

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO



CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL GRUPO COGOLLO A TRAVÉS DE MULTIATTRIBUTOS SÍSMICOS, EN EL ÁREA DE BLOQUE VIII, LAGO DE MARACAIBO. VENEZUELA.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Ing. Marfisi González Emerson A.
Para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO



CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL GRUPO COGOLLO A TRAVÉS DE MULTIATTRIBUTOS SÍSMICOS, EN EL ÁREA DE BLOQUE VIII, LAGO DE MARACAIBO. VENEZUELA.

TUTOR: MSc. Miguel Nuñez|

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Ing. Marfisi González Emerson A.
Para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, 2010

Caracas, Septiembre de 2010

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por la Comisión de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por el Ing. Emerson A. Marfisi González, titulado:

**Caracterización Geológica del Grupo Cogollo a través de
Multiatributos Sísmicos, en el área de Bloque VIII, Lago de
Maracaibo. Venezuela.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.

Jurado

Jurado

Msc. Miguel Nuñez
Tutor

A Dios y a mis padres, a mi esposa Verónica y mi hija Verónica Alexandra, a mis hermanas y hermano, gracias a todos por su estimulo y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que de una u otra forma colaboraron con la realización de este trabajo y de manera muy especial hago llegar mi reconocimiento:

- A la Ilustre Universidad Central de Venezuela por recibirme en su seno.
- A Petróleos de Venezuela, S.A, por proveer la información sísmica y de pozos con la que se realizó este trabajo, además de apoyo técnico y logístico.
- A Msc. Miguel Núñez, por su guía y apoyo a lo largo de la realización de esta tesis.
- A Antenor Alemán, por sus consejos y recomendaciones.
- A los profesores: Jhony Casas, Andrés Pilloud, Fernando Chacartegui, Frank Audemard, María Verónica Castillo, Juan Dicroce, Mariangela Capello, José Méndez, Enrique Navarro, Nuris Orihuela y Daniel Loureiro.
- Al equipo del proyecto Cretácico del Lago de PDVSA – Intevep: Andrés Espeso, Israel Graterol, Jhanes Barreto, Martha Martínez, Vladimir Franchi y al resto del personal, gracias.
- A Ana María Rodríguez por su ayuda y colaboración.

Marfisi G., Emerson A.

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL GRUPO COGOLLO A
TRAVÉS DE MULTIATRIBUTOS SÍSMICOS, EN EL ÁREA DE
BLOQUE VIII, LAGO DE MARACAIBO. VENEZUELA.**

Tutor Académico: MSc. Miguel Nuñez.

**Tesis. Ciudad Universitaria, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,
Minas y Geofísica. 2010, 123 p.**

Palabras Claves: Cretácico, Lago de Maracaibo, Bloque VIII, Grupo Cogollo,
Formación Río Negro, Multiatributos Sísmicos, Facies Sísmicas, Karst.

Resumen. Utilizando información sísmica 3D y datos de los pozos que alcanzaron el intervalo cretácico en el campo Bloque VIII del Lago de Maracaibo, se realizó una caracterización geológica del Grupo Cogollo permitiendo la identificación y cartografía en tiempo de sus principales interfases estratigráficas y rasgos estructurales. Asimismo, a través de multiatributos sísmicos, se logró identificar: a) La posible existencia de estructuras de colapso kársticas desarrolladas en la Formación Apón y que se extienden hasta la formación La Luna; b) La presencia de cuñas sedimentarias de la Formación Río Negro depositadas en sincronía con la actividad de fallas normales y altos precretácicos que extendieron su influencia incluso hasta el inicio de la depositación de la Formación Apón. La existencia de estructuras de colapso kársticas dentro del Grupo Cogollo y de cuñas sedimentarias de la Formación Río Negro infrayaciendo a la Formación Apón implicarían la presencia de dos nuevo plays exploratorios para la búsqueda de hidrocarburos en esta cuenca. La alta porosidad de las estructuras de colapso y los importantes espesores de arena que pueden contener las cuñas sedimentarias, sumadas a la presencia de la Formación La Luna, como roca generadora y de la Formación Colon como roca sello, configuran la existencia de blancos exploratorios de primer orden aún por evaluar.

*“Sólo comprendemos aquellas preguntas que
podemos responder”*
F. Nietzsche

*“Ciencia es aquello sobre lo cual siempre
cabe discusión”*
J. Ortega y Gasset

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tablas	xiii
Introducción	14
CAPÍTULO I Planteamiento del Problema.....	15
Objetivo General	15
Objetivos Específicos.....	15
Justificación e Importancia	16
Trabajos Previos.....	17
CAPÍTULO II Marco Referencial	18
Consideraciones Teóricas.....	18
<i>Depósitos Carbonáticos</i>	18
<i>Como Se Origina Un Complejo De Carbonatos</i>	18
<i>Ambientes De Carbonatos Marinos</i>	20
<i>Procesos de Karstificación</i>	21
<i>Formas comunes derivadas de la Morfología Kárstica</i>	21
<i>Concepto De Colapso Kárstico</i>	23
<i>Visualización de rasgos geomorfológicos</i>	27
<i>Atributos Sísmicos</i>	30
<i>Clasificación de los atributos sísmicos.</i>	31
Área de Estudio	39
<i>Ubicación Geográfica</i>	39
Geología Regional.....	41
Estratigrafía del Cretácico.....	42
Formación Río Negro.....	42
Grupo Cogollo.....	43
Formación La Luna	45
Formación Colón.....	45
Evolución Tectonoestratigráfica de la Cuenca del Lago de Maracaibo durante el Cretácico.	46
<i>Secuencia Neocomiense – Aptiense</i>	47
<i>Secuencia Aptiense</i>	47
<i>Secuencia Albiense – Cenomaniense Inferior</i>	48
<i>Secuencia Cenomaniense superior – Campaniense inferior.</i>	50
<i>Secuencia Cretácico Superior.</i>	51
<i>Secuencia Campaniense superior – Maastrichtiense.</i>	51
CAPÍTULO III METODOLOGIA	53
Revisión y Carga de Datos.....	54
Calibración Sísmica – Pozos.....	56
Generación de Cubos de Coherencia y descomposición Espectral.....	56
Interpretación de Horizontes y fallas.	57
Correlaciones de pozos	58

Generación de cubos de atributos sísmicos.....	58
Visualización sísmica de rasgos geomorfológicos.....	59
Evaluación de la relación entre atributos sísmicos y propiedades petrofísicas.....	61
CAPÍTULO IV Resultados	71
Sismogramas Sintéticos.	71
Transectos Sísmica – Pozos.	74
Transectos de Pozos	80
Cubos de descomposición espectral.....	94
Horizontes sísmicos	97
Análisis de la Respuesta Sísmica del Grupo Cogollo.	103
Mapas de Facies Sísmicas.	110
Discusión.....	114
Marco tectonoestratigráfico durante el Cretácico inferior.	114
Presencia de Estructuras de Colapso Kársticas.....	115
Relación entre atributos sísmicos y propiedades petrofísicas.	116
Conclusiones	117
Generales.....	117
Especificas.....	117
Recomendaciones.....	119
Bibliografía	120

Índice de Figuras

Figura II 1. Perfil tipo de una plataforma carbonática mostrando sus distintos subambientes y relaciones con respecto al nivel del mar. Modificado de Méndez, 2007.....	19
Figura II 2. Perfil tipo de un sistema karstico y su posición con respecto al nivel freatico. Tomado de Méndez, 2007.....	22
Figura II 3. Esquema del desarrollo de un sistema de Dolinas, Uvalas, Poljés y Simas. Tomado de Mendez, 2007.....	22
Figura II 4. Esquema evolutivo de un colapso de cavernas. Tomado de Loucks, 1999.	24
Figura II 5. Esquema evolutivo de un sistema de cavernas. Tomado de Loucks, 1999	25
Figura II 6. Perfil sísmico mostrando paleocolapsos karsticos en el campo Boonsville, cuenca de Fort Worth, Estados Unidos. Tomado de Hardage, 1996.....	26
Figura II 7. Perfil sísmico mostrando paleocolapsos karsticos en la cuenca de Arkoma, Oklahoma, Estados Unidos. Tomado de Brinkerhoff, 2007.....	27
Figura II 8. a. Perfil sísmico mostrando la respuesta de canales fluviales. b. Sección sísmica horizontal mostrando la posición de los elementos del sistema depositacional de un ambiente fluvial. Tomado de Zeng, 2006.....	28
Figura II 9. Sección sísmica horizontal mostrando la geometría de crecimientos arrecifales soterrados. Tomado de Posamentier, 2005.....	29
Figura II 10. Tomado de Taner, 1979, mostrando la representación teórica de la traza compleja con sus componentes real e imaginaria.	30
Figura II 11. Muestra el esquema del proceso de clasificación de trazas sísmicas según su forma utilizando redes neuronales. Modificado de Manual Stratimagic.	36
Figura II 12. Esquema del análisis PCA utilizando como datos de entrada volúmenes de atributos. Tomado de Manual Stratimagic.	38
Figura II 13. Muestra el esquema del método de descomposición espectral utilizando como datos de entrada un volumen sísmico. Tomado de Nissen, (2002).	38
Figura II 14. Ubicación geográfica del área de estudio.	39
Figura II 15. Área de levantamiento sísmico 3D Blq_VIII_3D junto a los pozos que alcanzan el intervalo cretácico en el Bloque VIII.	40
Figura II 16. Columna estratigráfica del área de estudio representando a las formaciones jurásico – cretácicas.....	43
Figura III 2. Área del levantamiento sísmico BLQ VIII 3D mostrando la ubicación de los pozos que alcanzaron el intervalo Cretácico.	55
Figura III 3. Sección correspondiente a la línea 455 donde se aprecia sombreado el intervalo de estudio.	57
Figura III 4. Grafico cruzado entre PHIE (Porosidad) y el atributo Instantaneous Bandwidth.....	65
Figura III 5. Grafico cruzado entre PHIE (Porosidad) y el atributo Instantaneous Frequency.....	65

Figura III 6. Grafico de los valores reales versus la predicción para la propiedad PHIE	66
Figura III 7. Grafico cruzado entre SW (Saturación de Agua) y el atributo Standard Deviation Frequency	67
Figura III 8. Grafico cruzado entre SW (Saturación de Agua) y el atributo Instantaneous Bandwidth	67
Figura III 9. Grafico de los valores reales versus la predicción para la propiedad SW.	68
Figura III 10. Grafico cruzado entre VSH (Volumen de Arcilla) y el atributo Integrated Absolute Amplitude.	69
Figura III 11. Grafico cruzado entre VSH (Volumen de Arcilla) y el atributo RMS Frequency.....	69
Figura III 12. Grafico de los valores reales versus la predicción para la propiedad VSH.....	70
Figura IV 1. Sismograma sintético del Pozo “E”	72
Figura IV 2. Sismograma sintético del Pozo “H”.	73
Figura IV 3. Sismograma sintético del Pozo “I”	73
Figura IV 4. Mapa mostrando la ubicación de los transectos sísmica – pozos	75
Figura IV 5. Grafico cruzado de resolución vertical ($\lambda/4$) versus la profundidad en tiempo.....	75
Figura IV 6. Transecto “A” de dirección NE. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sonico: purpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.	76
Figura IV 7. Transecto “B” de dirección NE. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sonico: purpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.	77
Figura IV 8. Transecto “C” de dirección NO. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sonico: purpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.	78
Figura IV 9. Transecto “D” de dirección NE. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sonico: purpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.	79
Figura IV 10. Transecto de pozos “A” de orientación NE.....	81
Figura IV 11. Transecto de pozos “B” de orientación NE.....	82
Figura IV 12. Transecto de pozos “C” de orientación E – O.....	83
Figura IV 13. Transecto de pozos “D” de orientación NO.	84
Figura IV 14. Sección que pasa por el pozo “B” en dirección E – O. Las reflexiones truncadas marcadas con flechas rojas que muestran el adelgazamiento y atenuación del reflector tope Formación Apón.	87
Figura IV 15. Detalle de la sección marcada en recuadro amarillo en la Figura IV 13, mostrando la respuesta de tres distintos atributos sísmicos.	88
Figura IV 16.(a). Sección sísmica horizontalizada, en la reflexión correspondiente al tope de la Formación Apón. Esta sección intercepta al pozo “B” el cual perforó “basamento” que posiblemente corresponda a la Formación Rio Negro o La Quinta.	
B. modelo estratigráfico sugerido para esta sección sísmica.	89

Figura IV 17. Sección sísmica que pasa por el pozo “P”, el cual alcanzo a perforar sedimentos de la Formación La Quinta. En la sección se muestran con flechas amarillas reflectores truncados que muestran la geometría del alto estructural precretacico.....	91
Figura IV 18. Detalle de la sección marcada en recuadro amarillo en la Figura IV 17, mostrando la respuesta de tres distintos atributos sísmicos.....	92
Figura IV 19. a. Sección sísmica horizontalizada, en la reflexión correspondiente al tope de la Formación Apón. Esta sección intercepta al pozo “P” el cual alcanzó a perforar sedimentos de la Formación La Quinta. B. modelo estratigráfico sugerido para esta sección.....	93
Figura IV 20. Imágenes de los cubos sísmicos generados por descomposición espectral, mostrando una misma línea vista a distintos intervalos de frecuencia.	95
Figura IV 21.(a) Espectro de frecuencias del volumen sísmico BLQ VIII 3D en el intervalo de interés. (b) Espectro del volumen sísmico producto de la descomposición espectral a 22 Hz.....	96
Figura IV 22, Horizonte en tiempo correspondiente al tope de la Formación La Luna mostrando la ubicación de los transeptos A – A’ y B – B’ además de la ubicación de la falla principal F-A.....	98
Figura IV 23. Transepto A – A’ de orientación N – S	99
Figura IV 24. Transepto B – B’ de orientación E – O	99
Figura IV 25. Horizonte en tiempo correspondiente a la base de la Formación Apón (Base Apón).	100
Figura IV 26. Horizonte en tiempo correspondiente al Tope de la Formación Apón (Tope Apón).....	101
Figura IV 27. Horizonte en tiempo correspondiente a la Formación Maraca – Tope de la Formación Lisure (Maraca – Lisure).....	102
Figura IV 28. Imagen sísmica horizontal de amplitud a 44 ms por debajo del Horizonte Maraca – Lisure mostrando la posición de una serie de anomalías identificadas en el volumen sísmico.	103
Figura IV 29. Vista en planta y perfil de los rasgos “A” y “B” a lo largo del Horizonte Maraca – Lisure.....	104
Figura IV 30. Vista en planta y perfil de una posible estructura de colapso kárstica (anomalía “C”) originada en la Formación Apón y extendida hasta la Formación La Luna.....	106
Figura IV 31. Vista en planta y perfil de una posible estructura de colapso kárstica (anomalía “D”) originada en la Formación Apón y extendida hasta la Formación La Luna.....	107
Figura IV 32. Vista en planta y perfil de una posible estructura de colapso kárstica (anomalía “E”) originada en la Formación Apón y extendida hasta la Formación La Luna.....	108
Figura IV 33. Mapa de facies sísmicas correspondientes al intervalo entre los horizontes Maraca – Lisure y Tope Apón.....	111
Figura IV 34. Mapa de facies sísmicas correspondientes al intervalo entre los horizontes Tope Apón y Base Apón.	113

Índice de Tablas

Tabla III 1. Listado de pozos utilizados en este estudio.....	54
Tabla III 2. Detalle de la matriz de correlación entre atributos	60
Tabla III 3. Lista de los pozos utilizados para este estudio con los valores de las propiedades petrofísicas para el intervalo Maraca – Lisure.....	62
Tabla III 4. Lista de los cubos de atributos usados para este estudio.....	63
Tabla III 5. Resultados de la regresión lineal multivariable para la propiedad PHIE.	66
Tabla III 6. Resultados de la regresión lineal multivariable para la propiedad SW....	68
Tabla III 7. Resultados de la regresión lineal multivariable para la propiedad VSH..	70

Introducción

Durante el Cretácico Temprano, en gran parte de la Cuenca Occidental de Venezuela se inició la depositación de un intervalo de calizas con intercalaciones siliciclásticas denominado Grupo Cogollo. Este intervalo carbonático siguió a la depositación de los clásticos basales del Cretácico inferior, Formación Río Negro, y antecedió a la depositación de la prolífica Formación La Luna, roca madre del 98% de los hidrocarburos de la cuenca del Lago de Maracaibo (Escalona y Mann, 2006).

Desde la publicación de Garner (1926, en L.E.V, 1997) diversos autores se han interesado en el estudio de las características y relaciones estratigráficas del Grupo Cogollo principalmente por su importancia desde el punto de vista petrolero. Los esfuerzos se han orientado principalmente a estudiar la distribución lateral de facies, identificar la presencia de discordancias y en la detección de fracturas con el fin de detectar zonas con alta porosidad – permeabilidad, favorables para la acumulación de hidrocarburos (Renz, 1959), (Bartok, *et al.*, 1981), (Azpirltxaga, 1991), (Poppelreiter *et al.*, 2005), (Méndez, 2008). Todos estos años de investigación han mostrado hechos realmente interesantes como la posible presencia de dolinas en la Formación Apón identificadas a partir de sísmica 3D (Castillo, 2007) y de karst, vistos en núcleos del Miembro Piché y posiblemente originados durante un periodo de exposición subaérea de la plataforma carbonática de la Formación Apón durante el Aptiense (Méndez, 2008).

Con el objetivo de continuar aportando información sobre este intervalo carbonático, en este trabajo se aborda el estudio del Grupo Cogollo, desde el punto de vista de su respuesta sísmica integrada con información de pozos del campo Bloque VIII, Lago de Maracaibo. La información sísmica y los atributos que de ella se derivan se utilizan para delimitar sus principales interfaces estratigráficas, estudiar su relación con las unidades supra e infrayacentes y describir su estructura interna. Además se evalúa la posible relación entre los atributos sísmicos y las propiedades petrofísicas y el uso de facies sísmicas como herramienta descriptiva en el Grupo cogollo.

CAPÍTULO I

Planteamiento del Problema

Objetivo General

Caracterización geológica del Grupo Cogollo a través de multiatributos sísmicos, en el área de Bloque VIII, Lago de Maracaibo. Venezuela.

Objetivos Específicos

- i. Identificar rasgos de la arquitectura sedimentaria, geometría y relaciones estratigráficas del Grupo Cogollo a través de imágenes sísmicas y mutiatributos.
- ii. Evaluar la factibilidad de la clasificación de las trazas sísmicas según su forma, conocida como Facies Sísmicas, como elemento discriminador de propiedades físicas y/o características estructurales en secuencias carbonáticas.
- iii. Evaluar la posible relación entre los atributos sísmicos y las propiedades petrofísicas.

Justificación e Importancia

La explotación petrolera en la Cuenca del Lago de Maracaibo se ha concentrado desde sus inicios en los yacimientos terciarios principalmente en las formaciones Misoa y Lagunillas por lo cuantioso de sus reservas y moderada profundidad de los objetivos. Sin embargo los yacimientos cretácicos de esta cuenca han venido tomando cada vez más importancia como fuente de hidrocarburos aun cuando ameritan mayores esfuerzos para la caracterización de reservorios y la prospección de nuevas acumulaciones.

La exploración en búsqueda de acumulaciones de hidrocarburos en el Grupo Cogollo se ha abordado tradicionalmente desde diversos puntos de vista. Uno de estos enfoques tiene como premisa que las acumulaciones de hidrocarburos en este intervalo carbonático tienen un control estructural relacionado con la presencia y densidad de fracturas (Galárraga et al., 2005) aunque esta presencia de fracturas pueda estar controlada por la distribución lateral de las facies carbonáticas y su grado de ductilidad (Bartok, *et al.*, 1981). Por otro lado también se cree que los yacimientos, dentro del grupo Cogollo, están estrechamente relacionados a la distribución de las facies sedimentarias y a procesos de disolución y generación de porosidad secundaria (Méndez, 2008), mientras que las fracturas solo jugarían un papel menor en la acumulación de hidrocarburos y su presencia solo mejoraría localmente la permeabilidad.

Por su parte, Poppelreiter et al., 2005, muestra una interesante asociación entre los escenarios anteriormente propuestos donde sugiere que las acumulaciones de hidrocarburos en el Grupo Cogollo presentan una conjunción entre rasgos estructurales y estratigráficos; donde los fluidos diagenéticos que pasan a través de fallas y fracturas interactúan con ciertas y determinadas facies carbonáticas dando origen a zonas con porosidad secundaria y excelentes características como reservorio. Cualquiera que sea la visión con la que abordemos la exploración de nuevos yacimientos en el Grupo Cogollo, esta requiere de una profundización en el conocimiento de la respuesta sísmica de esta unidad y del ensayo de nuevas técnicas y procedimientos que permitan aportar nuevos datos sobre su estratigrafía y rasgos estructurales.

Trabajos Previos

Renz (1959)	Bartok, <i>et al.</i>, (1981)	Azpiritxaga (1991)	Stauffer (1994)	Lugo y Mann (1995)
Presenta el primer compendio completo sobre la estratigrafía del Cretácico en el occidente de Venezuela, introduciendo el nombre de Formación Peñas Altas para el equivalente de Fm. Aguardiente en los estados Trujillo y Lara.	Realizó un Análisis sedimentológico, petrofísico y diagenético del Grupo Cogollo en la parte central del lago con énfasis en explicar la variación lateral de facies y su relación con la presencia de fracturas.	Estudió las facies carbonáticas y ambientes depositacionales presentes en el Grupo Cogollo del Bloque I del Lago de Maracaibo generando una descripción muy completa de facies sedimentarias y su relación con la estratigrafía secuencial.	Sugiere un modelo depositacional para el Grupo Cogollo en la Cuenca del Lago de Maracaibo, basado en información geológica regional Colombo - Venezolana y modelos climáticos	Presenta una síntesis de la evolución tectónica de la Cuenca del Lago de Maracaibo desde el Jurásico al Eoceno usando transectos sísmicos regionales e información de pozos aportada por Maraven y Lagoven.
Parnaud, <i>et al.</i>, (1995)	Regueiro (1997)	Poppelreiter (2005)	Castillo (2006)	Méndez (2008)
Presenta un completo compendio sobre la evolución tectonoestratigráfica del occidente de Venezuela con énfasis en la estratigrafía secuencial, la expresión sísmica de las unidades cretácicas y su importancia desde el punto de vista petrolífero	Realizó un estudio sobre la factibilidad del uso de atributos sísmicos a nivel del Grupo Cogollo en el Bloque VIII del Lago de Maracaibo con la información sísmica disponible hasta ese momento y datos de producción de pozos del área.	Presenta una completa evaluación estructural y de zonas prospectivas para hidrocarburos dentro del Grupo Cogollo en el campo Urdaneta del Lago de Maracaibo, considerando la relación entre estructuras, facies sedimentarias y diagénesis.	Plantea la existencia de un sistema kárstico desarrollado en la Formación Apón, identificado a partir de la interpretación de 1600 Km ² de sísmica 3D en la parte centro – sur del Lago de Maracaibo.	Realizó un completo estudio sedimentológico del Grupo Cogollo, en el Lago de Maracaibo con énfasis en la descripción de facies, y ambientes de sedimentación. Identificó la presencia de karst en núcleo del Mbro. Piché, pozo VLA 711

CAPÍTULO II

Marco Referencial

Consideraciones Teóricas

Depósitos Carbonáticos

Los sedimentos y rocas carbonáticas contienen más de 50% de minerales de carbonatos los cuales están compuestos por $(CO_3)_{2-}$ y uno o más cationes. La calcita, $CaCO_3$, es el mineral más común y el componente principal de las calizas, seguido de la dolomita, $(CaMg(CO_3)_2)$. En conjunto estos dos minerales constituyen más del 90% de los minerales de carbonatos formadores de rocas durante el tiempo geológico.

Las calizas y dolomías generalmente constituyen acuíferos y depósitos de hidrocarburos, así como yacimientos de zinc, plomo, plata y mercurio. Como reservorios importantes de hidrocarburos representan aproximadamente un 50% de los depósitos del mundo. En los yacimientos del Golfo Pérsico y en México la mayor parte de los depósitos de hidrocarburos se encuentran almacenados en calizas y dolomías. En Venezuela la mayor parte de los yacimientos de hidrocarburos corresponden a facies de areniscas, pero yacimientos importantes en calizas y dolomías se encuentran en el Cretácico de la cuenca del Lago de Maracaibo, frente de Perijá y zonas de llanuras de marea de la región de Barinas (Méndez, 2007).

Como Se Origina Un Complejo De Carbonatos

Un complejo de carbonatos se origina cuando se conjugan variables indispensables de temperatura, salinidad, biota, profundidad del agua, disminución o ausencia de sedimentos

clásticos, etc, (Figura II 1). Los carbonatos se desarrollan en una isla oceánica, una franja o plataforma costera donde prevalezcan las condiciones ideales para su formación (Méndez, 2007).

En la franja costera los carbonatos se originan como bancos alineados con la costa o arrecifes frangeantes. En la plataforma costera los carbonatos darán inicio a un sistema de rampa con el ascenso del nivel del mar. Las facies de carbonatos progradarán en dirección a la costa siempre y cuando el sedimento producido pueda compensar el aumento del nivel del mar. En el caso en que el nivel del mar descienda, la plataforma quedará expuesta y dependiendo del clima local y la mineralogía predominante (aragonito-calcita Mg-calcita), la erosión y diagénesis puede desarrollar amplias zonas de Karst (clima húmedo) o los relieves superficiales balanceados (clima árido).

La morfología derivada de la erosión condicionará, en gran medida, la nueva morfología y sistema de facies que se formarán con el próximo ascenso del nivel del mar, depositándose sobre las zonas erosionadas precedentes. La exposición de los carbonatos, el lapso de tiempo y el clima, incidirán en el relieve sobre el cual se formarán los sedimentos derivados de la nueva transgresión relativa del nivel del mar.

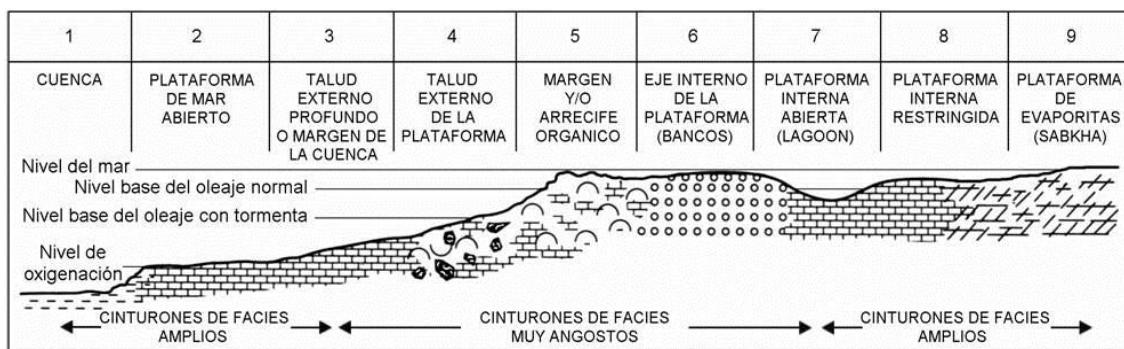


Figura II 1. Perfil tipo de una plataforma carbonática mostrando sus distintos subambientes y relaciones con respecto al nivel del mar. Tomado de Méndez, 2007.

Ambientes De Carbonatos Marinos

Los depósitos de carbonatos marinos pueden ser divididos en tres grandes grupos de acuerdo a la posición con respecto a la plataforma costera, origen de los carbonatos del depósito (como el caso de los carbonatos pelágicos), carbonatos derivados de islas oceánicas, etc. Estos tres grupos son: Carbonatos derivados de la plataforma continental, Carbonatos tipo plataforma (frangeantes y atolones no dependientes de la plataforma continental) y Carbonatos pelágicos. En los dos primeros casos una serie de factores son de gran importancia como la salinidad, profundidad de las aguas, temperatura, régimen hidrodinámico, morfología, tipo de substrato, penetración de la luz (zona fótica), etc.

- i. Carbonatos relacionados con la plataforma: Estos depósitos de carbonatos comprenden arrecifes de barrera, frangeantes, bancos, plataformas, rampas, etc. Estos ambientes comprenden, a su vez, una serie de ambientes relacionados con los depósitos mayores, como son: ambientes derivados de la fluctuación de las mareas, zonas de salinas, sabkhas, lagunas, barras litorales, zonas propias de biohermos, etc. Estos complejos de carbonatos presentan variaciones en el tipo de pendiente del talud externo y el margen de la plataforma. Las plataformas con arrecifes orgánicos en el margen poseen taludes con pendientes más inclinadas que las plataformas que presentan bancos de fragmentos esqueletales, oolitas o montículos en los márgenes.
- ii. Carbonatos tipo plataforma, banco, atolones y arrecifes frangeantes insulares no relacionados con la plataforma continental adyacente. En este grupo entran los depósitos de carbonatos de Bahamas, arrecifes frangeantes que bordean islas oceánicas como en el Arco de las Antillas Menores, y atolones típicos del Pacífico e Indico.
- iii. Carbonatos de depósitos pelágicos. Depósitos de carbonatos derivados de foraminíferos pelágicos, pterópodos, cocolitos, etc.

Procesos de Karstificación

Las rocas carbonáticas pueden sufrir fenómenos de disolución en contacto con aguas meteóricas cargadas de CO₂ los cuales se denominan procesos de karstificación. Estos procesos están comúnmente ligados a la exposición subaérea de la plataforma carbonática (figura II 2) pero también pueden ocurrir en el dominio del nivel freático, lo que no implica una exposición completa de la plataforma (Land, 1995)

En áreas con altas tasas de precipitación, la disolución puede ser intensa originando relieves de morfología kárstica y sistema de cavernas o zonas de colapso. En los carbonatos del Grupo Cogollo de la cuenca occidental de Venezuela (Aptiense - Albiense), algunas de las porosidades más importantes son del tipo móldico y de oquedad, generalmente derivadas de la disolución de fragmentos de bivalvos y en menor grado de ooides (Méndez 1989, 1997, en Méndez 2007).

Formas comunes derivadas de la Morfología Kárstica.

- Lapiaz: Incluye patrones de surcos, zanjas, crestas, etc. Son formas muy comunes en todos los karsts.
- Dolinas: Son depresiones y huecos formados por disolución en la superficie, generalmente en calizas y derivadas de una morfología tipo karst. Cuando dos o más dolinas se unen por el proceso continuo de disolución se denomina “uvala”. Cuando la unión de varias dolinas o uvalas forman grandes depresiones se les conoce como poljés.
- Sima: La erosión y disolución continua puede originar el colapso y derrumbe del techo de la zona expuesta originando grandes depresiones que se denominan simas. Las simas se pueden haber iniciado como dolinas, o por disolución subterránea debajo del techo. Finalmente en ambos casos el colapso dará origen a la sima (Figura II 3).

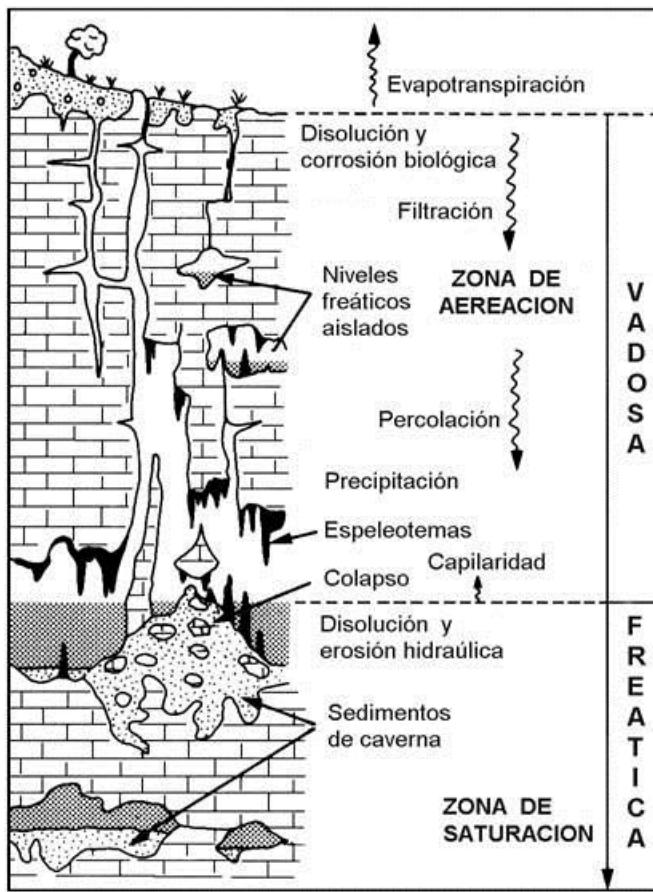


Figura II 2. Perfil tipo de un sistema kárstico y su posición con respecto al nivel freático. Tomado de Méndez, 2007.

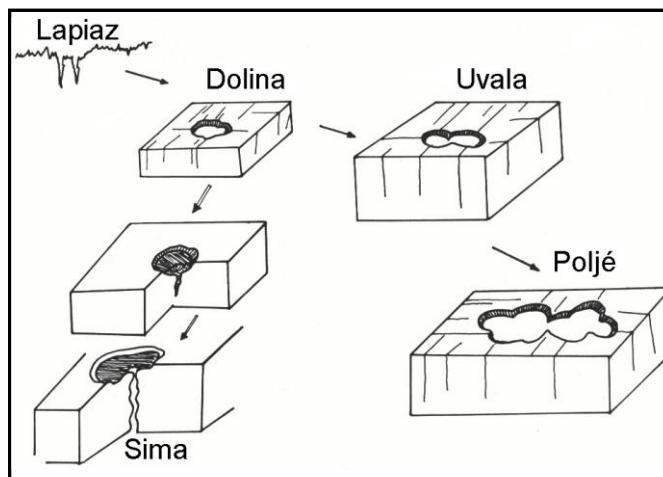


Figura II 3. Esquema del desarrollo de un sistema de Dolinas, Uvalas, Poljés y Simas. Tomado de Méndez, 2007.

Concepto De Colapso Kárstico

Davis (1949 en Robledo, 2005) aplicó el nombre de “cave breakdown” al fenómeno de hundimiento de cavidades desde el punto de vista de los proceso mecánico de rotura y hundimiento en una cavidad, sin profundizar en otros aspectos de carácter morfológico o sedimentológico asociados. Posteriormente, White y White (1969 en Robledo, 2005) utilizan la misma terminología, cave breakdown, pero abordan otros aspectos, fundamentalmente estructurales y mecánicos, definiendo formas producidas por el reajuste mecánico de los materiales afectados y adentrándose sensiblemente en el campo de la sedimentología, a partir de la diferencia de depósitos consecuencia del colapso.

La mayor parte de los trabajos sobre formas o depósitos asociados a paleocolapsos responden a estudios realizados a partir de sondeos sísmicos y geología de superficie (Hardage, 1996; Loucks, 1999; Brinkerhoff 2007). El colapso de sistemas de paleocavernas produce cuerpos de brechas y fracturas a gran escala, los cuales pueden originarse a partir de una sola caverna (Figura II 4) o un conjunto de estas que se interconectan formando un sistema de cavernas con numerosos pasajes (Figura II 5), produciendo, en este ultimo caso, una deformación en las capa superiores que puede llegar a ocupar cientos de kilómetros cuadrados.

Con frecuencia las extensas zonas de brechas, fracturas y depresiones estructurales que se desarrollan sobre estos sistemas de paleocavernas colapsadas pueden llegar a constituir excelentes reservorios para hidrocarburos como es el caso de los yacimiento de: Ellenburger del Ordovícico inferior de Texas; cuenca de Fort Worth (Figura II 6) y los de la Cuenca de Arkoma (Figura II 7) en los Estados Unidos de América.

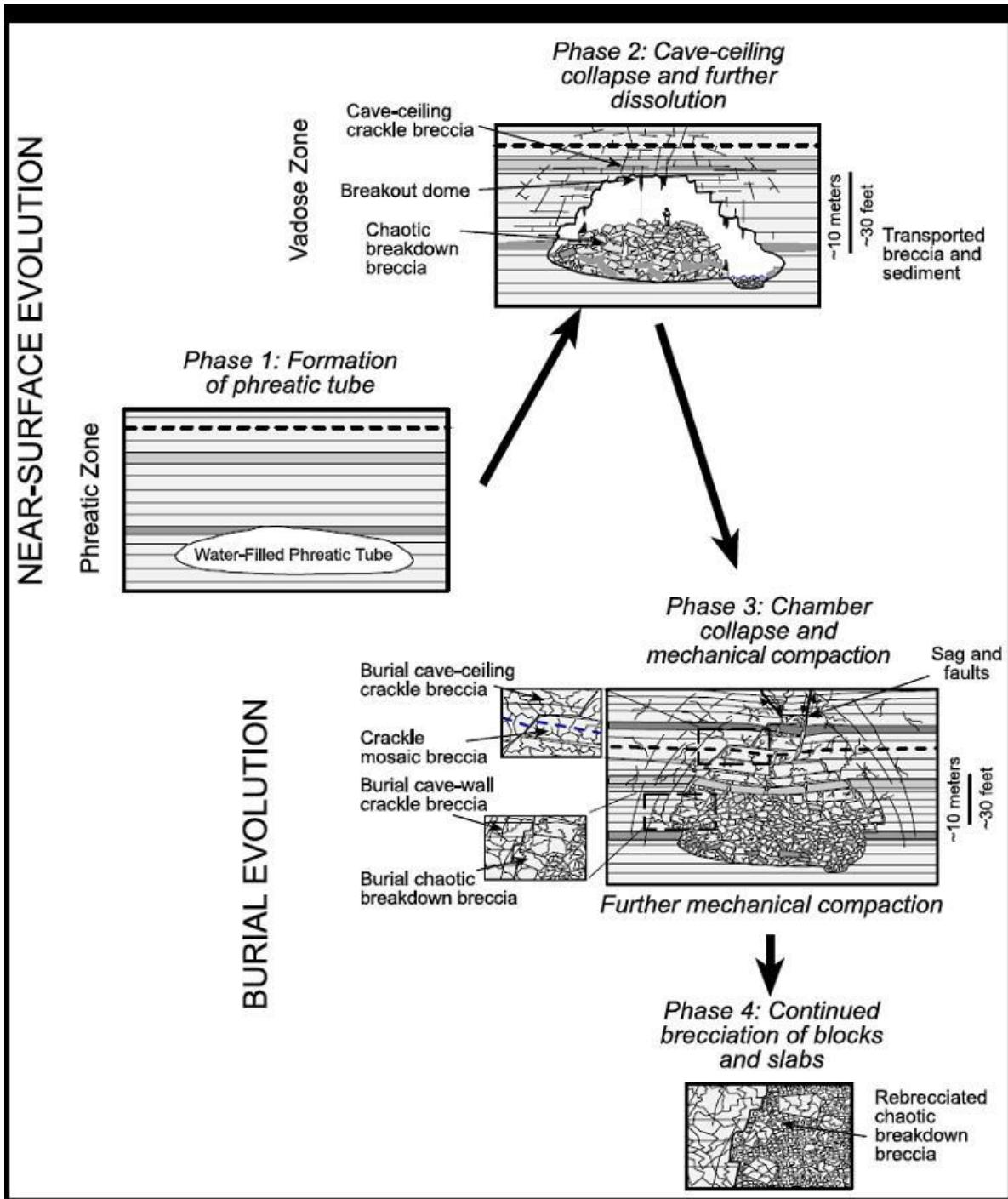


Figura II 4. Esquema evolutivo de un colapso de cavernas. Tomado de Loucks, 1999.

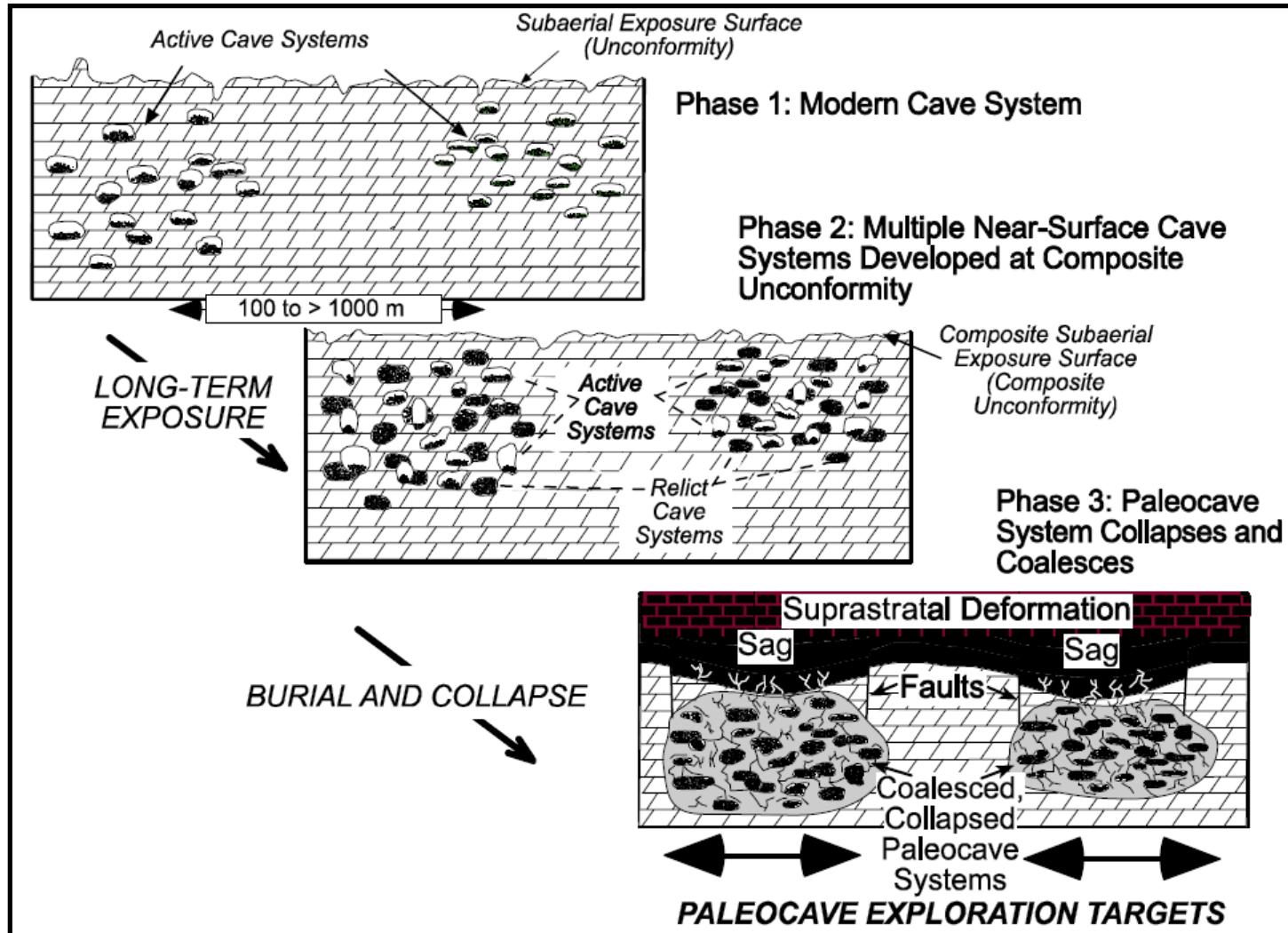


Figura II 5. Esquema evolutivo de un sistema de cavernas. Tomado de Loucks, 1999.

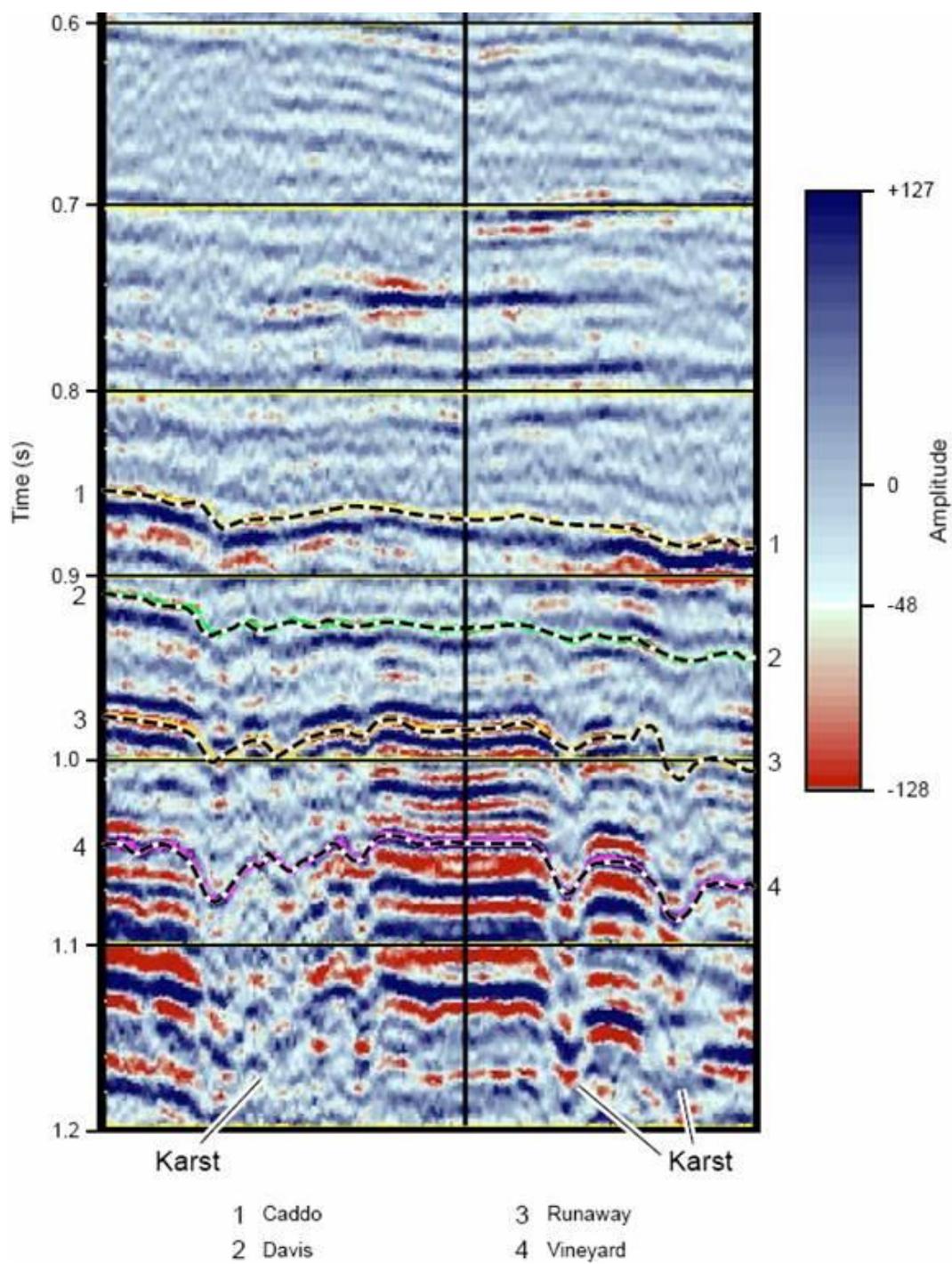


Figura II 6. Perfil sísmico mostrando paleocolapsos kársticos en el campo Boonville, cuenca de Fort Worth, Estados Unidos. Tomado de Hardage, 1996.

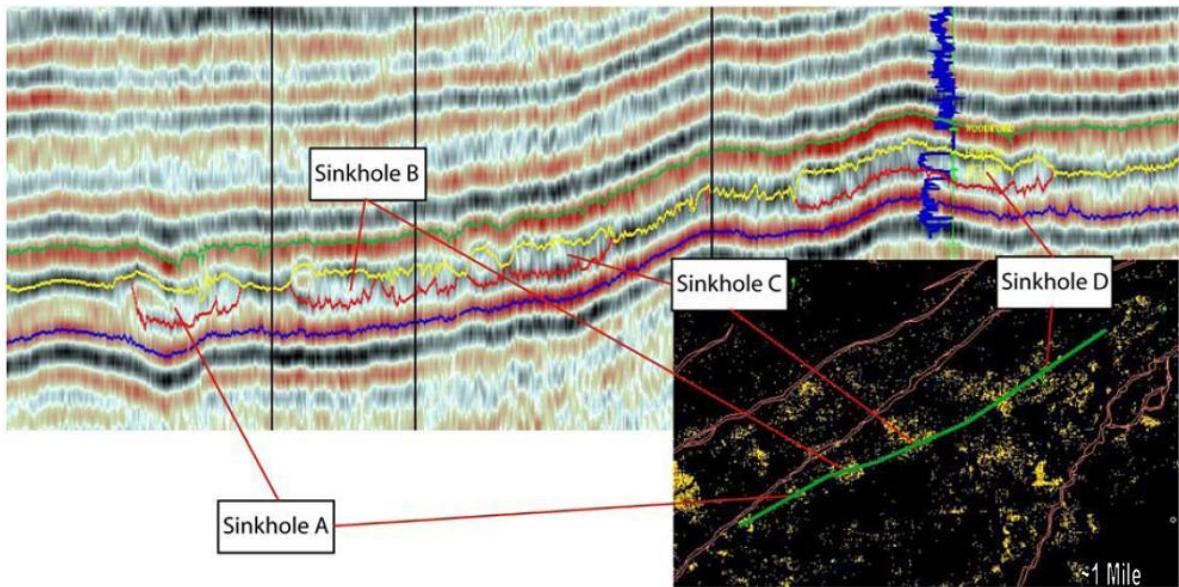


Figura II 7. Perfil sísmico mostrando paleocolapsos karsticos en la cuenca de Arkoma, Oklahoma, Estados Unidos. Tomado de Brinkerhoff, 2007.

Visualización de rasgos geomorfológicos

La técnica de visualización de elementos del sistema depositacional usando sísmica 3D, mejor conocida como Geomorfología Sísmica, es una aplicación novedosa impulsada formalmente por H. Posamentier, (2000, en Posamentier et al.; 2007) para vincular la respuesta sísmica en perfiles sísmicos horizontales con la presencia de elementos del sistema depositacional. Posamentier, 2007, define Geomorfología Sísmica como “la aplicación de técnicas analíticas orientadas al estudio de formas de paleorelieve soterradas y mostradas en imágenes de sísmica 3D”

Esta técnica ha resultado exitosa tanto en el caso de intervalos siliciclásticos como de unidades carbonáticas pudiendo mostrar en algunos casos, con extraordinario detalle, la disposición y características de los distintos elementos del sistema depositacional. Las

figuras II 8 y II 9 muestran ejemplos de imágenes sísmicas horizontales donde se observan elementos del sistema depositacional en ambientes siliciclásticos y carbonáticos respectivamente.

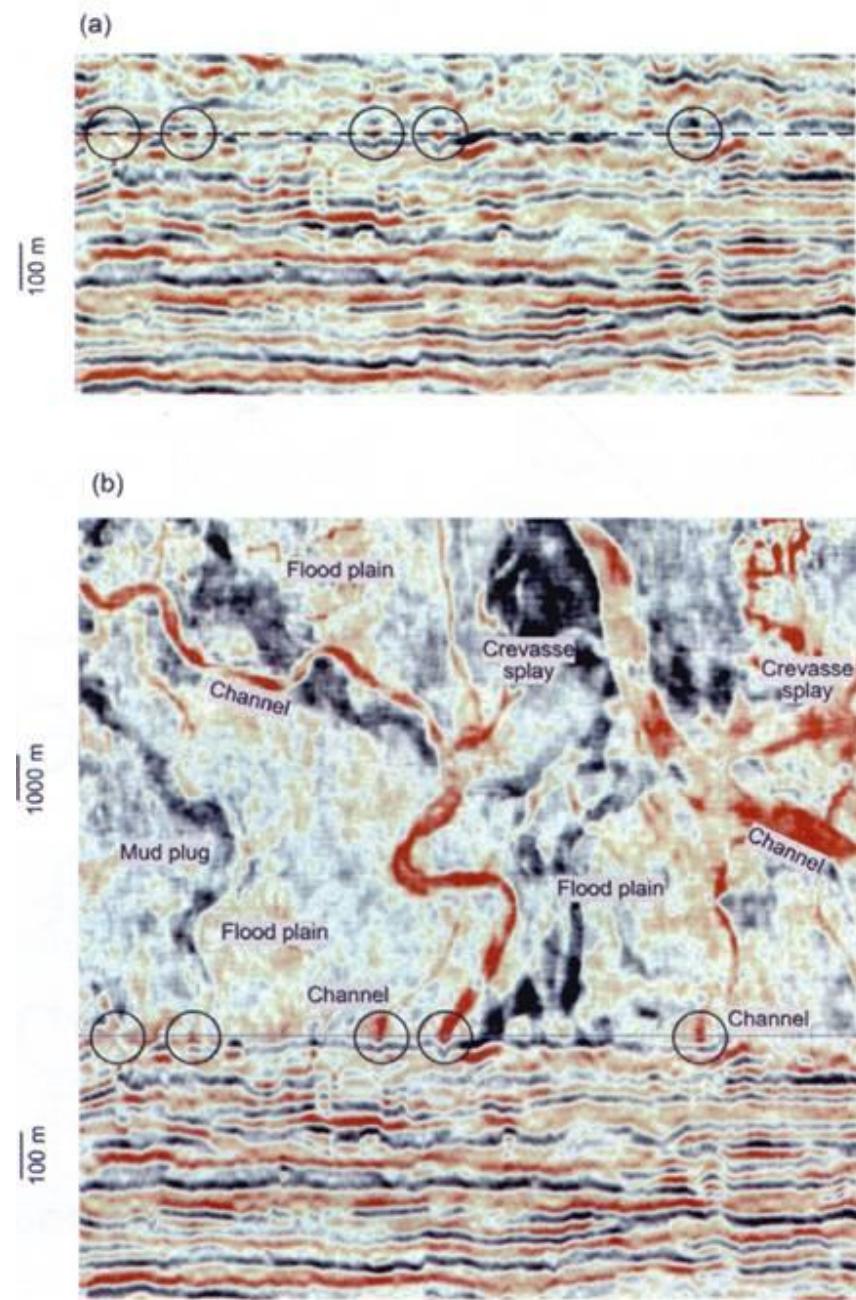


Figura II 8. a. Perfil sísmico mostrando la respuesta de canales fluviales. **b.** Sección sísmica horizontal mostrando la posición de los elementos del sistema depositacional de un ambiente fluvial. Tomado de Zeng, 2006.

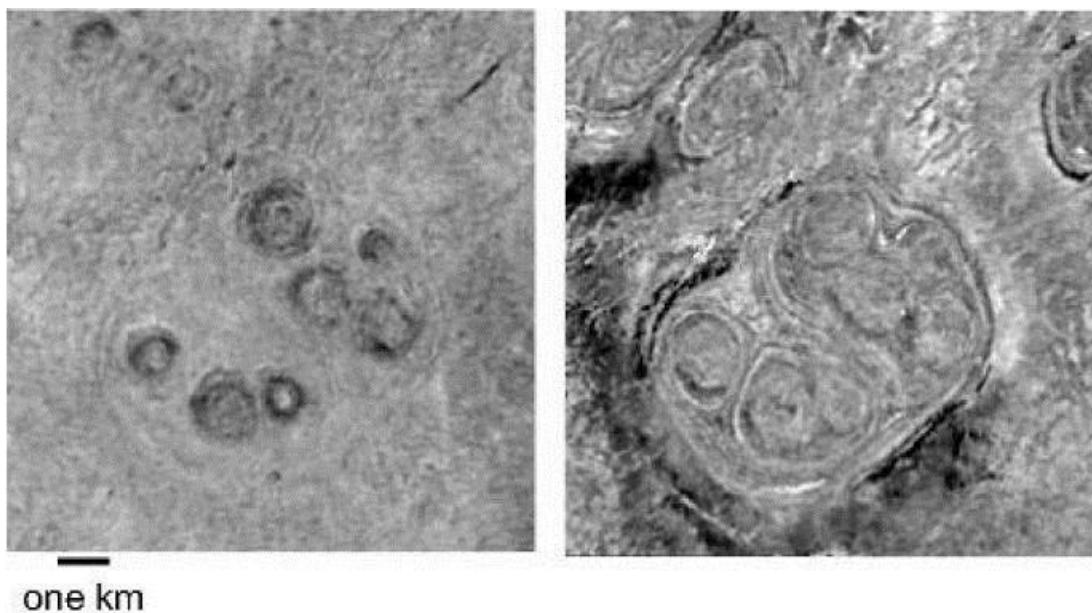


Figura II 9. Sección sísmica horizontal mostrando la geometría de crecimientos arrecifales soterrados.
Tomado de Posamentier, 2005.

Atributos Sísmicos

Los atributos sísmicos se definen como todos los componentes medidos, calculados o derivados a partir de datos sísmicos. Estos han transitado un largo camino desde su introducción a comienzos de los 70's y se han convertido en parte integral de todo proyecto de interpretación sísmica. Hoy en día son utilizados ampliamente en la predicción de litología y propiedades petrofísicas de yacimientos así como también en la exploración de hidrocarburos. Los atributos sísmicos incluyen atributos de la traza compleja (Figura II 10), atributos geométricos y atributos pre apilamiento.

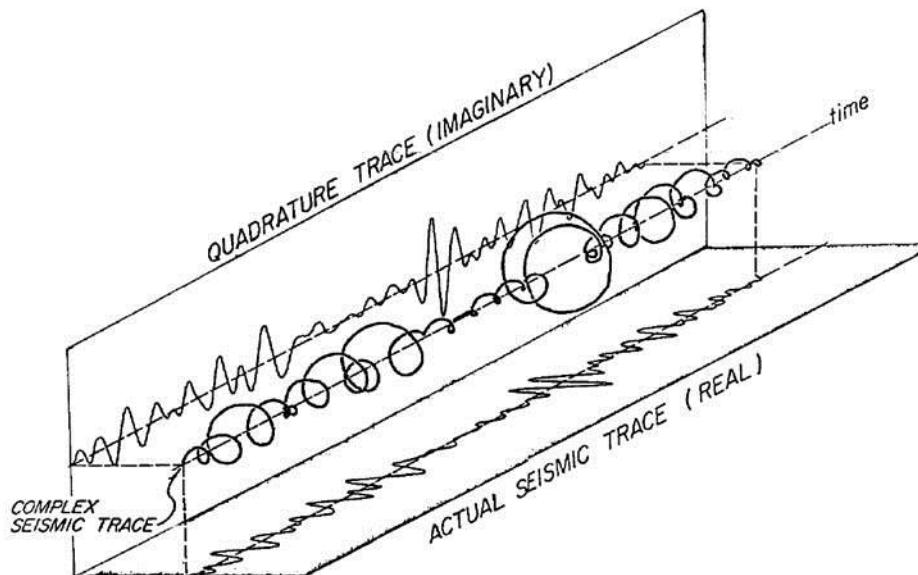


Figura II 10. Tomado de Taner, 1979, mostrando la representación teórica de la traza compleja con sus componentes real e imaginaria.

Clasificación de los atributos sísmicos.

Los atributos sísmicos se dividen en dos grandes grupos, Atributos Físicos y Atributos Geométricos.

Atributos Físicos

Los atributos físicos son los datos sísmicos directamente relacionados con la propagación de la onda, litología y otros parámetros físicos. Los atributos físicos se dividen en dos subclases atributos pre apilamiento y post apilamiento los cuales a su vez se dividen en atributos instantáneos y atributos de la traza sísmica. Los atributos instantáneos se calculan muestra a muestra y reflejan los cambios continuos de los atributos a lo largo del tiempo y del espacio mientras que los atributos de la traza sísmica representan las características de la traza y su espectro de amplitud

Atributos Post apilamiento (instantáneos)

Estos atributos se calculan a partir de la traza compleja utilizando filtros Butterworth y Pasa – Banda para obtener sus componentes reales e imaginarias. El filtro Pasa – Banda suprime las frecuencias muy altas y muy bajas de la señal para generar posteriormente una traza estable mediante la Transformada de Hilbert.

Componente real e imaginaria de la traza compleja.

La traza compleja se genera en el dominio del tiempo a través de un filtro Butterworth, cuya componente real genera la componente real de la traza sísmica, teniendo de esta manera ambas componentes de la traza sísmica las mismas características espectrales. La componente real e imaginaria de la traza sísmica se usa posteriormente para generar una gran variedad de atributos sísmicos como los que se describen a continuación:

Fuerza de Reflexión o Envolvente de la Amplitud (Reflection Strength, Envelope Amplitude)

- Representa principalmente la intensidad del contraste de impedancia acústica, por lo tanto reflectividad.
- Indicador de puntos brillantes.
- Posible indicador de acumulaciones de gas, límites de secuencia, capas delgadas, cambios laterales en la porosidad.

Derivada de la envolvente con respecto al tiempo (Time Derivative of Envelope).

- Indicador de interfares estratigráficas y discontinuidades.
- Es utilizada para el cálculo de la dirección de propagación de ondas.

Segunda derivada de la envolvente con respecto al tiempo.

- Muestra todas las interfaces reflexivas visibles dentro del espectro sísmico.
- Muestra acuñamientos estratigráficos.
- Representa con buen detalle los cambios estratigráficos en el subsuelo.

Fase Instantánea.

- No depende de la fuerza de la reflexión, lo que con frecuencia hace que eventos débilmente apreciables se hagan identificables
- Buen indicador de continuidad lateral.
- Indicador de discontinuidades.
- Se utiliza para el cálculo de la frecuencia instantánea y la aceleración.
- Buen visualizador de patrones estratigráficos.

Frecuencia Instantánea

- Corresponde al promedio de la frecuencia del espectro de amplitud de la ondícula sísmica.
- Indicador de capas delgadas.
- Indicador de continuidad Lateral
- Posible indicador de hidrocarburos a través de anomalías de baja frecuencia.
- Indicador de zonas de fracturas.
- Indicador de espesor de capas.

Aceleración Instantánea.

- Muestra patrones estratigráficos
- Puede estar relacionado con las propiedades elásticas de la roca.

Indicador de capas delgadas. (Thin bed Indicator)

- Calculado a partir de picos en la frecuencia instantánea,
- Muestra eventos que se solapan.
- Muestra la presencia de capas delgadas lateralmente continuas.
- Muestra detalles de los patrones estratigráficos.

Frecuencia dominante instantánea. (Instantaneous Dominant Frequency).

- Similar a la Frecuencia Instantánea pero proviene de la frecuencia RMS del espectro de amplitud de la ondícula sísmica.
- Permite calcular el ancho de banda de la señal sísmica.

Ancho de banda instantáneo. (Instantaneous Band-width).

- Representa el ancho de banda de la señal sísmica muestra a muestra.
- Muestra los efectos de absorción y cambios en el carácter sísmico.

Factor Q instantáneo. (Instantaneous Q).

- Muestra variaciones locales en el factor Q similares al cálculo de la impedancia acústica relativa a partir de la traza sísmica.
- Puede servir de indicador del contenido de fluidos.
- Indica la absorción relativa de las capas.

Impedancia acústica relativa instantánea. (Instantaneous Relative Acoustic Impedance).

- Representa el resultado de la integral de la parte real de la traza compleja y es una aproximación al componente de alta frecuencia de la impedancia acústica relativa.

Amplitud normalizada (Normalized Amplitude).

- Representa el coseno del ángulo de la fase instantánea.
- Incrementa la continuidad lateral de las reflexiones.

Envolvente modulada de la fase. (Envelope modulated Phase).

- Representa la respuesta de la fase instantánea ponderada por la magnitud de la envolvente de la traza, resaltando de esta manera las variaciones de fase de los eventos más fuertes sin la interferencia de los eventos débiles.

Atributos Pre – apilamiento.

Velocidades RMS

Este atributo puede obtenerse a través del análisis de las velocidades de migración. Se utiliza para la estimación de los porcentajes de arena / lutita, identificación de zonas con sobrepresión y detección de cambios litológicos mayores.

Atributos Geométricos

Los atributos geométricos reflejan las características de la distribución espacial de los datos sísmicos así como la continuidad y grado variabilidad del carácter de la señal. Entre los atributos geométricos encontramos:

- Dip y Azimuth.
- Coherencia.
- Detección de Fallas.
- Curvatura

Atributos de la traza sísmica.

Estos atributos se calculan muestra a muestra sobre la traza sísmica y representan la variación espacial de los valores de una traza o el conjunto de ellas a lo largo del tiempo. Estos valores de la traza determinan su geometría y si estos valores están influenciados por el carácter y la naturaleza de las interfaces geológicas a lo largo de las cuales viaja la señal, entonces, al estudiar su comportamiento estaríamos estudiando indirectamente el comportamiento de las interfaces geológicas aun cuando sus espesores estén por debajo de la resolución sísmica.

La idea planteada anteriormente representa el principio sobre el que se sustenta el método de clasificación de la traza sísmica según su geometría conocido como Facies Sísmicas,

particularmente el utilizado por el programa Stratimagic® de la compañía Paradigm. A través de este método se analizan las trazas sísmicas utilizando redes neuronales no supervisadas, obteniendo como resultado trazas patrón que reproducen mayoritariamente la forma de trazas presentes en el intervalo sísmico estudiado (Figura II 11).

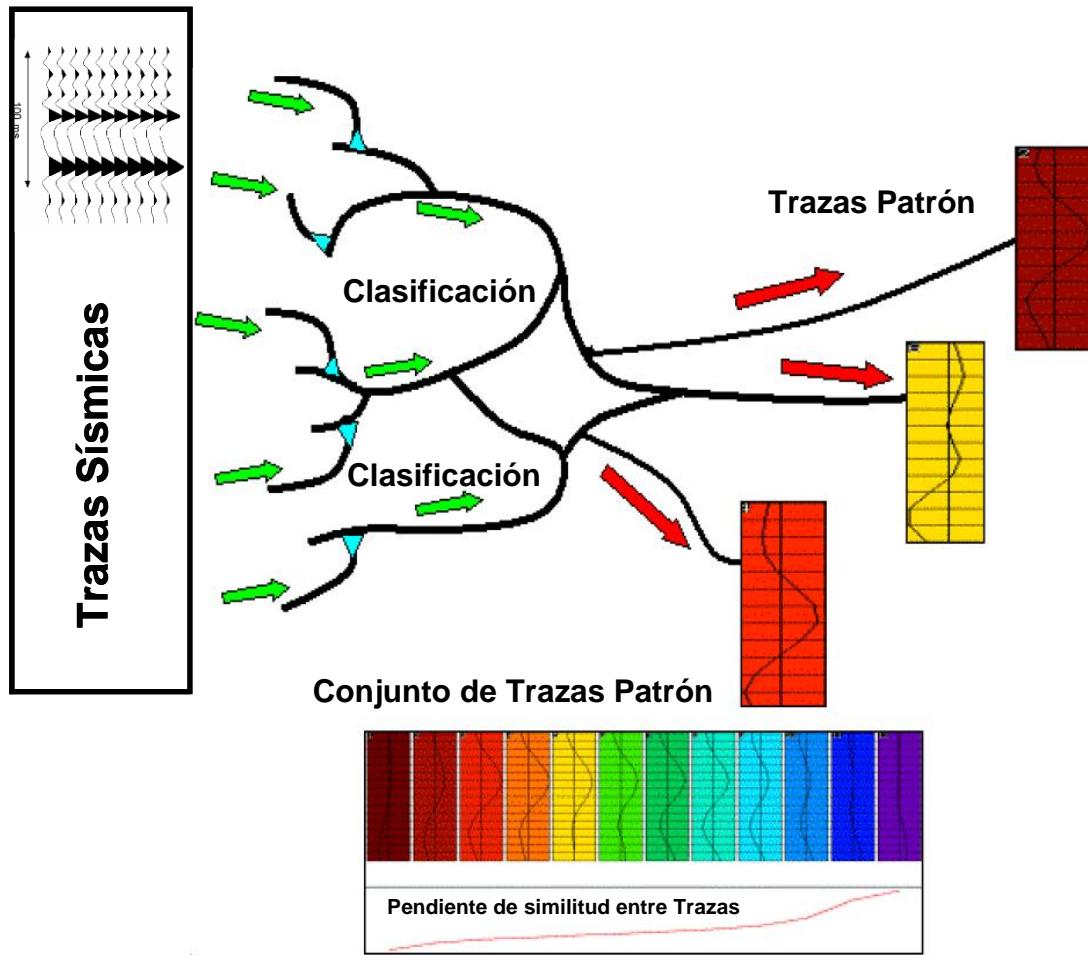


Figura II 11. Muestra el esquema del proceso de clasificación de trazas sísmicas según su forma utilizando redes neuronales. Modificado de Manual Stratimagic.

Análisis PCA.

El Análisis de Componentes Principales, conocido por sus siglas en inglés “PCA” consiste en un procedimiento matemático que transforma un número de variables posiblemente correlacionadas en un número menor de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. El primer componente principal representa la variabilidad espacial de la mayor parte de los datos mientras que los componentes sucesivamente los grados de variabilidad en orden de importancia.

El análisis PCA fue inventado en 1901 por Karl Pearson y es ampliamente utilizado para la clasificación de grandes volúmenes de datos. En geociencias se usa comúnmente para identificar la tendencia preferencial de un conjunto de datos y separarla de los datos con tendencia aleatoria. En el caso de análisis multiatributos se utiliza para comparar el conjunto de atributos entre sí y a la vez obtener uno o varios vectores que representen la tendencia principal del conjunto de datos (Figura II 12).

Descomposición Espectral

Consiste en convertir el conjunto de datos sísmicos desde el dominio del tiempo al de la frecuencia a través de la aplicación de la Transformada de Fourier. Este método permite separar la respuesta sísmica según la frecuencia de la señal que la origina, lo cual en muchos casos, ayuda a identificar respuestas originadas por características estratigráficas, propiedades de roca y/o propiedades de fluidos en el subsuelo, que de otra manera se encuentran solapadas en la respuesta del rango completo de frecuencias (Figura II 13).

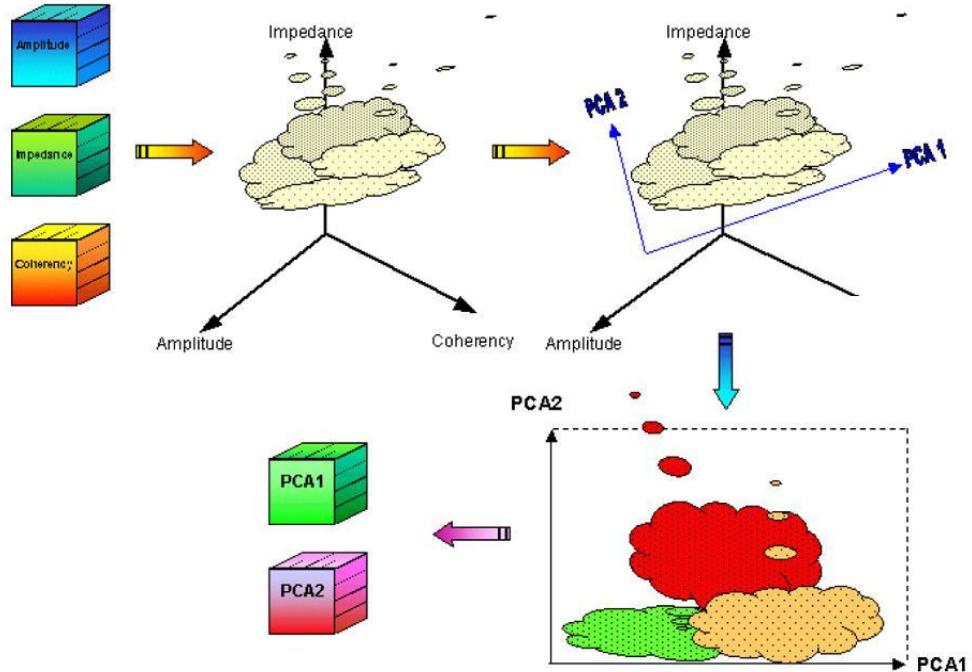


Figura II 12. Esquema del análisis PCA utilizando como datos de entrada volúmenes de atributos.
Tomado de Manual Stratimagic.

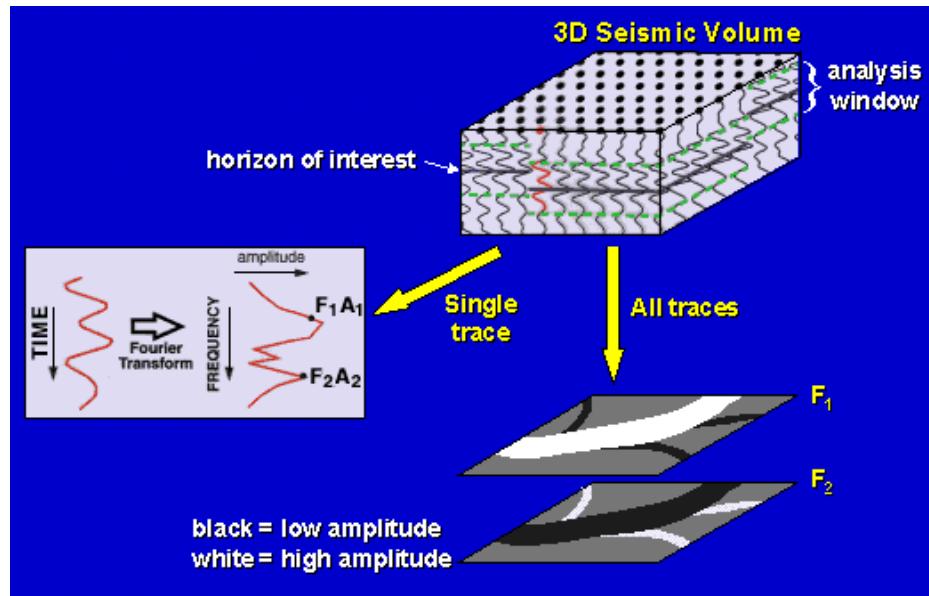


Figura II 13. Muestra el esquema del método de descomposición espectral utilizando como datos de entrada un volumen sísmico. Tomado de Nissen, (2002).

Área de Estudio

Ubicación Geográfica

La Cuenca del Lago de Maracaibo tiene una extensión de 50.000 Km² y está localizada en el extremo noreste de Sudamérica en la Cuenca Occidental de Venezuela. Limita al este y sur con la Cordillera de los Andes de Mérida, al oeste con la Cordillera de Perijá y al norte con el Mar Caribe (Figura II 14).

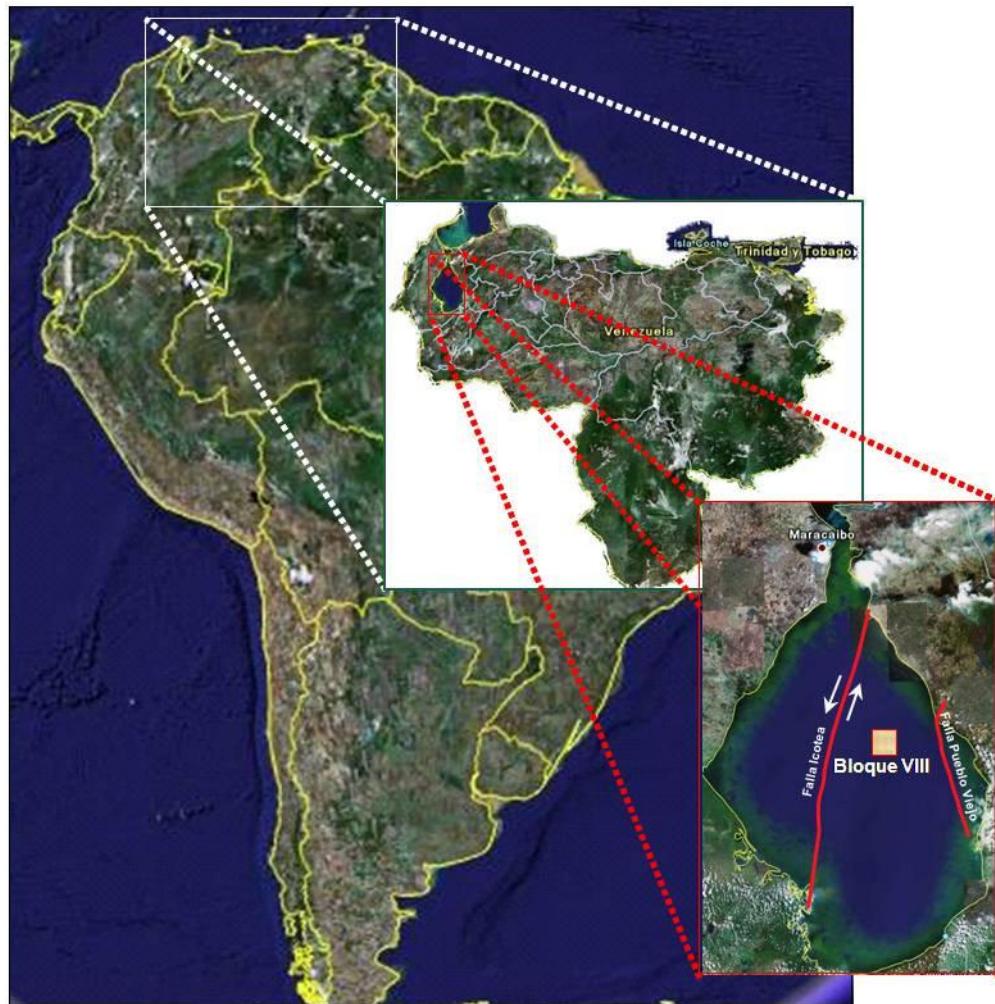


Figura II 14. Ubicación geográfica del área de estudio.

El Bloque VIII del Lago de Maracaibo pertenece a la Unidad de Explotación Centro – Sur Lago y se encuentra ubicado hacia la parte media del lago colindando hacia el norte con el Bloque XII, al este con el Bloque X, al sur con el Bloque Centro Lago y al este con el Bloque III. Este campo se encuentra cubierto por el levantamiento sísmico Blq_VIII_3D de 240 km² y posee 17 pozos que han alcanzado el intervalo cretácico, los cuales se muestran junto al área del levantamiento sísmico en la Figura II 15.

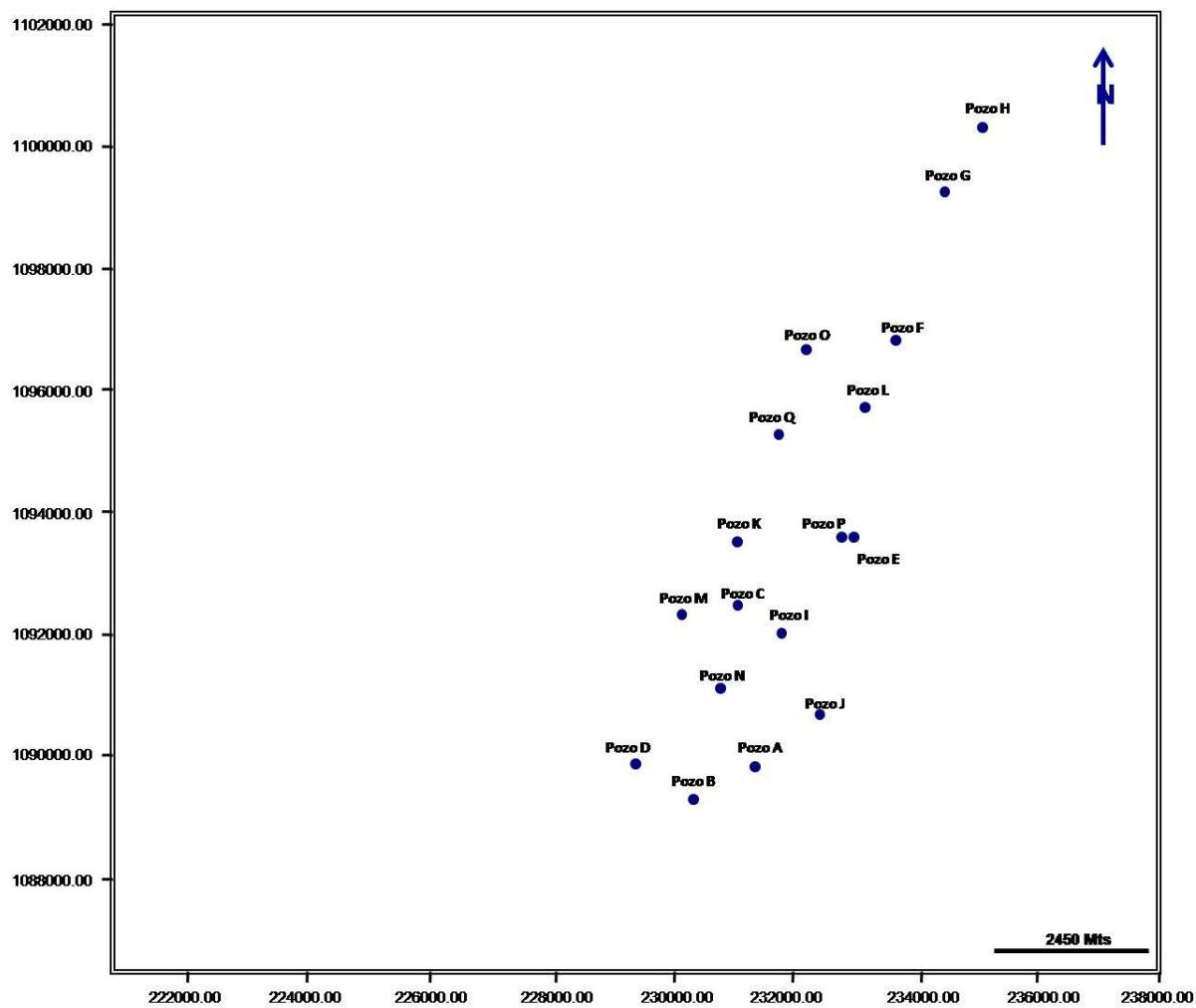


Figura II 15. Área de levantamiento sísmico 3D Blq_VIII_3D junto a los pozos que alcanzan el intervalo cretácico en el Bloque VIII.

Geología Regional

La Cuenca del Lago de Maracaibo está contenida dentro del denominado Bloque Maracaibo que constituye una cuña triangular de corteza continental delimitada al este y sur por una falla rumbo deslizante de tipo dextral denominada Falla de Boconó, al oeste por la falla rumbo deslizante sinestral denominada Zona de Falla de Santa Marta – Bucaramanga y al norte con la zona de fallas del Cinturón Plegado del Caribe (Mann, *et al.*, 2006). Dentro del Bloque Maracaibo están presentes una serie de fallas mayores de rumbo norte – noreste como: Lama – Icotea, Urdaneta y Pueblo Viejo, las cuales se originaron a partir de las fallas normales que delimitaban los grabenes jurásicos (Lugo y Mann, 1995) y fueron posteriormente reactivadas como fallas de rumbo durante el Eoceno.

La Cuenca del Lago de Maracaibo alberga una espesa columna sedimentaria (Figura II 16) con rocas que van desde el Jurásico al Cuaternario y un sistema petrolífero Cretácico - Terciario con reservas remanentes del orden de los 14 MMMBBL (Mann, *et al.*, 2006). Durante el Jurásico, se inició la depositación de una espesa secuencia de sedimentos continentales denominada Formación La Quinta, llenando un sistema de rift de dirección norte – noreste denominados Surco de Machiques, Surco de Uribante y Surco de Barquisimeto, formados a partir de la separación de norte y sur América (Lugo y Mann, 1995). El final de la depositación de la Formación La Quinta corresponde a un periodo de erosión regional que peniplanó los altos metamórficos del Paleozoico y los depósitos jurásicos, para dar paso a una extensa plataforma que cubría parte de Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela a inicios del Cretácico (Azpíritxaga, 1991).

Los depósitos cretácicos en la cuenca se iniciaron con la depositación de los clásticos basales de edad Barremiense denominados Formación Río Negro y continuaron con la sedimentación de los carbonatos y siliciclásticos del Grupo Cogollo. Durante el Turoniense, se inició la depositación de una unidad de calizas y lutitas negras denominada Formación La Luna la cual suprayace transicionalmente a las calizas del Grupo Cogollo (Lugo y Mann, 1995). La depositación cretácica continuó con la sedimentación de una caliza micrítica, de poco espesor, suprayacente a la Formación La Luna denominada Miembro

Socuy de la Formación Colón, sobre la que se depositó la espesa secuencia de lutitas que compone a la Formación Colón sensu stricto, principal sello regional para los yacimientos cretácicos.

Estratigrafía del Cretácico

A continuación se describen de forma cronológica las características más resaltantes de las formaciones cretácicas (Figura II 16) en el subsuelo del Lago de Maracaibo.

Formación Río Negro: Hedberg (1931 en L.E.V, 2007) empleó el término conglomerado de Río Negro, para designar capas basales de la secuencia del Cretácico en la Sierra de Perijá. Autores posteriores extendieron su reconocimiento a todo el occidente de Venezuela, en especial a los depósitos de gran espesor presentes en los surcos de Machiques, Uribante y Barquisimeto. Litológicamente consiste en areniscas blancas, generalmente de grano grueso, conglomerados heterogéneos; arcillas y lutitas variables, típicamente en tonos brillantes de amarillo, rojo y morado. De acuerdo con su fuente sedimentaria, las areniscas varían desde muy cuarzosas en el Surco de Uribante a muy feldespáticas en el Surco de Machiques (Van Andel, 1958 en L.E.V, 2007)

En la parte media de la formación, se presentan horizontes de coloración rojiza que recuerdan a la Formación La Quinta y es posible que ello se deba a erosión y resedimentación de estratos de esa formación. Las unidades superiores de esta formación, están formadas por capas de areniscas conglomeráticas; con estratos alternantes de poco espesor de lutitas y limolitas oscuras. El contacto superior, está definido por la aparición de los primeros horizontes carbonáticos de la Formación Apón. El espesor de esta formación es variable, en el surco de Machiques se midieron espesores de 1.500 metros, mientras que en la región de San Cristóbal el espesor es de 1.450 metros y la unidad se adelgaza cuando se avanza de la depresión del Táchira hacia el Alto de Mérida, llegando a tener espesores de sólo 25 metros.

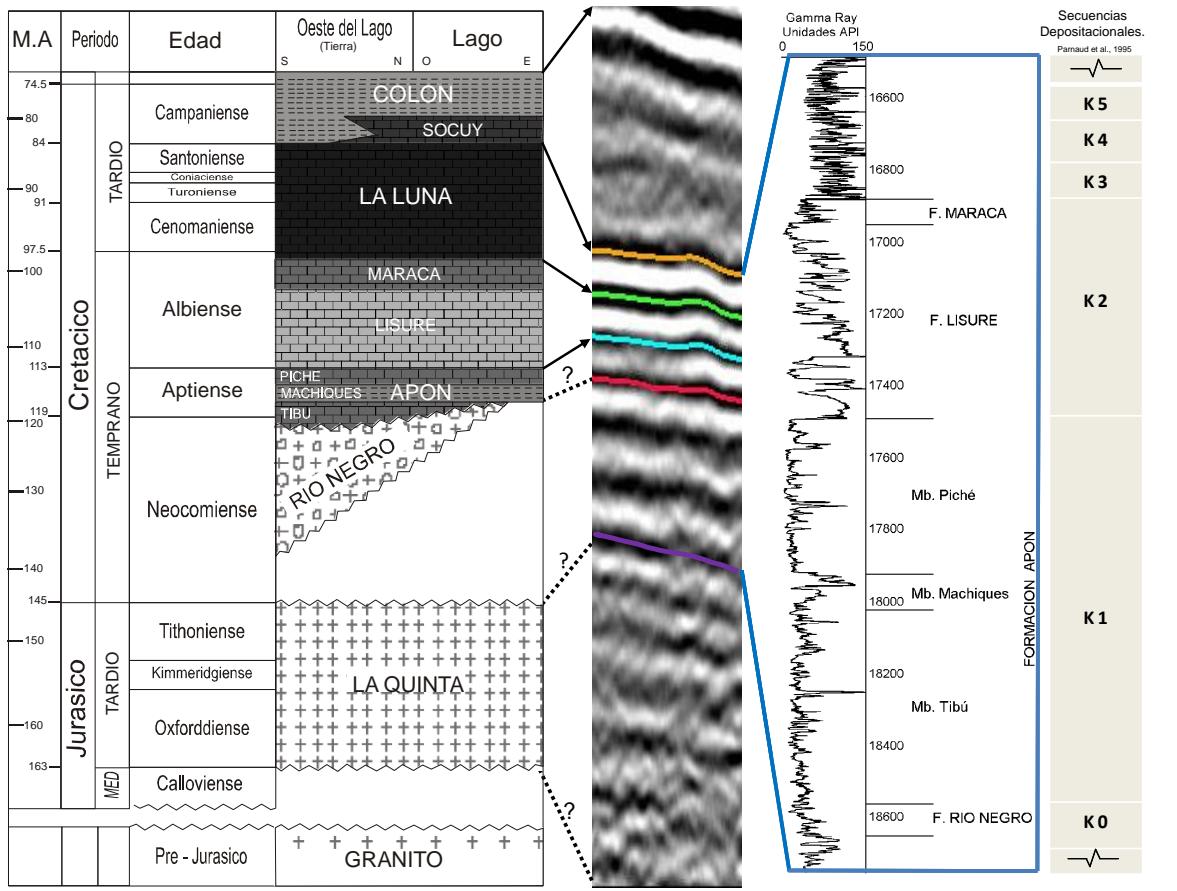


Figura II 16. Columna estratigráfica del área de estudio representando a las formaciones jurásico – cretácicas.

En base a sus relaciones de campo y a la flora y fauna determinadas, la edad de la formación se considera Neocomiense-Barremiense. En cuanto a los ambientes de sedimentación de la Formación Río Negro se consideran variables, desde ambientes de lagunas costaneras, llanuras de marea o albúferas a depositó en un ambiente deltáico a marino costanero (L.E.V, 2007).

Grupo Cogollo: La referencia original del término Caliza de Cogollo se debe a Garner (1926 en L.E.V, 2007), quien la usó para designar una secuencia de calizas color gris, macizas y cristalinas infrayacentes a la Formación La Luna, en la sección del río Cogollo de la sierra de Perijá, estado Zulia. Sutton (1946 en L.E.V, 2007) introduce por primera vez

el nombre de Grupo Cogollo en la Cuenca del Lago de Maracaibo, subdividido en dos unidades separadas por un hiato: la inferior, Formación Apón, y la superior, conformada por las formaciones Aguardiente en la base y Capacho en el tope. Rod *et al.*, 1954, divide al Grupo Cogollo en tres formaciones de base a tope: Apón (inferior, medio y superior), Lisure y Maraca mientras que Renz (1959 en L.E.V, 2007) da los nombres formales de miembros Piché, Machiques y Tibú, para las unidades de la Formación Apón.

Bartok, *et al.*, (1981), dividió al Grupo Cogollo en el subsuelo del centro del lago de Maracaibo en: Cogollo inferior, caracterizado por una combinación de carbonatos y siliciclásticos, separados a su vez en cinco unidades sedimentológicas cartografiadas, de base a tope: H, G, F, E y D, y Cogollo superior, representado por carbonatos más limpios, depositados bajo condiciones de mayor energía, con las unidades C, B y A.

La litología del Grupo Cogollo es variada, de base a tope se caracteriza por calizas densas, fosilíferas, con cantidades subordinadas de lutitas oscuras y arenas calcáreas. En cuanto a su espesor, en la sección tipo Hedberg (1937, en L.E.V, 2007) midió 370 mts, Rod (1954) midió 835 mts en caño Maraca y 735 mts en el río Yasa. En el subsuelo del lago de Maracaibo, León (1975, en L.E.V, 2007) da un promedio de 268 mts (805') para el campo Urdaneta Noreste y para el centro del lago Bartok, *et al.*, (1981) midieron 610 mts (2.000') de espesor.

El contacto inferior del Grupo Cogollo es transicional con las primeras calizas marinas, que se encuentran por encima de las areniscas de la Formación Río Negro, mientras que el contacto superior con la Formación La Luna, está marcado por un fuerte cambio litológico. La edad del Grupo Cogollo está comprendida entre el Aptiense temprano (Miembro Tibú), hasta la base de la Formación la Luna, la cual, por ser diacrónica va del Albiense al Cenomaniense (Bartok, *et al.*, 1981).

Azpiritxaga, (1991), considera que la deposición del Grupo Cogollo en la Cuenca del Lago de Maracaibo estuvo controlada por cambios en el nivel del mar e influjo de material siliciclástico. Los cambios en el nivel del mar fueron una combinación de eustacia y

subsidiencia diferencial dentro de la cuenca mientras que el influjo siliciclástico provino principalmente del Arco de Mérida que para ese tiempo constituía un relieve positivo.

Formación La Luna: Garner (1926 en L.E.V, 2007), publicó originalmente el nombre de caliza de La Luna, posteriormente descrita en detalle por Hedberg y Sass (1937 en L.E.V, 2007) y elevada al rango de formación. La Formación La Luna consiste típicamente de calizas y lutitas calcáreas fétidas, con abundante materia orgánica laminada, densa, de color gris oscuro a negro; las concreciones elipsoidales a discoidales de 10 a 80 cms de diámetro, son características típicas de la formación, que permiten reconocerla en cualquier afloramiento. Muchas de las concreciones tienen amonites y otros fósiles en su interior. Las capas de caliza varían en espesor de 1 – 2 cms hasta unos 50 cms, con estratificación uniforme y monótona. Fracturas frescas de las calizas tienen olor característico y fuerte a bitumen.

En la región del lago de Maracaibo, la Formación La Luna en general suprayace concordantemente a la Formación Maraca, la cual representa el tope del Grupo Cogollo, e infrayace concordantemente a la Formación Colón. Su espesor en el subsuelo del lago varía entre 100 y 300 metros, con tendencia a aumentar de sur a norte. La expresión sísmica de la Formación La Luna en la cuenca de Maracaibo consiste en tres (3) grupos de reflectores fuertes, contrastantes y continuos, los cuales se encuentran debajo del reflector “caliza de Socuy”, usado tradicionalmente como “tope del Cretáceo” en las interpretaciones sísmicas (L.E.V, 2007).

Formación Colón: Liddle (1928 en L.E.V, 2007) llamó “lutita de Colón” a la espesa unidad de lutitas representativa del Cretáceo Superior en la mayor parte de la Cuenca del Lago de Maracaibo. La Formación Colón se caracteriza por lutitas microfossilíferas gris oscuro a negras, macizas, piríticas y ocasionalmente micáceas o glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada. Las lutitas son más arenosas hacia la base y hacia la parte superior, donde la unidad cambia transicionalmente a la Formación Mito Juan (L.E.V, 2007).

La base de la Formación Colón está representada por el Miembro Socuy que consiste en 40 metros de caliza margosa de colores claros con intercalaciones muy escasas de lutitas, que suprayace a 2 - 3 mts de caliza glauconítica que Ford y Houbolt (1963 en L.E.V, 2007) consideran como el Miembro Tres Esquinas de la Formación La Luna y otros autores incluyen en el Miembro Socuy (González de Juana, 1980 en L.E.V, 2007). Ford y Houbolt (1963 en L.E.V, 2007.) indican que las calizas del miembro en sección fina, muestran matrices de grano muy fino y calcilutíticas, con conjuntos de foraminíferos tanto pelágicos como bénicos. Las calizas del Miembro Socuy se distinguen de las calizas de la Formación La Luna por la presencia de foraminíferos bénicos, el color más claro de la matriz y la ausencia de laminación (González de Juana, *et al.*, 1980 en L.E.V, 2007).

El contacto inferior de la Formación Colón con la Formación La Luna es aparentemente concordante, mientras que el contacto superior con la Formación Mito Juan es concordante y transicional, determinado por la primera aparición de intercalaciones de arenisca y caliza. El espesor medido de esta formación es de 900 metros en su sección tipo. La edad de la Formación Colón fué establecida por Cushman y Hedberg (1941 en L.E.V, 2007) como Cretácico tardío, Santoniense a Maastrichtiense temprano.

Evolución Tectonoestratigráfica de la Cuenca del Lago de Maracaibo durante el Cretácico.

Durante la etapa de margen pasivo, en la Cuenca del Lago de Maracaibo se depositaron un conjunto de secuencias sedimentarias, las cuales fueron agrupadas y bautizadas por Parnaud *et al.*, 1995, como Super Secuencias “B” y “C”. En general, es difícil diferenciar sísmicamente estas secuencias de margen pasivo, excepto por reflexiones truncadas locales (“onlaps” y “downlaps”), y de otro modo por continuas y persistentes reflexiones subparalelas. Se han definido seis secuencias deposicionales separadas por límites sísmicos, desde la K0 hasta la K5, las cuales se describen a continuación (Parnaud *et al.*, 1995).

Secuencia Neocomiense – Aptiense

En el Cretácico Temprano, una espesa secuencia de sedimentos continentales, se depositaron en tres surcos: el surco de Machiques en Perijá, el surco de Uribante en Táchira y el surco de Barquisimeto. Además de depositarse en estos surcos, esta secuencia constituía una amplia cobertura regional, excepto en la parte suroeste de Apure. Hedberg (1937, en L.E.V, 2007), describió la secuencia K0, en el área de Río Negro (Serranía de Perijá) y la bautizó como Formación Río Negro.

Esta secuencia marca el componente basal continental de la cuenca cretácica de margen pasivo y a pesar de su amplia extensión, su edad ha sido pobremente constatada. La evidencia disponible sugiere una edad Neocomiense-Aptiense. Esta secuencia del Cretácico Temprano, tiene un bajo potencial para hidrocarburos, las rocas madres son desconocidas y aunque tiene un alto contenido de areniscas, sus características como reservorio son relativamente pobres.

Secuencia Aptiense.

La depositación continental de la Formación Río Negro, dio paso a un conjunto de transgresiones episódicas, como lo evidencia la alternancia de secuencias depositacionales de tipo transgresivo y regresivo. La primera de estas secuencias tiene una edad aptiense, se denomina Formación Apón (K1) (Sutton, 1946 en L.E.V, 2007) y se depositó en una plataforma marino somera, con cambios laterales de facies.

Ford y Houbolt (1963 en L.E.V, 2007), dividen a la Formación Apón en cuatro miembros, en orden ascendente: Tibú, Lutitas de Guáimaro, Machiques y Piché, con los dos últimos confinados al Surco de Machiques y sus alrededores, mientras que los dos primeros se reconocen por todo el Occidente de Venezuela. El Miembro Tibú, es interpretado como un sistema transgresivo (“TST”), y comprende diversas parasecuencias retrogradacionales. Este “TST”, fue depositado en un ambiente de plataforma interna, donde se desarrollaron barras litorales, con abundantes organismos de caparazón calcáreo.

El Miembro Machiques y su equivalente lateral el Miembro Lutitas de Guáimaro, conforman una superficie de máxima inundación (“MFS”), y fueron depositados en un ambiente de plataforma media, con diversas intercalaciones de depósitos más someros. La parte superior de esta secuencia está caracterizada por un sistema de nivel alto (“HST”) que corresponde al Miembro Piché, depositado en un ambiente de plataforma interna.

En el subsuelo del Lago de Maracaibo, los datos sísmicos de reflexión, no distinguen claramente esta secuencia de otras unidades del Cretácico, sin embargo, su base muestra “onlaps” locales y su tope muestra truncaciones débiles. La geometría interna de la secuencia K1 está marcada por tres reflectores de gran amplitud y su espesor llega a alcanzar los 300 metros con una tasa estimada de sedimentación de alrededor de 25 metros por millón de años.

La secuencia deposicional del aptiense, tiene buen potencial para hidrocarburos en la parte oeste de la Cuenca de Maracaibo. La roca madre Machiques, es rica en materia orgánica del tipo 2 (Alberdi et al., 1994) y los posibles reservorios podrían estar relacionados con disolución y porosidad por fracturas.

Secuencia Albiense – Cenomanense Inferior

La segunda mayor transgresión marina tomó lugar durante el Albiense, invadiendo por entero la Cuenca Occidental de Venezuela, desde la Serranía de Perijá hasta el límite sureste de la Cuenca Barinas-Apure con el Escudo de Guayana. Esta secuencia deposicional (K2), incluye las formaciones Lisure y Maraca, y cuenta su vez con tres subdivisiones: parte inferior, media y superior.

La parte inferior, es un sistema transgresivo “TST” que está constituido internamente por grupos de parasecuencias retrogradantes que conforman a la Formación Lisure, la cual consiste en areniscas glauconíticas de grano medio a fino, de color gris azulado a gris verdoso, calizas arenosas glauconíticas laminadas, areniscas micáceas que alternan con lutitas arenoso-arcillosas de color gris azulado, calizas glauconíticas y algunas calizas lutíticas depositadas en un ambiente de plataforma media.

La parte media, corresponde a la superficie de máxima inundación “MFS” desarrollada en el miembro S de la Formación Escandalosa en la Cuenca Barinas – Apure y ausente debido a la erosión en la Cuenca de Maracaibo, este “MFS” fue depositado en un ambiente de plataforma media marino abierto. La parte superior de la secuencia, es un sistema de alto nivel “HST” progradacional que está relacionado con las areniscas regresivas del miembro “R” de la Formación Escandalosa en la Cuenca Barinas – Apure, depositado en un ambiente litoral somero cercano a la línea de costa, con barras costeras y sedimentación deltática. El equivalente lateral en el área de Maracaibo, está ausente debido a la erosión.

En Perijá y Maracaibo se identificó un hiato de edad Cenomaniense temprano entre la secuencia K2 y en los estratos suprayacentes del Cenomaniense tardío, correspondientes a la secuencia K3, truncando parcialmente la secuencia del Albiense. Se atribuye este hiato a la colisión del arco volcánico del Pacífico con la placa Sudamericana y a la consiguiente deformación flexural en el sentido del esfuerzo.

Al oeste de la Serranía de Perijá se desarrolló una cuenca antepaís con una flexura asociada, que se ubicó en las áreas de Perijá y Maracaibo. Esta flexura resultó en el levantamiento y erosión de la parte superior de la secuencia K2 durante el Cenomaniense temprano. Esto se refleja en un acuñamiento regresivo hacia los Andes de Mérida y en la depositación de las areniscas de la Formación Escandalosa. A continuación de este evento, una nueva transgresión inundó la totalidad del área, probablemente como resultado de la reanudación de la compresión y de la subsidencia debida al flexuramiento.

La acumulación en la cuenca de las facies calcáreas de la Formación La Luna, dio inicio a la sedimentación del Cenomaniense tardío. Los levantamientos sísmicos en la Cuenca del Lago de Maracaibo, muestran “onlaps” basales así como una superficie superior irregular que ha sido interpretada como paraconforme. Esta secuencia, es regionalmente persistente y tiene un espesor que alcanza los 600 mts. con una tasa estimada de sedimentación de 50 metros por millón de años en el flanco sur andino y de 12 metros por millón de años en la zona de la plataforma. El potencial para hidrocarburos en la secuencia K2, recae en los reservorios de la Formación Lisure con su porosidad por fracturas y en los reservorios de

arenisca de las Formaciones Aguardiente (“TST”) y Escandalosa, con porosidad intergranular.

Secuencia Cenomaniense superior – Campaniense inferior.

La profundización de la cuenca antepaís a continuación de la deposición de la secuencia del Cretácico Temprano, resultó en un episodio transgresivo del Cenomaniense tardío al Campaniense temprano, con tres secuencias depositacionales del tipo “back-stepping”: K3, K4 y K5. Estas secuencias, están presentes en la Serranía de Perijá y en la Cuenca de Maracaibo, como la Formación La Luna y el Miembro Tres Esquinas.

En estas secuencias, han sido reconocidas varias superficies de máxima inundación (“MFS”) una de las cuales corresponde al intervalo del Cenomaniense superior en la base de la Formación La Luna (Haq *et al.*, 1987). El próximo “MFS” se ubica en la base del Miembro La Morita, está bien definido en la Cuenca Barinas-Apure (equivalente al datum de 88 millones de años de Haq *et al.*, 1987). El tercer “MFS” se ubica en el Miembro Tres Esquinas de la Cuenca del Lago de Maracaibo (datum de 79 millones de años de Haq *et al.*, 1987). El “HST”, de cada secuencia y los correspondientes límites de secuencia, no han sido determinados con precisión.

Las características más resaltantes, que involucran la deposición de las secuencias K3, K4 y K5 son:

- i. Capas de cenizas volcánica en la base de la Formación La Luna, sugieren la presencia del arco volcánico del Pacífico al oeste del área de estudio.
- ii. La cuenca se profundizó rápidamente, de plataforma interna a profundidades batiales, posiblemente como reflejo de la migración hacia el este de un arqueamiento, en dirección de la Cuenca Barinas-Apure.
- iii. Cada una de las tres secuencias transgresivas terminó en un “MFS”.
- iv. Existen dos facies bien definidas. En el oeste, una secuencia de plataforma media a batial que contiene la facies calcárea y lutítica, de la Formación La Luna, y hacia el este

sedimentos detríticos de ambiente litoral de las formaciones Escandalosa (miembro P) y Navay (Miembro Quevedo).

Estas secuencias se establecieron sísmicamente basándose en sus relaciones de “onlap” y no se observó ninguna geometría interna en particular. El espesor de las secuencias varía entre 150 mts y 600 mts. Se estimó una tasa de sedimentación de 30 mts por millón de años, en el flanco surandino y de 8 mts por millón de años en la plataforma de Maracaibo. Estas secuencias tienen un gran potencial para hidrocarburos, incluyendo a la excepcional roca madre La Luna (Alberdi *et al.*, 1994).

Secuencia Cretácico Superior.

Durante el Cretácico Tardío, se marcó una nueva fase en la evolución tectónica, debido a la colisión del arco volcánico del Pacífico con la placa Suramericana. Esta colisión transformó el margen pasivo en un cinturón activo, creando una cuenca antepaís con una fosa asociada al oeste (área de Perijá) y un arqueamiento en el área de Barinas. Aunque hacia el norte y el noreste, persistió el margen pasivo hasta el emplazamiento de las Napas de Lara. Esto indica, un cierre brusco del antiguo margen pasivo, hacia el Cretácico Tardío - Paleoceno Temprano. Esta fase transicional también se caracterizó por una regresión que resultó en tres secuencias deposicionales, K6, K7 y K8, las cuales se discuten a continuación.

Secuencia Campaniense superior – Maastrichtiense.

La regresión, comenzó al principio del Cretácico Tardío. Simultáneamente, hacia el oeste, la colisión del arco volcánico del Pacífico, forma una fosa dentro de la cual se depositó la facies de lutitas de la Formación Colón. El arqueamiento asociado migró desde el depocentro del Lago de Maracaibo hacia Barinas-Apure, donde se depositó la facies de línea de costa de la Formación Burgüita (Renz, 1959). La sedimentación de esta secuencia (K6), culminó en un “HST”, que está expresado en la Formación Mito Juan. Los límites, tanto inferior como superior de esta secuencia, se atribuyen al Campaniense tardío y Maastrichtiense tardío respectivamente.

Muchas unidades depositacionales de menor escala, constituyen la fábrica interna de la secuencia K6, pero sin la determinación de superficies de máxima inundación (“MFS”). Generalmente las unidades lutíticas de la Formación Colón, son interpretadas como secuencias transgresivas, mientras que la estratigrafía más arenosa de la Formación Mito Juan, es interpretada como un sistema de alto nivel. En la cuenca de Maracaibo, la base de la secuencia K6 corresponde a un reflector continuo y fuerte correspondiente al tope del Miembro Socuy. Ahora bien, su límite superior es menos obvio, excepto hacia el oeste, donde se observan truncamientos.

Los topes erosionados de esta formación, sugieren un tectonismo del Cretácico Tardío en el área de Perijá. Esta secuencia depositacional, es generalmente mas argilácea que la secuencia infrayacente y consecuentemente menos competente. Debido a esto, los estilos de falla en las secuencias inferiores, difieren de aquellos observados en las rocas del Campaniense – Maastrichtiense, donde hay mayor heterogeneidad. El espesor de la secuencia alcanza los 900 mts. La tasa de sedimentación fue de 65 mts por millón de años en la plataforma, y 150 mts por millón de años en el “foredeep” de Perijá.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

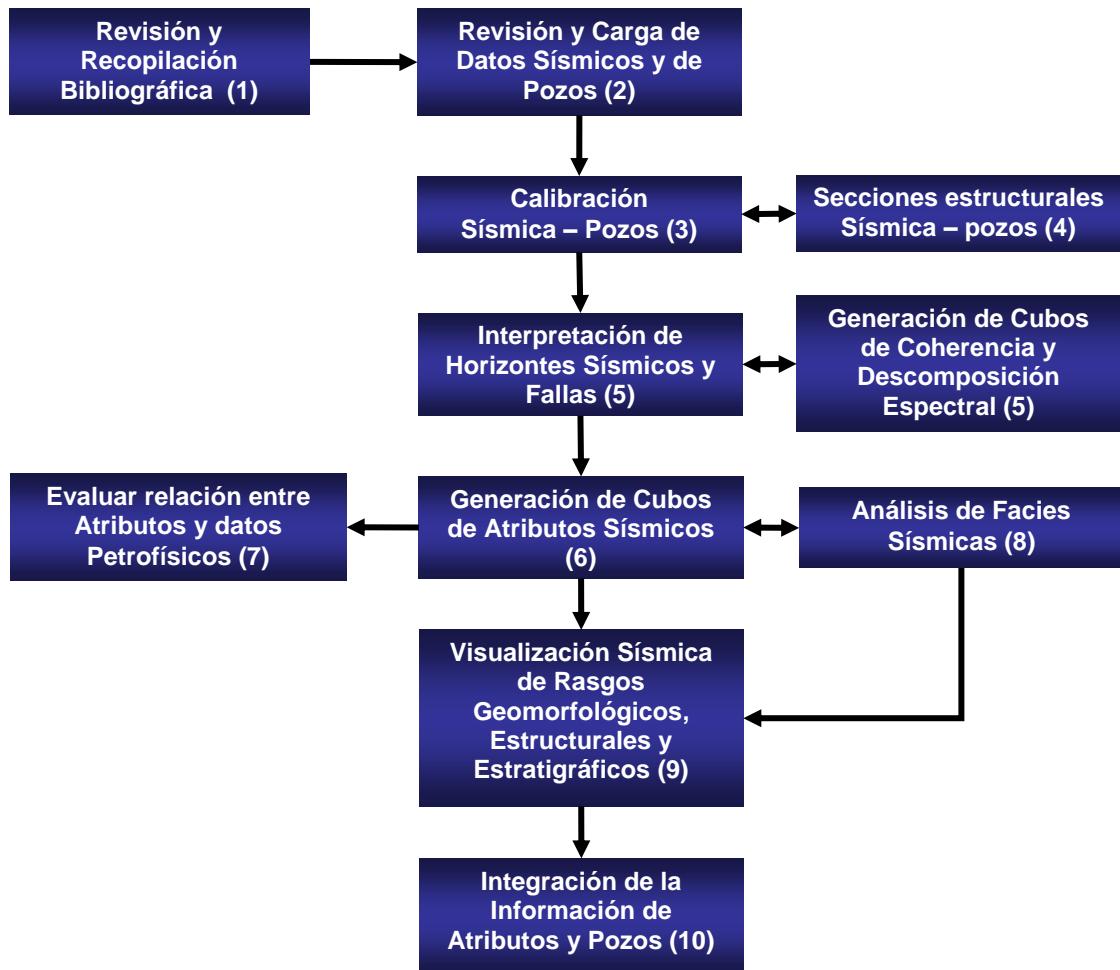


Figura III 1. Flujo de trabajo propuesto mostrando las distintas interrelaciones entre actividades.

A continuación se describen cada uno de los pasos y actividades que se siguieron durante la realización de este trabajo. La Figura III 1 muestra de forma esquematizada el orden en el cual se abordaron las actividades así como las distintas relaciones que mantienen entre sí. El flujo de trabajo utilizado cumple los pasos tradicionales en el tratamiento de datos sísmicos y de pozos, pero haciendo especial énfasis en su utilidad para la delimitación estratigráfica y la detección de rasgos estructurales a través del uso de multiatributos sísmicos.

Revisión y Carga de Datos.

Para este estudio se contó con la información de 17 pozos pertenecientes al Bloque VIII del Lago de Maracaibo (Tabla III 1 y Figura III 2), los cuales alcanzaron el intervalo Cretácico con distintos niveles de penetración. Una vez seleccionados los pozos se procedió a constatar el tipo y calidad de sus registros asociados para iniciar su carga en los programas de interpretación sísmica.

Tabla III 1. Listado de pozos utilizados en este estudio.

Pozo	X-Coord.(mts)	Y-Coord.(mts)	KB(pies)	TD(pies)
Pozo “A”	231329.6856	1090162.527	32.4	16002
Pozo “B”	230388.0189	1089652.908	33	15830
Pozo “C”	231051.063	1092756.098	37	15928
Pozo “D”	229468.1297	1090177.065	36	15975
Pozo “E”	232919.995	1093780.41	34	15750
Pozo “F”	233565.365	1096885.73	32	13685
Pozo “G”	234340.007	1099280.99	40	16100
Pozo “H”	234925.158	1100237.62	43	16272
Pozo “I”	231743.874	1092273.59	35	16049
Pozo “J”	232399.287	1090968.4	43	16242
Pozo “K”	231064.356	1093719.71	32	16170
Pozo “L”	233081.852	1095852.71	36	16252
Pozo “M”	230211.945	1092563.3	39	16190
Pozo “N”	230766.847	1091390.51	39	15896
Pozo “O”	232165.642	1096752.08	40	16100
Pozo “P”	232723.173	1093782.44	44	16172
Pozo “Q”	231697.199	1095398.54	37	16147

Conjuntamente con la revisión de curvas de pozos se verificó la integridad de cuatro “checkshots”, presentes en el área del Bloque VIII, los cuales corresponden a los pozos: Pozo “E”, Pozo “F”, Pozo “H”, y Pozo “I”. Así mismo se corroboraron los valores de profundidad correspondientes a los topes estratigráficos operaciones correspondientes a: Miembro Socuy de la Formación Colón, y a las formaciones: La Luna, Maraca, Lisure, Apón y “Basamento”.

Al culminarse con la carga de pozos y curvas asociadas se inició la carga del volumen sísmico migrado post – apilamiento Blq VIII 3D con una área de 240 km², intervalo de muestreo de 2 ms y tiempo total de grabación de 6 seg, en la plataforma Openwork® de Landmark.

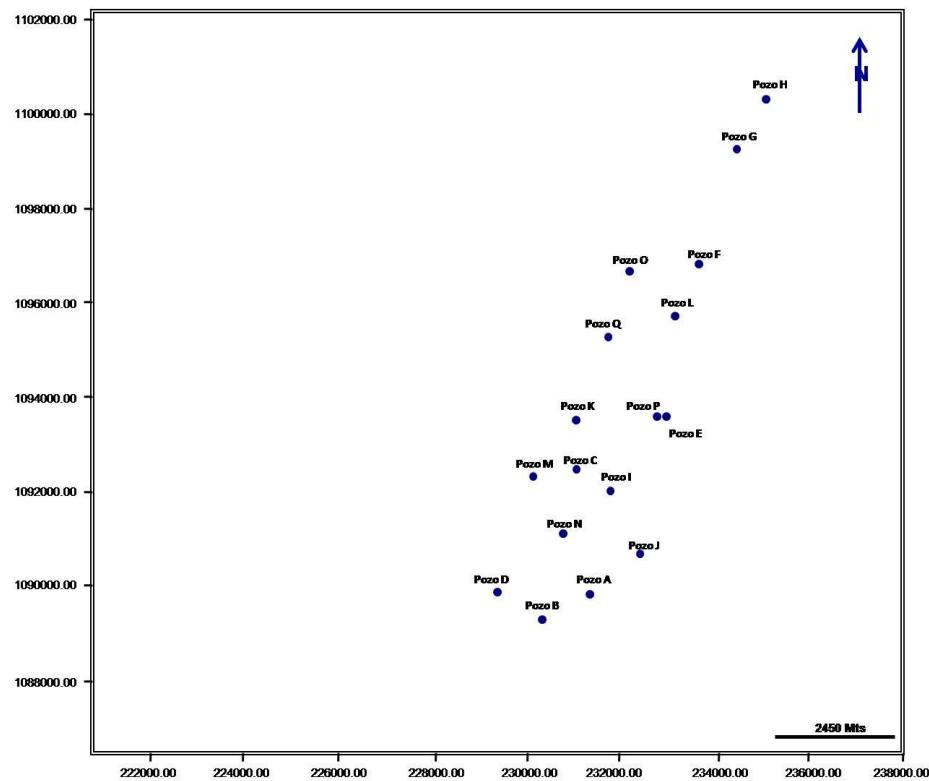


Figura III 2. Área del levantamiento sísmico BLQ VIII 3D mostrando la ubicación de los pozos que alcanzaron el intervalo Cretácico.

Una vez cargada la información sísmica y de pozos se procedió, entre otras tareas, a crear la columna estratigráfica de la zona utilizando el “Strat Column Editor” de Landmark donde se indica la correspondencia entre los topes estratigráficos descritos en los pozos y las distintas unidades litoestratigráficas presentes en la cuenca. El intervalo de visualización seleccionado para este trabajo oscila entre 2500 ms y 4000 ms, el cual permite mostrar parte de la sección terciaria del Lago de Maracaibo, así como la espesa secuencia de lutitas que suprayace a la formación La Luna, presentando de esta manera la mayor parte de la columna estratigráfica de la cuenca. En la figura III 3 se muestra sombreado el intervalo sísmico correspondiente a: Miembro Socuy – Formación La Luna – Grupo Cogollo, aunque los dos primeros no forman parte de los objetivos de este estudio creemos que es necesarios usarlos en algunos casos de manera referencial para comparar su respuesta sísmica y particularidades con las del Grupo Cogollo.

Calibración Sísmica – Pozos.

Para la calibración sísmica – pozos se utilizó el programa Syntool® de Landmark el cual permite generar una equivalencia entre el tiempo de la sísmica y la profundidad de los pozos, de manera tal de poder integrar la información entre ambos dominios. Para esta tarea se seleccionaron los pozos “E”, “H”, e “I” los cuales cuentan con “checkshot”, registro sónico y densidad. El pozo “F” también cuenta con el conjunto de registros necesario, sin embargo debido a que fue perforado a lo largo de una falla sus velocidades son anómalas y poco útiles para la calibración.

Generación de Cubos de Coherencia y descomposición Espectral

Durante los pasos previos a la interpretación estructural del volumen sísmico se inició la generación de cubos de coherencia y descomposición espectral. El algoritmo de detección de discontinuidades en la señal sísmica (Coherencia, similitud, semblanza etc.) permitió detectar las discontinuidades tanto laterales como verticales en los datos.

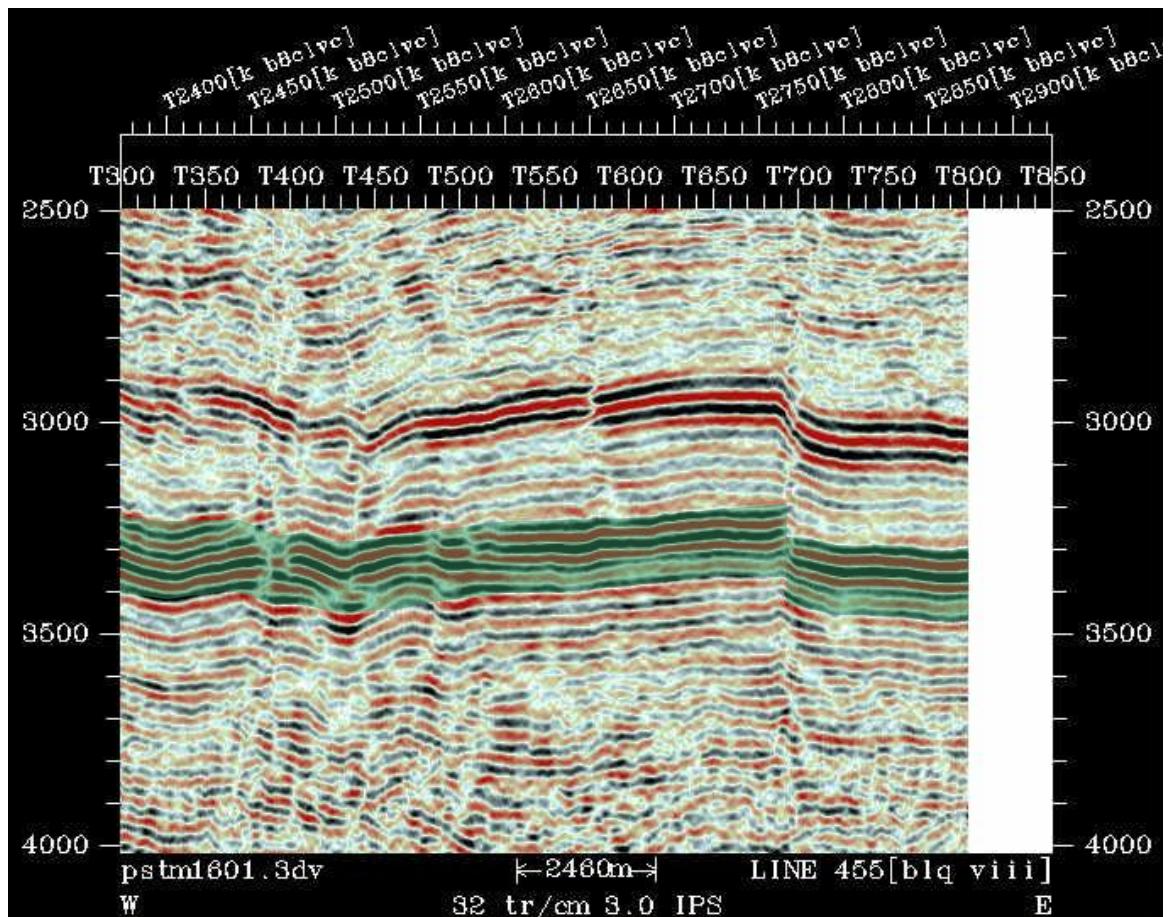


Figura III 3. Sección correspondiente a la línea 455 donde se aprecia sombreado el intervalo de estudio.

Interpretación de Horizontes y fallas.

La interpretación estructural se inició con la identificación de las fallas mayores para inferir la continuidad lateral de los reflectores sísmicos. En cuanto a los métodos usados para la interpretación de horizontes, en este trabajo resultó de particular utilidad la incorporación de cubos sísmicos en rango limitado de frecuencias (descomposición Espectral) y de cubos de Coherencia como datos de entrada para la interpretación, a partir de los primeros se obtuvo un incremento en la continuidad de los reflectores que permitió un desempeño mas eficiente de los algoritmos de generación de horizontes mediante semillas, mientras que con el cubo de coherencia se identificaron zonas de discontinuidad que permitieron apreciar la geometría del sistema de fallas.

Correlaciones de pozos

Para visualizar el comportamiento lateral de los espesores de las distintas unidades estratigráficas y su posición estructural fue necesaria la construcción de secciones entre pozos donde se encuentren desplegadas las curvas de pozos y la información de topes estratigráficos. Para este trabajo se utilizaron los topes operacionales de cada pozo para delimitar las principales unidades estratigráficas. Estos topes se establecen durante la perforación y provienen de correlaciones con pozos cercanos corroboradas con las respuestas de los registros del pozo.

Las secciones de pozos pueden ser de dos tipos: estructurales o estratigráficas. Las secciones estructurales tienen como finalidad mostrar la posición espacial de las distintas unidades estratigráficas en el subsuelo mientras que las secciones estratigráficas tienen como objetivo resaltar el comportamiento lateral de los espesores de dichas unidades valiéndose de un datum estratigráfico común para todos los pozos.

Generación de cubos de atributos sísmicos.

A partir de un volumen sísmico en tiempo migrado pre o post – apilamiento con amplitudes preservadas es posible extraer subgrupos de datos que representan alguna cualidad o comportamiento en particular del volumen sísmico. Para este trabajo se generaron inicialmente veintitrés cubos de distintos atributos sísmicos obtenidos a partir del levantamiento BLQ VIII 3D y procesados por medio del programa Stratimagic® de Paradigm. Dentro de esta gran cantidad de atributos existían muchos que expresaban, en términos cuantitativos, relaciones numéricas y espaciales muy similares a algún otro atributo, lo que los convertía en atributos redundantes o que básicamente aportan la misma información. Para identificar estos atributos redundantes y poder extraerlos del grupo se siguió el siguiente procedimiento:

- i. Se realizó un análisis de componentes principales, teniendo como datos de entrada los veintitrés volúmenes de atributos. Mediante este procedimiento el programa re – escala

los volúmenes sísmicos a una escala común e inicia un muestreo para comparar la información de todos entre si.

- ii. Una vez realizada la comparación se obtiene una matriz de correlación con los valores de similitud entre atributos en los cuales el valor máximo de correlación es uno (1) y el menor es cero (0) pudiendo existir valores negativos (Tabla III 2). Existen muchas divergencias en cuanto a establecer el valor de correlación a partir del cual un atributo es similar a otro. En la literatura sobre el tema aun no se ha establecido un valor de referencia, sin embargo para los fines de este trabajo concluimos que si la similaridad entre dos atributo es menor a treinta y tres por ciento (33 %), entonces se considera que los atributos son lo bastante diferentes como para considerarlos independientes.

Visualización sísmica de rasgos geomorfológicos.

Las reflexiones sísmicas son el producto del contraste de impedancias entre dos materiales de propiedades acústicas distintas. En la mayoría de los casos este contraste de impedancias se presenta en la transición entre una unidad estratigráfica y otra que la suprayace, infrayace o colinda lateralmente, por lo que las flexiones sísmicas pasan a tener un significado crono – estratigráfico. Entonces, si identificamos la distribución espacial de una reflexión sísmica dentro de un volumen 3D, estaríamos muy probablemente siguiendo una superficie estratigráfica.

Dentro de la continuidad lateral de una reflexión sísmica es común identificar variaciones en los valores de amplitud de las trazas que la conforman, las cuales están vinculadas a las variaciones laterales presentes en cualquier unidad estratigráfica. Si visualizamos en planta, con escala y paleta de color adecuada, la distribución de las distintas variaciones de amplitud de una reflexión sísmica, entonces podríamos estar visualizando rasgos inherentes al sistema depositacional y geomorfología presentes para ese momento del tiempo geológico

Tabla III 2. Detalle de la matriz de correlación entre atributos

Atributos Comparados

Valor de Correlación

Al comparar un atributo consigo mismo su valor de correlación es 1

		thin_bed_indicator_raw20hz	signal_envelop_raw20hz	relative_acoustic_impedance_raw20hz	rawSpecDec2000-4400_1889hz	instantaneous_frequency_raw20hz	envelop_derivative_raw20hz	average_frequency_raw20hz
1	thin_bed_indica	1.000000	-0.010669	0.003982	-0.002936	0.413378	0.072620	0.000235
2	signal_envelop_	-0.010669	1.000000	-0.327682	-0.008921	0.204264	0.054508	0.083881
3	relative_acoust	0.003982	-0.327682	1.000000	0.235025	-0.158793	0.277360	-0.037677
4	rawSpecDec2000-	-0.002936	-0.008921	0.235025	1.000000	-0.012502	-0.148934	0.033768
5	instantaneous_f	0.413378	0.204264	-0.158793	-0.012502	1.000000	-0.053700	0.090011
6	envelop_derivat	0.072620	0.054508	0.277360	-0.148934	-0.053700	1.000000	-0.053710
7	average_frequen	0.000235	0.083881	-0.037677	0.033768	0.090011	-0.053710	1.000000

La visualización mediante esta técnica se realiza a través de imágenes sísmicas horizontales guiadas por horizontes, en las cuales se aprecia la distribución lateral de amplitudes de un grupo de reflectores usando como referencia la geometría de un horizonte para desplazarse verticalmente hacia los demás reflectores. Esta técnica brinda la certeza que la distribución de amplitudes observadas en la imagen corresponde a un mismo reflector y por lo tanto a una misma interfase estratigráfica; caso contrario de la secciones completamente horizontales, “time slices” en las cuales de existir buzamiento en los reflectores sísmicos la imagen mostrará una distribución de amplitudes provenientes de varios flectores al mismo tiempo. Poder visualizar o reconocer rasgos estructurales o estratigráficos mediante este tipo de imágenes no siempre es posible, ya que se requiere una resolución sísmica suficiente para poder discriminar geometrías en las variaciones de la amplitud sísmica. Por lo general las mejores imágenes se obtienen dentro de los primeros segundos de grabación, donde en el caso de los sistemas fluviales se aprecia con bastante detalle la geometría y características de los cauces y canales.

Evaluación de la relación entre atributos sísmicos y propiedades petrofísicas.

Como parte de las actividades realizadas durante este trabajo se realizó la evaluación de factibilidad del vínculo entre atributos sísmicos y datos petrofísicos. El propósito de comparar los atributos sísmicos con los valores de las propiedades petrofísicas es tratar de establecer una relación matemática entre estos conjuntos de datos que permita predecir el comportamiento espacial de uno de ellos a partir de los valores del otro conjunto.

Para esta actividad se utilizó la información petrofísica de los pozos del área de Bloque VIII que perforaron completamente el intervalo comprendido entre las formaciones Maraca y Lisure (Castillo y Bastardo, 2007) (Tabla III 3) con excepción del pozo “F”, cuyos valores se ven afectado por su cercanía a la falla principal, y de los pozos “E”, “L”, y “N”, los cuales no poseen análisis petrofísico o no alcanzan por completo el intervalo de estudio.

Se eligió el intervalo entre las formaciones Maraca y Lisure por ser el más superficial y el que atraviesan completamente la mayoría de los pozos, teniendo de esta manera valores promedio de las propiedades petrofísicas para toda la sección.

En cuanto a los atributos sísmicos, se utilizaron los 12 cubos de atributos linealmente independientes productos del análisis PCA (Tabla III 4). A partir de estos cubos se generaron mapas de valor promedio de los atributos para el intervalo comprendido entre las formaciones Maraca y Lisure. Los valores de estos atributos en la posición de los pozos se compararon con los valores del promedio ponderado de las propiedades petrofísicas de cada intervalo mediante gráficos cruzados donde se calcularon los valores de correlación entre atributos y datos petrofísicos.

Como producto de esta tarea se generaron 48 gráficos cruzados para mostrar la relación entre PHIE, SW, VSH y CNP versus 12 atributos sísmicos en el intervalo Maraca – Lisure. Estos gráficos cruzados permitieron identificar los atributos sísmicos que mejor correlacionaron con cada propiedad petrofísica. Este grado de correlación se analizó mediante la técnica de regresión lineal multivariable utilizando el Programa SPSS® para evidenciar la fortaleza estadística de estos resultados.

Tabla III 3. Lista de los pozos utilizados para este estudio con los valores de las propiedades petrofísicas para el intervalo Maraca – Lisure.

Pozo	PromPond %PHIE	PromPond %SW	PromPond %VSH
Pozo A	6,49	18,91	19,34
Pozo B	5,72	24,94	19,82
Pozo C	7,52	13,49	21,89
Pozo D	4,97	30,04	27,65
Pozo G	4,03	18,86	29,68
Pozo H	5,77	13,07	21,47
Pozo I	4,43	15,47	12,68
Pozo J	5,42	37,17	21,93
Pozo K	4,78	39,90	18,41
Pozo M	4,82	19,36	10,87
Pozo O	5,73	29,77	39,73
Pozo P	4,93	34,14	18,08
Pozo Q	4,49	29,09	16,86

Tabla III 4. Lista de los cubos de atributos usados para este estudio.

Integration	Dominant Frequency
Integrated Absolute Amplitude	Cosine Instantaneous Phase
Instantaneous Frequency	Amplitud Weighted Instantaneous Frequency
Instantaneous Bandwidth	Standard Deviation Frequency
Instantaneous Acceleration	Second Envelop Derivative
Instantaneous Q	RMS Frequency

Finalmente se muestra un diagrama cruzado de la relación del valor real de la propiedad petrofísica versus el valor de la predicción a partir de la regresión lineal. Las figuras III 4 – III 12 muestran los mejores ajustes obtenidos a partir de los gráficos cruzados y el análisis estadístico correspondiente a la predicción de cada propiedad petrofísica. A continuación se discuten en detalle los resultados para las distintas propiedades petrofísicas.

Los gráficos cruzados entre la propiedad Porosidad (PHIE) y los atributos sísmicos *Instantaneous Bandwidth* e *Instantaneous Frequency* muestran una correlación de 34,3% y 31,6% respectivamente (Figuras III 4 y III 5), las mayores entre los doce atributos sísmicos utilizados en la comparación. Al incluir estos dos atributos como variables independientes en un modelo de relación lineal multivariada, cuya variable dependiente es PHIE, se obtiene un valor de correlación de 39% y una significancia estadística superior a 0,05 (Tabla III 5), valores que muestran una correlación débil entre estos atributos sísmicos y PHIE. La figura III 6, muestra la comparación entre PHIE y el valor de la predicción a partir de la regresión lineal.

La propiedad Saturación de Agua (SW) mostró su mejor correlación con los atributos sísmicos *Instantaneous Bandwidth* y *Standard Deviation Frequency*, con un grado de similitud de 18,4% y 46,2% respectivamente (Figuras III 7 y III 8). Al incluir estos dos atributos como variables independientes en un modelo de relación lineal multivariada, cuya variable dependiente es SW, se obtiene un valor de correlación de 55,1% y una

significancia estadística inferior a 0,05 (Tabla III 6). La figura III 9, muestra la comparación entre SW y el valor de la predicción a partir de la regresión lineal.

La propiedad Volumen de Arcilla (VSH) mostro el más alto grado de correlación con los atributos *Integrated Absolute Amplitude* y *RMS Frequency* arrojando valores de 54% y 17,7% respectivamente (Figura III 10 y III 11). Al incluir estos dos atributos como variables independientes en un modelo de relación lineal multivariada, cuya variable dependiente es VSH, se obtiene un valor de correlación de 37,8% y una significancia estadística superior a 0,05 (Tabla III 7). La figura III 12, muestra la comparación entre VSH y el valor de la predicción a partir de la regresión lineal.

Los resultados de la comparación entre atributos sísmicos y las propiedades petrofísicas no muestran una correspondencia sólida que permita realizar predicciones con la certeza necesaria como para realizar mapas de pseudopropiedades utilizando como dato de entrada los valores de atributos sísmicos.

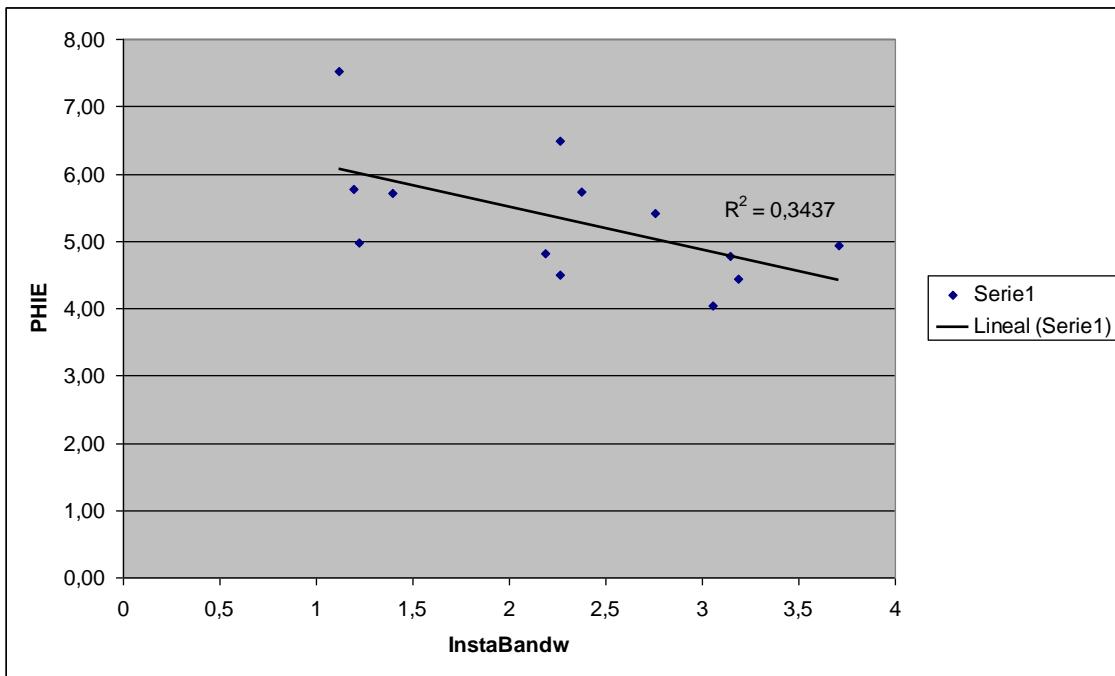


Figura III 4. Grafico cruzado entre PHIE (Porosidad) y el atributo Instantaneous Bandwidth.

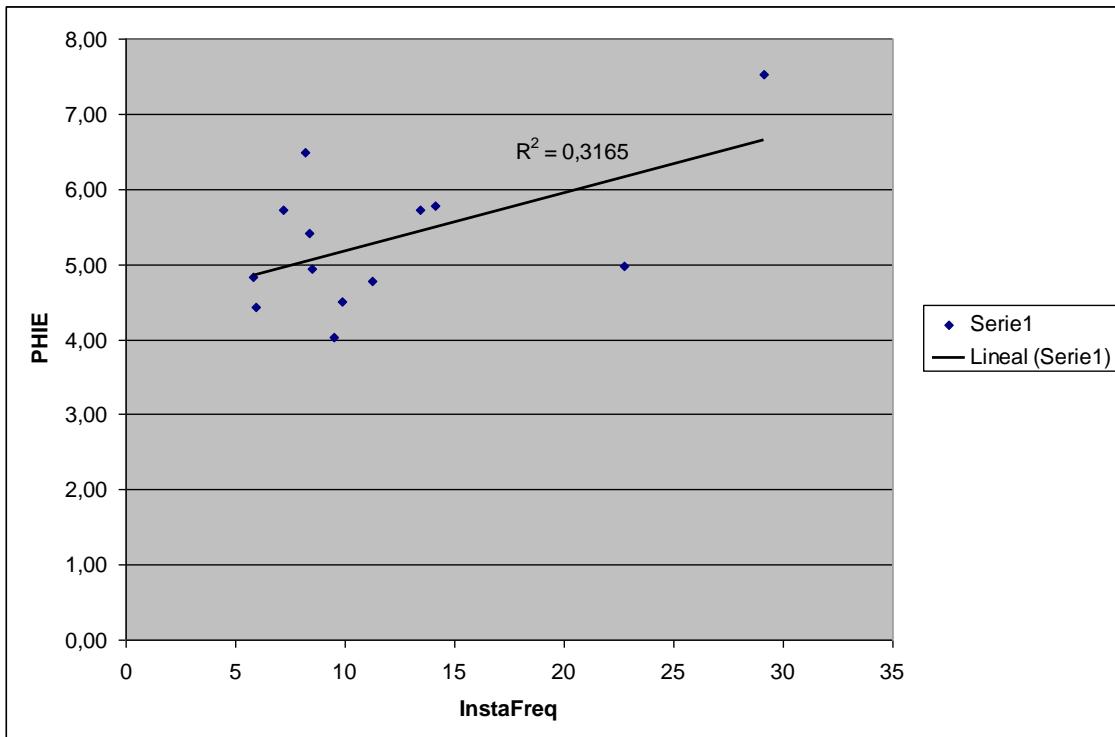


Figura III 5. Grafico cruzado entre PHIE (Porosidad) y el atributo Instantaneous Frequency.

Tabla III 5. Resultados de la regresión lineal multivariable para la propiedad PHIE.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df 1	df 2	Sig. F Change
1	,625 ^a	,391	,269	,80763	,391	3,210	2	10	,084

a. Predictors: (Constant), InstaFreq, InstaBandw

b. Dependent Variable: PHIE

Scatterplot

Dependent Variable: PromPond %PHIE

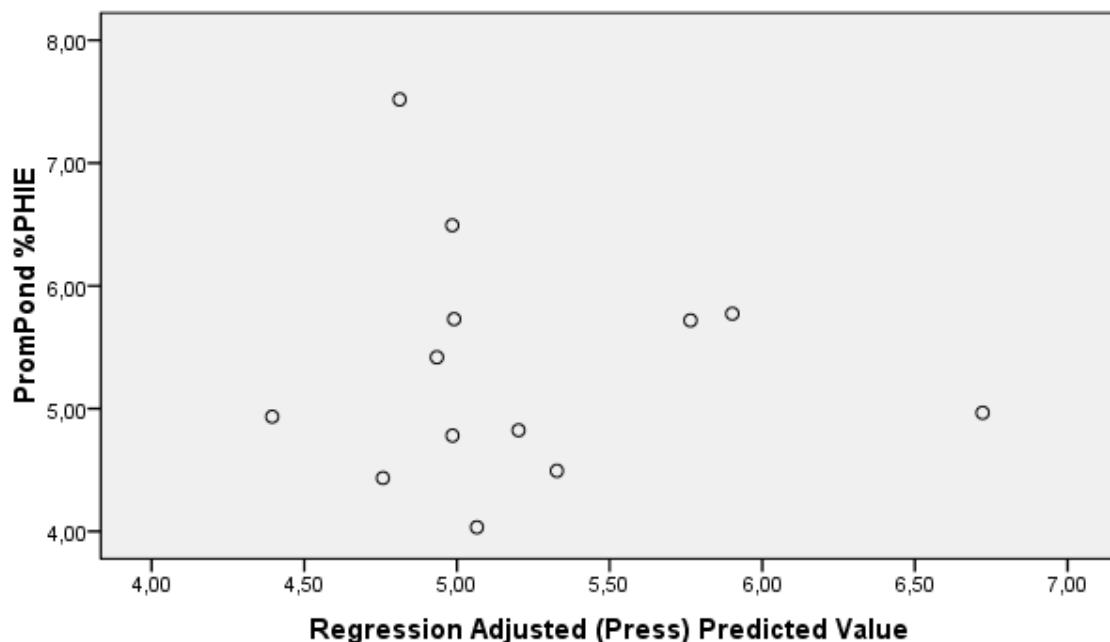


Figura III 6. Grafico de los valores reales versus la predicción para la propiedad PHIE.

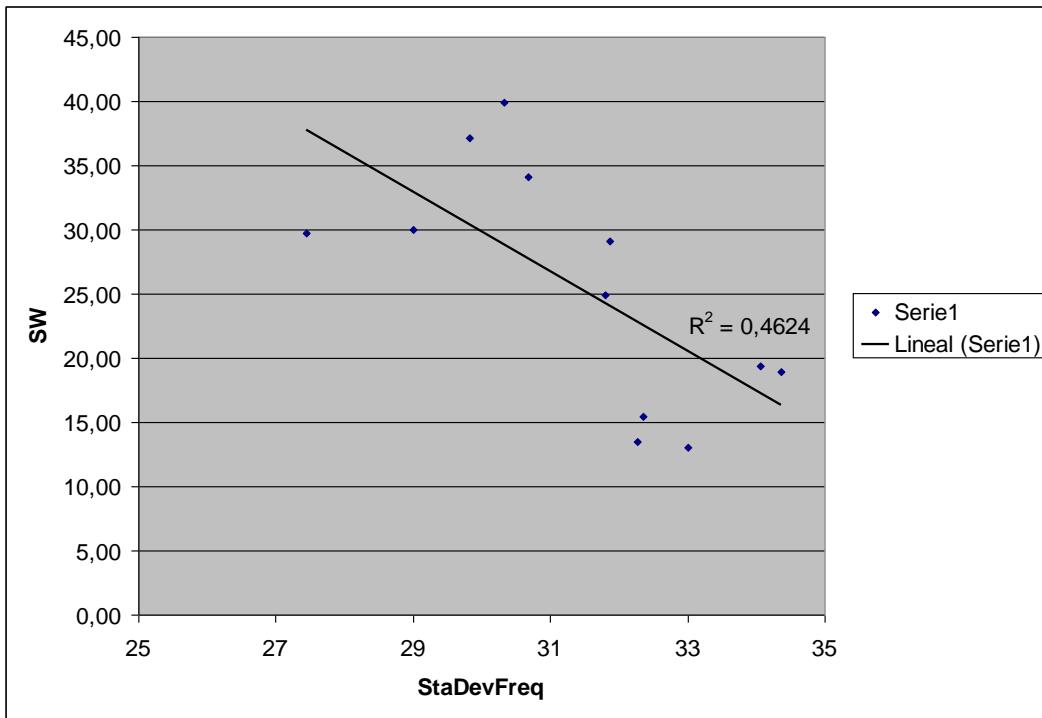


Figura III 7. Grafico cruzado entre SW (Saturación de Agua) y el atributo Standard Deviation Frequency.

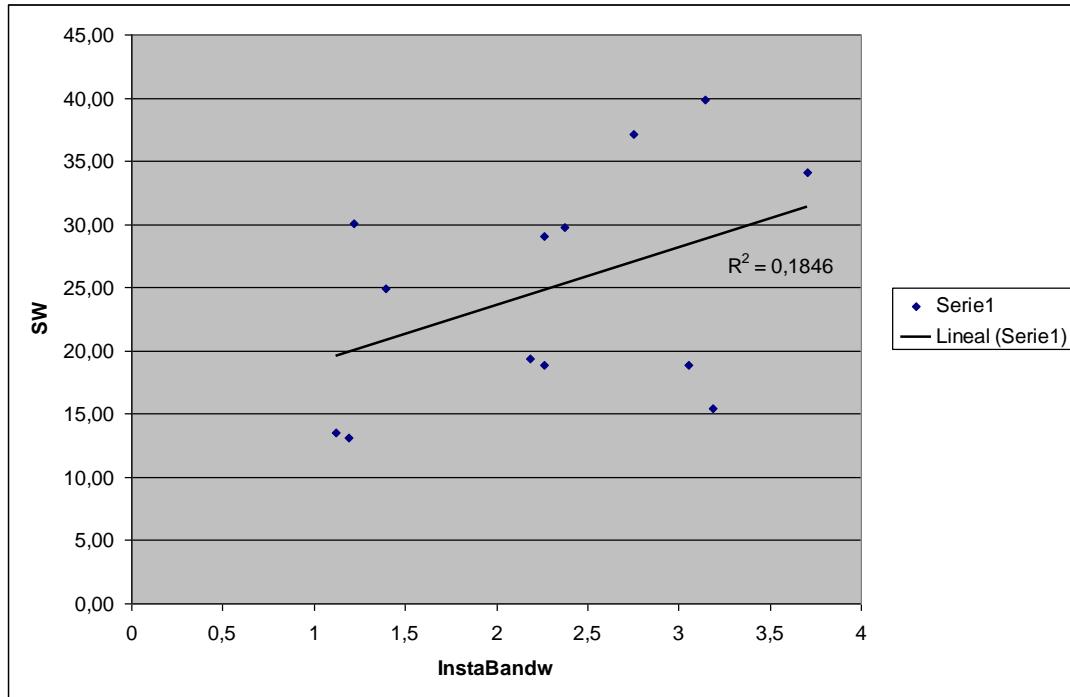


Figura III 8. Grafico cruzado entre SW (Saturación de Agua) y el atributo Instantaneous Bandwidth.

Tabla III 6. Resultados de la regresión lineal multivariable para la propiedad SW.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,742 ^a	,551	,461	6,67273	,551	6,125	2	10	,018

a. Predictors: (Constant), InstaBandW_3, StanDevFreq_3

b. Dependent Variable: SW_3

Scatterplot

Dependent Variable: PromPond %SW

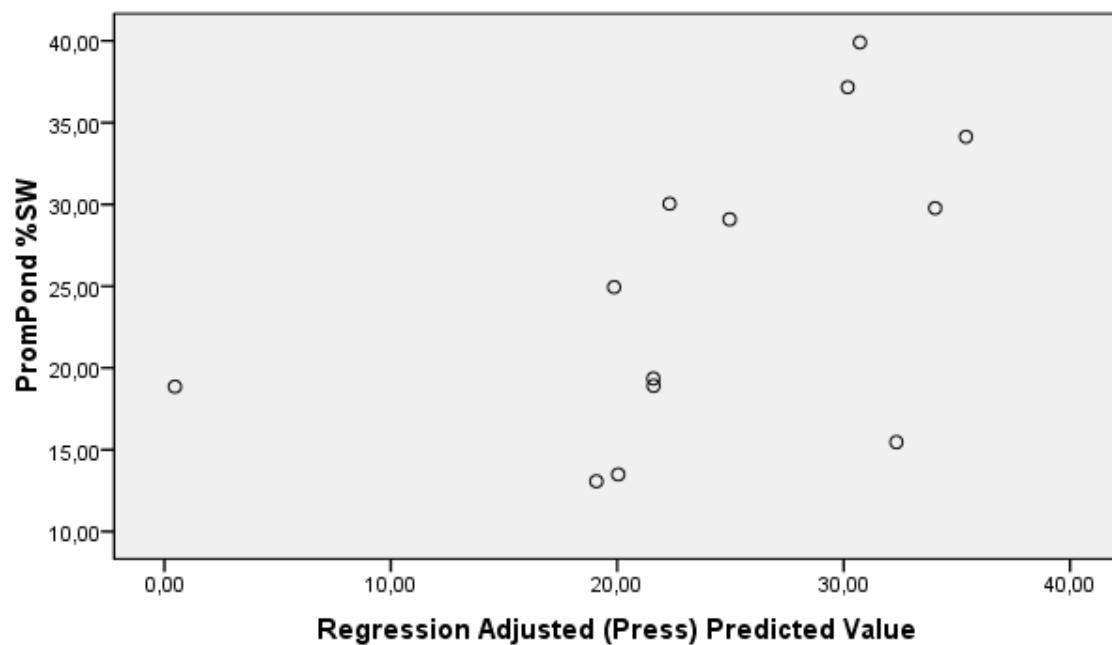


Figura III 9. Grafico de los valores reales versus la predicción para la propiedad SW.

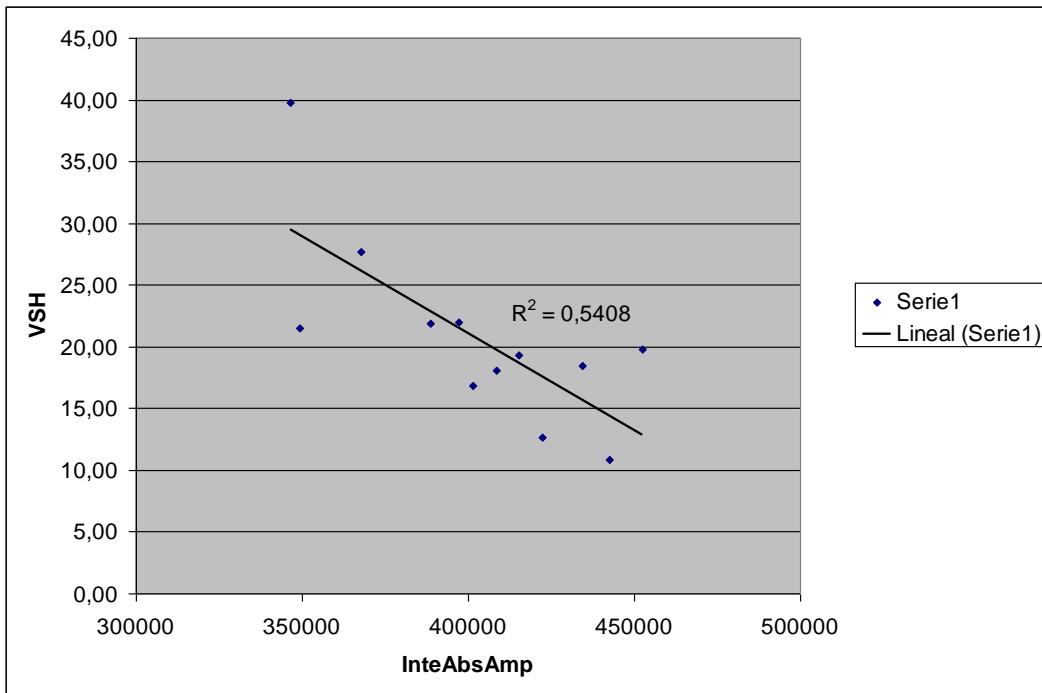


Figura III 10. Grafico cruzado entre VSH (Volumen de Arcilla) y el atributo Integrated Absolute Amplitude.

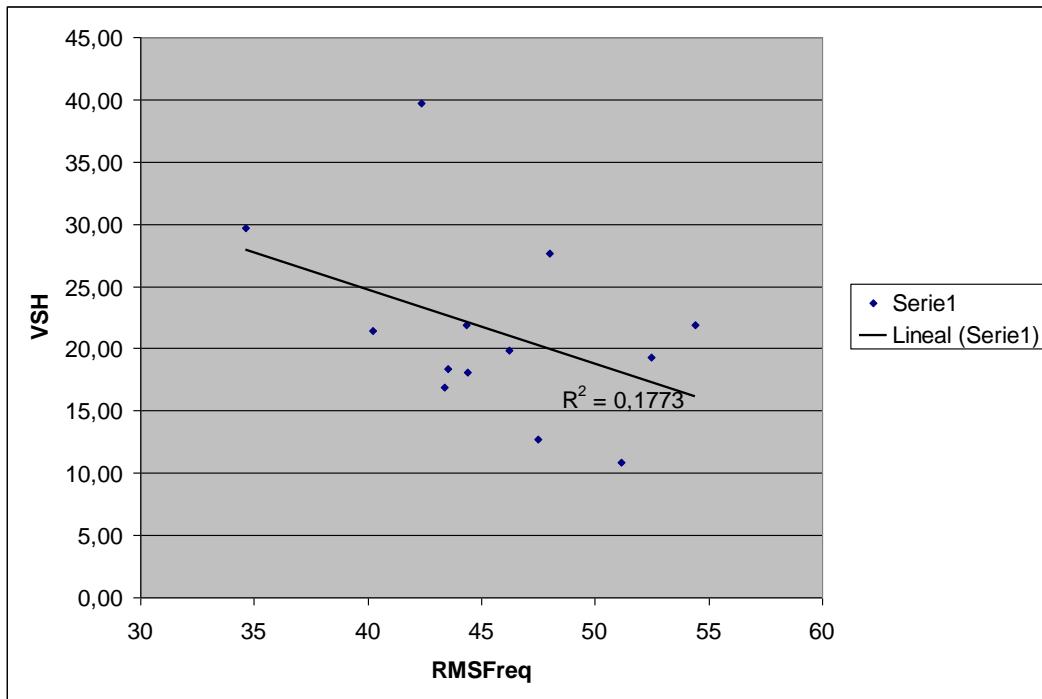


Figura III 11. Grafico cruzado entre VSH (Volumen de Arcilla) y el atributo RMS Frequency.

Tabla III 7. Resultados de la regresión lineal multivariable para la propiedad VSH.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,615 ^a	,378	,253	6,49696	,378	3,036	2	10	,093

a. Predictors: (Constant), RMSFreq, InteAbsAmp

b. Dependent Variable: PromPond %VSH

Scatterplot

Dependent Variable: PromPond %VSH

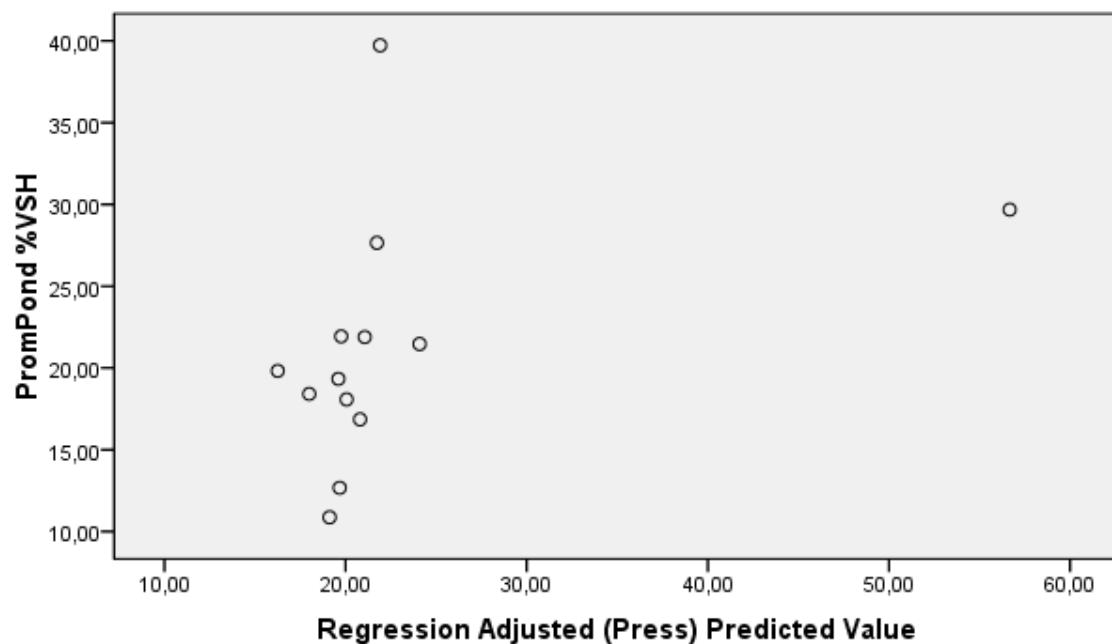


Figura III 12. Grafico de los valores reales versus la predicción para la propiedad VSH.

CAPÍTULO IV

Resultados

Los resultados de este estudio muestran los productos obtenidos a lo largo del flujo de trabajo y consisten principalmente en transectos sísmica – pozos, transectos de pozos, horizontes sísmicos en tiempo, imágenes sísmicas, mapas de facies sísmicas y de atributos sísmicos así como una serie de productos primarios como sismogramas sintéticos y cubos de descomposición espectral, los cuales sirvieron de base para los demás resultados. Toda esta información se integró con el fin de brindar una descripción de las características geológicas presentes en el área del levantamiento sísmico Blq VIII – 3D, en la parte central del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Sismogramas Sintéticos.

Durante el proceso de generación de los sismogramas sintéticos se obtuvieron los siguientes resultados:

- i. La mejor correlación se obtuvo al usar ondículas sintéticas Ricker con frecuencia entre 20 Hz y 16 Hz. Aunque que el volumen sísmico fue procesado con fase cero se requirió hacer pequeños ajustes al ángulo de la fase de la traza sísmica para obtener un mayor grado de correlación.
- ii. La expresión, en el sismograma sintético, de la interfase Formación Colón – Miembro Socuy no puede ser reproducida a plenitud en muchos pozos debido a que a menudo los registros inician sus lecturas dentro del Miembro Socuy (Figura IV 1).

- iii. El escaso espesor de la Formación Maraca (no mayor a 40 pies) no permite su discriminación en la señal sísmica pasando a formar parte de la misma reflexión positiva (pico) que corresponde a la Formación Lisure (Figura IV 2).
- iv. La interfase entre las formaciones Lisure y Apón, aun cuando el contraste de impedancia entre ambas es bajo, está claramente representada por una reflexión positiva (Figura IV 3).
- v. El contacto entre el Grupo Cogollo y las infrayacentes formación Río Negro o La Quinta según sea el caso, se encuentra presente en pocos pozos y esta representado en el sismograma sintético por una reflexión positiva (Figura IV 3).

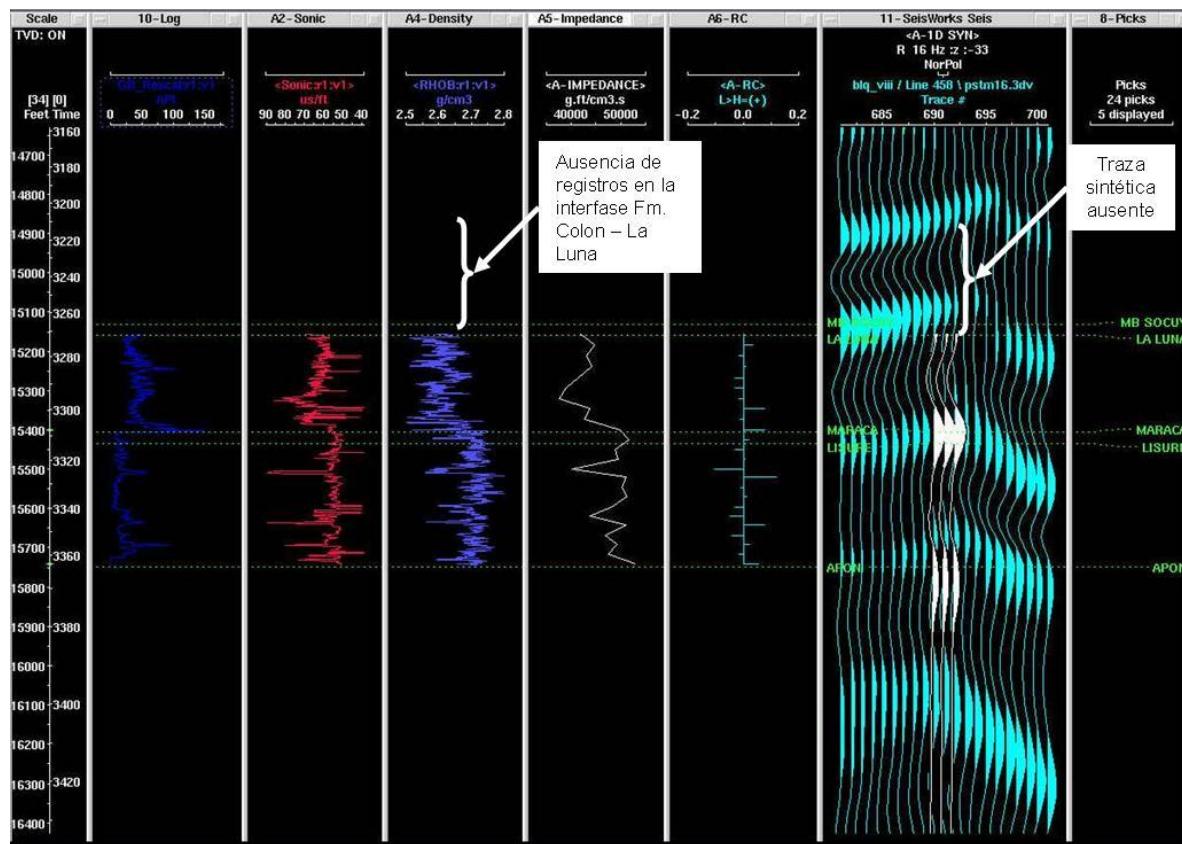


Figura IV 1. Sismograma sintético del Pozo “E”

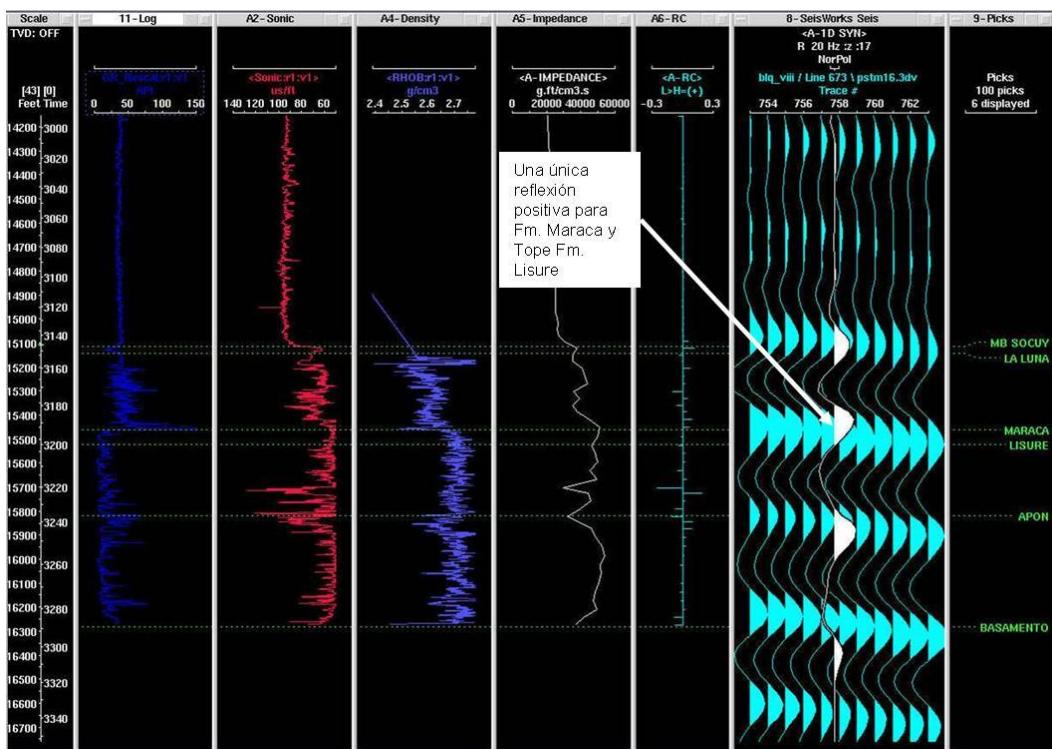


Figura IV 2. Sismograma sintético del Pozo “H”.

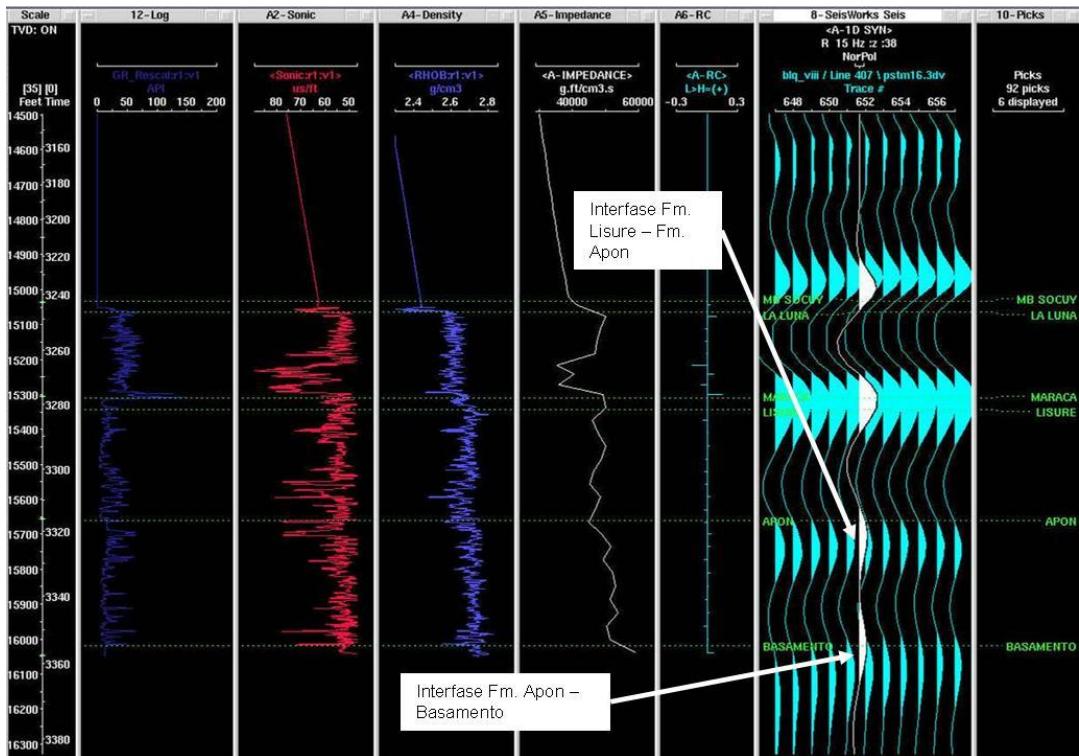


Figura IV 3. Sismograma sintético del Pozo “I”.

Transectos Sísmica – Pozos.

Se generaron cuatro transectos estructurales sísmica – pozos, en los cuales se muestra la correlación entre los registros de pozo y el volumen sísmico. Estos transectos también sirvieron para corroborar la correspondencia entre los topes estratigráficos definidos en los pozos y los reflectores sísmicos. La figura IV 4 muestra la posición de los distintos transectos dentro del volumen sísmico. La frecuencia sísmica dominante para el cubo sísmico a la profundidad del Grupo Cogollo es de 20 Hz y la resolución vertical está entre 160 y 245 pies, dependiendo de la profundidad como lo muestra la figura IV 5.

El datum común para todos los transectos sísmica – pozos es la profundidad de -14600 pies TVDSS, la cual se ubica estratigráficamente en la Formación Colón. Al observar la correlación entre los topes estratigráficos, registros de pozos y el volumen sísmico (Figuras IV 6, IV 7, IV 8 y IV 9) es importante señalar que:

- i. El fuerte contraste de impedancia presente entre las lutitas de la formación Colón, y el Miembro Socuy (miembro de calizas, Formación Colón) - Formación La Luna genera un pico (polaridad normal, acuerdo SEG) de fuerte amplitud y extensión regional. A todo lo largo de este primer pico pueden observarse altos valores del registro GR y un incremento en la velocidad mostrada por el registro Sónico, ambos vinculados a la presencia de la Formación La Luna.
- ii. Debido al reducido espesor de la Formación Maraca (alrededor de 30 pies) su respuesta sísmica forma parte de la respuesta sísmica generada por la Formación Lisure.
- iii. La respuesta sísmica del Grupo Cogollo muestra reflectores de fuerte amplitud y gran continuidad lateral por lo que es posible vincular lateralmente estos reflectores con la presencia de las distintas unidades estratigráficas que lo conforman.

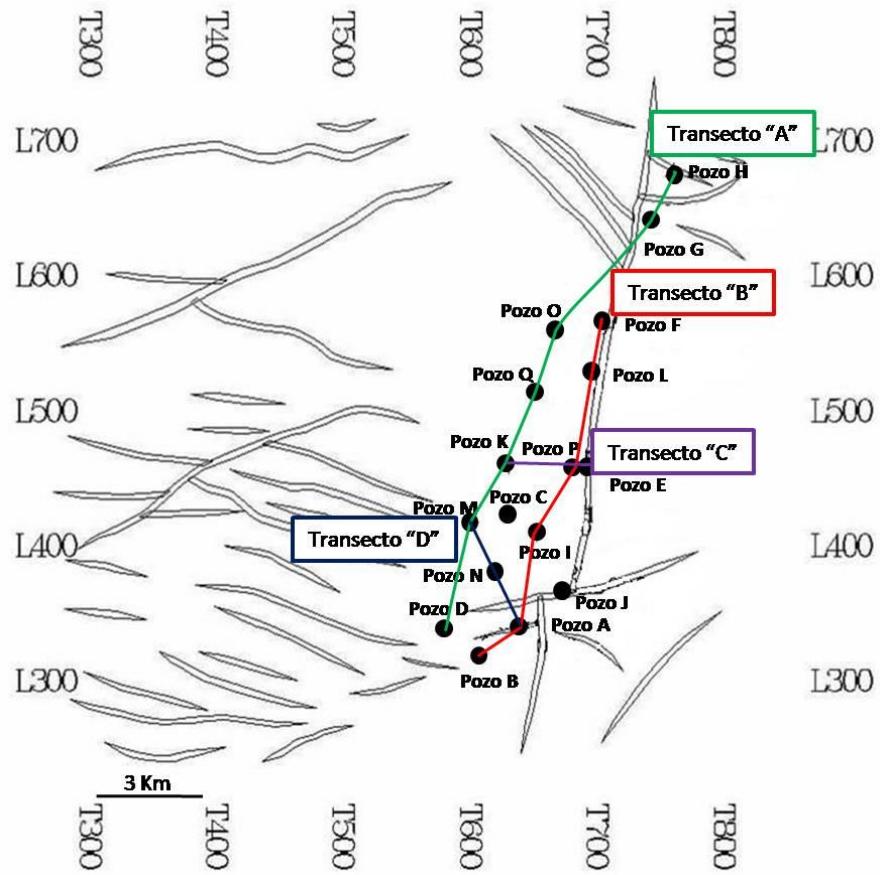


Figura IV 4. Mapa mostrando la ubicación de los transectos sísmica – pozos.

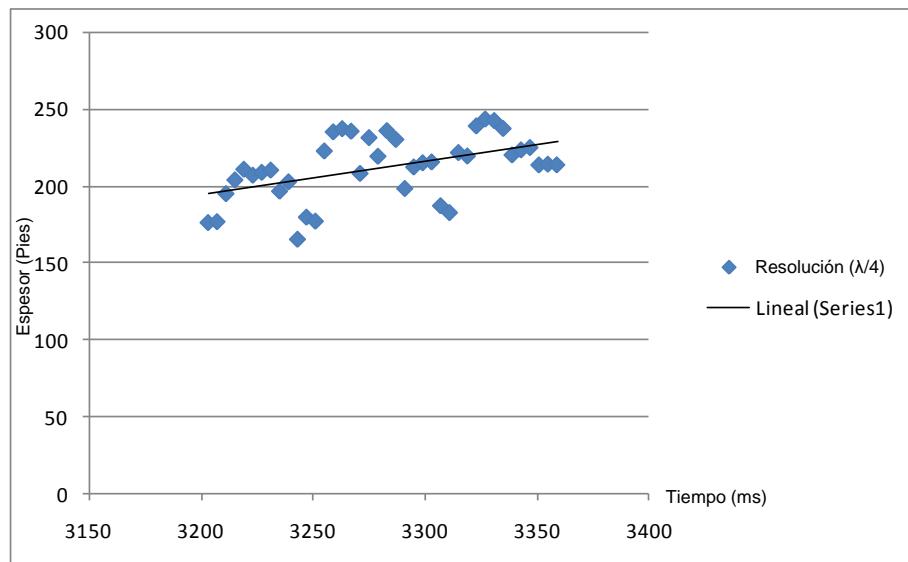


Figura IV 5. Grafico cruzado de resolución vertical ($\lambda/4$) versus la profundidad en tiempo.

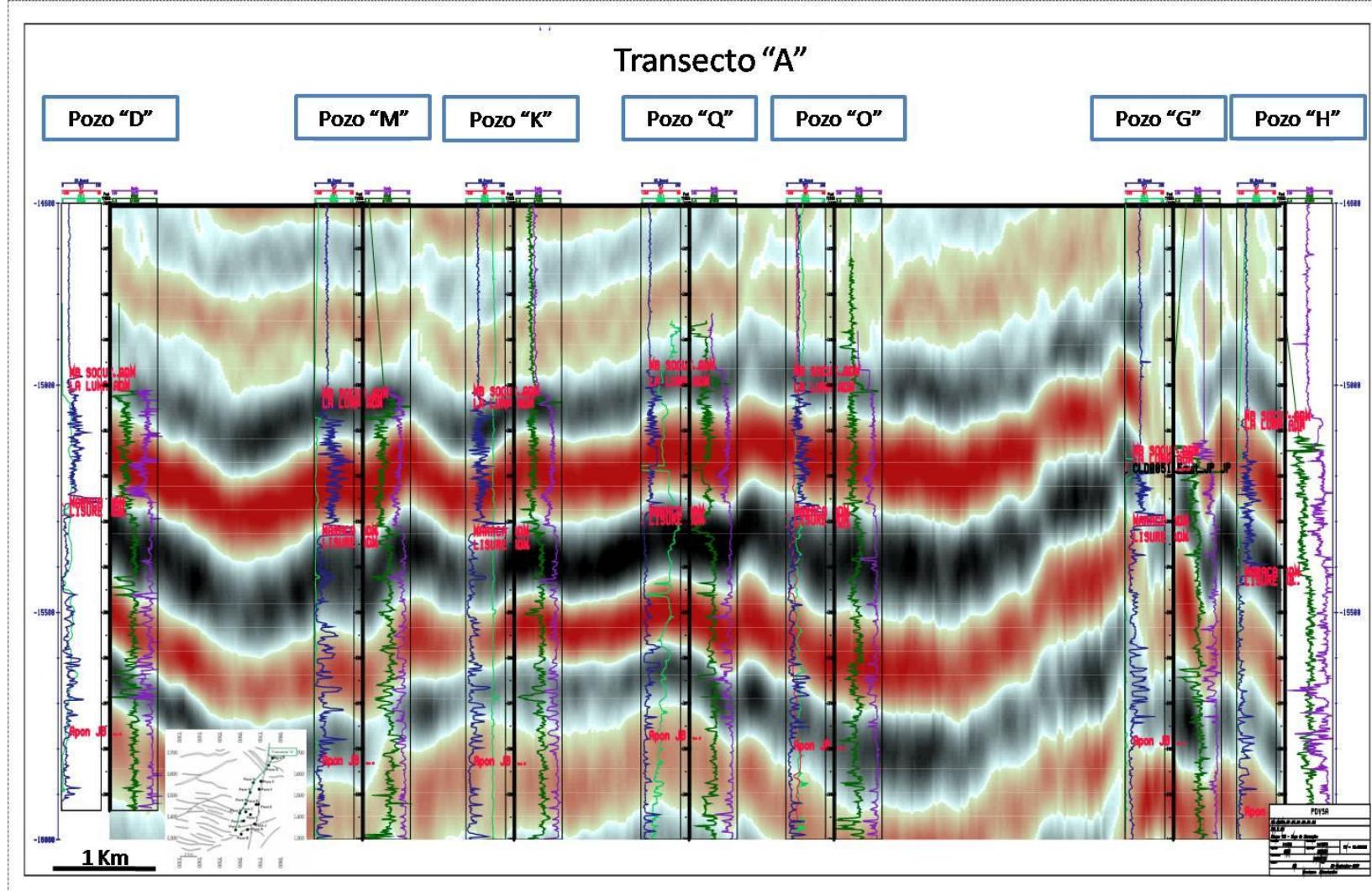


Figura IV 6. Transecto "A" de dirección NE. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sonico: púrpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.

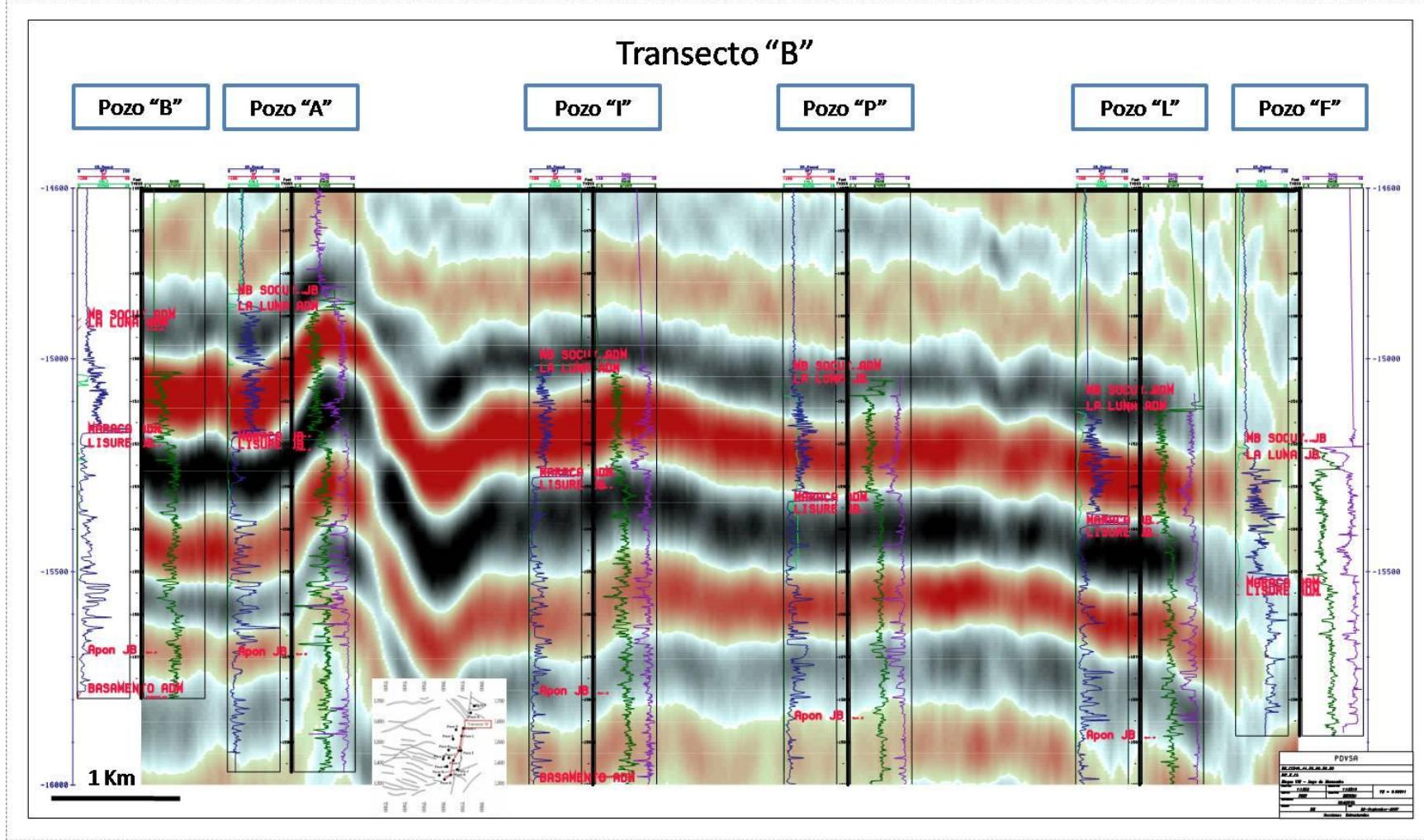


Figura IV 7. Transecto “B” de dirección NE. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sonico: purpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.

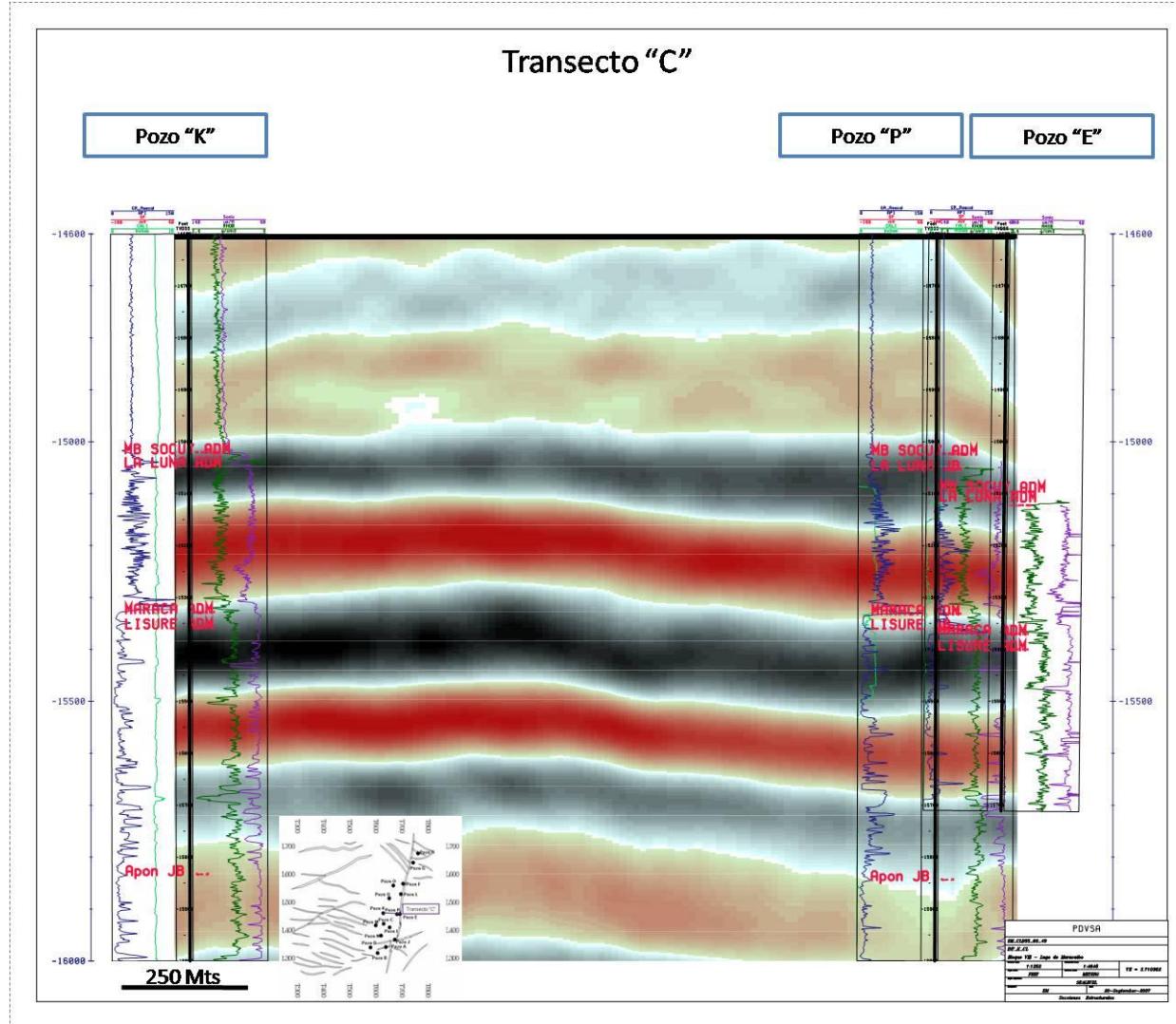


Figura IV 8. Transecto "C" de dirección NO. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sonico: púrpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.

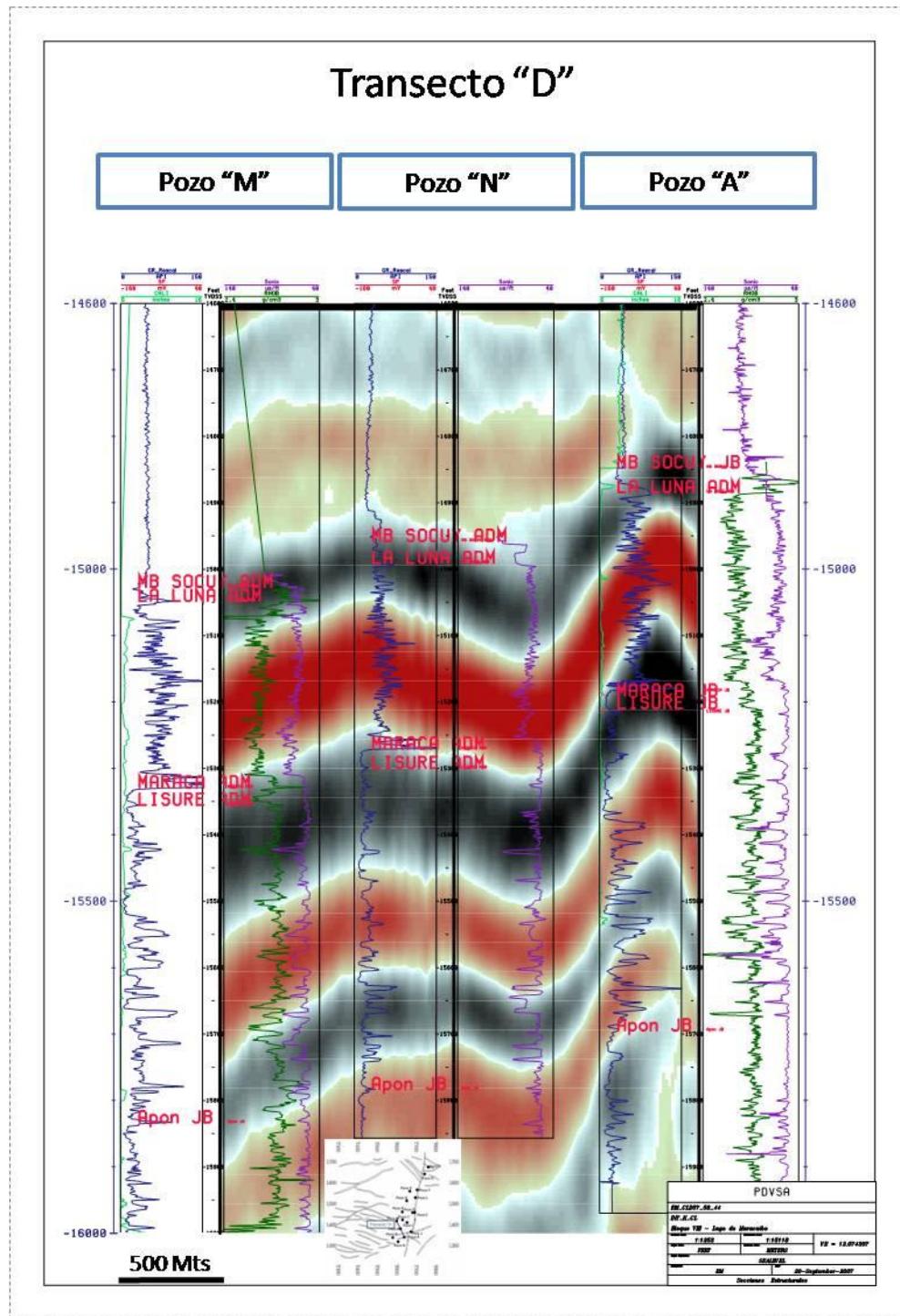


Figura IV 9. Transecto "D" de dirección NE. Curvas de pozos: Gr: azul; Caliper: verde claro; Sónico: purpura; Rhob: verde. Sísmica: Negro: polaridad positiva; Rojo: polaridad negativa.

Transectos de Pozos

Se generaron cuatro transectos de pozos para mostrar la continuidad lateral de las distintas formaciones que conforman al Grupo Cogollo. Los transectos siguen la misma orientación que los transectos sísmica – pozos por lo que su trayectoria pueden ser vista en detalle en la Figura IV 4. El datum común para todos los transectos de pozos es la profundidad de - 14600 pies TVDSS, la cual se ubica estratigráficamente en la Formación Colon. A partir de los transectos de pozos mostrados en las figuras IV 10, IV 11, IV 12 y IV 13 llegamos a los siguientes resultados:

- i. El espesor promedio para la Formación Maraca a lo largo de los transectos de pozos es de 35 pies; para la Formación Lisure es de 500 pies, mientras que la Formación Apón presenta un espesor que varía desde 100 pies (Pozo B) hasta 270 pies (Pozo M) (Figuras IV 10 y IV 11).
- ii. La uniformidad en los espesores de las formaciones Maraca y Lisure en el área del levantamiento BlqVIII – 3D parece indicar que el principal control al tiempo de su deposición, en esta zona, fue la subsidencia de la plataforma carbonática. En cuanto a la Formación Apón, muestra un espesor variable a lo largo de los transectos de pozos, lo cual plantea una interrogante interesante acerca de las características de la paleotopografía sobre la cual se depositó esta formación.
- iii. Estudiando en detalle las imágenes sísmicas en la posición de los pozos que mostraron menores espesores de la Formación Apón se logró identificar una atenuación de la reflexión sísmica hacia el extremo sur del área de estudio que podría ser evidencia de la disminución de su espesor. Adicionalmente los pozos “B”, “G”, “I”, “K”, “L”, y “M” reportan haber alcanzado basamento, mientras que los pozos “O” y “Q” indican haber alcanzado a la Formación Rio Negro y el pozo “P” reporta haber alcanzado la Formación La Quinta (Jurásico).

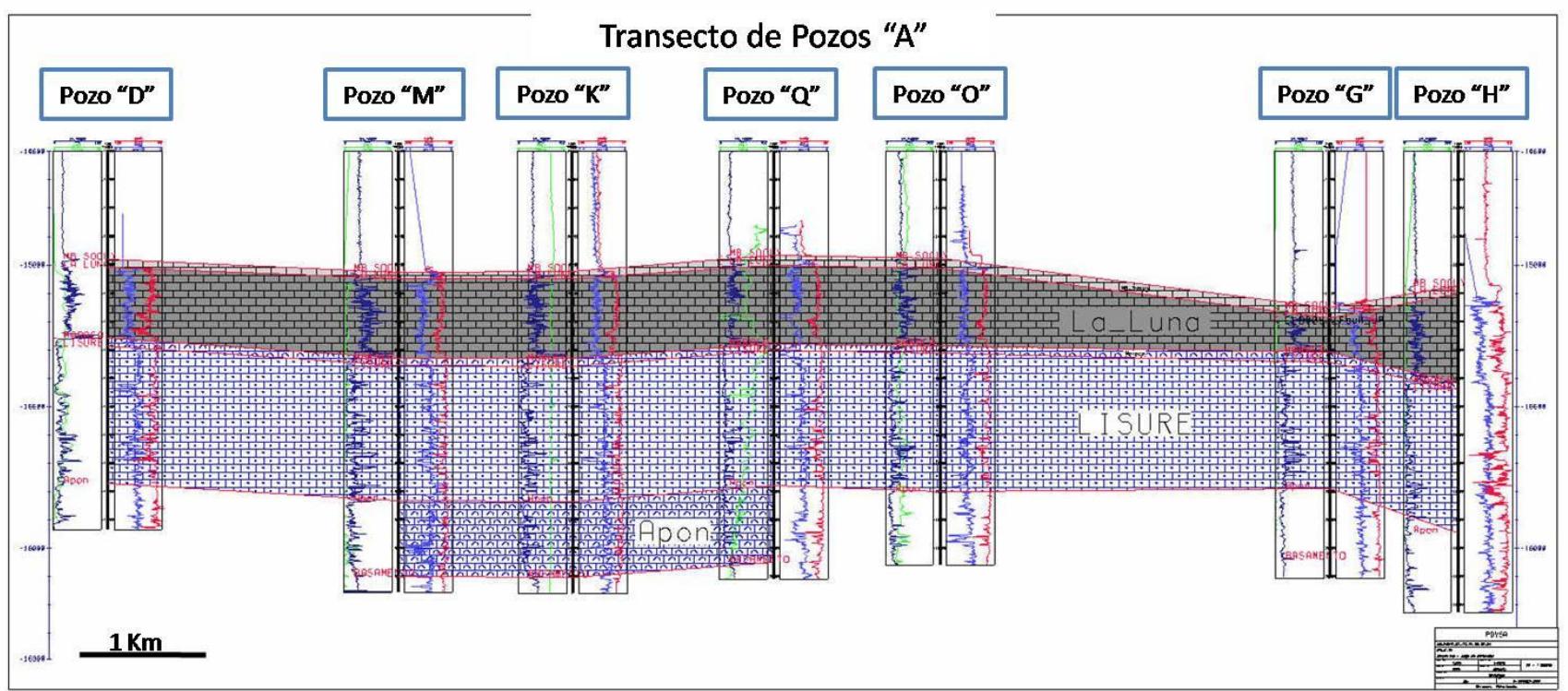


Figura IV 10. Transecto de pozos "A" de orientación NE.

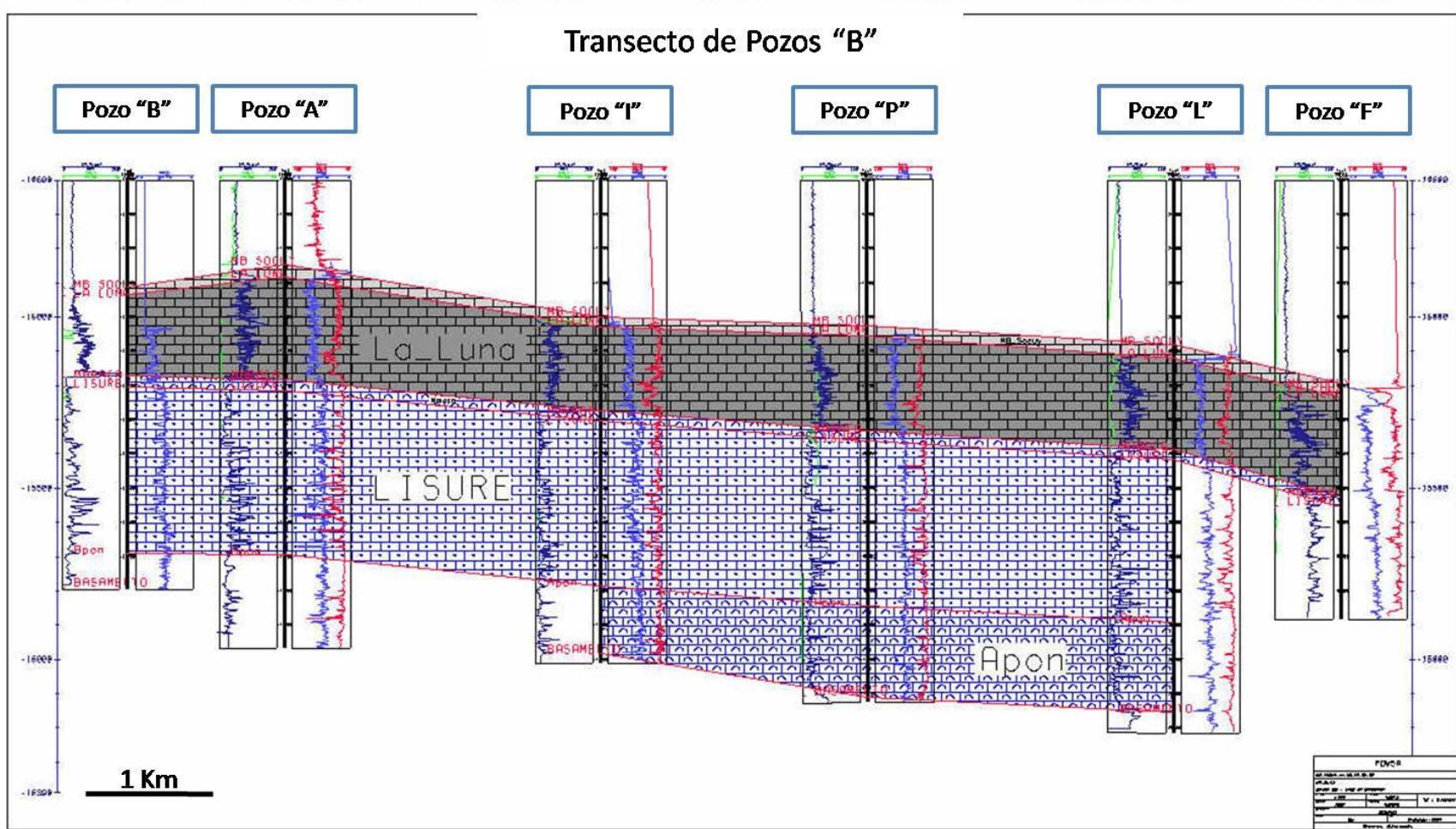


Figura IV 11. Transecto de pozos "B" de orientación NE.

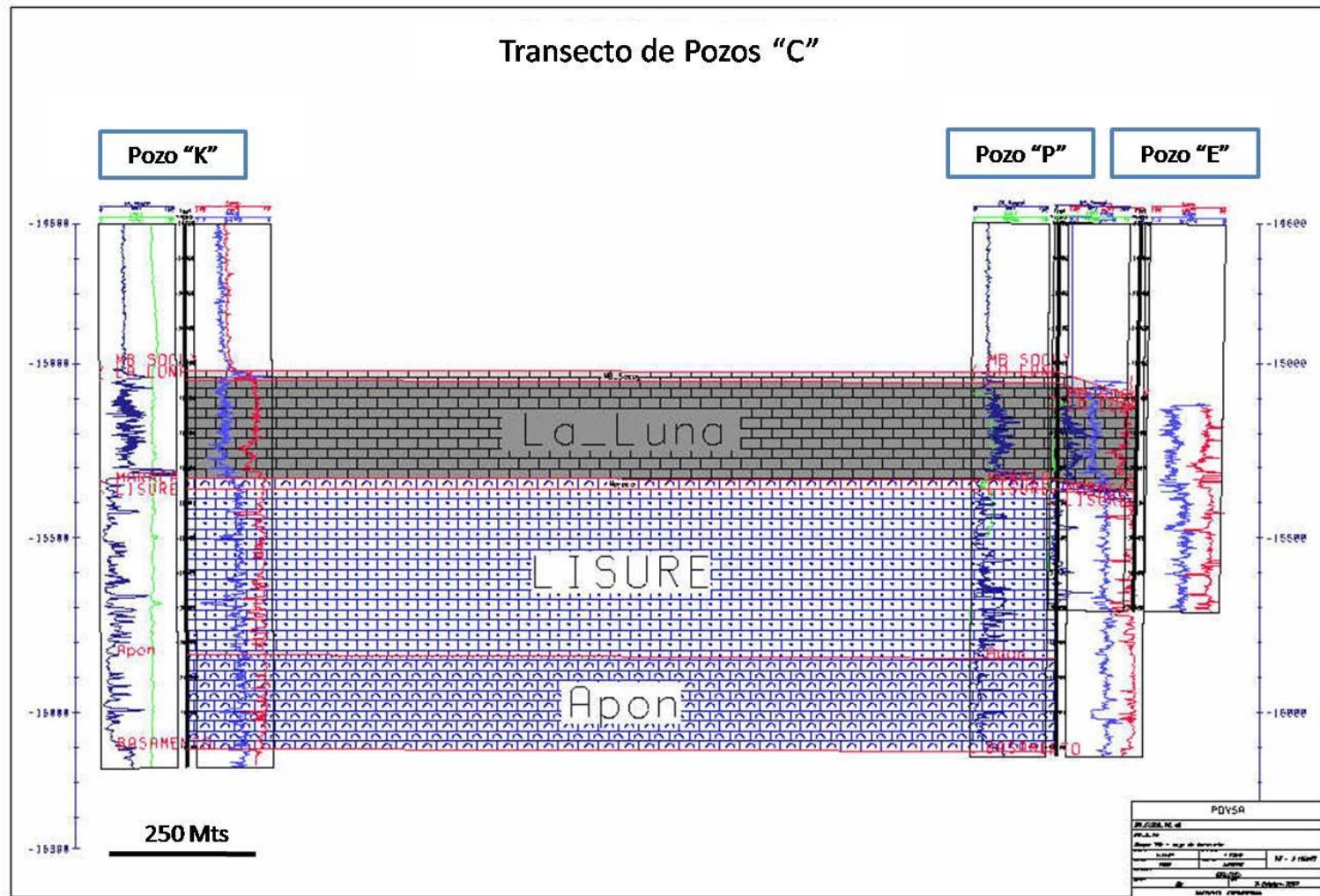


Figura IV 12. Transecto de pozos “C” de orientación E – O.

Transecto de Pozos "D"

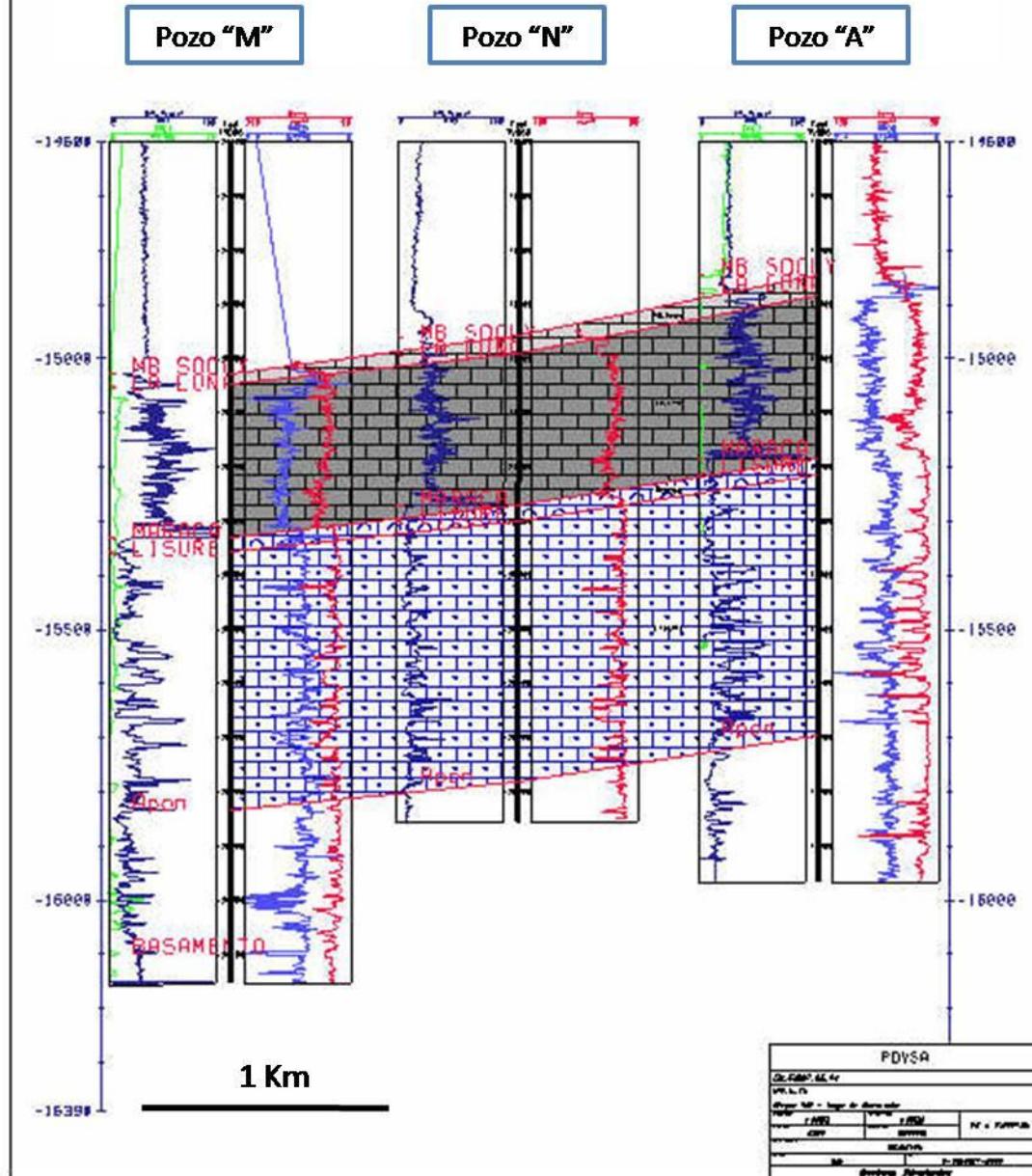


Figura IV 13. Transecto de pozos "D" de orientación NO.

Es práctica común en la industria petrolera denominar “Basamento” a las unidades sedimentarias que se ubican por debajo de los intervalos productores y que tienen “bajo” potencial petrolífero, este bien podría ser el caso del basamento reportado en los pozos antes descritos, ya que la respuesta sísmica que se aprecia por debajo de la Formación Apón corresponde a la respuesta de unidades sedimentarias (Figura IV 14). Este hecho es corroborado por pozos de la zona que reportan la presencia de las formaciones Rio Negro y La Quinta, por lo que el “basamento” reportado en otros pozos bien podría corresponder a la presencia de algunas de estas dos formaciones. También es importante hacer notar, que los sedimentos que se depositan en la cercanía de altos estructurales tienen características similares a los de la fuente sedimentaria, ya que provienen de la erosión y retrabajo de esta última y por lo tanto las litologías de las Formaciones Rio Negro y La Quinta en algunas zonas pudieran ser muy similares.

La figura IV 14 muestra con flechas de color rojo la atenuación de la reflexión correspondiente al tope de la formación Apón en las cercanías del pozo “B” donde se reportó la presencia de basamento. Las flechas de color amarillo muestran el truncamiento de una serie de reflectores que se extienden por debajo del reflector correspondiente a la Formación Apón y que mantienen cierto paralelismo con las reflexiones correspondientes al Grupo Cogollo. El recuadro punteado en color amarillo señala un sector de la figura IV 14 estudiado a través de multiatributos sísmicos y cuyos resultados se muestran en la figura IV 15.

En la figura IV 15 muestra de manera clara como el uso de los atributos “Amplitud Weighted Instantaneous Frequency”, “Instantaneous Q” e “Integration”, permiten diferenciar la presencia del Grupo Cogollo y la Formación La Luna de las unidades supra e infrayacentes. A partir de esta discriminación podemos resaltar que:

- i. Se observa una disminución apreciable del espesor del Grupo Cogollo hacia el este con respecto al espesor en tiempo observado al oeste del pozo “B” (ver atributo “Amplitud Weighted Instantaneous Frequency”), este hecho podría significar que existen espesores

mucho mayores de la Formación Apón, a los reportados por los pozos del campo Bloque VIII, hacia la parte oeste del levantamiento sísmico.

- ii. Al oeste del pozo “B” puede apreciarse una cuña de sedimentos cuya respuesta sísmica es distinta a la del Grupo Cogollo y a su vez distinta a la de las unidades precretacicas, la cual podría asociarse a la presencia de la Formación Río Negro.
- iii. En la profundidad final del pozo “B” puede distinguirse la presencia de un alto estructural cuya respuesta de atributos es claramente distinta a la del Grupo Cogollo y cuyo límite superior está marcado por una superficie punteada en color negro que muestra aproximadamente la posición de la discordancia entre unidades cretácicas y precretácicas a todo lo largo de la sección.

La figura IV 16a muestra la misma sección sísmica que la figura IV 14 pero horizontalizada en la reflexión correspondiente al tope de la Formación Apón, lo cual permite observar la geometría de la cuenca en esta zona para el momento de su depositación, mostrando al oeste y por debajo de la profundidad final del pozo una serie de reflexiones truncadas con ligera divergencia hacia el este, lo cual permite corroborar la existencia de una cuña sedimentaria sintectónica que posiblemente, por su posición estratigráfica, corresponde a depósitos de la Formación Rio Negro (Figura IV 16b). Los depósitos que constituyen esta cuña sedimentaria se engrosan contra el alto estructural actual del campo Bloque VIII lo que sugiere en primer lugar, que su sedimentación fue controlada por el desplazamiento de una falla normal y en segundo lugar que este alto estructural ha estado presente al menos desde el Cretácico inferior.

Por debajo y en contacto discordante con esta última unidad sedimentaria se observan una serie de reflexiones subparalelas, en algunos casos caóticas y con carácter sísmico claramente distinguible del de las unidades cretácicas, que corresponderían a unidades precretácicas.

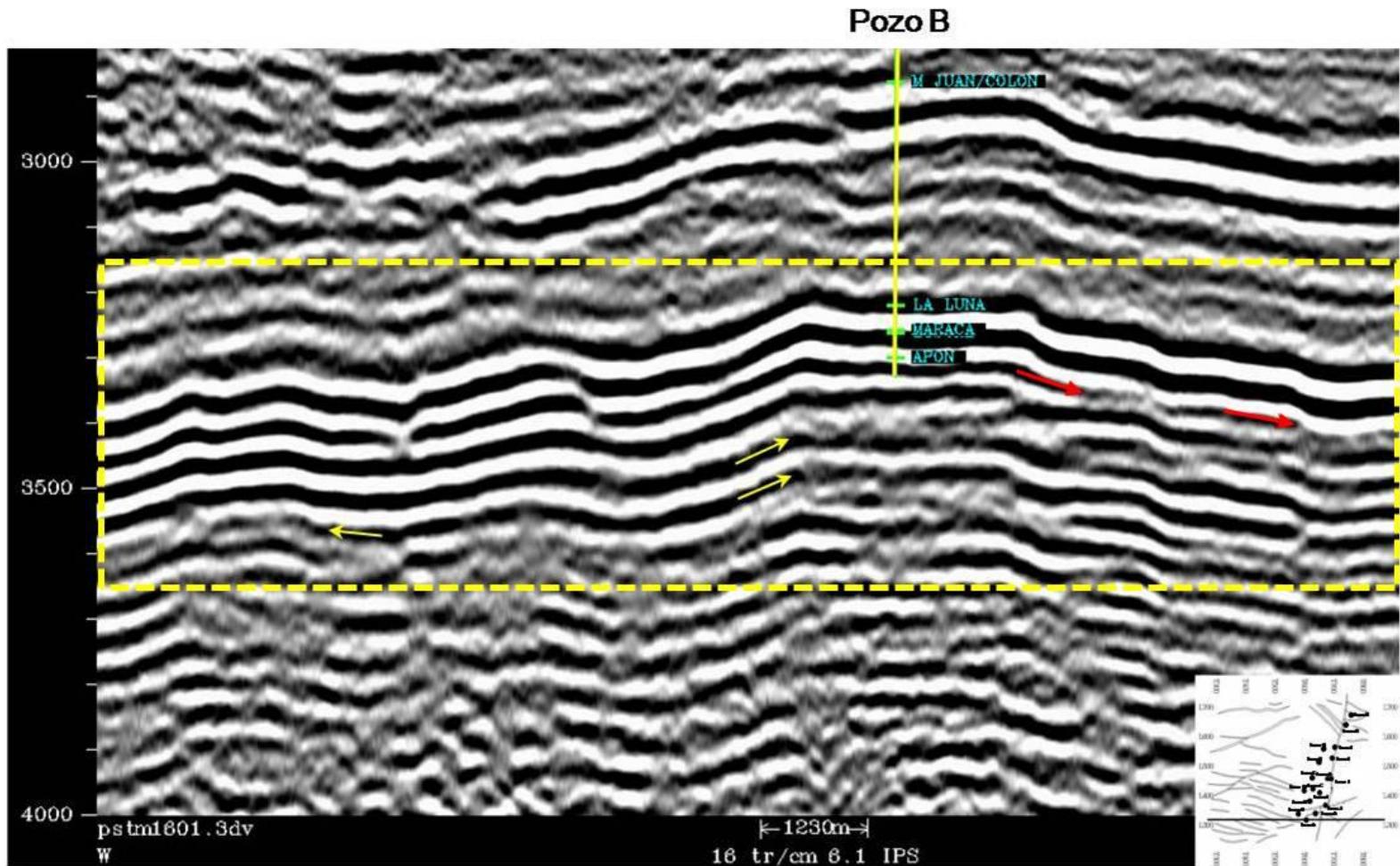


Figura IV 14. Sección que pasa por el pozo “B” en dirección E – O. Las reflexiones truncadas marcadas con flechas rojas que muestran el adelgazamiento y atenuación del reflector tope Formación Apón. Las flechas amarillas muestran el truncamiento de reflexiones contra lo que posiblemente sea la respuesta sísmicas de unidades sedimentarias pre – cretácicas.

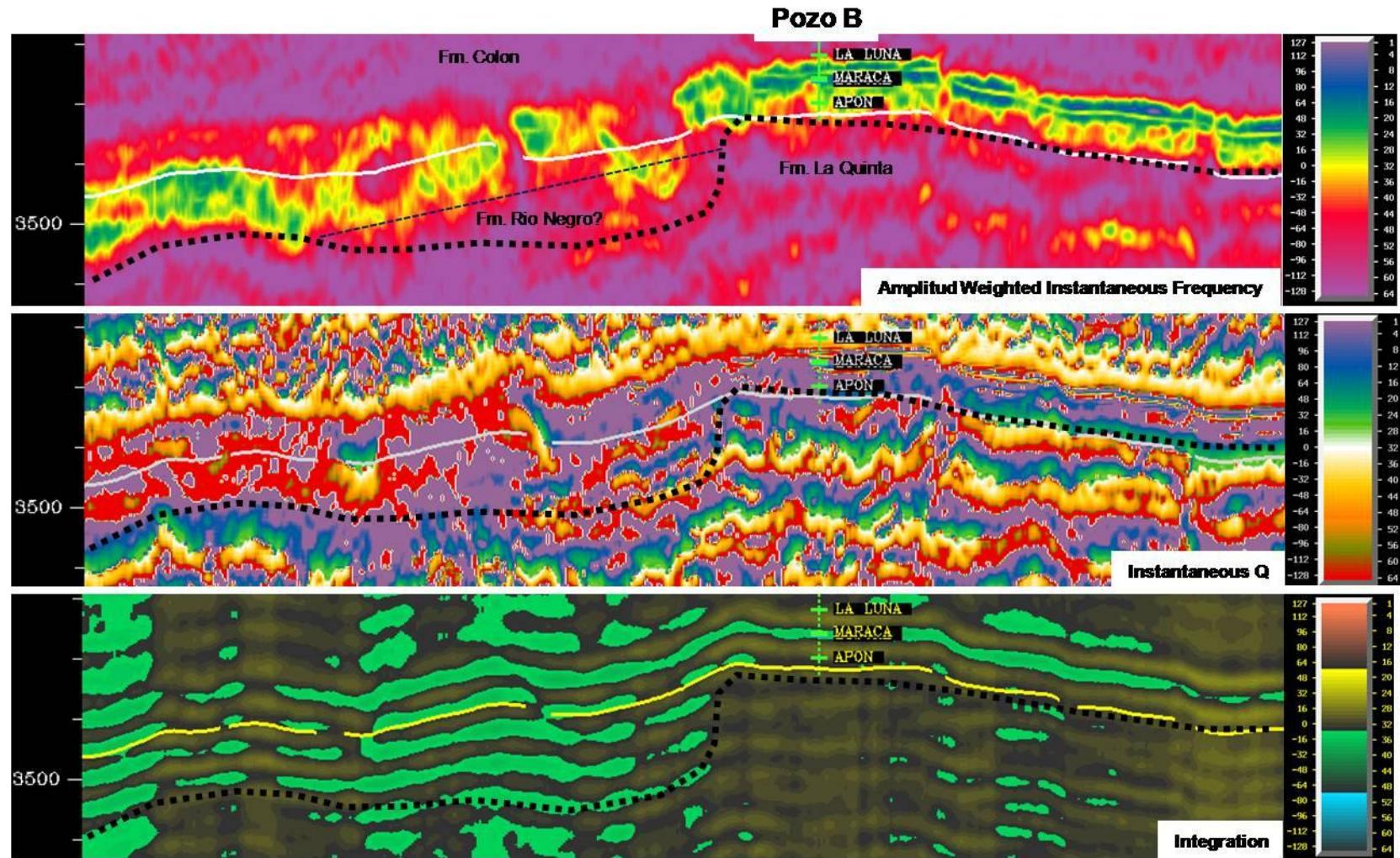


Figura IV 15. Detalle de la sección marcada en recuadro amarillo en la Figura IV 13, mostrando la respuesta de tres distintos atributos sísmicos.

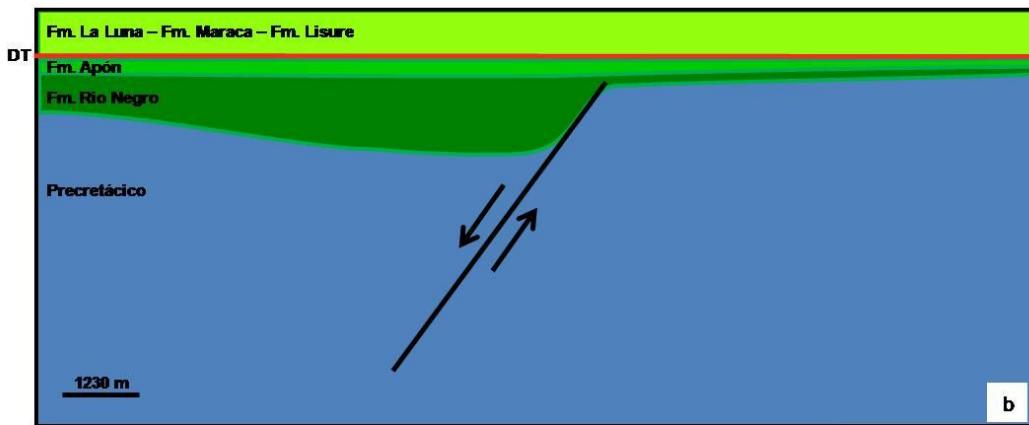
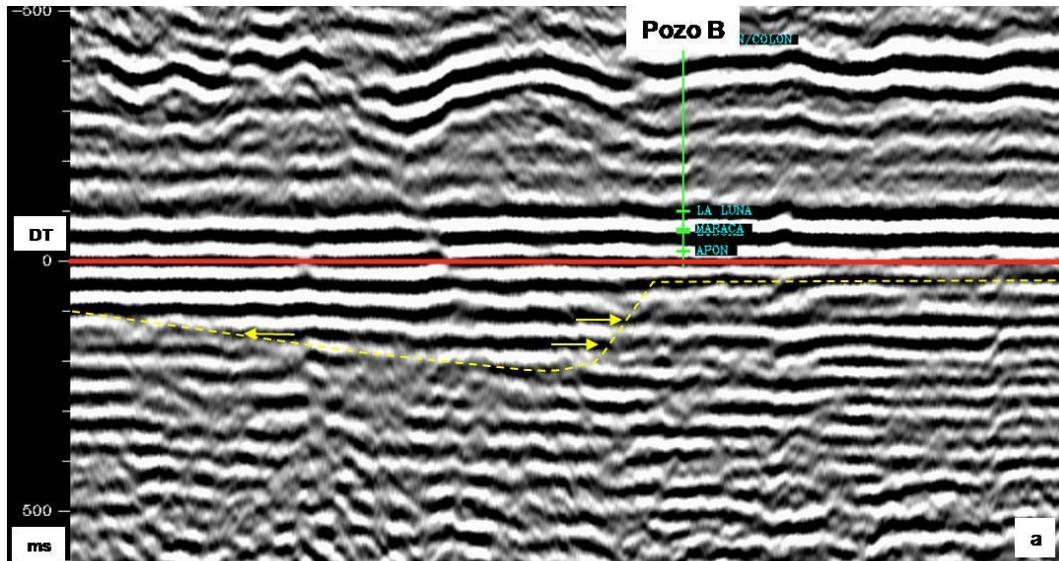


Figura IV 16.(a). Sección sísmica horizontalizada, en la reflexión correspondiente al tope de la Formación Apón. Esta sección intercepta al pozo “B” el cual perforó “basamento” que posiblemente corresponda a la Formación Rio Negro o La Quinta. B. modelo estratigráfico sugerido para esta sección sísmica.

La Figura IV 17 muestra un transecto que pasa en dirección norte sur por el pozo “P”, el cual reporta haber alcanzado a perforar la Formación La Quinta (Jurásico), donde se muestra nuevamente la existencia de un alto estructural en esta zona contra el cual se truncan las reflexiones correspondientes al Grupo Cogollo y las que posiblemente correspondan a la Formación Río Negro. En la Figura IV 18 se aprecia la respuesta de los atributos sísmicos “Standard Deviation Frequency” “Instantaneous Bandwidth” e “Integration” para el área seleccionada de la figura IV 17, sobre la que vale la pena destacar los siguientes aspectos:

- i. A partir de la información del pozo “P” podemos señalar que el alto estructural observado corresponde a la Formación La Quinta.
- ii. Los atributos sísmicos muestran la presencia de mayores espesores del Grupo Cogollo al norte del pozo “P” y en la misma dirección la presencia de una cuña sedimentaria que posiblemente corresponda a la Formación Río Negro.
- iii. La presencia de la Formación La Quinta infrayaciendo en contacto con la Formación Apón en el pozo “P” evidencia que en algunos casos la sedimentación de la Formación Río Negro no alcanzo a rebasar los altos estructurales constituidos por afloramientos de la Formación La Quinta y que fue solo durante la sedimentación de la Formación Apón que se logró rebasarlos por completo.

La figura IV 19a muestra una sección sísmica horizontalizada que pasa por el pozo “P” donde se corrobora la existencia un alto estructural precretácico, mientras que la figura IV 19b presenta el esquema estratigráfico propuesto para dicha sección sísmica. Todas estas observaciones aportan datos para reconstruir el marco tectono – estratigráfico del inicio de la deposición del Grupo Cogollo durante el Cretácico temprano

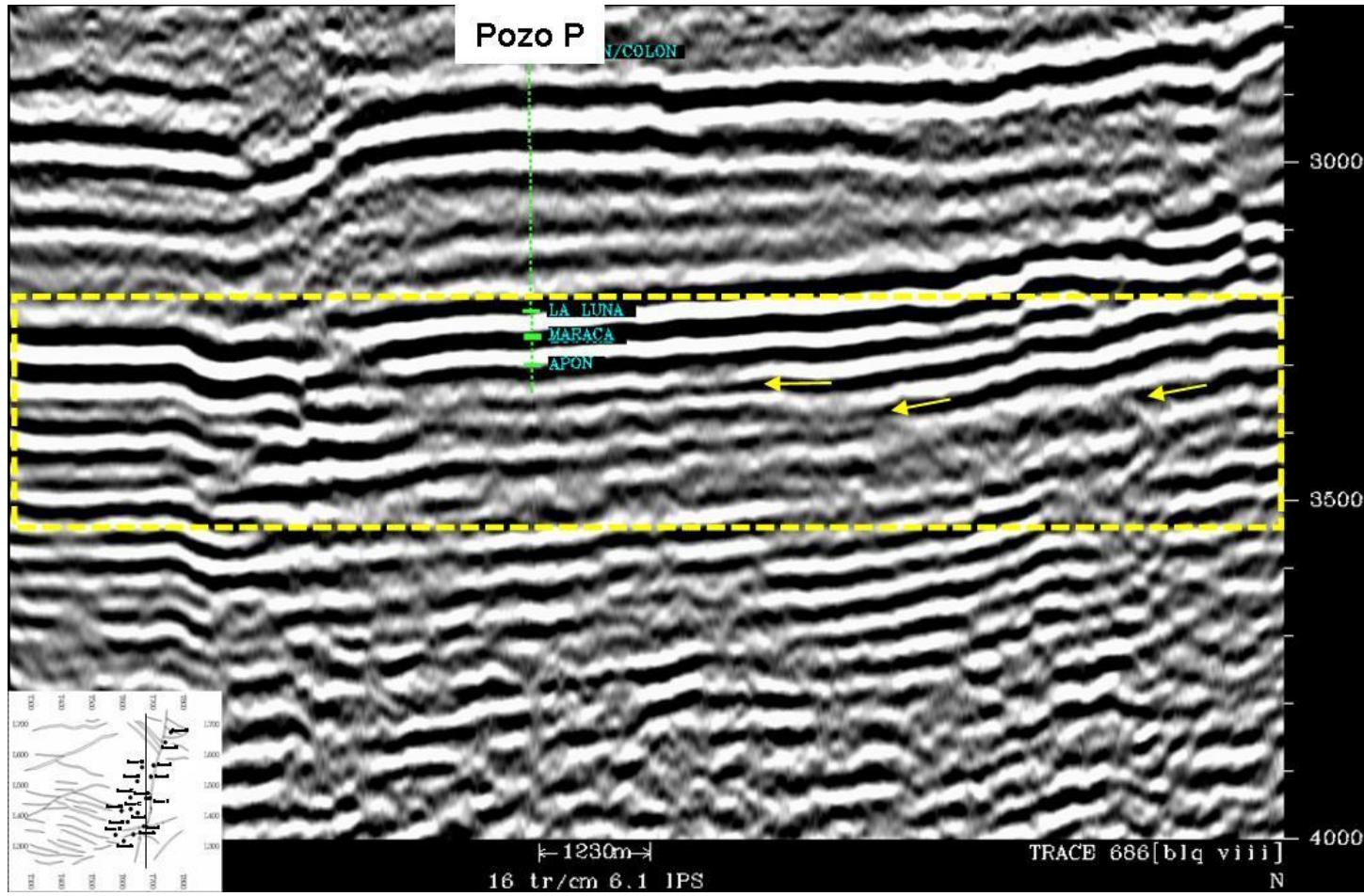


Figura IV 17. Sección sísmica que pasa por el pozo “P”, el cual alcanzo a perforar sedimentos de la Formación La Quinta. En la sección se muestran con flechas amarillas reflectores truncados que muestran la geometría del alto estructural precretácico.

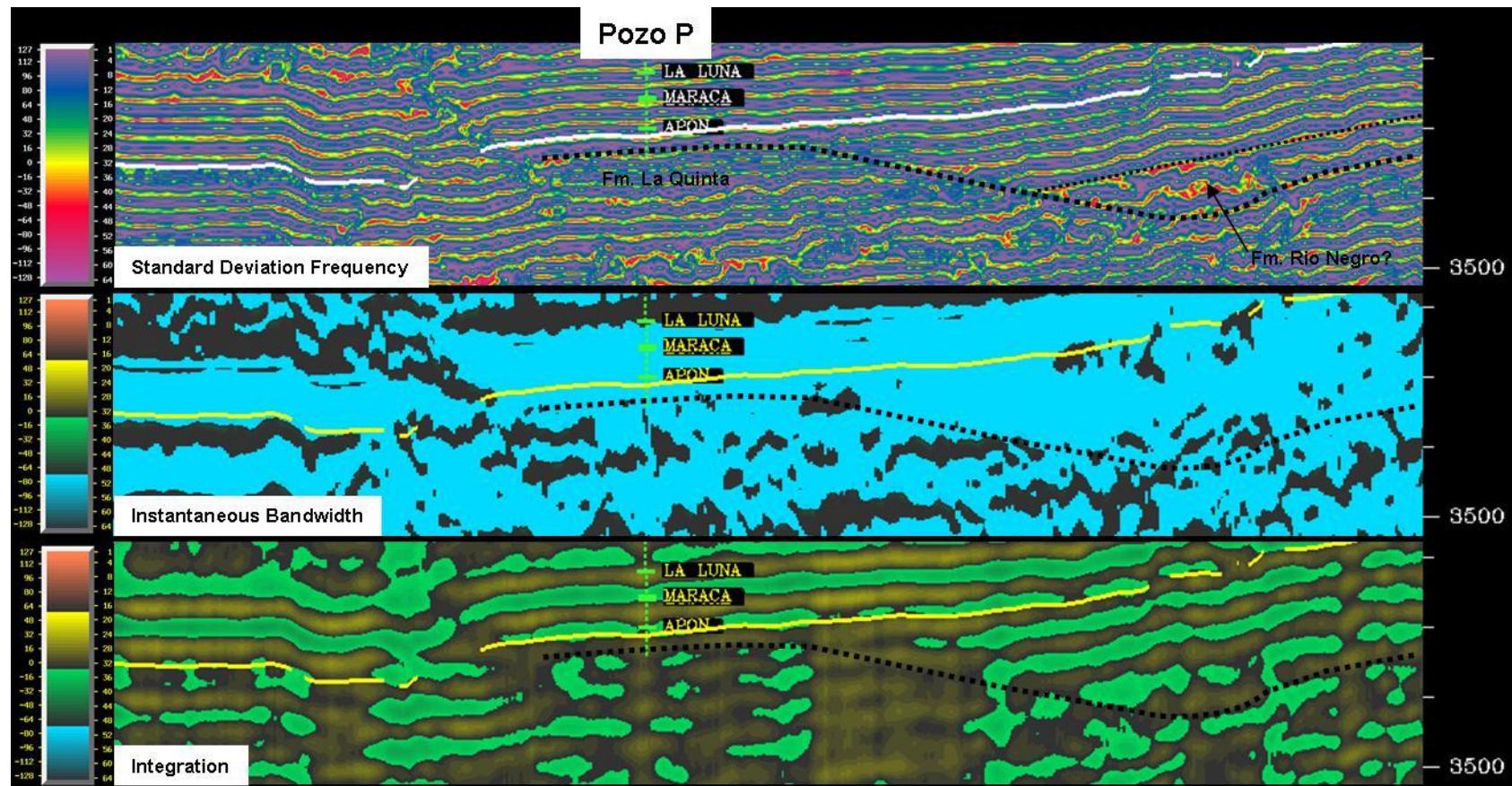


Figura IV 18. Detalle de la sección marcada en recuadro amarillo en la Figura IV 17, mostrando la respuesta de tres distintos atributos sísmicos.

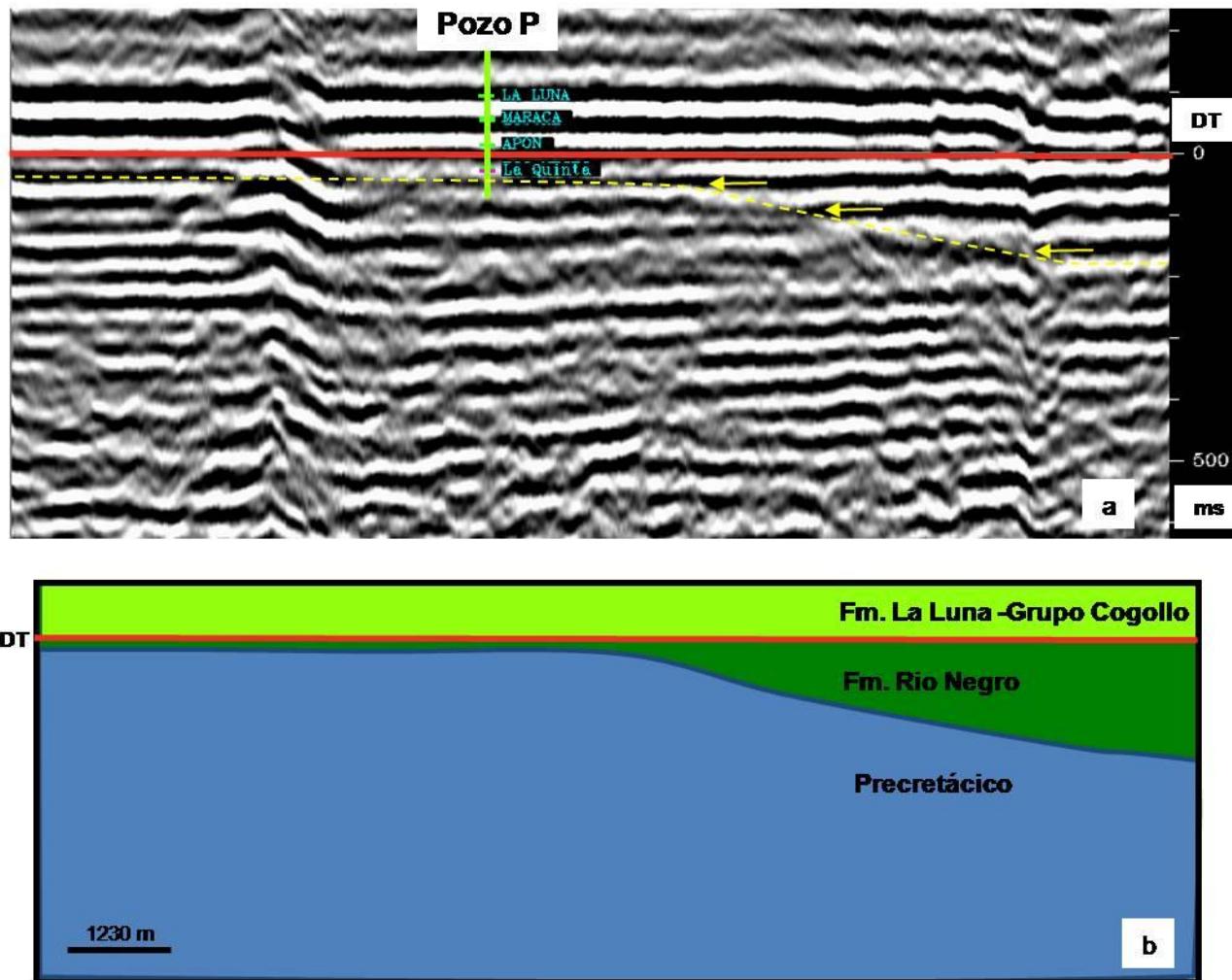


Figura IV 19. a. Sección sísmica horizontalizada, en la reflexión correspondiente al tope de la Formación Apón. Esta sección intercepta al pozo “P” el cual alcanzó a perforar sedimentos de la Formación La Quinta. B. modelo estratigráfico sugerido para esta sección.

Cubos de descomposición espectral

Se generaron cinco cubos sísmicos a partir de la descomposición espectral del volumen original con frecuencias dominantes de: 10, 14, 22, 33, 50 Hz (Figura IV 20), estos cubos muestran las respuestas de las distintas unidades estratigráficas en un determinado rango de frecuencias y se realizaron con el fin de optimizar la interpretación de horizontes sísmicos a través de un incremento en la continuidad de la señal y a la vez examinar los datos sísmicos en búsqueda de rasgos del sistema depositacional. Del estudio del carácter sísmico de estos cubos es importante resaltar que:

- i. El cubo de 10 Hz muestra escasa continuidad de los reflectores aun cuando puede distinguirse la interfase Formación Colón – Formación La Luna. Su valor para la interpretación estructural es escaso, y no se identificaron rasgos estratigráficos.
- ii. El cubo de 14 Hz presenta mejorías en la continuidad de los reflectores correspondientes a la Formación La luna y el Grupo Cogollo, incluso se observa una curiosa continuidad de los reflectores en el intervalo correspondiente a la Formación Colón.
- iii. El cubo de 22 Hz presenta una apreciable mejoría en la continuidad de los reflectores mostrándose ideal para la interpretación de los horizontes. Esta excelente continuidad esta relacionada con el hecho de que la frecuencia dominante del volumen original es aproximadamente 20 Hz (Figura IV 21a), por lo que en este cubo de 22 Hz se minimizaron las variaciones de amplitud originadas por las altas y bajas frecuencias dando como resultado una señal mas coherente. La figura IV 21b, muestra el espectro de frecuencias para el cubo de 22 Hz donde es posible apreciar que mantiene la frecuencia dominante del volumen original dentro de un rango muy estrecho de frecuencias.

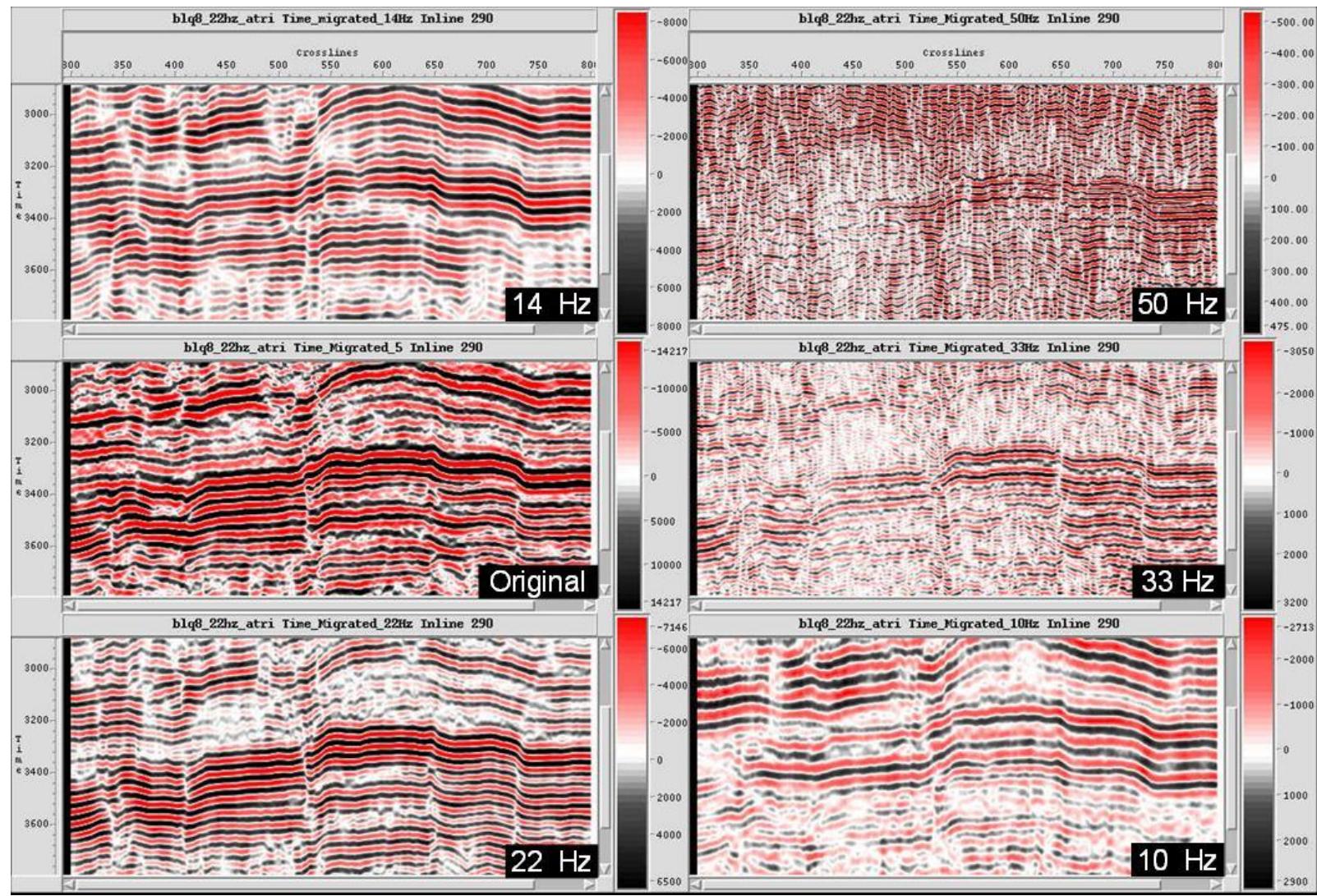


Figura IV 20. Imágenes de los cubos sísmicos generados por descomposición espectral, mostrando una misma línea vista a distintos intervalos de frecuencia.

- iv. En el cubo de 33 Hz se observa una clara discriminación de las principales interfases estratigráficas del Cretácico, aunque el reflector vinculado a la interfase Formación La Luna – Formación Maraca se presenta discontinuo lo cual requiere un análisis detallado para tratar de determinar si se trata de la expresión de rasgos estratigráficos que son resaltados a esta frecuencia en particular.
- v. El cubo de 50 Hz presenta una imagen de reflectores discontinuos que aunque parecen reflejar un aumento en la resolución vertical no permiten una correlación confiable con los datos de pozo. Es probable que junto a la información contenida en este cubo también esté presente una cantidad apreciable de ruido responsable de las reflexiones caóticas.

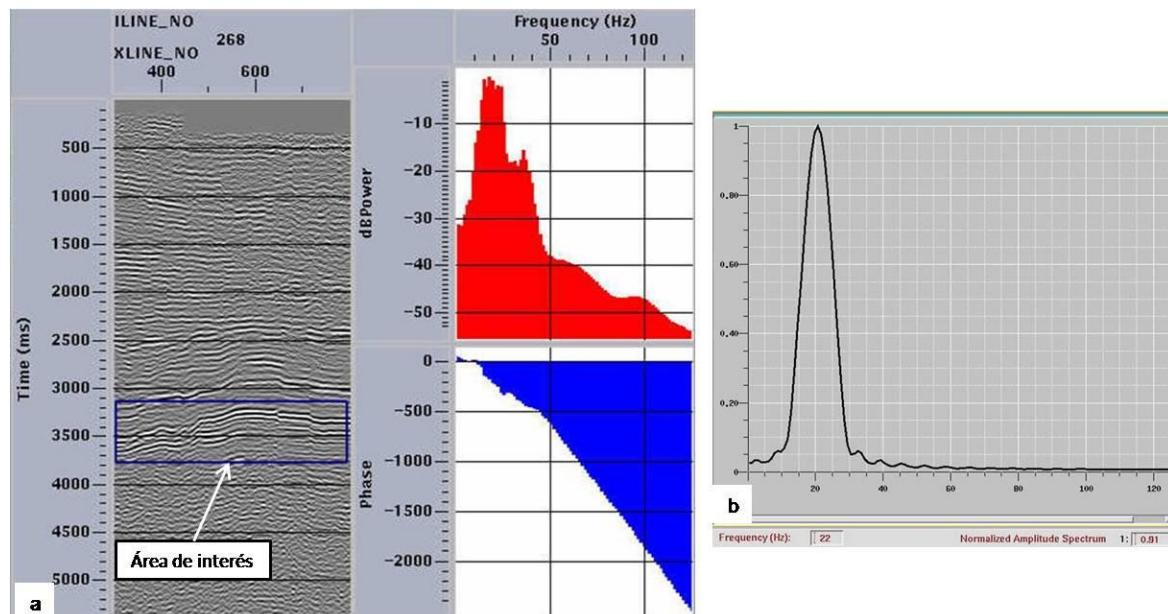


Figura IV 21.(a) Espectro de frecuencias del volumen sísmico BLQ VIII 3D en el intervalo de interés. **(b)** Espectro del volumen sísmico producto de la descomposición espectral a 22 Hz.

Horizontes sísmicos

A partir del uso de los cubos de descomposición espectral se procedió a la cartografía de horizontes, seleccionando para cada interfase estratigráfica el cubo en el cual dicha interfase mostró mayor grado de continuidad. En este punto es importante señalar que el interpretar horizontes en volúmenes con rango limitado de frecuencias trae como consecuencia, en algunos casos, un ligero desplazamiento en tiempo del horizonte interpretado con respecto a uno interpretado en el cubo sísmico original.

Durante este trabajo se interpretaron los horizontes sísmicos correspondientes a los topes y bases de las formaciones: Apón (Horizonte Tope Apón y Horizonte Base Apón), Lisure y Maraca (Horizonte Maraca – Lisure), miembros del Grupo Cogollo, cartografiando de esta manera sus principales interfaces estratigráficas. Adicionalmente se cartografió el reflector correspondiente al tope de la Formación La Luna (Figura IV 22) (Horizonte La Luna) como horizonte de referencia por su fuerte contraste sísmico y extensión regional.

Estructuralmente, los horizontes interpretados dentro del intervalo correspondiente al Grupo Cogollo se presentan paralelos unos a otros, diferenciándose casi exclusivamente por su posición en tiempo, salvo el Horizonte Base Apón que, como se mostró en los transectos sísmica pozos, muestra adelgazamientos y atenuaciones vinculadas a cambios de espesor.

Los horizontes interpretados están interceptados por una serie de fallas orientadas en cuatro direcciones principalmente, E-NE, N-NE, N-NO y NE (Sección A – A', Figuras IV 23) que corresponden a eventos tectónicos de edad Paleozoico, Jurásico, Eoceno y Mioceno respectivamente (Poppelreiter, 2005; Lugo y Mann, 1995). La falla principal F-A, de tendencia N-NE – S-SO, es una falla subvertical, normal de desplazamiento oblicuo, paralela a la Falla Lama – Icotea (Sección B – B', Figura IV 24). Esta falla divide el área del levantamiento sísmico Blq VIII – 3D en dos bloques, un bloque levantado al oeste de la falla en el que se ubican los pozos productores y un bloque deprimido al este de la falla.

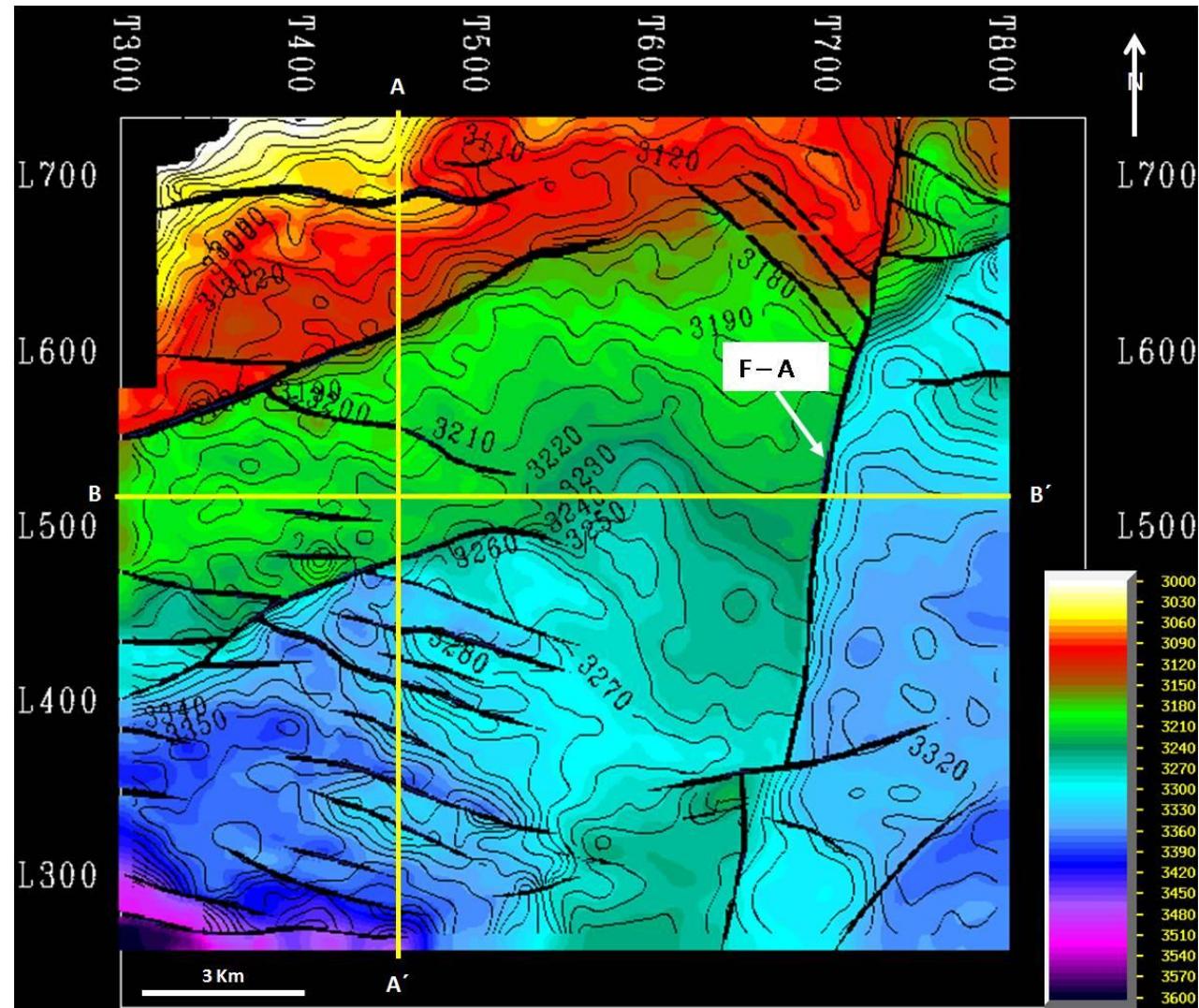


Figura IV 22, Horizonte en tiempo correspondiente al tope de la Formación La Luna mostrando la ubicación de los transectos A – A' y B – B' además de la ubicación de la falla principal F-A.

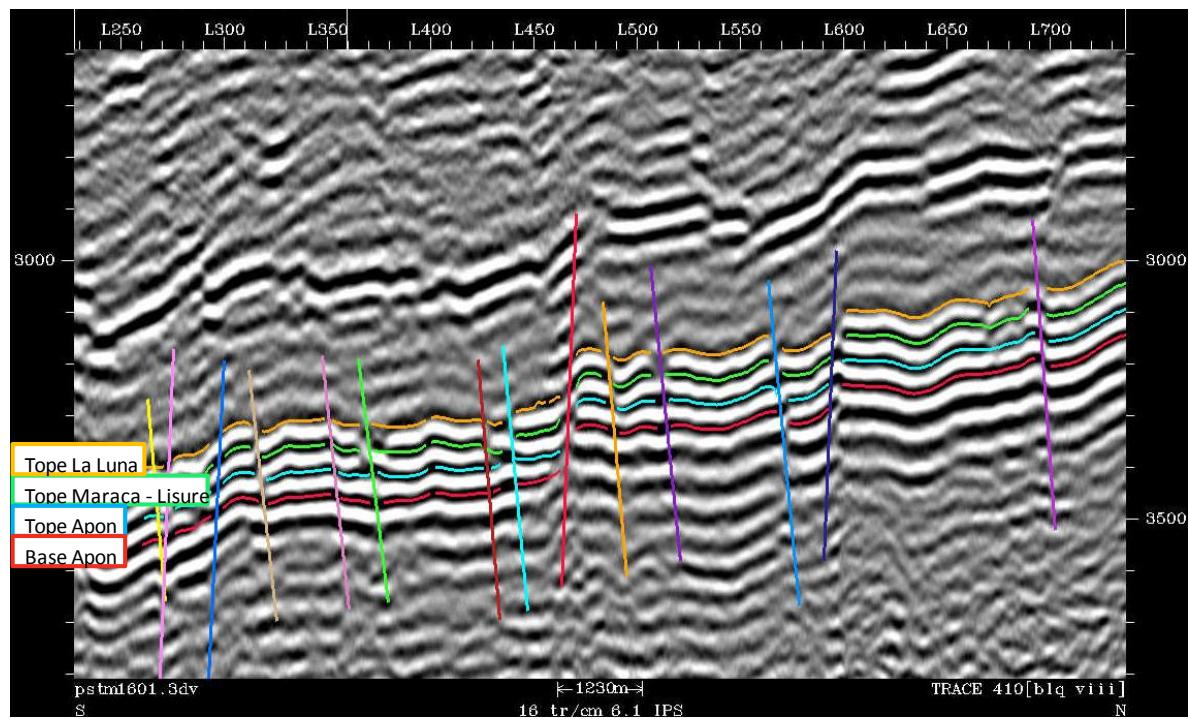


Figura IV 23. Transepto A – A' de orientación N – S.

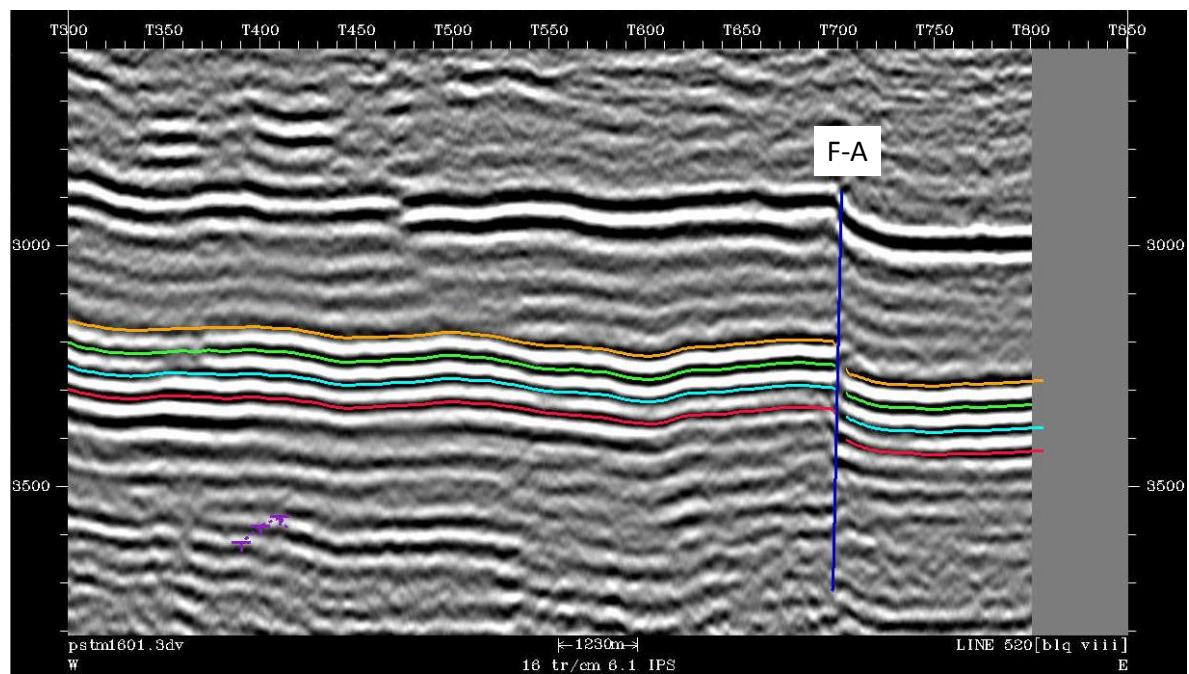


Figura IV 24. Transecto B – B' de orientación E – O.

Horizontes Base Apón – Tope Apón.

El horizonte correspondiente a la base de la Formación Apón (Figura IV 25), define el límite inferior del Grupo Cogollo (límite entre las secuencias K0 y K1) identificado en los pozos del área y consiste en un homoclinal fallado con buzamiento SE, cuyo rango de profundidad oscila entre 3550 ms y 3200 ms a lo largo de la dirección de buzamiento. Los altos estructurales que se observan localmente a lo largo del horizonte están vinculados al desplazamiento de fallas menores, mientras que en general la estructura principal del campo, asociada a la falla F – A, muestra la misma geometría de la estructura precretácica presente al inicio de la sedimentación del Grupo Cogollo.

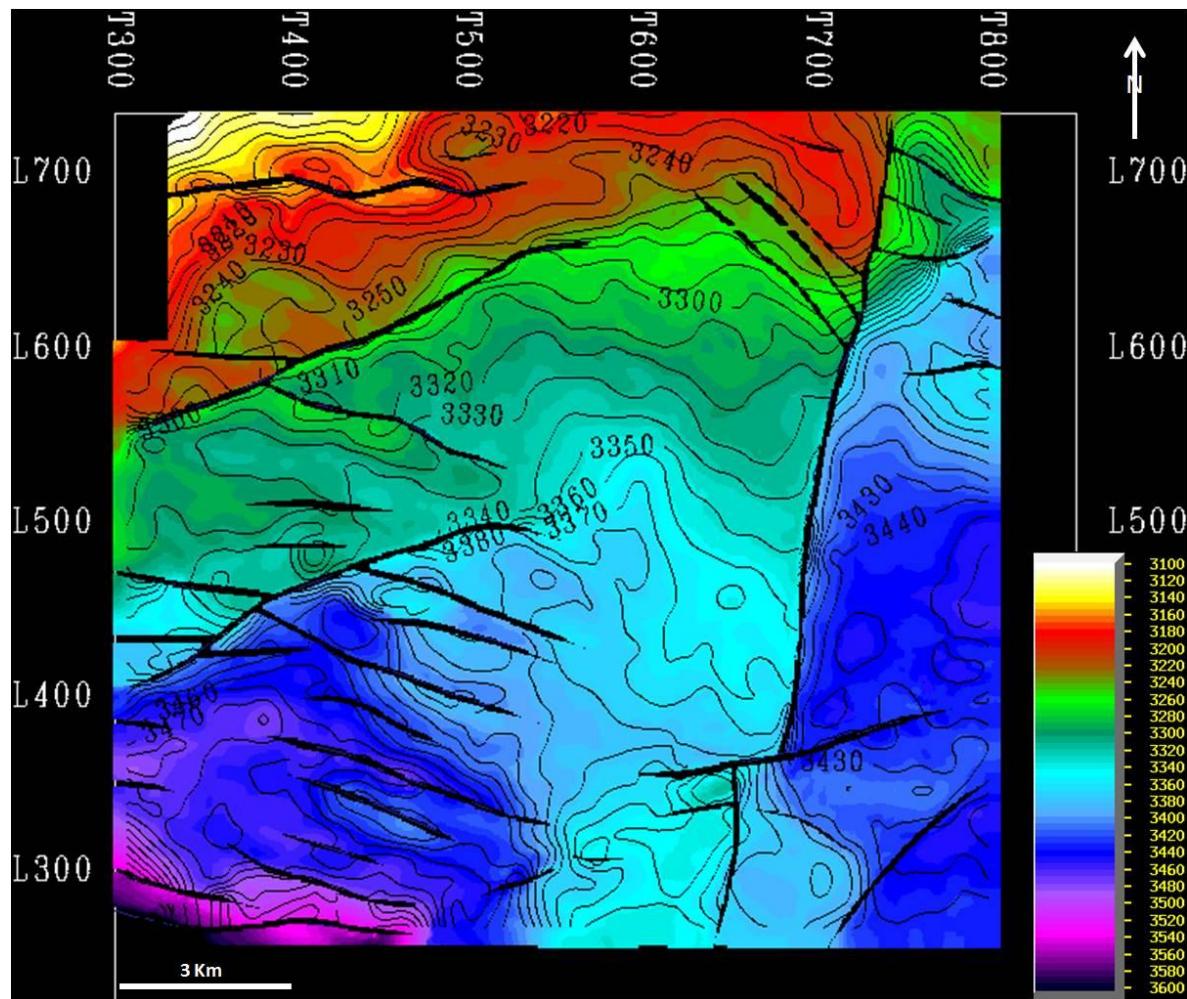


Figura IV 25. Horizonte en tiempo correspondiente a la base de la Formación Apón (Base Apón).

El horizonte correspondiente al tope de la Formación Apón (Base de la Formación Lisure y límite entre las secuencias K1 y K2) (Figura IV 26), marca la transición entre las formaciones Apón y Lisure, esta última con mayor presencia de sedimentos clásticos. El rango de profundidad en tiempo para el tope de la Formación Apón oscila entre 3530 ms y 3120 ms en la dirección del buzamiento.

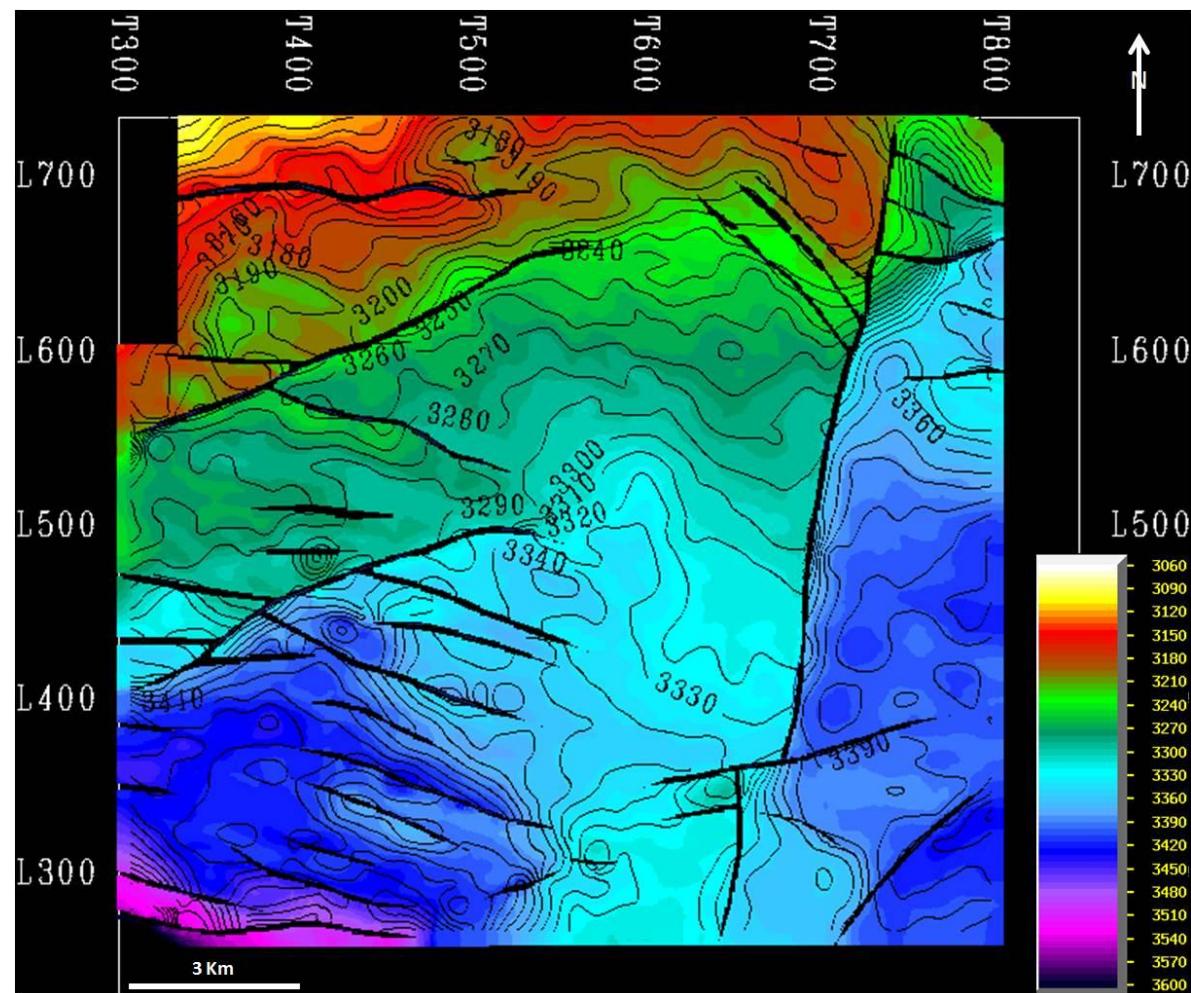


Figura IV 26. Horizonte en tiempo correspondiente al Tope de la Formación Apón (Tope Apón)

Horizonte Maraca – Lisure.

El horizonte correspondiente a la Formación Maraca – Tope de la Formación Lisure (límite entre las secuencias K2 y K3) (Figura IV 27), muestra un homoclinal fallado con buzamiento hacia el SE, con un rango de profundidad en tiempo para este horizonte que oscila entre 3480 ms y 3090 ms a lo largo de la dirección de buzamiento. El espesor promedio de la Formación Maraca en esta área es de 30 pies por lo que está por debajo de la resolución sísmica de este levantamiento que oscila entre 160 y 245 pies. Debido a esto no es posible obtener una reflexión sísmica que corresponda únicamente a la Formación Maraca, sino al conjunto Formación Maraca – Tope de la Formación Lisure.

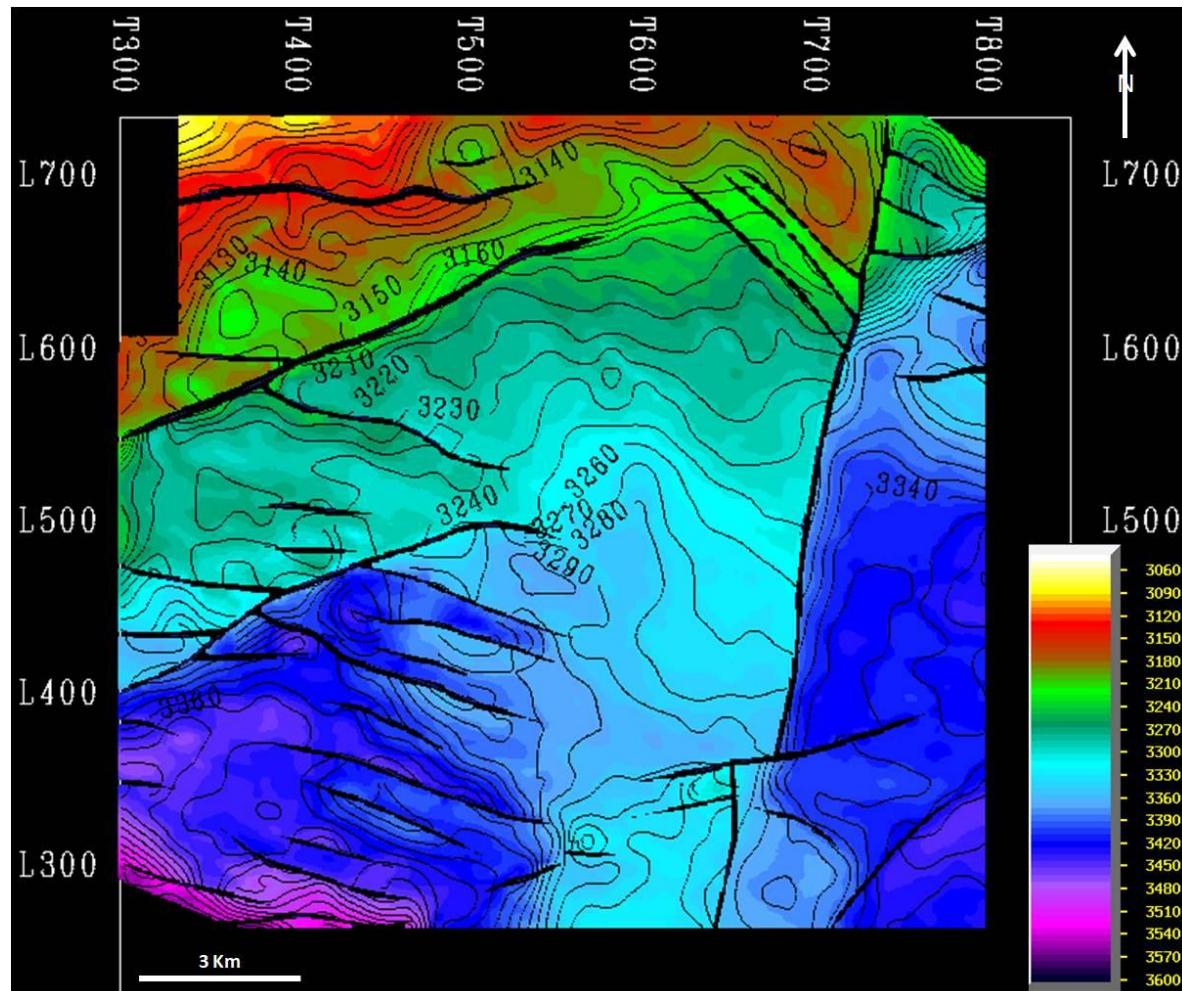


Figura IV 27. Horizonte en tiempo correspondiente a la Formación Maraca – Tope de la Formación Lisure (Maraca – Lisure).

Análisis de la Respuesta Sísmica del Grupo Cogollo.

En esta sección se muestran los resultados de un análisis de la respuesta sísmica en el intervalo correspondiente al Grupo Cogollo, a través de la aplicación de diversas técnicas para la obtención de imágenes y su integración con atributos sísmicos. Las imágenes de secciones sísmicas horizontales “Horizon Slices” permitieron estudiar los cambios laterales en el carácter de la señal sísmica entre los horizontes correspondientes al tope de la Formación Maraca – Lisure y tope y base de la Formación Apón. Estas imágenes mostraron anomalías de amplitud en la respuesta sísmica que se presentan como cuerpos elongados de dirección NW – SE (Figura IV 28. Rasgos A y B) y anomalías circulares y semi-circulares a lo largo de planos de falla o en su cercanía (Figura IV 28. Rasgos C, D y E).

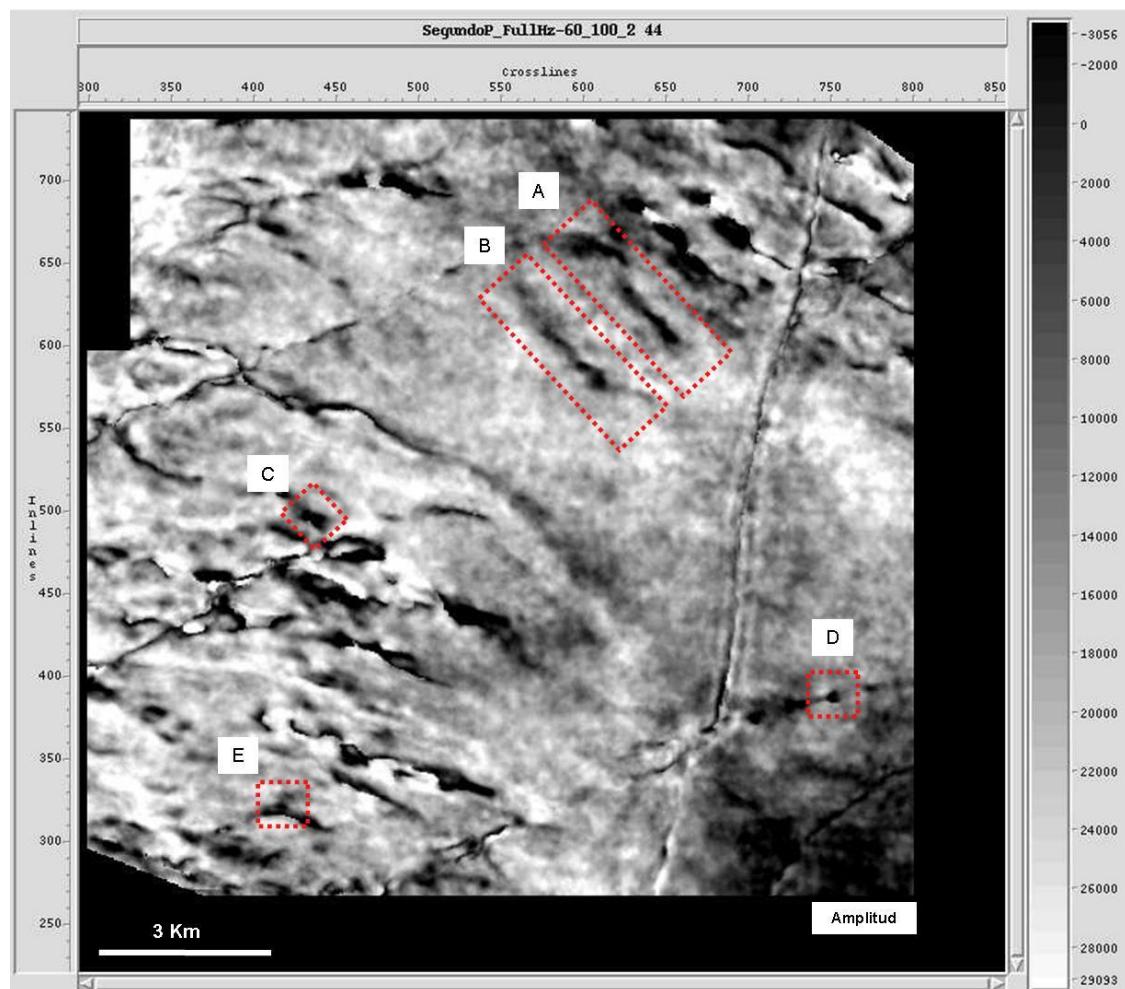


Figura IV 28. Imagen sísmica horizontal de amplitud a 44 ms por debajo del Horizonte Maraca – Lisure mostrando la posición de una serie de anomalías identificadas en el volumen sísmico.

La Figura IV 29, muestra la expresión en atributos sísmicos de los rasgos “A” y “B” los cuales vistos en planta utilizando el cubo de coherencia, se presentan como dos acanaladuras orientadas en dirección NO – SE y que varían entre 1 y 1,5 Kms de longitud. Las secciones verticales de atributos sísmicos muestran la presencia de dos estructuras representadas por la curvatura en sentido cóncavo de las reflexiones sísmicas entre las formaciones Apon y La Luna, retornando dichas reflexiones paulatinamente a su horizontalidad fuera de este intervalo. El atributo “Amplitud Weighted Instantaneous Frequency” permite diferenciar claramente la expresión de estas estructuras de la expresión sísmica del Grupo Cogollo – Formación la Luna, mostrando que estas se desarrollan dentro de este intervalo sin un desplazamiento apreciable de los bloques a ambos lados de las estructuras.

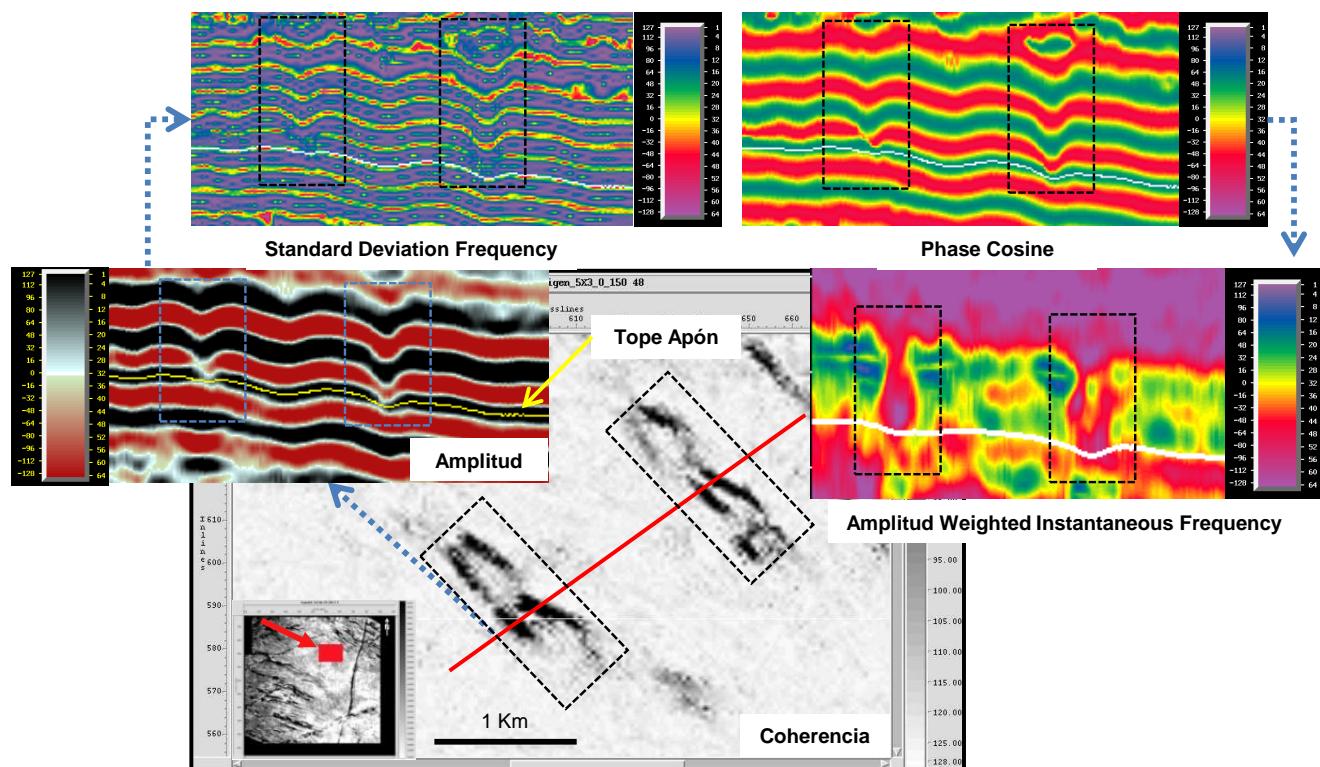


Figura IV 29. Vista en planta y perfil de los rasgos “A” y “B” a lo largo del Horizonte Maraca – Lisure.

La Figura IV 30, IV 31 y IV 32 muestra la vista en planta y perfil de los rasgos “C”, “D” y “E”, los cuales se presentan como estructuras circulares de entre 250 mts y 450 mts de diámetro, que se extienden verticalmente desde la Formación Apón hasta la Formación La Luna. Al estudiar en detalle estas anomalías se identificaron las siguientes características:

- i. Consisten en depresiones estructurales representadas por la curvatura en sentido cóncavo de las reflexiones sísmicas entre las formaciones Apón y La Luna,
- ii. La respuesta de los atributos de frecuencia muestra continuidad en gran parte de las unidades estratigráficas a través de estas estructuras, con excepción del reflector correspondiente al tope de la Formación Apon el cual se encuentra truncado por estas estructuras. Todo esto parece indicar que el evento mayor de deformación que originó estas estructuras ocurrió una vez depositado el Grupo Cogollo y la Formación La Luna.
- iii. La respuesta del cubo de coherencia visto en planta muestra estructuras circulares (rasgos “C”, “D” y “E”) o沿adas como los rasgos (“A” y “B”).
- iv. Las reflexiones por debajo y por sobre estas estructuras permanecen horizontales, restringiendo la zona de deformación al intervalo carbonático Grupo Cogollo – Formación La Luna. Esta deformación es gradual ubicándose la mayor deformación en los reflectores mas cercanos a la Formación Apon y disminuyendo paulatinamente en sentido ascendente, tal y como lo muestra el atributo “Standard Deviation Frequency” en la figura IV 30.
- v. La geometría mostrada por estas estructuras resultan bastante similares a las estructuras generadas por el colapso de cavernas en sistemas karsticos (Hardage, 1996; Loucks, 1999; Brinkerhoff 2007).

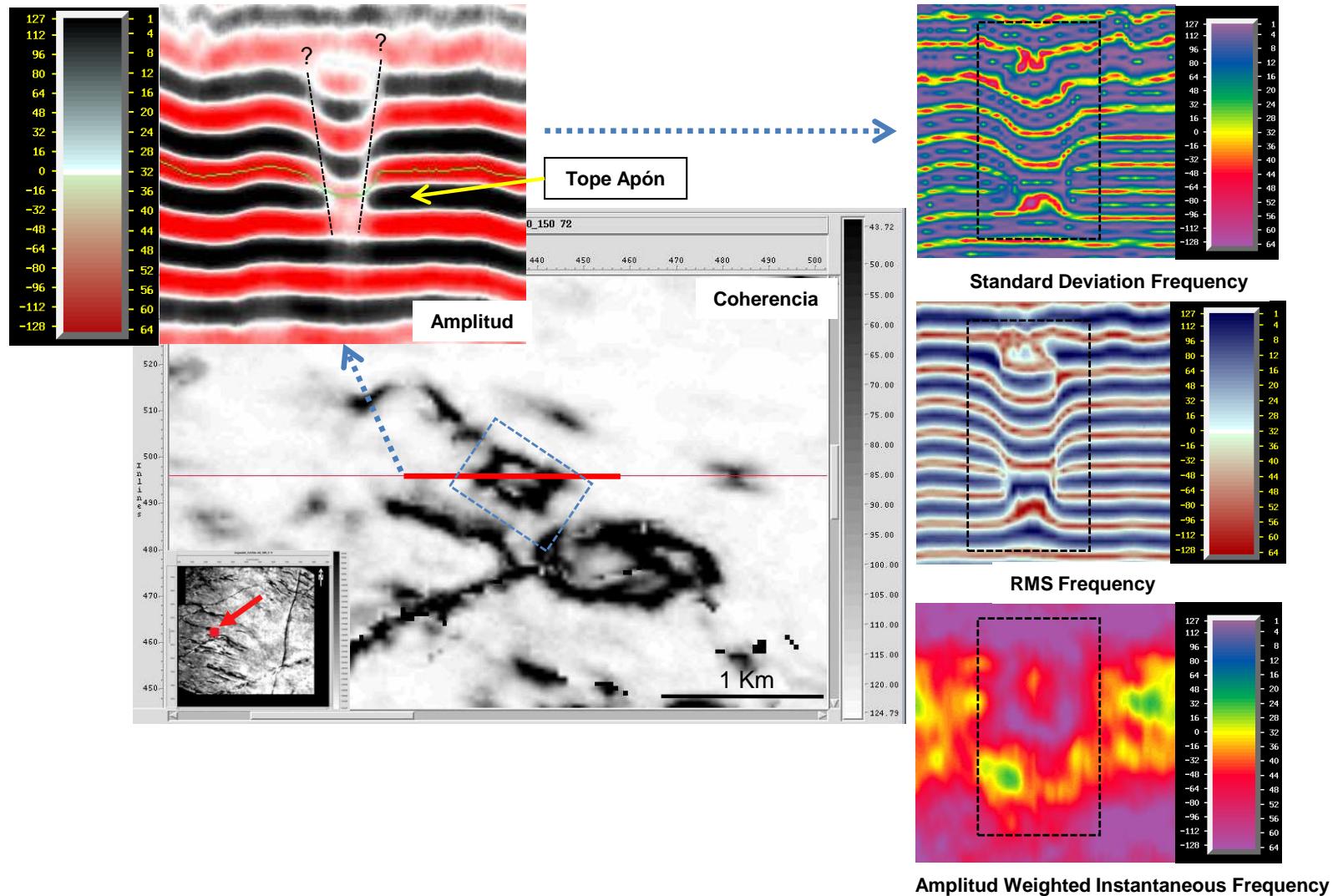


Figura IV 30. Vista en planta y perfil de una posible estructura de colapso kárstica (anomalía “C”) originada en la Formación Apón y extendida hasta la Formación La Luna.

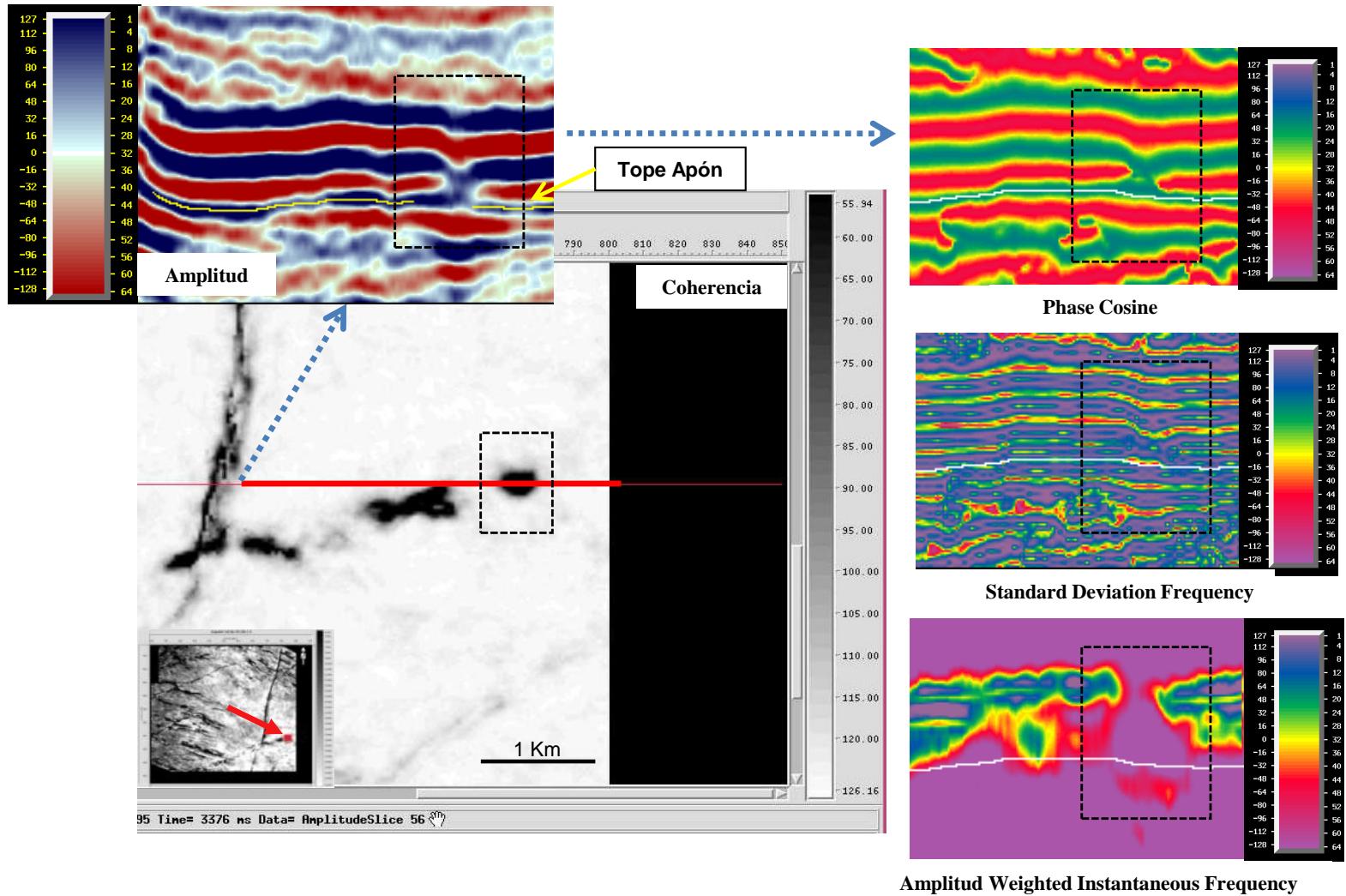


Figura IV 31. Vista en planta y perfil de una posible estructura de colapso kárstica (anomalia “D”) originada en la Formación Apón y extendida hasta la Formación La Luna.

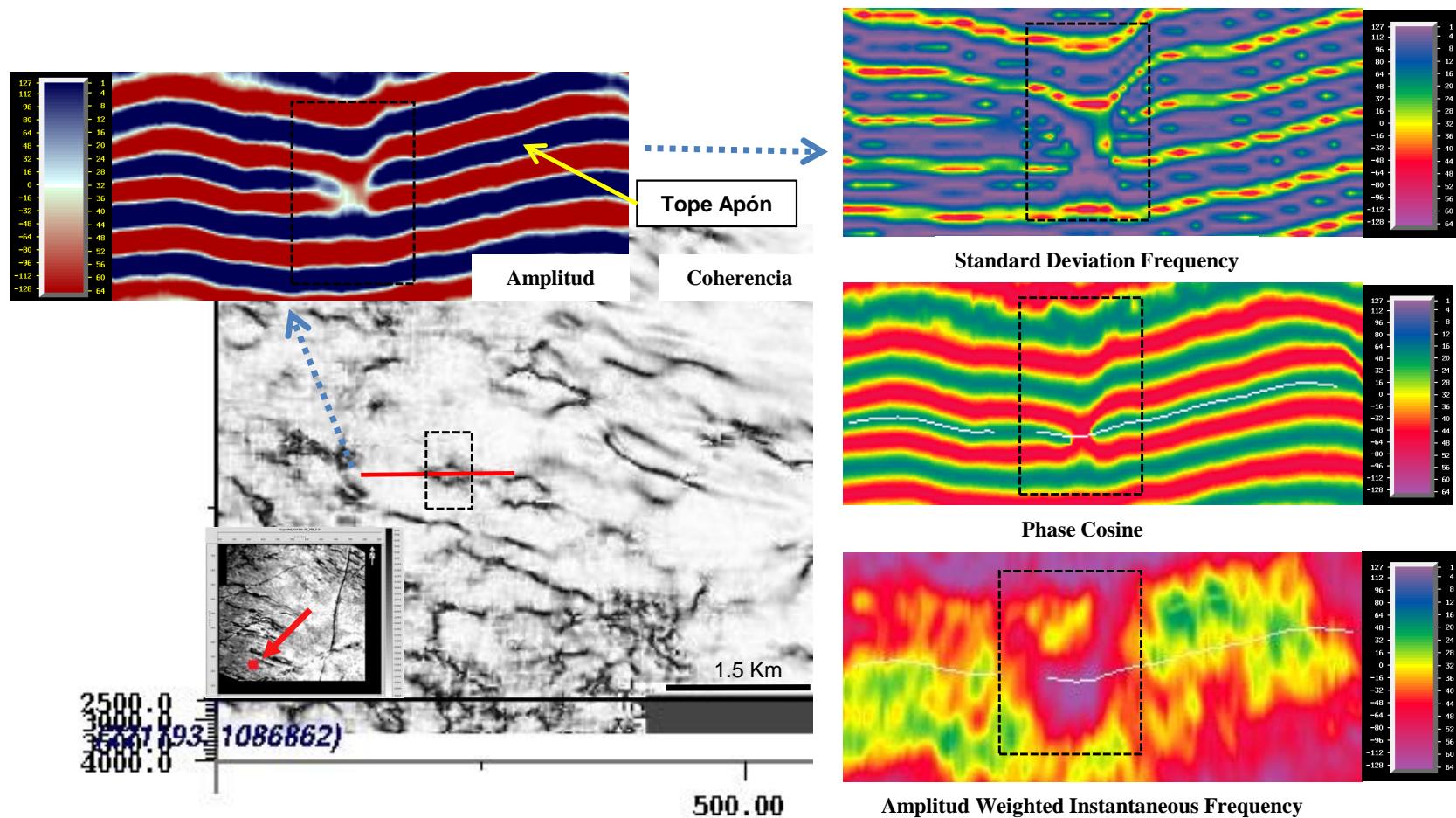


Figura IV 32. Vista en planta y perfil de una posible estructura de colapso kárstica (anomalía “E”) originada en la Formación Apón y extendida hasta la Formación La Luna.

Castillo, 2006, plantea la existencia de un sistema kárstico desarrollado en la Formación Apón, caracterizado por depresiones subcirculares de hasta 600 mts de diámetro y 100 mts de profundidad e identificado a partir de la interpretación de 1600 Km² de sísmica 3D en la parte centro – sur del Lago de Maracaibo, al sur del área de estudio de este trabajo.

En dicha publicación se relacionan estas depresiones subcirculares con la existencia de dolinas (Sinkholes) desarrolladas en la Formación Apón durante un periodo de exposición subaerea a finales del Aptiense. Posteriormente, Méndez (2008), describe la presencia de cavidades producto de un proceso de disolución kárstica en el núcleo del pozo VLA 711 hacia el tope del Miembro Piché de la Formación Apón, ubicado al norte del área de estudio de este trabajo. Todas estas evidencias sumadas a las que aquí se presentan, permiten sustentar la existencia de dicho sistema kárstico y particularmente la presencia de posibles estructuras de colapso kársticas en el Grupo Cogollo cuyo efecto de deformación se extiende hasta la Formación La Luna.

La presencia de un sistema kárstico desarrollado en la Formación Apón explicaría la ausencia de la reflexión correspondiente al tope de esta formación en los rasgos “C”, “D” y “E” (figuras IV 30, IV 31 y IV 32.)y el colapso de las cavernas que constituían dicho sistema kárstico explicaría los distintos grados de deformación en las unidades suprayacentes mostrados principalmente por el atributo “Standard Deviation Frequency”.

Mapas de Facies Sísmicas.

Los mapas de facies sísmicas muestran la similitud de cada traza sísmica con sus trazas vecinas obteniéndose de esta manera mapas de similitud en la respuesta sísmica por cada intervalo de interés. Para este trabajo se generaron dos mapas de facies sísmicas correspondientes al intervalo entre los horizontes Maraca –Lisure – Tope Apón y Tope Apón – Base Apón. La figura IV 33 muestra el mapa de facies sísmicas correspondientes al intervalo entre los horizontes Maraca – Lisure y Tope Apon mostrando una clasificación de nueve trazas tipo, correspondiendo cada una a una facies sísmica. Cada facies sísmica en el mapa tiene un color asignado, lo que permite que visualmente discriminemos que zonas del mapa muestran trazas con características similares y por ende originadas a partir de zonas del subsuelo con propiedades similares.

Al estudiar la distribución de facies sísmicas en el mapa de la figura IV 33 puede observarse que existe dos regiones claramente diferenciables en el intervalo que comprende a las formaciones Maraca y Lisure, la primera se ubica en la mitad oeste del cubo con predominancia de las facies 1 – 3 y la segunda región abarca la parte centro oriental del cubo con predominancia de la facies 4 – 9. Es importante resaltar que las facies 1 – 3 parecen estar relacionadas con la presencia de zonas de falla o fracturas? Ya que es evidente su presencia en la cercanía de las fallas principales. Las facies 4 – 9 muestran variaciones en la señal sísmica posiblemente relacionadas con cambios en las propiedades de roca, litología o deformaciones locales. Es importante señalar que la ubicación de las posibles estructuras de colapso discutidas anteriormente se encuentran incluidas en la facies 9 de este mapa.

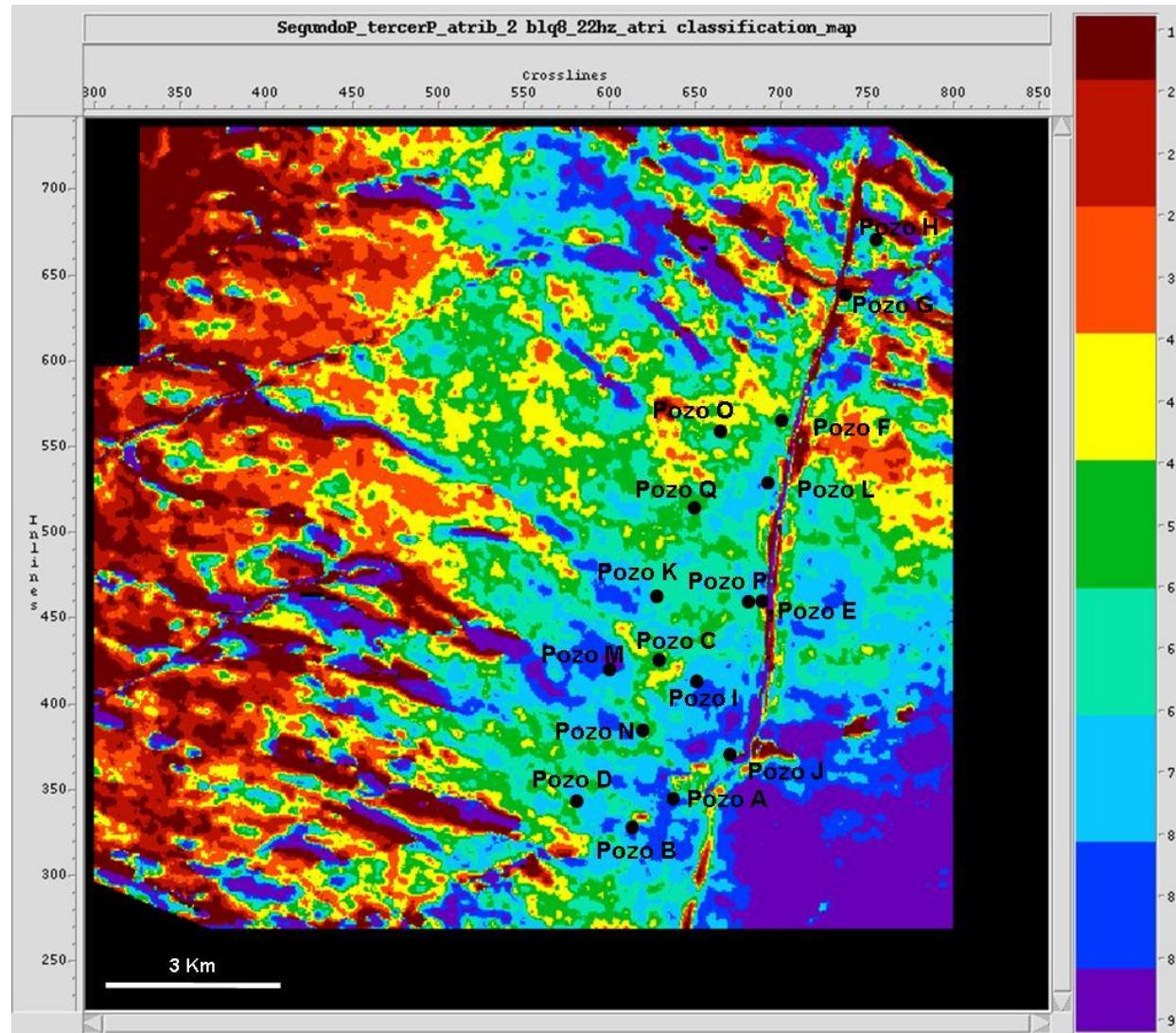


Figura IV 33. Mapa de facies sísmicas correspondientes al intervalo entre los horizontes Maraca – Lisure y Tópe Apón.

El mapa de la figura IV 34 muestra la clasificación de facies sísmicas para el intervalo correspondiente a la Formación Apón. En este mapa puede apreciarse que los rasgos estructurales se encuentran representados principalmente por las facies 1 – 4, las cuales además de resaltar las fallas muestran con buen grado de detalle la posición y variaciones internas de las posibles estructuras de colapso karsticas (recuadros negros en la figura IV 34). Por otra parte tomando en cuenta la relación que parece existir entre las facies 1 – 4 y la presencia de estructuras de colapso karsticas, podríamos inferir que en los casos donde estas no representan la presencia de fallas, podrían estar mostrando la distribución espacial de los karts dentro de la Formación Apón.

Las facies 5 – 9 parecen no estar vinculadas a la presencia de estructuras por lo que utilizando ambos mapas de facies sísmicas se realizó la comparación entre la facies presente en los mapas y la presencia de pozos productores o pozos secos. Los pozos “C”, “F”, “H” y “O” son pozos secos mientras que los pozos “B”, “L”, “P”, “J”, “I” y “D” corresponden a los mejores productores del área. Los resultados muestran que no existe consistencia entre la respuesta de facies y la presencia o no de producción de hidrocarburos en el pozo.

Existen varias razones para explicar esta falta de correlación entre facies sísmicas y producción. La primera es que la totalidad de los pozos productores del cretácico en el Bloque VIII son completados y puestos a producir a hoyo abierto hecho que reduce significativamente los costos de perforación pero que no permite conocer a qué intervalo cretácico en particular corresponde la producción de hidrocarburos que llega a superficie, para de esta manera realizar una comparación precisa con la respuesta de facies. En segundo lugar la poca resolución que presenta este levantamiento sísmico a nivel del intervalo cretácico, limita la posibilidad de que la señal sísmica de vea influenciada por una propiedad en particular a lo largo de la columna litológica.

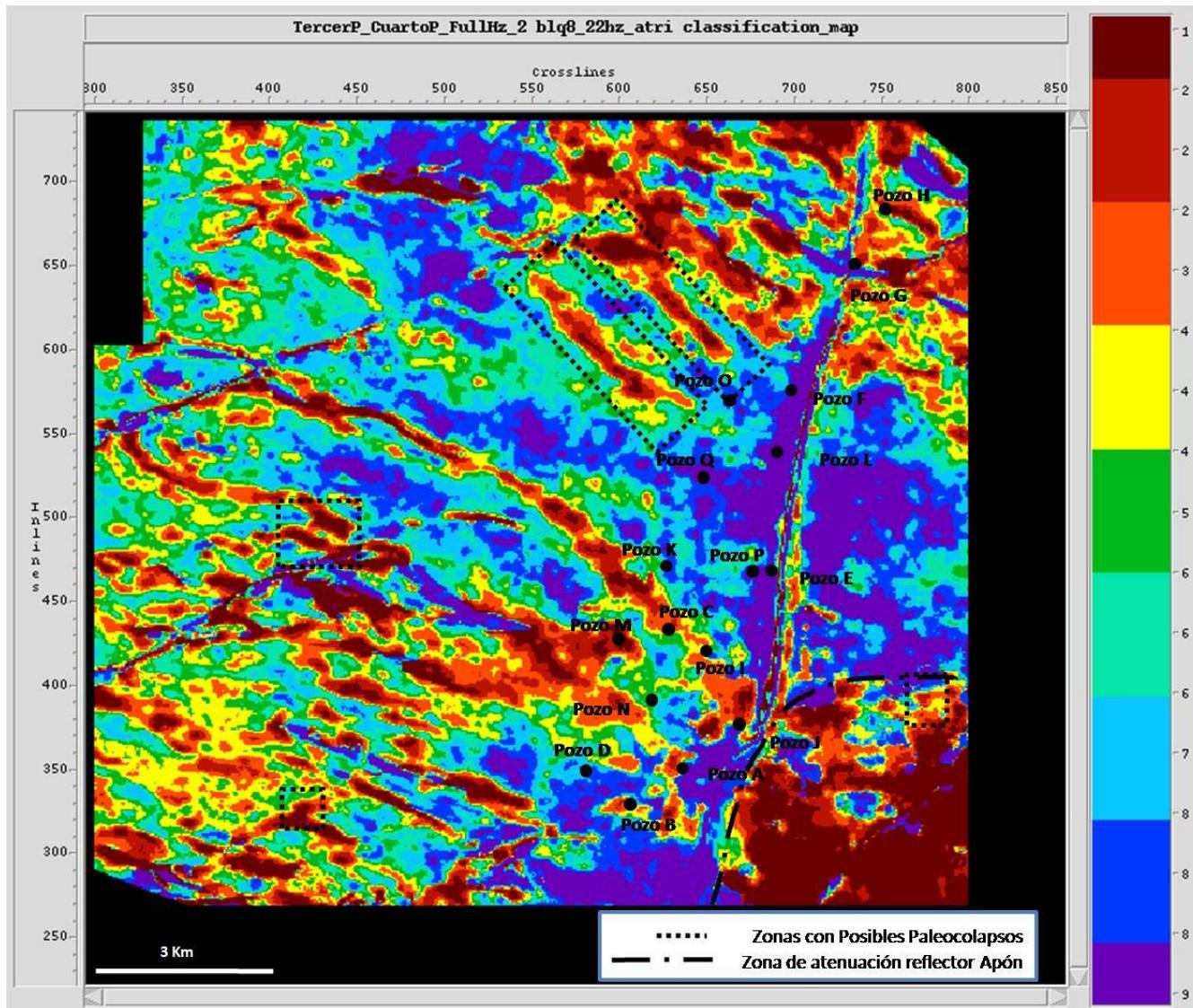


Figura IV 34. Mapa de facies sísmicas correspondientes al intervalo entre los horizontes Tope Apón y Base Apón.

Discusión

En esta sección se abordan los aspectos de mayor interés generados por este trabajo, con la visión obtenida al completar los productos de esta investigación, evaluarlos en su conjunto e integrarlos con información preexistente. Una primera reflexión, a manera de marco introductorio, consiste en la necesidad de mantener un espíritu crítico en la investigación geológica, que nos aleje de los dogmas y nos permita avanzar en el conocimiento de nuestras cuencas sedimentarias.

Otro aspecto sobre el que es importante reflexionar es el de sobreponer el conocimiento práctico de los procesos y relaciones vinculadas a la geología, al del uso de software geológico especializado. Los programas de computación utilizados a diario para interpretar, procesar o visualizar datos geológicos son una herramienta valiosa que permite manejar grandes cantidades de información en poco tiempo, pero su ausencia no puede convertirse en barrera para generar productos y proponer escenarios. En muchos casos el conocimiento de los principios básicos que permiten la generación de un determinado producto geológico a través de un software especializado, sirven de base para realizar la misma actividad utilizando una hoja de cálculo.

Marco tectonoestratigráfico durante el Cretácico inferior.

Existe un amplio consenso en afirmar que la sedimentación de las unidades cretácicas en el occidente de Venezuela ocurrió en un periodo de estabilidad tectónica (Lugo y Mann, 1995; Castillo 2006; Parnaud et al 1995, Azpiritxaga, 1991) sin embargo se acepta que la Formación Río Negro se depositó principalmente a lo largo de los surcos de Uribante Machiques y Barquisimeto, remanentes tectónicos del rifting jurásico. Es importante señalar que existe poca información sobre lo que ocurrió entre el fin del evento de rifting jurásico y el inicio de la sedimentación de la Formación Río Negro, mas allá de la existencia de una discordancia que separa ambos eventos y que se extiende desde el Jurásico superior hasta el Cretácico temprano (Barremiense).

Las evidencias mostradas en este trabajo sugieren que la Formación Río Negro se depositó en el área de estudio como cuñas sedimentarias sintectónicas que se adelgazaban contra altos estructurales presentes durante el Cretácico inferior. Este hecho se sustenta en el espesor irregular de la Formación Apón en el área de estudio y en la presencia de cuñas sedimentarias y altos estructurales mostrados en sísmica y pozos. Todos estos hechos parecen indicar que la acción de las fallas normales jurásicas continuó hasta el Cretácico inferior o al menos se reactivaron durante ese periodo, controlando de esta manera la deposición de la Formación Río Negro en el área de estudio y parcialmente la de la Formación Apón.

La recopilación de este tipo de evidencias de carácter local, permite incrementar la información que se tiene sobre las condiciones tectonoestratigráficas presentes al momento de la deposición del Grupo Cogollo y a la vez aporta datos para comprender el por qué permanecían presentes los surcos de Uribante, Machiques y Barquisimeto durante el Cretácico inferior, al menos 15 millones de años después del fin de la extensión jurásica, para el momento de la deposición de la Formación Río Negro.

Presencia de Estructuras de Colapso Kársticas.

La publicación de Castillo, (2006), sugiere la existencia de paleokarts y Dolinas en la Formación Apón producto de la exposición subaérea de la plataforma carbonática a finales del Aptiense, hecho que es reafirmado por Méndez (2008), quien describe la presencia de karst en el núcleo del pozo VLA 711 en la parte superior del Miembro Piché, Formación Apon. En este trabajo se presentan evidencias que sustentan aun más la posibilidad de la existencia de un sistema kárstico en el Grupo Cogollo a través de la identificación de estructuras, en el volumen sísmico 3D, que parecen corresponder con la respuesta sísmica de estructuras de colapso kársticas. Otros autores (Brinkerhoff, 2007; Hunt, 2003; Hardage, 1996) han también identificado este tipo de estructuras en sísmica 3D y las han vinculado a la presencia de paleokarst, paleocolapsos y en general con estructuras de colapso kársticas producto de la disolución de rocas carbonáticas y el posterior colapso de las cavernas generadas mediante este proceso.

Relación entre atributos sísmicos y propiedades petrofísicas.

Una de las actividades que abordamos con interés durante este trabajo de caracterización geológica a través de multatributos sísmicos fue la posibilidad de que la respuesta sísmica estuviese influenciada de manera corroborable por una o varias propiedades de roca. Si bien es cierto que la respuesta sísmica es el producto de los contrastes de impedancia presentes entre las distintas unidades de roca en el subsuelo y a su vez la impedancia es el producto de la velocidad por la densidad del medio donde se propaga la señal; no siempre es posible aislar la influencia de una determina propiedad de roca de la influencia que el conjunto de ellas tiene sobre la señal sísmica.

La principal barrera para la identificación de relaciones entre atributos sísmicos y propiedades de roca sigue siendo la perdida de frecuencia del espectro sísmico con la profundidad, lo que disminuye su capacidad de resolución sobre las interfasas geológicas y por ende la posibilidad de que las características propias de estas interfasas influencien la señal sísmica. La información disponible en el levantamiento sísmico BLQ VIII 3D resultó particularmente útil para la interpretación estructural y estratigráfica realizada en este trabajo, no así para la correlación con propiedades petrofísicas.

Una posibilidad interesante para la solución de este problema seria el diseño de levantamientos sísmicos con objetivo profundo en el Lago de Maracaibo, lo cual permitiría obtener un mayor contenido de frecuencias en el intervalo cretácico, hecho que aumentaría considerablemente la posibilidad de identificar relaciones sólidas entre atributos sísmicos y propiedades de roca.

Conclusiones

Generales

- i. Las evidencias aportadas por este trabajo sugieren que la sedimentación de la Formación Río Negro y parcialmente la de la Formación Apón, en la parte central del Lago de Maracaibo, fue controlada por la distribución y movimiento de fallas de los grabenes formados durante el Jurásico y cuya actividad se extendió o fue reactivada durante el Cretácico inferior.
- ii. La identificación a través de imágenes sísmicas y atributos de una serie de estructuras presentes en el intervalo Grupo Cogollo – Formación La Luna aportan evidencias sobre la posible existencia de estructuras de colapso karsticas en el Grupo Cogollo.
- iii. Los mapas de facies sísmicas elaborados para el Grupo Cogollo permiten discriminar la presencia de fallas, posibles estructuras de colapso karsticas, y en general la posible distribución de los karst dentro de la Formación Apón.

Específicas

- i. El Léxico Estratigráfico de Venezuela en su descripción sobre la extensión de la Formación Río negro, afirma que: "...En la región intermedia, de la plataforma del lago de Maracaibo se presentan conglomerados de menor espesor, infrayacentes a la Formación Apón, cuya designación ha sido muy diversa. Algunos autores, los incluyen en la Formación Río Negro y otros en la Formación Apón, con términos tales como "Clásticos Basales" o "Areniscas Basales"..." lo cual podría corresponder solamente a los espesores de esta formación depositados al momento de rebasar los altos estructurales precretálicos, quedando aun por estudiar la naturaleza de los depósitos contenidos en las cuñas sedimentarias identificadas en este trabajo.

- ii. La presencia de mayores espesores de la Formación Apón en la periferia de los altos estructurales precretácicos podría significar la existencia en estas zonas de facies tipo Miembro Machiques (depositadas en ambientes anóxicos a mayores profundidades de agua), y por ende la existencia de potenciales rocas madres.
- iii. La posible existencia de una exposición de la plataforma carbonática del Grupo Cogollo durante el Aptiense plantea nuevas interrogantes sobre la estabilidad tectónica en el área del Lago de Maracaibo durante el Cretácico inferior y revela la presencia de un evento hasta ahora escasamente estudiado.
- iv. Se propone la existencia de dos posibles plays para hidrocarburos en la parte central del lago de Maracaibo, el primero consiste en cuñas sedimentarias sintectónicas de la Formación Río Negro, las cuales podrían tener espesores importantes de areniscas de grano grueso y/o conglomerados intercalados con lutitas fluviales. El segundo play a explorar consiste en posibles estructuras de colapso kársticas, desarrolladas en el Grupo Cogollo y extendidas hasta la Formación La Luna, las cuales podrían albergar altas porosidades producto de la disolución de carbonatos y la presencia de brechas. Adicionalmente el efecto de deformación que estas estructuras producen sobre las capas suprayacentes, pueden llegar en algunos casos a generar trampas para hidrocarburos a lo largo de sus flancos. Estos posibles reservorios pasarían a formar parte del conocido sistema petrolífero presente en la cuenca del Lago de Maracaibo con la Formación La Luna como roca generadora y la Formación Colon como sello regional.
- v. Los atributos sísmicos mostraron ser de gran utilidad en la discriminación de la presencia del Grupo Cogollo; en la identificación de geometrías e interfases estratigráficas y en la caracterización geométricas de las posibles estructuras de colapso kársticas presentes en ese intervalo.
- vi. En este trabajo se mostró con éxito la utilidad del uso de multiatributos sísmicos en la fase exploratoria y con propósitos estratigráficos, hecho que se aleja significativamente de la visión tradicional de su uso en la caracterización de yacimientos.

Recomendaciones

- i. Extender la identificación de las posibles estructuras de colapso kársticas identificadas en este trabajo a otros levantamientos sísmicos en el Lago de Maracaibo.
- ii. Estudiar en detalle la distribución de las cuñas sinsedimentarias de la Formación Rio Negro en la parte central del Lago de Maracaibo y evaluar su potencial como reservorio.
- iii. Diseñar levantamientos sísmicos 3D con objetivo cretácico en el Lago de Maracaibo con el fin de mejorar la resolución a este nivel e incrementar la calidad y detalle de la información obtenida.
- iv. Evaluar la utilidad de los atributos sísmicos utilizados en este trabajo para caracterizar al Grupo Cogollo en otros levantamientos sísmicos.

Bibliografía

Azpiritxaga, I., (1991). *Carbonate depositional styles controlled by siliciclastic influx and relative sea level changes, Lower Cretaceous, central Lake Maracaibo, Venezuela.* M.A. thesis, University of Texas at Austin, Austin, Texas, 151 p.

Alberdi, M.; Tocco, R.; Parnaud, F., (1994). *Caracterización geoquímica de la columna estratigráfica en las cuencas occidentales de Venezuela. Mem. V Simposio Bolivariano,: 411-412.*

Bartok, P. E., Reijers, T. J. A., y Juhasz, I., (1981). *Lower Cretaceous Cogollo Group, Maracaibo Basin, Venezuela: Sedimentology, diagenesis and petrophysics.* AAPG. Bulletin, 65, 1110-1134.

Brinkerhoff. A., (2007) Mapping middle Paleozoic Erosional and Karstic Patterns with 3-d Seismic Attributes and Well Data in the Arkoma Basin. Tesis de Maestría. Departamento de Ciencias Geológicas. Brigham Young University. Oklahoma. Estados Unidos. 63 p.

Castillo, M. V., y P. Mann, (2006). *Deeply Buried, Early Cretaceous Paleokarst Terrane, Southern Maracaibo Basin, Venezuela.* AAPG Bulletin, v. 90, p. 567–579.

Castillo, J., Bastardo, M., (2007). *Modelado Estructural y Petrofísico del Bloque VIII en la Unidad de Explotación Centro Sur Lago, a Nivel del Cretácico del Lago de Maracaibo.* Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Universidad de Oriente, Venezuela.

Léxico Estratigráfico de Venezuela (2007). III Edicion. Comité Interfilial de Estratigrafía y Nomenclatura (L.E.V). <http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm>.

Escalona, A., y P. Mann, (2006). *An overview of the petroleum system of Maracaibo Basin.* AAPG Bulletin, v. 90, p. 653– 674.

Galarraga, M., y Hansen B., (2005). Detailed 3D Seismic Interpretation Using HFI Seismic Data, Fault Throw, and Stress Analysis for Fault Reactivation in the Cogollo Group, Lower Cretaceous, Urdaneta West Field, Maracaibo Basin. Society of Petroleum Engineers Bulletin. SPE 95060 pp. 16 pp

Hardage, B, A., (1996) 3-D Seismic Evidence of the Effects of Carbonate Karst Collapse on Overlying Clastic Stratigraphy and Reservoir Compartmentalization. Geophysics, vol. 61, no. 5. p. 1336-1350

Haq, B., Hardenbol, J., y Vail. P., (1987). Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic. Science, 6 Mar. 1987: v235: 1156-67. Cambridge MA: Moses King.

Hunt, D., Elvebak, G., Rafaelsen, B., (2003). *Paleokarst Recognition & 3D Distribution – New Insights From The Upper Palaeozoic, Loppa High, Barents Sea*. EAGE 65th Conference & Exhibition — Stavanger, Norway, 2 - 5 June 2003, Resumen, 4 p.

Land, L., Paull, C., (1995) Genesis of a submarine sinkhole without subaerial exposure: Straits of Florida. Geology; October 1995; v. 23; no. 10; p. 949–951.

Loucks, R.G., 1999. Paleocave Carbonatic Reservoir: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity and reservoir implications. American Association Petroleum Geologist Bulletin, 83 (11), 1795-1834 pp.

Lugo, J., y Mann P., (1995). Jurassic–Eocene Tectonic Evolution of Maracaibo Basin, Venezuela, in A. Tankard, S. Suarez, and H. Welsink, eds., Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 699– 725.

Mann, P., A. Escalona, y M. V. Castillo, (2006). *Regional Geology And Tectonic Setting Of The Maracaibo Supergiant Basin, Western Venezuela*: AAPG Bulletin, v. 90, p. 445– 477

Méndez. J., (2007). Carbonatos Sedimentarios. 260pp

Méndez. J., (2008). Sedimentación Del Grupo Cogollo. Facies, Reservorios, Porosidad y Niveles De Roca Madre. Sistema Petrolero. Informe interno PDVSA – Exploración. 219 pp.

Nissen S. E., (2002). Seismic Attributes for the Explorationist (Pagina WEB). Disponible: <http://www.kgs.ku.edu/PRS/publication/2002/ofr49/index.html> (Consulta: 2009, Enero 20)

Parnaud, F., Gou, Y., Pascual, J. C., Capello, M. A., Truskowski, I., Passalacqua, H., (1995). Stratigraphic Synthesis Of Western Venezuela. Petroleum Basins of South America (AAPG MEM N° 62), p. 681-698.

Poppelreiter, M., Balzarini M. A., De Sousa P., Engel S., Galarraga M., Hansen B., Marquez, X., Morell J., Nelson R., y Rodriguez F. (2005) Structural control on sweet-spot distribution in a carbonate reservoir: Concepts and 3-D models (Cogollo Group, Lower Cretaceous, Venezuela) AAPG Bulletin, v. 89, no. 12 Diciembre 2005, pp. 1651–1676.

Posamentier, H., Laurin, P., (2005) *Seismic Geomorphology Of Oligocene To Miocene Carbonate Buildups Offshore Madura, Indonesia*. SEG/Houston 2005 Annual Meeting. Resumen, 4 p

Posamentier, H., Davies R. J., Cartwright J. A., Wood, L., (2007) *Seismic Geomorphology - An Overview*. Seismic Geomorphology, Application to Hydrocarbon Exploration and Production. Geological Society of London. Special Publication 277. p. 1 – 14.

Robledo. P., (2005) Los Paleocolapsos kársticos en las plataformas carbonatadas del Mioceno superior de Mallorca: análisis geográfico, genético, geológico y evolutivo. Tesis Doctoral. Universitat De Les Illes Balears. Departamento de Ciencias de La Tierra. España. Rod, E., y Maync, W., (1954). *Revision of Lower Cretaceous Stratigraphy of Venezuela*. AAPG Bulletin, v. 38, p. 193–283.

Regueiro, J., (1997). *Estudio De Factibilidad Sobre El Uso De Atributos Sísmicos, A Nivel Del Grupo Cogollo, En El Bloque VIII Lago De Maracaibo*. Informe interno Maraven. 25 p.

Renz O., (1959). The *Lithologies Units of the Cretaceous of Western Venezuela*. 5^{to} Congreso Geológico Venezolano, v. 1 p. 45 – 58.

Stauffer, K. W., (1994). *Depositional model of the Cogollo Group, Maracaibo Basin, Venezuela*. Memoria V Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, p.190 – 206.

Taner, M.T., Koehler, F., Sheriff, R.E. (1979). Complex Seismic Trace Analysis: Geophysics, 44, 1041-1063.

Zeng. H., (2006). Stratal Slicing Makes Seismic Imaging of Depositional Systems Easier. Search and Discovery Article #40196. pp 6.