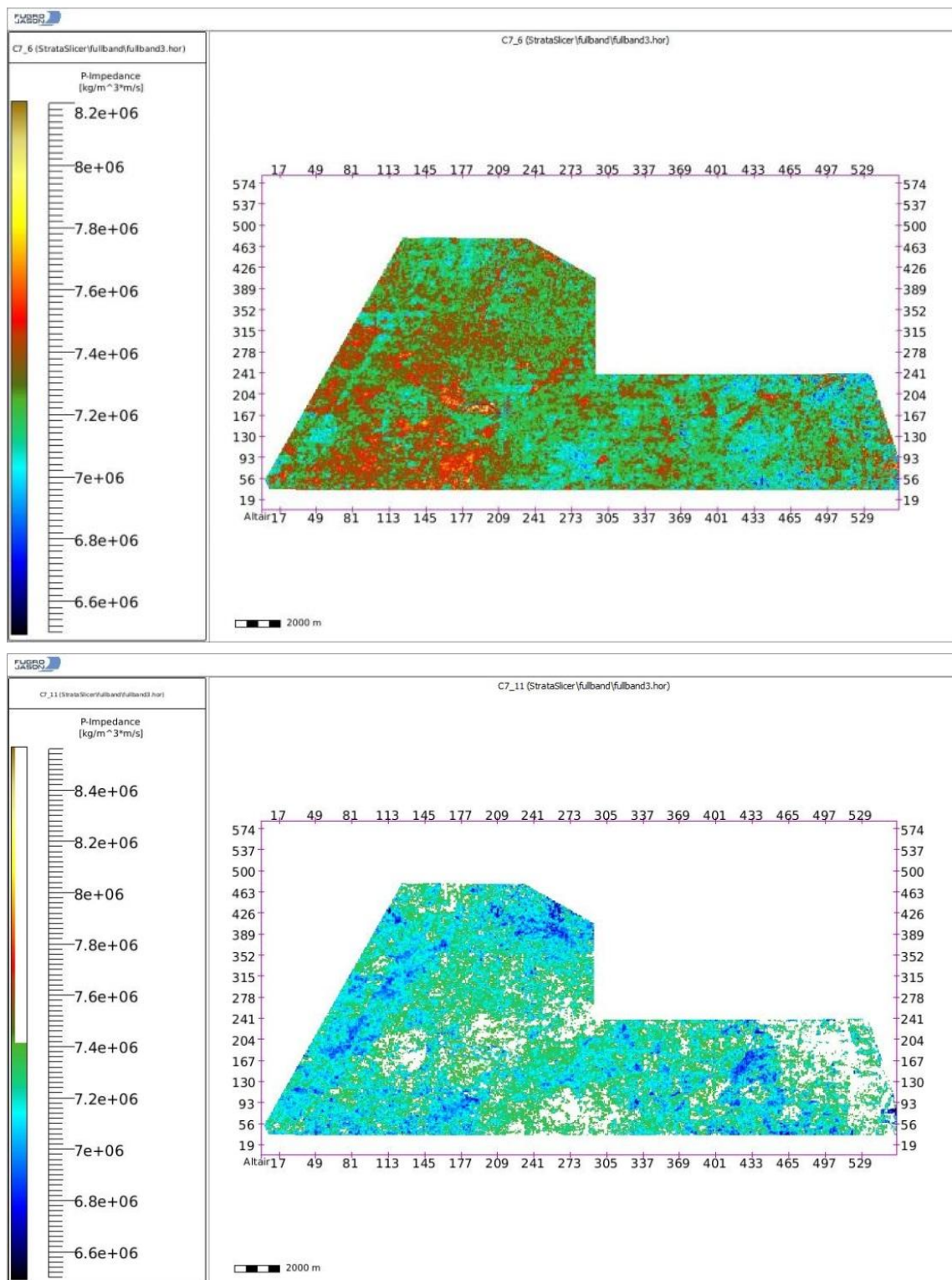
Figura 4-21. Ejemplos Filtros a Diferentes Rangos de Valores de IA

Figura 4-22. Características Sedimentarias y Geomorfológicas Correspondientes a Canales Fluviales

TIPO DE CANAL	COMPOSICION DEL RELLENO DE CANAL	GEOMETRIA DEL CANAL			ESTRUCTURA INTERNA		RELACIONES LATERALES
		sección transversal	aspecto en mapas	isotípico de arañas	fábrica sedimentaria	secuencia vertical	
CANAL DE CARGA DE LECHO	predominio de arena	relación ancho/profundidad alta relieve bajo o moderado sobre la superficie de erosión basal	recto a ligeramente sinuoso	isotípico de arañas	la acreción de estratos domina el relleno sedimentario	irregular, secuencia granodecreciente probermente desarrollada	los rellenos de canales multilaterales por lo general excaden volumétricamente a los depósitos de albardón
CANAL DE CARGA MIXTA	mezcla de arena, limo y fango	relación ancho/profundidad moderada relieve alto sobre la superficie de erosión basal	sinuoso	complejas fajas "en rosario"	tanto la acreción de bancos como de estratos se preservan en el relleno de sedimentos	variedad de perfiles granodecreciente bien desarrollada	los rellenos de canales multi-históricos se subordinan generalmente a los depósitos de albardón circundantes
CANAL DE CARGA EN SUSPENSION	predominio de limo y fango	relación ancho/profundidad baja a muy baja erosión del relieve alto con márgenes escarpadas, algunos segmentos con talwegs múltiples	altamente sinuoso a anastomosado	filiforme o vainas	la acreción de bancos (ya sea simétrica o asimétrica) domina el relleno de sedimentos	secuencia dominada por material fino, por ello las tendencias pueden no ser claras	los rellenos de canales multi-históricos se encierran en abundante fango y arcilla de los albardones

Figura 4-23. Ejemplo de "Strata-slices" Secuencia 1 y Pozo Tipo Interpretado

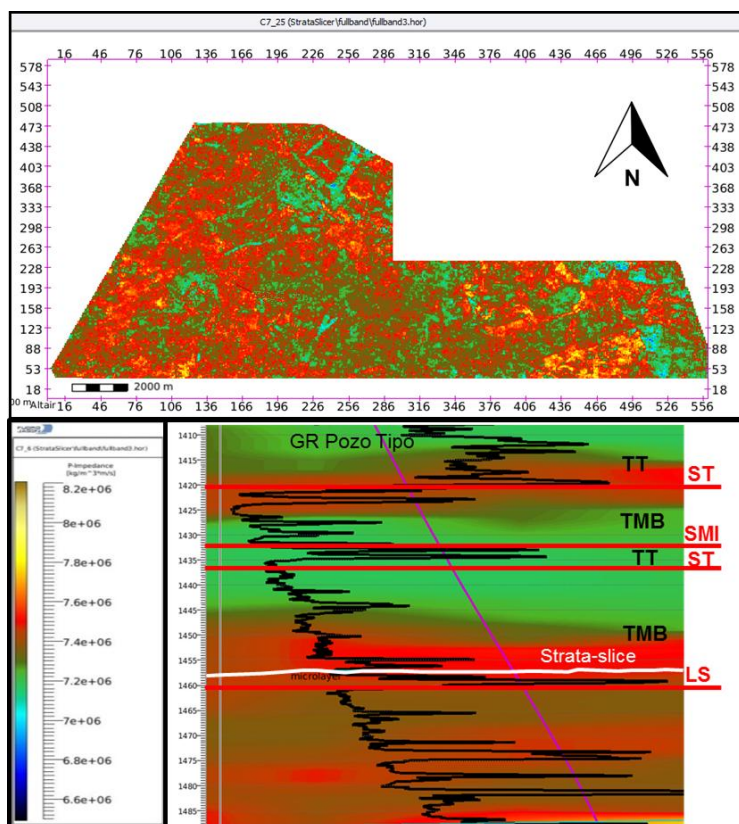
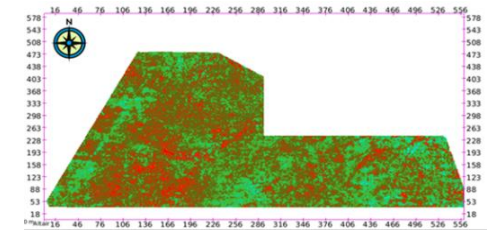
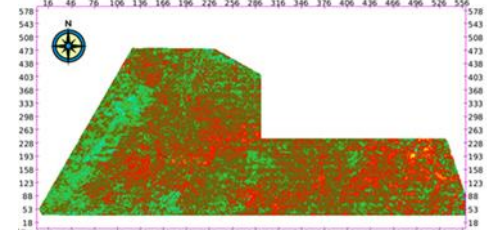
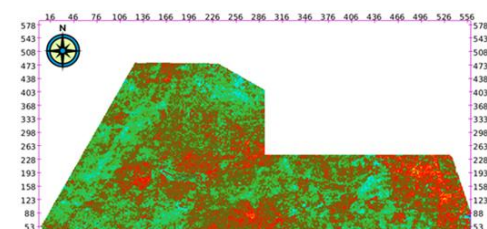
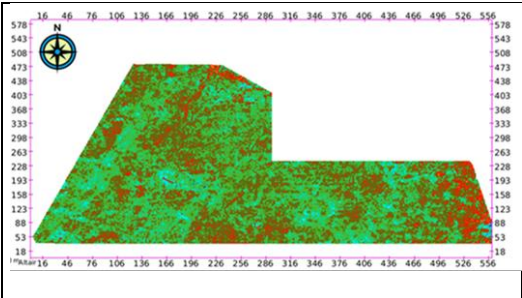
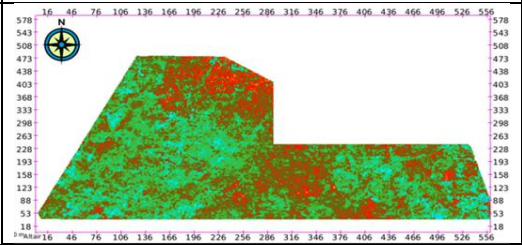
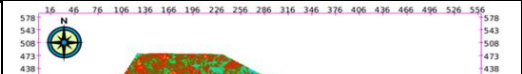
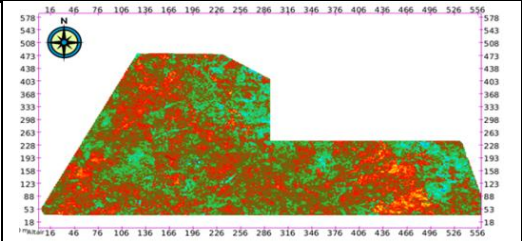
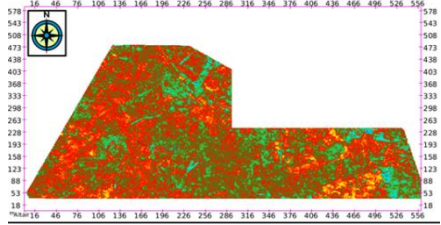
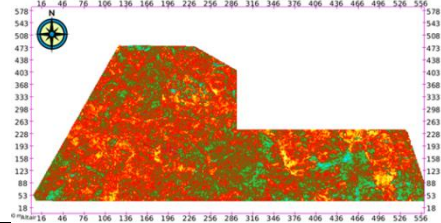
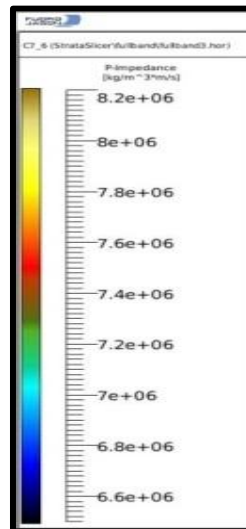


Tabla 4-6: Asociación de Facies y Ambientes de Depósito Secuencia 1 (Escala de colores valores IA al final del cuadro)

Superficie	Trato de Sistema	Electrofacie	Litofacies	Litología	Ejemplo "Strata Slice"	Ambiente de Depósito (pozo)
SI	TT	EF-1	LTF-0	Arcillolitas de color gris clara a media, menor gris verdosa clara; moderadamente firme a firme; predomina subblocosa; moderadamente limosa; ligeramente soluble; no calcárea.		Paleosuelo
			LTF-1	Areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, subredondeado a redondeado, buena selección; intercaladas con niveles de arcillolita limosa gris medio. Las estratificaciones cruzadas presentan ángulos que varían entre 15° - 30° con direcciones de paleocorrientes hacia el Sur.		Depósitos de desborde asociado a sistema fluvial
		EF-2	LTF-2	Areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, menor grueso, angular a subangular, buena selección; intercaladas con niveles de arcillolita limosa gris medio. Intercalado con delgados niveles de limos carbonosos. Laminaciones lenticulares. La dirección preferencial de los buzamientos es SE.		Depósitos de acreción lateral - canal fluvial

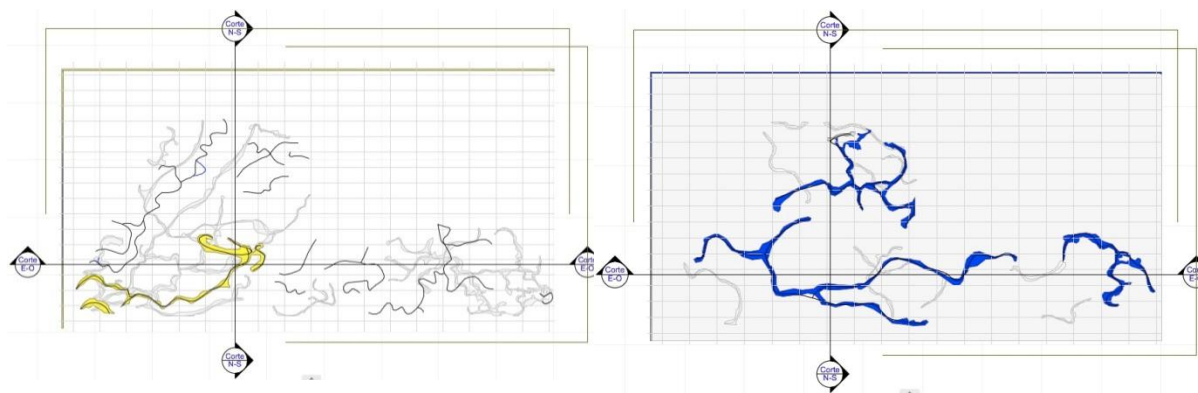
ST		EF-3	LTF-3	Intercalaciones de arenas de grano medio a grueso, con limolitas marrón medio con laminaciones de materia orgánica, y niveles de carbón negro, blocoso y quebradizo.		Llanura de Inundación - charcas
			LTF-4	Arenas de grano fino a medio, subredondeadas a subangulares, localmente angulares, sorteamiento regular. Estratificación Cruzada.		Canales amalgamados – sistema fluvial
	TMB	EF-4	LTF-5	Arcillolita crema, marrón muy clara, dura, blocosa, silícea, no calcárea. Trazas de arena cuarzosa de grano fino.		Superficie de inundación
			LTF-6	Arenas de grano fino a medio, subredondeadas a subangulares, localmente angulares, sorteamiento regular. Trazas de Pirita. Estratificación Cruzada.		Canales amalgamados – sistema fluvial

LS1			LTF-7	Intercalaciones de arenades grano fino a muy fino, menor medio, con limolita marrón oscura, con laminaciones de materia orgánica, carbobosa, pirítica y arcillolita crema.		Superficie de inundación
			LTF-8	Arcillolita crema, marrón muy clara, moderadamente dura, predomina blocosa, silíceas; no calcárea. Parcialmente Fracturado.		Paleosuelo



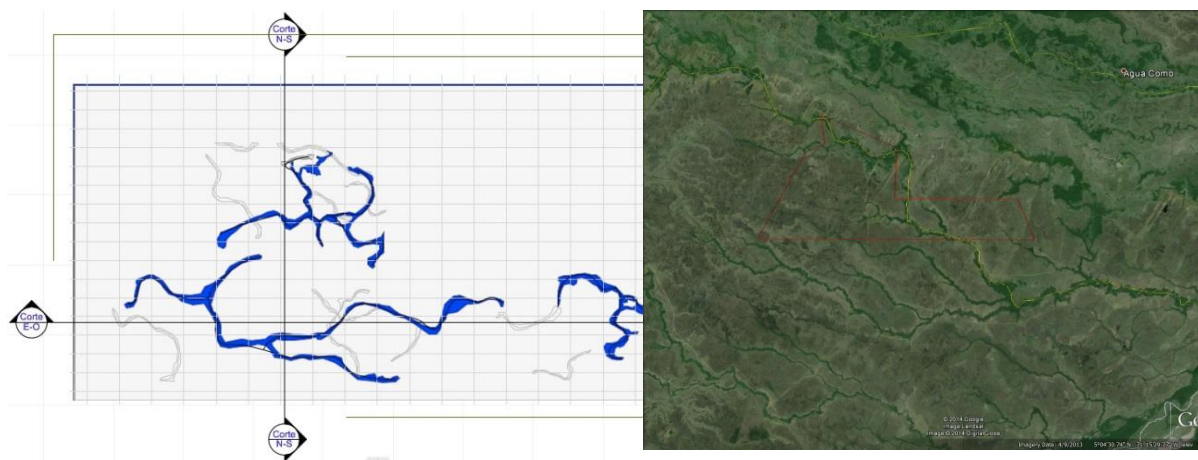
Para cada uno de los de los “*strata slices*” se llevó a cabo la interpretación de las geoformas de los ambientes y subambientes de depósitos asociados, principalmente canales y llanuras de inundación. A continuación un ejemplo de los canales interpretados en cuatro de las secciones(Figura 4-24).

Figura 4-24: Interpretación geoformas sobre “*srata slices*”.



De cada sección se pueden extraer los canales y tratar de definir las características de drenaje para el área, por ejemplo a través del uso de análogos como imágenes de satélite de los ríos actuales en el área de estudio (Figura 4-25). Se puede observar que los patrones de drenaje guardan cierta similitud, de canales meandríformes con distributarios (ríos efímeros) y zonas de llanura de inundación.

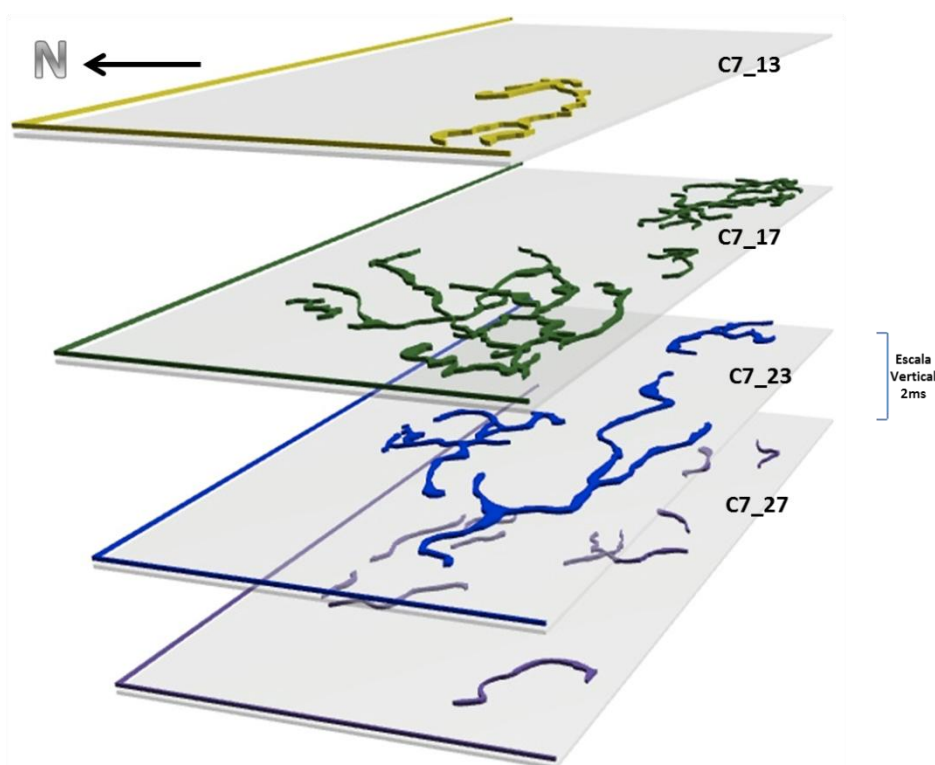
Figura 4-25: Comparación de patrones de drenaje con el sistema presente en el área de estudio en la actualidad



Siguiendo la metodología de Miall (2002), una superposición de cuatro “strata slices” se utiliza para analizar la sucesión vertical de las geoformas en el área de estudio. Si cada una de las secciones sigue el ángulo de buzamiento de las capas (análogo a la paleotopografía), se podría inferir que los subambientes asociados están presentes para cada sección, en iguales condiciones de espacio de acomodación, subsidencia y clima.

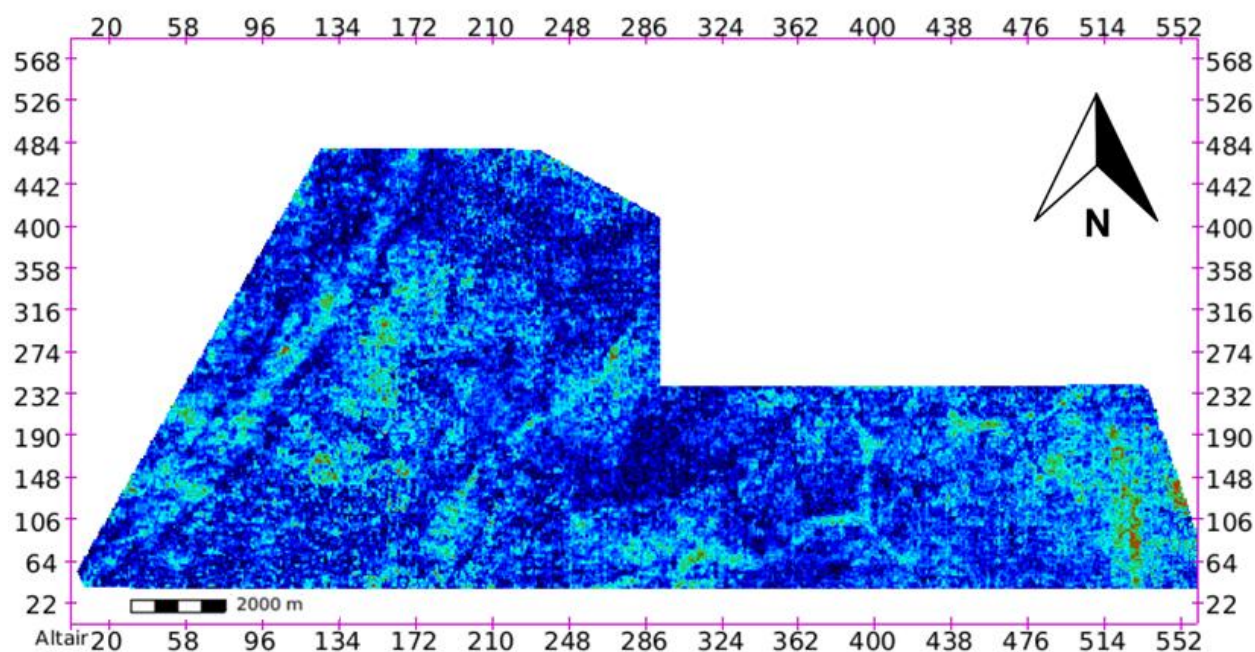
De la Figura 4-26 se puede concluir que para algunas de las secciones y para los diferentes tiempos, se presentan en el área de estudio canales meandrosos y sus dirtributarios, así como ríos efímeros. La Secuencia 1 (S1) se podría definir con estas cuatro secciones, evidenciando que hacia el tope de éstas el número de canales disminuye y hay mayor área para los depósitos de llanura de inundación. En la mayoría de las secciones no es posible identificar geoformas que asociar con ambientes de depósito, ni correspondencia con las secciones verticales en el cubo de Impedancia. Igualmente el amalgamamiento de las arenas impiden que se puedan identificar claras formas de canales, en su lugar se ven contrastes de impedancias entre zonas de formas irregulares sin asociación ambiental alguna, más allá de la que ofrecieron los pozos.

Figura 4-26: Sucesión Vertical de canales de Sistema Fluvial de Río Meandroso



Dentro de la ventana de tiempo definida para la Inversión, y sobre el cubo de Impedancia Acústica (IA), se calcularon cubos de Descomposición Espectral a varias frecuencias para complementar la interpretación, haciendo uso de la herramienta que para este fin tiene incorporada la plataforma Jason®. Luego de tener los nuevos cubos, se generaron “strata slides” de la misma forma que se generaron para el cubo de IA, para poder comparar el producto del atributo sísmico con el de la inversión (Figura 4-27).

Figura 4-27: Ejemplo Strata Slice Cubo de Descomposición Espectral a 16 Hz



Los cubos se generaron a las siguientes frecuencias: 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 52, 60 y 70 (Tabla 4-7).

Tabla 4-7: Volúmenes de Descomposición Espectral que Permiten Identificar Geoformas

Frecuencia	12	16	20	24	28	32	36	40	44	52	60	70
Evidencia de Geoformas		X		X	X						X	

Al barrer los strata slices se pudo constatar que no todas las frecuencias permitían ver los canales (Figura 4-28).

Figura 4-28: Ejemplo Strata Slices Cubos de Descomposición Espectral, comparados con la sísmica y las impedancias. Todas las imágenes es el mismo strata slice C7_13. (Escala de Colores al final en la Figura 4-29)

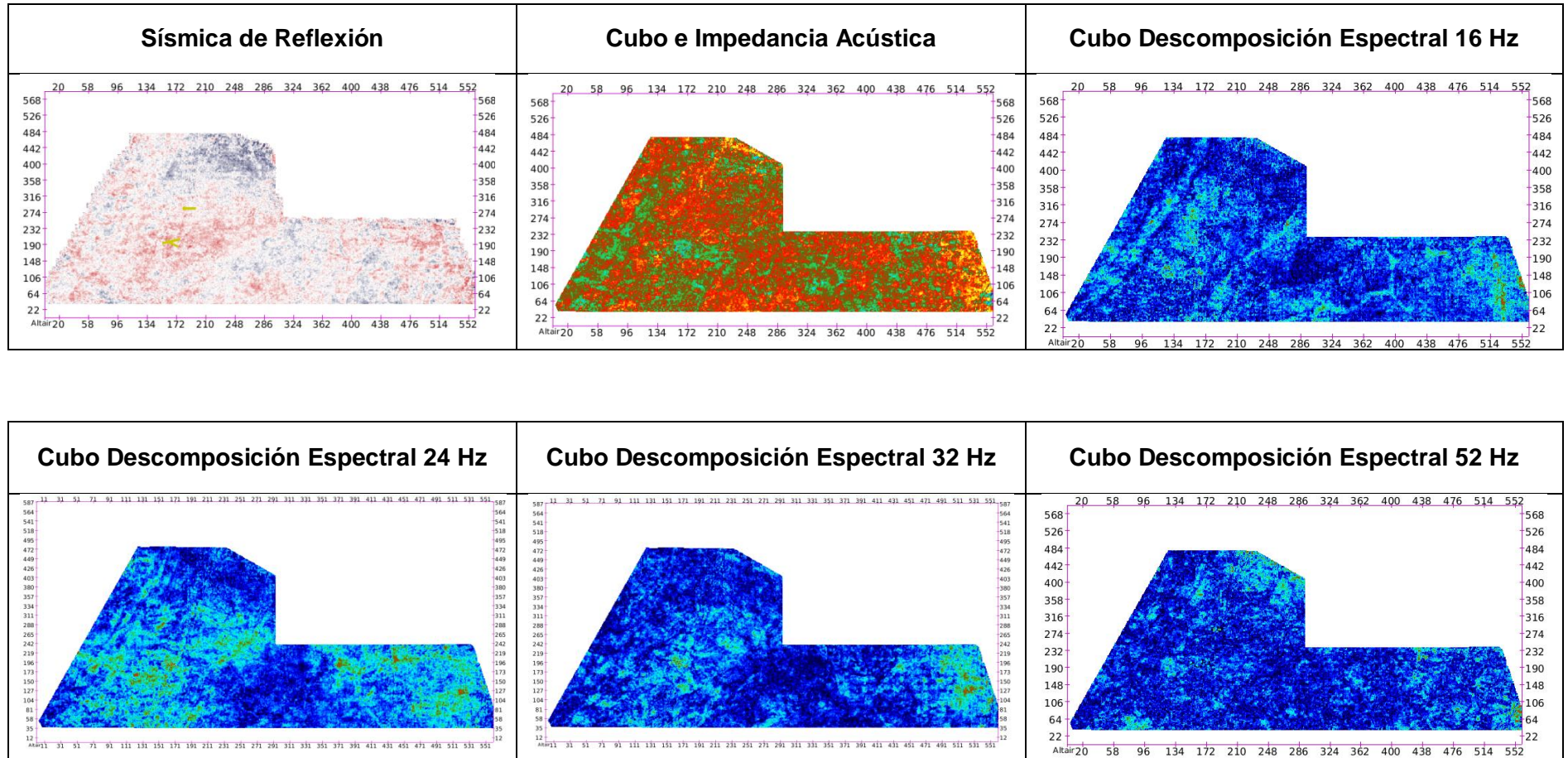
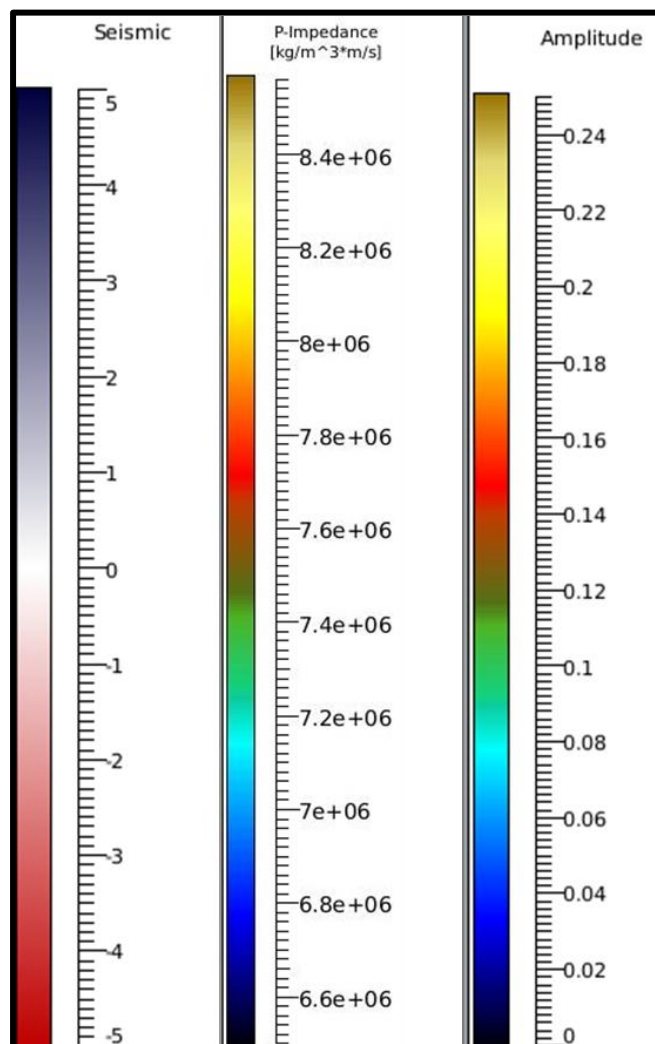
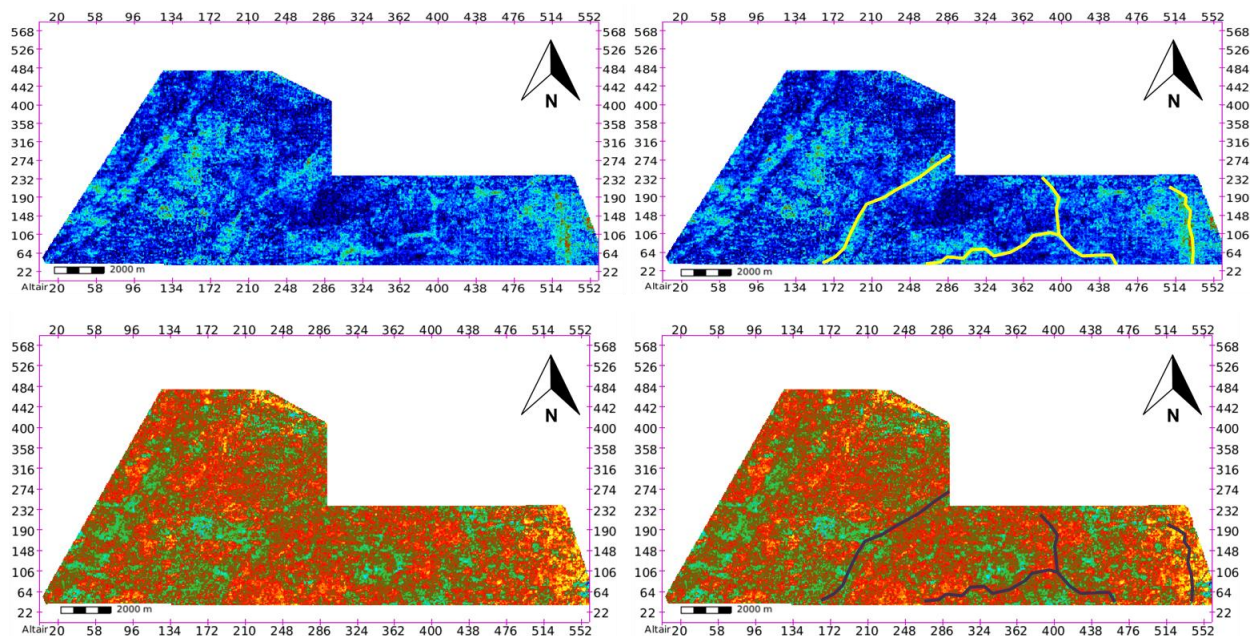


Figura 4-29: Escala de Colores para la Figura 4-28 (Sísmica, IA y Descomposición Espectral)



En la Figura 4-28 también podemos observar como características que no se aprecian en la sísmica, son más evidentes en el cubo de impedancia acústica; pero aun así el contraste de impedancias para “strata slices” como el utilizado en el ejemplo, no resuelve la distribución areal de facies. Es ahí donde los cubos de descomposición espectral aportan una mirada más al subsuelo, y para casos del como el cubo de 16 Hz, se puede observar geoformas que no se habían interpretado en la información antes analizada (Figura 4-30).

Figura 4-30: Ejemplo Comparación Strata Slice del Cubo de IA y el de Descomposición Espectral a 16 Hz



4.2 Análisis Sismoestratigráfico

Con los resultados de la fase anterior, se inicia la elaboración del marco cronoestratigráfico y la elaboración del mapa paleo-ambiental. El fundamento para el análisis en la mejor estimación de la posición vertical de cada sistema fluvial, es la estratigrafía de secuencias realizada con los datos sísmicos y de pozo, y los detalles ofrecidos por los “strata slices” (Miall, 2002).

A partir del análisis de los valores de impedancia se diferenciaron aquellas geoformas que aparecían sin mostrar cambios en varios strata slices, y se estableció a cuál de ellos realmente pertenecía, separando los que permanecían de igual carácter en más de una sección, evitando así interpretar el efecto de sombra de los canales. Al final tenemos un conjunto de geoformas que describen un escenario más cercano a la estratigrafía real del depósito estudiado.

De los datos de registros para este análisis, se puede resaltar los datos de direcciones de paleocorrientes aportados por las imágenes FMI, los cuales cuentan con mayor certeza en el área de los pozos y va disminuyendo en la medida que nos alejamos de esta área en la interpretación.

Las secciones sísmicas utilizadas, son segmentos de tiempo que cortan el cubo siguiendo la dirección de buzamiento regional dada por dos Horizontes interpretados en la sísmica, no necesariamente horizontes estratigráficos pero si cercanos a ellos. Esto significa que las superficies con un significativo relieve podrían no ser reflejados por más de una sección. También significa que las características deposicionales formados en diferentes momentos pueden aparecer al mismo tiempo de tránsito. Sin embargo, es posible analizar las variaciones del estilo fluvial en los segmentos sucesivos en términos de una sucesión de los depósitos de la secuencia estratigráfica definida en este trabajo.

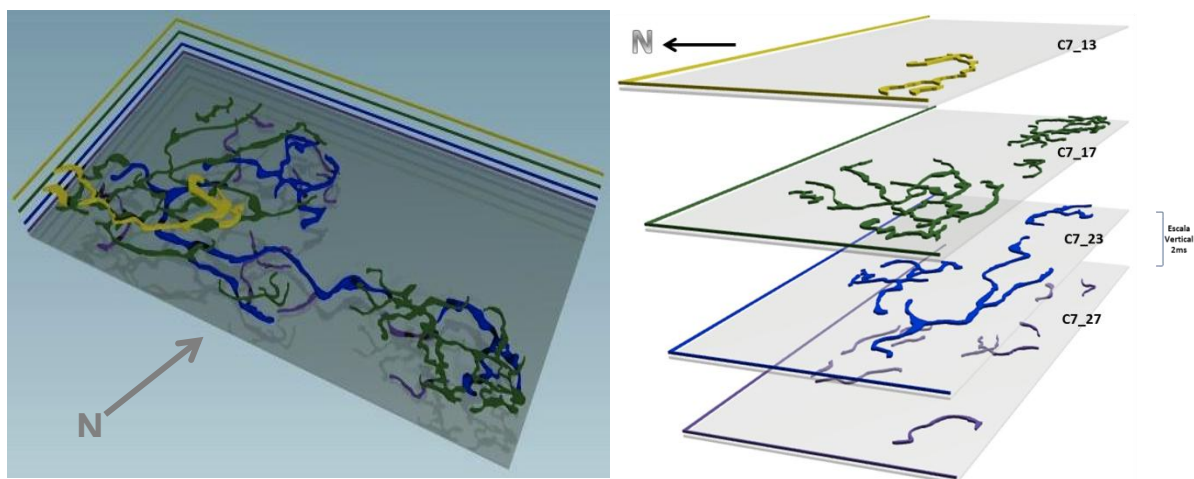
El modelo desarrollado contribuye a explicar las principales características observadas de los sistemas fluviales en el área del proyecto, pero cuenta de los límites de la resolución sísmica. El modelo que se ilustra en la Figura 4-31, utiliza valores generalizados para la aproximación de las edades de los depósitos al no contar con datos bioestratigráficos de alta resolución, se estiman representar intervalos de tiempo comprendidos en una historia geológica de aproximadamente 3 millones de años para la secuencia definida (Secuencia 1 – S1).

El modelo que se ilustra en la Figura 4-31, utiliza una escala en la vertical de 2 ms sin expresar con esto aproximaciones a valores de los espesores o las edades de los depósitos.

Los patrones de los “canales” interpretados son susceptibles de análisis, usando los conceptos y previos resultados de la estratigrafía de secuencias de los sistemas fluviales

que proporcionan las herramientas para la generación de modelos secuenciales (Miall, 2002).

Figura 4-31: Posición Vertical de los sistemas fluviales interpretados en los Strata Salices.



En el ejemplo de la Figura 4-31 se puede apreciar una superposición de cuatro de los segmentos de tiempo dibujados para visualizar la sucesión vertical de características a lo largo del área de estudio. Se hace énfasis en la forma meandrosa de los canales, la aparición y desaparición de los distributarios, así como los cambios en las direcciones de los patrones de drenaje predominado en algunos casos los E-W y para otros SW-NE. Las áreas de desborde se hacen más amplias, en la medida en que subimos en la secuencia, algunas manteniéndose en varios intervalos de tiempo, sucesivamente, más jóvenes. El relleno de los depósitos del Trato Transgresivo es visible en los “strata slices” superiores, los cuales no se incluyeron en el ejemplo al presentar una distribución homogénea de los depósitos asociados reflejados en un bajo contraste de valores de impedancia, que no permite diferenciar en toda el área geoforma alguna.

A la sucesión vertical se le realizaron además cortes transversales en sentido N-S y E-W (Figura 4-32), mostrándose en estos cortes ciertas tendencias en la distribución de los “canales”, los cuales se sobreponen en algunas áreas infiriéndose la movilidad (migración) en el tiempo de estos sistemas fluviales (Círculo rojo Figuras 4-33 y 4-34).

Figura 4-32: Localización Cortes Transversales Sucesión Vertical

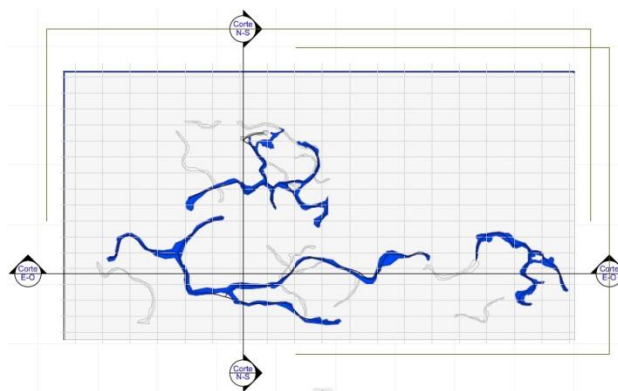


Figura 4-33: Corte W-E Transversal Sucesión Vertical.

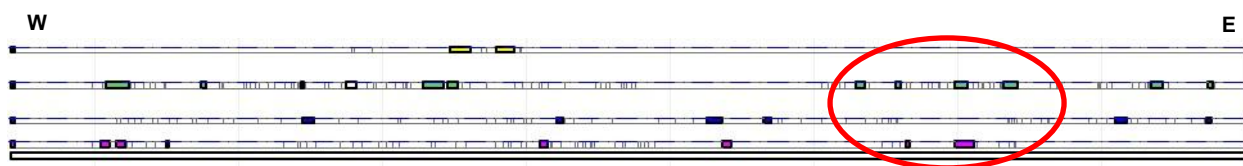
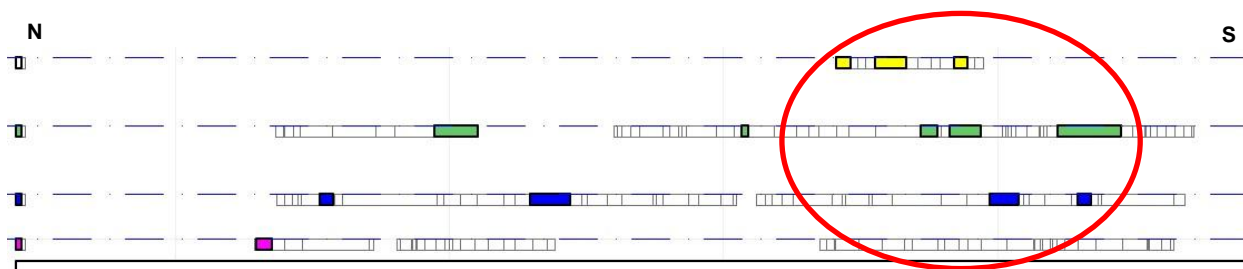


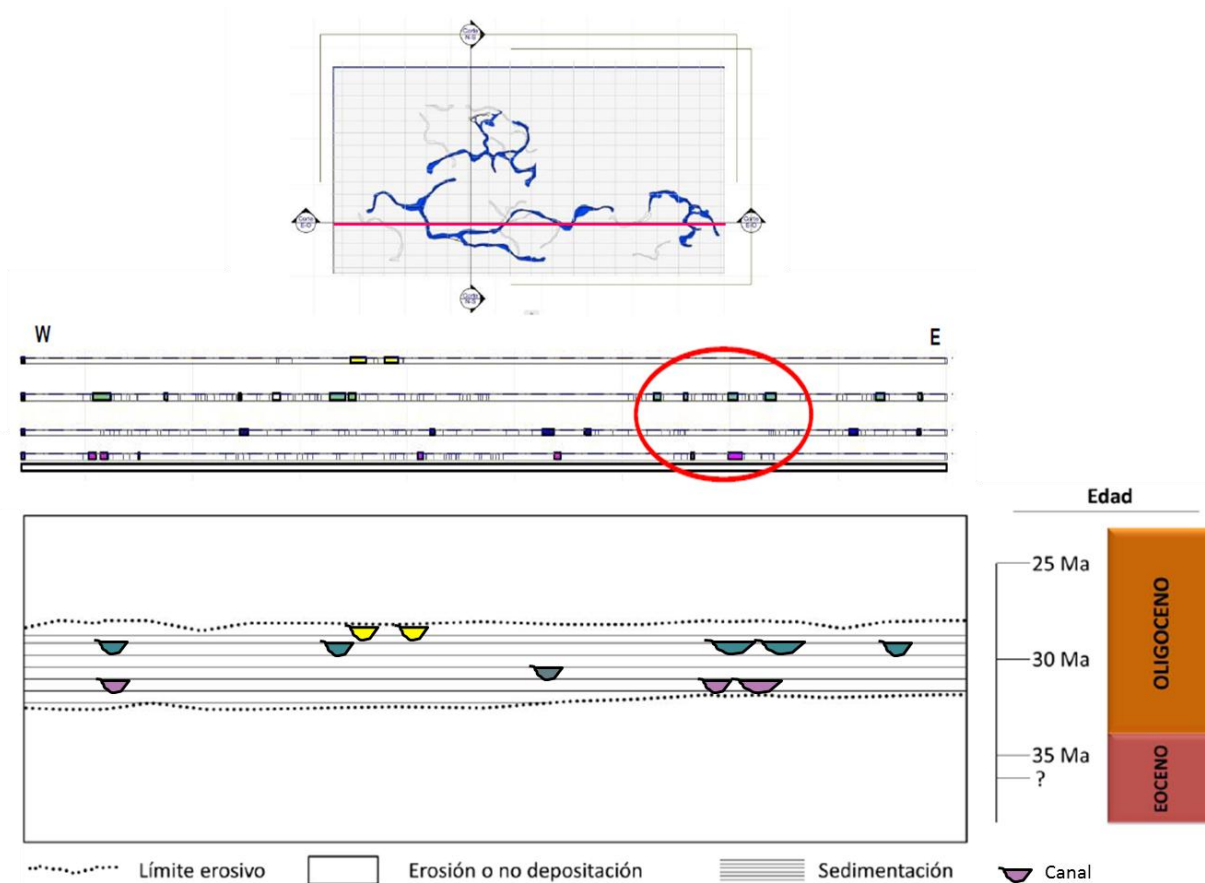
Figura 4-34: Corte N-S Transversal Sucesión Vertical.



Al carecer de información de mayor detalle, y basándose el análisis sismoestratigráfico secuencial, los depósitos objeto de interés de este estudio, corresponden a la Secuencia

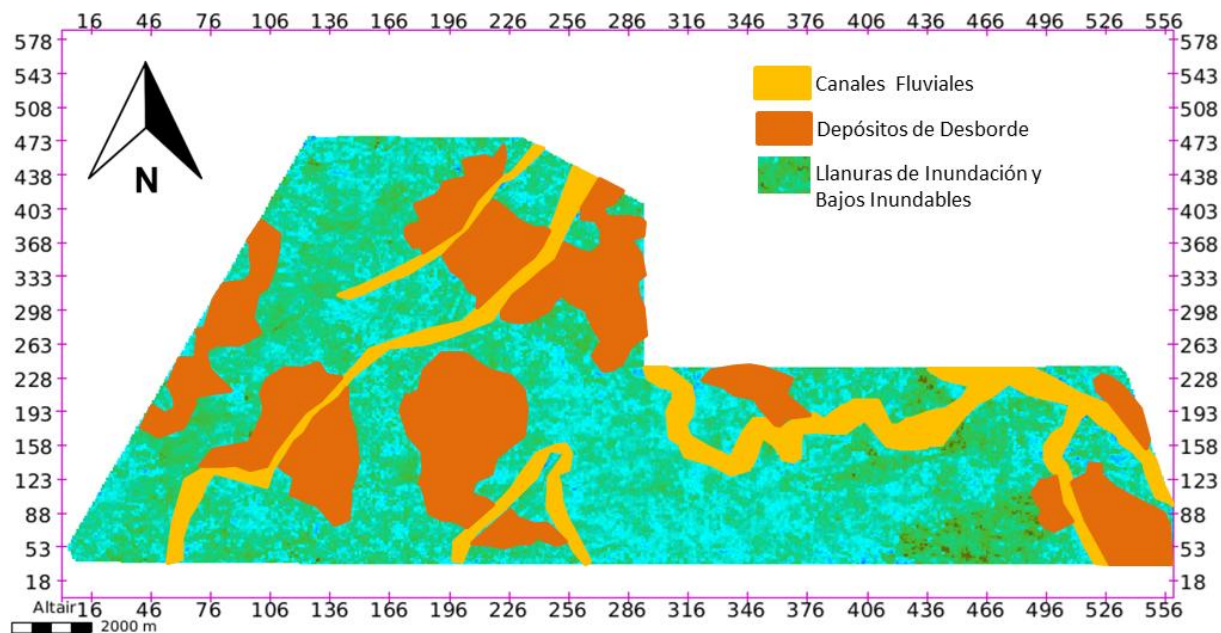
de tercer orden (Secuencia 1) caracterizada por un ciclo sedimentario, dejando un registro cronoestratigráfico basado en la interpretación de secuencias sísmicas, tomando como base la metodología propuesta por Wheeler (1958) para la elaboración de la Carta Cronoestratigráfica (Diagrama de Wheeler).

Figura 4-35: Diagrama de Wheeler.



Al final, se construye mapa paleoambiental para la sección media de la Secuencia 1 (Figura 4-36), utilizando como referencia para la interpretación un modelo teórico (Figura 4-22).

Figura 4-36: Mapa Paleoambiental sobre “Strata Slice”.



4.3 Discusión de Resultados

Como resultado de la integración de la información, se obtuvo la definición de:

- Nueve (9) Litofacias que describen la sección perforada a partir de la litológica descrita en muestras de zanja.
- Enmarcar la sección de estudio con base en la información Bioestratigráfica como correspondiente al Oligoceno y situada aproximadamente entre los 31.5 y 28.5 millones de años (biozonas T-11 a T-10 de acuerdo con Jaramillo *et al.*, (2010), y son restringirlos a depósitos de ambientes continentales.
- Definir cuatro (4) Electrofacies para el Miembro C7 de la Formación carbonera, a partir del análisis de patrones de registro y la asociación de facies. Los patrones de los registros sumada a la litología descrita, permitieron inferir que tenemos en el área de estudio un Sistema Fluvial Meandriforme e incluye una parte del

sistema morfogénico Llanura Fluvial Deltáica consistente de una extensa planicie con escaso relieve ligeramente ondulado formado por aluviones constituidos por arenas de diferente gradación, limos y arcillas con estratificación cruzada y abundante lignito, turba y materia orgánica producto de la acción acumulativa del río y sus tributarios locales (Serra, 1984). Las areniscas y lodolitas de C7, fueron depositadas principalmente en un ambiente migratorio de canales meandriiformes que cortaban llanuras de inundación fluviales con zonas pantanosas y sectores con exposición sub-aérea que permitieron el desarrollo de paleosuelos.

- La “Secuencia 1” (S1) comprende un intervalo de tiempo menor a 5 millones de años, por lo que sería una secuencia de tercer orden (Vail, 1977).
- Los límites de la S1 están dados por una superficie LS1 en la base, que corresponde a una discordancia, y hacia el tope se encuentra la LS2 representada por una superficie concordante. La superficie LS1 marca el inicio del Trato de Mar Bajo (TMB) conformado por parasecuencias progradantes, con evidencia de canales migrantes en llanuras de inundación amplias de un sistema fluvial de río meandroso, que culmina en una superficie transgresiva (ST) que permite inferir un aumento en el nivel base. El inicio de la transgresión (Trato Transgresivo-TT) dejó depósitos ricos en materia orgánica y carbón asociados a llanuras de inundación (charcas), siguiendo con depósitos de desborde y finalmente con un acrecentamiento en el aporte de finos anunciando el comienzo de un aumento del nivel base que culminó en un Trato de Mar Alto (TMA) interpretado como un ambiente transicional-Lacustrino.
- Se definieron dos (2) sismofacies y con ellas, se elaboró un Mapa de Sismofacies generalizando la distribución de las sismofacies definidas en el 3D.
- En la sísmica la sismofacies SF-A, contiene reflexiones de amplitudes moderadamente altas que preliminarmente puede estar coincidiendo con cuerpos arenosos y que pueden corresponder a canales, probablemente cuerpos más continuos lateralmente y amalgamados, mientras las SF-B se asocian con las

llanuras de inundación y/o charcas presentes en el sistema interdigitados con delgados cuerpos arenosos.

- Con el objeto de mejorar la resolución vertical de la sísmica, se realiza una inversión sísmica en la ventana de tiempo definida: entre los horizontes interpretados C5 y Gachetá. Se genera un Cubo de Descomposición espectral que permitió a través de contrastes de Impedancia Acústica en “*strata slices*” interpretar geofomas asociadas al ambiente sedimentario propuesto.
- Se generaron cubos de Descomposición Espectral a diferentes frecuencias, los cuales aportaron un mayor detalle a la definición de geofomas en la ventana de tiempo de interés.
- Finalmente, la información de sísmica y pozos, permitió realizar a partir del Análisis Sismoestratigráfico un Mapa Paleoambiental para el Área de Estudio.

5. CONCLUSIONES

Las areniscas y lodolitas del Miembro C7, fueron depositadas principalmente en un ambiente migratorio de canales que cortaban llanuras de inundación fluviales con zonas pantanosas y sectores con exposición sub-aérea que permitieron el desarrollo de paleosuelos.

Resultado del análisis facial los elementos arquitecturales definidos son: canales (distributarios), llanuras de inundación, depósitos de desbordamientos, humedales, lacustre.

Los canales, principalmente de variable sinuosidad, generaron depósitos de arenas de canal amalgamados con buena extensión lateral (base de la sección).

La disposición general de los canales y los complejos que conforman tiende a ser sectorizada y poco frecuente.

En la distribución vertical se observa que los canales se interdigitan y los depósitos de desbordamiento en llanura de inundación se sobreponen unos con otros.

Se puede establecer una predicción y anteposición espacio temporal de la historia estratigráfica a partir del análisis de la sucesión vertical de los canales.

La reconstrucción paleoambiental soporta el modelo secuencial.

La Secuencia está conformada por el ciclo de deposición, de base a techo, por un Trato de Mar Bajo (TMB), un Trato Transgresivo (TT) y un Trato de Mar Alto (TMA).

El Trato de Mar Bajo (TMB) está representado por cinturones de canales amalgamados de ambientes fluviales con buena continuidad lateral.

El Trato Transgresivo (TT) es conformado por las llanuras de inundación y los depósitos de desborde.

El Trato de Mar Alto (TMA) está asociado a depósitos de ambiente lacustre.

Las herramientas geofísicas (inversión, atributos) contribuyen en la definición de las geoformas.

El análisis sismoestratigráfico a partir de la interpretación de “*strata slices*”, permitió un mejor entendimiento y detalle de la arquitectura estratigráfica del Miembro C7 de la Formación Carbonera.

Se recomienda realizar análisis bioestratigráficos con mayor resolución, para disminuir la incertidumbre de las dataciones de las secuencias y mejorar el marco geocronológico del área.

Se recomienda adquirir núcleos en el área de estudio a partir de los cuales se puedan complementar las descripciones litológicas y las estructuras sedimentarias, importantes en la definición de facies.

Resulta interesante proyectar éste trabajo, con la realización de análisis enfocado a la calidad de los cuerpos arenosos como reservorios y su potencial como productoras de hidrocarburos.

A. Anexo: Procesamiento de la sísmica 3D – Inversión Simultánea.

Se contó con la información del pozo A-2 y el volumen sísmico 3D apilado como datos de entrada para la inversión. Una vez cargados y acondicionados los datos, se prosiguió con el amarre sísmica-pozo, para lo que se utilizó la información de velocidades arrojada por el sintético.

Un paso importante fue realizar la factibilidad del proceso para definir el tipo y alcance de la inversión. Como resultado de la factibilidad, se concluyó que en los Crossplots hay diferenciación de la información del pozo filtrada en la sísmica y que aunque el pozo no cuenta con registro de velocidad de onda S, se podía calcular lo requerido a partir de las velocidades de onda P sin usar la relación V_p/V_s ; por lo tanto, era factible realizar una inversión simultánea para generar un cubo de Impedancia Acústica con mejor resolución vertical para la ventana de tiempo seleccionada entre los Horizontes interpretados como correspondientes a las Formaciones Carbonera C5 y Gachetá.

Siguiendo el flujo de trabajo (Figura A-1), como metodología de interpretación de la data sísmica, se generó un cubo de Impedancia Acústica (IA) para la ventana de tiempo seleccionada a través de la Inversión Sísmica. Los pasos que se siguieron de esta metodología de trabajo fueron la base para el análisis de la data y la identificación de oportunidades de diferenciación de la información interpretada en los pozos en la sísmica:

- Importar Datos: sísmica (segy), horizontes interpretados, survey, registros de pozo, topes de formaciones.

-
- Amarre sísmica-pozo: se importan las velocidades usando la información del VSP y el sintético.
 - Factibilidad: tiene como objeto definir el alcance y tipo de Inversión a realizar, analizando los datos de entrada al modelo simulando las posibles salidas a obtener por el procesamiento.
 - Cálculo de la Ondícula: se buscó la ondícula que mejor representara al pozo en su impedancia/serie de reflectividad. Varias ondículas pueden representar la sísmica, pero no el pozo.
 - Definición del Modelo Sólido: se definió el marco estratigráfico, y la estratigrafía de capa fina (paralelo al horizonte o a la estratigrafía).
 - Creación de Modelo de Baja Frecuencia: Las bajas frecuencias son necesarias para determinar la tendencia de la inversión, tal que la impedancia P invertida coincida con la impedancia P del pozo.
 - Se selecciona método de interpolación y filtro: se utilizaron el Inverso a la distancia (710 m de radio) y “Lateral Filtering”, respectivamente.
 - Se ponderan apilados y organizan gathers: se evalúa la relación señal/ruido, para definir cuál es el mínimo o máximo de apilados por ángulo. Para esto también se definieron los ángulos: máximo 43°, mínimo 0° y 7.6° donde hay datos. Con esto se procura garantizar para qué ángulos existen el número de muestras necesarias para generar una adecuada inversión.
 - Se corre el algoritmo de Inversión: “Constrained Sparse Spike”.

A continuación el Flujo de Trabajo General ejecutado para realizar la Inversión Simultánea:

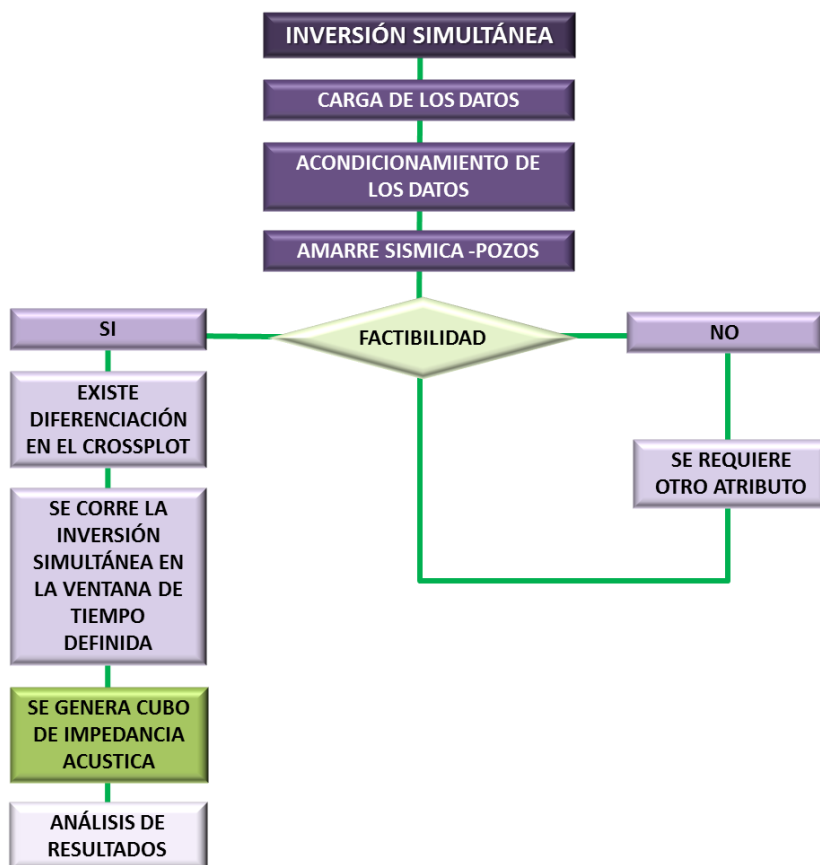


Figura A-1. Flujo de Trabajo

Con la ayuda de otro módulo se generaron “strata slices” (cortes del cubo sísmico en sentido del buzamiento de las formaciones entre dos “horizon slices” de referencia) cada 2ms para mapear posibles geoformas asociadas a las paleo-ambientes y sus depósitos.

La interpretación del cubo de impedancia se inició desde el punto conocido, el área donde fue perforado el pozo tipo, y de allí hacia el resto del cubo. Lo primero fue identificar rasgos en el pozo que indicaran asociación con las facies definidas y completar la definición de las sismofacies con las características aportadas por la inversión. Luego se inició una interpretación sobre los “strata slices” con el objeto de identificar geo-formas que complementarían la definición de distribución de las facies y sus ambientes relacionados.

B. Anexo: Glosario

Horizon Slices, pag. 19. Cortes del Cubo sísmico en sentido del Buzamiento de las formaciones.

Stratal Slices, pag. 19. Horizontes creados en el cubo sísmico entre dos Horizon Slices de referencia siguiendo el buzamiento de las capas.

Trato de nivel bajo (LST), pag. 32. Es aquel que incluye depósitos que son acumulados durante la caída de nivel relativo de nivel del mar. Este trato de sistema es depositado directamente sobre la superficie que indica la mayor caída del nivel del mar.

Trato de nivel transgresivo (TST), pag. 32. Comprende depósitos acumulados al iniciar la transgresión marina, caracterizado por una mayor relación de A/S debido al incremento del espacio de acomodación.

Trato de nivel alto (HST), pag. 32. Evento durante la etapa final de la máxima inundación, cambiando el régimen de deposición y disposición de los sedimentos.

Flatenizando, pag 57. Aplanar la sección a un nivel de referencia equivalente en todos los pozos.

Bibliografía

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. 75p. Bogotá, Colombia. 2007

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH), UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Plan Cubrimiento Sísmico – Tomo I. 2010.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH), UNIVERSIDAD EAFIT. Petroleum Geology of Colombia, Llanos Basin – Vol. 9.ANH, 2011.

AARRE, V., D. ASTRATTI, T. N. A. AL-DAYYNI, S. L. MAHMOUD, A. B. S. CLARK, M. J. STELLAS, J. W. STRINGER, B. TOELLE, O. V. VEJBAEK, AND G. WHITE. Seismic detection of subtle faults and fractures, Schlumberger Oilfield Review, 24, no. 2, 28-43.2012.

BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., REYES-HARKER A. & TORRES, V. Paleocene-Middle Miocene flexural-margin migration of the nonmarine Llanos foreland basin of Colombia. CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, v. 3 (3). p. 141-160. 2007.

BAYONA G, VALENCIA A, MORA A, RUEDA M, ORTIZ J, MONTENEGRO O. Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca Antepaís de los Llanos de Colombia. Geología Colombiana No. 33, Diciembre, 2008. ISSN 0072-0992

BEICIP FRANLAB - ECOPETROL. Estudio Geológico Regional: Cuenca de los Llanos Orientales. Vol.1. Instituto Colombiano del Petróleo. p. 7-43. 1995.

CATUNEANU, O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls Journal of African Earth Sciences, Volume 35, Issue 1, Pages 1-43. 2002.

CATUNEANU, O., GALLOWAY, W.E., KENDALL, C.G.ST.C., MIALL, A.D., POSAMENTIER, H.W., STRASSER, A., TUCKER, M.E. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy* 44 (3), 173-245. 2011.

CHOPRA, S., AND MARFURT K.J. Seismic Attribute for Prospect Identification and Reservoir Characterization: Society of Exploration Geophysicists Geophysical Development Series No. 11, 464B. 2007.

COOPER, M. A., ADDISON, F.T. ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, A. B., HOWE, S., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS. R., PULHAM, A. J., & TABORDA, A. Basin development and tectonic history of the Llanos basin, eastern cordillera, and middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 79 (10) p. 1421-1443. 1995.

DE PORTA, J. *Léxico Estratigráfico Internacional Vol 5. Amérique Latine fascicule 4b Colombia. Décima parte.* Centre National de la Recherche Scientifique, Paris. 1974.

DUEÑAS JIMÉNEZ, H. & T. VAN DER HAMMEN. Significado geológico y asociaciones palinológicas de las formaciones Diablo Superior (Mioceno tardío) y San Fernando Superior (Mioceno Medio), Piedemonte Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. *Revista Academia Colombiana Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* XXXI (121): 481-498. Bogotá. 2007.

FAJARDO, A., ROJAS, E., CRISTANCHO, J., & CONSORCIO G&G, GOING SYSTEM, L., Definición del Modelo estratigráfico en el intervalo Cretáceo tardío a mioceno medio en la Cuenca Llanos Orientales y Piedemonte llanero. Informe interno, Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). p. 42 – 125. 2000.

FRAZER, B. et al., *Seismic Inversion: Reading Between the Lines.* Schlumberger Oilfield Review. 2008.

GALLOWAY, W. & HOBDA, D., Terrigenous clastic depositional systems: applications to petroleum, coal, and uranium exploration. Ed. Springer-Verlag p. 51-78. New York. 1983.

GALLOWAY, W.E., Genetic stratigraphic sequences in basin analysis. I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 73, 125–142. 1989.

HARRIS, M. J., et al., in AIP Conf. Proc. 410, Proc. Fourth Compton Symp., ed. C. D. Dermer, M. S. Strickman, & J. D. Kurfess (New York: AIP), 1997.

JARAMILLO, C., AND RUEDA, M. Impact of biostratigraphy in oil exploration, in Abstracts, III Convención Técnica de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Bogotá, p. 6. 2004.

JARAMILLO, C., MUÑOZ, F., COGOLLO, M., AND PARRA, F. Quantitative biostratigraphy for the Paleocene of the Llanos Foothills, Colombia: Improving palynological resolution for oil exploration, in Powell, A. J., and Riding, J., eds., Recent Developments in Applied Biostratigraphy: London, The Micropalaeontological Society Special Publications, v. 1, p. 145-159. 2005.

JARAMILLO, C., RUEDA, M., BAYONA, G., SANTOS, C., FLOREZ, P. & PARRA, F. (2009): Biostratigraphy breaking paradigms: dating the Mirador Formation in the Llanos Basin of Colombia, in: Demchuck, T., and Gary, A., eds., SEPM Special Publication 93: Geologic Problem Solving with Microfossils: A Volume in Honor of Garry D. Jones, p. 29-40.

JARAMILLO, C., C. HOORN, A.F. SILANE, F. LEITE, F. HERRERA, L. QUIROZ, R. DINO & L. ANTONIOLI. The origin of the modern Amazon rainforest: implications of the palynological and palaeobotanical record. In: C. 2010.

JARAMILLO, C. A., RUEDA, M., TORRES, V. 'A palynological zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia', *Palynology*, 35: 1, 46 — 84. 2011.

MIALL, A.D., *The Geology of Fluvial Deposits*. Springer-Verlag, Berlin, 582 pp. 1996.

MIALL, A.D., Architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene fluvial system in the Balay Basin, based on seismic time-slice analysis: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 86, p 1201-1216. 2002.

MIALL, A.D., How do we identify big rivers, and how big is big? *Sedimentary Geology*, v. 186, p. 39-50. 2006.

MITCHUM, R, VAIL, P., AND THOMPSON, S. Seismic stratigraphy and global changes in sea level, part 2: the depositional sequence as the basic unit for stratigraphic analysis, In: *Seismic stratigraphy: application to hydrocarbon exploration*. C. Payton, (ed.). American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, p. 53-62.1977.

MORA, A., PARRA, M., STRECKER, M.R., KAMMER, A., DIMATE, C., & RODRÍGUEZ, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25. TC2010, doi:10.1029/2005TC001854. 2006.

NOTESTEIN, F. B., Hubman, C. W., Bowler, J. *Geology of Barco Concession republic of Colombia*. *Suth America.Bulletin of Geological Society of America*, Vol. 55, pp. 1165-1215. 1944.

PALEOFLORA. Estudio Palinológico Intervalo Analizado: 5000' - 7150', Bloque Altair. 2010.

POSAMENTIER, H.W. & ALLEN, G. P., Siliciclastic sequence stratigraphic patterns in foreland ramp-type basins. In: *Geology*. v. 21. p. 455-458. 1993

POSAMENTIER, H.W., JERVEY, M.T. & VAIL, P.R., Eustatic controls on clastic deposition conceptual framework. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C.,

Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds.), *Sea Level Changes — An Integrated Approach*. Special Publication, vol. 42. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), p. 110–124. 1988.

READIGN, H., G. “Sedimentary Environments: Processes, facies and Stratigraphy”, Blackwell Science, United Kingdom, 688 pp. 2005.

REYES, J., FAJARDO, A., RUBIANO, J., MUNAR, F., PÉREZ, H., SANDOVAL, J., SOTO, C., HERNANDEZ, O. & ROJAS, L., 1998. Evaluación Regional Meta: Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo- Gerencia de Estudios Regionales. p. 23 – 94.

SLOSS L.L., KRUMBEIN W.C., DAPPLES E.C. *Integrated Facies Analysis*. Longwell, C.R. (Ed.), *Sedimentary Facies in Geologic History*, vol. 39. Geological Society of America Memoir, p. 91-124. 1949.

SLOSS, L.L., *Sequences in the cratonic interior of North America: Geological Society of America Bulletin*, v. 74, p. 93–114, doi: 10.1130/0016-7606(1963)74[93:SITCIO]2.0.CO;2. 1963.

SANGREE, J. & WIDMIER, J., *Seismic interpretation of clastic depositional facies*. Memoir 26, in: Payton C., ed., *Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration*. p. 165-184. 1977.

SERRA, O. 1984. *Análisis de ambientes sedimentarios mediante perfiles de pozo*. Ed Schlumberger. p. 142-149.

SHERIFF, R.E., *Seismic Resolution a Key Element; AAPG DECEMBER EXPLORER*. 1997.

STRECKER, U., STEIDTMANN, J.R., SMITHSON, S.B..A conceptual tectonostratigraphic model for seismic facies migrations on a fluvio-lacustrine extensional basin.American Association of Petroleum Geologists Bulletin 83, 43261. 1999.

TANER, M. T. Seismic attributes, CSEG Recorder, Houston, U.S.A., 48-56. US Energy Information Administration. 2001.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. AND KEYS, D. A..Applied Geophysics.Cambridge University Press. .1976.

TRAVERSE, A., Paleopalynology [a textbook]. Unwin/Hyman Ltd., U.K., 600 pp.1988.

TORRADO, L., Mann, P. & BHATTACHARYA J. Application of seismic attributes and spectral decomposition for reservoir characterization of a complex fluvial system: Case study of the Carbonera Formation, Llanos foreland basin, Colombia.

VAIL, P.R., MITCHUM, JR. R.M. & THOMPSON III, S., Seismic Stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal "onlap". In: Payton, C.E. (Ed.), Seismic Stratigraphy — Applications to Hydrocarbon Exploration. Memoir, vol. 26.American Association of Petroleum Geologists. p. 63–81. 1977.

VAIL, P.R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part I: Seismic stratigraphy interpretation procedure. In Atlas of Seismic Stratigraphy, ed. AW Bally. Pp. 1-10. Am. Assoc. Petrol. Geol.Stud.Geol. No. 27, Vol. 1. 125 pp. 1987.

WHEELER, H. E. Time stratigraphy.AM. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 42:1047-63. 1958.