ARMAZÓN CRONOESTRATIGRÁFICO CON BASE EN ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA Y DE SECUENCIAS PARA UN ÁREA PILOTO EN LA CUENCA DE LA BAJA GUAJIRA *OFFSHORE* DEL CARIBE COLOMBIANO

HERNAN DARIO MADERO PINZÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS MAESTRÍA EN GEOLOGÍA ESCUELA DE GEOLOGÍA BUCARAMANGA 2010 ARMAZÓN CRONOESTRATIGRÁFICO CON BASE EN ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA Y DE SECUENCIAS PARA UN ÁREA PILOTO EN LA CUENCA DE LA BAJA GUAJIRA *OFFSHORE* DEL CARIBE COLOMBIANO

HERNAN DARIO MADERO PINZÓN

TESIS DE GRADO PRESENTADA COMO REQUERIMIENTO PARA OPTAR AL TITULO DE: MAGISTER EN GEOLOGÍA

DIRECTOR Geólogo Ph.D. JUAN DIEGO COLEGIAL GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS MAESTRÍA EN GEOLOGÍA ESCUELA DE GEOLOGÍA BUCARAMANGA 2010

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo con mucho cariño y aprecio a mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a mis directores de grado Ph.D. Juan Diego Colegial Gutiérrez y Freddy Mauricio Niño Rodríguez quienes con su paciencia y conocimiento guiaron el desarrollo de este trabajo. Igualmente quiero agradecer la asesoría del Doctor Paul Weimer, por sus generosos aportes a este trabajo. También quiero agradecer a Dora Luz Marín Restrepo del grupo de Estratigrafía del ICP, Andrés Calle y Alexandra Plata del grupo de Geofísica del ICP, a Oswaldo Mantilla del grupo de Bioestratigrafía del ICP por su colaboración y seguimiento del desarrollo de trabajo.

Además agradecer al profesor Jorge Eduardo Pinto Valderrama, a Andrés Reyes Harker, a la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Geología y a Ecopetrol S.A. quienes hicieron posible este programa de Maestría en Geología. Por último quiero agradecer a los calificadores de este trabajo especialmente a Victor Ramírez por dedicar tiempo y dedicación a la revisión y a sus importantes aportes.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS9			
LISTA DE TABLAS12			
NOMENCLATURA			
RESUMEN14			
SUMMARY			
1. INTRODUCCIÓN	16		
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA			
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	23		
4. OBJETIVOS	23		
4.1. OBJETIVO GENERAL	23		
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	23		
5. ANTECEDENTES24			
6. MARCO TEÓRICO	31		
6.1. MARCO GEOLÓGICO	32		
6.2. MARCO TECTÓNICO			
6.3. ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA Y DE SECUENCIAS			
7. METODOLOGÍA	41		
7.1. RECOPILACIÓN DE DATOS	42		
7.2. PRIMERA FASE	43		
7.2.1. Estratigrafía Sísmica	44		
7.3. SEGUNDA FASE	50		
7.3.1. Bioestratigrafía	50		
7.3.2. Estratigrafía	53		
7.3.3. Análisis estratigráfico de los datos de pozo	54		

8.	RESULTADOS	.65
8	.1. SECUENCIAS SÍSMICAS	.70
	8.1.1. Secuencia Sísmica 1 (Pre-Miocena)	.73
	8.1.2. Secuencia Sísmica 2 (Mioceno Inferior 20-19 M.a)	.78
	8.1.3. Secuencia Sísmica 3 Mioceno Medio Temprano (17-19 M.a)	.82
	8.1.4. Secuencia Símica 4 Mioceno Medio inferior (15-17 M.a)	.86
	8.1.5. Secuencia sísmica 5 Miceno Medio (13 a 15 M.a)	.88
	8.1.6. Secuencia sísmica 6 Mioceno Medio Tardío (13 a 9 M.a)	.90
	8.1.7. Secuencia Sísmica 7 Mioceno Medio tardio a Miceno Superior (9 a 6	
	M.a). 91	
	8.1.8. Secuencia Sísmica 8 Mioceno Superior (6.2 a 5.9 M.a)	.93
	8.1.9. Secuencia Sísmica 9 Plioceno Inferior (5 a 4 M.a).	.94
	8.1.9. Secuencia Sísmica 10 Plioceno Superior (4 a 3.4 M.a)	.95
	8.1.9. Secuencia Sísmica 11 Pleistoceno (3.4 a 1 M.a)	.97
	8.1.10. Carta Cronoestratigráfica	.98
9.	DISCUSIÓN1	00
10.	10. CONCLUSIONES1	02
11.	BIBLIOGRAFÍA1	04

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE TIERRAS ANH DONDE SE MUESTRAN LOS BLOQUES EN
EXPLORACIÓN
FIGURA 2. CORTE ESQUEMÁTICO PARA LA CUENCA DE LA GUAJIRA OFF-SHORE
FIGURA 3. GUAJIRA <i>OFF-SHORE</i> , CORRELACIÓN CON ORIENTACIÓN SW-NE DE ALGUNOS POZOS DE LA SUBCUENCA DE NAZARET (BAJA GUAJIRA)
FIGURA 4. DEFINICIÓN DE HORIZONTES SÍSMICOS A PARTIR DE MARCADORES BIOESTRATIGRÁFICOS SOBRE POZOS <i>OFF-SHORE</i> 25
FIGURA 5. ESQUEMA COMPARATIVO DE LAS SECUENCIAS DEFINIDAS POR RUBIO Y RAMIREZ Y TEXACO
FIGURA 6. MARCO CRONESTRATIGRÁFICO COSTA AFUERA PARA LA CUENCA DE COLOMBIA
FIGURA 7. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL CONCEPTO DE ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS
FIGURA 8. UBICACIÓN CUENCA DE LA GUAJIRA Y SUS LÍMITES
FIGURA 9. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO SITUADA AL NORTE EN EL OFF-SHORE DEL CARIBE COLOMBIANO
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN DE LA INTERACCIÓN DE LAS PLACAS CARIBE, SURAMERICANA, COCOS, NAZCA Y LA MICROPLACA DE COSTA RICA Y PANAMÁ
FIGURA 11. SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA DE UNA SECUENCIA
FIGURA 12. DIAGRAMA DE LAS DIFERENTES TERMINACIONES DE LOS REFLECTORES SÍSMICOS
FIGURA 13. METODOLOGÍA PARA LA INTERPRETACIÓN CRONOESTRATIGRÁFICA BASADO EN ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS
FIGURA 14. DELIMITACIÓN DE SECUENCIAS SÍSMICAS ESTABLECIDAS A PARTIR DE TERMINACIÓN DE REFLECTORES
FIGURA 15. CONFIGURACIÓN INTERNA DE LOS REFLECTORES 46
FIGURA 16. BIOZONACIÓN BASADA EN FORAMINÍFEROS PLANCTÓNICOS PARA EL NEÓGENO

FIGURA 17. UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS SÍSMICAS EMPLEADAS PARA LA EXTRAPOLACIÓN DE DATOS AL ÁREA DE ESTUDIO
FIGURA 18. ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO BASADO EN CAMBIOS DE NIVEL BASE SOBRE LOS POZOS CERCANOS A LOS DATOS SÍSMICOS 3D
FIGURA 19. COMPARACIÓN DE LOS CAMBIOS RELATIVOS DEL NIVEL DEL MAR 58
FIGURA 20. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LOS POZOS 1, 2, 3 Y 4 61
FIGURA 21. DATOS EXTRAPOLADOS A LAS LÍNEAS SÍSMICAS 2D, LOS DATOS BIOESTRATIGRÁFICOS DE LOS POZOS
FIGURA 22. HORIZONTES GUÍA DETERMINADOS CON BASE EN EL ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO DE LOS POZOS EXTRAPOLADOS AL CUBO SÍSMICO
FIGURA 23. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA INTERPRETACIÓN DE UNA SECCIÓN SÍSMICA DEL CUBO 3D DEL ÁREA PILOTO
FIGURA 24. SECCIÓN SÍSMICA DEL BLOQUE SÍSMICO DEL ÁREA PILOTO
FIGURA 25. REFLEXIONES SÍSMICAS QUE DEFINEN EL BASAMENTO EN EL ÁREA DE ESTUDIO.
FIGURA 26. MAPA ESTRUCTURAL 3D EN TIEMPO (TWT) DEL BASAMENTO SÍSMICO
FIGURA 27. IMAGEN DE LAS 4 SECUENCIAS SÍSMICAS MÁS PROFUNDAS DEL CUBO SÍSMICO
FIGURA 28. MAPA ESTRUCTURAL 3D EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 1 75
FIGURA 29. EN DERECHA SE OBSERVA LA SECCIÓN CROSS-LINE, CON EL TOPE DE LA SECUENCIA APLANADO (FLATTENED), HACIA LA IZQUIERDA SE APRECIA LA IMAGEN INLINE DEL CUBO,
FIGURA 30. MAPA ISÓPACO ENTRE EL BASAMENTO SÍSMICO Y EL TOPE DE LA SUPERFICIE 1
FIGURA 31. MAPA ESTRUCTURAL 3D EN TIEMPO PARA EL TOPE DE LA SECUENCIA 3 79
FIGURA 32. APLANAMIENTO DEL TOPE DE LA SECUENCIA 2(LÍNEA AZUL)
FIGURA 33. MAPA ISOPACO ENTRE EL TOPE DE LA SECUENCIA 2 Y BASE DE LA SECUENCIA 1
FIGURA 34. MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 3 83
FIGURA 35. IMAGEN DEL TOPE DE LA SUPERFICIE 3 APLANADO

FIGURA 36.	MAPA ISÓPACO ENTRE LA SUPERFICIE 2 Y LA SUPERFICIE 3 8	5
FIGURA 37.	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SUPERFICIE 4 8	7
FIGURA 38.	TOPE DE LA SECUENCIA NÚMERO 4 APLANADA (LÍNEA NARANJA)	8
FIGURA 39. 5	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA SÍSMICA 8	9
FIGURA 40.	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 6 9	1
FIGURA 41.	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 7 9	2
FIGURA 42.	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 8 9	4
FIGURA 43.	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 9 9	5
FIGURA 44.	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 10 9	6
FIGURA 45.	MAPA ESTRUCTURAL EN TIEMPO (TWT) AL TOPE DE LA SECUENCIA 11 9	8
FIGURA 46.	DIAGRAMA DE WHEELER PARA EL ÁREA PILOTO	9

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. INFORMACIÓN DATOS SÍSMICOS 3D EN LA ZONA DE ESTUDIO 4	12
TABLA 2. INFORMACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS 2D EMPLEADOS PARA REALIZAR EL AMARRE DE DATOS DE POZO AL BLOQUE SÍSMICO	13
TABLA 3. INFORMACIÓN DE LOS POZOS EMPLEADOS PARA UBICAR EDADES RELATIVAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	13
TABLAS 4 Y 5. EN LA TABLA 4 SE OBSERVA EL SISTEMA DE CÓDIGOS PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS A-B/C. EN LA TABLA 5 SE MUESTRA LOS TIPOS DE CONFIGURACIONES INTERNAS PARA DEFINIR LA VARIABLE C EN LOS MAPAS A-B/C (MODIFICADO DE MITCHUM, Y VAIL 1977)	17
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS FACIALES PARA AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN CLÁSTICOS EN UN ESCENARIO DEPOSITACIONAL DE PLATAFORMA (SANGREE Y WIDMIER 1977) 4	} 19
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS FACIALES PARA AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN DE CLÁSTICOS EN UN ESCENARIO DEPOSITACIONAL DE PLATAFORMA MARGINAL Y PENDIENTE. SEGÚN SANGREE Y WIDMIER (1977) (TOMADO DE REY 2008)	50
TABLA 8. EN ESTA TABLA SE MUESTRA LAS FORMACIONES IDENTIFICADAS EN LA CUENCA DE LA GUAJIRA EN LA PARTE <i>ON SHORE</i> CORRESPONDIENTES AL TIEMPO GEOLÓGICO REPRESENTADO EN LAS BIOZONACIONES PLANCTÓNICAS REALIZADAS EN LOS POZOS CERCANOS AL ÁREA DE TRABAJO	53

NOMENCLATURA

2D	Dos Dimensiones
3D	Tres Dimensiones
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
A/S	Relación Espacio de Acomodación y Suministro de Sedimento
CDSC	Cinturón Deformado del Sur Caribe
ECOPETROL	Empresa Colombia de Petróleo
GR	Registro Gamma Ray
ICP	Instituto Colombiano del Petróleo
Ма	Millones de Años
TPCG	Trillones de Pies Cúbicos de Gas
тwт	Tiempo Doble de Transito
SP	Registro de Potencial Espontáneo

RESUMEN

TÍTULO

ARMAZÓN CRONOESTRATIGRÁFICO CON BASE EN ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA Y DE SECUENCIAS PARA UN ÁREA PILOTO EN LA CUENCA DE LA BAJA GUAJIRA *OFF-SHORE* DEL CARIBE COLOMBIANO*

AUTOR

HERNAN DARIO MADERO PINZON **

PALABRAS CLAVE

Guajira off-shore, Estratigrafía sísmica, Estratigrafía de secuencias.

DESCRIPCIÓN

Elaborar un marco cronoestratigráfico relativo para el *off-shore* de la Baja Guajira es una tarea imprescindible para la reducción del riesgo exploratorio en esta zona del país. Este trabajo tiene como objetivo definir un armazón cronoestratigráfico para un sector de esta cuenca basado en estratigrafía sísmica y de secuencias, extrapolando e integrando información de pozos cercanos a un área piloto, ya que esta zona carece de ellos.

Para elaborar este armazón cronoestratigráfico se integró información estratigráfica y biocronológica de los pozos Tairona 1, Calamar1, Mero1 y Merluza1, denominados Pozos 1, 2, 3 y 4 ubicados al sur de área de estudio. Esta información fue inicialmente comparada con la carta de cambios relativos del nivel mar, encontrando importantes coincidencias en el comportamiento de la curva generada a partir de los datos de pozo con la carta global. A partir de esta información se identificaron 5 horizontes sísmicos guía, asociados con aumentos del nivel del mar, correspondientes a 2.0 Ma (Pleistoceno inferior), 4.0 Ma (Plioceno medio), 5.8 Ma (Mioceno superior), 13.0 Ma (Mioceno medio) y 17.0 Ma Mioceno inferior tardío las cuales sirven como referencia para la elaboración de este trabajo. Esta información se transportó a los datos del bloque sísmico del sector de la cuenca sobre la cual se realizó este estudio por medio de líneas sísmicas 2D con el amarre de los datos de pozo a estas líneas por medio de los *check-shot* de cada uno de los pozos.

El análisis estratigráfico realizado sobre la sísmica 3D en el área piloto determinó 11 secuencias sísmicas de tercer orden que van desde el Mioceno inferior hasta el Pleistoceno. Para la ubicación temporal de estas secuencia se utilizaron principalmente datos extrapolados de los pozos, adicionalmente se correlacionó con la carta global de variaciones del nivel del mar haq et al (1987).

^{*}Tesis de Maestría

^{**}Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez. Codirector: Freddy Mauricio Niño

SUMMARY

TITLE

CHRONOSTRATIGRAPHY FRAMEWORK BASED ON SEISMIC AND SEQUENCE STRATIGRAPHY TO AN STUDY AREA IN OFFSHORE OF BAJA GUAJIRA BASIN*

AUTHOR

HERNAN DARIO MADERO PINZON**

KEY WORDS

Guajira offshore, Seismic stratigraphy, Sequence stratigraphy.

DESCRIPTION

Develop a chronostratigraphic framework on Baja Guajira offshore is an essential task for reducing exploration risk in this area. This work aims to define a chronostratigraphic framework for a sector of this basin based on seismic and sequence stratigraphy, extrapolating and integrating information from wells near a pilot area, as this area lacks of them.

To make this chronostratigraphic framework this work integrated stratigraphic and biochronological data of Tairona 1 Calamar1, Mero1 and Merluza1 wells, called here as wells 1, 2, 3 and 4 located in the south of the study area. This information was initially compared to relative changes in sea level chart, finding significant similarities with behavior of curve produced from well data with global chart. From this information were identified five seismic horizons, associated them with increases in sea level, corresponding to 2.0 Ma (Early Pleistocene), 4.0 Ma (middle Pliocene), 5.8 Ma (Late Miocene), 13.0 Ma (middle Miocene) and Late Miocene 17.0 Ma which serve as reference for the preparation of this work. This information is transported to seismic data sector block of the basin on which a was performed by 2D seismic lines to tie the well data to these lines through the check-shot of each wells

Stratigraphic analysis on the 3D seismic in the pilot area has been identified 11 third-order seismic sequences ranging from miocene to pleistocene. For the temporary location of these sequences were mainly used to data extrapolated from wells, additional, it was correlated with global sea level variations chart hag et al (1987).

*Master Thesis

^{**}Faculty of Physical-Chemical Engineering, School of Geology. Directress: Juan Diego Colegial Gutiérrez. Codirectress: Freddy Mauricio Niño.

1. INTRODUCCIÓN

El *off-shore* del Caribe colombiano es un área con alto interés en la exploración petrolera, ya que en ésta región se presentan importantes manifestaciones de hidrocarburos, principalmente con la presencia de gas al norte en los campos Ballenas y Chuchupa con reservas probadas superiores a 7 TPCFG (Trillones de pies cúbicos de gas) en sedimentitas de edad Terciaria (Escalante, 2005), estos campos se encuentran ubicados en la cuenca de la Guajira *off-shore*, la cual se convirtió en una zona importante para la exploración de hidrocarburos para compañías como Exxon, Ecopetrol, Texaco y Total.

Según los estudios geológicos el *off-shore* colombiano se caracteriza por la presencia de cuencas sedimentarias de gran complejidad, en una zona de deformación activa en el límite de las placas Caribeña, Suramericana, Nazca y la microplaca de Costa Rica-Panamá.

Sobre esta cuenca se han realizado estudios estratigráficos (e.g. Anderson, 1927 y 1929; Allmon, et al,1993; Duque Caro, 1976; Guzman, 2003; Rey, 2007; Duarte et al, 2006; Olaya & Rey, 2004; Escalante, 2005; Ramirez, 2007; Molina, et al, 1999) y algunos tectónicos y estructurales realizados en la parte norte de la placa de Sur América que incluyen esta cuenca (Reyes & Clavijo, 1996; Adameck, et al, 1988; Hernandez et al, 2005; Cerón et al, 2007; Vence, 2008) con el objetivo de conocer la evolución geológica de la región.

Los principales trabajos estratigráficos llevados a cabo por la industria del petróleo en el Caribe colombiano los cuales incluyen la cuenca de la Guajira, han sido dirigidos a identificar elementos que permitan reducir la incertidumbre exploratoria en aguas someras y profundas. Estos trabajos emplearon principalmente estratigrafía sísmica, integrando diferentes datos como información de pozo

16

(Bioestratigráfica, Petrográfica, Sedimentológica y Registros eléctricos), contando principalmente con datos sísmicos 2D e información geológica regional.

Desde hace algunos años, Ecopetrol S.A. ha venido realizando estudios encaminados a adquirir, generar, interpretar y analizar datos que permitan contribuir al entendimiento geológico de la región para reducir el riesgo exploratorio en esta región. Entre la recolección de datos se realizó la adquisición sísmica 3D de alta resolución en el área conocida como Nazaret (Figura 1) en la cuenca de la Baja Guajira (*off-shore* Caribe colombiano).

La interpretación sísimica de este cubo mediante estratigrafía de alta resolución es fundamental para el entendimiento geológico de la región. La elaboración de un marco cronoestratigráfico confiable para este sector es un trabajo que puede dar pie a estudios encaminados a evaluar el potencial petrolifero de la zona y a la delimitación de un posible sistema petrolifero allí. Este marco cronestratigráfico se puede elaborar utilizando conceptos de estratigrafía de secuencias, basados principalmente en la información arrojada por la sísmica 3D integrada con los datos de pozo, identificando secuencias a partir de las variaciones de los ciclos relativos del nivel del mar (Mitchum, et al, 1977), ya que los hiatos en esta cuenca son diácronos y no pueden ser directamente extrapolados a partir de los pozos (Ecopetrol-ICP, 2007), para ello es necesario realizar análisis de estratigrafía sísmica con el fin de definir geometrías y patrones de los reflectores que permitan reconocer secuencias deposicionales o systems tracts que puedan tener un comportamiento regional con el fin de realizar correlaciones en tiempo a partir de los datos generados sobre los pozos cercanos al área de estudio por el grupo de estratigrafía del ICP (Molinares, et al, 2007).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La necesidad de aumentar las reservas de crudo a causa de una demanda altamente creciente, ha llevado a la industria petrolera a realizar exploración en zonas menos habituales y de difícil acceso como el *off-shore*. Frente a esta situación, Ecopetrol S.A. como operador directo y en otras ocasiones en asocio con otras compañías se encuentra realizando exploración en el *off-shore* del Caribe colombiano, el cual está sectorizado en 15 bloques de los cuales Ecopetrol hace presencia en 5 de ellos como operador directo, los cuales se denominan como, Bloque Fuerte Norte y Fuerte Sur, RC-9, RC-11 y RC12. De los anteriores bloques 3 forman parte de la cuenca Guajira *off-shore* (RC-9, C11, C12) (Figura 1).

Con el fin de reducir el riesgo exploratorio en esta región se han venido desarrollando diversos proyectos en el ICP (instituto Colombiano del Petróleo) con miras a contribuir en el entendimiento geológico de esta zona. Entre los alcances de estos proyectos se encuentra definir un armazón cronoestratigráfico para el área del *off-shore* del Caribe colombiano, basado en biocronología y estratigrafía sísmica (Ecopetrol, 2007).



Figura 1. Mapa de tierras ANH donde se muestran los bloques en exploración (Color amarillo) en el norte de Colombia, los bloques con las letras ECP son explorados por Ecopetrol S.A. El área de estudio corresponde al cuadro rojo denominado Bloque Nazaret. (Modificado de Mapa de Tierras ANH, 2010)

El problema específico de esta investigación radica en que la cuenca de la Baja Guajira (*off-shore* del Caribe colombiano) es un área con un importante interés de exploración en hidrocarburos, pero el sector de Nazaret (Figura 1) el bloque símico del área piloto aún no cuenta con un armazón cronoestratigráfico consistente, ya que no se ha publicado un análisis de estratigrafía de secuencias sobre este, el cual permita amarrar la nueva información bioestratigráfica y estratigráfica de los pozos ubicados en la plataforma continental del Caribe colombiano con esta zona del *offs-hore*. Estudios anteriores (Escalante 2005; Ramírez, 2007; ANH, 2007) permiten deducir que las secuencias sedimentarias de esta área son de edad Cenozoica (Figura 2), aunque no hay una división detallada de las mismas; lo cual se debe a que la zona carece de pozos exploratorios que permitan realizar un estudio estratigráfico o bioestratigráfico directo para fijar las edades de estas

secuencias, por esta razón los modelos de edades se basan en correlaciones desde el margen continental establecidos en reflexiones sísmicas cuyas edades no cuentan con una calibración apropiada (ICP, 2007), lo cual ocasiona que al realizar el amarre estratigráfico en ciertas direcciones se presenten diferencias cronológicas (Figura 3) como superficies diacronas.



Figura 2. Corte esquemático para la cuenca de la Guajira *off-shore*, en el cual se plantea la edad para las secuencias sedimentarias como Paleógeno-Neógeno (Tomado de ANH, 2007).

Por lo tanto, para reducir el riesgo exploratorio se hace necesario elaborar un marco cronoestratigráfico relativo para el sector Nazaret sur que permita ubicar en tiempo y espacio las secuencias estratigráficas presentes y sirva como elemento de partida para describir y cartografiar con mayor precisión los diferentes elementos del sistema petrolífero de la cuenca.

En los últimos años la Industria del petróleo ha impulsado numerosas campañas para adquirir información y generar la mayor cantidad de datos que permitan

facilitar la interpretación geológica de este sistema, entre ellas adquisición sísmica 3D, corazonamiento e información de registros de pozos en *off-shore* y *on-shore*, además se están llevando a cabo nuevas biozonaciones basados en grupos fósiles como foraminíferos (Planctónicos y Bentónicos) y nanofósiles que aumentan la precisión en la definición de edades relativas; el ICP ha creado el proyecto de investigación *off-shore* para realizar dicha interpretación con la mayor confiabilidad posible.



Figura 3. Guajira *off-shore*, Correlación con orientación SW-NE de algunos pozos de la subcuenca de Nazaret (Baja Guajira). Las líneas sólidas corresponden a topes de secuencias realizadas por Texaco 2000, las líneas interrumpidas corresponden a líneas de tiempo propuestas por Duque y Reyes 1999. (Compilación de datos)

La estratigrafía de secuencias, utilizada en la interpretación sísmica del cubo sísmico de alta resolución de la zona, integrada con el análisis de datos de pozo, es una herramienta que contribuye a mejorar el entendimiento geológico y cronoestratigráfico del área, identificando ambientes de depositación con base en las propiedades y características de las diferentes facies sísmicas reconocidas. Determinando con esta herramienta, secuencias depositadas de acuerdo con los ciclos relativos del nivel del mar, los cuales pueden asociarse a cambios A/S, es decir, en el espacio de acomodación en relación con el suministro de sedimento, caracterizando procesos sedimentarios, geometrías de las secuencias depositacionales y su distribución espacial y temporal con el fin de definir zonas prospectivas para la explotación de hidrocarburos.

La disposición de los datos 3D del programa sísmico Nazaret en un sector *off-shore* de la baja Guajira hacen de esta zona un área interesante para realizar un estudio de estratigrafía sísmica con el fin de ayudar a la elaboración de un marco cronoestratigráfico más robusto para este sector de la Cuenca; el cual sirva de apoyo a trabajos posteriores que contribuyan al entendimiento evolutivo geológico del *off-shore* del Caribe colombiano.

Además posiblemente esta área se puede asociar con mayor desarrollo de rocas almacenadoras, asociados a secuencias depositacionales del *lowstand systems tracts* y *transgresive systems tracts*, las cuales son de alto interés en exploración de hidrocarburos.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo es la distribución espacial y temporal de las 11 secuencias sísmicas que conforman la cuenca de la Baja Guajira en el área piloto del programa sísmico 3D Nazaret?

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un marco cronoestratigráfico con base en estratigrafía sísmica y de secuencias para una área piloto del sector conocido como Nazaret (Cuenca Baja Guajira) al norte de la Sierra Nevada de Santa Marta, para contribuir con la elaboración de un armazón sísmico estratigráfico en la parte norte del Caribe colombiano.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar unidades de secuencias depositacionales o systems tracts enmarcándolos dentro de los cambios relativos del nivel del mar.
- Determinar el orden y magnitud de los ciclos relativos del nivel del mar en los cuales fueron depositadas las secuencias reconocidas.
- Identificar ciclos y secuencias que estén asociados a eventos regionales para realizar una correlación con los nuevos datos estratigráficos y bioestratigráficos, éstos últimos actualizados por el ICP para los pozos de la cuenca ubicados cerca al bloque sísmico 3D de Nazaret.

5. ANTECEDENTES

Los primeros estudios realizados en la cuenca de la Guajira datan de las decadas de los 20 y 30 realizados por Lleras Codazzi y Stutzer los cuales dan a conocer la geologia de la Guajira de forma general. Paralelamente, Anderson en 1927 realiza los primeros estudiós de las rocas marinas del norte de Colombia, estos estudios se basaron en moluscos y descripciones de secciones de campo cerca a Barranquilla. Posteriormente, autores como Renz (1960) y Rollins (1965) discuten ampliamente la estratigrafía de la parte oriental de la cuenca durante el Mesozoico y el Cenozoico basados en datos estratigráficos y paleontológicos, estableciendo una nomenclatura litoestratigráfica, situandola dentro de un contexto cronoestratigráfico. Estos trabajos se enfocan principalmente para las rocas continentales. Julivert (1968) realiza un análisis de estos trabajos, mostrando las principales diferencias que existen entre cada uno de ellos en cuanto a definición de los límites de algunas formaciones del Cretácico.

La adquisicion de datos sísmicos 2D en la Guajira *off-shore* data desde finales de los años 60, con más de 33.000 km de perfiles sísmicos adquiridos hasta la actualidad y 35 pozos perforados. A partir de estos datos se han realizado numeroso trabajos que integran esta información para dar un modelo geológico más detallado y preciso.

A continuación se presentan los informes más relevantes para el desarrollo de este trabajo. La mayoría de estos trabajos son elaborados para Ecopetrol S.A. en esta zona. Algunos de ellos corresponden a informes confidenciales y otros son publicaciones técnicas.

Duque y Reyes 1999 integran datos de bioestratigrafía con información sísmica, haciendo énfasis en establecer intervalos bioestratigráficos reconocibles en la interpretación de secciones sísmicas (Figura 4). Definieron nueve zonas

24

bentónicas para la alta Guajira y seis para la Baja, las cuales fueron calibradas con zonaciones planctónicas. Posteriormente este trabajo realizó un amarre de los límites con la sísmica disponible para realizar el primer armazón cronoestratigráfico de la zona. Este trabajo se quiso extender a realizar un amarre *onshore-offshore*, el cual presentó un gran problema, ya que los pozos perforados en el área *off-shore* presentan un pobre recobro de ejemplares planctónicos y además estos presentaban fenómenos de retrabajamiento.



Figura 4. Definición de horizontes sísmicos a partir de marcadores bioestratigráficos sobre pozos *off-shore* cercanos al área de estudio, Según Duque y Reyes 1999. Esta figura fue creada a partir de los datos obtenidos de este trabajo.



Figura 5. Esquema comparativo de las secuencias definidas por Rubio y Ramirez (2000) a la derecha y TEXACO (1999) en la parte izquierda. Se puede observar las diferencias en la definicion de las secuencias y las edadeas de las mismas. Tomado de Ramirez (2007).

Texaco-Shell y Ecopetrol (1999)con base en la información bioestratigráfica disponible en la cuenca, obtenida de diferentes pozos de la Guajira, realizan una síntesis que inicialmente se sustenta en la definición preliminar de secuencias cronoestratigráficas (Figura 5), el estudio es base para la interpretación de la evolución geológica de La Guajira pero presenta algunas inconsistencias respecto al trabajo de Duque y Reyes (1999) en la asignación de edades de los reflectores sísmicos (Figura 3).

Rubio R. y Ramirez V. (Ecopetrol,2000) hacen una definición de secuencias cronoestratigráficas (Figura 5) en las cuales se cartografían y caracterizan estas según su potencial petrolífero, adicionalmente se compilan todos los conceptos exploratorios empleados en la cuenca y se establecen los diferentes tipos de plays probados y por comprobar.

Ecopetrol en (2000), realiza un levantamiento geoquímico de superficie en La Baja Guajira, que permite establecer la ocurrencia de zonas con concentraciones anómalas, que pueden reflejar acumulaciones en el subsuelo. La evidencia geoquímica indica la presencia de hidrocarburo de tipo termogénico, generado posiblemente de rocas cretácicas registradas en subsuelo al sureste de La Baja Guajira.

Olaya et, al (2002) integra nueva información bioestratigráfica a los datos sísmicos definiendo dos prospectos importantes en la Guajira *off-shore*. En los últimos años el *off-shore* del Caribe colombiano a tomado gran importancia en cuanto a exploración de hidrocarburos, por esta razón en el 2003 Ecopetrol realiza un nuevo trabajo con el fin de determinar la existencia y calidad de roca sello en el *off-shore* basados en un estudio de estratigrafía de secuencias (Reyes, et al, 2003).

27

En la zona han sido realizados estudios enfocados a la caracterización y evaluación del sistema petrolifero al igual que al análisis del riesgo exploratorio, examinando en mayor detalle la estratigrafía de la región para contextualizarla en un marco cronoestratigrafico confiable, apoyados en datos de pozos, afloramientos e interpretación sísmica 2D; a continuación se explican brevemente algunos de estos estudios que constituyen el conocimiento base para el desarrollo del presente estudio:

Olaya y Rey (2004), realizan un trabajo basado en estratigrafía sísmica para el área del *off-shore* en la Baja Guajira, en su informe mencionan, la necesidad de reprocesar la sismica 2D o adquirir datos 3D. Lo anterior con el fin de realizar un analisis sísmico estratigráfico detallado que permita cartografiar y caracterizar mejor algunos rasgos sísmicos, con el fin de localizar posibles zonas de acumulación.

Duarte et, al. (2006), realizó un trabajo regional (Caribe colombiano) con el fin de establecer un marco cronoestratigráfico para las cuencas Guajira y Sinú *off-shore*. Definiendo 6 secuencias regionales caracterizando ambientes marinos y transicionales. Identificando controles sedimentarios como variaciones eustáticas y tectónicas. Además, realiza el reconocimiento de elementos del sistema petrolífero, como posibles zonas acumuladoras y sellos con base en secuencias deposicionales o *systems* tracts, reconociendo 9 superficies puestas en un contexto cronoestratigráfico a partir de datos paleontológicos (Foraminiferos Planctónicos y Bentónicos). Ubicando las 6 secuencias sismicas definidas a través del *off-shore* del Caribe colombiano con edades que van desde el Cretaceo hasta el Pleistoceno (Figura 6).

Ramírez (2007), realiza un armazón estratigráfico y un análisis del sistema petrolífero para la cuenca de la Guajira, incluyendo el *off-shore* y el *on-shore*, diferenciando dos procesos de generación de hidrocarburos (Biogénico y

28

termogénico) para diferentes secuencias en la columna estratigráfica. Además, identifíca estratos del Eoceno, Mioceno y Oligoceno como principales rocas fuente para la cuenca y asocia las rocas reservorio y sello con las secuencias sísmicas.



Figura 6. Marco cronestratigráfico costa afuera para la cuenca de Colombia la cual incluye las cuencas de la Alta y la Baja Guajira elaborado por Duarte (2006).

Los trabajos realizados previamente recomiendan la necesidad de adquirir nueva información que permita aumentar el conocimiento geológico de la cuenca. Por esta razón, en los últimos años las compañías petroleras, han adquirido información sísmica 3D entre otras, para ser evaluada con el fin lograr este objetivo y reducir el riesgo exploratorio en esta parte de país.

La ubicación temporal de las secuencia sedimentarias es importante desde el punto de vista científico y comercial. La generación de un marco cronoestratigráfico a partir de datos 3D es un trabajo significativo ya que ademas de la distribución temporal de la secuencias se puede observar la geometria de estas y su distribución espacial. Observar una secuencia en tres dimensiones permite aumentar el conocimiento de esta y reducir la incertidumbre en el riesgo exploratorio ya que la definición de las secuencias es mucho más precisa.

6. MARCO TEÓRICO

La estratigrafía de secuencias es una herramienta que permite estudiar la respuesta sedimentaria de una cuenca, la cual se origina por las variaciones del nivel base, es decir, relación espacio de acomodación y suministro de sedimento (A/S) (Figura 7) a lo largo del tiempo geológico. Esto se hace mediante la identificación y análisis de patrones sedimentarios que son el reflejo de esta interacción entre el espacio de acomodación y sedimento disponible, representados con ciclos estratigráficos. Esta es una herramienta que permite comprender el registro geológico de la Tierra. Entendiendo estos cambios a escala global y local, se puede mejorar aspectos económicos tanto en exploración como producción de hidrocarburos (Catuneanu, 2006).



Figura 7. Esquema representativo del concepto de estratigrafía de secuencias. La figura superior presenta el concepto de nivel base. En la parte inferior se exhibe la simbología con la que se representan los cambios del nivel base en una columna o registro sedimentario (Modificado de Wheeler 1964).

La aplicación de la estratigrafía de secuencias al registro sísmico ha causado gran impacto en la industria del petróleo tanto en exploración como en producción, ya que entender la configuración del subsuelo, la distribución espacial de las unidades productoras, los sellos y unidades generadoras situadas dentro de un marco geocronológico son de vital importancia para reducir el riesgo exploratorio y optimizar estrategias de explotación de los campos de gas y petróleo alrededor del mundo (Alsharhan & Whittle, 1995,Beaubouef, 2000; Busch & Daniel, 1974; Cheong, 1992, Peters et al,2000, Prather, et al, 2000). La aplicación de esta herramienta a nueva información y de mejor resolución, recopilada en algunos sectores de la cuenca de la Baja Guajira *off-shore*, permitirá mejorar el conocimiento sobre estas áreas especificas, y posteriormente al de la cuenca en un marco regional.

6.1. MARCO GEOLÓGICO

La cuenca de la Guajira se encuentra ubicada en el norte de Colombia. Esta cuenca limita hacia el suroccidente por la falla de rumbo conocida como la falla de Oca, al norte por el cinturón deformado del Caribe sur, La cuenca cuenta con un área aproximada de 49050 km², de ellos, 36450 km² aproximadamente están en el *off-shore*. La región de la Guajira se encuentra dividida en dos subcuencas, conocidas como Alta y Baja Guajira, cada una con una evolución tectónica propia. La subcuenca de la Alta Guajira, se caracteriza por el desarrollo de una tectónica transpresiva, mientras la subcuenca de la Baja Guajira se distingue por la evolución en un ambiente tectónico transtensivo (Ramos, 2005). Estas subcuencas se encuentran divididas por un rasgo estructural importante denominado la falla de Cuiza (Figura 8).



Figura 8. Ubicación Cuenca de la Guajira y sus límites, el área sombreada corresponde a la subcuenca de la Baja Guajira. (Modificación de GeoMapApp versión 2.4.2 y Google Earth).

El presente trabajo se desarrolla en el *off-shore* del norte de Colombia (Figura 9), en la parte sur-occidental de la cuenca de la Guajira, conocida como subcuenca de la Baja Guajira *off-shore*, en una zona ubicada al norte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Las cuencas sedimentarias de esta región se prolongan del continente norte colombiano hacia el *off-shore* manteniendo la mayoría de sus características tectono-estratigráficas (Duarte, et al, 2006).

6.2. MARCO TECTÓNICO

La evolución geológica del norte de Colombia se encuentra influenciada por la interacción de las placas Suramericana, Caribe, Nazca y la microplaca de Costa Rica-Panamá, localizándose en una zona activa creando cuencas de gran complejidad geológica (Figura 10). La evolución tectono-sedimentaria Cenozoica del Norte de Colombia se relaciona directamente con la convergencia entre las placas tectónicas Caribe y Suramericana, siendo el movimiento relativo de la

Placa Caribe el "motor" de la generación, rotación y translación de las cuencas y bloques tectónicos del norte de Colombia hasta su posición actual (Hernández et al, 2006).



Figura 9. Ubicación de la zona de estudio situada al norte en el Off-shore del Caribe colombiano, la zona de estudio se encuentra ubicada dentro del bloque Nazaret (Tomadas y modificadas de GeoMapApp versión 2.4.2).

La colisión de Cuba con las Bahamas sumado a otros eventos globales generaron el cambio de movimiento relativo del oeste de Suramérica, movimiento que ha creado convergencia en esta placa, la cual contiene todos los elementos necesarios para llegar a pensar en esta zona como objeto exploratorio importante (Cerón, Kellogg, & Ojeda, 2007).



Figura 10. Representación de la interacción de las placas Caribe, Suramericana, Cocos, Nazca y la microplaca de Costa Rica y Panamá hace 10 Ma. (Pindell & Kennan, 2009).

El proceso de interacción entre estas placas tectónicas, también ha generado diferentes estilos estructurales al norte de Colombia. La cuenca de la Baja Guajira, presenta un estilo estructural dominado por fallas de rumbo dextrales, las cuales conforman un sistema transtensivo afectando sedimentos del neógeno y el paleógeno (Ramos, 2005).

La región del Caribe colombiano se ha visto afectada por cuatro grandes ciclos tectónicos, los dos primeros relacionados entre las orogénias de Grenville, Caledoniana y Alleghaniana, la cuales se dieron durante el Proterozoico y el Paleozoico, formando las rocas que conforman el basamento de la Cordillera Central, Oriental y la Sierra Nevada de Santa Marta y el control sedimentario al norte de la placa de Sur América (Ramos, 2005); Las dos siguientes en el Mesozoico, con la subduccion de la placa Caribe bajo la placa Suramericana, y el Cenozoico correspondiente a la orogenia andina. Esta última de gran importancia para el entendimiento de la sedimentación en esta parte del *off-shore,* Ya que la mayor parte del registro sedimentario allí, corresponde a esta etapa.

Los movimientos relativos de la Placa del Caribe respecto a la placa Suramericana, han podido producir rotación y translación, generando cuencas y bloques tectónicos levantados hasta su posición actual en el norte de Colombia (Hernández et. al., 2001). El fallamiento y deformación que haya acomodado la rotación y translación anterior, pueden determinar el potencial de la prospectividad, expresado en el tamaño y tipo de estructuras que se hayan podido formar durante tal evolución (Hernández, 2006).

6.3. ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA Y DE SECUENCIAS

La estratigrafía de secuencias aplicada a rocas sedimentarias marinas, se puede definir como el estudio de las rocas sedimentarias ubicadas dentro de un contexto cronoestratigráfico, partiendo de la premisa en la cual la deposición de las secuencias marinas han sido controladas por ciclos de descensos y aumentos del nivel del mar, y que las características de estas secuencias pueden variar de una cuenca a otra si varían las condiciones de aporte de sedimentos y control tectónico (Weimer & Slatt, 2007).

36

Partiendo del la hipótesis planteada, la cual supone que las secuencias sedimentarias depositadas durante aumentos del mar, cuentan con una distribución uniforme y de mayor extensión sobre la cuenca, lo que indica que estas superficies de máximas inundaciones presentan mayor seguridad en cuanto a la extrapolación de edades a partir de datos de pozo. Estas características, hacen de las superficies asociadas a estos eventos, guías confiables para la elaboración de un marco cronológico. Como la estratigrafía sísmica tiene como primer objetivo definir paquetes de reflexiones sísmicas genéticamente relacionadas las cuales son observadas sobre secuencias sísmicas y *systems tract*, siendo estas el producto de la sedimentación durante las diferentes etapas en las variaciones del nivel del mar, entonces la integración de estos conceptos, aplicados sobre el área de estudio son un paso importante para la elaboración de un marco cronoestratigráfico en esta área.

Una secuencia sísmica es una secesión de deposición identificada en una sección sísmica (Mitchum, 1997). Esto significa que es una sucesión relativamente similar de reflectores sísmicos, limitados hacia la base y tope por secuencias fronteras (Figura 11). Estos límites pueden ser inconformidades o conformidades relativas (Vail, et al, 1977). Algunas veces, es posible identificar este paquete de reflectores por sus geometrías, representando una sucesión de sistemas depositacionales genéticamente relacionados (*Systems Tract*) y que son interpretados para definir durante cuáles cambios eustáticos fueron depositados (Posamentier, et al., 1988). Los *systems tract* son unidades estratigráficas genéticamente relacionadas la cuales fueron depositadas durante periodos o ciclos de cambios relativos del nivel del mar.

37



Figura 11. Sección estratigráfica generalizada de una secuencia. Los límites están definidos por las superficies A y B las cuales son inconformidades y conformidades relativas (Tomado y modificado de Mitchum, et al, 1977).

Lowstand systems Tract (LST), el cual incluye depósitos que son acumulados después de un aumento relativo de nivel del mar. Este systems tract es depositado directamente sobre la superficie que indica la mayor caída del nivel del mar.

Transgressive systems tract (TST), comprende depósitos acumulados al iniciar la transgresión marina, este se encuentra justamente sobre la superficie que marca el *Lowstand systems tract*.

Highstand Systems Tract (HST) es la que marca la mayor inundación y Regressive System Tract (RST) son secuencias depositadas durante la regresión marina, es decir, cuando el nivel del mar empieza a descender, estos sistemas depositacionales son reconocidos por la terminaciones de la reflexiones sísmicas, las cuales permiten identificar a cuál de los systems tract corresponde la secuencia delimitada. Estas terminaciones pueden ser definidas según su
posición con respecto a la superficie limitante (Figura 12) y se describen de la siguiente manera (Vail et al, 1977).



Figura 12. Diagrama de las diferentes terminaciones de los reflectores sísmicos y sus respectivos nombres. (Modificado de Vail, et al, 1977)

Downlap: Frecuentemente es visto en la base de progradación de clinoformas, usualmente representa la progradación de un margen talud – cuencas en aguas profundas.

Onlap: Es reconocido en datos sísmicos por terminaciones de reflexiones de bajo ángulo en contra en una superficie sísmica de mayor pendiente.

Toplap: Se define como la terminación de reflectores inclinados en contra de una superficie sísmica suprayacente de bajo ángulo, este representa el limite depositacional más proximal de la cuenca.

Truncación Erosional: Es la terminación de un estrato contra una superficie erosional suprayacente.

Mediante la identificación de estas terminaciones de reflectores se podrá delimitar estas secuencias sobre las secciones obtenidas del cubo sísmico. Con la ubicación de datos biocronológicos sobre estas secuencias y la comparación de estas con la carta de variación de nivel del mar propuesta por Haq (1987) será posible crear un marco geocronológico para este sector de la cuenca.

7. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el presente trabajo se divide en dos partes (Figura 13), la primera corresponde al análisis sísmico estratigráfico del cubo sísmico, el cual incluye elaboración y análisis de mapas isópacos. La segunda fase se enfoca en el análisis de pozos y posterior amarre de esta información a líneas 2D con el fin de extrapolar e integrar esta información al bloque sísmico del área piloto y ubicar edades relativas de las diferentes secuencias a partir de este ejercicio.



Figura 13. Metodología para la interpretación cronoestratigráfica basado en estratigrafía de secuencias. La fase 1 se basa en el análisis de estratigrafía sísmica para el cubo sísmico, La segunda fase corresponde al análisis estratigráfico de los pozos de referencia para realizar el amarre e integración de los datos.

El análisis estratigráfico de los datos sísmicos se realizó basado en las metodologías propuestas por Vail (1997) y Widmier y Sangree (1997). La información y el análisis bioestratigráfico se toma del grupo de Bioestratigrafía del ICP correspondiente a datos del 2007. El análisis estratigráfico de los pozos se

elaboró fundado en la descripción litológica y de registros de cada uno de ellos, empleando el método de reconocimiento de patrones de apilado y en el establecimiento de ciclos estratigráficos. La metodología planteada para la elaboración de este trabajo tiene como base la recopilación de datos, la cual se presenta a continuación.

7.1. RECOPILACIÓN DE DATOS

El bloque sísmico ubicado al norte de la Sierra Nevada de Santa Marta abarca un área superficial de aproximadamente 988 km², la profundidad del bloque se encuentra en tiempo doble de transito. El cubo cuenta con la siguiente información:

Programa Sísmico Nazaret Sur 3D			
Ubicación	Baja Guajira off-shore		
Profundidad			
(TWT)	9000 ms		
Longitud en X	31.6 km		
Longitud en Y	31.3 km		
Área Superficial	988 km ²		
Range X-line	2001-6001 step 2		
Range In-line	1535-2800 step 1		

Tabla 1. Información datos sísmicos 3D en la zona de estudio.

Se trabajó con aproximadamente 800km de líneas sísmicas 2D con información de pozo y amarre al cubo sísmico. Las líneas interpretadas fueron migradas y preapiladas en tiempo, e igualmente se encuentran a tiempo doble de transito. En la siguiente tabla se encuentra la información de estas líneas.

Línea Sísmica	Año de Adquisición	Programa Sísmico
c-82-940	1982	Caribe Regional
c-1419	1982	Caribe Regional
Line_NAZ-99-101	1999	Nazaret
Line_NAZ-99-105	1999	Nazaret
Line_NAZ-99-141	1999	Nazaret
Line_NAZ-99-147	1999	Nazaret
Line_NAZ-99-7300	1999	Nazaret
Line_NAZ-99-8400	1999	Nazaret

Tabla 2. Información de los datos sísmicos 2D empleados para realizar el amarre de datos de pozo al bloque sísmico.

Los pozos cuentan con el registro litológico, registros de GR y SP, así como con la información bioestratigráfica; esta última ha sido revaluada y revisada en los últimos años por el grupo de estratigrafía del ICP, asesorados por el Doctor Herman Duque.

Pozo	Año	Compañía Perforadora	TD	Estado	Autores
Merluza	1989	Texaco	9750	Seco	Duque Caro
Calamar	1982	Texaco	8511	Gas-NC	Duque Caro
Mero	1983	Texaco	15720	Seco	Duque Caro
Tairona	1979	Provincia Pet	17900	Seco	Duque Caro

Tabla 3. Información de los pozos empleados para ubicar edades relativas en el área de estudio.

7.2. PRIMERA FASE

La primera fase se enfoca en el análisis sísmico-estratigráfico del cubo sísmico. Esta etapa inicial es independiente de la segunda fase, puesto que la delimitación de las secuencias sísmicas es en cierta forma independiente de la información de pozo, ya que esta se basa en el patrón de los reflectores sísmicos.

7.2.1. Estratigrafía Sísmica

Para la interpretación estratigráfica del cubo sísmico del sector, se llevaron a cabo los siguientes pasos para la fase 1 (Mitchum y Vail 1977).

- Análisis y reconocimientos de secuencias.
- Análisis y reconocimiento de facies sísmicas interpretación y cartografía.
- Elaboración de cartas cronoestratigráficas basada en cambios relativos del nivel del mar

Inicialmente se definieron, sobre la sección sísmica los conjuntos de reflectores genéticamente relacionados llamados secuencias sísmicas/systems tract. Para este paso se reconocieron los límites de secuencias, identificando patrones de terminación de los reflectores. En La figura 14 se observa la definición de 12 secuencias sísmicas divididas por líneas continuas. Las dos secuencia más profundas se dividen entre sí por la terminación *onlap* de los reflectores de la secuencia más profunda sobre el basamento, y la segunda secuencia por tener el mismo patrón de terminación sobre la secuencia 1, posteriormente la tercera secuencia, la cuarta y la quinta se dividen por diferencia entre los patrones de los reflectores en cuanto a continuidad amplitud y frecuencia, por lo tanto se limitaron superficies concordantes. Definiendo las secuencias posteriores por sus terminaciones *downlap*. Estas secuencias no presentan una continuidad clara a través del cubo sísmico, lo cual dificulta la elaboración de mapas a los topes de cada secuencia sísmica dentro del cubo sísmico.



Figura 14. Delimitación de secuencias sísmicas establecidas a partir de terminación de reflectores y diferencia con base en las características (Amplitud, frecuencia y continuidad) de los reflectores.

Después de identificar los limites de secuencias, se realizó el análisis basado en la forma externa, arquitectura interna y la terminación de los reflectores superior e inferior de las secuencia reconocidas. Inicialmente se procede a identificar la relación de de terminación de los reflectores hacia la base y tope de la secuencia, así como configuración interna de los reflectores (Figura 15), con el fin de crear mapas A-B/C (Sangree y Widmier 1997) para el reconocimiento de secuencia y facies sísmicas (Tablas 4 y 5) y determinar a partir de estos datos posibles ambiente de depositación y profundidad en que estas pudieron ser depositadas (Tablas 6 y 7).



Figura 15. Configuración interna de los reflectores, aquí se muestran esquemas que representan las características internas de los reflectores como frecuencia, amplitud y continuidad. (Widmier y Sangree 1997).

Tabla 4

CODIGOS DEL SISTEMA A-B/C		CONFIGURACIÓN DE REFLECTORES (DENTRO DE LAS SECUENCIAS)
TERMINACIONES LIMITE SUPER	RIOR (A)	CONFIGURACIONES PRINCIPALES
TRUNCACIÓN EROSIONAL	(Te)	PARALELA
(TOPLAP) CONCORDANTE	(Top) (C)	SUBPARALELA
	(-)	DIVERGENTE
TERMINACIONESLIMITEINFERI	OR (B)	CLINOFORMAS PROGRADACIONALES
(ONLAP) (DOWNLAP) CONCORDANTE	(On) (Dwn) (C)	SIGMOIDE OBLICUA (COMPLEX) SIGMOIDE-OBLICUA (SHINGLED) CLINOFORMAS (HUMMOKY)
CONFIGURACIÓN INTERNA (C)		CAÓTICA
PARALELA	(P)	
DIVERGENTE CAOTICO	(D) (C)	
	(W)	
(MOUNDEN) (MOUNDEN) PROGRADACIÓN OBLICUA) PROGRADACIÓN SIGMOIDAL REFLEXIONES LIBRES (SHINGLED)	(DM) (M) (Sb) (SIG) (Rf) (Sh)	LISAS (HUMMOKY) ONDULADAS LENTICULAR REGULARES INTERRUMPIDAS IRREGULARES (CONTORTED) UNIFORMES VARIABLES

Tabla 5

Tablas 4 y 5. En la tabla 4 se observa el sistema de códigos para la elaboración de mapas A-B/C. En la tabla 5 se muestra los tipos de configuraciones internas para definir la variable C en los mapas A-B/C (Modificado de Mitchum, y Vail 1977).

Para realizar el análisis de secuencias es necesario contar con información de pozos que pueda ser amarrada a los datos sísmicos, con el fin de definir facies que permitan diferenciar las diferentes secuencias sísmicas reconocidas y determinar cambios de acomodación a partir de los patrones de apilamiento de las parasecuencias. En esta fase se realiza un chequeo de las edades para ubicar las diferentes secuencia en un marco geocronológico. Lo anterior se lleva a cabo a partir de las dataciones determinadas por el grupo de Estratigrafía del ICP. Estas dataciones se basaron en datos bioestratigráficos, la información se tomará de los pozos Tairona, Calamar, Mero y Merluza los cuales pueden ser amarrados a líneas símicas que servirán para ser extrapoladas al cubo sísmico. El

amarre de la información de pozos a la sísmica se realiza a partir de los datos del *check shot* de cada uno de los pozos.

De igual manera se deben definir la jerarquía de los ciclos estratigráficos, sobre las secuencias sísmicas reconocidas (Prather, et al, 2000), esto con el fin de definir la resolución de los resultados obtenidos y realizar comparaciones posteriores con cartas globales de variaciones eustáticas y cambios relativos del nivel del mar.

SEISMIC FACIES UNIT	ENVIRONMENT	EXTERNAL FORM	REFLECTIONS AT BOUNDARIES	INT CONFIG.	AMPLITUD	
1. High continuity High amplitude	Wave transported shallow marine clastics and paralic desposits	Sheet or wedge	Top concondant base concordant or gentle onlap or downlap	Parallel to divergent	Rel. High but variable	
2. Discont to continuous	(a) Marine clastics deposited by low energy turbidity currenst or wave transported.	Sheet or wedge	Top concordant base concordant or gentle onlap or downlap	Parallel to divergent	Very low to low	
	(b) Fluvial and wavetransported nearshore clastics	Sheet or wedge	gentie onlap or downlap	Parallel to divergent	Low	
3. Discont variable amplitud	Non marine clastics deposited by Rivers and marginal marine processes	Sheet or wedge	Top concordant base concordant or gentle onlap or downlap	Parallel to divergent	Low to righ, variable with frequent high amp. Bursts	
4. Mounded Continuity is variable	Shelf delta complex	Low Mound May be elongate	Top concondant Gentle downlap at base	Mounded to sigmoid and divergent	Variable. Often low with bursts discont high Ampl	
5. Sheet drape	Deep marine hemipelagic	Sheet drape	Top concordant. Base concordant or subtle on lap	Parallel	Relatively low to moderate	SHEELORAPE (LOW ENERGY)
6. Slope front fill	Deep water sediment complex often related to submarine fans	Large fan	Top concordant Onlaps updip, and downlaps downdip	Parallel to sub-parallel	Low to moderate	
7. Onlap fill	Relatively low velocity turbidity current deposits	Basin, Trough, Channel, and Slope- front fill	Usually top concordant. Base onlap	Varies – divergent, mounded or chaotic	ONLAP FILL	SLOPE-RONT FILL GUW ENERGY
8. Mounded (fan complex)	Deep water complex often at mouth of submarine canyon. Incluides turbidites, mass movement and hemipelagic deposits. Relates to major subaerial drainage Systems.	Fan	Onlap of overlying units, with base downlap FAA COMPLEX SIMPLE FAA COMPLEX SIMPLE	FAN COMPLEX COMPOUND	Variable, tends to be low. Often decreases with increasing depth – high energy absorption	
9. Mounded (ontourite)	Deep water sediment complex epos. By deep marine currents. Probably mainly fine- grained clastics	Elongate mound	Truncated / concordant at top. Base downlap	Asymmetric mounds	Variable CONTOURITE MOUND	
10. Mounded onlap fill	Relatively high velocity turbidity current deposits	Mounded; Basin, Trough, Channel and Slope-front fill	Concordant or erosional truncation at top. Base onlap	Irreg. Mounded to parallel	Variable. Dreceases as cont. decreases	MOUNDED ONLAP FLL
11. Chaotic fill	Gravity, mass transport and high energy turbidity current sediments. Lithology depends on upslope sediment source	Basing, Trough, Channel, and Slope- front fill. Lower mounds tend to show wavy, sub-parallel chaotic patern. Higher mounds show more contorted and discordante chaotic patterns.	Unit onlaps at base, but individual onlap terminations rare because of reflection patern. Top concordance or revisional fruncation seen where reflection segments can still be observed.	Chaotic and contorted	Ranges from high	CHAOTIC FILL

Tabla 6. Características faciales para ambientes de depositación clásticos en un escenario depositacional de plataforma (Sangreey Widmier 1977).

SEISMIC FACIES UNIT	ENVIRONMENT	EXTERNAL FORM	REFLECTIONS AT BOUNDARIES	INT CONFIG.	AMPLITUD
1. Sigmod Prgradational	Clays and muds of low energy turbidity currents and hemipelagic depos. From low velocity currents. Shelf topsets may involve wave or fluvial transp.	Elongate lens or low fan	Top concondant Base downlap	Sigmod in dip direct, parallel to sub-par. Along depositional streike	Moderate to high, uniform
2. Oblique progradadational Subzones		Fan ORLIOUE			
(a) Delta plain(b) Delta front upper clinoform(c) Lower clinoform	Shelf margin deltaic, incl. Delta plain, delta front, prodelta. Whith strong bottom currents, may also be found in deep	E TANGORTINA	 (a) Concord. at top if delta plain topsets present. (b) Toplap. Truncation at top. 	(a) Parallel (b-d) Oblique in depositional dip direct. Parallel or gently oblique to	(a-b) Moderate to high
(d) Prodelta bottomsets	water	e. SKINGLED	(d) Downlap at base	sigmoid parallel to depos. Strike.	(d)Moderate to low

Tabla 7. Características faciales para ambientes de depositación de clásticos en un escenario depositacional de plataforma marginal y pendiente. Según Sangree y Widmier (1977) (Tomado de Rey 2008).

7.3. SEGUNDA FASE.

La Fase 2 corresponde al análisis estratigráfico de los pozos y amarre a la información sísmica 2D. Para ello se trabajó con la descripción litológica, bioestratigráfica y con el comportamiento del registros de pozo (GR, SP, Densidad y Neutrón) de los pozos, a partir de estos se determinaron ciclos de variaciones de la relación A/S, identificando ciclos de segundo y tercer orden (Figura 16); de esta manera se identificaron los intervalos correspondiente a los aumentos de nivel base, así como la edad relativa de dicho intervalo para ubicarlas en las líneas 2D (Figura 16). Estas edades son definidas a partir de datos paleontológicos por el grupo de bioestratigrafía de ICP.

7.3.1. Bioestratigrafía. El principal grupo fósil en el cual se fundamenta la caracterización bioestratigráfica del sector en la cuenca se basa en la biozonación

de foraminíferos, a partir de este grupo se puede determinar la discontinuidad en el registro sedimentario (Rubio y Ramirez 2000). Los límites de las secuencias sedimentarias son definidos principalmente por la ausencia de biozonas.

Las biozonas Planctónicas que se encuentran en los pozos cercanos al área de estudio han sido redefinidas por el grupo de biestratigrafía del ICP, a partir de modelos estándar planteados por Blow (1969) en la alta y baja guajira *off-shore* (Figura 16), Molinares et al 2007, elaboran un modelo de edad basado en foraminíferos planctónicos, esto debido a la mejor resolución que proporciona este grupo fósil frente a los foraminíferos bentónicos, los cuales presentan una amplia distribución a lo largo del tiempo geológico. Además, este grupo está restringido a ciertos ambientes, generando problemas en la asignación de edades.

En este orden de ideas, de acuerdo con el análisis bioestratigráfico, conforme con la reevaluación realizada por el grupo de bioestratigrafía del ICP, en los trabajos realizados del 2007; el tiempo geológico reconocido en los pozos se encuentra registrado por las biozonas de foraminíferos planctónicos de la siguiente manera (nomenclatura Blow. 1969):

Pleistoceno Inferior - Plioceno Medio por las biozonas planctónicas N21?-N20. Plioceno Medio - Mioceno Superior por las biozonas planctónicas N19-N18 Mioceno Superior – Mioceno Medio por las biozonas planctónicas N17b, N17 – N14 Mioceno Medio – Mioceno Inferior Superior por las biozonas planctónicas N 13 – N9

Mioceno Inferior con la presencia de las biozonas planctónicas N7 – N5?.

51



Figura 16. Biozonación basada en foraminíferos Planctónicos para el Neógeno. Las columnas de la derecha corresponden a la definición de la biozonas según Molinares et. al 2007 en los pozos cercanos al área de trabajo. Los intervalos rosados representan zonas afectadas aparentemente por retrabajamiento o *cavins*, en amarillo zonas identificadas pero no delimitadas, en verde zonas identificadas y delimitadas y en gris zonas donde no es posible realizar un diagnóstico bioestratigráfico. (Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G., et al. (2004), Zonas N Según Blow (1969) GEOLOGIC TIME SCALE (2004).

De acuerdo con la figura 16, sobre los pozos de la zona no se reconoce la biozona N8 la cual correspondería parte del Mioceno inferior temprano. Esto puede obedecer a que en el caso de los pozos 1, 2 y 4 la secuencia perforada no llegó hasta esta zona. El pozo 3 presenta las biozonas N7-N5?, estas, identificadas

como las más antiguas entre los datos de los 4 pozos cercanos al cubo sísmico. No se identifica la biozona N8 lo que se puede deber al bajo recobro sobre este intervalo, el cual probablemente fue muy pobre y no pudo ser diagnosticado bioestratigráficamente.

7.3.2. Estratigrafía. Según los datos cronológicos representados en la figura 16 se puede observar la continuidad en el registro estratigráfico desde el Mioceno inferior, hasta las secuencias del Plioceno superior. Las unidades litoestratigráficas presentes en el continente correspondientes a este intervalo pertenecen a las Formaciones Castilletes, Jimol y Uitpa (Tabla 8)

Formación	Edad	
Uitpa	Mioceno Inferior	
Jimol	Mioceno Medio	
Castilletes	Mioceno Superior-Plioceno	

Tabla 8. En esta tabla se muestra las Formaciones identificadas en la cuenca de la Guajira en la parte *on shore* correspondientes al tiempo geológico representado en las biozonaciones planctónicas realizadas en los pozos cercanos al área de trabajo.

7.3.2.1. Formación Castilletes. Según los datos bioestratigráficos la edad de esta Formación es Mioceno medio a superior. Referenciada originalmente por Renz (1960). La localidad tipo se encuentra en la Bahía de Tucacas. Esta formación se encuentra dividida en dos secciones. La parte inferior predominantemente calcárea (areniscas calcáreas, calizas arenosas y limolitas fosilíferas). La Parte superior predominantemente arcillosa, (arcillolitas blandas de color gris verdoso). Espesor en localidad tipo de 692m. Rollins, 1965. El límite inferior se describe como concordante. El límite superior se describe como un contacto inconforme con estratos del Pleistoceno.

7.3.2.2. Formación Jimol. De edad Mioceno inferior a medio. La localidad tipo de esta Formación se encuentra en la ensenada de Cosinetas. En esta formación se presentan capas de calizas alternantes con limolitas calcáreas y lutitas. Frecuentes capas de areniscas calcáreas con algunos niveles conglomeráticos. El espesor en la localidad tipo es de 40m (Rollins, 1960). Los contactos tanto superior como inferior son concordantes.

7.3.2.3. Formación Uitpa. De dad Mioceno Inferior. Conformada por Areniscas calcáreas fosilíferas, limolitas calcáreas y arcillolitas de color gris claro a castaño. En la localidad tipo, alcanza un espesor de 342 m Definida por Rollins, (1960).

7.3.3. Análisis estratigráfico de los datos de pozo. A partir de los datos de registros (Gamma Ray y Litológico) de los pozos cercanos al área, se realizó el análisis estratigráfico basado en los cambios del nivel base o relación espacio de acomodación y suministro de sedimento (A/S), estos cambios se relacionaron directamente con los cambios relativos del nivel del mar. En la figura 17 se observa un plano general del área, donde se muestran los pozos en la zona, algunas líneas 2D con la que se contaron para amarrar los datos biocronológicos al cubo sísmico.



Figura 17. Ubicación de las líneas sísmicas (En color rojo) empleadas para la extrapolación de datos al área de estudio (Cuadro negro) y la ubicación de los pozos (Estrellas verdes) de los cuales se tomó la información bioestratigráfica.

El análisis de los ciclos estratigráficos a partir de los datos de pozo se realizó identificando patrones de apilado del registro litológico definiendo estos ciclos y confrontándolo al mismo tiempo con el comportamiento del registros de pozo. Al caracterizar el comportamiento de los ciclos estratigráficos, es posible determinar condiciones de deposición de máximos del nivel del mar, asociándolos directamente con condiciones de aumentos del nivel base (Figura 18). En esta parte se determinaron ciclos estratigráficos de tercer y segundo orden. Para extrapolar a los datos sísmicos se emplearon los ciclos estratigráficos de tercer orden, ya que son los ciclos con la resolución más apropiada para extrapolar a los datos.

Bio- zonas	Litología	Ciclos	Reistro Gamma Ray	Cambios relativos del Nivel del Mar ► ► ►
N14 N13 N12 N12			My Meren and March way My My My March	
N10			And Unipportant Anthony Mark	
N 9			MAN MANANA W	

Figura 18. Análisis estratigráfico basado en cambios de nivel base sobre los pozos cercanos a los datos sísmicos 3D.

Con esta información es posible amarrar los reflectores sísmicos que tengan características sísmicas asociadas a máximos del nivel del mar, los cuales pueden tener una extensión mayor a través de la cuenca y por ende son los mejores marcadores cronológicos que se puedan extrapolar hacia los datos sísmicos 3D del área de estudio.

Posteriormente se realizó una correlación de los cambios relativos del nivel del mar representado en los pozos y la curva de cambios relativos del nivel del mar a nivel global (Figura 19) hallando importantes coincidencias entre estos datos. De

acuerdo con la comparación de estos se pueden reconocer otros eventos que son importantes para la extrapolación de las edades.



Figura 19. Comparación de los cambios relativos del nivel del mar correspondientes a los intervalos identificados en los pozos cercanos al área, con los cambios relativos del nivel del mar de Haq (1987). Las líneas rojas representan aumentos del nivel del mar que se encuentran registradas en los pozos.

Del ejercicio anterior se obtuvieron los siguientes marcadores para ser extrapolados a las secciones sísmicas, basados en que los reflectores correspondientes a esas profundidades están relacionados con aumentos del nivel del mar; de más antigua a más reciente:

La línea de tiempo ajustada a los 17 M.a. (Mioceno Inferior Superior) ubicada al tope de la biozona N7 y que corresponde a un aumento del nivel del mar coincidiendo con el ciclo estratigráfico identificado en esta sección en el pozo Mero.

La línea de tiempo correspondiente a los 13 M.a. aproximadamente (Mioceno Medio), la cual se encuentra cercana en el límite de las biozonas N12 y N11, este ciclo estratigráfico fue determinado en el intervalo correspondiente a estas zonas en el pozo Tairona.

La línea de tiempo cercana a los 5.9 M.a. (Mioceno Superior). Esta línea de tiempo se definió por la delimitación de un aumento del nivel base que involucra desde la biozona N15 a la N18 identificadas en el pozo Tairona.

Finalmente se presentan las líneas de tiempo correspondiente a los 4 y 2 M.a representadas en la figura 19 (Plioceno Medio y Pleistoceno Inferior correspondientemente). La delimitación de estas líneas de tiempo se deduce por el comportamiento de la curva del nivel del mar estimada a partir de los ciclos estratigráficos establecidos cercanos a esta zona, ya que los datos bioestratigráficos en este intervalo presentan problemas para la su delimitación.

También se localizan intervalos correspondientes a zonas de regresión marina, que están relacionados con posibles zonas de depósitos sedimentarios propicios para la depositación de sedimentos con buenas condiciones para formar rocas almacenadoras. Esta zona está relacionada con la base de la biozona N18

59

correspondientes a los 6 millones de años. La base de las biozonas N11 la cual está cercana a los 14 millones de años.

Posterior al análisis de la información de los pozos y la identificación de los diferentes eventos que puedan ser empleados para realizar las diferente dataciones de las superficies delimitadas en los datos sísmicos, se realizó una correlación basada en estratigrafía de secuencias correlacionando los ciclos estratigráficos identificados (Figura 20), apoyados en los datos bioestratigráficos dando edades a las diferentes línea definidas.



Figura 20. Correlación estratigráfica de los pozos Tairona, Calamar, Mero y Merluza. Correlación basada en estratigrafía de secuencias para los pozos cercanos al área. El datum corresponde al tope de la biozona *Buliminella curta* definida por Duque y Reyes 1999 (Modificado de Duque y Reyes 1999).

La extrapolación de las líneas de tiempo generadas a partir de análisis de datos de pozo, se proyectó sobre los datos sísmicos empleando los *check shots* de cada uno de los pozos (Figura 21).

Como es posible observar en la Figura 21 el pozo con la mayor cantidad de datos biestratigráficos corresponde al pozo Tairona. Por lo que la información que aportó este fue de gran importancia para el desarrollo de este trabajo. Además, esta información se consideró como la de mejor resolución y calidad en los pozos cercanos al área de estudio.

En la Figura 21 se observa la extrapolación de los datos cronológicos y bioestratigráficos a la sísmica 2D. Las áreas sombreadas corresponden a las Biozonas descritas en los pozos, las líneas de tiempo se extrapolaron a partir de los *check shots* de los pozos.



Figura 21. Datos extrapolados a las líneas sísmicas 2D, los datos bioestratigráficos de los pozos están representados en las zonas sombreadas.

Como se mencionó anteriormente el fundamento de este estudio se basa en identificar las superficies u horizontes asociados a aumentos del nivel del mar, ya que estas superficies pueden tener un carácter regional. Por consiguiente pueden tener mejor continuidad a lo largo de la cuenca, permitiendo que el seguimiento de estas superficies sobre los datos sísmicos sea más sencillo, siempre y cuando estos no estén afectados estructuralmente por fallas o por fenómenos de diapirismo presentes en la zona. Además, por tratarse de superficies asociadas a a (Olaya & Rey P., 2004)umentos del nivel base, existe mayor certeza que las superficies limitantes asociadas a este tipo de reflexión corresponden a una edad específica. Lo contrario a lo anteriormente planteado puede ocurrir a menudo con las superficies asociadas a regresiones o hiatos. Sin embargo es importante tener en cuenta las superficies asociadas a mínimos o bajadas del nivel del mar, ya que en algunas ocasiones es posible asociar estas directamente, cuando se comparan las cartas de cambios relativos del nivel del mar a escala global.

8. RESULTADOS

A continuación se mostrarán los resultados de la aplicación de la metodología planteada. Primero se presentará los diferentes horizontes sísmicos interpretados, seguidamente se presenta la interpretación de las secuencias sísmicas de acuerdo a la metodología planteada por Widmier y Sangree (1977).

Inicialmente se interpretaron 10 horizontes correspondientes a los diferentes eventos identificados en los pozos. Estos horizontes fueron llevados de los datos sísmicos 2D y de allí se extrapolaron a los datos 3D (Figura 22).



Figura 22. Horizontes guía determinados con base en el análisis estratigráfico de los pozos extrapolados al cubo sísmico.

En esta etapa se extrapolaron todas las superficies identificadas a partir de los datos bioestratigráficos tomados de los pozos, ajustados a la curva de cambios

relativos del nivel del mar (Haq, et al, 1987). Extrapolando todas las líneas, sin discriminar las que están asociadas a diminuciones del nivel de mar. En el siguiente esbozo (Figura 23) se muestra un esquema simplificado de la interpretación de la sección sísmica. En esta figura se expone la extrapolación de las diferentes líneas de tiempo que se emplearon para elaborar el marco cronoestratigráfico sobre el cubo símico. Allí se presentan las líneas de tiempo de 4Ma., 5.9Ma., y 13Ma., asociadas a aumentos del nivel del mar. Además, se muestra la línea de tiempo correspondiente a 15 M.a., la cual está asociada a un descenso del nivel del mar, que está representada por un reflector de buena continuidad.



Figura 23. Esquema simplificado de la interpretación de una sección sísmica del cubo 3D del área piloto, en rojo se presentan las edades relacionadas con aumentos del nivel del mar.

A partir de esta información se realizó la asignación de edades para las demás secuencias identificadas en el cubo sísmico. Con el fin de realizar un modelo cronoestratigráfico para este sector. A continuación se describirán las secuencias reconocidas, relacionando estas a las condiciones de variaciones del nivel mar en las cuales estas se depositaron, partiendo de sus características sísmicas. Posteriormente estas secuencias se relacionan con la carta de cambios relativos del nivel del mar propuesta por Haq 1987. Al analizar la carta cronoestratigráfica de cambios del nivel del mar a escala global y su respectiva asociación de reflectores *costal onlap* tomado de la interpretación sísmica realizada sobre el cubo sísmico, se observa una coincidencia importante sobre la cual es posible apoyarse para la asignación de edades para las diferentes secuencias del cubo sísmico identificadas basados en la metodología propuesta por Vail et. al, (1977).

En la figura 24 se observa esta relación entre las secuencias sísmicas y la carta de variaciones del nivel del mar, donde se realizó un amarre previo con los horizontes sísmicos que se consideraron confiables para el amarre cronológico y un posterior ajuste de las diferentes curvas mostradas aquí en base a estos datos.

De este análisis se puede determinar, que las secuencias sísmicas 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 se pueden ubicar dentro de un contexto cronológico, a partir de la metodología planteada. Teniendo en cuenta que la primera secuencia identificada de la cual se presentará una descripción más adelante, se puede ubicar cronológicamente a partir de la deformación del basamento, asociando la depositación de esta a un evento tectónico que genera una fuerte subsidencia y deformación en la cuenca.

68



Figura 24. Sección sísmica del bloque sísmico del área piloto. En esta imagen se presenta la asociación de la interpretación de la secuencias sísmicas asociadas a los cambios relativos del nivel del mar y su comparación con la carta global de cambios del nivel del mar propuesta por Haq (1987). En la derecha se muestra enumeradas del 1 al 12 las secuencias símicas identificadas en la sección símica. A, B y C son la relación de las cartas *costal onlap*, cambios relativos del nivel del mar global y la carta *costal onlap* para la sección sísmica.

Sin embargo las secuencias posteriores se pueden ajustar y contener dentro del marco cronológico obtenido de la curva de cambios relativos del nivel del mar (Haq, 1987), ya que existe una correspondencia importante en la comparación de la curva de cambios relativos del nivel del mar y además, donde el registro bioestratigráfico permite amarrar estas secuencia a una edad relativa correspondiente al marco cronológico planteado.

8.1. SECUENCIAS SÍSMICAS

Las secuencia reconocidas mediante la metodología propuesta, se describen a continuación de más profunda a más somera de la siguiente manera:

Inicialmente se describe el basamento sobre el cual sobreyacen las secuencias sísmicas identificadas en los datos 3D. De acuerdo a los datos de pozos de la cuenca en estudios anteriores (Olaya y Reyes 2004, Ecopetrol 2004). Define un basamento compuesto por rocas metamórficas (Esquistos, gneises, metasedimentos y serpentinas) para la cuenca en general. Para los pozos cercanos al área de estudio, solamente los pozos Mero y Merluza alcanzan el basamento. Según la descripción de estos intervalos, el basamento corresponde a Cuarcitas y Gneises en Mero y únicamente Cuarcitas en Merluza. Estas rocas se generaron por el metamorfismo regional de rocas pre-Triásicas.

La definición sísmica de este basamento no es homogénea y varían sus características, a través del cubo. Los reflectores marcan un contraste mas fuerte hacia al noreste del cubo, en la regiones cercanas a una elevación de este basamento (Figura 25) donde es fácil la delimitación de este. Mientras que en las partes alejadas de este alto, hacia el sur y el occidente las reflexiones sísmicas que delimitan esta superficie no son tan evidentes. También es posible observar rasgos sísmicos que pueden deducir algunas características del tipo de roca que conforma el basamento. En algunos sectores es posible ver lo que puede

70

corresponder a una foliación en el basamento expresadas en una serie de reflexiones subparalelas, discontinuas, con amplitudes altas y de baja frecuencia.



Figura 25. Reflexiones sísmicas que definen el basamento en el área de estudio. En esta figura se puede observar la variación en la característica del reflector, así como diferentes características en la configuración interna de estos dentro del denominado Basamento sísmico.

A partir de la delimitación de este basamento se generó un mapa estructural en tiempo (TWT) (Figura 26) de este, en este se puede observar dos características morfológicas importantes. La presencia de un alto estructural hacia la parte noreste del área de estudio y el desarrollo de un bajo estructural o un depocentro hacia la parte occidental. Esta característica es un efecto del carácter transtensional que domina la cuenca, el cual se ve evidencia al realizar un análisis de las diferentes secuencias sísmicas identificadas en el cubo sísmico.



Figura 26. Mapa estructural 3D en tiempo (TWT) del basamento sísmico. En la figura se puede observar dos características morfológicas importantes, las cuales son un alto y un depocentro.

Las dos secuencias más profundas que sobreyacen el basamento no cuentan con datos extrapolados bioestratigráficos desde los pozos cercanos Figura (27). Debido a que este registro se encuentra para secuencias superiores a partir de tercera y cuarta secuencia. Por lo tanto es necesario realizar un análisis basado en la carta de ciclos globales, y una confrontación con la evolución tectónica de la cuenca para compararlo con el comportamiento que presenta las secuencias sísmicas identificadas para este intervalo de tiempo.

Con el fin de apreciar la paleotopografía en este intervalo de tiempo se realizaron mapas isópacos que pudieran representar la deformación de la cuenca y la generación de espacio de acomodación o profundización de la misma.



Figura 27. Imagen de las 4 secuencias sísmicas más profundas del cubo sísmico, en la imagen correspondiente a una sección *crossline* se puede observar que el dato cronológico más antiguo extrapolado no permite datar las tres secuencias sísmicas más profundas del cubo.

8.1.1. Secuencia Sísmica 1 (Pre-Miocena). Esta secuencia presenta una forma externa de relleno, con reflectores terminando en *onlap* contra el basamento sísmico. Hacia el tope los reflectores son paralelos con la superficie que limita

esta, por lo que se puede catalogar como terminaciones concordantes. En cuanto a las características arquitectónicas se aprecia, que esta secuencia disminuye su espesor hacia el norte y sur, mostrando su mayor espesor en la parte media de la sección sísmica, exhibiendo el mismo comportamiento en sentido este oeste. El patrón de reflexiones internas muestra reflectores continuos y paralelos hacia el norte y hacia el este. Mientras los reflectores muestran un patrón caótico, discontinuos hacia el sur y el occidente. Las amplitudes de las reflexiones son altas en este sector. Al parecer esta secuencia se encuentra rellenando depresiones formadas en el basamento (Figura 28 y 29).

El mapa estructural al tope de esta secuencia sísmica (Figura 28) revela que esta tiene la misma topografía del basamento, lo cual sugiere que esta secuencia se afecta estructuralmente con los mismos eventos que deforman el basamento. Esto indica que esta secuencia posiblemente pudo haberse de depositado en una período anterior o sindepositacional a la deformación del basamento.

La datación de este intervalo no se puede realizar mediante el método planteado ya que los datos de pozo no llegan a esta zona y no es posible determinar la edad de la superficie que limita esta secuencia primero con la que le sobreyace. A pesar de no presentar claramente un límite superior discordante, esta secuencia se encuentra en contacto con varias secuencias más recientes, lo que indica que está pudo estar expuesta durante un largo periodo de tiempo. Siendo cubierta por sedimentos correspondientes al Mioceno inferior y Mioceno medio.

74




Figura 28. Mapa estructural 3D en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 1. En esta imagen se puede observar que esta secuencia se depositó en una etapa anterior a la generación del depocentro y el alto estructural que presenta el basamento.



Figura 29. En derecha se observa la sección cross-line, con el tope de la secuencia aplanado (Flattened), hacia la izquierda se aprecia la imagen inline del cubo, en esta parte se puede observar una falla de tipo normal que afecta el basamento.

La figura 30 corresponde al mapa isópaco entre el basamento y el tope de la secuencia sísmica 1, en este mapa se puede observar la deformación en la parte central del área estudiada evidenciada por el mayor espesor de la secuencia hacia este sector. En esta zona se crea una depresión la cual es rellenada por la secuencia 1, como se aprecia en la descripción realizada de esta secuencia presenta reflectores en terminaciones *onlap*, rellenando posibles depresiones en la cuenca. En este mapa se puede ver el desarrollo de una falla normal en sentido este-oeste que afecta el basamento significativamente en la parte central generando una depresión que es rellenada por los sedimentos de la secuencia 1. Este rasgo estructural es el más significativo en este intervalo de tiempo, este puede ser correlacionado a eventos que dieron lugar a la deformación del basamento. Ya que esta falla es paralela a la falla de Oca y Cuiza. Aunque esta no parece tener una componente de rumbo, puede estar directamente relacionado con este sistema de fallas.



Figura 30. Mapa isópaco entre el basamento sísmico y el tope de la superficie 1, en este mapa se observa como rasgo más importante el desarrollo de una falla normal que origina una depresión en la parte central del área de estudio.

Según el análisis sísmico de esta secuencia mediante la disposición interna de los reflectores y su forma externa, esta corresponde a depósitos de baja energía, estos pueden relacionarse con depósitos turbidíticos de baja velocidad en las partes más profundas de la cuenca. En las parte someras de la cuenca pueden predominar facies de aguas poco profundas con influencia de facies continentales, asociadas a depósitos de sedimentos favorables para la formación de roca almacenadora. Los reflectores parecen indicar que esta secuencia se deposita durante una etapa anterior o contemporánea a la deformación del basamento

(Figura 29), rellenando depresiones formadas que posiblemente había sido afectado, por una falla normal (Figura 29) denominada Megafalla (Olaya y Rey, 2004).

Las características que presentan los reflectores especialmente hacia los palealtos parecen comparadas con los datos de los pozos cercanos a este intervalo, indican el desarrollo de depósitos calcáreos asociados a condiciones de aguas someras. El hecho de presentar una paleo-topografía que evoluciona mostrando el mismo comportamiento del basamento, la ubica cronológicamente en una etapa anterior a la deformación del basamento.

8.1.2. Secuencia Sísmica 2 (Mioceno Inferior 20-19 M.a). Según los análisis estratigráficos pertenecientes a esta sección, este marca el un evento transgresivo al inicio del mioceno. La comparación de esta secuencia con la carta de la variación del nivel del mar la ubica en las edades entre 20 a los 19 millones de años aproximadamente. Esta secuencia presenta una forma externa acuñada, presentando mayor espesor hacia el suroccidente del área piloto, esta secuencia termina sobre el tope de la secuencia 1 al norte y este del bloque. El contacto inferior de esta unidad sísmica presenta terminaciones *onlap*. Los reflectores hacia el tope de la secuencia se identificaron como concordantes. Los patrones de reflexiones internas son subparalelas de amplitudes altas, las cuales se tornan caóticas mostrando patrones de reflexiones libres en algunas partes de la secuencia 1, presentan reflectores más continuos hacia el norte y el este, donde disminuye su espesor y las reflexiones presentan frecuencias altas.





Figura 31. Mapa estructural 3D en tiempo para el tope de la secuencia 3. En esta imagen se puede apreciar que al norte el alto estructural actúa como barrera e impide la extensión de la secuencia hacia el norte de la secuencia.

El mapa estructural al tope de la secuencia 2 (Figura 31), muestra que la secuencia no presenta una extensión total a través de área de estudio. La depositación de de esta secuencia se ve controlada por morfología del basamento, principalmente hacia el norte, donde se presenta un alto estructural, el cual no permite que la depositación de la secuencia continúe hacía ese sector.

Es posible observar como el alto del basamento actúa como barrera impidiendo que esta secuencia presentara una extensión total a través de área. Esta secuencia pierde espesor acuñándose hacia la parte occidental del paleo-alto especialmente hacia el sur-este del cubo sísmico donde esta secuencia se pierde y no se observa en las líneas sísmicas hacia el este de la cuenca.



Figura 32. Aplanamiento del tope de la secuencia 2(Línea azul). En la figura de la izquierda se presenta la imagen correspondiente a una sección *crossline* del cubo sísmico, en la figura de la derecha se observa una sección *inline* del mismo.

Al realizar el aplanamiento de este horizonte en la sísmica (Figura 32) se puede observar mayor subsidencia de la cuenca hacia el oeste, donde la secuencia descrita aumenta de espesor. Mostrando un adelgazamiento de esta hacia el norte y el este, donde esta secuencia pierde espesor. En la figura 32 se puede observar que subsidencia de la cuenca hacia el occidente aumenta. Al comparar esta imagen con el aplanamiento de la superficie correspondiente al del tope de la primera secuencia, se hace evidente el desarrollo de fallas normales

El análisis del mapa isópaco entre el tope de la secuencia 2 y el tope de la secuencia 1 a (Figura 33) indica que hay una profundización de la cuenca hacia el suroccidente. En esta sección se también se observa que la secuencia sísmica se acuña hacia el noreste de área de trabajo perdiendo su espesor.



Figura 33. Mapa isopaco entre el tope de la secuencia 2 y base de la secuencia 1.

Al igual que la secuencia 1 esta parece que se deposita en ambiente de aguas poco profundas, con influencia de ambientes continentales principalmente hacia el este de la sección. Hacia el oeste y el sur de la sección sísmica analizada se observa mayor espesor de la secuencia, que pueden estar asociadas a épocas de extensión tectónica, la cual crea depocentros hacia la parte occidental de la cuenca. Hacia estos sectores de la cuenca es posible el depósito de facies asociadas a sistemas turbidíticos.

8.1.3. Secuencia Sísmica 3 Mioceno Medio Temprano (17-19 M.a). La forma externa de esta secuencia es acuñada (Wedge), su espesor aumenta hacia el suroccidente del área. La base de la secuencia se delimita por la terminación *onlap* de los reflectores sobre la secuencia sísmica 2 hacia el este y sobre el basamento sísmico, al noreste. El espesor de esta secuencia es menor sobre el paleoalto identificado en el análisis del basamento sísmico y la secuencia 1. Las reflexiones presentan una continuidad regular en la parte central del área, los reflectores presentan altas amplitudes y también presenta baja frecuencia. Los reflectores son paralelos entre sí.

Esta secuencia sigue mostrando el aumento de la subducción de la cuenca hacia el occidente. La delimitación de las superficies de las primeras secuencias se dificulta a medida que se avanza hacia el noroccidente del área de estudio. Esto se puede deber al desarrollo de un pliegue en este sector, que afecta la mayor parte de las secuencia e incluso puede estar afectando el basamento. Este pliegue es posible observarse con facilidad hacia el tope de la secuencia 4 (Figura 37).

El mapa estructural al tope de la secuencia 3 (Figura 34) muestra una superficie más horizontal la cual no ha sido suficientemente afectada por eventos tectónicos que la afectaran así como las secuencia 1 y 2. Al superponer el tope de la secuencia 3 sobre la superficie generada de la interpretación del basamento sísmico, esto permite observar que el espesor de la cobertura sedimentaria aumenta hacia el occidente del área de estudio.



Figura 34. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 3.

También es evidente la pérdida de espesor de la cubierta sedimentaria hacia el este, donde la mayoría de secuencias descritas pierden espesor y se acuñan. La situación anterior se observa en la figura 35, donde se aprecia la continua deformación del basamento generando más espacio de acomodación de sedimentos hacia el occidente de área y la terminación de la secuencia sobre el basamento sísmico hacia el norte y el este.



Figura 35. Imagen del tope de la superficie 3 aplanado. La imagen de la izquierda corresponde a una sección *crossline* del cubo, mientras que la imagen de la derecha corresponde a una sección *inline* del mismo.

Al realizar el mapa isópaco entre el tope de la secuencia 3 con el tope de la secuencia 2 (Figura36), se puede observar que esta secuencia presenta mayor espesor hacia el suroccidente del área. Esto indica un leve cambio en las condiciones de deformación de la cuenca. Este cambio genera más espacio de acomodación en zonas cercanas al continente.



Figura 36. Mapa isópaco entre la superficie 2 y la superficie 3, se puede observar un aumento en el espesor de la cuenca hacia el sur-oeste y pérdida de espesor hacia el norte y el este del cubo.

El acuñamiento de estas primeras secuencias hacia el borde occidental de palealto. Puede formar trampas estratigráficas, especialmente hacia la parte sur-este del cubo sísmico, donde la secuencia 2 pierde espesor y se acuña entre la secuencia 1 y 3. En general estas secuencias se asocian con depósitos de aguas poco profundas, con influencia continental. El rasgo principal es la subsidencia de la cuenca hacia el occidente de la cuenca, por lo que hacia este sector de la cuenca, es posible que hayan sistemas de turbiditas. Según el análisis estratigráfico comparado con la curva de cambios relativos del nivel del mar, esta secuencia tiene lugar de en los intervalos de tiempo correspondiente a los 17 Ma. a 18.8 Ma, correspondiente al Mioceno inferior a Mioceno medio temprano.

8.1.4. Secuencia Símica 4 Mioceno Medio inferior (15-17 M.a). Esta secuencia tiene una forma externa tabular (*Sheet*). Hacia el tope y base la secuencia presenta limites concordantes, los reflectores son paralelos y subparalelos, discontinuos en la mayor parte del área. Hacia el oeste los reflectores tienen altas frecuencia y baja amplitud, hacia el noroeste este comportamiento cambia a reflectores de frecuencias altas y amplitudes bajas. El patrón interno de los reflectores es bastante heterogéneo dentro de la secuencia, en la mayoría de la secuencia se presentan reflexiones libres, reflectores interrumpidos y *contorted*, principalmente hacia la parte central del cubo sísmico.

El mapa estructural realizado al tope de la superficie (Figura 37) muestra una superficie poco deformada, el rasgo estructural más importante es la generación de un pliegue hace el nor-occidente del área de estudio, este pliegue presenta una dirección sur-este nor-este. Este pliegue se puede identificar plenamente en esta superficie, las secuencia más profundas exhiben reflectores caótico en esta parte de la sección debido a la deformación de estas secuencia y a los altos ángulos que los estratos que componen las secuencias alcanzan. Al igual que las secuencias anteriores, esta unidad sísmica no se encuentra en toda la cuenca, ya que el paleo-alto no permite que se depositen estas secuencias de forma uniforme en la cuenca.



Figura 37. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la superficie 4. Esta superficie se compara con el mapa estructural del basamento sísmico.

La figura 38 se presenta con el fin de resaltar la evolución de la cuenca, al aplanar el tope de la secuencia 4 y deformar la sección sísmica, es evidente la generación de espacio hacia el sur y la parte oeste del cubo sísmico. Hacia los sectores mencionados sobre el área de estudio, la secuencias 2, y 3 esta secuencia aumenta de espesor. Esta condición se hace más notable en la hacia la parte occidental de la cuenca (Figura 38).



Figura 38. Tope de la secuencia número 4 aplanada (Línea naranja). En la izquierda se presenta una sección *crossline* de los datos sísmicos 3D. En la imagen de la derecha se encuentra una sección *innline*.

8.1.5. Secuencia sísmica 5 Miceno Medio (13 a 15 M.a). La secuencia sísmica 5 de edad Mioceno medio temprano según los datos bioestratigráficos, se limita superiormente por reflexiones sísmica concordantes, hacia la base se distinguen reflexiones en terminación *onlap* sobre el tope de la secuencia 4 hacia el sur del cubo sísmico. La forma externa de la secuencia es tabular (*Sheet*), aunque es posible observar pérdida de espesor de esta se cuenca hacia el norte. El patrón interno de las reflexiones de esta secuencia presenta continuidad buena a regular, la amplitud de estos es alta a moderada.





Figura 39. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia sísmica 5.

El mapa estructural elaborado al tope de la secuencia (Figura 39), presenta la deformación de esta secuencia hace el nor-este, creando una depresión. Esta geometría de la cuenca es más cercana a la geometría actual de esta. Aunque no es muy evidente en esta imagen, esta unidad sísmica también es afectada por un plegamiento hacia el nor-occidente.

Según la descripción de la forma externa de esta secuencia y la disposición de los patrones internos de los reflectores, el ambiente de depositación de esta se interpreta como depósitos marinos clásticos con desarrollo de depósitos relacionados a corrientes de turbidez. Depositada en la parte final de un evento transgresivo es decir un evento de máxima inundación.

8.1.6. Secuencia sísmica 6 Mioceno Medio Tardío (13 a 9 M.a). La comparación de los límites de esta secuencia comparada con la carta de cambios relativos del nivel del mar a escala global la ubica dentro de las edades correspondientes a los 13 Ma. y 9 Ma. aproximadamente. Esta secuencia tiene una forma externa tabular (Sheet) y se extiende a través del área de estudio. Lis límites de la secuencia tanto superior como inferior es concordante. La característica general de los reflectores es de amplitudes bajas a medias de continuidad buena a moderada y frecuencias altas. Hacia la parte central de la sección norte sur se presentan reflexiones onduladas, que se extienden en sentido nor-occidente sur-este. Los reflectores divergentes.



Figura 40. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 6.

Según la descripción de la forma externa de esta secuencia y la disposición de los patrones internos de los reflectores, el ambiente de depositación de esta se interpreta como depósitos clásticos de secuencias marinas de aguas poco profundas con desarrollo de depósitos sedimentarios de sistemas parálicos.

8.1.7. Secuencia Sísmica 7 Mioceno Medio tardio a Miceno Superior (9 a 6 M.a). La forma externa de la esta secuencia es en forma de cuña o cuneiforme (Wedge), aumentando de espesor hacia el norte y acuñándose hacia el sur sobre el tope de la secuencia 6. La terminación de los reflectores es en onlap contra la superficie limitante. En la superficie presenta un límite concordante. En sentido norte sur, hacia la parte media de la sección sísmica, se presentan reflectores sísmicos interrumpidos trenzados (Contorted). Esta característica se extiende en sentido sur-este nor-oeste a través del cubo sísmico. Hacia la parte norte del

cubo, los reflectores son continuos y paralelos con frecuencias altas y amplitudes bajas. Hacia el sur los reflectores aumentan de amplitud y la intensidad de estos es más débil.

Esta secuencia se deposita durante un evento de regresión marina, marcando un importante descenso en el nivel del mar, el cual es representado por la carta global de variaciones del nivel del mar propuesta por Haq. El ambiente de depósitación de esta secuencia se interpreta como un ambiente marino somero con desarrollo de facies de canales submarinos.



Figura 41. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 7.

El mapa estructural (Figura 41) elaborado hacia el tope de la base muestra que esta secuencia sigue siendo afectada por el pliegue que se genera hacia la parte

nor-occidental del área, observando este como el rasgo estructural más sobresaliente.

8.1.8. Secuencia Sísmica 8 Mioceno Superior (6.2 a 5.9 M.a). La forma externa de esta secuencia es cuneiforme (*Wedge*), aumentando de espesor hacia el norte, acuñándose hacia el sur (Continente). El límite inferior de la secuencia es concordantes hacia la parte media de la sección, en la parte más al norte de la misma, las reflexiones terminan en *downlap* sobre la superficie 7, y hacia el sur los reflectores que limitan la base de esta secuencia terminan en *onlap* contra la misma secuencia, más hacia el norte el contacto del límite inferior muestra un comportamiento concordante. El límite superior de la secuencia es concordante en la mayor parte de la sección sísmica. Hacia la parte éste del cubo sísmico, los reflectores terminan en *toplap*, mostrando un contacto discordante con la unidad suprayacente. El patrón interno de los reflectores es de amplitudes altas, con alta continuidad, principalmente hacia la base al norte de la sección sísmica. Esta continuidad se ve interrumpida hacia el sur de la sección sísmica. Hacia la parte éste ve entral de la sección, principalmente hacia el tope se observa reflectores ondulantes, que pueden corresponder a desarrollos de canales.

Esta secuencia se interpreta como ambiente marino de plataforma, con desarrollo de canales submarinos en dirección norte-sur básicamente.



Figura 42. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 8.

En la figura 42 se observa el mapa estructural elaborado al tope de la secuencia sísmica número 8, este mapa es elaborado en tiempo (TWT). Se observa como rasgo estructural más importante el plegamiento de hacia el nor-occidente de la secuencia descrita.

8.1.9. Secuencia Sísmica 9 Plioceno Inferior (5 a 4 M.a). La forma externa de esta secuencia sísmica es tabular (Sheet). Los limites de secuencia tanto superior como inferior, son concordantes. El patrón interno de las reflexiones es de amplitudes bajas y baja continuidad, paralelas y subparalelas, en la mayoría de la sección sísmica. Hacia la parte norte del cubo, los reflectores presentan altas continuidades y altas frecuencias.

La secuencia 9 se deposita durante un evento transgresivo, el cual maraca una profundización de la cuenca depositando facies sedimentarias asociadas a depósitos de grano fino, como arcilla y limos. En esta secuencia es posible encontrar depósitos de sistemas tubidíticos hacia el norte de la cuenca.

La figura 43 presenta el mapa estructural en tiempo realizado al tope de la secuencia número 9, en el se observa el desarrollo de fallas normales en sentido en sentido sur-este nor-oeste, que afectan principalmente la secuencia en la parte sur-occidental del área.



Figura 43. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 9.

8.1.9. Secuencia Sísmica 10 Plioceno Superior (4 a 3.4 M.a). Esta secuencia sísmica tiene forma tabular (Sheet). Los límites superior e inferior de esta secuencia son concordantes, el patrón interno de los reflectores es paralelo, de

continuidad baja a moderada. Los reflectores presentan altas bajas y frecuencias moderadas.

El ambiente de depositación de esta secuencia se interpreta como un ambiente marino con depósitos sedimentarios asociados a facies de baja energía en el cual pueden presentarse sistemas turbiditicos de baja energía y transporte por oleaje.



Figura 44. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 10.

En la figura 44 se observa el mapa estructura elaborado al tope de la secuencia sísmica número 10, este mapa se presenta en tiempo doble de tránsito. En este mapa se puede observar que esta secuencia no se ha visto afectada por eventos tectónicos representativos, y se observa una topografía suave.

8.1.9. Secuencia Sísmica 11 Pleistoceno (3.4 a 1 M.a). La secuencia sísmica número 11 se caracteriza por presentar una forma externa cuneiforme y elongada. El límite inferior hacia el norte se distingue por la terminación *downlap* de los reflectores sobre la secuencia suprayacente. Hacia la parte superior, la secuencia está limitada por reflectores que terminan en *toplap* principalmente hacia la parte sur, en la parte norte estos parecen ser concordantes con el tope de la secuencia. El patrón interno que exhiben los reflectores es de baja amplitud y frecuencias moderadas, de alta continuidad, especialmente hacia el norte, mostrando el mismo comportamiento en sentido este-oeste. Hacia el sur los reflectores presentan un carácter caótico especialmente cuando se observan en la *crossline* es sentido este-oeste.

El ambiente de depósito de esta secuencia puede estar asociado con ambientes de aguas profundas indicando una etapa de aumento del nivel del mar según la comparación con la carta global, en los cuales se pueden depositar sedimentos finos depositados en ambientes de baja energía. Las litologías formadas en estos ambientes presentan característica físicas para formar excelentes rocas sello. En las secciones sísmicas se puede observar el desarrollo de canales con direcciones sur-norte.



Figura 45. Mapa estructural en tiempo (TWT) al tope de la secuencia 11.

La figura 45 muestra el mapa estructural al tope de esta secuencia. En este mapa se puede observar una topografía suave en comparación con las secuencias anteriores. Mostrando una profundización de la cuenca hacia al nor-este del área de estudio.

8.1.10. Carta Cronoestratigráfica. En la Figura 46 se observa la carta estratigráfica elaborada a partir de los datos obtenidos, donde se ubican las secuencias sísmicas reconocidas en el área de estudio. La carta cronoestratigráfica permite observar dos eventos regresivos importan dentro de los intervalos de 10 a 12 M.a. y de 4 a 6 M.a. aproximadamente. Adicionelmente presenta aumentos del nivel de mar en 13 Ma., 6 M.a. y 3 M.a aproximadamente.



Figura 46. Diagrama de Wheeler para el área piloto. En esta figura se muestra la ubicación temporal de la 11 secuencias sísmicas reconocidas.

9. DISCUSIÓN

La ubicación y descripción de las diferentes secuencia sísmicas empleando la carta de cambios globales del nivel del mar propuesta por Haq (1987) presenta ciertas dificultades en cuanto a la veracidad de las edades interpretadas, ya que los cambios locales que han actuado sobre la cuenca requieren de la generación de una carta propia para esta. Es importante resaltar que a pesar de no tener exactamente el mismo comportamiento, las tendencias de aumento y descenso del nivel del mar se mantienen. Entonces este comportamiento permite tomar esta carta (Haq, 1987) como una herramienta inicial para la generación de un marco cronoestratigráfico relativo en esta parte de la cuenca. Especialmente ante la falta de información.

Emplear líneas de tiempo asociadas a máximos del nivel del mar para la extrapolación de datos geocronológicos determinados a partir de algún parámetro estratigráfico en este tipo de cuenca, es una herramienta útil. Los horizontes o superficies asociadas a estos eventos tienden a presentar una distribución más extensa, de fácil seguimiento sobre secciones sísmicas, además, estas superficies brindan mayor seguridad para realizar correlaciones estratigráficas con los diferentes pozos en la zona. Por lo tanto la implementación y perfeccionamiento de esta metodología se puede convertir en un instrumento para mejorar la asignación de edades de las diferentes secuencias estratigráficas en la cuenca de la Baja Guajira.

La ubicación temporal y espacial de las diferentes secuencias sísmicas y la interpretación de las condiciones de depositación de estas, es una tarea imprescindible para el entendimiento geológico de la región. Es importante mencionar al alto impacto en cuanto a la exploración de hidrocarburos. Los intervalos productores en los campos Chuchupa, Ballena y Riohacha los cuales son los únicos campos productores en la cuenca de la Baja Guajira, pertenecen al

Oligoceno superior, Mioceno inferior y Mioceno medio, las características de estos reservorios permiten inferir que estas rocas reservorio se depositaron en ambientes de alta energía. Encontrar secuencias estratigráficas con estas características es importante para la exploración de hidrocarburos y por ende para la ampliación de las reservas de gas y petróleo que existen en el país.

La secuencia 1 identificad en el cubo sísmico presenta un reto importante en cuanto a la asignación de edades, ya que hacia este intervalo no fue posible extrapolar la información bioestratigráfica para la asignación de edades y la comparación con la curva de cambios relativos del nivel del mar.

10.10. CONCLUSIONES

Según la comparación de las secuencia depositacionales en el área piloto con la carta de cambios relativos del nivel del mar a escala global, se encontraron coincidencias que pueden permitir la elaboración de un marco cronoestratigráfico a partir de este análisis en el área piloto. A partir del estudio de estos datos, y su respectiva comparación con la evolución tectónica de la cuenca. Se puede deducir que en el área hay presencia de depósitos sedimentarios de edad Mioceno Inferior como la secuencia más antigua a partir de las comparaciones de la curva de nivel del mar propuesta por Haq (1987). Los depósitos correspondientes a las 4 secuencias sísmicas más profundas no se encuentran presentes en toda la extensión del cubo sísmico, debido a la geometría de la cuenca a causa de su evolución tectónica. Estos depósitos se encuentran hacia la parte occidental del área piloto.

Después de realizar la correlación de los datos procedentes del análisis estratigráfico de los pozos, hacia las secuencias sísmicas identificadas, se determinó. 1) Según los intervalos de tiempos obtenidos para la depositación de estas pertenecen a secuencias de tercer orden con intervalos de 2 a 5 Ma. 2) Las secuencies 3, 5, 9 y 11 correspondientes al Mioceno inferior (18.8-17Ma.), Mioceno medio (15-13 Ma), Mioceno superior-Plioceno medio (5.9-4 Ma) y Pleistoceno inferior (3.4-1 Ma) se depositan durante eventos de aumentos del nivel del mar, por lo que estas secuencias pueden presentar mejores características de roca sello en la cuenca. 3) las secuencias 2, 6, 7 y 8 Mioceno inferior (20-18.8 Ma), Mioceno superior respectivamente se encuentran asociadas a descensos de nivel del mar, estas secuencias pueden contar con facies arenosas, que dan lugar a la generación de rocas almacenadora.

Para la secuencia sedimentaria que sobreyace el basamento sísmico, la cual tiene como edad interpretada Oligoceno superior, se interpretó como depósitos de

relleno de ambientes someros, el cual puede estar relacionado con depósitos de ambientes transicionales con presencia de depósitos calcáreos. El interés de este intervalo podría referirse a la disposición para la depositación de roca reservorio, aunque no se debe descartar la depositación de rocas generadoras que pueden estar asociadas estas secuencias calcáreas, y sectores donde se profundiza la cuenca.

11. BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, W., 1967. Geology of the Simarua and Carpintero areas, Guajira Peninsula. Ph.D. Thesis, Princeton University.

AAPG, 1977. Seismic Stratigraphy Applications to Hidrocarbon Exploration. [ed.] Charles E. Payton. Oklahoma : The American Association Of Petroleum Geologists, 1977. pág. 514. Memoir 26.

Adameck, S. Frohlich, C. & Pennington, W., 1988. Seismicity of the Caribbean-Nazca boundary: constraints on microplate tectonics of the Panama region. *Journal of Geophysical Research.* **93**: 2053-2075.

Allmon, W.D., Rosenberg, G, Portell, R.W. & Schindler, K. S., 1993. Diversity of Atlantic coastal plain mollusks since the Pliocene. *Science*.

Alsharhan, A. S., & Whittle, G. L., 1995. Carbonate-Evaporite Sequences of the Late Jurassic, Southern and Southwestern Arabian Gulf. AAPG Bulletin. ,Vol 79 No (11), 1608–1630.

Anderson, F.M., 1927. The Marine Miocene deposits of North Colombia. *Academy* of Sciences. 14 (3): 87-95.

Anderson, F.M., 1929. Marine Miocene and related deposits of north Colombia. *Proceedings of the California Academy of Sciences*. 18 (4): 73-213.

ANH, 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology a New Proposal. Bogotá : ANH and B&M Exploration Ltda., 2007.

ANH, 2009. ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos. Recuperado el 05 de Febrero de 2009, de ANH Mapa de Tierras: http://www.anh.gov.co/es/index.php?id=1.

Beaubouef, R. T., y Friedmann, S. J., 2000. High Resolution Seismic/Sequence Stratigraphic Framework for the Evolution of Pleistocene Intra Slope Basins, Western Gulf of Mexico: Depositional Models and Reservoir Analogs. GCSSEPM Foundation 20th Annual Researth Conference Deep-Water Reservoirs of the World, p 21.

Busch, D. A., 1974. Ancient Examples of Beach Sandstones; Stratigraphic Traps in Sandstones--Exploration Techniques, Memoir 21. P.48 - 71

Bucsh, D. A., 1974. Channel Sandstones. En Stratigraphic Traps in Sandstones-Exploration Techniques, Memoir 21. 72 - 107. AAPG.

Cataneanu, O., 2002. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls: Journal of African Earth Sciences, v. 35, p. 1–43.

Catuneanu, O. (2006). Priciples of Sequence Stratigraphy . Alberta, Canada: Elsevier.

Cerón, J. F., Kellogg, J. N., Ojeda, G. Y., 2007. Basement Configuration of the Northwestern South America - Caribbean Margin from Recent Geophysical Data. CT&F (Ciencia, Tecnología y Futuro), 3 (3), 25-49.

Cheong, Dae-Kyo, Kendall, C. G.St.C., Stoudt, David L., & Bowen, Bruce E.; 1992, Analysis of Jurassic Marine sedimentary sequence and hydrocarbon occurence in the U.S.Gulf Coast Basin; Ocean Research, v.14, n.2, p.89-109 **De Porta, J. 1974.** Lexique Stratigraphique Internacional. Vol. V, fasc. 4^a, deuxième partie. París.

Duarte L. M., Rizzi J. A., Toledo M. A., Reistroffer J., Buitrago J., Avella E., Guerrero C, Suarez M., 2006. Estratigrafía y Controles Sedimentarios de la Cuenca Costa Afuera en el Caribe Colombiano. Cartagena, Colombia, s.n., 2006. Memorias IX Congreso Bolivariano "Exploración Petrolera de Cuencas Sub Andinas". pág. 11.

Duque Caro, H., 1976. Características estratigráficas y sedimentarias del Terciario marino de Colombia. *Segundo Congreso Latinoamericano de Geología*. 945-964.

Duque Caro, H. y Reyes G, R. 1999. Biostratigraphy Study Intergrating Seismic Data of the Guajira Region (Onshore and Offshore). Bogotá.

Ecopetrol-ICP, **2007**. Estratigrafía de las Secuencias Cenozoicas del Norte de Colombia. Ecopetrol-ICP. Piedecuesta : s.n., 2007. Técnico.

Ecopetrol S.A. 2008. Informe Final del Proyecto de Modelamiento Geológico de Áreas Costa

Escalante, C., 2005. Integrated Seismic Stratigraphic And 1-D Basin Analysis Of The Tayrona Depression – Offshore Baja Guajira Basin, Colombia. Norman, Oklahoma. Tesis de Maestría.

Escalona, A., Mann P., 2006, Tectonic controls of the right-lateral Burro Negro tear fault on paleogene structure and stratigraphy, northeastern Maracaibo Basin: AAPG Bulletin, Volumen. 90. 479-504.

Guzmán, G., 1995, Geología regional del Caribe colombiano. Problemática estratigráfica. VI Congreso Colombiano del Petróleo y Medio Ambiente: Desarrollo Social. Memorias, T. I, pp. 57-63.

Haq, B. U., Hardenbol, H., & Vail, P. R., 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic. Science , 235 (4793), 1156-1167.

Hernandez, R., & Guerrero, C., 2006. Expresion Profunda De Dominios Oceánico Y Continental, Y Propagación De Su Deformación Hacia La Cobertera Sedimentaria Del "Offshore" Caribe. IX Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas".

Hernandez. R., Ramírez. V. y Reyes J. P., 2005. Evolucion Geohistórica de las Cuencas del Norte de Colombia. VIII Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas".

Hoorn Carina, Guerrero Javier, Sarmiento Gustavo A. Lorente Maria A., 1995. Andean Tectonics As a Cause for Changing Drainage Patterns in Miocene Northern South America. Geology 23, 237-240.

Kominz, M. A., Browning, J. V., Miller, K. G., Sugarman, P. J., Mizintseva, S., & Scoteses, C. R., 2008. Late Cretaceous to Miocene Sea-Level Estimates from the New Jersey and Delaware Coastal Plain Coreholes: An Error Analysis. The Authors. Journal Compilation, Basin Research , 211-226.

Mitchum, R. M., Vail, P. R., Thompson, S., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphy Analysis. Charles E. Payton. Seismic Stratigrphy Applications to Hidrocarbon Exploration. Oklahoma : s.n., 1977, pág. 514.

Molina M., A., Molina M., C., Giraldo O., L., Barrero O., R., 1999. Caracteristicas Estratigráficas y Morfodinámicas de la Franja Litoral Caribe Colombiana (Sector Barranquilla (Bocas de Ceniza) - (Flecha de Galerazamba)). Boletin de Investigación Marina y Costera, 61-94.

Molinares, C. E., Mantilla, O., Pulido, M. A., Espitia, D., Patarrollo, G. 2007. Informe técnico Ecopetrol-ICP. Carta Biocronoestratigráfica Baja Guajira Offshore. Piedecuesta, Santander.

Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaiana, C., Steinberger, B., Heine, C., 2008. Long-Term Sea-Level Fluctuations Driven by Ocean Basin Dynamics. Science, 319, 1357-1362.

Olaya L., Ivan D., Rey P., Alexander., 2004. Interpretación Sismica del Offshore Caribe Colombiano: Evaluación Bloque Oca. Ecopetrol-ICP. Pedecuesta.

Peters, K. E., Snedden, J. W., Sulaeman, A., Sarg, J. F., & Enrico, R. J., 2000. A New Geochemical-Sequence Stratigraphic Model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 12-44.

Pindell, J., & Kennan, L. 2009. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. The geology and evolution of the region between North and South America, Geological Society of London, Special Publication

Posamentier, H. W., Meizarwin, Wisman, P. S., Plawman, T., 2000. Deep Water Depositional Systems--Ultra-Deep Makassar Strait, Indonesia. GCSSEPM Foundation 20th Annual Rersearch Conference Deep-Water Reservoirs of the World, (pág. 11).

Prather, B. H., Keller, F. B., & Chapin, M. A., 2000. Hierarchy of Deep-Water Architectural Elements With Reference to Seismic Resolution: Implications for Reservoir Prediction and Modeling. GCSSEPM Foundation 20th Annual researh Conference Deep Water Reservoirs of the World, (pág. 19).

Ramirez C., Victor O., 2007. Stratigraphic Framework and Petroleum Systems Modeling Guajira Basin Nothern Colombia. Alabama: Department of Geological Sciences of The University of Alabama, 2007.

Ramos, E. L. 2005. Evolución Tectónica De la Región Caribe de Colombia. Instituto Colombian de Geología y Minería Servicio Geológico, Bogotá.

Renz, O., 1960. Geología de la parte sureste de la Península de la Guajira (Republica de Colombia). III Congreso Geológico Venezolano.

Reyes, G., Clavijo, J., 1996. Geología de los Cinturones de San Jacinto y Sinú Norte. VII Congreso Colombiano de Geología., INGEOMINAS, Bogotá. T. III, pp. 27-37.

Reyes, J. P., Garnica, M., Corredor, G., Mesa, J., Ramirez, V. 2003. Interpretación Estratigráfica Cuenca de La Guajira (Proyecto Determinación y Calidad de Roca Sello en la Guajira Offshore AEX-ICP). Ecopetrol. Pedecuesta, Santander: ICP.

Rollins, J., 1965. Stratigraphy and Structure of the Goajira Peninsula, northwestern Venezuela and northeastern Colombia, University of Nebraska studies No 30.

Rubio, R. y Ramirez, V. 2000. Cuenca de La Guajira –Definición cronoestratigráfica e implicaciones exploratorias. Reporte interno Ecopetrol. Bogotá.

Rubio, R. y Reyes, R., 1999. Biostratigraphic compilation of well data in the Guajira Region. Guajira Joint Venture Team, Texas–Shell Report. Reporte interno archivo Ecopetrol. Inf. Geol. 5683. Bogotá.

Vail, P. R. and Mitchum, R. M., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 1: Overview. AAPG. Seismic Stratigraphy Applications to Hidrocarbon Exploration. Oklahoma : The American Association of Petroleum Geologists.

Vence, E. M., 2008. Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the

Guajira margin of northern Colombia. MSc Thesis. The University of Texas at Austin.

Wheeler, H.E., 1964. Base level, lithosphere surface, and time stratigraphy: Geological Society of America Bulletin, v. 75, p. 599–610.