

TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

ANÁLISIS T-F EN DATOS SÍSMICOS COMO DETECTOR DE ARENAS Y ACUMULACIONES DE GAS EN LA FORMACIÓN ROBLECITO, CAMPO COPA MACOYA, ESTADO GUÁRICO

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por el Ing. Geofísico Colombo C. Da Encarnação Q.

Para optar al título de
Magister Scientiarum en Geofísica. Orientación: Prospección

Caracas, 2017

©Colombo Clemente Da Encarnacao Quintal, 2017

Hecho el Depósito de Ley.

Depósito Legal DC2017000768

TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

ANÁLISIS T-F EN DATOS SÍSMICOS COMO DETECTOR DE ARENAS Y ACUMULACIONES DE GAS EN LA FORMACIÓN ROBLECITO, CAMPO COPA MACOYA, ESTADO GUÁRICO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Yaraixa E. Pérez M.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Ing. Geofísico Colombo C. Da Encarnação Q.
Para optar al título de
Magister Scientiarum en Geofísica. Orientación: Prospección

Caracas, 2017



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



VEREDICTO

Comisión de
Estudios de
Postgrado


Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo de Grado presentado por el ING. COLOMBO DA ENCARNACAO, portador de la Cédula de Identidad No. [REDACTED], bajo el título "ANÁLISIS T-F EN DATOS SÍSMICOS COMO DETECTOR DE ARENAS Y ACUMULACIONES DE GAS EN LA FORMACIÓN ROBLECITO, CAMPO COPA MACOYA, ESTADO GUÁRICO", a fin de cumplir con el requisito legal para optar al grado académico de Magister Scientiarum en Geofísica dejan constancia de lo siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del jurado, se fijó el día viernes 24 de Marzo, a las 11:30 a.m., para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que este hizo en la sala de conferencias Dr. Guillermo Zuloaga de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado, todo ello conforme con lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa del trabajo, el jurado decidió aprobarlo, por considerar, sin hacerse solidario con las ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

3.- El jurado por unanimidad decidió otorgar la calificación de EXCELENTE al presente trabajo por tratarse de un estudio minucioso del efecto de distintos tipos de modelos de subsuelo en atributos que pueden obtenerse de una señal sísmica. Se aplicó al estudio de desarrollo de arenas delgadas del Campo Copa Macoya.

Para este veredicto, el Jurado, los profesores M.Sc. Yaraixa Pérez, M.Sc. Jesús González y la Dra. Milagrosa Aldana estimaron que la obra examinada representa en su conjunto un aporte importante. Esta investigación presenta un enfoque novedoso dentro del área de Geofísica.




En fe de lo cual se levanta la presente ACTA, a los 24 días del mes de Marzo del año 2017, conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado, actuó como Coordinador del Jurado la M.Sc. Yaraixa Pérez.



Dra. Milagrosa Aldana
C.I. [REDACTED]
(Universidad Simón Bolívar)



M.Sc. Jesús González
C.I. [REDACTED]
(Facultad de Ingeniería - UCV)



M.Sc. Yaraixa Pérez
C.I. [REDACTED]
ENI / FI-UCV
(Tutor)



DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mi familia y especialmente a mis hijos que con sus nacimientos marcaron el inicio y el fin de este ciclo académico enseñándome lo que es la paternidad.

AGRACEDIMIENTOS

Agradezco a la ilustre Universidad Central de Venezuela, la cual ha sido mi espacio de formación profesional, tanto en mis estudios de pregrado como en la maestría. Por ser un espacio de encuentro y de diversidad. Y también por ser ejemplo de moral, ética, coraje e integridad en este difícil momento de la historia de Venezuela.

A la profesora Yaraixa Pérez quien fue tutora durante la elaboración de este proyecto.

Al jurado por tomar parte de su valioso tiempo en la revisión de este trabajo.

Al grupo INPEX y sus empresas en Venezuela por ser la institución que abaló y suministró los datos necesarios para elaboración de este trabajo.

A los profesores Jhonny Casas, Jesús Pereira, Fernando Chacartegui, Juan José Infante, Miguel Bosch, Christian Chomat, Jean-Marlet Flament, Nuris Orihuela, Mauricio Bermúdez, Véronique Junqua, Michael Schmitzs y Antonio Ughi por haberme impartido sus conocimientos en las áreas específicas de mi formación.

A los coordinadores de los posgrados de Geofísica, Antonio Ughi y Juan José Infante, y a la coordinadora del posgrado de Ciencias Geológicas, así como los miembros de la comisión de postgrado por su apoyo en los trámites administrativos.

A los encargados de diseñar y distribuir las herramientas gratuitas Generic Mapping Tools (GMT), GNU Octave y OpendTect que fueron fundamentales en el desarrollo del proyecto.

A mi familia y mis amigos gracias por todo.

Finalmente quiero agradecer muy especialmente a mi esposa quien me apoyo extraordinaria e incondicionalmente durante estos años. Te amo.

Da Encarnacao Q., Colombo C.

ANÁLISIS T-F EN DATOS SÍSMICOS COMO DETECTOR DE ARENAS Y ACUMULACIONES DE GAS EN LA FORMACIÓN ROBLECITO, CAMPO COPA MACOYA, ESTADO GUÁRICO

Tutor Académico: Prof. Yaraixa Pérez Meza.

Trabajo de grado de maestría. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2017, 178 p.

Palabras Clave: Fm. Roblecito, Capas delgadas, Atributos sísmicos, Análisis de Fourier, Descomposición espectral.

Resumen. En el área de estudio, la Formación Roblecito está compuesta principalmente de lutita con intervalos de arenas delgadas que están por debajo de la resolución sísmica vertical y no son visibles en los datos sísmicos. Para resolver ese problema, se realizó modelos sísmicos sintéticos 1D y 2D usando la densidad y las velocidades de propagación de onda P y S extraídas de pozos. En estos modelos se calculó un conjunto de atributos sísmicos (energía, atributos instantáneos y atributos del análisis espectral *STFT*, *CWT* y *ST*) para extraer relaciones empíricas que posteriormente fueron usadas para la interpretación de los datos reales.

Según los modelos, las capas delgadas fueron detectables en secciones sísmicas usando los atributos de energía con ventanas de 8 ms y la *CWT* con escala siete. Aunque los atributos instantáneos no distinguieron las capas delgadas, la amplitud instantánea exhibió aumentos en magnitud en zonas donde hubo presencia de ellas; La fase instantánea funcionó como indicador de canales y otros elementos estratigráficos; y la frecuencia y aceleración de la fase instantánea permitieron delinear algunos cuerpos con espesores próximos al límite de resolución. Los atributos del análisis espectral, es decir, la frecuencia dominante, amplitud máxima y las imágenes RGB fueron útiles delineando canales y cuerpos de arena, así como la ubicación de zonas de apilamientos de capas delgadas.

Durante la interpretación de datos reales, las arenas fueron agrupadas en cinco horizontes sísmicos. La interpretación estructural fue elaborada en secciones usando la energía, la *CWT* y la amplitud instantánea. La interpretación estratigráfica fue realizada visualizando los atributos de energía, frecuencia dominante, amplitud máxima e imágenes RGB sobre los horizontes interpretados. Se agruparon las zonas donde coincidieron canales y barras de arenas y se infirió la presencia de gas donde hubo mayor energía con disposiciones geométricas que permitían el entrapamiento estratigráfico y estructural.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
RESOLUCIÓN SÍSMICA, INTERFERENCIA Y DETECTABILIDAD	5
FÍSICA DE ROCAS Y EL MODELADO DIRECTO	8
<i>Tipos de onda y velocidades de propagación</i>	9
<i>Constantes elásticas</i>	10
Esfuerzo, deformación y módulos elásticos.....	10
Módulo de Young (E).....	11
Módulo de volumen (K).....	11
Módulo de cizalla (μ)	11
Relación de Poisson (ν).....	11
Impedancia P (IP) y S (Is)	12
<i>Escalamiento de las propiedades de roca</i>	12
<i>AVO y modelado directo</i>	14
Aproximación de Richards y Frasier o Aki y Richards.....	15
ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA	16
<i>Transformada de Fourier</i>	17
<i>Transformada de Fourier dependiente del tiempo</i>	19
<i>Transformada ondícula continua (CWT)</i>	21
<i>Transformada S</i>	24
<i>Descomposición espectral</i>	25
<i>Volúmenes resaltantes</i>	27
<i>Transformada de Hilbert</i>	28

Señal analítica	29
Atributos instantáneos	29
Amplitud Instantánea, envolvente o fuerza de la reflexión	29
Fase instantánea	30
Frecuencia instantánea	31
<i>Sombras de baja frecuencia</i>	31
ATRIBUTO DE ENERGÍA Y PSEUDO-RELIEVE	32
CAPÍTULO III.....	33
MARCO GEOLÓGICO	33
EVOLUCIÓN TECTONOESTRATIGRÁFICA.....	33
<i>Megasecuencia preapertura oceánica “Pre-rift”</i>	34
<i>Apertura continental “Rifting”</i>	36
<i>Margen pasivo</i>	37
<i>Colisión oblicua</i>	37
CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA.....	39
SUBCUENCA DE GUÁRICO.....	40
ESTRATIGRAFÍA LOCAL	42
FORMACIÓN ROBLECITO	44
CAPÍTULO IV.....	46
MARCO METODOLÓGICO.....	46
RECOPIACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS.....	46
ETAPA N° 1: ESTUDIO DE MODELOS SINTÉTICOS	48
<i>Modelo sintético: Suma de chirridos o señal compuesta</i>	49
Generación de la señal.....	49
Cálculo de los atributos de la señal compuesta	50
Descomposición espectral	50
Atributos instantáneos.....	53
Energía y cuadratura de la energía	54
<i>Construcción de modelos sintéticos basados en datos de pozo</i>	55
Extracción de datos de pozo	56
Lectura de registros de pozos y carga de topes	57

Cálculo de constantes elásticas.....	58
Escalamiento a sísmica.....	59
Obtención del V_{sh} y generación gráficos cruzados, histogramas y medidas de tendencia central	59
Generación de la ondícula	60
Tipos de modelos sintéticos construidos.....	61
Modelos de cuña.....	61
Trazas sintéticas	63
Traza de pozo	65
Generación del sismograma	66
Ajuste sísmica pozo.....	68
Cálculo de atributos en las trazas sísmicas de los pozos.....	70
ETAPA N° 2: ANÁLISIS DE ATRIBUTOS EN DATOS SÍSMICOS 3D.....	70
Carga de datos	71
Cálculo de atributos sísmicos.....	71
Interpretación estructural de nuevos horizontes	72
Interpretación estratigráfica.....	73
Elaboración de mapas estratigráficos y zonas con potencial de gas	73
CAPÍTULO V.....	74
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
MODELOS SINTÉTICOS	74
<i>Modelo sintético: Suma de chirridos o señal compuesta.....</i>	<i>74</i>
Atributos de la suma de chirridos	74
Descomposición espectral	74
Atributos instantáneos.....	80
Energía y cuadratura de la energía	81
<i>Modelos sintéticos basados en datos de pozos</i>	<i>81</i>
Escalamiento de registros de pozo a frecuencia sísmica	81
Extracción de propiedades para construcción de modelos	84
Modelos de interfase simple	90
Interfase simple 1: Contacto lutita-arena limpia	91
Interfase simple 2: Contacto lutita-arena limpia contenida de gas	93

Modelo de varias interfaces	95
Atributos de energía	97
Atributos instantáneos	98
Atributos de descomposición espectral	100
Modelo de cuñas	107
Energía y cuadratura de la energía	109
Atributos instantáneos	115
Atributos de descomposición espectral	118
<i>Análisis sobre trazas sísmicas</i>	<i>127</i>
Energía y cuadratura de la energía	127
Atributos instantáneos	128
Transformada rápida de Fourier	129
Transformadas de Fourier dependiente del tiempo	130
Transformada ondícula continua (CWT)	134
Transformada S	136
VOLÚMENES DE ATRIBUTOS SÍSMICOS	137
INTERPRETACIÓN SÍSMICA	139
<i>Interpretación de la base de las lutitas de la Fm. Roblecito</i>	<i>140</i>
<i>Interpretación de horizontes de arenas</i>	<i>142</i>
<i>Interpretación de características estratigráficas</i>	<i>149</i>
Arenas Grupo 1	150
Arenas Grupo 2 (MFS)	154
Arenas Grupo 3	156
Arenas Grupo 4	159
Arenas Grupo 5 (Base lutita)	162
<i>Integración de geocuerpos y estructura</i>	<i>165</i>
CAPÍTULO VI.....	168
CONCLUSIONES	168
BIBLIOGRAFÍA	170

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	3
FIGURA 2. MODELO DE CUÑA DE UNA CAPA DELGA	6
FIGURA 3. LA SENSIBILIDAD DE UN REFLECTOR DE VALLE A PICO ESPESOR Y LA AMPLITUD DEL VALLE PARA EL MODELO DE CUÑA SIMPLE MOSTRADO EN LA FIGURA 2..	8
FIGURA 4. ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL MODELADO SÍSMICO DIRECTO E INVERSO	9
FIGURA 5. EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL PROMEDIO EN LA VELOCIDAD P	14
FIGURA 6. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA CON ÁNGULO DE INCIDENCIA DISTINTO DE CERO.....	16
FIGURA 7. ESPECTROGRAMA DE UNA SEÑAL CHIRRIDO LINEAL.....	20
FIGURA 8. ESCALOGRAMA DE UNA SEÑAL SINUSOIDAL COMPUESTA POR DOS FRECUENCIAS EN DISTINTOS INTERVALOS.....	24
FIGURA 9. DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE VENTANA CORTA.	26
FIGURA 10. CUBOS DE ENERGÍA DE FRECUENCIA	26
FIGURA 11. ESQUEMA DE LA RELACIÓN DEL CONTENIDO DE FRECUENCIA CON RESPECTO AL ESPESOR DE LA GEOLOGÍA.....	27
FIGURA 12. ESPECTRO DE AMPLITUD PARA UNA TRAZA M Y MUESTRAS N MOSTRANDO LA FRECUENCIA EN LA CUAL SE ALCANZA LA AMPLITUD ES MÁXIMA	28
FIGURA 13. FUNCIÓN $1/ T $ Y SU TRANSFORMADA DE FOURIER, FUNCIÓN ESCALÓN Y SU TRANSFORMADA DE FOURIER.....	28
FIGURA 14. ATRIBUTOS INSTANTÁNEOS DE UN SEGMENTO DE TRAZA SÍSMICA.....	30
FIGURA 15. EVOLUCIÓN DE LOS MÁRGENES PASIVOS Y ACTIVOS EN VENEZUELA	34
FIGURA 16. MAPAS PALEOGRÁFICOS DEL JURÁSICO TEMPRANO, JURÁSICO MEDIO Y EL JURÁSICO TARDÍO.....	35
FIGURA 17. PERFIL SÍSMICO Y SU INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL DE LA SECUENCIA JURÁSICO- CRETÁCICO.....	36
FIGURA 18. RUTA DE MIGRACIÓN DE ARCO DE ISLAS DE LA PLACA CARIBE.	38
FIGURA 19. CUENCAS PETROLÍFERAS DE VENEZUELA BASADO EN LA DISTRIBUCIÓN DE SUS PROVINCIAS SEDIMENTARIAS.....	40
FIGURA 20. PRINCIPALES ELEMENTOS DE ESTRUCTURALES DE LA CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA.	40

FIGURA 21. CORTE GEOLÓGICO EN EL FRENTE DE MONTAÑAS DE GUÁRICO. EN EL RECTÁNGULO ANARANJADO SE INDICA LA ZONA DE ESTUDIO (MODIFICADO DE CHIGNE, 1989).	41
FIGURA 22. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA Y SU LITOLOGÍA DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO (BASADA EN ARNSTEIN <i>ET AL.</i> (1985), DAAL <i>ET AL.</i> (1989) Y TEIKOKU (2005)).	43
FIGURA 23. DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES A REALIZAR	46
FIGURA 24. DATOS DISPONIBLES EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	48
FIGURA 25. SEÑAL COMPUESTA CONSTRUIDA POR LA SUMA DE DOS SEÑALES TIPO CHIRRIDO, UNA DE FRECUENCIA ASCENDENTE 10-60 HZ Y OTRA DE FRECUENCIA DESCENDENTE 60-10 HZ CON SUS RESPECTIVOS ESPECTROS DE AMPLITUD A LA DERECHA.	50
FIGURA 26. ESPECTROGRAMA DE LA <i>STFT</i> CON VENTANA DE ESTUDIO DE 14 MS DE LA SEÑAL COMPUESTA.	51
FIGURA 27. ATRIBUTOS RESALTANTES EXTRAÍDOS DE LA <i>STFT</i> CON VENTANA DE 14 MS DE LA SEÑAL COMPUESTA.	51
FIGURA 28. IMAGEN MEZCLADA RGB DE LA <i>STFT</i> CON VENTANA DE 14 MS DE LA SEÑAL COMPUESTA.	52
FIGURA 29. VISUALIZACIÓN DEL PICO DE FRECUENCIA O ESCALA CUANDO HAY DOS O MÁS AMPLITUDES MÁXIMAS.	52
FIGURA 30. PALETA DE COLORES RGB.	53
FIGURA 31. ATRIBUTOS INSTANTÁNEOS DE LA SEÑAL COMPUESTA.	54
FIGURA 32. VARIACIÓN DE LA RESPUESTA DE ENERGÍA Y CUADRATURA DE LA ENERGÍA CON RESPECTO A LA CANTIDAD DE MUESTRAS EN TIEMPO USADAS EN EL CÁLCULO.	55
FIGURA 33. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA CONSTRUCCIÓN Y CÁLCULO DE ATRIBUTOS DE LOS MODELOS SINTÉTICOS BASADOS EN DATOS DE POZOS.	56
FIGURA 34. REGISTROS DE POZO Y VELOCIDADES DE ONDA CALCULADAS DEL POZO C3.	58
FIGURA 35. CONSTANTES ELÁSTICAS DEL POZO C3 ENTRE LAS PROFUNDIDADES 6.000 Y 8.000 PIES.	59
FIGURA 36. ONDÍCULA DE RICKER USADA PARA LOS MODELOS SINTÉTICOS, SU ESPECTRO DE AMPLITUD Y SU ESPECTRO DE FASE	60
FIGURA 37. MODELOS DE CUÑAS GENERADOS PARA ESTUDIAR LA VARIACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN FUNCIÓN DEL ESPESOR.	63
FIGURA 38. PROCESO DE GENERACIÓN DEL MODELO DE CUÑA	64
FIGURA 39. ATRIBUTOS DE LA DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 1 USANDO <i>STFT</i> CON VENTANA DE 14 MS.	65

FIGURA 40. CURVA DE VELOCIDAD DEL POZO C3	66
FIGURA 41. REGISTROS ESCALADOS (GR , D_{BULK} Y V_p), IMPEDANCIA ACÚSTICA, SERIE DE REFLECTIVIDAD Y TRAZA SINTÉTICA DEL POZO C3.	67
FIGURA 42. <i>ANGLE GATHER</i> Y TRAZA SINTÉTICA APILADA DEL POZO C3	67
FIGURA 43. TRAZAS SINTÉTICAS ANTES Y DESPUÉS DEL AJUSTE SÍSMICA POZO.	69
FIGURA 44. DESPLIEGUE DE LOS TOPES DE LA FM. ROBLECITO EN EL POZO C3 LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL AJUSTE SÍSMICA POZO	69
FIGURA 45. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ETAPA DOS.....	71
FIGURA 46. INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL PREVIA MOSTRADA EN LA LÍNEA SÍSMICA ARBITRARIA QUE PASA POR LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.....	72
FIGURA 47. ESPECTROGRAMAS DE AMPLITUD DE LA <i>STFT</i> DE LA SEÑAL COMPUESTA CON VENTANA DE ESTUDIO DE 14 MS, 28 MS, 42 MS Y 56 MS	75
FIGURA 48. IMÁGENES RGB GENERADAS USANDO LA <i>STFT</i> EN VENTANA DE ESTUDIO DE 14 MS, 28 MS, 42 MS Y 56 MS	77
FIGURA 49. VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA DOMINANTE Y AMPLITUD MÁXIMA DE LA SEÑAL COMPUESTA EN FUNCIÓN DE LA VENTANA DE ESTUDIO 14 MS, 28 MS, 42 MS Y 56 MS.	78
FIGURA 50. DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE LA SEÑAL COMPUESTA USANDO LA <i>CWT</i> Y LA <i>ST</i>	79
FIGURA 51. RESULTADO DEL ESCALAMIENTO A SÍSMICA DE LOS DATOS DEL POZO C3 ENTRE LAS PROFUNDIDADES 6.000 Y 8.000 PIES.	82
FIGURA 52. GRÁFICOS DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDA P DE LOS REGISTROS SÓNICOS, REGISTROS SÓNICOS ESCALADOS A SÍSMICA, Y VELOCIDADES INTERVÁLICAS CALCULADAS USANDO LOS TIROS DE VERIFICACIÓN SÍSMICA O PERFIL SÍSMICO VERTICAL DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.	83
FIGURA 53. VARIABLES GR , V_{SH} , D , $BULK$, V_p Y V_s DEL POZO C3 EN ESCALA DE POZO Y ESCALA SÍSMICA	84
FIGURA 54. GRÁFICOS CRUZADOS DE PROFUNDIDAD CON RESPECTO AL NIVEL DEL MAR, DENSIDAD $BULK$, V_{SH} , V_p Y V_s DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.....	85
FIGURA 55. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA DE V_{SH} , D , $BULK$, V_p Y V_s DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.	86
FIGURA 56. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA DE V_{SH} , D , $BULK$, V_p Y V_s DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5 EN EL INTERVALO $V_{SH} < 0,1$	87
FIGURA 57. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA DE V_{SH} , D , $BULK$, V_p Y V_s DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5 EN EL INTERVALO $0,1 \leq V_{SH} < 0,5$	87

FIGURA 58. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA DE V_{SH} , D. BULK, V_p Y V_s DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5 EN EL INTERVALO DE $0,5 \leq V_{SH}$	88
FIGURA 59. VARIACIÓN DE LA AMPLITUD CON RESPECTO AL ÁNGULO DE INCIDENCIA DE CUATRO INTERFASES SIMPLES USANDO LA APROXIMACIÓN AVO DE RICHARDS-FRASIER	90
FIGURA 60. MODELO DE INTERFASE SIMPLE LUTITA-ARENA LIMPIA	92
FIGURA 61. TRAZAS SINTÉTICAS DEL MODELO DE FASE SIMPLE LUTITA-ARENA LIMPIA	92
FIGURA 62. ANÁLISIS DE FOURIER DE LAS TRAZAS SINTÉTICAS DEL MODELO DE INTERFASE SIMPLE LUTITA-ARENA LIMPIA	93
FIGURA 63. MODELO DE INTERFASE SIMPLE LUTITA-ARENA CON GAS	94
FIGURA 64. TRAZAS SINTÉTICAS DEL MODELO DE INTERFASE SIMPLE LUTITA-ARENA CON GAS	94
FIGURA 65. ANÁLISIS DE FOURIER DE LAS TRAZAS SINTÉTICAS DEL MODELO DE INTERFASE SIMPLE LUTITA-ARENA CON GAS	95
FIGURA 66. MODELO DE VARIAS INTERFASES.	95
FIGURA 67. TRAZAS SINTÉTICAS DEL MODELO DE VARIAS INTERFASES	96
FIGURA 68. ANÁLISIS DE FOURIER DE LAS TRAZAS SINTÉTICAS DEL MODELO DE VARIAS INTERFASES.	97
FIGURA 69. ATRIBUTOS DE ENERGÍA DE LOS MODELOS DE INTERFASE.	98
FIGURA 70. ATRIBUTOS INSTANTÁNEOS DE LOS MODELOS DE INTERFASE	100
FIGURA 71. ATRIBUTOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE LA TRAZA SINTÉTICA DE INCIDENCIA CERO DE LOS MODELOS DE INTERFASE SIMPLE USANDO LA <i>STFT</i> CON VENTANA DE 14 MS. .	102
FIGURA 72. ATRIBUTOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE LA TRAZA SINTÉTICA DE INCIDENCIA CERO DE LOS MODELOS DE INTERFASE SIMPLE USANDO LA <i>STFT</i> CON VENTANA DE 28 MS. .	103
FIGURA 73. ATRIBUTOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE LA TRAZA SINTÉTICA DE INCIDENCIA CERO DE LOS MODELOS DE INTERFASE SIMPLE USANDO LA <i>STFT</i> CON VENTANA DE 42 MS. .	104
FIGURA 74. ATRIBUTOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE LA TRAZA SINTÉTICA DE INCIDENCIA CERO DE LOS MODELOS DE INTERFASE SIMPLE USANDO LA <i>STFT</i> CON VENTANA DE 56 MS. .	105
FIGURA 75. ATRIBUTOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE LA TRAZA SINTÉTICA DE INCIDENCIA CERO DE LOS MODELOS DE INTERFASE SIMPLE USANDO LA <i>CWT</i>	106
FIGURA 76. ATRIBUTOS DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL DE LA TRAZA SINTÉTICA DE INCIDENCIA CERO DE LOS MODELOS DE INTERFASE SIMPLE USANDO LA <i>ST</i>	107
FIGURA 77. MODELOS DE CUÑAS CONVOLUCIONADOS CON UNA ONDÍCULA DE RICKER DE FRECUENCIA 30 HZ.	108
FIGURA 78. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS 1	110

FIGURA 79. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE LA CUADRATURA DE LA ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 1.	110
FIGURA 80. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 2.....	111
FIGURA 81. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE LA CUADRATURA DE LA ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 2..	112
FIGURA 82. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 3.....	113
FIGURA 83. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 4.....	114
FIGURA 84. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE LA CUADRATURA DE LA ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 3.	114
FIGURA 85. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE LA CUADRATURA DE LA ENERGÍA DEL MODELO DE CUÑAS TIPO 4..	115
FIGURA 86. AMPLITUD INSTANTÁNEA DE LOS MODELOS DE CUÑA.....	116
FIGURA 87. FASE INSTANTÁNEA DE LOS MODELOS DE CUÑA	117
FIGURA 88. FRECUENCIA INSTANTÁNEA DE LOS MODELOS DE CUÑA	117
FIGURA 89. ACELERACIÓN DE LA FASE INSTANTÁNEA DE LOS MODELOS DE CUÑA	118
FIGURA 90. ATRIBUTOS RESALTANTES DE LA CUÑA TIPO 1 USANDO <i>STFT</i>	120
FIGURA 91. ATRIBUTOS RESALTANTES DE LA CUÑA TIPO 2 USANDO <i>STFT</i>	120
FIGURA 92. ATRIBUTOS RESALTANTES DE LA CUÑA TIPO 3 USANDO <i>STFT</i>	121
FIGURA 93. ATRIBUTOS RESALTANTES DE LA CUÑA TIPO 4 USANDO <i>STFT</i>	121
FIGURA 94. IMÁGENES RGB DE LOS MODELOS DE CUÑA BASADO EN LA STFT EN VENTANAS 14, 28, 42 Y 56 MS.	122
FIGURA 95. ATRIBUTOS RESALTANTES USANDO LA <i>CWT</i> DE LOS MODELOS DE CUÑA.....	124
FIGURA 96. ATRIBUTOS RESALTANTES USANDO LA <i>ST</i> DE LOS MODELOS DE CUÑA.....	124
FIGURA 97. IMÁGENES RGB DE LA <i>CWT</i> Y <i>ST</i> DE LOS CUATRO MODELOS DE CUÑA.	126
FIGURA 98. MAGNITUD DE LA ESCALA 7 DE LA <i>CWT</i> DE LOS MODELOS DE CUÑA.....	126
FIGURA 99. VARIACIÓN DEL ATRIBUTO DE ENERGÍA Y SU CUADRATURA EN FUNCIÓN DE LA CANTIDAD DE MUESTRAS USADAS PARA SU CÁLCULO	128
FIGURA 100. ATRIBUTOS INSTANTÁNEOS DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.....	129
FIGURA 101. ESPECTRO DE AMPLITUD DE LAS TRAZAS SÍSMICAS EN LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.....	130
FIGURA 102. ESPECTROGRAMAS DEL POZO C1 USANDO VENTANAS CON APERTURA DE 28, 42 Y 56 MS.....	131
FIGURA 103. ESPECTROGRAMAS DEL POZO C3 USANDO VENTANAS CON APERTURA DE 28, 42 Y 56 MS.....	132

FIGURA 104. ESPECTROGRAMAS DEL POZO C4 USANDO VENTANAS CON APERTURA DE 28, 42 Y 56 MS.....	133
FIGURA 105. ESPECTROGRAMAS DEL POZO C5 USANDO VENTANAS CON APERTURA DE 28, 42 Y 56 MS.....	134
FIGURA 106. ESCALOGRAMAS DE AMPLITUD DE LA CWT USANDO LA ONDÍCULA DE MORLET COMPLEJA.....	135
FIGURA 107. RELACIÓN ENTRE EL REGISTRO GR ESCALADO Y LA CWT EN BAJAS ESCALAS.	136
FIGURA 108. ESPECTROGRAMAS DE AMPLITUD DE LA TRANSFORMADA S DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.....	137
FIGURA 109. COMPARACIÓN DE ESPECTROGRAMAS DE AMPLITUD DE LA TRANSFORMADA S CALCULADA USANDO MATLAB/OCTAVE Y EL ALGORITMO DEL CWT DE OPENDTECT DE LAS TRAZAS SÍSMICAS UBICADAS EN LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5.....	138
FIGURA 110. UBICACIÓN DE LOS HORIZONTES SÍSMICOS INTERPRETADOS EN SÍSMICA Y TOPES INTERPRETADOS EN POZO.....	140
FIGURA 111. DETECCIÓN DE LA BASE DE LA LUTITA DE LA FM. ROBLECITO MEDIANTE LOS REGISTROS DE POZO A ESCALA SÍSMICA.	141
FIGURA 112. AMPLITUD SÍMICA DE LA LÍNEA ARBITRARIA ENTRE LOS POZOS C3 Y C4.	142
FIGURA 113. ATRIBUTOS SÍSMICOS DE LA LÍNEA ARBITRARIA ENTRE LOS POZOS C3 Y C4.	143
FIGURA 114. AMPLITUD INSTANTÁNEA Y FASE INSTANTÁNEA EN LA LÍNEA ARBITRARÍA DE LOS POZOS C3-C4.....	144
FIGURA 115. DETECCIÓN DE CUERPOS DE ARENA MEDIANTE LOS ATRIBUTOS DE FRECUENCIA INSTANTÁNEA Y ACELERACIÓN DE LA FASE EN EL POZO C4.	145
FIGURA 116. ATRIBUTOS DE AMPLITUD MÁXIMA Y FRECUENCIA DOMINANTE CALCULADOS MEDIANTE LA STFT CON VENTANA DE 42 MS EN LA LÍNEA ARBITRARÍA DE LOS POZOS C3-C4.146	
FIGURA 117. IMÁGENES RGB DE LAS STFT CON VENTANA DE 28, 42 Y 56 MS Y LA ST DE LA LÍNEA ARBITRARIA QUE PASA POR LOS POZOS C3 Y C4.....	147
FIGURA 118. MAPAS ESTRUCTURALES EN TWT.	149
FIGURA 119. ATRIBUTOS DE ENERGÍA, AMPLITUD INSTANTÁNEA Y AMPLITUD MÁXIMA DE LA ARENAS GRUPO 1.	150
FIGURA 120. ATRIBUTO DE FRECUENCIA DOMINANTE DE LA ARENAS GRUPO 1.....	151
FIGURA 121. IMAGEN RGB DE LAS ARENAS GRUPO 1.	152
FIGURA 122. INTERPRETACIÓN DE UN CANAL USANDO UN MAPA DE ISOFRECUENCIA A 42 HZ.	152

FIGURA 123. ACERCAMIENTO SOBRE LA FASE INSTANTÁNEA EN EL POZO C1 SOBRE EL GRUPO DE ARENAS 1.	153
FIGURA 124. MAPA DE FACIES DE LAS ARENAS A1 Y A2	153
FIGURA 125. ATRIBUTOS DE ENERGÍA, AMPLITUD INSTANTÁNEA Y AMPLITUD MÁXIMA DE LA ARENAS GRUPO 2.	154
FIGURA 126. ATRIBUTO DE FRECUENCIA DOMINANTE DE LA ARENAS GRUPO 2.....	155
FIGURA 127. IMAGEN RGB DE LAS ARENAS GRUPO 2.	155
FIGURA 128. MAPA DE FACIES DE LA ARENA A4.....	156
FIGURA 129. ATRIBUTOS DE ENERGÍA Y AMPLITUD MÁXIMA DE LA ARENAS GRUPO 3.	157
FIGURA 130. IMAGEN RGB DE LAS ARENAS GRUPO 3.	157
FIGURA 131. ATRIBUTO DE FRECUENCIA DOMINANTE DE LA ARENAS GRUPO 3.....	158
FIGURA 132. MAPA DE FACIES DE LA ARENA A7.....	158
FIGURA 133. ATRIBUTOS DE ENERGÍA Y AMPLITUD MÁXIMA DE LA ARENAS GRUPO 4.	159
FIGURA 134. IMAGEN RGB DE LAS ARENAS GRUPO 4.	160
FIGURA 135. ATRIBUTOS DE FASE Y FRECUENCIA INSTANTÁNEA EN EL POZO C4.....	160
FIGURA 136. ATRIBUTO DE FRECUENCIA DOMINANTE DE LA ARENAS GRUPO 4.....	161
FIGURA 137. MAPA DE FACIES DE LA ARENA A11.....	161
FIGURA 138. ATRIBUTOS DE ENERGÍA Y AMPLITUD MÁXIMA DE LA ARENAS GRUPO 5.	162
FIGURA 139. ATRIBUTO DE FRECUENCIA DOMINANTE DE LA ARENAS GRUPO 5.....	163
FIGURA 140. IMAGEN RGB DE LAS ARENAS GRUPO 5.	164
FIGURA 141. MAPA DE FACIES DE LA ARENA A19.....	165
FIGURA 142. SUPERPOSICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTRATIGRÁFICAS EN LOS MAPAS ESTRUCTURALES Y ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN DE LOS YACIMIENTOS.	166
FIGURA 143. SUPERPOSICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTRATIGRÁFICAS DE TODOS LOS HORIZONTES SÍSMICOS.	167

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DESPLAZAMIENTOS EN TIEMPO REALIZADOS EN LOS POZOS PARA EL AJUSTE SÍSMICA-POZO	68
TABLA 2. AGRUPACIÓN DE LAS ARENAS Y SU HORIZONTE SÍSMICO ASOCIADO.	73
TABLA 3. PROMEDIO DE PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5 EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ARCILLA V_{SH}	89
TABLA 4. PROMEDIO DE PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS POZOS C1, C3, C4 Y C5 EN FUNCIÓN DE LA RESISTIVIDAD PROFUNDA PARA ARENAS LIMPIAS ($V_{SH}<0,1$).	89
TABLA 5. VOLÚMENES SÍSMICOS GENERADOS.	139

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El estudio de los datos sísmicos de reflexión ha evolucionado enormemente desde la década de los años 60 cuando se comenzó a grabar los datos sísmicos de forma digital, hasta la actualidad, que se aplican procedimientos complejos que incluyen gráficos cruzados de atributos, patrones de reconocimiento, redes neurales, análisis AVO, descomposición espectral, inversión acústica y elástica, análisis multiatributos, entre otros (Chopra y Marfurt, 2007). Sin embargo, la resolución sísmica depende de la longitud de onda sísmica (λ), siendo ampliamente aceptada la definición del límite de resolución, es decir el elemento más pequeño al cual puede definírsele la base y tope, corresponde al criterio de Rayleigh establecido como un cuarto de la longitud de onda (Widess, 1973; Kallweit y Wood, 1982; Zeng, 2009). En términos prácticos, la sísmica de reflexión tiene un rango de resolución que varía de 10 a 100 metros (aproximadamente 33-330 pies). Por otra parte, se pueden observar capas más delgadas usando las herramientas para adquirir registros de pozos, las cuales tienen un límite de resolución mucho menor, que están entre 5 a 20 pulgadas (Bourke *et al.*, 1989; Sheriff, 2002).

Dejtrakulwong (2012) indica que la definición de capas delgadas varía según el contexto. Generalmente, se define como capas delgadas a aquellas capas geológicas que están por debajo de la resolución vertical de la herramienta de medición. Así, las arenas gasíferas dentro de la zona de estudio, pertenecientes a la Formación Roblecito en el Campo Copa Macoya, poseen espesores que varían entre 5 a 15 pies y la frecuencia dominante de los datos sísmicos adquiridos es de 30Hz, lo que permite evaluar con efectividad paquetes de arenas por encima de 92 ft (Pérez, 2009A), siendo por definición, según el criterio de Rayleigh, capas finas y difíciles de observar en el dominio de los datos sísmicos, pero son capas gruesas y detectables usando datos de pozos.

Villanueva (2013) realizó una interpretación sísmica 3D con el objetivo de identificar mediante la aplicación de los atributos sísmicos de descomposición espectral, similitud, e instantáneos, la distribución y geometría de geocuerpos a nivel de la Formación Roblecito.

En este trabajo se realizó un estudio de la respuesta de los atributos asociados con el análisis tiempo-frecuencia producidos por diversos modelos sintéticos 1D y 2D, es decir, atributos de descomposición espectral, picos de amplitud y frecuencia, transformada ondícula y atributos instantáneos, para establecer relaciones que puedan ser usadas para interpretar características estratigráficas contenedoras de capas delgadas y posibles acumulaciones de gas.

Ubicación del área de estudio

El área de estudio está ubicada en el Campo Copa Macoya, entre las poblaciones Tucupido y El Caro de La Negra, Municipio José Félix Ribas, Estado Guárico.

La figura 1 muestra la ubicación del área de estudio. La misma, es una composición que consta de tres mapas: (1) El mapa regional, el cual fue elaborado usando la base de datos del comando pscoast del programa Generic Mapping Tools (GMT; Wessel y Smith, 2015); El mapa de municipios de Guárico tomado del Sistema de Información Geográfico del Turismo en Venezuela (2015); y El mapa local, el cual fue elaborado usando datos de la base cartográfica a escala 1:25.000, hoja NC-20 del año 1997 y datos de coordenadas de los polígonos de la sísmica 3D y de la licencia de explotación de gas.

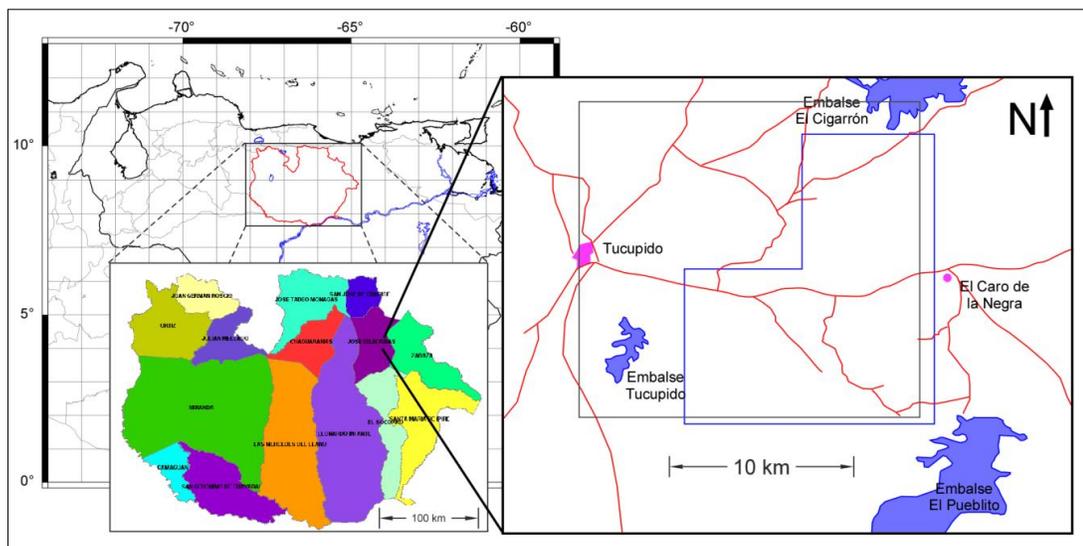


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Dentro del mapa local, el polígono gris es el área de producción de Gas y el polígono azul representa 153,84 km² de datos sísmicos 3D que serán usados durante el estudio.

OBJETIVOS

Objetivo general

Interpretar características asociadas a las arenas delgadas de la Formación Roblecito, así como, localizar posibles yacimientos de gas mediante técnicas del análisis tiempo-frecuencia, utilizando espectrogramas, escalogramas, atributos asociados a la frecuencia, la transformada de Hilbert y la descomposición espectral.

Objetivos específicos

- Evaluar las respuestas de diversos atributos de frecuencia generadas por distintos modelos sintéticos 1D, como trazas sintéticas con ángulo de incidencia cero y trazas sintéticas apiladas calculadas de ecuaciones AVO, modelos de cuñas, y extraer información que permita identificar vínculos entre los datos sísmicos y capas delgadas o acumulaciones de gas.
- Construir volúmenes de atributos del análisis tiempo-frecuencia.
- Generar mapas de ambientes sedimentarios e identificar zonas donde se localicen potenciales trampas estratigráficas o estructurales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Resolución sísmica, interferencia y detectabilidad

La resolución es definida por Sheriff (2002) como la capacidad de separar dos eventos o características adyacentes. También puede expresarse como la separación mínima que permitan distinguir de dos cuerpos antes de sus identidades individuales se pierdan en un mapa o sección transversal.

Simm y Bacon (2014) describen la resolución sísmica como un elemento clave en la interpretación de datos sísmicos de banda limitada, donde hay un límite inferior para un espesor de capas que puede ser resuelto. Este límite define la separación entre ‘capas gruesas’, que están por encima de la resolución, y ‘capas delgadas’, las cuales están por debajo de la resolución. Además, según Dejtrakulwong (2012) la definición de capas delgadas varía según el contexto. Donde se define como capas delgadas a aquellas capas geológicas que están por debajo de la resolución vertical de la herramienta de medición (sísmica, registro de pozo, núcleo, etc.).

Zeng (2009) indica que el límite de resolución de los datos de sísmicos es un tema complejo que involucra además de la frecuencia dominante de la onda, las características de la fase, y la calidad de datos (relación señal/ruido “S/N”), sino también criterios sobre cómo medir esta resolución. Así, está el criterio de Widess (1973) y el criterio de Rayleigh (Kallweit y Wood, 1982).

Widess (1973) discutió el efecto del espesor de una capa en la característica de reflexión usando una ondícula simétrica en un modelo de cuña (figura 2) y propuso que el límite de resolución es un octavo de la longitud de onda $\lambda/8$, o la mínima distancia en la cual una forma de onda de una reflexión compuesta es derivada de una forma de onda de una reflexión individual. Sin embargo, este criterio tiene más impacto teórico que práctico debido a las grandes dificultades para juzgar la estabilización de una la forma de onda (Zeng, 2009; Zeng y Marfurt, 2015). Por lo

tanto, es más aceptado y manejable el criterio de límite de resolución de Rayleigh donde se establece la separación de pico a valle en $\lambda/4$ para una capa delgada con la misma polaridad en la parte superior e inferior (Kallweit y Wood, 1982). En esta zona llamada punto de interferencia (*tuning point*) es donde la composición de la amplitud de dos ondículas o formas de onda entran en interferencia (Zeng, 2009).

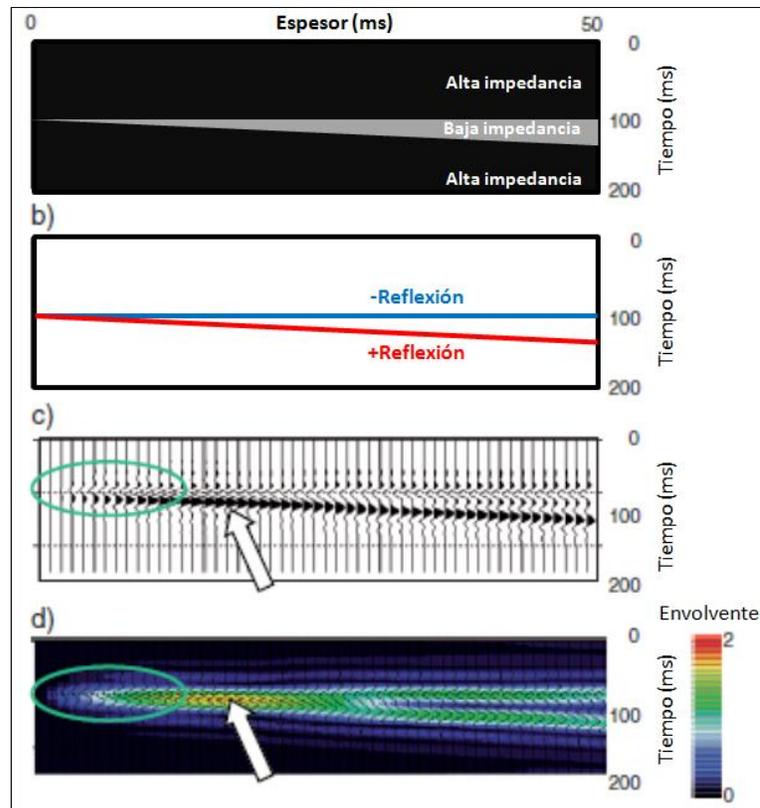


Figura 2. Modelo de cuña de una capa delga. (a) muestra un medio de menor impedancia envuelto por una capa de mayor impedancia. (b) muestra el coeficiente de reflexión producido por (a) con un espesor variante de 0 m a 50 m de izquierda a derecha. (c) muestra la convolución de la serie de reflectividad (b) con un filtro Ormsby 8-10-40-50 Hz. (d) muestra el atributo de amplitud instantánea calculado sobre (c). La flecha señala el punto de interferencia a $1/4 \lambda$, debajo de este espesor la forma de onda deja de cambiar pero sigue variando la amplitud linealmente hasta alcanzar el espesor de $1/8 \lambda$ indicado por el ovalo verde (modificado de Chopra y Marfurt, 2007).

La interferencia sísmica es la superposición de dos o más formas de onda. Esta superposición ocurre en capas cuya separación base y tope es pequeña. Esta interferencia puede ser constructiva si las ondas están en fase, es decir, los picos se

suman, o puede ser destructiva si las ondas están 180° fuera de fase lo que implica una cancelación de un pico con un valle (Widess, 1973; Zeng, 2009; Sheriff, 2002; Simm y Bacon, 2014; Zeng y Marfurt, 2015).

Para espesores menores al punto de interferencia sísmica, la forma de la onda se estabiliza (figura 3a) y sólo varía la amplitud sísmica con respecto al espesor. Widess (1973) demostró que cuando estamos muy por debajo del espesor de un cuarto de longitud de onda (interferencia), la variación de la amplitud es lineal con respecto al espesor, como se indica en la figura 3b y se define por:

$$R\delta\left(t + \frac{T}{2}\right)w(t) - R\delta\left(t - \frac{T}{2}\right)w(t) \cong RT \frac{dw}{dt} \quad (1)$$

Donde R es el coeficiente de reflexión, $w(t)$ es la ondícula sísmica, y $\delta(t+T/2)$ y $\delta(t-T/2)$ representan los picos de tope y base de la capa delgada de tiempo de viaje doble con espesor T . Una propiedad de la transformada de Fourier es que si

$$w(t) \leftrightarrow W(\omega) \quad (2)$$

Denota el par de transformada de Fourier, donde ω es la frecuencia, entonces:

$$\frac{dw}{dt} \leftrightarrow j\omega W(\omega) \quad (3)$$

La ecuación 1 señala que para capas delgadas, la amplitud varía linealmente con el espesor T . Adicionalmente, de la ecuación 3 se observa que las bajas frecuencias son atenuadas y las altas frecuencias son amplificadas (determinado por el parámetro ω) mientras que la fase es rotada 90° (determinado por el parámetro j). Marfurt (2014) indica que se pueden observar variaciones de la amplitud entre $T=\lambda/8$ y $T=\lambda/16$.

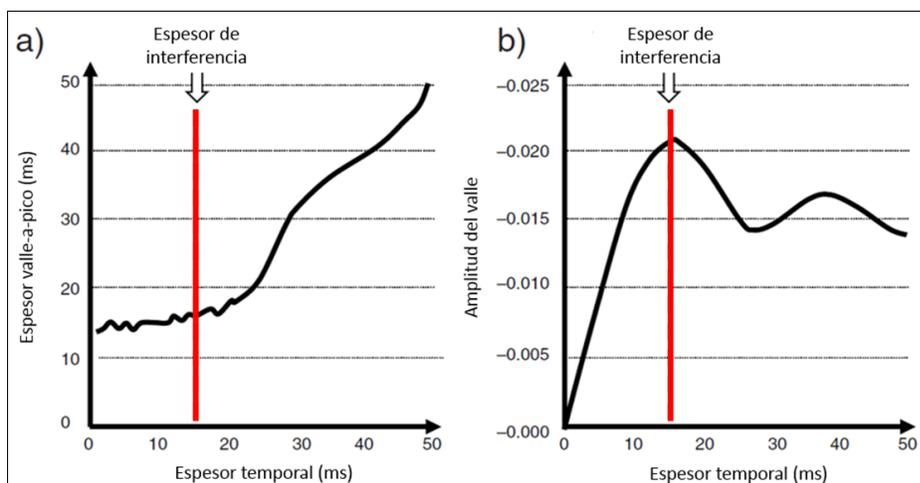


Figura 3. La sensibilidad (a) del espesor de un reflector de valle a pico con respecto al espesor real y (b) la amplitud del valle para el modelo de cuña simple mostrado en la figura 2. Obsérvese la variación casi lineal de la amplitud con respecto al espesor para valores pequeños de espesor (≤ 10 ms).

Modificado de Chopra y Marfurt (2007); después de Partyka (2001); después de Widess (1973).

Si bien la resolución sísmica es un concepto clave de la interpretación en el contexto de la sísmica 3D y otros mapas de atributos sísmicos, la idea de resolución también tiende a incorporar la noción de detectabilidad o límite de separabilidad (Simm y Bacon, 2014; Brown, 2011). Aunque una arena tenga un espesor por debajo del espesor de sintonía, esta arena puede ser detectable sin ser totalmente resuelta. El límite de detectabilidad está alrededor de $\lambda/20 - \lambda/30$ (Sheriff y Geldart, 1995; Sheriff, 2002; Brown, 2011) y depende fundamentalmente del contraste de impedancia acústica y la relación señal ruido de la sísmica.

Física de rocas y el modelado directo

La física de rocas es la rama de la geofísica que estudia y establece relaciones entre varias propiedades de la roca. Usando estas relaciones es posible vincular la respuesta sísmica con la litología usando las propiedades elásticas de la roca. Estas propiedades son principalmente las velocidades de ondas P y S, la impedancia acústica (I_a) y elástica (I_e) y la relación de Poisson, y son vinculadas a la litología, porosidad y contenido de fluido (Sheriff, 2002; Dvorkin, Gutierrez y Grana, 2014; Castagna, Chopra y Al-Jarrah, 2014; Simm y Bacon, 2014).

Las reflexiones sísmicas dependen de los contrastes de las velocidades de propagación de las ondas P y S y de la densidad de masa entre distintas capas del subsuelo. Estas propiedades a su vez dependen de características de la roca tales como la composición mineral, porosidad, fluido, textura y esfuerzos. Así se tiene un enlace que asocia la composición de la roca con sus propiedades elásticas y otro que asocia las propiedades elásticas con propagación de la señal sísmica. Una forma de interpretar datos sísmicos es mediante el modelado directo de la roca (figura 4), este consiste en reproducir propiedades de la roca como serían en el yacimiento, hallando sus propiedades elásticas y generando sismogramas sintéticos. Una vez reproducida la traza sintética, esta es comparada con los datos reales bajo la suposición de que respuestas similares indican propiedades similares (Dvorkin *et al.*, 2014).

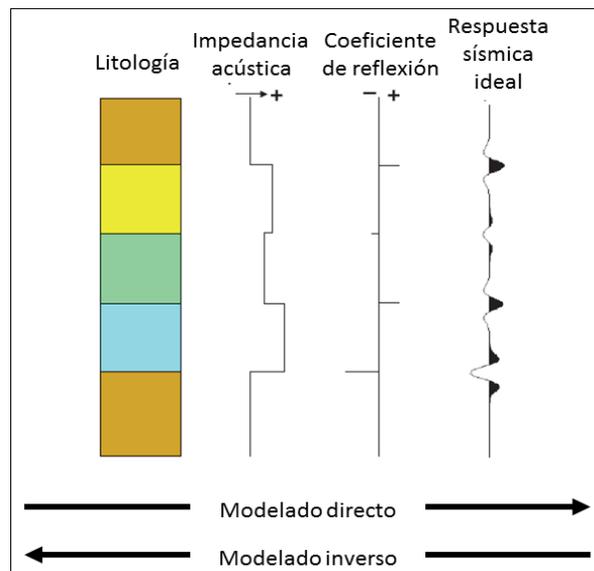


Figura 4. Esquema simplificado del modelado sísmico directo e inverso (Modificado de Herron, 2011).

Tipos de onda y velocidades de propagación

En la exploración sísmica normalmente se usan dos tipos de ondas, la onda de compresión o primaria normalmente conocida como onda P, y la onda de cizalla o secundaria conocida como onda S. Mientras que en la onda P la partícula vibra en dirección de la propagación de la onda, en la onda S la partícula vibra transversalmente a la dirección de propagación de la onda. La deformación que

genera la onda P en el medio involucra cambios de en volumen y forma y la deformación generada por la onda S solo genera cambios de forma (Sheriff, 2002; Mavko, Mukerji y Dvorkin 2009; Chopra y Castagna, 2014). Según (Dvorkin *et al*, 2014) Si K , G , M y ρ son el módulo de volumen (*bulk modulus*), módulo de cizalla, módulo de onda P y densidad del medio, respectivamente, la velocidad de onda P (V_p) y de onda S (V_s) vienen dadas por las relaciones 1 y 2 respectivamente, y el módulo de compresión M y está dado por la ecuación número 3:

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

$$M = K + \frac{4}{3}G \quad (6)$$

Contantes elásticas

La simulación de la propagación de ondas elásticas en roca requiere el conocimiento de las constantes elásticas del medio (Abell, Shao y Pyrak-Nolte 2014; Chopra y Castagna, 2014). Es por ello que en esta sección se presentará las constantes elásticas y sus relaciones para sus cálculos.

Esfuerzo, deformación y módulos elásticos

Cuando una fuerza es aplicada a una roca, ella es sometida a deformación con respecto a sus dimensiones originales. La fuerza aplicada por unidad de área es llamada esfuerzo. Para bajos niveles de esfuerzos, estos son proporcionales con la deformación y en este caso se habla de deformación elástica. En un material isotrópico y elásticamente lineal, el esfuerzo y deformación es relacionado por la ley de Hooke (Timoshenko y Goodier, 1934; Sheriff, 2002). Bajo estas condiciones las relaciones entre esfuerzo y deformación pueden ser descritas por los módulos elásticos (Chopra y Castagna, 2014).

Dependiendo del esfuerzo (σ) aplicado a una roca, resultan tres tipos de deformación: (1) cambio de longitud que está asociado a módulo de Young, (2) un cambio de volumen asociado al módulo de volumen y (3) un corte que está asociado al módulo de cizalla. Las ecuaciones 7, 8 y 9 muestran la relación entre estos módulos y las deformaciones.

Módulo de Young (E)

$$E = \frac{\sigma_L}{\Delta L/L} \quad (7)$$

Donde σ_L es el esfuerzo longitudinal, $\Delta L/L$ es el cambio de longitud fraccional. Generalmente es expresado en gigapascales (GPa).

Módulo de volumen (K)

$$K = \frac{\sigma_V}{\Delta V/V} \quad (8)$$

Donde σ_V es el esfuerzo volumétrico (presión), $\Delta V/V$ es el cambio de volumen fraccional. Expresado en unidades de presión (psi, Pa o N/m²).

Módulo de cizalla (μ)

$$\mu = \frac{\tau}{\theta} \quad (9)$$

El módulo de cizalla (μ) también llamado módulo de rigidez o constante de Lamé. El esfuerzo de corte es representado por τ y la deformación por θ . Generalmente es expresado en gigapascales (GPa). Nota, según el autor, el módulo de cizalla es representado por la letra **G** o la letra griega μ .

Relación de Poisson (ν)

Según Chopra y Castagna (2014) y Dvorkin *et al.* (2014) el módulo de volumen (K) y el módulo de cizalla (μ) se relacionan mediante la relación de Poisson (ν) mediante las siguientes fórmulas 10, 11 y 12:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 - \nu)} \quad (11)$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (12)$$

Además, para un medio elástico e isotrópico, la relación de Poisson (ν) se define en términos de las velocidades de propagación de ondas P y S mediante expresión 13:

$$\nu = \frac{1 V_s^2 - 2}{2 V_s^2 - 1} \quad (13)$$

Chopra y Castagna (2014) indican que la relación de Poisson de una roca depende del material sólido de la roca, la forma del espacio poroso y de la saturación.

Impedancia P (I_P) y S (I_S)

La impedancia I de un medio elástico es la relación de esfuerzo con la velocidad de la partícula. Las impedancias de onda P (I_P) y de onda S (I_S) son la resistencia que opone un medio al paso ondas que se propagan sobre este. La impedancia asociada a la onda P es la impedancia acústica (ecuación 14) y la impedancia elástica está asociada a la onda S (ecuación 15) (Aki y Richards, 1980; Sheriff, 2002; Mavko *et al.*, 2009; Dvorkin *et al.*, 2014).

$$I_P = \rho V_P \quad (14)$$

$$I_S = \rho V_S \quad (15)$$

Escalamiento de las propiedades de roca

Mukerji, Mavko, Mujica, Lucet, (1995), Rio, Mukerji, Mavko, y Marion (1996), Mavko *et al.* (2009), Dvorkin *et al.* (2014) y Simm y Bacon (2014) indican que la velocidad sísmica en un medio estratificado no sólo depende de las propiedades de

la roca y el tipo de fluido contenido, también depende de la comparación de la escala de los datos sísmicos con la escala de la sección sedimentaria. Las velocidades son controladas por la relación de la longitud de onda λ y el espesor de la capa d , obteniendo una velocidad aparente que puede ser mayor donde λ/d es mucho menor que 1, comparado con el caso opuesto. Cuando $\lambda/d \ll 1$, la onda se propaga como un rayo y el tiempo total de viaje a través de una secuencia es exactamente la suma de los tiempos de viaje en cada capa por individual. En el caso opuesto, $\lambda/d \gg 1$, donde el espesor de la capa es mucho menor a la longitud de onda, las propiedades elásticas de la onda resultan de un promedio de las capas individuales y la velocidad aparente es menor a la real.

Para poder realizar el modelado directo es necesario realizar el cambio de escala de las propiedades de roca obtenidas de registros de pozo a escala sísmica. Para escalar propiedades de masa y volumen (por ejemplo: densidad y volumen de arcilla) puede usarse la media aritmética sobre una ventana móvil de n muestras:

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (16)$$

Donde ρ_i es la densidad individual de la capa i , $\langle \rho \rangle$ es la densidad escalada, y n es el tamaño de la ventana que se desea promediar. Los módulos elásticos pueden ser promediados usando el promedio armónico sobre una ventana móvil:

$$\langle M \rangle = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{M_i} \right)^{-1} \quad (17)$$

Donde M_i son los módulos elásticos individuales de cada capa i , $\langle M \rangle$ es el modulo elástico escalado y la ventana debe ser comparable con la longitud de onda λ , donde Sams y Williamson (1993) recomiendan usar $\lambda/10$, mientras que Rio *et al.* (1996) indican que se puede utilizar $\lambda/20$. En la figura 5 se muestra el efecto de la escala de medición de velocidades de onda medidas en pozo y sus expresiones en escala sísmica.

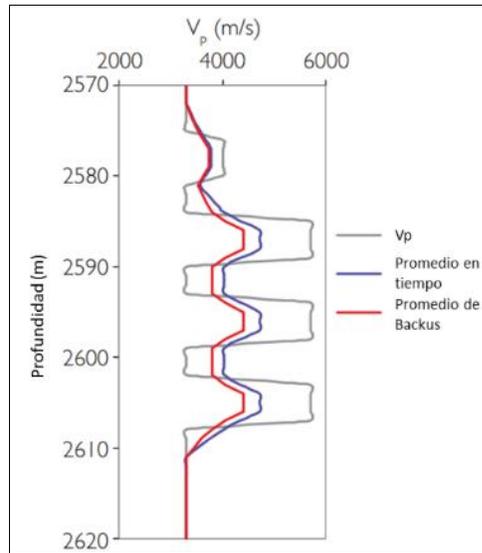


Figura 5. Efecto de la aplicación del promedio en la velocidad P. En gris se muestra la velocidad leída de pozo, en azul se indica la velocidad promediada en tiempo y en rojo se muestra la velocidad usando el promedio de Backus (Modificado de Simm y Bacon, 2014).

AVO y modelado directo

Previamente se indicó que el modelado directo de una traza con ángulo de incidencia cero $T(t)$ consiste en la convolución de la serie de reflectividad $SR(t)$ por la ondícula $W(t)$ y que la misma se le podría agregar un ruido aleatorio $N(t)$:

$$T(t) = SR(t) * W(t) + N(t) \quad (18)$$

Ahora se presenta como varía la amplitud de la onda cuando una onda se refleja con ángulo de incidencia distinto de cero.

Cuando una onda incidente P alcanza un límite entre dos medios de forma oblicua, la energía de la onda se divide en componentes reflejadas y refractadas de ondas P y ondas S. Este fenómeno es descrito por las ecuaciones de Zoeppritz. Debido a que las ecuaciones de Zoeppritz son complejas, diversos autores (Bortfeld, 1961; Richards y Frasier, 1976 mejor conocida como Aki y Richards, 1980; Shuey, 1985; Hilterman, 1975; Smith y Gidlow, 1987; Fatti, Smith, Vail, Strauss y Levitt, 1994) han trabajado en distintas aproximaciones con distintos objetivos, suposiciones y limitaciones (Chopra y Castagna, 2014).

Aproximación de Richards y Frasier o Aki y Richards

En 1976 Richards y Frasier y en 1980 Aki y Richards derivan la ecuación para la reflexión de la onda de compresión abarcando tres parámetros, la densidad ρ , la V_p y la V_s dada por la relación 19:

$$R(\theta) = \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \text{sen}^2(\theta) \right) \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{1}{2 \cos^2(\theta)} \frac{\Delta V_p}{V_p} - \left(4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \text{sen}^2(\theta) \right) \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (19)$$

Donde:

$$\Delta V_p = V_{p_2} - V_{p_1} \quad (20)$$

$$\Delta V_s = V_{s_2} - V_{s_1} \quad (21)$$

$$V_p = \frac{V_{p_2} + V_{p_1}}{2} \quad (22)$$

$$V_s = \frac{V_{s_2} + V_{s_1}}{2} \quad (23)$$

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \quad (24)$$

$$\rho = \frac{\rho_2 + \rho_1}{2} \quad (25)$$

$$\theta = \frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \quad (26)$$

Esta ecuación genera el coeficiente de reflexión de la onda P en un límite de dos medios y funciona bien entre ángulos θ de 0° a 35° . Los subíndices 1 y 2 indican la propiedad es del medio más somero y más profundo, respectivamente (figura 6). El ángulo θ_2 puede calcularse conociendo el ángulo de incidencia θ_1 y las velocidades de onda P de los dos medios mediante la Ley de Snell expresada en la ecuación 27 (Sheriff, 2002):

$$\frac{\text{sen}(\theta_1)}{V_1} = \frac{\text{sen}(\theta_2)}{V_2} \quad (27)$$

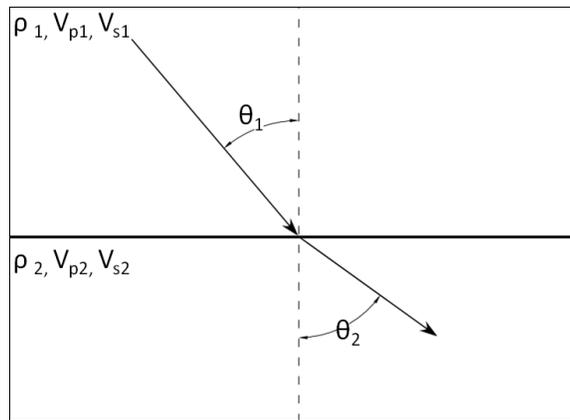


Figura 6. Características del medio de propagación de la onda con ángulo de incidencia distinto de cero.

Análisis tiempo-frecuencia

Desde el inicio de la grabación digital, el procesamiento geofísico ha descompuesto la traza sísmica medida en componentes espectrales con el objetivo de atenuar ruidos de diversas fuentes, aumentar la ganancia de la señal, aplicar técnicas para conocer la forma de la ondícula, cambios espectrales resultantes de múltiples, entre otros procesos.

Taner, Koehler y Sheriff. (1979) describieron las propiedades de la transformada de Hilbert aplicada a la sísmica y sus atributos instantáneos (amplitud, fase y frecuencia) para describir el significado geológico de sus reflexiones. Robertson y Nogami (1984) estudian la capacidad de la traza compleja para detectar capas delgadas. Posteriormente, Partyka, Gridley y López (1999) aplicaron la transformada discreta de Fourier para descomponer los datos sísmicos en distintas bandas de frecuencia para mapear capas delgadas y discontinuidades geológicas en volúmenes sísmicos 3D, este método actualmente se le conoce como descomposición espectral. Blumentritt y Marfurt (2007) generaron volúmenes resaltantes basados en picos de amplitud y frecuencia el cual consiste en detectar la frecuencia dominante para mejorar la selección de frecuencias de la descomposición espectral. Sinha, Routh, Anno, y Castagna (2005) presentaron una nueva metodología para calcular mapas de tiempo-frecuencia de señales no estacionarias usando la transformada

ondícula, la cual permite realizar análisis espectrales sin la necesidad de preseleccionar una ventana.

A continuación se realiza una descripción de las herramientas básicas del análisis espectral usadas para mejorar la detección de capas delgadas.

Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es fundamental en el análisis de datos sísmicos. Ella es aplicada en casi todas las fases del procesamiento sísmico. Una traza sísmica representa un campo de onda sísmico grabado desde un receptor en determinada posición. La forma digital de una traza sísmica es una serie de tiempo $x(t)$ que puede ser totalmente descrita como una suma discreta de un número de sinusoidales, cada una con un pico único de amplitud, frecuencia y retraso de fase. El análisis de la traza sísmica en sus componentes sinusoidales es alcanzado usando la transformada de Fourier hacia adelante. Inversamente, la reconstrucción de la traza sísmica de las componentes sinusoidales individuales se obtiene mediante la transformada de Fourier inversa (Yilmaz, 2001).

La transformada de Fourier permite la descripción de una señal no periódica en términos del contenido de frecuencia dado por las componentes sinusoidales. Las componentes de frecuencia de señales no periódicas están definidas para todos los valores reales de la variable de frecuencia angular “ ω ”. Dada una señal $x(t)$, la transformada de Fourier de $X(\omega)$ de $x(t)$ está definida como una función de frecuencia de la forma:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad -\infty < \omega < \infty \quad (28)$$

La relación anterior se conoce como función de análisis. “ ω ” es la frecuencia angular y se relaciona con la frecuencia “ f ” mediante la relación 29:

$$\omega = 2\pi f \quad (29)$$

Finalmente, dada una señal $x(t)$ con transformada de Fourier $X(\omega)$, la señal $x(t)$ puede recalcularse aplicando la transformada inversa de Fourier dada por la ecuación de síntesis:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} dt \quad (30)$$

Generalmente la transformada de Fourier $X(\omega)$ es una función compleja de la variable real ω , es decir, tiene una componente real y una componente imaginaria de la forma $z = x+jy$, donde j es la unidad imaginaria. Debido a que los números complejos pueden expresarse en forma polar o rectangular, la transformada de Fourier $X(\omega)$ también tendrá estas representaciones mediante las siguientes relaciones 31 y 32:

$$X(\omega) = R(\omega) + jI(\omega); \text{ Forma rectangular} \quad (31)$$

$$X(\omega) = |X(\omega)| e^{j\angle X(\omega)}; \text{ Forma polar} \quad (32)$$

Donde $R(\omega)$ es la parte real, $I(\omega)$ es la parte imaginaria, $|X(\omega)|$ es la magnitud de $X(\omega)$ y $\angle X(\omega)$ es el ángulo de $X(\omega)$. Las formas polar y rectangular se vinculan mediante las relaciones 33 y 34:

$$|X(\omega)| = \sqrt{R(\omega)^2 + I(\omega)^2} \quad (33)$$

$$\angle X(\omega) = \begin{cases} \pi + \tan^{-1} \frac{I(\omega)}{R(\omega)}, & R(\omega) < 0 \\ \tan^{-1} \frac{I(\omega)}{R(\omega)}, & R(\omega) \geq 0 \end{cases} \quad (34)$$

$|X(\omega)|$ es conocida como espectro de amplitud y $\angle X(\omega)$ como espectro de fase y ambos pueden representarse gráficamente en función de la frecuencia (Oppenheim y Willsky, 1996; Kamen y Heck, 2008).

La representación de Fourier $X[k]$ para secuencias de duración finita $x[n]$, donde n está dentro del intervalo $[0, N - 1]$, se asumen como señales periódicas fuera de ese intervalo y se realiza mediante las ecuaciones de análisis y de síntesis (35 y 36) de la transformada discreta de Fourier (DFT):

$$\text{Ecuación de análisis: } X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jk\frac{2\pi}{N}n}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (35)$$

$$\text{Ecuación de síntesis: } x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{jk\frac{2\pi}{N}n}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (36)$$

Las ecuaciones de para secuencias de longitud finita no elimina la periodicidad inherente correspondiente a la Transformada de Fourier periódica $X(e^{j\omega})$, es decir, si las ecuaciones de la representación de Fourier secuencias de duración finita se evalúan fuera del intervalo $[0, N-1]$, el resultado no será cero, sino una extensión periódica de $x[n]$ (Oppenheim y Schaffer, 2011).

Transformada de Fourier dependiente del tiempo

La DFT es buena para caracterizar las propiedades (amplitud, frecuencia y fase) de señales estacionarias, es decir, de señales compuestas de sinusoidales cuyas frecuencias no varían en el tiempo. No obstante, a menudo las señales varían sus propiedades con el tiempo. Ejemplo de ello son las señales de radar, sonar, de voz, de almacenamiento de datos y trazas sísmicas. Para este tipo de señales no es suficiente una sola DFT para la descripción de sus componentes de amplitud, frecuencia y fase (Oppenheim y Schaffer, 2011). Para poder estudiar estas señales variantes en el tiempo se introduce la técnica de la transformada de Fourier dependiente del tiempo o transformada de Fourier de tiempo corto (STFT) la cual se define como:

$$X[n, \omega] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[n+m] w[m] e^{-j\omega m} \quad (37)$$

Donde $w[m]$ es una secuencia de ventana. La STFT convierte la función unidimensional $x[n]$, de variable temporal discreta n , en una función en dos dimensiones $X[n, \omega]$ de variable discreta de tiempo n y variable continua de frecuencia ω . La STFT es periódica en ω con periodo 2π , por lo tanto es sólo necesario considerar valores de ω en el intervalo $0 \leq \omega < 2\pi$ o en otro intervalo de longitud 2π (Oppenheim y Schaffer, 2011).

La representación gráfica de la STFT de una señal no estacionaria es el espectrograma. Este gráfico es una representación tridimensional de la distribución de la energía con respecto a las variables tiempo y frecuencia (Sidney Burrus *et al.*, 1998; Oppenheim y Schaffer, 2011). La figura 7 muestra la distribución de la energía en la frecuencia con respecto al tiempo de una señal tipo chirrido ascendente.

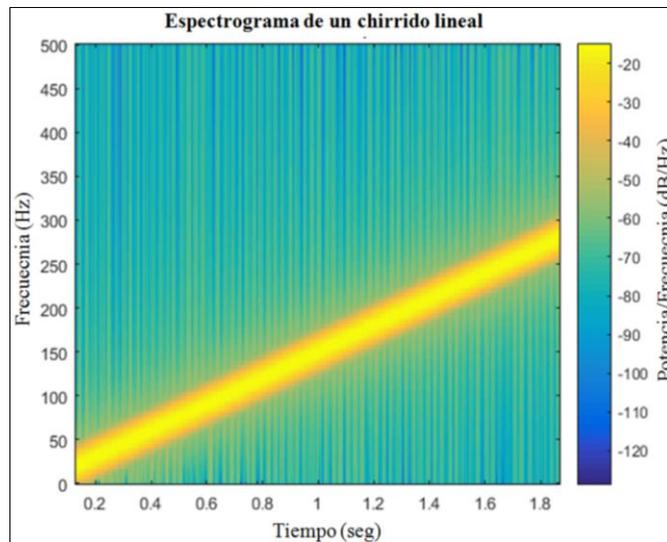


Figura 7. Espectrograma de una señal chirrido (Chirp) lineal. El eje horizontal representa el tiempo en segundos, y el eje vertical muestra la frecuencia en HZ (Modificado de MathWorks, s.f.A).

Según Sheriff (2002) una ventana es la porción de un conjunto de datos seleccionados para un estudio. El propósito principal de la ventana $w[m]$ en la transformada de Fourier dependiente del tiempo es limitar la extensión de la secuencia que se va a transformar, de forma que las características espectrales sean razonablemente estacionarias en el intervalo de duración de la ventana. A medida que la longitud de la ventana decrece la resolución en frecuencia también decrece, sin embargo permite observar cambios en el tiempo. Por otra parte, Si la longitud de la ventana aumenta, será posible separar elementos en el dominio de frecuencia pero se pierde resolución de eventos en el dominio del tiempo. En consecuencia, en el momento de escoger el ancho de ventana se genera un compromiso en la selección de la longitud de la ventana con el objetivo mejorar la resolución en tiempo o en frecuencia.

Otro efecto importante de la ventana se genera en los bordes de la señal que se desea estudiar. En los espectrogramas se puede observar una ausencia de resultados en el inicio y al final del eje del tiempo y que esta ausencia de resultados aumenta con la longitud de la ventana.

Transformada ondícula continúa (CWT)

Según Daubichies (1988) y Grossman y Morlet (1984) una función real o compleja en el tiempo $\psi(t)$, es una ondícula si cumple con las propiedades siguientes:

1. La integral de la función es cero:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (38)$$

2. Si es cuadrado integrable, es decir, su energía es finita:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (39)$$

3. Para que la transformada sea invertible, la ondícula debe cumplir la condición de admisibilidad. Esta condición se obtiene si para la ondícula $\psi(t)$ existe un parámetro C tal que:

$$C \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (40)$$

Donde $\Psi(\omega)$ es la transformada de Fourier de $\psi(t)$ ω es la frecuencia angular. Nótese que hay una importante discontinuidad en $\omega = 0$.

Las ondículas pueden ser soportadas compactadamente, es decir, la ondícula entera tiene duración finita, o pueden no ser soportadas compactadamente. Un ejemplo de las ondículas no soportadas es la ondícula de Morlet. Esta ondícula es construida por la modulación de una función sinusoidal con la función Gaussiana, pero la mayoría de la energía está confinada en un intervalo finito (Rao y Bopardikar, 1998).

Si $x(t)$ es una función cuadrado integrable, su transformada ondícula continua (CWT) es definida como:

$$W(a, b) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{|\sqrt{a}|} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (41)$$

Donde $\psi(t)$ es la ondícula madre, la cual es dilatada y trasladada, a y b son reales y $*$ denota la conjugación compleja, La variable \mathbf{a} es un factor de escala y la variable \mathbf{b} es un factor de traslación en el tiempo (Grossman y Morlet, 1984; Rao y Bopardikar, 1998).

Si se define $\psi_{a,b}(t)$ como:

$$\psi_{a,b}(t) \equiv \frac{1}{|\sqrt{a}|} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (42)$$

Entonces se puede reescribir la CWT como:

$$W(a, b) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (43)$$

Según Rao y Bopardikar (1998), en la relación anterior puede observarse que la CWT es un producto interno de la función $x(t)$ con versiones dilatadas y trasladadas de una ondícula madre $\psi(t)$, es decir, la CWT es un conjunto de correlaciones cruzadas de la función $x(t)$ con la ondícula $\psi(t)$ para distintos factores de escala \mathbf{a} y una convolución para $-\mathbf{b}$. Nótese que si $\psi_a(t) = y(t)$ la CWT se escribe como:

$$\langle x(t) | y(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y^*(t) dt \quad (44)$$

y si:

$$x(t) * y(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t - \tau) dt \quad (45)$$

Entonces la transformada ondícula $W(a, b)$ puede escribirse como:

$$W(a, b) = x(b) * \psi_{a,0}^*(-b) \quad (46)$$

Puryear, Tai y Castagna, (2008) indican que la CWT es esencialmente equivalente a un filtro de banda estrecha de los datos en el dominio del tiempo. Según Daubechies (1992) los valores de escala a determinan el grado en el cual la ondícula es comprimida o dilatada, así que, para bajos valores de a , la ondícula correlaciona mejor y presentará más energía en las altas frecuencias, mientras que, usando altos valores de a , la ondícula correlaciona mejor con bajas frecuencias.

La representación gráfica de la transformada ondícula es el escalograma. Este gráfico es una representación 3D que muestra la distribución de energía de la CWT de una señal en función del eje de escalas y el eje de tiempo. En la figura 8 se observa la distribución de energía en función de las escalas de una señal compuesta por sinusoidales en frecuencias 10 y 40 Hz. En la imagen se puede apreciar que la energía para la frecuencia 10 Hz es mayor para escalas centradas en 50 y la energía para la frecuencia 40 Hz se concentra en escalas alrededor de 10.

Una ondícula muy usada en la CWT es la ondícula de Morlet, cual es definida por Torrence y Compo (1998) como:

$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (47)$$

Donde ω_0 es la frecuencia y es tomada como 2π para satisfacer la condición de admisibilidad. Siendo la frecuencia central de la ondícula Morlet inversamente proporcional a la escala, provee una interpretación de escala a frecuencia.

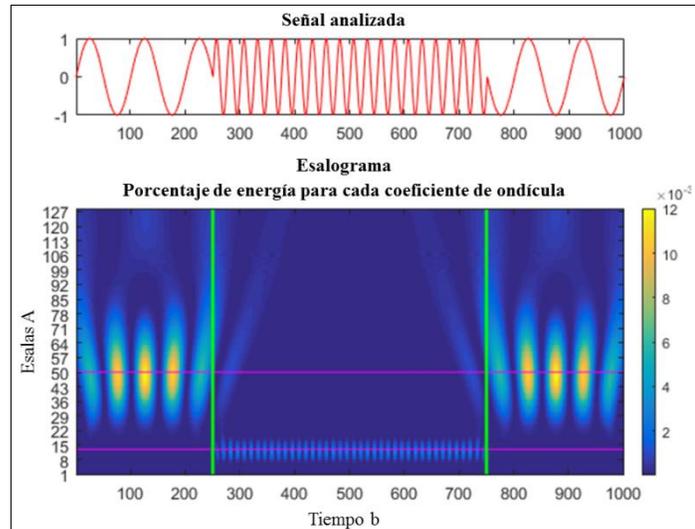


Figura 8. Escalograma de una señal sinusoidal compuesta por dos frecuencias (10 y 40 Hz) en distintos intervalos. Se puede observar como las menores frecuencias tienen mayor energía en escalas mayores y las mayores frecuencias concentran su energía en escalas menores (Modificado de MathWorks, s.f.B).

En geofísica es más común usar el eje de frecuencia que el eje de escala. Sinha *et al.* (2005) indican que la escala representa una banda de frecuencia y no una frecuencia determinada. Una forma de convertir el escalograma a un espectro de frecuencia es usando f_c/f , donde f_c es la frecuencia central de la ondícula. Sin embargo hay formas alternativas para generar paneles de tiempo frecuencia como la Transformada Ondícula Continua en Tiempo-Frecuencia (TFCWT) desarrollada por Sinha *et al.* (2005) o la Transformada S introducida por Stockwell, Mansinha y Lowe (1996).

Transformada S

Stockwell *et al.* (1996) presentan la Transformada S como una “corrección de fase” en la transformada ondícula continua como se indica en la relación 48.

$$S(b, f) = e^{i2\pi fb} W(a, b) \quad (48)$$

Donde la ondícula madre es definida como es ahora definida como:

$$\psi(t, f) \equiv \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} \quad (49)$$

Siendo el factor de escala a el inverso de la frecuencia f . Nótese que la ondícula de la fórmula 49 no satisface la condición de admisibilidad; por lo tanto, la ecuación 48 no es estrictamente una CWT. Explícitamente la transformada S viene dada por la fórmula 50, donde la frecuencia de la ondícula es indicada por f y el parámetro de traslación expresado por la letra b , que describe el punto de tiempo de análisis de la señal $x(t)$, ha sido sustituido por la letra griega τ :

$$S(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (50)$$

Stockwell *et al.* (1996) señalan que la transformada S es una representación del espectro local. Esto significa que una simple operación del promedio del espectro local sobre todo el tiempo debería dar el espectro de Fourier, es decir:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(f, \tau) d\tau = X(f) \quad (51)$$

Siendo $X(f)$ la transformada de Fourier de $x(t)$. Este hecho implica que se puede recuperar la señal $x(t)$ de $S(f, \tau)$ aplicando la transformada inversa de Fourier en la ecuación 52 obteniendo:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} S(f, \tau) d\tau \right\} e^{i2\pi f t} df \quad (52)$$

Descomposición espectral

Partyka *et al.* (1999) indican que transformado los datos sísmicos al dominio de frecuencia usando la transformada discreta de Fourier en una ventana corta, es posible localizar reflexiones delgadas asociadas a características geológicas de espesores variables mediante los espectros de amplitud y fase localizados (figura 9).

El método propuesto consiste en descomponer el volumen sísmico 3D en un conjunto de volúmenes de banda limitada en frecuencia. Este análisis en el dominio de frecuencia es visto como una cuarta dimensión de los datos sísmicos y el objetivo es generar cubos de energía de distintas frecuencias (figura 10).

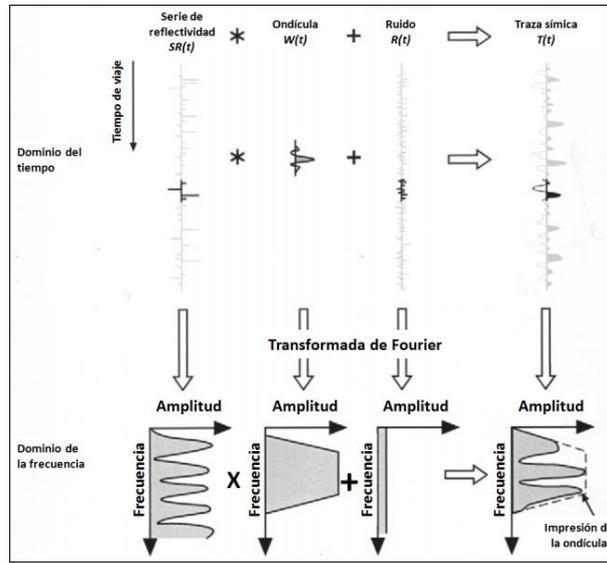


Figura 9. Descomposición espectral de ventana corta. Se muestra el modelo convolucional de un evento con la ondícula más el ruido. La señal resultante tiene espectro de frecuencia de banda limitada (Modificado de Partyka *et al.*, 1999).

Los eventos observables en volúmenes de baja frecuencia están asociados a elementos más gruesos que los volúmenes de altas frecuencias. La figura 11 muestra un esquema de la relación entre las capas delgadas y su observación en distintas componentes espectrales para un canal idealizado.

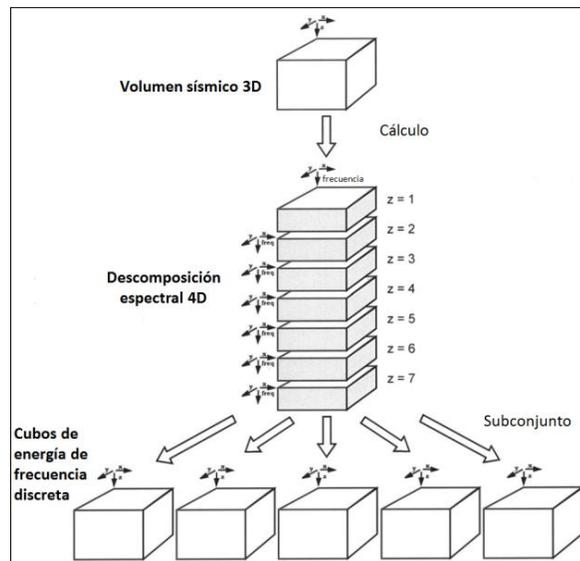


Figura 10. Cubos de energía de frecuencia (Modificado de Partyka *et al.*, 1999).

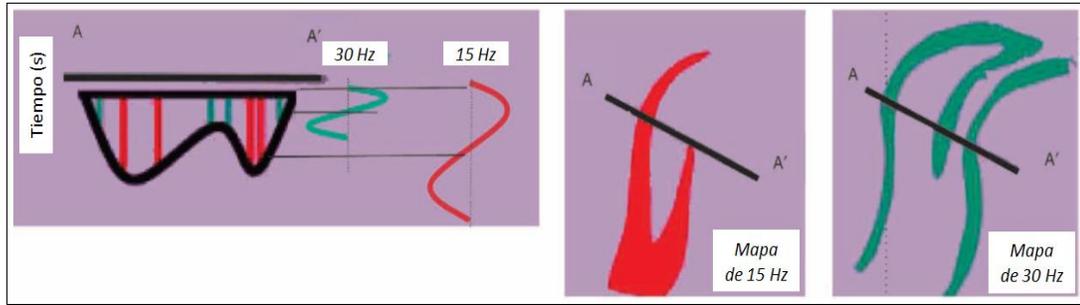


Figura 11. Esquema de la relación del contenido de frecuencia con respecto al espesor de la geología. A la izquierda se muestra una sección vertical compuesta por dos canales, donde los flancos del canal están vinculados a pequeñas longitudes de onda en color verde y el centro de los canales está asociado a mayores longitudes de onda. Al centro es una vista en planta que muestra las componentes de mayores frecuencias y a la derecha se muestra la imagen en planta que muestra las componentes de menores frecuencias (Modificado de Partyka *et al.*, 1999).

Volúmenes resaltantes

Blumentritt y Marfurt (2007) indican que un problema de la aplicación del método de descomposición espectral propuesto por Partyka *et al.* (1999) es que hay que analizar docenas de volúmenes de frecuencia para encontrar la frecuencia óptima que ilumine las características estratigráficas de estudio. Por tal motivo proponen utilizar volúmenes resaltantes. Estos volúmenes consisten en picos de frecuencia (frecuencia dominante) y amplitud (amplitud máxima) dentro de la descomposición de Fourier en ventanas (figura 12). El método propuesto por Blumentritt y Marfurt (2007) se basa en el hecho de que cuando una formación decrece en espesor, los datos sísmicos deben contener mayor frecuencia para poder ser iluminados. Además indican que si el promedio del espectro de amplitud difiere significativamente del pico de amplitud, se está en presencia de una verdadera anomalía.

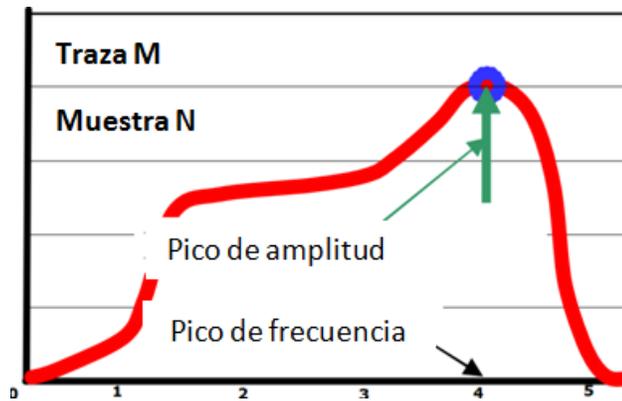


Figura 12. Espectro de amplitud para una traza M y muestras N mostrando la frecuencia en la cual se alcanza la amplitud es máxima (Modificado de Blumentritt y Marfurt, 2007).

Transformada de Hilbert

La transformada de Fourier de $1/t$ es esencialmente la función escalonada. Específicamente la transformada de Fourier de $-1/\pi t$ es $i \cdot \text{sgn}(\omega)$, donde $\text{sgn}(\omega)$ es la función signo, este par es mostrado en la figura 13.

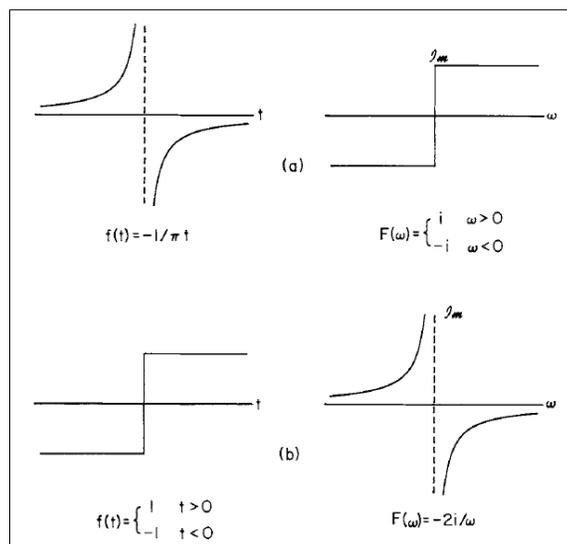


Figura 13. (a) Función $-1/\pi t$ y su transformada de Fourier, (b) función escalón y su transformada de Fourier (Karl, 1989).

Si se convoluciona alguna función $x(t)$ con la función $-1/\pi t$ en el dominio del tiempo, se obtiene la transformada de Hilbert, la cual viene dada por la siguiente integral:

$$HT[x(t)] = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau) d\tau}{t - \tau} \quad (53)$$

Si $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de $x(t)$, debido a que la transformada de Fourier de $-1/\pi t$ es $i \cdot \text{sgn}(\omega)$, la transformada de Hilbert produce un salto de fase de 90° sobre la función $x(t)$. La fase de $X(\omega)$ es adelantada 90° para todas las frecuencias positivas y es atrasada 90° para todas las frecuencias negativas, lo que implica que la transformada de Hilbert es un filtro de cuadratura. La amplitud de $X(\omega)$ permanece sin alteración debido a que el espectro de $i \cdot \text{sgn}(\omega)$ es plano (Karl, 1989; Claerbout, 2004). Taner *et al.* (1979) mencionan que la señal real y la señal en cuadratura tienen las mismas características como coherencia, y relación señal-ruido, diferenciándose sólo por el salto en la fase de 90° .

Señal analítica

La señal o función analítica $g(t)$ de $x(t)$ se construye mediante la suma de una parte real dada $x(t)$ y una parte imaginaria dada por su función en cuadratura como se indica en la siguiente ecuación (Taner *et al.*, 1979; Karl, 1989; Claerbout, 2004):

$$g(t) = x(t) + jHT[x(t)] \quad (54)$$

Atributos instantáneos

Al aplicar la transformada de Hilbert a una traza sísmica $x(t)$, se obtiene la traza analítica $g(t)$ (Taner *et al.*, 1979). Usando la traza analítica $g(t)$ junto a la traza original $x(t)$, se puede calcular la amplitud instantánea, envolvente o fuerza de la reflexión $E(t)$, la fase instantánea $\phi_{\text{inst}}(t)$, la frecuencia instantánea $\omega_{\text{inst}}(t)$ y la frecuencia ponderada (figura 14). (Bracewell, 1965; Taner *et al.*, 1979; Karl, 1989; Claerbout, 2004).

Amplitud Instantánea, envolvente o fuerza de la reflexión

Una alta fuerza de la reflexión $E(t)$ está asociada con cambios litológicos importantes entre las capas de rocas adyacentes, También puede asociarse con

acumulaciones de gas. Variaciones en la fuerza de la reflexión también pueden indicar discordancias, variaciones laterales del espesor de las capas. Cambios locales repentinos pueden indicar fallas o acumulaciones de hidrocarburos (Taner *et al.*, 1979; Liner, 2004). La fuerza de la reflexión viene dada por:

$$A_{inst}(t) = E(t) = |g(t)| = \sqrt{x^2(t) + HT^2[f(t)]} \quad (55)$$

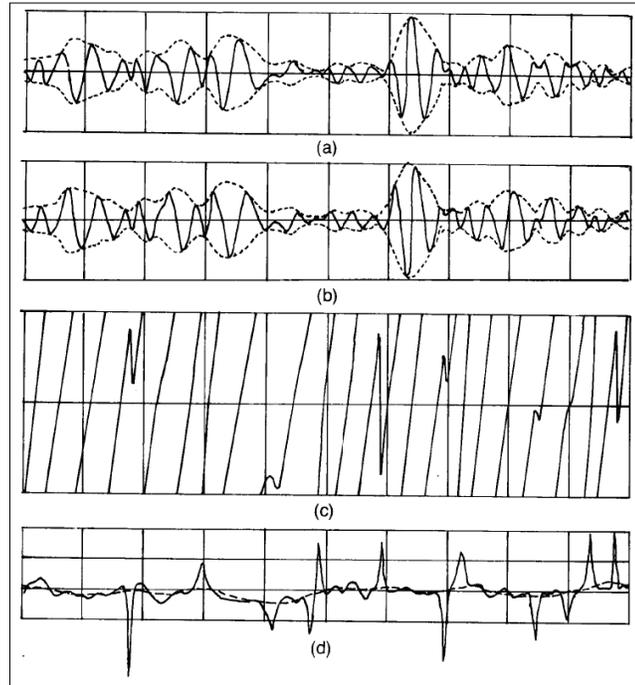


Figura 14. Atributos instantáneos de un segmento de traza sísmica. En los paneles a y b se muestran en línea continua la traza real su cuadratura respectivamente. En punteado se muestra la envolvente. En el panel c se muestra la fase instantánea, y en el panel d se observa en línea continua la frecuencia instantánea y en línea punteada la frecuencia ponderada (Taner *et al.*, 1979).

Fase instantánea

La interpretación de fase instantánea es utilizada para delinear la continuidad de los eventos, la configuración estructural y estratigráfica (Liner, 2004). Taner *et al.* (1979) indican que la fase es eficiente para mostrar discontinuidades, acñamientos, angularidades, y eventos con diferente buzamientos que interfieren unos a otros. La fase instantánea es útil para interpretar límites de secuencia (Payton, 1977). La relación para obtener la fase instantánea viene dada por:

$$\phi_{inst}(t) = \tan^{-1}\left(\frac{HT[x(t)]}{x(t)}\right) \quad (56)$$

El problema con la fase es que esta es una cantidad acotada entre $-\pi$ y π generando discontinuidades. Según Kaplan y Ulrych (2007) el intento de reconstruir la fase fuera de este intervalo se llama fase desenvuelta. Se han definido los algoritmos de desempaqueado de fase, imponiendo condiciones de suavidad a la fase estimada, sumando o restando $2n\pi$ cuando la diferencia entre valores adyacentes de la fase envuelta exceden un umbral dado. En otras palabras, el desenvolvimiento de fase se realiza para expresar la fase fuera del intervalo $-\pi$ y π .

Frecuencia instantánea

La mayoría de las reflexiones son una composición de un número de reflectores individuales muy cercanos. La superposición de estas reflexiones individuales puede producir un patrón de frecuencia que caracteriza la reflexión compuesta. Las características de la reflexión compuesta cambian de la misma forma que un conjunto de capas cambia su espesor o litología (Taner *et al.*, 1979). La frecuencia instantánea permite tener información de la firma de eventos, espesores, absorción y fracturamiento (Liner, 2004).

La ecuación de la frecuencia instantánea viene dada por:

$$\omega_{inst}(t) = \frac{d\phi_{inst}(t)}{dt} \quad (57)$$

No obstante, Taner *et al.* (1979) indican que una forma más conveniente de calcular la frecuencia instantánea es calculando la derivada la función arcotangente:

$$\omega_{inst}(t) = \frac{x(t) \frac{dHT(t)}{dt} - HT(t) \frac{dx(t)}{dt}}{x^2(t) + HT^2[x(t)]} \quad (58)$$

Sombras de baja frecuencia

Un cambio a bajas frecuencia, también conocido como sombra de baja frecuencia, es frecuentemente observado en reflectores que están inmediatamente por

debajo de arenas con Hidrocarburos. Estas observaciones son empíricas y todavía no se explica el mecanismo. Se han propuesto dos posibles razones: (1) Que la arena con gas funciona como filtro pasa bajo porque la frecuencia depende de la absorción o la resonancia natural, o (2) el tiempo de viaje dentro de la arena con gas es mayor por la reducción de la velocidad (Taner *et al.*, 1979).

Chopra y Marfurt (2007) señalan que ha sido frecuente la observación de sombras de baja frecuencia en amplitudes anómalas y que estas sombras están asociadas con la presencia de yacimientos de gas. El termino sombra se refiere a una reducción de la frecuencia sísmica vista por debajo de los yacimientos de gas. Tales sombras son causadas por fuertes atenuaciones de la energía de las altas frecuencias. Mientras más grueso sea el yacimiento de gas, mayor es la atenuación.

Atributo de energía y pseudo-relieve

Según Oppenheim y Willsky (1996), Ingle y Proakis (2006), Oppenheim y Schafer (2011), entre otros, la energía E_x de una señal $x(t)$ viene dada por la ecuación 59:

$$E_x = x(t)x^*(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \quad (59)$$

Donde el símbolo * denota la conjugación compleja.

Según Brown (2011) la energía es el cuadrado de la amplitud sísmica y esta provee información de la reflexión. Esta información permite resaltar paquetes asociados a configuraciones estratigráficas con diferente fuerza de reflexión y mejorar la observación de puntos brillantes.

El pseudo-relieve es la cuadratura del atributo de energía, este atributo ofrece una mejor correlación de eventos sísmicos y ayuda a delimitar mejor las fallas, canales y puntos brillantes, además el pseudo relieve normalmente aumenta el contenido espectral de las bajas frecuencias (OpendTect, 2015).

CAPÍTULO III

MARCO GEOLÓGICO

En esta sección se hace una descripción del entorno geológico de la Formación Roblecito dentro del campo de producción de Gas Copa Macoya. Esta descripción contempla la evolución tectónica de la Cuenca Oriental de Venezuela, haciendo énfasis en la estratigrafía de la Subcuenca de Guárico. Finalmente se realiza una descripción de la Formación Roblecito y del sistema petrolero de la región.

Evolución tectonoestratigráfica

Daal *et al.* (1989), Eva, Bruke, Mann y Wadge (1989), Parnaud *et al.* (1995), Yoris y Ostos (1997), Di Croce *et al.* (1999) y Audemard y Serrano (2001) describen cuatro eventos importantes de la evolución tectónica de la Cuenca Oriental: (1) Una fase de preapertura continental (*pre-rift*) de edad Paleozoica; (2) una fase de apertura continental (fase *syn-rift*) de edad jurásica y cretácico temprano que dio pie a la formación del Graben de Espino; (3) un margen pasivo de edad Cretácico-Paleógeno y (4) una fase antepaís (*foredeep*) consecuencia de la colisión oblicua de edad Paleógeno/Cuaternario. En la figura 15 se muestra un esquema de la evolución de los márgenes pasivos y activos en toda Venezuela.

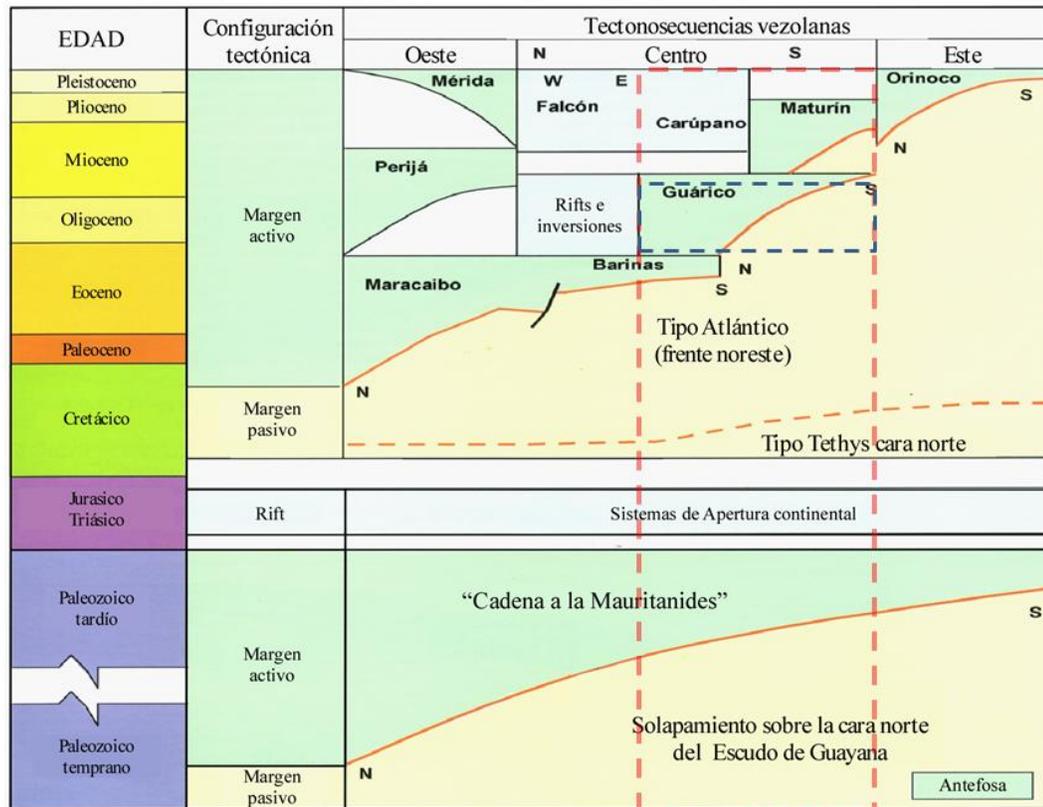


Figura 15. Evolución de los márgenes pasivos y activos en Venezuela. El rectángulo rojo indica la evolución en la Subcuenca de Guárico y en rectángulo azul muestra la evolución en la Formación Roblecito (Modificado de Audemard y Serrano, 2001).

Megasecuencia preapertura oceánica “Pre-rift”

La zona en donde se formó la cuenca Oriental fue parte del supercontinente Pangea (figura 16, arriba), y basado en los ambientes y tasa de sedimentación de las rocas que se depositaron se sugiere que esta área es de edad paleozoica (Cámbrico inferior) y de ambiente continental a marino marginal antes del rift. (González de Juana *et al.*, 1980; Feo, Smith, Aboud y Di Giacomo 1984)

Esta secuencia de preapertura oceánica fue identificada mediante el uso de perfiles sísmicos (figura 17) y está compuesta de sedimentos de ambientes marino-costeros asociados con las formaciones Carrizal y Hato Viejo de la Subcuenca de Guárico. Esta secuencia alcanza esta alrededor de los 3000-5000 m de espesor (Parnaud *et al.*, 1995).

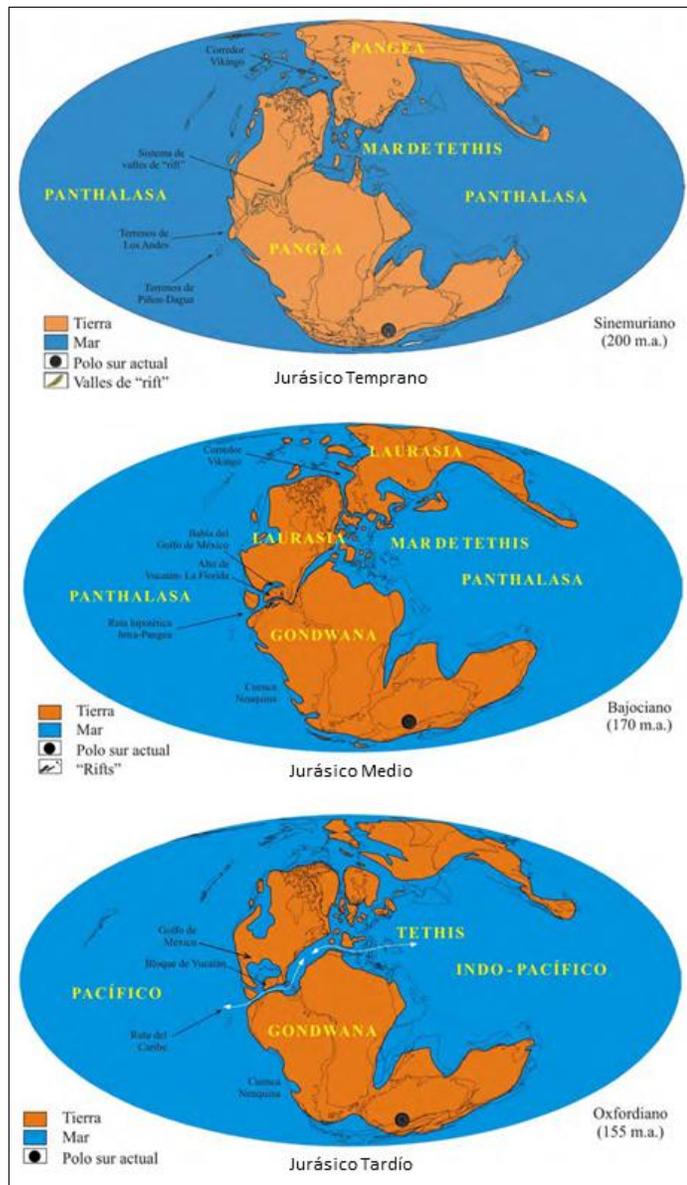


Figura 16. Mapas paleográficos del Jurásico Temprano (arriba), Jurásico Medio (medio) y el Jurásico Tardío (abajo). En el Jurásico Temprano la paleografía es similar a la del supercontinente Pangea, existiendo un limitado grado de fracturamiento y dispersión continental. En el Jurásico Tardío se ha separado Laurasia de Gondwana y da inicio a un margen pasivo (Modificado de Iturralde-Vinent, 2003).

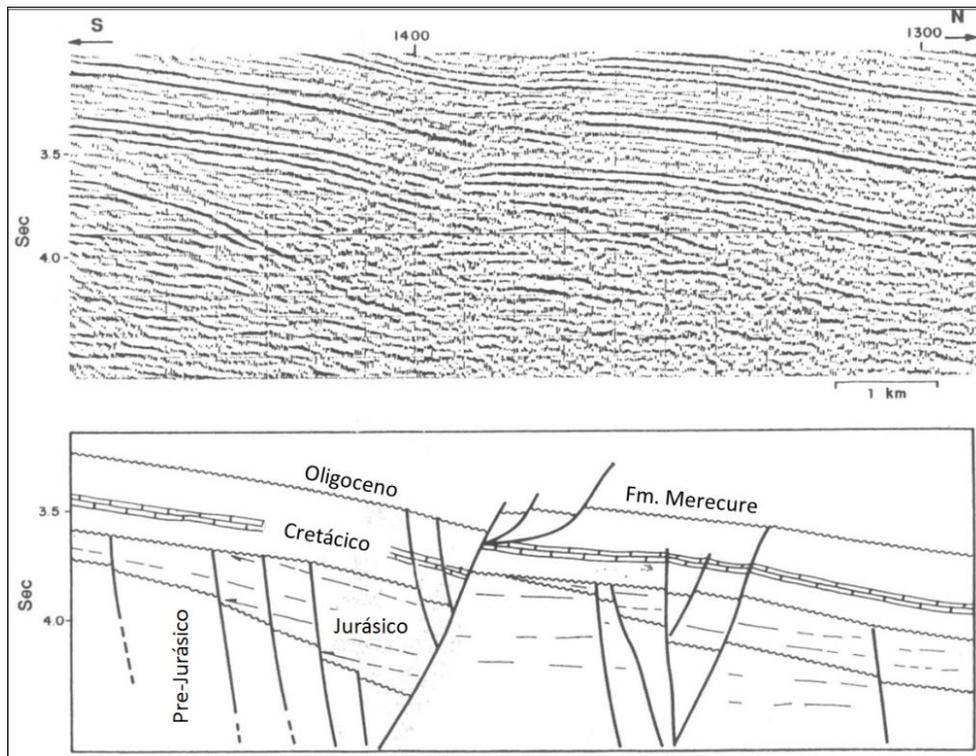


Figura 17. Perfil sísmico y su interpretación estructural de la secuencia Jurásico-Cretácico (Modificado de Parnaud *et al.*, 1995).

Apertura continental “*Rifting*”

Según Parnaud *et al.* (1995) la megasecuencia de rift fue desarrollada entre el Jurásico Tardío (figura 16, abajo) y el Cretácico Temprano. Está definida por la generación de estructuras típicas de regímenes tectónicos extensionales como graben y horst, la generación de corteza oceánica al norte y una discordancia regional hacia el cratón. Esta megasecuencia es sísmicamente reconocida por el semi-graben (figura 17) y alcanza alrededor de 3600 m de espesor.

Luego de la separación de Laurasia con Gondwana, se generó un sistema de fallas extensionales en el margen norte de Suramérica. La evidencia de este proceso se encuentra en la base de la cuenca Oriental, en la cual durante el Jurásico se depositó una espesa secuencia de capas rojas equivalentes a la formación La Quinta, la cual está ubicada al este de la cuenca en el Graben de Espino (Moticska, 1985).

Margen pasivo

Se inicia en el Cretácico temprano y finaliza en el Paleógeno en la instalación de un margen activo del Eoceno. Se depositan rocas clásticas marinas originadas por la subsidencia tectónica del margen pasivo. El cretácico tardío presenta intervalos de unidades carbonáticas pertenecientes a la Fm Tigre, miembros Infante (caliza “N”) y Guavinita. Esta acumulación de carbonatos marca el avance de la máxima transgresión. Posteriormente durante el Eoceno Superior, debido a la transgresión generalizada, comienza la acumulación de las areniscas parálicas de la Fm La Pascua, seguida de lutitas de aguas marinas someras de la Fm Roblecito (Parnaud *et al.*, 1995; González de Juana González de Juana, Iturralde y Picard, 1980; Patterson y Wilson, 1953; LEV, 1997).

Colisión oblicua

Mann (1999) describe la existencia de dos modelos que explican la evolución de la placa Caribe. El primer modelo Frisch, Meschede y Sick (1992) proponen que el Caribe se formó durante el periodo 130-80 millones de años atrás por una traslación de la placa Suramericana en dirección al sur alejándose de Norte América. Esta separación generó el espacio necesario para que aflorase material ígneo entre los dos continentes el cual formó una corteza anómalamente espesa que se convirtió el Caribe y Centroamérica.

Un modelo alternativo formulado por Wilson (1966) y posteriormente elaborado por Malfait y Dinkelman (1972), Ross y Scotese (1988), Pindell y Barrett (1990), considera una Placa Caribe móvil, de edad cretácica, originada en el Pacífico este y que es desplazada a su posición actual en el espacio libre entre Suramérica y Norteamérica (figura 18). Este desplazamiento generó una colisión oblicua entre placas Caribe y Suramérica y cuya interacción controla el marco tectónico del margen norte de Venezuela.

depositaron en esta fase se encuentran la formación Roblecito (Oligoceno) y Chaguaramas (Oligoceno-Mioceno) (Pérez, 2009A)

Cuenca Oriental de Venezuela

La Cuenca Oriental de Venezuela es la más extensa de Venezuela, con más de 150.000 km² y alcanza una extensión de 200.000 km² si se incluye su región costa afuera. La cuenca es asimétrica y alargada, contiene hasta 8 km de espesor de sedimentos de edad Terciaria. Debido a su producción y reservas, es una de las importantes del país. Ella está ubicada dentro de la ventana geográfica 61-66°W de longitud y 8-11°N de latitud, abarcando los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, Sucre y Delta Amacuro, y se extiende al este por la Plataforma Deltana y sur de Trinidad. Su frontera norte es la cordillera del Caribe, al sur el cratón de Guayana delineado por el Río Orinoco, al este la plataforma del delta del Río Orinoco y al oeste el Arco del Baúl. Topográficamente se caracteriza por extensas llanuras y una zona de mesas en Anzoátegui y Monagas (González de Juana *et al.*, 1980; Méndez, 1985; Kiser 1992; Yoris y Ostos., 1997; Di Croce, Bally y Vail, 1999).

La Cuenca Oriental de Venezuela está dividida en dos subcuencas: La Subcuenca de Guárico al oeste y la Subcuenca de Maturín al este (figura 19); siendo estas separadas por estructuras complejas asociadas con el sistema de fallas de Anaco (Yoris y Ostos., 1997; Di Croce *et al.*, 1999)

Pérez (2009A) nombra los elementos estructurales más importantes que sugieren la evolución de la Cuenca oriental de Venezuela, destacando el corrimiento frontal de Guárico, el corrimiento de Anaco, El corrimiento de Pirital, la Serranía del Interior Oriental, la Falla del pilar, la falla de San Francisco, la Falla de Urica y el sistema de fallas del flanco sur de la cuenca (figura 20).

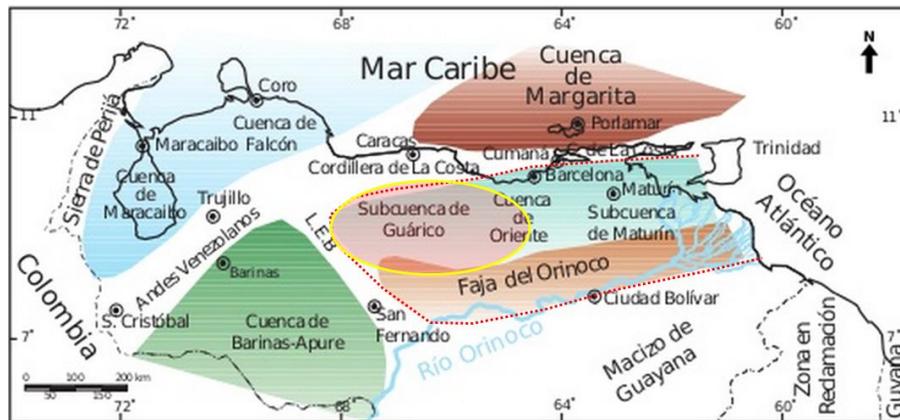


Figura 19. Cuencas petrolíferas de Venezuela basado en la distribución de sus provincias sedimentarias. Se identifica la ubicación de la Cuenca Oriental de Venezuela en el polígono punteado en rojo y la Subcuenca de Guárico en el óvalo amarillo. (Modificado de Yoris y Ostos., 1997)

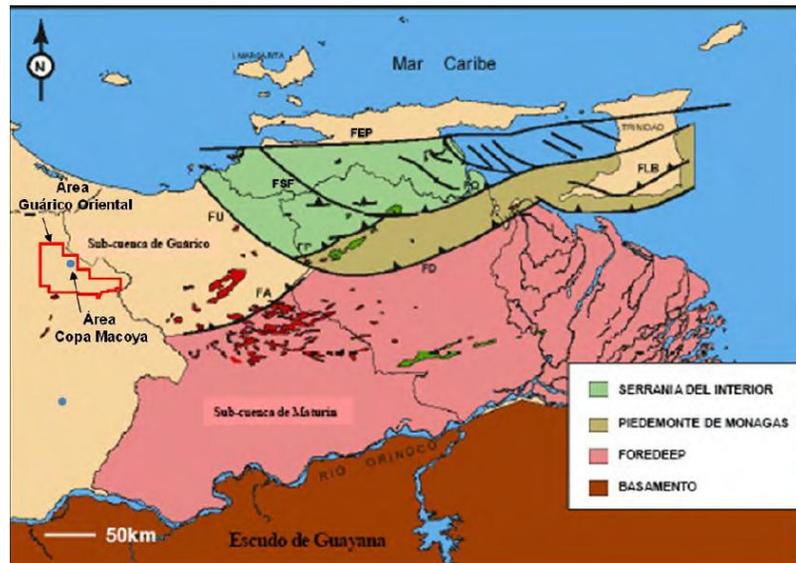


Figura 20. Principales elementos de estructurales de la Cuenca Oriental de Venezuela. En el mapa se muestra la Falla de El Pilar (FEP), Falla de San Francisco (FSF), Falla de Pirital (FP); Falla de Urica (FU), Falla de Los Bajos (FLB), Falla de Anaco (FA) y el frente de deformación (FD). Tomado de Hung 1997, en Pérez (2009B)

Subcuenca de Guárico

La Subcuenca de Guárico abarca todo el estado Guárico y parte del estado Anzoátegui. Está ubicada en la zona más occidental de la Cuenca Oriental de Venezuela cubriendo un área de 49.895 km² (Kiser, 1992; Schenk, 2000). Según

Yoris y Ostos (1997) la subcuenca limita al norte con el corrimiento de la cordillera del Caribe donde se ubica el sistema de fallas de Guárico, el cual empuja rocas cretácicas y terciarias, originando un marco tectónico complicado. Al sur limita con el Escudo Guayanés en una estructura más sencilla, con evidencias de depresiones estructurales en las que se almacenaron rocas jurásicas y paleozoicas, y con un acuñamiento de las secuencias cretácicas y terciarias (figura 21). Al oeste con el arco de El Baúl y al este con la subcuenca de Maturín separada por el Arco de Urica.

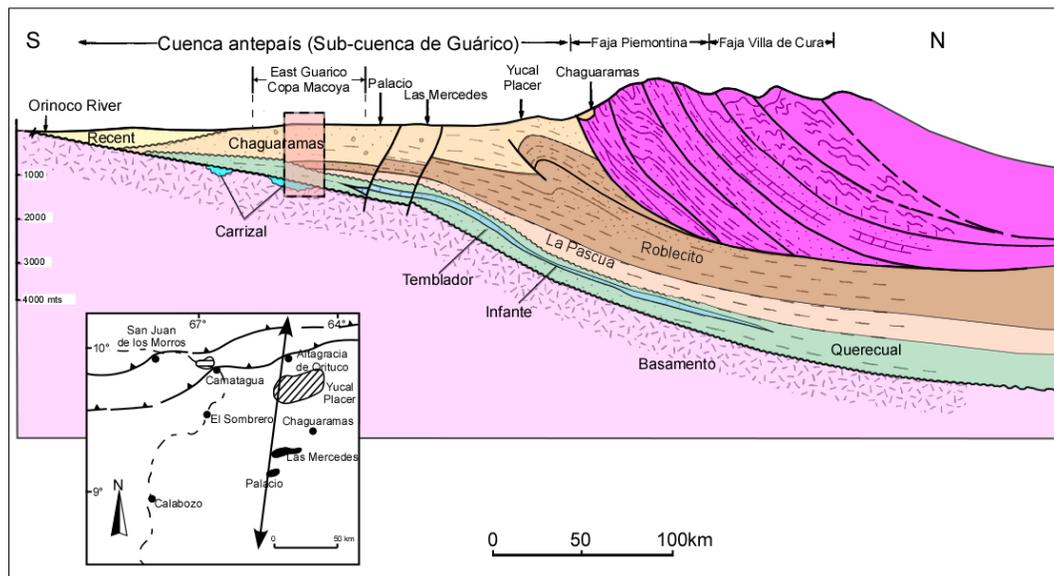


Figura 21. Corte geológico en el frente de montañas de Guárico. En el rectángulo anaranjado se indica la zona de estudio (Modificado de Chigne, 1989).

El rumbo estructural de la cuenca tiene variaciones noreste-sureste en el Cretácico, este-oeste en el Oligoceno, y norte-sur en el Mioceno. Estos cambios se deben al fuerte basculamiento de la cuenca hacia el este iniciando en el arco de El Baúl. La estructura actual de la cuenca se originó a principios del Oligoceno mediante la convergencia entre las placas Caribe y Suramérica generando un hundimiento compresivo de la corteza permitiendo la transgresión desde el noreste de las lutitas pelágicas de la Formación Roblecito (Kiser, 1992).

Los principales campos petroleros son Palacio, Las Mercedes, Yucal-El Placer, Tucupido, El Jobal, Socorro, Copa Macoya y Yucal-El Placer, siendo el último un campo de gas por excelencia.

Estratigrafía local

La figura 22 muestra la columna estratigráfica dentro del área de estudio a partir del Paleoceno hasta el presente. Esta columna está basada en Arnstein, Cabrera y Russomanno (1985), Daal *et al.* (1989) y resultados de estudios palinológicos de Teikoku (2004). El campo de producción está representado de base a tope en el Terciario por las formaciones La Pascua, Roblecito y Chaguaramas. Según INPEX (2009) en la bibliografía no existe un acuerdo a la hora de establecer edades específicas para cada formación. Las formaciones Roblecito y Chaguaramas son actualmente productoras de hidrocarburos.

La Formación La Pascua descansa directamente por encima de sedimentos cretácicos y representa la base de la secuencia transgresiva de edad Eoceno Tardío-Oligoceno Medio. Ella está compuesta de una alternancia de sedimentos clásticos (lutitas y areniscas inter-estratificadas) de ambiente fluviales a costeros.

La Formación Roblecito está ubicada por encima y de forma concordante de la Formación La Pascua. En ella continua la sedimentación durante el evento transgresivo. Dentro del área de estudio, la Formación Roblecito está compuesta por intercalaciones de areniscas, lutitas, limolitas y algunos de carbones de ambientes costeros. Datos de núcleos han confirmado la presencia de bioturbaciones, secuencias grano crecientes y grano decrecientes que han sido interpretados como depósitos asociados con ambientes deltaicos a marino marginal.

La Formación Chaguaramas está ubicada por encima y de forma concordante con la Formación Roblecito. Esta representa depósitos de relleno de la subcuenca de Guárico que van desde el Oligoceno Tardío hasta el Mioceno Medio y están asociados la fase regresiva que se dio en un periodo de relativa estabilidad tectónica (Teikoku, 2004). Litológicamente la formación está constituida por intercalaciones de

areniscas, lutitas, limolitas y una importante presencia de lignitos. Usando datos de pozos, se ha hallado muestras de canal e indicaciones de capas delgadas de calizas no continuas y con distribución irregular en la secuencia. Según interpretaciones de núcleos, el ambiente sedimentario es de tipo deltaico (Teikoku, 2004).

Edad		Formación	Espesor (m)	Litología
Neógeno	Pleistoceno			Arena y Grava
	Plioceno			
		Superior		
	Mioceno	Chaguaramas	600-1.400	
Inferior				
Paleógeno	Oligoceno	Roblecito	1.000-1.500	Secuencia gruesa de lutitas marinas con arenas turbidíticas en el medio y arenas de plataforma en la parte inferior.
		La Pascua	300-430	Lutitas y areniscas interestratificadas, Arenas de plataforma marina superior
	Eoceno			
	Paleoceno			
Cretácico	Superior	Guavinita	250	Calizas finas, areniscas y cherts.
		Infante		Calizas fosilíferas.
		La Cruz		
Inferior	Canoa		Areniscas y lutitas.	
Jurásico		"G. Espino"	+3.000	Capas rojas. (Equivalente a la Fm. La Quinta).
Triásico				
Paleoceno		Carrizal	+1.827	Lutitas, limolitas y areniscas.
		Basamento igneo		

Figura 22. Columna estratigráfica y su litología dentro de la zona de estudio (Basada en Arnstein *et al.* (1985), Daal *et al.* (1989) y Teikoku (2005)).

Según Pérez (2009B) estudios regionales previos (Teikoku, 2004) muestran paleo ambientes de llanuras costeras para la época de depositación de la Formación Chaguaramas. Además mediante estudios palinológicos, se dividió la Formación

Chaguaramas en tres niveles: Chaguaramas Inferior (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior), Medio (Mioceno Inferior) y Superior (Mioceno medio).

Formación Roblecito

Geográficamente, La Formación Roblecito se extiende sobre la mayor parte de la cuenca de Guárico y aflora en el sector noroccidental. También existen afloramientos interrumpidos en la zona de corrimientos del frente de montañas de Guárico. Su edad varía desde el Eoceno Tardío hasta el Mioceno Temprano, sin embargo, la misma está restringida al Oligoceno sobre la mayor parte de la cuenca (LEV, 1997). Su espesor es 460-580 m en el área mayor Las Mercedes y varía desde su acuñaamiento estratigráfico contra el Alto Monasterios (Arco El Baúl) al sureste hasta más de 2.130 m al noroeste, al sur del piedemonte; aparentemente, continúa engrosándose por debajo de la Serranía del Interior occidental (Patterson y Wilson, 1953). Peirson (1965) estima un espesor de más de 2.440 m en esa dirección.

El contacto La Pascua-Roblecito es transicional, tanto horizontal como verticalmente. Igualmente, el contacto de Roblecito con Chaguaramas, en el subsuelo, es transicional sobre un intervalo relativamente corto (LEV, 1997).

Según Méndez (1985) la Formación Roblecito se caracteriza por lutitas marinas de color gris oscuro a negro, se correlaciona con la parte basal de la Formación Merecure de los campos de Anaco y Oficina. Hacia el este, transgrede de forma diacrónica en el área de Barcelona y se hace equivalente a la Formación Areo, de edad Oligoceno medio.

González (2009) menciona que las arenas de la parte superior marcan el inicio de ambientes marinos de menor profundidad, tendencia que se acentuará durante la sedimentación de la Formación Chaguaramas suprayacente. La parte inferior ha sido interpretada, en base a palinología y sedimentología, como el reflejo de sedimentación costera y de llanura costera, mientras que la parte superior refleja un paleo ambiente costero a marino costero. Al norte de la unidad de Guárico Este, el paleo ambiente de la Formación Roblecito fue algo más marino, y la línea de la costa

se ubicó en la parte norte de la unidad, pasando a menudo a través del área de Copa Macoya. El espesor de la formación en el área de Copa Macoya es de unos 1000 – 1100 pies; hacia el sur, el espesor se reduce especialmente por acuñamiento pero también por cambios laterales de facies.

La Formación Roblecito ha sido considerada como una posible roca madre de petróleo y gas en Guárico, debido a que sus lutitas ricas en materia orgánica fueron depositadas en ambientes de aguas tranquilas sin acción de olas y corrientes, además de haber sido sometidas a enterramiento y condiciones geoquímicas favorables para la generación de hidrocarburos (Méndez, 1985). Económicamente, Las areniscas de la formación constituyen importantes yacimientos de hidrocarburos de gas y petróleo (LEV, 1997).

Los principales yacimientos de gas natural no asociado del campo Copa Macoya se encuentran en la Fm. Roblecito, a una profundidad entre 6.000-7.000 pies, con una porosidad aproximada de 20% y una permeabilidad típica alrededor de los 200 md. El gas producido es seco, sin embargo presenta un contenido de condensado (González, 2009).

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En esta sección se explican los procedimientos que se realizaron para la elaboración de los objetivos establecidos. La figura 23 presenta un diagrama de flujo de las principales actividades que fueron desarrolladas y son explicadas con más detalle a continuación.

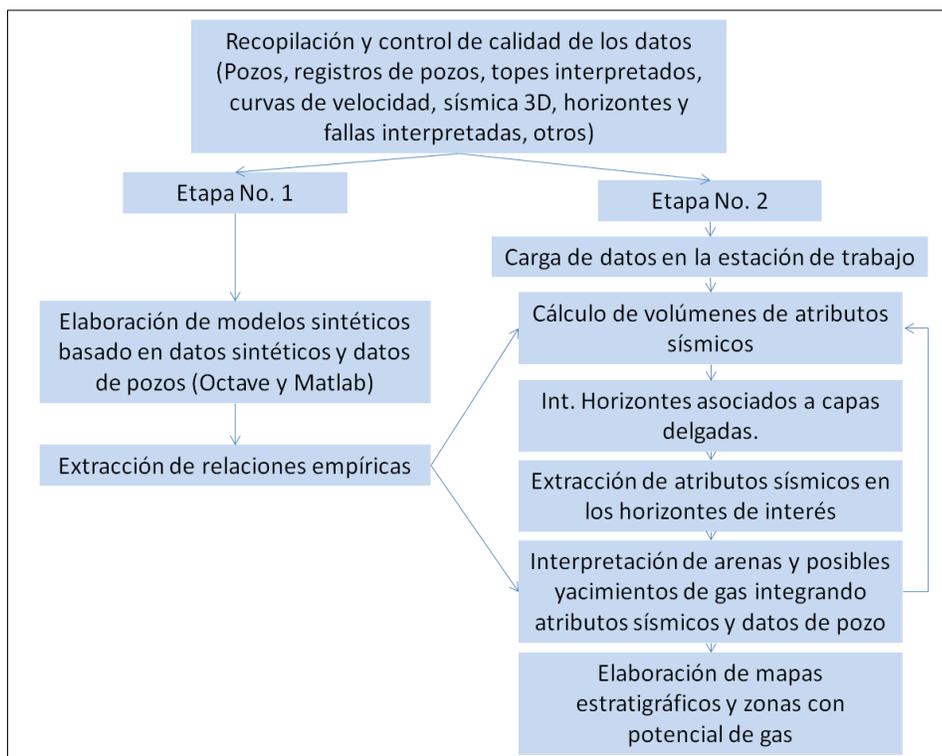


Figura 23. Diagrama de flujo de las principales actividades a realizar. La metodología está dividida en dos etapas principales, la primera tiene como objetivo obtener relaciones que vinculen modelos geológicos con atributos sísmicos y la segunda tiene como objetivo la interpretación de los atributos.

Recopilación y control de calidad de los datos

En este apartado se realizó la recopilación y cuantificación de los datos e información disponibles para la realización del proyecto. El tipo de datos básicos requeridos para este estudio son los datos sísmicos y registros de pozo donde se pueda obtener la densidad y las velocidades de onda P y S de medio. Además, para

finde de interpretación, es importante tener toda la información geológica disponible desde escala regional hasta escala local, datos de pozos (registros, desviación, tiros de verificación sísmica, etc.).

Es indispensable conocer las coordenadas y el *datum* geográfico, así como, la elevación y *datum* de cada tipo de dato disponible. En este proyecto todos los datos fueron referenciados al *datum* oficial de Venezuela (SIRGAS-REGVEN) y la elevación fue referenciada al nivel del mar, excepto en los casos que se trabajó con la profundidad medida en pozo expresada como “*MD*” por su siglas en inglés. No obstante, por razones de confidencialidad, los mismos fueron modificados u omitidos.

La figura 24 muestra el mapa base y los datos disponibles dentro del área de estudio. En el mapa se delimita el campo Copa Macoya por el polígono rojo, en azul se muestra la combinación de dos levantamientos sísmicos 3D, donde el polígono punteado en color morado delimita el volumen sísmico piloto CM3D02, adquirido en el año 2002, con un área de 25 km², tamaño de celda (*Bin*) 25x25 m y cobertura nominal de 2400%; y el resto del polígono representa el área del volumen sísmico CM3D06 con fecha de adquisición 2007-2008 y un área de 136 km², tamaño de celda (*Bin*) 20x20 m y cobertura nominal de 4000%. El procesamiento sísmico del volumen CM3D06 se realizó de manera tal de integrar la geometría de ambos levantamientos sísmicos en un solo volumen apilado con área total de 161.18 km², mallado final de orientación de Norte franco, y tamaño del bin es de 20 x 20 m (EXGEO, 2008).

Al volumen sísmico integrado por los dos volúmenes CM3D02 y CM3D06 se le realizó un post-procesamiento para suprimir las llamadas huella de adquisición o “footprint” que es “la influencia de la geometría de grabación en las amplitudes de las reflexiones sísmicas” (EXGEO, 2008).

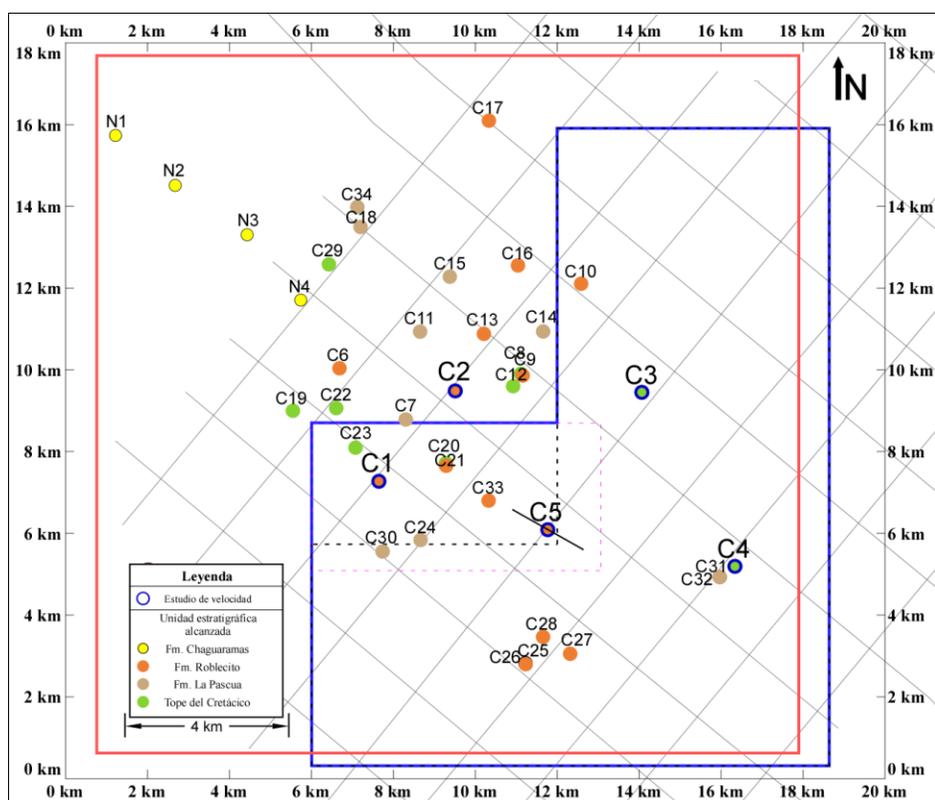


Figura 24. Datos disponibles en el área de estudio.

Adicionalmente, el mapa muestra la ubicación de 38 pozos con un código de color que indica la formación alcanzada en la perforación y si el pozo posee datos de velocidad. De los pozos en el área 34 perforaron la Fm. Roblecito, razón por la cual se descartaron los cuatro pozos N1, N2, N3 y N4. Los pozos C1, C2, C3, C4 y C5 poseen curvas T-Z, además el pozo C5 cuenta con un perfil sísmico vertical tipo *walk away* de 2 km de longitud horizontal. El pozo C2 no está dentro de ningún volumen sísmico, los pozos C1 y C5 están ubicados en el volumen sísmico CM3D02 piloto, mientras los pozos C3 y C4 están localizados al este del volumen sísmico CM3D06.

Etapa N° 1: Estudio de modelos sintéticos

Esta etapa consistió en la elaboración de modelos sintéticos y el cálculo de sus atributos sísmicos para poder determinar relaciones que puedan ser usadas para la interpretación de datos sísmicos reales. Los modelos y procesos fueron realizados usando los programas Matlab y GNU Otave.

Inicialmente, se construyó una señal mediante la suma de dos señales tipo chirrido cuyo contenido de frecuencia es conocida y se le calculó los atributos sísmicos de energía, descomposición espectral y atributos instantáneos. Posteriormente, se generó modelos sintéticos 1D y modelos de cuna usando velocidades y densidades extraídas de los registros de pozos de pozos, y sismogramas sintéticos de los pozos C1, C3, C4 y C5. A todos estos modelos también se le calculó sus atributos y se anotó resultados de interés.

Modelo sintético: Suma de chirridos o señal compuesta

Se generó una señal basada sólo en elementos matemáticos y con conocimiento exacto de su comportamiento en frecuencia para poder observar la capacidad de los atributos en la extracción de información eliminando cualquier fuente de error asociada a elementos geológicos o de la ondícula.

Generación de la señal

La señal chirrido (*chirp*) es un barrido de frecuencia que puede ser ascendente o descendente, donde la frecuencia instantánea en el tiempo inicial T_0 es f_0 y la frecuencia instantánea en el tiempo final T_f es f_f . Según Oppenheim y Schaffer (2011) la señal chirrido está definida en el tiempo continuo como:

$$x_c(t) = \cos(\theta(t)) \quad (60)$$

En Matlab y GNU Octave se puede construir las funciones chirrido en tiempo discreto usando la instrucción $Y = \text{chirp}(T_0, f_0, T_f, f_f)$. La señal de estudio que se construyó (figura 25 izquierda) es una suma de dos chirridos, uno ascendentes y otro descendente con frecuencias que varían linealmente entre 10 y 60 Hz. Las señales fueron generadas en un intervalo de tiempo entre 0.0 y 0.4 segundos, usando un intervalo de muestreo similar al de los datos sísmicos de 2 ms.

Al lado derecho de la figura 25 se graficó el espectro de amplitud obtenido de la *fft* (siglas en inglés de la transformada rápida de Fourier) de las señales generadas.

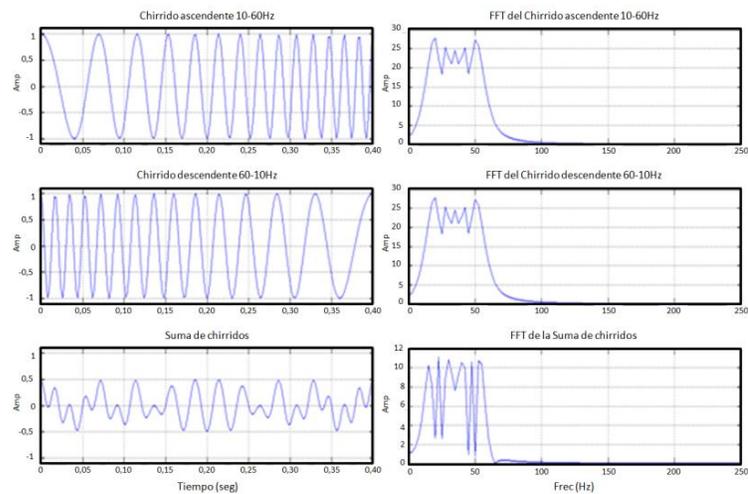


Figura 25. Señal compuesta (izquierda y abajo) construida por la suma de dos señales tipo chirrido, una de frecuencia ascendente 10-60 Hz (izquierda y arriba) y otra de frecuencia descendente 60-10 Hz (izquierda y centro) con sus respectivos espectros de amplitud a la derecha. Se puede observar que los espectros de amplitud de las señales chirrido son idénticos y similares al espectro de amplitud de la señal compuesta.

Cálculo de los atributos de la señal compuesta

Para evaluar la señal compuesta se calculó tres tipos de atributos: atributos de análisis tiempo frecuencia, atributos instantáneos, y atributos de energía. Debido a que en esta sección sólo se explican los procesos realizados, solamente se mostraron los atributos de análisis tiempo-frecuencia correspondientes a la transformada en tiempo corto (*STFT*) con ventana de análisis de 14 ms. Los resultados y análisis de la *STFT* con ventanas 14, 28, 42, 56 ms, la transformada ondícula (*CWT*) y transformada S (*ST*) son presentados en la sección Análisis de Resultados.

Descomposición espectral

Los atributos calculados a la señal de estudio son la transformada de Fourier dependiente del tiempo o de tiempo corto (*STFT*) con ventanas de análisis de 14, 28, 42 y 56 ms, usando la función *specgram*, la transformada ondícula de continua (*CWT*) usando la ondícula compleja de Morlet mediante la instrucción *cwt* (sólo funciona en Matlab), y la transformada S usando la instrucción *mm_st* programada por Stockwell *et al.* (1996). La figura 26 muestra el espectrograma de amplitud de la

STFT con ventana de estudio de 14 ms. La paleta de color usada para la Amplitud es la paleta *jet* que va de azul para los valores más bajos y rojo los valores más altos.

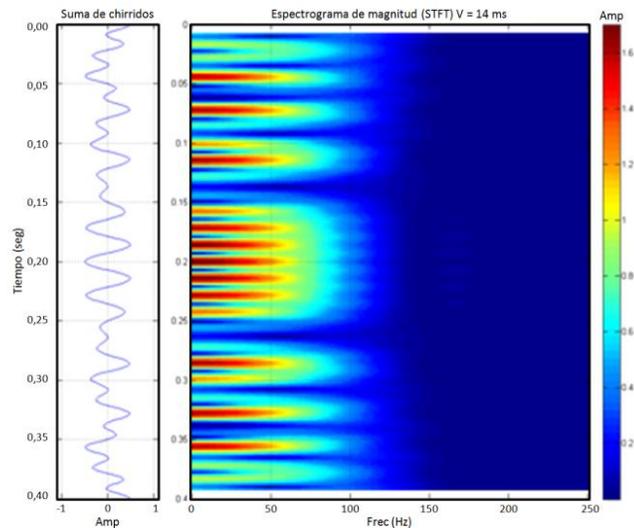


Figura 26. Espectrograma de la *STFT* con ventana de estudio de 14 ms de la señal compuesta.

Una vez desplegados los espectrogramas o escalogramas se procedió a extraer sus atributos resaltantes, picos de frecuencia o escala y amplitud máxima (figura 27) e imágenes mezcladas *RGB* (figura 28).

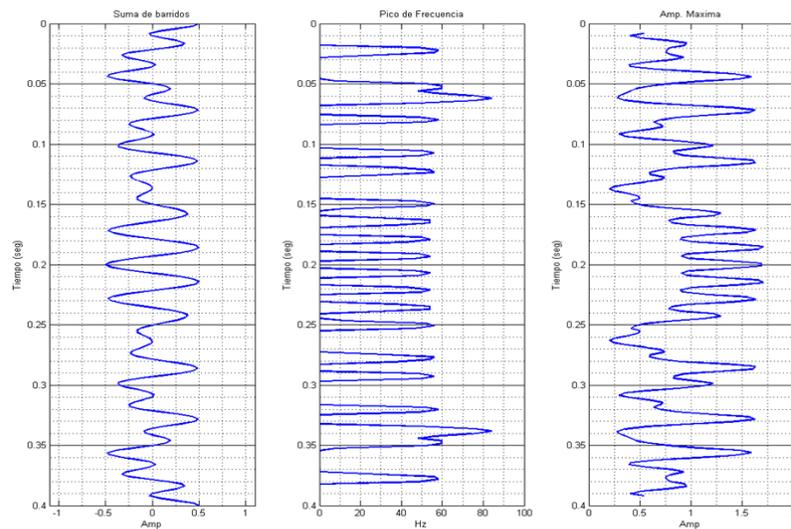


Figura 27. Atributos resaltantes extraídos de la *STFT* con ventana de 14 ms de la señal compuesta. De izquierda a derecha se despliega la señal original, los picos de frecuencias en Hz y la amplitud dominante, respectivamente.

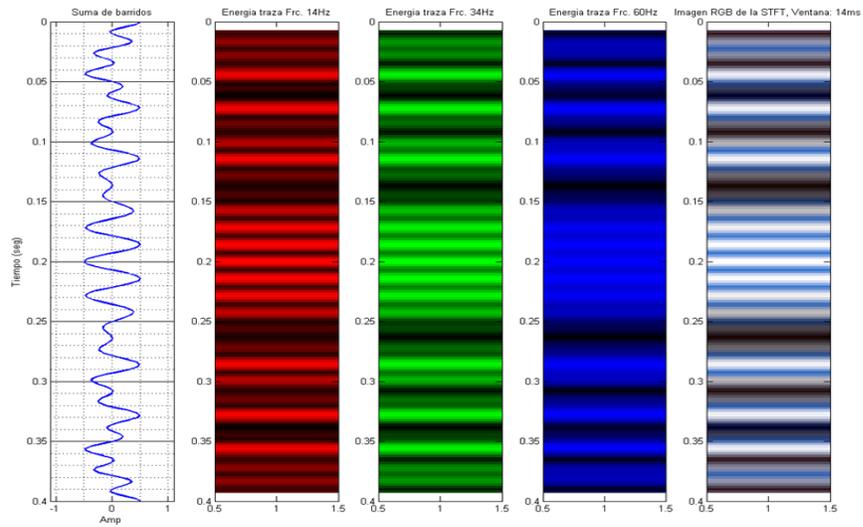


Figura 28. Imagen mezclada RGB de la *STFT* con ventana de 14 ms de la señal compuesta. A la izquierda se despliega la señal original, las amplitudes asociadas a las frecuencias 14, 34 y 60 Hz se muestran con paletas rojo, verde y negro respectivamente, y a la derecha la imagen RGB de las frecuencias seleccionadas.

El algoritmo escrito (*analisis_freq3.m*) para extraer la amplitud máxima y el pico de frecuencia fue programado de forma tal que si existen dos picos de frecuencia con igual amplitud, se registrará el de mayor índice, es decir, el último que se encuentra en el eje de frecuencia o de escala como se muestra en la figura 29.

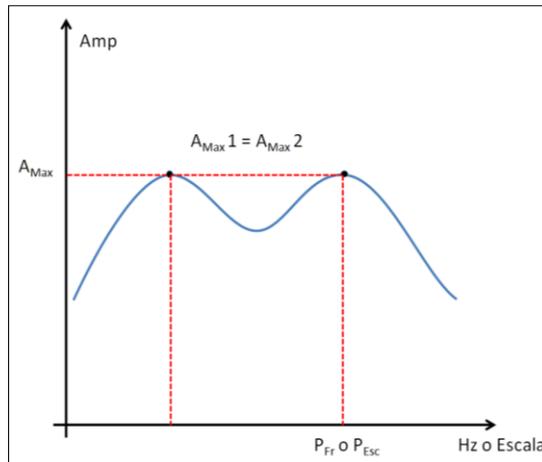


Figura 29. Visualización del pico de frecuencia o escala cuando hay dos o más amplitudes máximas.

Cuando haya dos o más amplitudes máximas, el algoritmo escrito en la función *analisis_freq3.m* escogerá como pico de frecuencia o de escala que posea mayor índice o posición en el eje horizontal.

Las imágenes mezcladas *RGB*, permiten asociar las paletas de color rojo (R), verde (G) y azul (B) a determinadas componente de frecuencias seleccionadas por el intérprete. Esto significa que en aquellas zonas donde predomina determinado color también predomina la energía asociada a la frecuencia asignada. El color negro implica que la energía para las frecuencias seleccionadas es cero mientras que el color blanco implica que la energía de las distintas componentes de frecuencia es máxima. La figura 30 muestra como se combinan los colores para la paleta RGB.

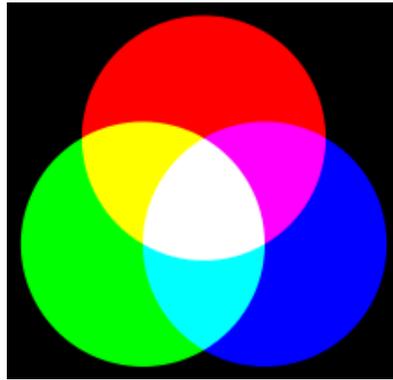


Figura 30. Paleta de colores RGB.

Atributos instantáneos

Los atributos instantáneos se calcularon mediante el algoritmo *hilbert.m* de la transformada de Hilbert. La parte imaginaria corresponde a la cuadratura de la señal de estudio; la envolvente es la amplitud instantánea y describe la energía de la señal; la fase instantánea es el ángulo acotado entre $-\pi$ y π ; la fase instantánea desenvuelta toma el ángulo y lo expresa fuera del intervalo original $-\pi$ y π ; la frecuencia instantánea da información de la frecuencia de la señal en Hz y la 2da derivada muestra singularidades de la fase extrayendo los efectos de la pendiente. El cálculo de la fase instantánea desenvuelta permite calcular los atributos de frecuencia instantánea y segunda derivada sin los problemas de discontinuidad que genera la fase instantánea. La figura 31 muestra el despliegue de los atributos instantáneos calculados. Estos atributos permiten mostrar propiedades de la señal calculados en el tiempo t de la señal.

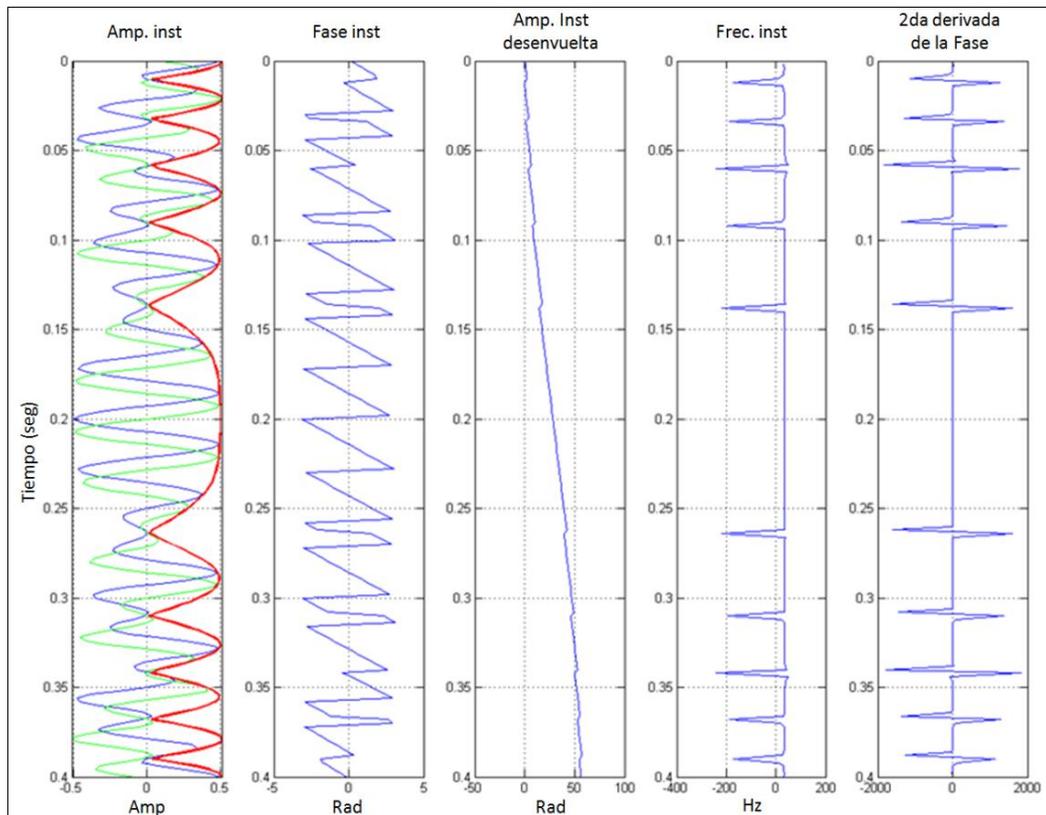


Figura 31. Atributos instantáneos de la señal compuesta. El primer panel contiene la señal original (azul), la cuadratura de la señal (verde) y la envolvente (rojo). El resto de los paneles muestra de izquierda a derecha la fase instantánea, la fase instantánea desenvuelta, la frecuencia instantánea y la segunda derivada de la fase instantánea.

Energía y cuadratura de la energía

El atributo de energía permite describir la distribución de la energía de una señal con respecto al tiempo, mientras que la cuadratura de la energía (también conocido como pseudo-relieve) mejora la correlación de los datos sísmicos, además de aumentar el contenido espectral en el rango de frecuencias bajas.

Para calcular estos atributos en la señal compuesta, se escribió la rutina `EnergiaTexturachirp.m`, la cual llama a la función `EnergiaAtrb.m` que evalúa la energía de la señal en función de la cantidad de muestras en el tiempo. Posteriormente se calcula la cuadratura de la energía mediante la transformada de Hilbert. Finalmente, se grafica la variación de ambos atributos con respecto a un eje de

número de muestras. En la figura 32 se muestra la variación de los dos atributos con respecto al número de muestras.

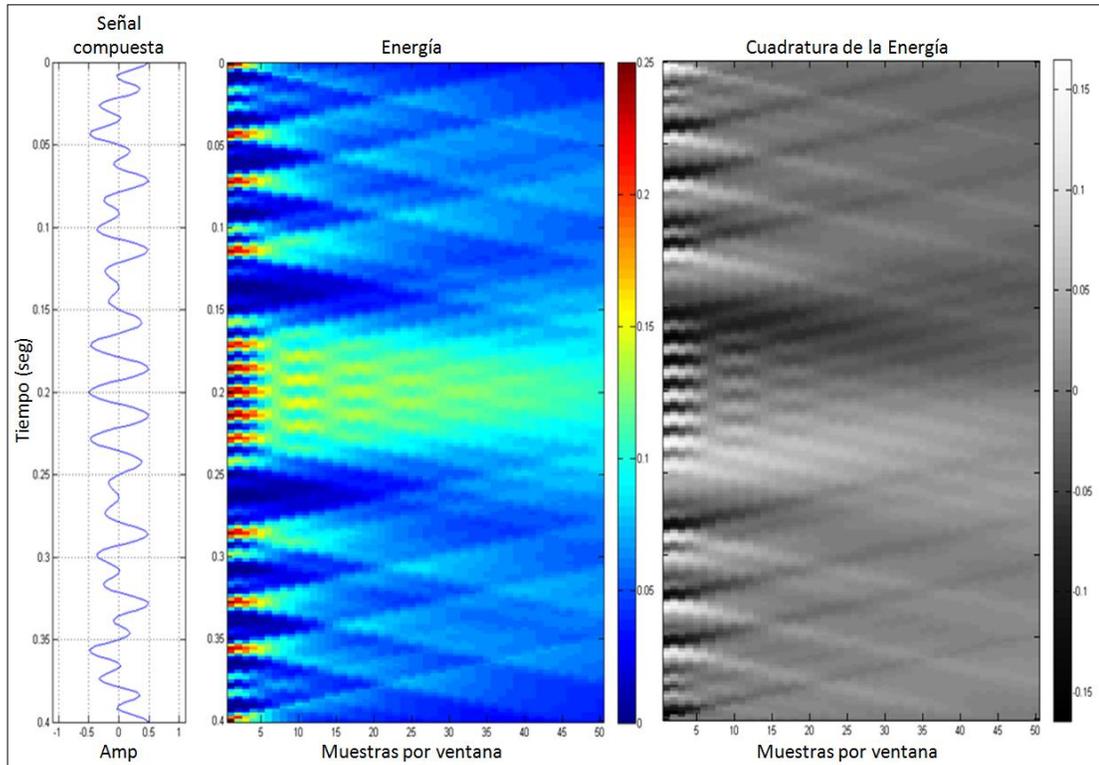


Figura 32. Variación de la respuesta de energía y cuadratura de la energía con respecto a la cantidad de muestras en tiempo usadas en el cálculo.

Construcción de modelos sintéticos basados en datos de pozo

En esta sección se construyeron diversos modelos sintéticos usando como base las densidades y velocidades de propagación de los pozos. Estas propiedades son los promedios (media aritmética) obtenidos de los registros de pozo en función de una clasificación litológica basada en el volumen de arcilla. A cada modelo se le calculó los atributos de energía, atributos instantáneos y atributos de descomposición espectral. En la figura 33 se muestra el diagrama de flujo usado en esta sección.

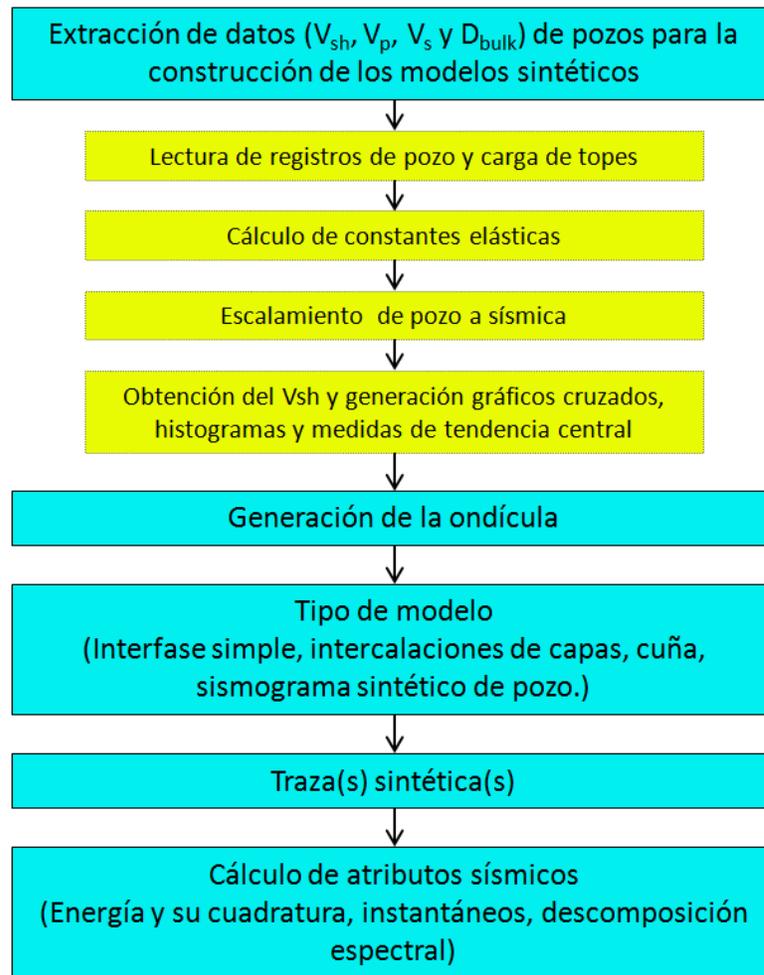


Figura 33. Diagrama de flujo de la construcción y cálculo de atributos de los modelos sintéticos basados en datos de pozos.

Extracción de datos de pozo

Los modelos sintéticos generados tuvieron como objetivo conocer la respuesta esperada de la traza sísmica y sus atributos en litologías representativas del área de estudio. Por tal motivo, las velocidades de onda y la densidad de entrada en esta fase fueron extraídas de los registros de pozos. Los pasos fueron (a) lectura de registros de pozos y carga de topes, (b) cálculo de constantes elásticas, (c) escalamiento a sísmica y (d) obtención del V_{sh} y generación gráficos cruzados, histogramas y medidas de tendencia central. Estos pasos son descritos a continuación.

Lectura de registros de pozos y carga de topes

Los topes de la Fm. Roblecito y sus arenas de interés fueron tomados de la base de datos local de la empresa TOGV de los intérpretes C2005 y S2011 y revisados con la base de datos interna del departamento de producción de la empresa Gas Guárico. Estos topes fueron escritos manualmente en la rutina de nombre CargaTopes.m junto con el *datum* de adquisición de los registros de cada pozo. Los nombres utilizados para los topes, ordenados del más somero al más profundo, son los siguientes CN_Datum, CN_TopRob, CN_A01, CN_A02, CN_A03, CN_A04, CN_A05, CN_A06, CN_A07, CN_A08, CN_A09, CN_A10, CN_A11, CN_A12, CN_A13, CN_A14, CN_A15, CN_A16, CN_A17, CN_A18, CN_A19, CN_A20 y CN_BaseRob. Aquellos pozos que no alcanzaron la profundidad de determinado tope o aquellos topes que no fueron interpretados fueron almacenados como *NaN* (*Not-a-Number*) que es la representación aritmética de la organización *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* para valores no numéricos. Una vez cargados estos datos, los mismos fueron guardados en archivos PozoCN_TopesMD.mat para cada pozo CN y posteriormente fueron llamados por las rutinas y funciones utilizadas durante la elaboración del trabajo. La unidad de profundidad utilizada en este proceso fue el pie.

Se construyó las rutinas PozoCN_Lee_las.m para leer los datos del pozo CN provenientes de los archivos las y almacenarlos en archivos mat bajo el nombre de PozoCN_Depth_Cal_GR_DTC_DTS_Bulk_Vp_Vs_Res.mat, si los pozos contienen sónico de cizalla y PozoCN_Depth_Cal_GR_DTC_DTS_Bulk_Vp_Res.mat, si los pozos solo tienen DT. Aquellos pozos que no poseen registros sínicos en la Fm. Roblecito carecen de interés para esta fase del proyecto. Los registros cargados en esta fase son caliper (Cal) en pulgadas, rayos gamma (GR) en API, densidad bulk (Bulk) en gr/cm^3 , porosidad (NPHI, CNCF o PHIE), sónico de compresión (DT o DTC) y sónico de cizalla (DTS) en $\mu\text{seg/pie}$ si existe y resistividad profunda (DR, Res, M2RX, o AHT90) en ohm-m. Adicionalmente, se calculó las velocidades V_p y V_s en pies/s. Al lado izquierdo de la figura 34 se muestran los registros leídos y las

velocidades calculadas del pozo C3 en todo el pozo (de 1500 a 8080 pies), y del lado derecho se muestra el acercamiento en la Fm. Roblecito (de 6856 a 7852 pies).

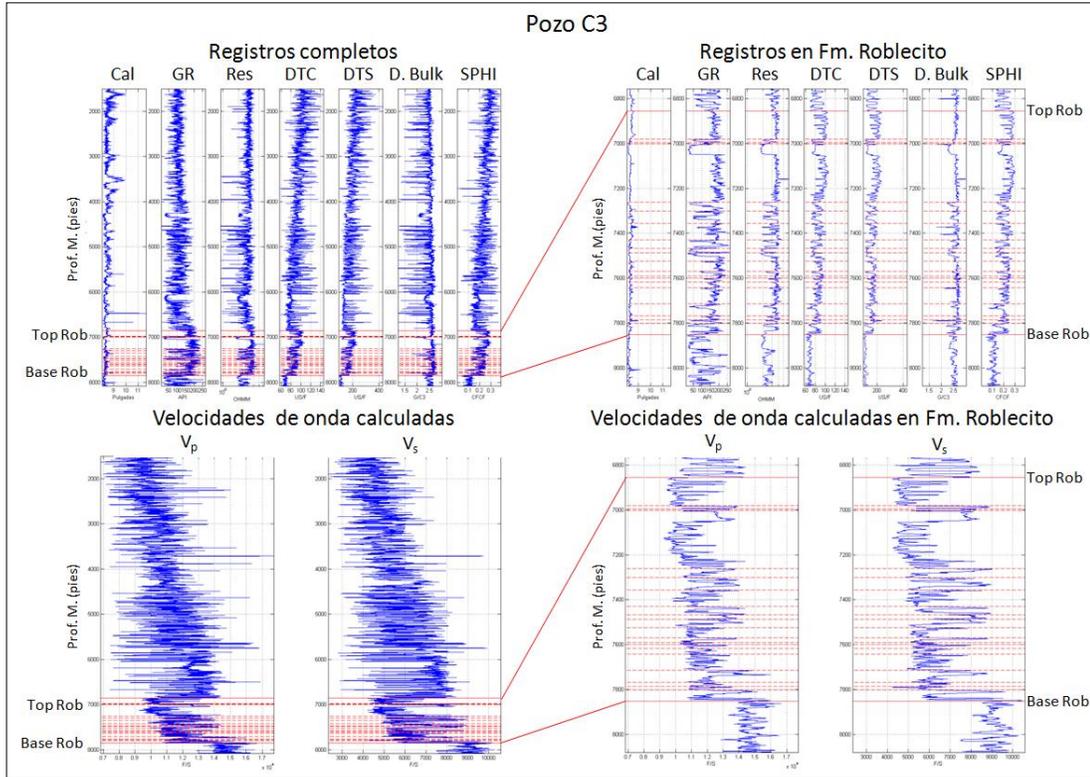


Figura 34. Registros de pozo y velocidades de onda calculadas del pozo C3. Al lado izquierdo se muestran los registros completos y a la derecha los registros dentro de la Fm. Roblecito.

Cálculo de constantes elásticas

Se realizó el cálculo de constantes elásticas para cada pozo. En los pozos que sólo poseen V_p se calculó el módulo de onda P. Para los pozos que contienen V_p y V_s se calculó el módulo de Young, relación de Poisson, módulo de Bulk, módulo de onda P, el parámetro de Lamé λ también conocido como módulo de cizalla, el parámetro de Lamé μ y la relación λ/μ . Sin embargo para este estudio sólo se requirió de los módulos de onda P y de cizalla λ . Para realizar estos cálculos se escribió la rutina PozoCN_ConsElasticas.m donde las unidades de densidad y de velocidades se pasaron kg/m^3 y m/s , respectivamente. La figura 35 muestra las constantes elásticas calculadas para el pozo C3 entre 6.000 y 8.000 pies.

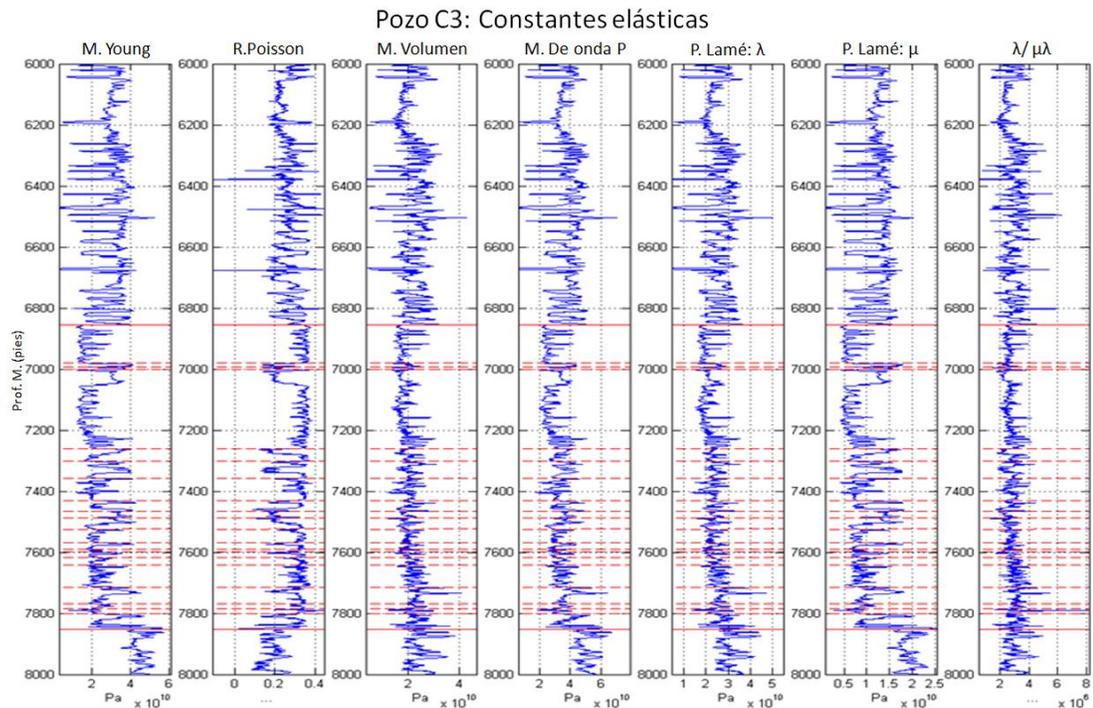


Figura 35. Constantes elásticas del pozo C3 entre las profundidades 6.000 y 8.000 pies. El tope más somero y el más profundo indican el tope y la base de la Fm. Roblecito respectivamente.

Escalamiento a sísmica

Un paso previo para realizar los sismogramas sintéticos de los pozos es convertir los datos leídos en pozo a 0,5 pies a la escala de la sísmica. Para escalar los datos de volumen y masa se usó la media móvil y para escalar los módulos elásticos se utilizó el promedio de Backus. Las velocidades de onda escaladas se calcularon usando la densidad escalada y su respectivo módulo elástico, es decir, el módulo de compresión M para V_p y el módulo de cizalla λ para V_s . Para este escalamiento se utilizó como ventana de una décima parte de la longitud de onda.

Obtención del V_{sh} y generación gráficos cruzados, histogramas y medidas de tendencia central

Para poder generar los modelos se necesita información de la densidad, y velocidades de propagación de onda sísmica. Sin embargo, también es importante conocer a que litología están relacionadas esas variables. En esta fase se calculó el

volumen de arcilla usando la relación lineal del índice de GR. Este cálculo se hizo sólo dentro de la Fm. Roblecito. Luego se generó gráficos cruzados e histogramas para determinar las densidades y velocidades de onda de medios arenosos con intervalos de V_{sh} entre 0,0-0,1 y 0,1-0,5 y medios lutíticos con $V_{sh}>0,5$. Para cada pozo CN se corrió la rutina PozoCN_Rob_Vsh_GrafCruzados_Histogramas.m y para el conjunto de pozos C1, C3, C4 y C5 se corrió la instrucción PozosC1C3C4C5_Rob_Vsh_GrafCruzados_Histogramas.m que además de generar los gráficos cruzados e histogramas también se calculó el promedio de las propiedades V_{sh} , densidad, V_p y V_s .

Generación de la ondícula

Para los modelos sintéticos y las trazas sintéticas de los pozos se utilizó la ondícula de Ricker en fase cero con frecuencia central de 30 Hz, con tasa de muestreo de 2 ms acotada en el intervalo de -60 a 60 ms mostrada en la figura 36. Para generar la ondícula se escribió la función RickerW(Fc, T), donde Fc es la frecuencia central y T es el vector de tiempo, en el archivo RickerW.m.

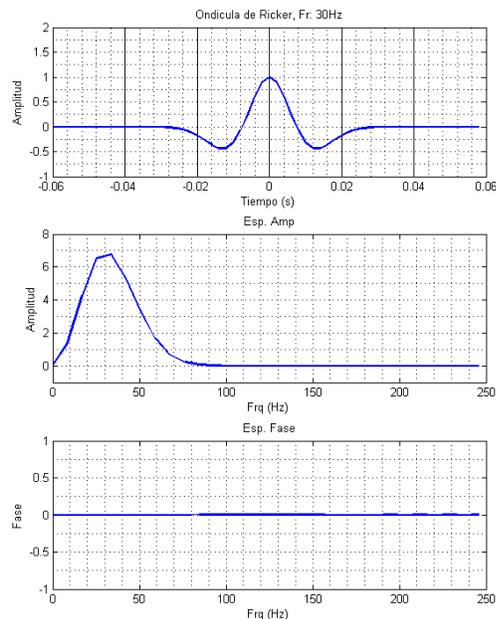


Figura 36. Ondícula de Ricker usada para los modelos sintéticos (arriba), su espectro de amplitud (centro) y su espectro de fase (abajo).

Tipos de modelos sintéticos construidos

Una vez obtenida la ondícula y los parámetros físicos de la litología, se procedió a construir diversas geometrías que describen modelos geológicos ideales. En la construcción de modelos se asumió que no hay efectos por profundidad o compactación. Los modelos generados fueron:

- Modelo de interfase simple (lutita-arena limpia)
- Modelo de interfase simple (lutita-arena limpia contenida de gas)
- Modelo de varias interfases
- Modelos de cuñas

La traza sintética se generó usando el modelo convolucional la aproximación de Richards y Frasier (1976) y Aki y Richards (1980). Se comprobó la diferencia entre las trazas de incidencia cero con la traza apilada mediante el análisis Fourier.

Los atributos sísmicos calculados en los distintos modelos fueron la energía y la cuadratura de la energía; los atributos instantáneos; y atributos de descomposición espectral. La descomposición espectral se realizó mediante los métodos de *STFT* en las ventanas de tiempo 14, 28, 42 y 56 ms, *CWT* y *ST*.

Los atributos fueron calculados en MATLAB u Octave usando las herramientas del análisis de señales para los atributos asociados a la transformada de Fourier y transformada ondícula continua, mientras que para los atributos de energía se escribió la función *EnergiaAtrb.m*. La Transformada S se calculó aplicando la función *mm_st* escrita por Stockwell *et al.* (1996)

Modelos de cuña

Los modelos de cuña fueron utilizados para estudiar la variación de la respuesta sísmica sintética con respecto a la variación del espesor de una litología dada y proporcionar una perspectiva bidimensional del atributo.

Para generar los modelos se seleccionó las velocidades de onda P y densidades extraídas de los registros de pozo. El intervalo en tiempo doble (TWT) de

cierta capa es una función dependiente del espesor y la velocidad, y se calculó mediante la relación:

$$TWT(x_n) = \frac{2x_n}{V_{pn}} \quad (61)$$

Donde TWT viene expresado en segundos, x_n y V_{pn} son el espesor y la velocidad de onda P de la capa n respectivamente.

Los modelos que cuñas realizados (figura 37) son (a) el modelo de cuna de un cuerpo de arena limpia delimitado en base y tope por lutitas; (2) un cuerpo de arena delimitado en tope y base por capas de lutita con 7,62 m (25 pies) de espesor y estas capas delimitadas por de arenas; (c) una cuña rellena por capas horizontales generadas por intercalaciones de arenas y lutitas simulando un acuñamiento (pinch-out); y (d) una cuña rellena por capas inclinadas generadas por intercalaciones de arenas y lutitas simulando un truncamiento.

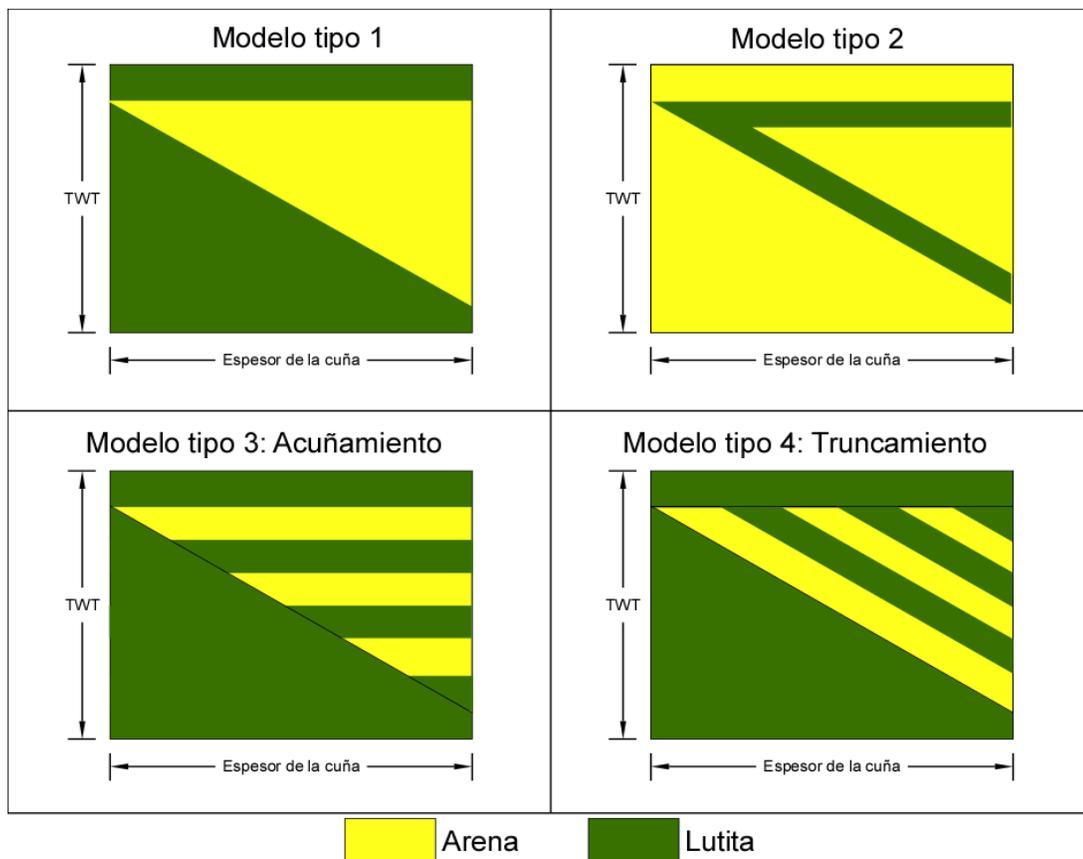


Figura 37. Modelos de cuñas generados para estudiar la variación de la respuesta sísmica en función del espesor.

Trazas sintéticas

En la figura 38 se muestra el proceso de construcción del modelo de cuña tipo 1, la cual consiste en los coeficientes de reflexión de la cuña (izquierda), la ondícula utilizada en la convolución (centro) y el sismograma resultante (derecha). Este modelo consistió en una arena limpia no productora de $V_p = 3979$ m/s y $2,30$ gr/cm³ y con una variación del su espesor de 0 a 150 pies, cubierta arriba y abajo por una lutita de $V_p = 3405$ m/s y $2,53$ gr/cm³. Dentro de cada gráfico de los modelos sintéticos y atributos sísmicos de la cuña se indicó la posición de los límites de resolución de Rayleigh y Widess.

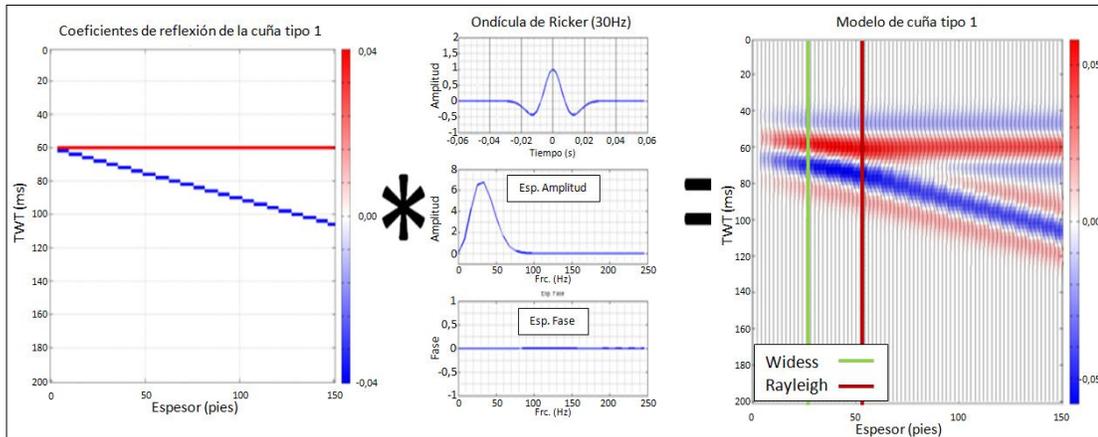


Figura 38. Proceso de generación del modelo de cuña. A la izquierda se muestra la variación con respecto a la profundidad de los coeficientes de reflexión, al centro la ondícula usada en la convolución y a la derecha el sismograma sintético del modelo de cuña en el cual se señalan los límites de resolución de Rayleigh y Wides.

Posteriormente, se calculó los atributos sísmicos de las trazas del sismograma sintético de la cuña tipo 1. Los scripts utilizados para calcular los atributos del modelo de cuñas tipo 1 fueron CunaTipo1EnergiaTextura.m para los atributos energía y cuadratura de la energía, CunaTipo1InstAtributos.m para los atributos instantáneos, y CunaTipo1STFT.m, CunaTipo1CWTmorlet_i.m y CunaTipo1ST.m para la descomposición espectral. Se construyó rutinas similares para cada modelo de cuñas.

La figura 39 muestra los resultados de la descomposición espectral usando *STFT* con ventana de 14 ms. Arriba y a la izquierda se muestra el espectrograma de la traza de 50 pies de espesor. A la derecha se muestra los atributos de amplitud máxima y pico de frecuencia respectivamente. Abajo se muestra la energía de tres frecuencias (16, 32 y 50 Hz) seleccionadas arbitrariamente de las observaciones realizadas en distintos espectrogramas. Posteriormente se asoció un color (rojo, verde o azul) a esas frecuencias para poder hacer la imagen combinada *RGB*.

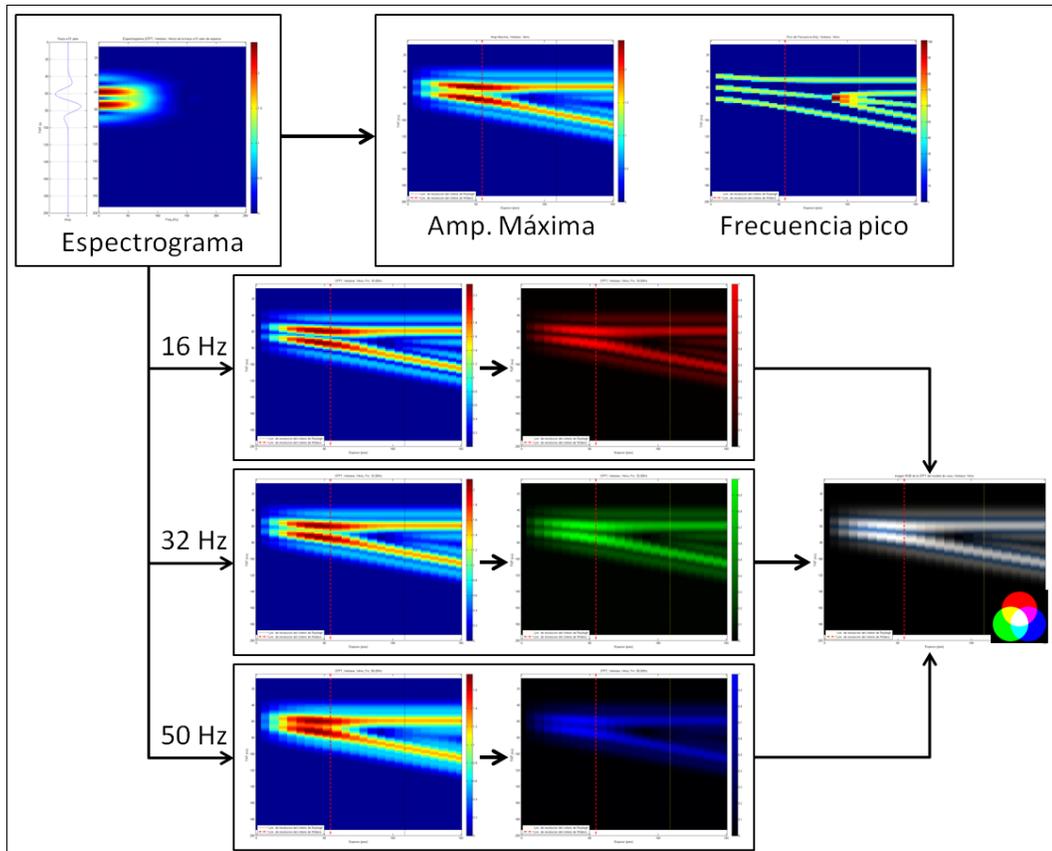


Figura 39. Atributos de la descomposición espectral del modelo de cuñas tipo 1 usando *STFT* con ventana de 14 ms. Arriba y a la izquierda se muestra el espectrograma de la traza con 50 pies de espesor; arriba y a la derecha se muestran los atributos de amplitud máxima y frecuencia pico; abajo se muestra la energía asociada a tres frecuencias seleccionadas arbitrariamente 16, 32 y 50 Hz junto con su representación en rojo, verde y azul respectivamente y finalmente la imagen compuesta *RGB*.

Traza de pozo

Para conocer la respuesta real de los atributos sísmicos, estos se calcularon directamente en las trazas del volumen 3D en la posición de los pozos C1, C3, C4 y C5. Para ello, primero se elaboraron los sismogramas sintéticos de los pozos mediante los modelos de incidencia cero y los modelos usando la aproximación AVO. Seguidamente se realizó el ajuste sísmica-pozo y se graficaron los topes interpretados en pozo y los horizontes interpretados en la sísmica. Posteriormente se calcularon los atributos de energía, instantáneos y de descomposición espectral.

Generación del sismograma

Se elaboraron los sismogramas sintéticos de los pozos C1, C3, C4 y C5 debido a que son los únicos pozos que poseen estudios de velocidad (tiro de verificación sísmica o perfil sísmico vertical) y que están dentro del volumen sísmico 3D. La ondícula utilizada fue la ondícula de Ricker de fase cero y frecuencia central 30 Hz. Para construir la serie de reflectividad se usaron las propiedades D_{bulk} , V_p y V_s escaladas a sísmica y pasadas a dominio de TWT mediante la curva de velocidad (figura 40).

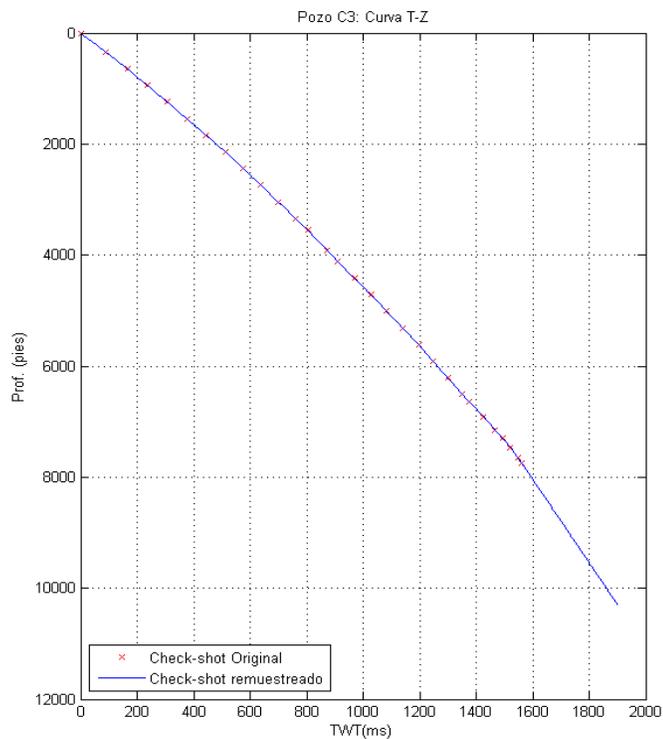


Figura 40. Curva de velocidad del pozo C3. Las marcas en forma de X en color rojo representan las muestras del tiro de verificación sísmica y la línea continua azul representa la interpolación y extrapolación de la curva.

La curva de velocidad fue cargada y interpolada y extrapolada linealmente cada 2 ms. Posteriormente se generó la traza sintética con ángulo de incidencia cero usando la rutina CN_SINT_CERO_OFFSET.m (figura 41) y la traza apilada con la rutina C3_SINT_AVO.m (figura 42).

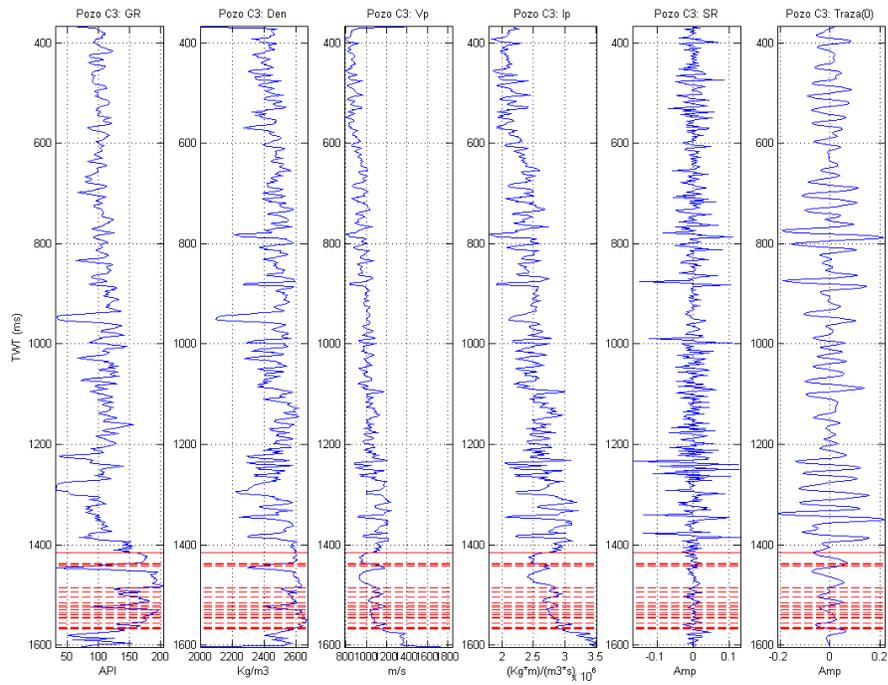


Figura 41. Registros escalados (GR, D_{Bulk} y V_p), impedancia acústica, serie de reflectividad y traza sintética del pozo C3. Los topes de la Fm. Roblecito se muestran en rojo.

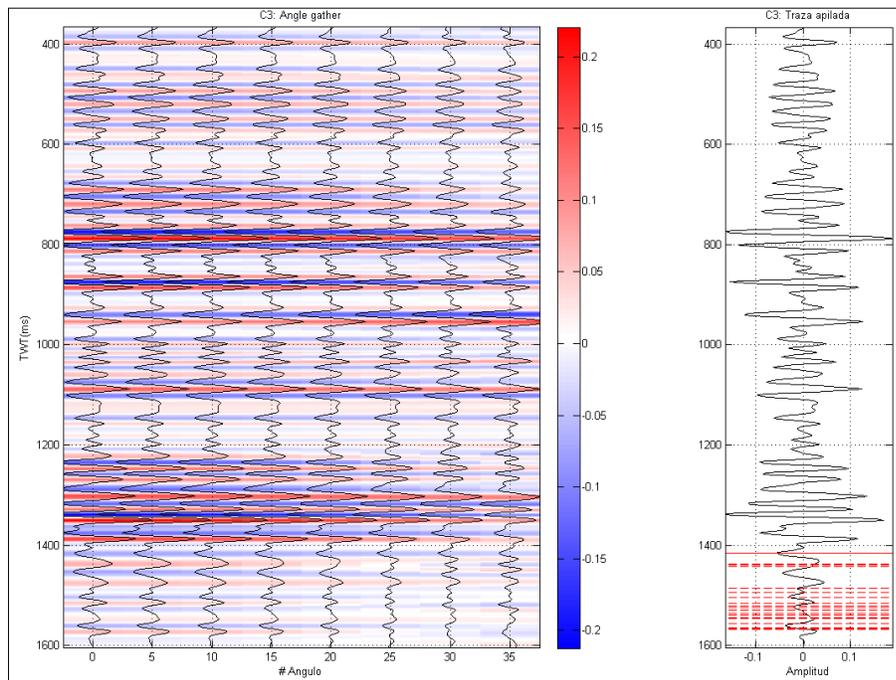


Figura 42. Angle gather y traza sintética apilada del pozo C3. Los topes de la Fm. Roblecito se muestran en rojo.

Ajuste sísmica pozo

Para esta fase se escribió la rutina CN_ComparaTrazas.m, donde se cargan las trazas sintéticas previamente calculadas y la traza sísmica 3D de la ubicación del pozo. Se corrigió la el *datum* vertical de la traza sísmica real restándole 140 ms.

Se comparó la traza sísmica proveniente del 3D con las trazas sintéticas mediante reflexiones características y se aplicó un desplazamiento en tiempo de las trazas sintéticas hasta que se alcanzó la mejor correlación entre los datos sintéticos y reales. La Tabla 1 muestra el desplazamiento resultante en tiempo que se aplicó en cada pozo para el ajuste sísmica-pozo. En la figura 43 se muestra las trazas sísmicas antes y después del ajuste y en la figura 44 se muestra el ajuste sísmica-pozo resultante con la ubicación de los topes de la Fm. Roblecito.

Tabla 1. Desplazamientos en tiempo realizados en los pozos para el ajuste sísmica-pozo

Pozo	Desplazamiento en tiempo (ms)
C1	-61
C3	-43
C4	-39
C5	-47

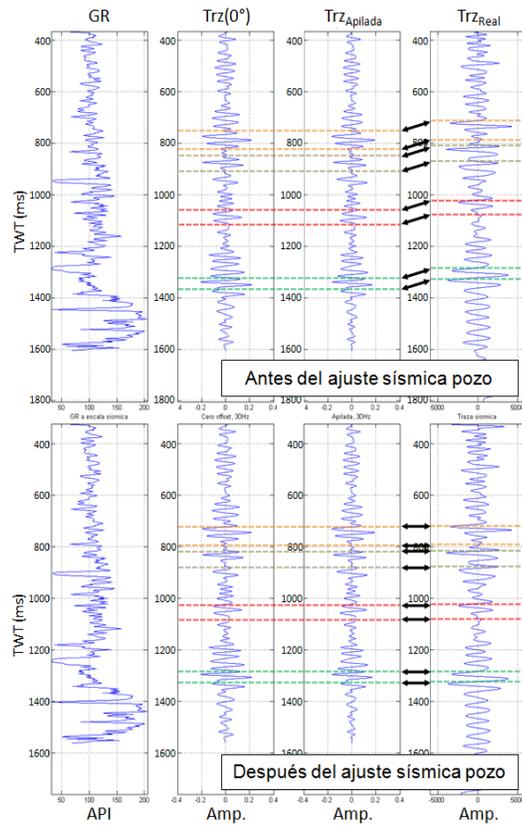


Figura 43. Trazas sintéticas antes y después del ajuste sísmica pozo. En el pozo C3 se aplicó un desplazamiento en tiempo de -43 ms.

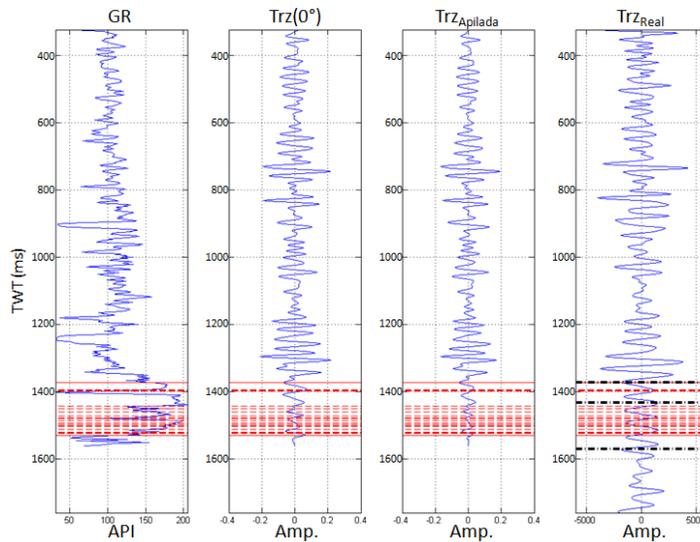


Figura 44. Despliegue de los topos de la Fm. Roblecito en el pozo C3 luego de la aplicación del ajuste sísmica pozo. En la traza real se despliegan los horizontes interpretados en tiempo en color negro.

Cálculo de atributos en las trazas sísmicas de los pozos

Habiendo calibrado los datos de pozo con los datos sísmicos, se estudió la respuesta de los atributos calculados directamente en la traza sísmica extraída del volumen sísmico 3D. Los atributos fueron calculados usando el programa Matlab u Octave mediante funciones similares a las usadas en los modelos sintéticos. Los atributos calculados fueron los atributos de energía, atributos instantáneos y los de tiempo frecuencia.

Etapa N° 2: Análisis de atributos en datos sísmicos 3D

Mientras la etapa N° 1 estuvo dirigida al análisis de modelos sintéticos, en la segunda etapa se utilizó las propiedades extraídas en la primera etapa para poder interpretar datos sísmicos reales y elaborar un modelo geológico de la distribución de arenas y posibles zonas contenedoras de gas.

Esta etapa incluyó la carga de datos en las estaciones de trabajo (registros de pozo, volumen sísmico, horizontes y fallas), el ajuste sísmico pozo, el cálculo de volúmenes de atributos sísmicos y la interpretación estructural y estratigráfica sobre horizontes sísmicos previamente interpretados. Los programas que fueron utilizados en esta etapa son Openworks (Landmark), GeoGraphix (LMKR) para manejar las bases de datos, interpretación estructural y construcción de mapas. Y OpendTect (dGB) para el cálculo de atributos y visualización. La figura 45 presenta el diagrama de flujo de los pasos correspondientes a esta etapa.

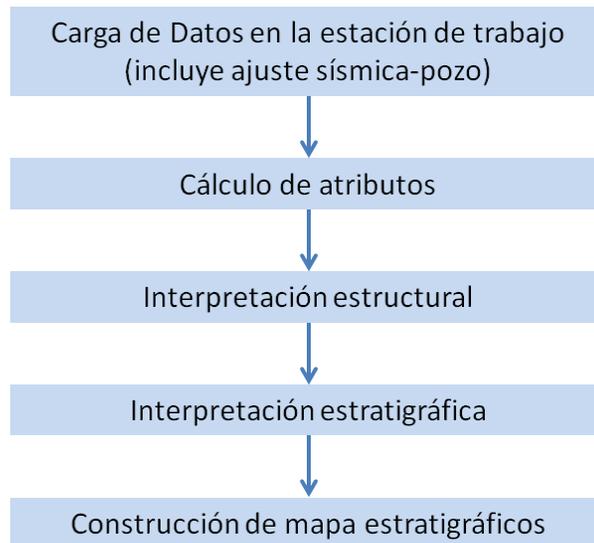


Figura 45. Diagrama de flujo de la etapa dos.

Carga de datos

Se cargaron los datos en la estación de trabajo en el programa OpendTect. Los datos incluidos en esta fase son el volumen sísmico 3D, los registros de pozo caliper, GR, DT, DTS, densidad, y resistividad, así como las curvas TZ, un perfil sísmico vertical correspondiente al pozo C5. Posteriormente se cargó los topes, horizontes y fallas interpretados en estudios anteriores.

Cálculo de atributos sísmicos

En esta fase se calcularon los atributos sísmicos pos-apilamiento que mejor respondieron en las pruebas de modelado sísmico. Sin embargo, esto no fue una limitante para calcular otros atributos disponibles en la estación de trabajo. Estos cálculos fueron realizados en un subconjunto del volumen 3D acotado entre 1150 y 1850 ms. Para la selección del intervalo en tiempo se consideró el valor más somero del tope y más profundo de la base de Roblecito, y con el fin de evitar problemas de frontera, se adicionó las ventanas en tiempos requeridas para el cálculo de los atributos de energía y STFT. Los cálculos se realizaron usando el menú de análisis de la plataforma OpendTect (dGB) y códigos de Matlab.

Interpretación estructural de nuevos horizontes

Por la naturaleza de las capas delgadas de la Fm. Roblecito, en los estudios anteriores (INPEX, 2009) sólo se realizó la interpretación estructural de tres horizontes sísmicos que tuvieron continuidad lateral en todo el volumen sísmico. Estos horizontes fueron nombrados desde el más profundo al más somero como Base de Roblecito, MSF y el Tope de Roblecito (figura 46).

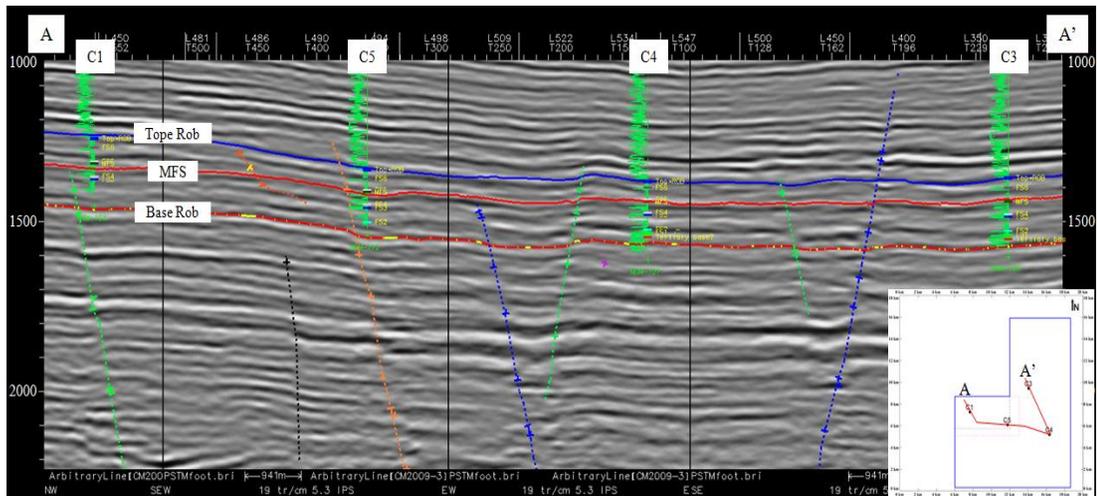


Figura 46. Interpretación estructural previa mostrada en la línea sísmica arbitraria que pasa por los pozos C1, C3, C4 y C5.

La interpretación estructural de los nuevos horizontes se realizó en las secciones sísmicas mediante el uso del volumen sísmico original, combinado con los atributos de energía calculados con ventanas de 8 y 20 ms y la CWT de escala 7, que resaltaron elementos asociados a grupos de arenas, y la cuadratura de la energía con ventana de 8 ms para afinar a interpretación de las fallas. Los nuevos horizontes se basaron en la expresión vista en sísmica de grupos de arenas delgadas la Tabla 2 muestra la nomenclatura de los horizontes y las arenas agrupadas.

Tabla 2. Agrupación de las Arenas y su horizonte sísmico asociado.

Arena	Grupo	Horizonte sísmico asociado
----	----	Tope Roblecito
A1, A2 y A3	1	Arenas grupo 1
A4, A5 y A6	2	MFS
A7, A8, A9 y A10	3	Arenas grupo 3
A11, A12, A13, A14 y A15	4	Arenas grupo 4
A16, A17, A18, A19 y A20	5	Base lutitas
----	----	Base Roblecito

Interpretación estratigráfica

Para la interpretación estratigráfica, se aplanaron los horizontes sísmicos de interés y sobre ellos se desplegó los atributos que poseen la capacidad de resaltar eventos sub-sísmicos asociados a cuerpos de arena e hidrocarburos. Los atributos que mejor revelaron estas características son los atributos de energía, amplitud dominante y las imágenes RGB de descomposición espectral.

Elaboración de mapas estratigráficos y zonas con potencial de gas

Este paso consistió en dibujar canales y barras sobre los mapas estructurales de cada horizonte sísmico y se delimitó polígono que señalan las zonas con potencial gasífero basado en los atributos sísmicos, la información del departamento de producción y la geometría válida para un entrapamiento estratigráfico y estructural.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados y el análisis de los experimentos realizados. En la primera parte se muestran las respuestas obtenidas de los modelos realizados y sus atributos, y en la segunda parte se presenta el modelo geológico de la distribución de arenas y posibles acumulaciones de gas basado en los resultados de la interpretación de los datos sísmicos reales.

Modelos sintéticos

Modelo sintético: Suma de chirridos o señal compuesta

En Matlab/Octave se generó dos señales tipo chirrido de frecuencia acotada entre 10 y 60 Hz linealmente ascendente y descendente en el intervalo de tiempo de 0,0 a 0,4 s y un intervalo de muestreo en tiempo de 0,002 s. Estas señales fueron sumadas generando una señal compuesta (figura 25). Se evidenció la variación ascendente y descendente de la frecuencia de las señales chirrido, mientras que la señal compuesta no reveló claramente el comportamiento de la frecuencia.

Mediante la transformada Fourier se vio que los espectros de amplitud de las señales chirrido son iguales y que su energía está contenida entre 10 y 60 Hz. El espectro de amplitud de la señal compuesta mostró un comportamiento semejante al obtenido en las señales chirrido. Este resultado confirma que la transformada de Fourier tiene la capacidad de mostrar el contenido de frecuencia de una señal pero no puede discriminar su distribución en el tiempo (figura 25).

Atributos de la suma de chirridos

Descomposición espectral

La descomposición espectral de la señal compuesta se usó la transformada corta de Fourier, transformada ondícula en el dominio de la escala (*CWT*) y la transformada S. En la figura 47 se muestra los espectrogramas de amplitud de las

transformadas de Fourier en tiempo corto de la señal compuesta. Esta transformada fue realizada usando ventanas de Hanning con apertura de 14, 28, 42 y 56 ms.

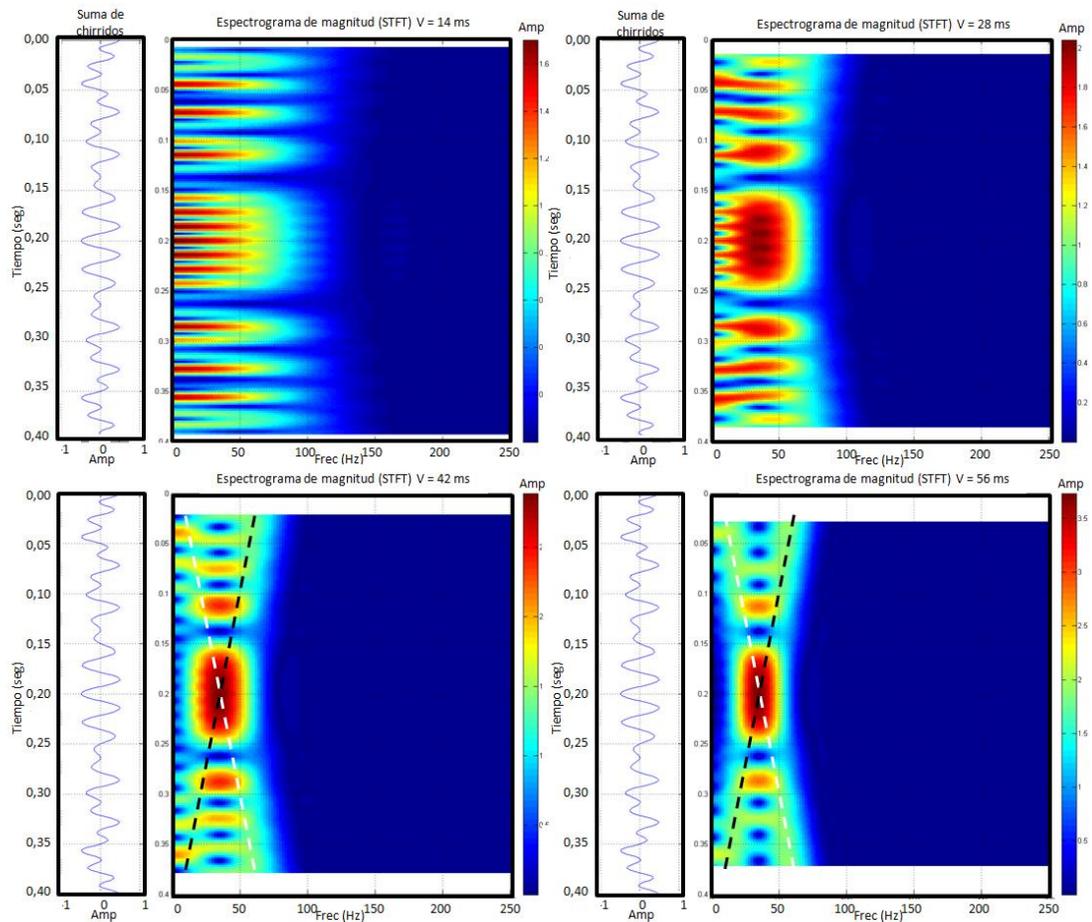


Figura 47. Espectrogramas de amplitud de la *STFT* de la señal compuesta con ventana de estudio de 14 ms, 28 ms, 42 ms y 56 ms. Las líneas punteadas representan el comportamiento de la frecuencia de las señales tipo chirrido.

El espectrograma con ventana de 14 ms presentó separaciones de energía con respecto al tiempo, pero no logró una buena distinción de eventos en frecuencia. Usando una ventana de 28 ms, se mejoró la expresión en frecuencia, sin embargo todavía no fue lo suficientemente buena para poder rastrear las componentes de frecuencia que están contenidas en la señal compuesta. Al usar ventanas con apertura de 42 y 56 ms se logró separar las frecuencias contenidas en la señal de estudio, identificando con una línea punteada en blanco la frecuencia ascendente y con una

línea punteada en negro la frecuencia del chirrido descendente. No obstante, el espectrograma obtenido de la ventana de 56 ms tuvo menor capacidad para separar elementos en el eje de tiempo. Además, también se observó una dependencia de los valores de frontera con respecto al ancho de la ventana usada, generándose un vacío de datos en los extremos del eje de tiempo.

Dos consecuencias directas del cálculo de la transformada de Fourier mediante ventanas son (1) la generación de efectos de borde y (2) la dependencia de la respuesta en tiempo y frecuencia con respecto al ancho de la ventana. Así, al calcular los espectrogramas con ventanas pequeñas (14 y 28 ms) se observó que la pérdida de información en los bordes es pequeña y hay una buena diferenciación de eventos en la escala temporal, pero no se pudo diferenciar las componentes de frecuencia. En ventanas grandes (42 y 56 ms) se observó una mejor separación de las frecuencias provenientes de las señales tipo chirrido, pero se perdió resolución en el eje de tiempo. La pérdida de información debido al efecto de borde en la *STFT* fue igual a la mitad del tamaño de las ventanas.

En la figura 48 se muestra la señal original, sus componentes de frecuencia seleccionadas arbitrariamente de 14, 34 y 60 Hz, usando un código de color rojo, verde y azul, respectivamente, y una imagen *RGB* de esas componentes en el último panel. Como las componentes de frecuencias fueron extraídas de los espectrogramas de amplitud, estas heredaron las características de las ventanas usadas en la *STFT*, como por ejemplo la pérdida de datos en los extremos del eje de tiempo. Al igual que en los espectrogramas, en la imagen asociada al a ventana de 14 ms no se observó una importante diferencia entre las tres componente en frecuencia, generándose una imagen *RGB* muy similar a las componentes individuales. En las imágenes de ventanas de 28, 42 y 56 ms se observó una mejor separación de eventos, donde las imágenes *RGB* presentaron una diferenciación al ubicar al centro las frecuencias cercanas a 35 Hz y a los extremos las frecuencias cercanas a 10 y 60 Hz.

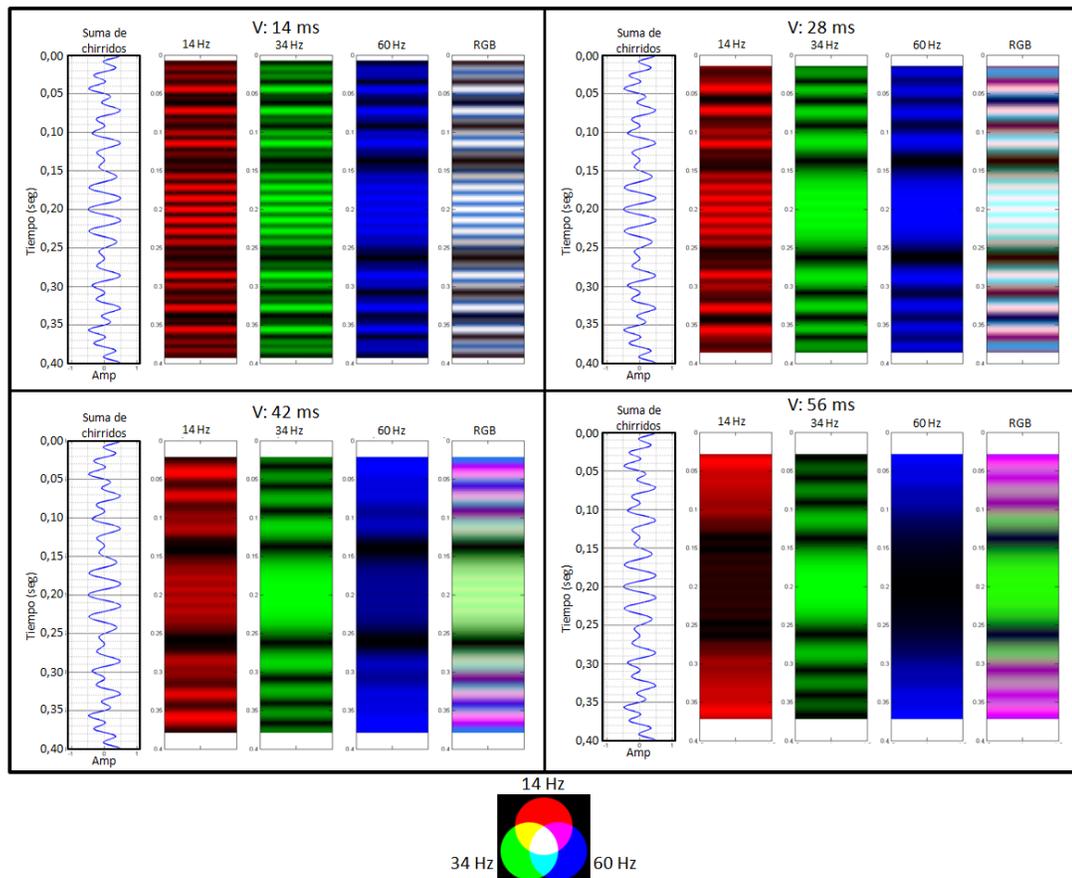


Figura 48. Imágenes RGB generadas usando la STFT en ventana de estudio de 14 ms, 28 ms, 42 ms y 56 ms. Las componentes de 14, 34 y 60 Hz se representan en rojo, verde y azul, respectivamente.

Los atributos resaltantes (figura 49), frecuencia dominante y amplitud máxima, también fueron influenciados por el tamaño de ventana usada en el cálculo de la *STFT* al presentar mayor separación de eventos en la con respecto al tiempo en ventanas pequeñas y mayores vacíos de datos en los bordes del eje para las ventanas grandes. Se perdió el análisis multifrecuencia indicando una frecuencia de 35 Hz, la cual es el promedio de frecuencia de los dos chirridos. La respuesta de la frecuencia se alternó en los extremos de la señal. La amplitud máxima indica los valores donde se alcanza la frecuencia dominante, en esta señal se observó que la frecuencia con mayor energía esta próxima al centro de la señal, es decir a 0,2 s, y alrededor de los 35 Hz. Este resultado se obtiene debido a que las frecuencias de las señales chirrido se cruzan en el tiempo 0,2 s.

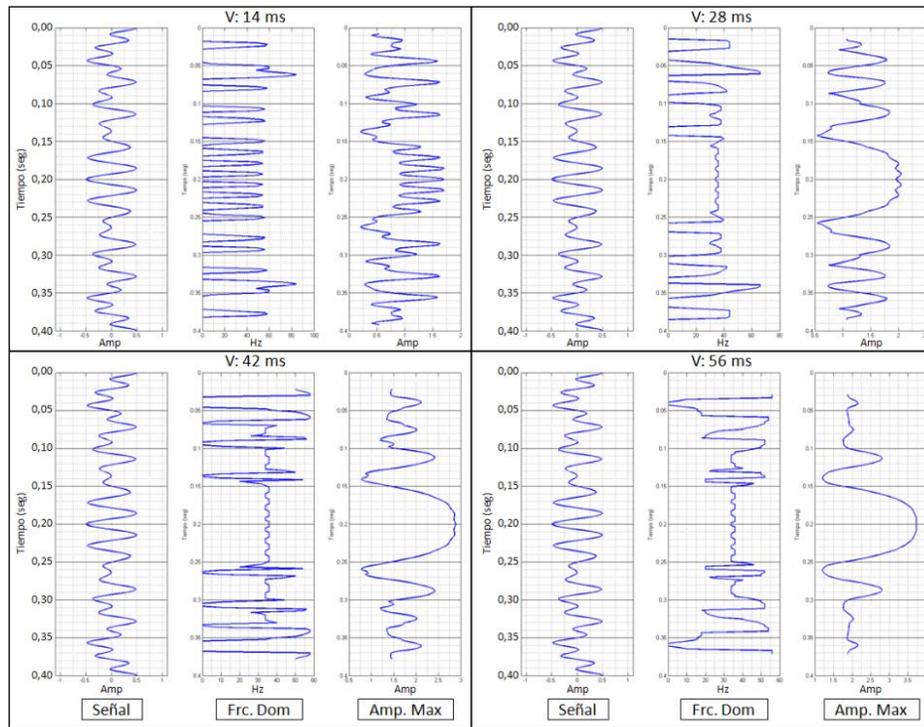


Figura 49. Variación de la frecuencia dominante y amplitud máxima de la señal compuesta en función de la ventana de estudio 14 ms, 28 ms, 42 ms y 56 ms.

La figura 50 muestra la descomposición espectral de la señal compuesta usando los algoritmos de CWT y ST respectivamente. De izquierda a derecha se muestra la señal de estudio, el espectrograma o escalograma, los atributos resaltantes escala o frecuencia dominante, amplitud máxima, y las imágenes RGB de las componentes de escala o frecuencia seleccionadas de forma arbitraria. El escalograma de la CWT y espectrograma de la ST mostraron respuestas en todo el eje del tiempo, es decir, no hubo problemas de borde asociados a ventanas, y también se observó una buena separación de eventos de frecuencia o escala dentro de los espectros de amplitud. Los atributos resaltantes presentaron una amplitud máxima que concentró los valores más grades en el intervalo 0,15 y 0,25 s, con mayor precisión que los resultados obtenidos de la STFT, además, se observó que el resultado de la CWT tuvo mayor precisión y amplitud que la ST. Fuera de este intervalo de tiempo, la amplitud tuvo un comportamiento casi constante el cual está asociado a la amplitud de la señal chirrido en individual.

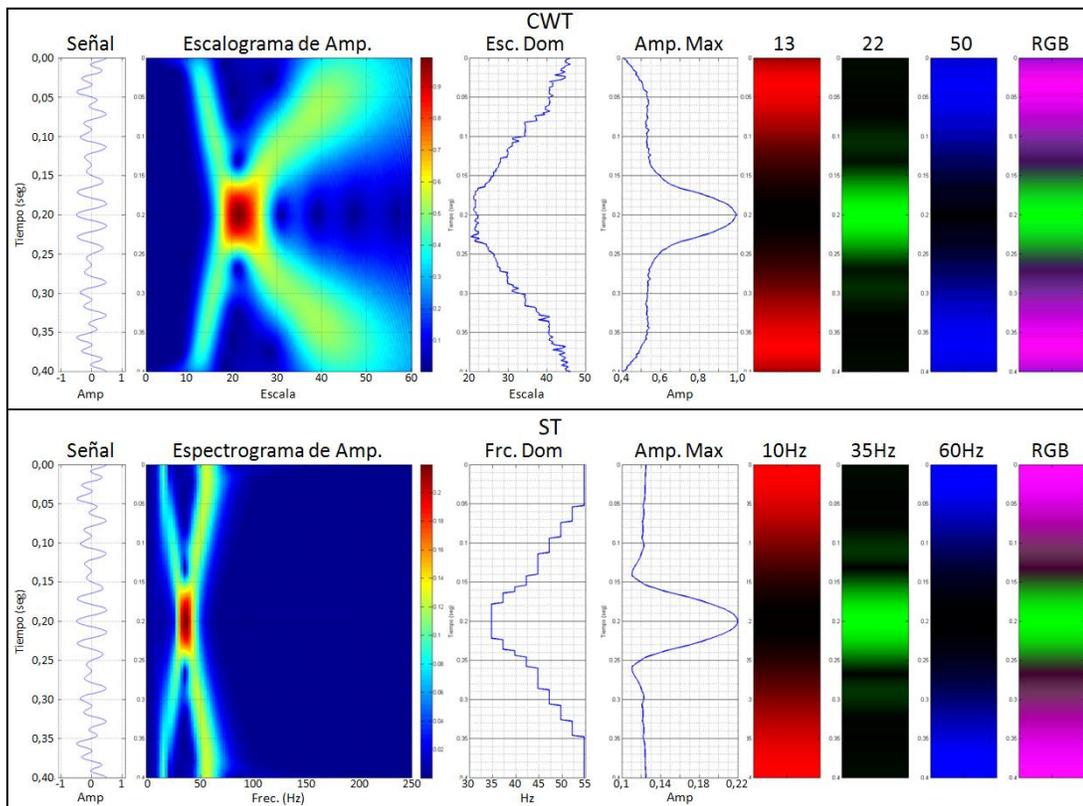


Figura 50. Descomposición espectral de la señal compuesta usando la *CWT* y la *ST*. De izquierda a derecha se despliega la señal de estudio, el escalograma y espectrograma de amplitud, la escala y frecuencia dominante, la amplitud máxima, las componentes de escala 13, 22 y 50 para la *CWT*, las componentes de frecuencia 10 Hz, 35 Hz y 60 Hz para la *ST* y la imágenes combinada RGB.

Al inspeccionar las curvas de escala o frecuencia dominante, se observó que el algoritmo de *ST* seleccionó las mayores frecuencias a lo largo del eje del tiempo, mientras que el algoritmo de la *CWT* seleccionó las mayores escalas. Teniendo en cuenta que las escalas tienen una relación inversa a la frecuencia, este resultado implica que, según los algoritmos utilizados en este proyecto, la transformada *S* resalta eventos de alta frecuencia mientras que la *CWT* resalta elementos de baja frecuencia.

Las imágenes RGB de ambas transformadas indicaron una buena separación de eventos de frecuencia o escala al mostrarse valores totalmente verdes al centro de la señal (frecuencia 35 Hz, escala 22) y una expresión purpura que significa una

participación similar de las frecuencias 10 y 60 Hz o escalas 13 y 50 sin ninguna componente verde.

Atributos instantáneos

La figura 31 muestra los atributos instantáneos de la señal compuesta. Estos atributos permiten mostrar propiedades de la señal calculados en el tiempo t de la señal y tienen un cálculo computacionalmente más rápido que los atributos de descomposición espectral. En el primer panel, se graficó simultáneamente la traza original (en azul), su cuadratura (en verde) y la envolvente (en rojo). Se observó que la amplitud instantánea máxima es similar a lo largo del tiempo t , pero tiene un lóbulo más representativo en el intervalo donde se cruzan las frecuencias de los chirridos de que componen la señal original.

En los paneles dos y tres (de izquierda a derecha) se graficaron los atributos de fase instantánea y fase instantánea desenvuelta. Debido a que la fase instantánea es una cantidad acotada entre $-\pi$ y π , se dificulta visualmente extraer ciertas características que pueden ser observadas en la fase instantánea desenvuelta. Una de las características es que la fase mostró un comportamiento lineal y ascendente excepto por algunos puntos donde la amplitud instantánea igual a cero.

En el cuarto panel se visualizó la frecuencia instantánea. Esta mostró una frecuencia generalmente igual a 35 Hz que es el promedio de las frecuencias de los chirridos a lo largo del tiempo, este fenómeno se debe a que la frecuencia instantánea no permite realizar el análisis multifrecuencia. También se notó la presencia de frecuencias negativas que también coincidieron con la amplitud instantánea igual a cero.

En la 2da derivada de la fase (en el último panel de la derecha) se observó un valor constante igual a cero en casi todo el intervalo comprobando que no hay ningún tipo de curvatura en la fase. Además se detectó, al igual que en la frecuencia instantánea, puntos de singularidad en donde la amplitud instantánea es igual a cero.

Energía y cuadratura de la energía

Los atributos de energía y su cuadratura (pseudo-relieve) mostrados en la figura 32 fueron graficados en paneles 2D, cuyo eje horizontal representa la variación con respecto al número de muestras usadas para su cálculo. En ambos atributos se resaltó los niveles donde la señal tiene más energía, generando una mejor separación de eventos en el eje de tiempo y mayor energía cuando la ventana de cálculo posee pocas muestras. Se observó que al aumentar la cantidad de muestras se generaba un solapamiento en la respuesta que resalta elementos de baja frecuencia.

Modelos sintéticos basados en datos de pozos

Para la construcción de modelos sintéticos mediante el modelo convolucional se requirió poseer los datos de densidad y velocidad de propagación de onda P de la litología (volumen de arcilla) de interés para el modelo de una traza con ángulo de incidencia cero y, adicionalmente, se necesitó la velocidad de propagación de onda S para modelos basados en la teoría AVO o AVA.

En la figura 33 se muestra el diagrama de flujo utilizado para extraer esos parámetros. Es importante destacar que debido a que las arenas están por debajo de la resolución se realizó un reescalamiento de los datos para identificar cuáles cuerpos o apilamientos de arenas son detectables en el dominio de la sísmica. Esto implicó el realizar el estudio de las velocidades P y S escaladas al dominio de la sísmica.

Escalamiento de registros de pozo a frecuencia sísmica

En la figura 51 se muestra los resultados obtenidos en el reescalamiento de los datos y las constantes elásticas M y μ del pozo C3 dentro de la Fm. Roblecito. En color azul se pintaron los datos originales y en color verde los datos escalados. Las líneas rojas continuas indican el tope y base de Roblecito, y las líneas punteadas indican los topes interpretados. Los datos escalados a sísmica mostraron una frecuencia y magnitud menor a los datos de pozo que tiene un muestreo de 0,5 pies. Esto generó una pérdida de en la detección de arenas individuales, sin embargo hizo

posible distinguir aquellas zonas de lutitas y paquetes de arena que son observables a escala sísmica. Este comportamiento fue similar en los pozos C1, C4 y C5.

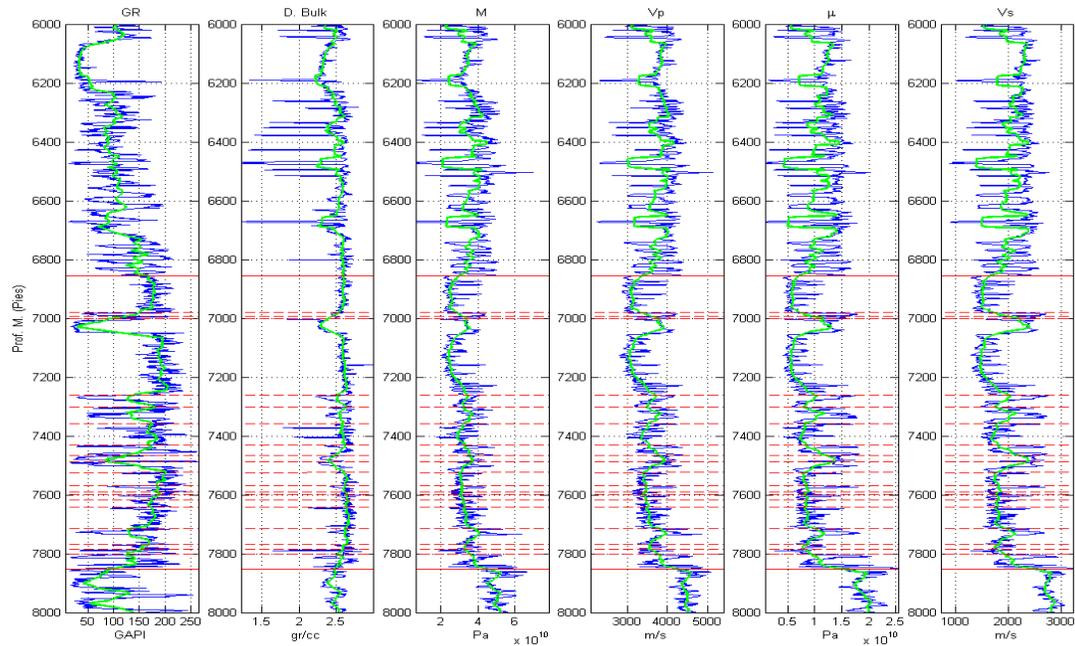


Figura 51. Resultado del escalamiento a sísmica de los datos del pozo C3 entre las profundidades 6.000 y 8.000 pies. El tope más somero y el más profundo indican el tope y la base de la Fm. Roblecito respectivamente. En azul se muestran los datos originales, en verde los datos escalados.

En la figura 52 se muestra la V_p interválica obtenida de tiros de verificación sísmica (pozos C1, C3 y C4) y perfil sísmico vertical (Pozo C5) junto con la V_p extraída del registro DT (en azul) y la V_p escalada de estos registros (en verde). Se observó que las velocidades escaladas son más suaves y de menor magnitud que las velocidades medidas. Este resultado se debe a que las mayores velocidades están asociadas a las componentes de mayor frecuencia, las cuales son medidas a escala de pozo y no a escala sísmica Mukerji *et al.* (1995), Rio *et al.* (1996), Mavko *et al.* (2009). La velocidad interválica del Pozo C5 mostró picos semejantes a su curva DT, este comportamiento se debe a que el perfil sísmico vertical tiene un muestro mayor que los tiros de verificación sísmica, lo que implica que registra velocidades de mayor frecuencia.

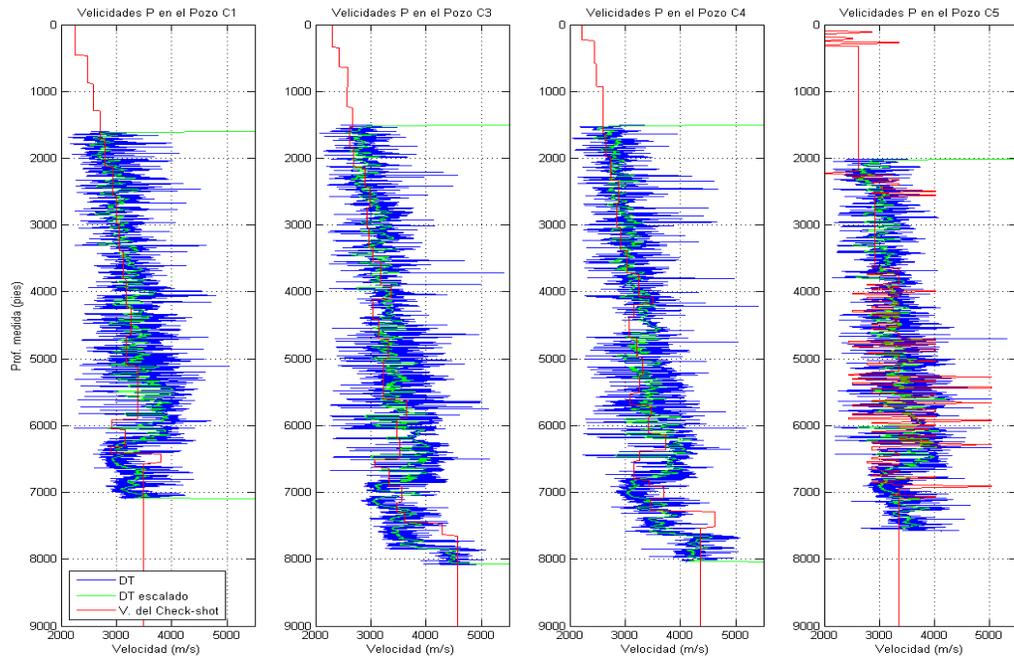


Figura 52. Gráficos de las velocidades de propagación de onda P de los registros sísmicos (azul), registros sísmicos escalados a sísmica (verde), y velocidades interválicas calculadas usando los tiros de verificación sísmica o perfil sísmico vertical de los pozos C1, C3, C4 y C5 ordenados de izquierda a derecha.

La figura 53 muestra los registros medidos y sus versiones escaladas de GR, V_{sh} , Densidad bulk, V_p y V_s del pozo C3 dentro de la Formación Roblecito. En estos registros también se mostró cómo las versiones escaladas de los registros de pozos son más suaves y de menor amplitud que los registros originales. Se pudo observar en la curva de V_{sh} suavizada que la respuesta de las capas de arena delgadas se agrupan en bloques con $V_{sh} < 0.5$ (litologías arenosas) y que estos bloques tienen una respuesta en densidad o velocidad contrastante con las lutitas. Esto implica que es posible distinguir cuerpos o grupos de cuerpos de litologías arenosas que pueden ser rastreables en la sísmica.

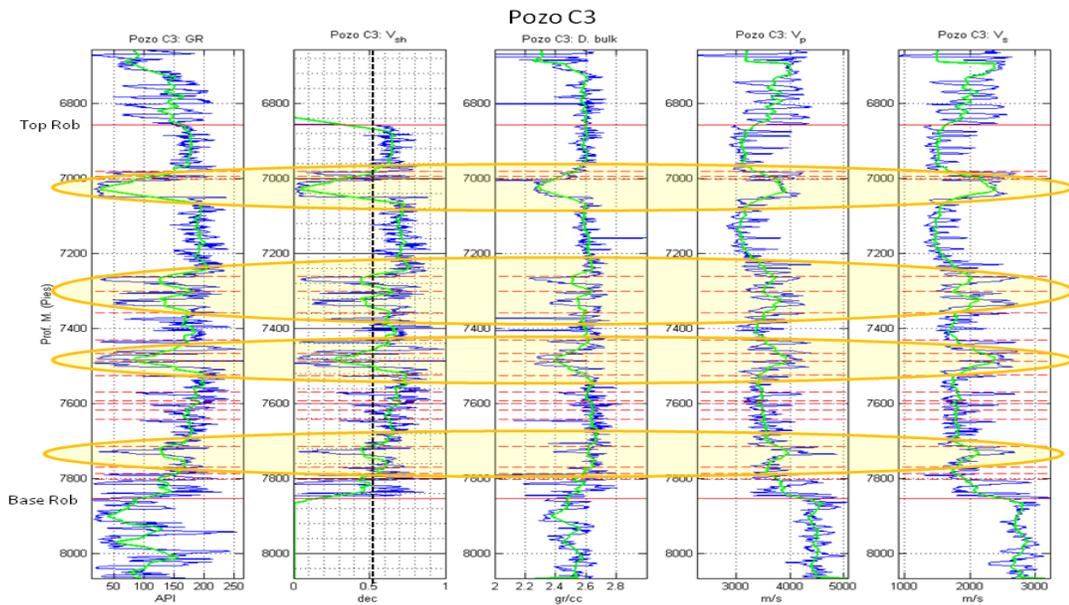


Figura 53. Variables GR, V_{sh} , D. Bulk, V_p y V_s del pozo C3 en escala de pozo (azul) y escala sísmica (verde). Los óvalos amarillos muestran agrupaciones de arena delgadas distinguibles en escala sísmica.

Extracción de propiedades para construcción de modelos

La principal herramienta para separar poblaciones de datos fue gráficos cruzados coloreados por alguna variable e histogramas de frecuencia.

En la figura 54 se muestran los gráficos cruzados de densidad bulk con respecto al volumen de arcilla coloreado por la profundidad (arriba y a la izquierda), V_p con respecto al volumen de arcilla coloreado por la profundidad (arriba y a la derecha), V_s con respecto al volumen de arcilla coloreado por la profundidad (abajo y a la izquierda) y V_p con respecto a V_s coloreado por el volumen de arcilla (abajo y a la derecha).

En el gráfico de densidad bulk en función del volumen de arcilla y coloreado por la profundidad, se evidenció un aumento de la densidad en función de la profundidad, y que ese aumento afecta más a las litologías lutíticas, es decir, $V_{sh} > 0,5$. También se observó que la densidad de las arenas limpias es contrastante con las arcillas cuya profundidad es mayor que 6.500 pies. El rango de densidad para arenas limpias varía entre 2,1 y 2,5 gr/cm^3 y el de las litologías más arcillosas varía entre 2,0

y 2,5 gr/cm³ para lutitas con profundidad menor a 6.500 pies y entre 2,5 y 2,9 gr/cm³ para las lutitas más profundas, sugiriendo que la densidad de las lutitas es más susceptible a la compactación que las arenas.

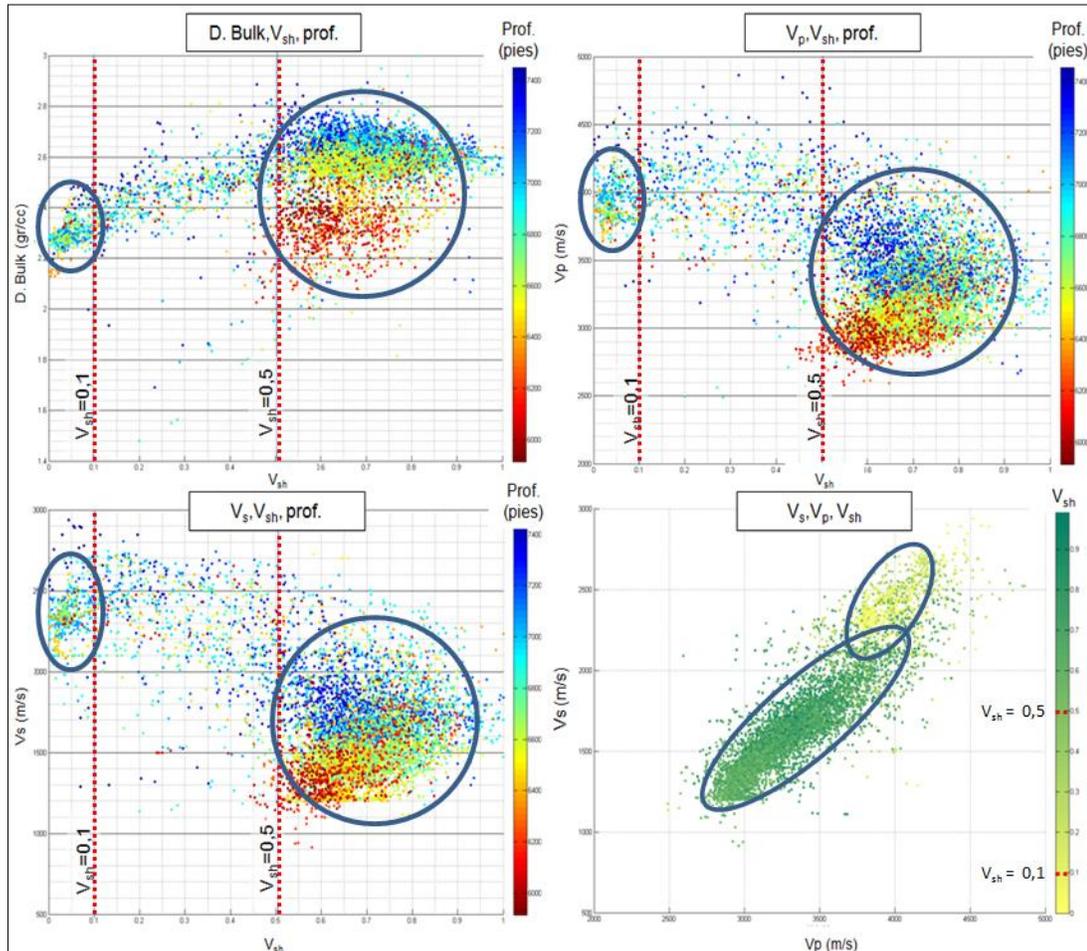


Figura 54. Gráficos cruzados de profundidad con respecto al nivel del mar, densidad bulk, V_{sh} , V_p y V_s de los pozos C1, C3, C4 y C5.

En general, ambas velocidades aumentaron con respecto a la profundidad y para litologías con $V_{sh} > 0,5$ el aumento del rango de velocidades fue mayor. Además, pudo separarse las velocidades de litologías lutíticas y arenosas, logrando una mayor separación en la V_s . Se observó cierto solapamiento en la V_p de las arenas limpias y las arcillas más profundas.

En el gráfico cruzado de la V_s en función de la V_p y coloreado por el contenido de arcilla pudo apreciarse una buena separación entre litologías de arenas con $V_{sh}<0.3$ y litologías más arcillosas. Se observó una mejor separación en para valores de V_s que de V_p .

En la figura 55 se presenta los histogramas de frecuencia del V_{sh} , densidad bulk, V_p y V_s para todas las muestras de los pozos C1, C3, C4 y C5. El histograma de V_{sh} tuvo una distribución casi normal en el intervalo 0,4-1,0, con moda 0,7 que es representativa de la litología donde predomina la arcilla. No obstante, también se observó un grupo de datos dentro del intervalo 0,0-0,1 que representa a las arenas limpias de la formación. Los histogramas de densidad, V_p y V_s , mostraron modas asociadas a la litología predominante (densidad=2.6 gr/cm³, V_p =3.000 m/s y V_s =1.600 m/s). Sin embargo, también se logró distinguir algunos pequeños eventos que pueden estar asociados a arenas limpias. Por este motivo se separó los datos y elaboró histogramas en tres grupos de V_{sh} . Los grupos fueron seleccionados en los intervalos $V_{sh}<0,1$ (arenas limpias), $0,1 < V_{sh} < 0,5$ (arenas arcillosas) y $0,5 < V_{sh}$ (arcillas).

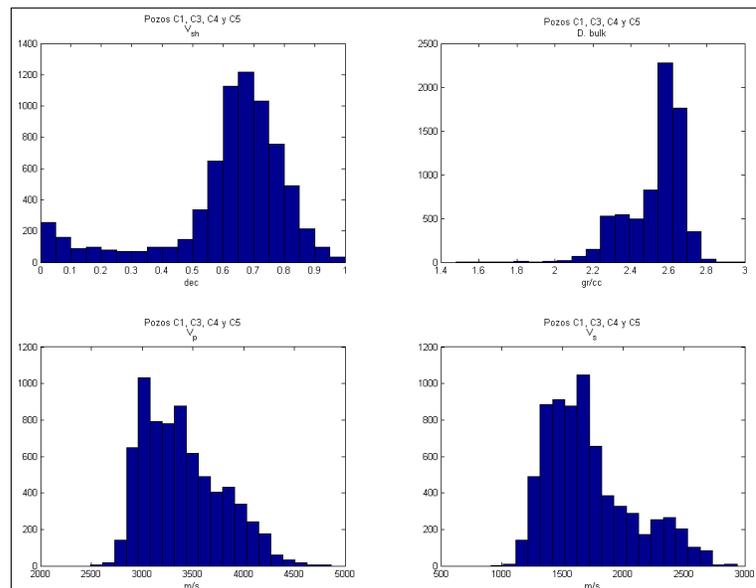


Figura 55. Histogramas de frecuencia de V_{sh} , D_{bulk} , V_p y V_s de los pozos C1, C3, C4 y C5.

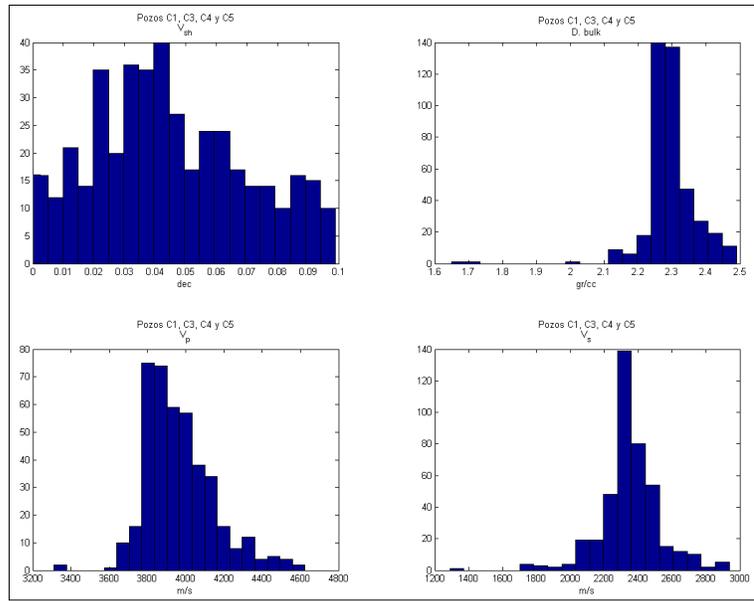


Figura 56. Histogramas de frecuencia de V_{sh} , $D. \text{bulk}$, V_p y V_s de los pozos C1, C3, C4 y C5 en el intervalo $V_{sh} < 0,1$.

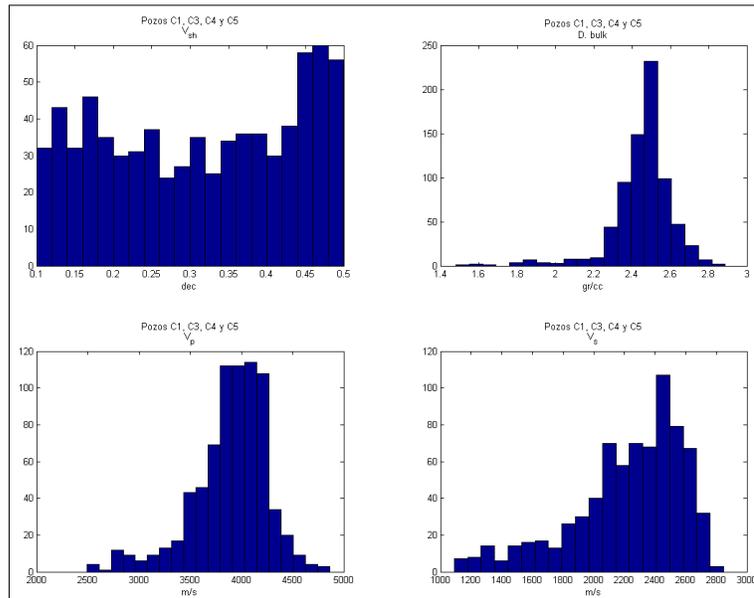


Figura 57. Histogramas de frecuencia de V_{sh} , $D. \text{bulk}$, V_p y V_s de los pozos C1, C3, C4 y C5 en el intervalo $0,1 \leq V_{sh} < 0,5$.

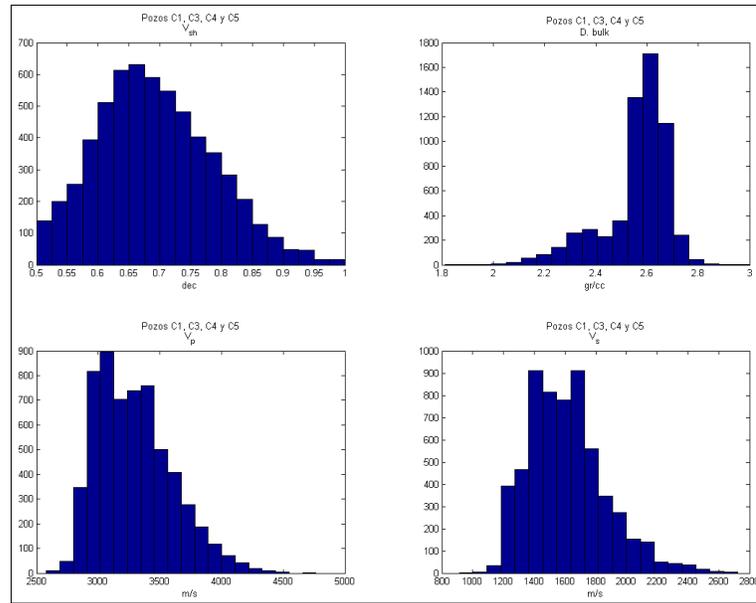


Figura 58. Histogramas de frecuencia de V_{sh} , D_{bulk} , V_p y V_s de los pozos C1, C3, C4 y C5 en el intervalo de $0,5 \leq V_{sh}$.

En los histogramas de V_{sh} de las figuras 65, 66 y 67 se observó que las litologías de arenas limpias y arcillas hay una distribución semejante a la normal, mientras que en las arenas arcillosas hay una distribución casi uniforme. La separación de estos datos también permitió cuantificar los valores promedio de la densidad, V_p y V_s para cada intervalo litológico. Se observó que las litologías más arcillosas ($V_{sh} > 0,5$) tuvieron mayor densidad y menores velocidades que las litologías basadas en arenas limpias ($V_{sh} < 0,1$). Estas cantidades están mostradas en la Tabla 3.

Usando los registros de resistividad profundo, se clasificó intervalos de datos de las arenas limpias ($V_{sh} < 0,1$), en arenas con resistividades menores y mayores a 100 Ohm-m. A cada uno de estos intervalos se les calculó el promedio de las propiedades densidad, V_p y V_s . Las arenas con resistividad menor a 100 Ohm-m (contenedoras de agua) exhibieron mayor densidad y velocidades que las arenas con resistividad mayor a 100 Ohm-m. Estos resultados son resumidos en la Tabla 4

Tabla 3. Promedio de parámetros físicos de los pozos C1, C3, C4 y C5 en función del contenido de arcilla V_{sh}

V_{sh}	Parámetro	Promedio
0,0-1,0 (Todos los datos)	V_{sh} (Dec)	0,61
	D. Bulk (gr/cm^3)	2,53
	V_p (m/s)	3405
	V_s (m/s)	1724
$V_{sh} < 0,1$	V_{sh} (Dec)	0,05
	D. Bulk (gr/cm^3)	2,30
	V_p (m/s)	3979
	V_s (m/s)	2355
$0,1 \leq V_{sh} < 0,5$	V_{sh} (Dec)	0,31
	D. Bulk (gr/cm^3)	2,44
	V_p (m/s)	3909
	V_s (m/s)	2232
$0,5 \leq V_{sh}$	V_{sh} (Dec)	0,69
	D. Bulk (gr/cm^3)	2,56
	V_p (m/s)	3297
	V_s (m/s)	1612

Tabla 4. Promedio de parámetros físicos de los pozos C1, C3, C4 y C5 en función de la resistividad profunda para arenas limpias ($V_{sh} < 0,1$).

Res (Ohm-m)	Parámetro	Promedio
<100	D. Bulk (gr/cm^3)	2,30
	V_p (m/s)	3989
	V_s (m/s)	2357
>100	D. Bulk (gr/cm^3)	2,10
	V_p (m/s)	3807
	V_s (m/s)	2315

Modelos de interfase simple

Los modelos de interfase simple se realizaron con el objetivo de conocer la respuesta sísmica sintética en el contacto de dos medios, uno de litología lutítica y otro de arena limpia contenedora de gas o agua. La figura 59 muestra la variación de la amplitud en función del ángulo de incidencia entre un medio lutítico y uno de arena limpia con distintas resistividades usando la aproximación de Richards-Frasier o Aki-Richards. La línea negra indica la variación de la amplitud para un medio de lutita en contacto con arena limpia sin importar su resistividad, las líneas roja y azul representan un contacto de lutita-arena resistiva y poco resistiva, respectivamente, y las estrellas en azul señalan el contacto entre arenas resistivas en el tope y poco resistivas en la base.

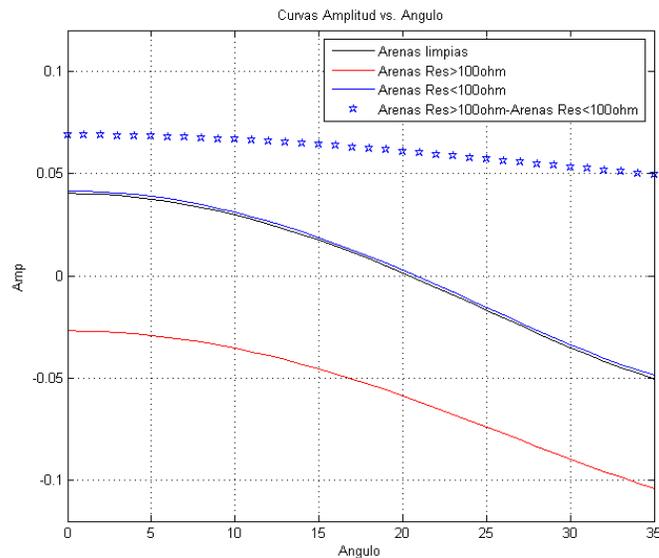


Figura 59. Variación de la amplitud con respecto al ángulo de incidencia de cuatro interfaces simples usando la aproximación AVO de Richards-Frasier. La línea negra indica la interfase lutita-arena limpia sin considerar su resistividad, la línea azul indica la interfase lutita-arena limpia con resistividad menor a 100 ohm, la línea roja indica la interfase lutita-arena limpia con resistividad mayor a 100 ohm y la curva delimitada por las estrellas indica el contacto de arenas de mayor resistividad a arenas de menor resistividad.

La amplitud del contacto lutita-arena y lutita-arena poco resistiva tiene un cambio en la polaridad de positivo a negativo en un ángulo cercano a 21° y que

posiblemente sea un comportamiento AVO clase 1. Esta clase es no prospectiva y está asociada a contenido de agua. La similitud en las respuesta de estos dos contactos puede deberse a que las muestras de arena limpia poseen en su mayoría resistividades menores a 100 ohm haciendo poco representativo los valores de las arenas más resistivas en el conjunto de las arenas limpias.

La respuesta de la curva de amplitud del contacto lutita-arena resistiva, es negativa y decreciente para todo ángulo. Este comportamiento es de las clases AVO tipo 2 o 3 y puede estar asociado a una arena contenedora de gas.

La interfase que conecta las arenas con resistividad mayor a 100 ohm y las arenas de menor resistividad es una curva decreciente que mantuvo la amplitud positiva para todo ángulo. Este es otro comportamiento de AVO clase 1 y que puede confirmar el contacto de arenas contenedoras de gas en el tope y arenas contenedoras de agua en la base.

Interfase simple 1: Contacto lutita-arena limpia

El primer modelo de interfase simple (figura 60) está formado por un medio arcilloso con V_{sh} mayor a 0,5 (verde) y otro de arena limpia con V_{sh} menor a 0,1 (azul). La figura 61, muestra la traza con ángulo de incidencia cero (arriba-izquierda), la cual fue construida usando el modelo convolucional, y la traza resultante del apilamiento de trazas con ángulo de incidencia de 0 a 35° (abajo-izquierda), generada con la aproximación de Richards y Frasier (1976) y Aki y Richards (1980). Estas trazas sólo se diferenciaron en la amplitud (derecha).

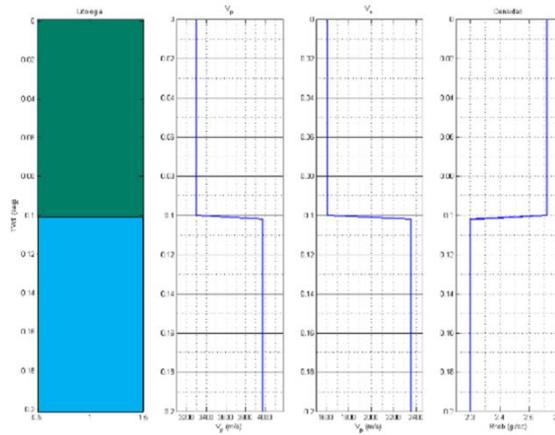


Figura 60. Modelo de interfase simple lutita-arena limpia. Se muestra el contacto de lutita (verde) por encima de una arena limpia (azul). A la derecha se muestran las curvas de V_p , V_s y densidad promedio de las litologías.

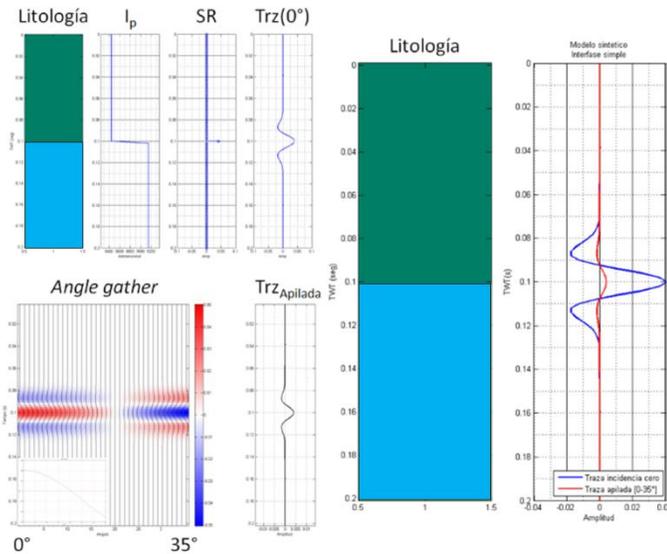


Figura 61. Trazas sintéticas del modelo de fase simple lutita-arena limpia. Izquierda-arriba se muestra la construcción de la traza sintética con ángulo de incidencia cero; izquierda-abajo se muestra el conjunto de trazas sintéticas con ángulos de 0 a 35° y la traza resultante de su apilamiento; y a la derecha se muestra en azul la traza sintética calculada con ángulo de incidencia cero y en rojo la traza sintética resultante del apilamiento de las trazas calculadas con ángulos de incidencia entre 0 y 35°.

La similitud entre las trazas sintéticas resultantes se verificó en el dominio de frecuencia mediante la aplicación de la transformada de Fourier (figura 62) y se observó que el espectro de amplitud de las trazas solo difiere en su magnitud, siendo

mayor en la traza de incidencia cero que en la traza apilada, y que los espectros de fase son idénticos. Por esta razón el análisis de este modelo fue realizado sólo en la traza calculada con incidencia cero.

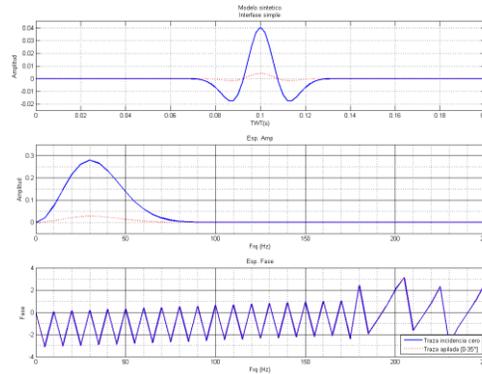


Figura 62. Análisis de Fourier de las trazas sintéticas del modelo de interfase simple lutita-arena limpia. La traza calculada con ángulo de incidencia cero esta coloreada en azul y de la traza sintética resultante del apilamiento de las trazas calculadas con ángulos de incidencia entre 0 y 35° esta graficada en línea punteada coloreada en rojo. Arriba se muestran las trazas de estudio, al centro los espectros de amplitud y abajo los espectros de fase.

Interfase simple 2: Contacto lutita-arena limpia contenida de gas

El modelo de interfase simple 2 (figura 63), al igual que el primer modelo, las trazas generadas con incidencia cero y apiladas sólo presentaron diferencia en la amplitud con la diferencia de que la traza apilada tuvo mayor magnitud (figura 64). Este hecho también se confirmó mediante la transformada de Fourier (figura 65). Esto se debe a que la amplitud con respecto al ángulo clase 3 no cambia de signo por lo que el apilamiento de las trazas no se destruyen en la suma.

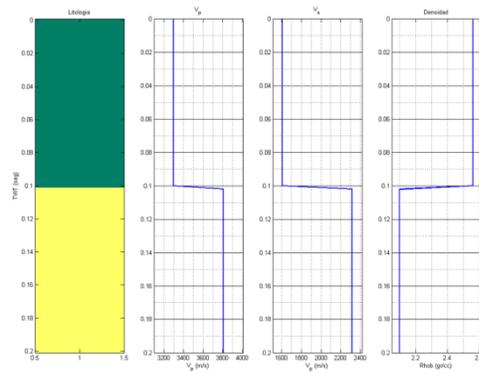


Figura 63. Modelo de interfase simple lutita-arena con gas. Se muestra el contacto de lutita (verde) por encima de una arena limpia con gas (amarillo). A la derecha se muestran las curvas de V_p , V_s y densidad promedio de las litologías.

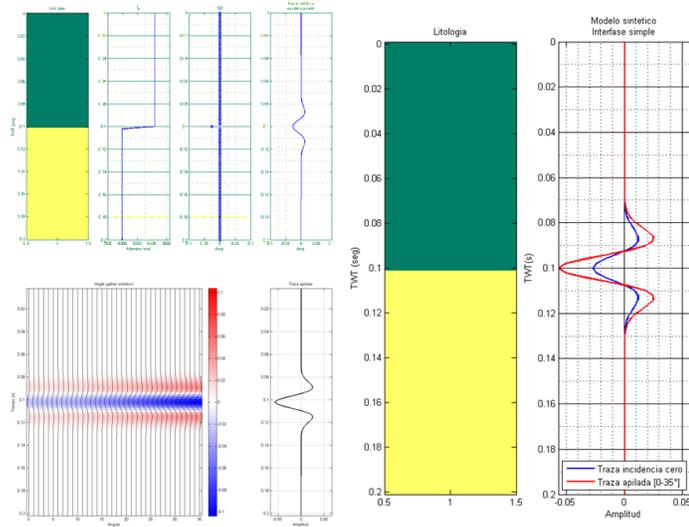


Figura 64. Trazas sintéticas del modelo de interfase simple lutita-arena con gas. Izquierda-arriba se muestra la construcción de la traza sintética con ángulo de incidencia cero; izquierda-abajo se muestra el conjunto de trazas sintéticas con ángulos de 0 a 35° y la traza resultante de su apilamiento; y a la derecha se muestra en azul la traza sintética calculada con ángulo de incidencia cero y en rojo la traza sintética resultante del apilamiento de las trazas calculadas con ángulos de incidencia entre 0 y 35°.

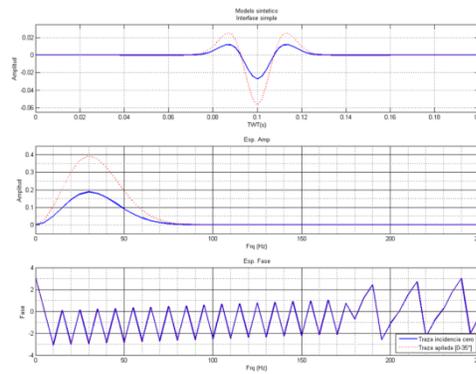


Figura 65. Análisis de Fourier de las trazas sintéticas del modelo de interfase simple lutita-arena con gas. La traza calculada con ángulo de incidencia cero esta coloreada en azul y de la traza sintética resultante del apilamiento de las trazas calculadas con ángulos de incidencia entre 0 y 35° esta graficada en línea punteada coloreada en rojo. Arriba se muestran las trazas de estudio, al centro los espectros de amplitud y abajo los espectros de fase.

Modelo de varias interfases

Este modelo consta de cinco medios dividido por cuatro interfases. De forma descendente, los medios están formados por lutita, arena delgada productora de gas, una arena con agua, lutita y arena con agua (figura 66).

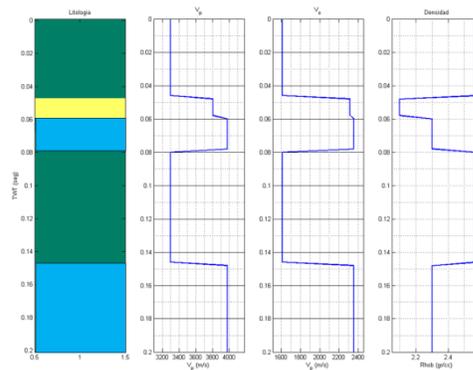


Figura 66. Modelo de varias interfases. Se muestra las litologías lutita (verde) seguido de una arena limpia con gas (amarillo) y una arena limpia con agua (azul) con un espesor que genera interferencia sísmica y más abajo una interfase simple de lutita-arena con gas. A la derecha se muestran las curvas de V_p , V_s y densidad promedio de las litologías.

La primera interfase, es de polaridad negativa y la traza apilada presentó una amplitud mayor que la traza de incidencia cero. Posteriormente se produce un cambio

de polaridad al aumentar la impedancia del medio. Debido al espesor de la capa contenedora de gas, se entra en interferencia sísmica y la amplitud de las traza tuvieron casi el mismo valor. En la interfase que une la arena con agua a la lutita, se generó una amplitud negativa y la mayor magnitud estuvo en la traza de incidencia cero, se observó un cambio de polaridad en las trazas pre-apiladas. Esta interfase también se originó en una zona de interferencia sísmica. Finalmente, en la interfase de lutita a arena con agua, el comportamiento fue similar al modelo de interfase 1 (figura 67).

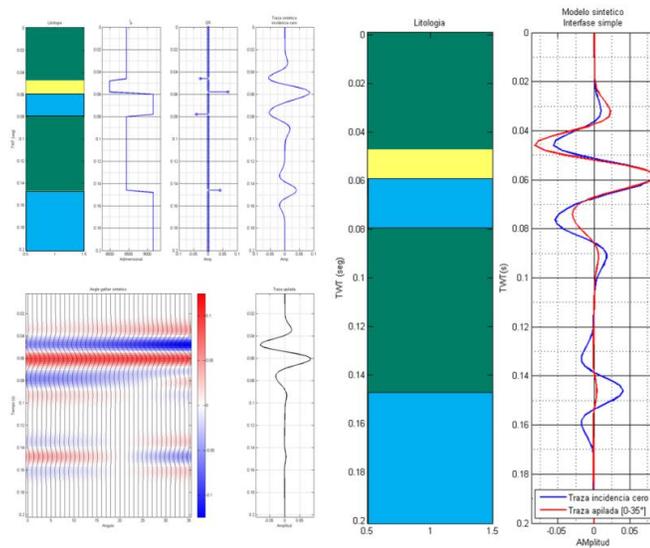


Figura 67. Trazas sintéticas del modelo de varias interfases. Izquierda-arriba se muestra la construcción de la traza sintética con ángulo de incidencia cero; izquierda-abajo se muestra el conjunto de trazas sintéticas con ángulos de 0 a 35° y la traza resultante de su apilamiento; y a la derecha se muestra en azul la traza sintética calculada con ángulo de incidencia cero y en rojo la traza sintética resultante del apilamiento de las trazas calculadas con ángulos de incidencia entre 0 y 35°.

En la figura 68 se presenta la transformada de Fourier de la traza. Se puede observar que ambas trazas tuvieron una magnitud similar en el espectro de amplitud. Sin embargo, el espectro de la señal apilada es más suave que el espectro de la señal con incidencia cero. Este fenómeno posiblemente está vinculado a que la amplitud de las reflexiones generadas en la zona de interferencia sísmica es bastante mayor a la generada en la última interfase en la traza apilada.

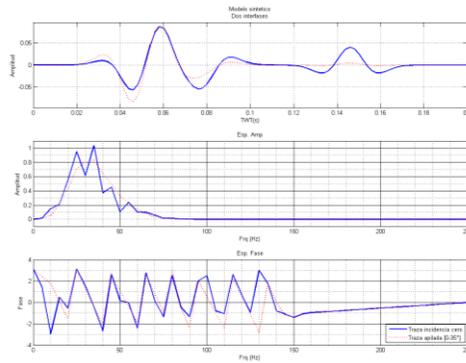


Figura 68. Análisis de Fourier de las trazas sintéticas del modelo de varias interfases. La traza calculada con ángulo de incidencia cero esta coloreada en azul y de la traza sintética resultante del apilamiento de las trazas calculadas con ángulos de incidencia entre 0 y 35° esta graficada en línea punteada coloreada en rojo. Arriba se muestran las trazas de estudio, al centro los espectros de amplitud y abajo los espectros de fase.

Atributos de energía

En la figura 69 se muestra la traza sintética, los paneles de energía y su cuadratura de los modelos de interfase simple lutita-arena limpia (arriba), lutita-arena con gas (centro) y el modelo de varias interfases (abajo). En el eje vertical está el tiempo en TWT y el eje horizontal indica el número de muestras usadas para calcular el atributo. Los atributos calculados para las interfases simples lutita-arena y lutita-arena con gas fueron similares. En el modelo de varias interfases se observó que hay mayor energía en la zona de interferencia sísmica, lo que permite utilizar el atributo de energía como indicador de capas delgadas. En las ventanas de cálculos iguales o menores a cinco muestras (4 ms o menos), se observó un aumento importante de la energía y una buena localización en tiempo de las interfases. En las ventanas localizadas entre 5 y 20 muestras (4 a 10 ms) se observó una pequeña reducción de la energía, pero se resaltó los intervalos delgados de arena con gas y arena limpia.

El atributo de pseudo-relieve permitió localizar las interfaces usando ventanas menores o iguales a 5 muestras. Al usar más muestras en el cálculo de este atributo, se observó un solapamiento de las respuestas de las distintas interfaces.

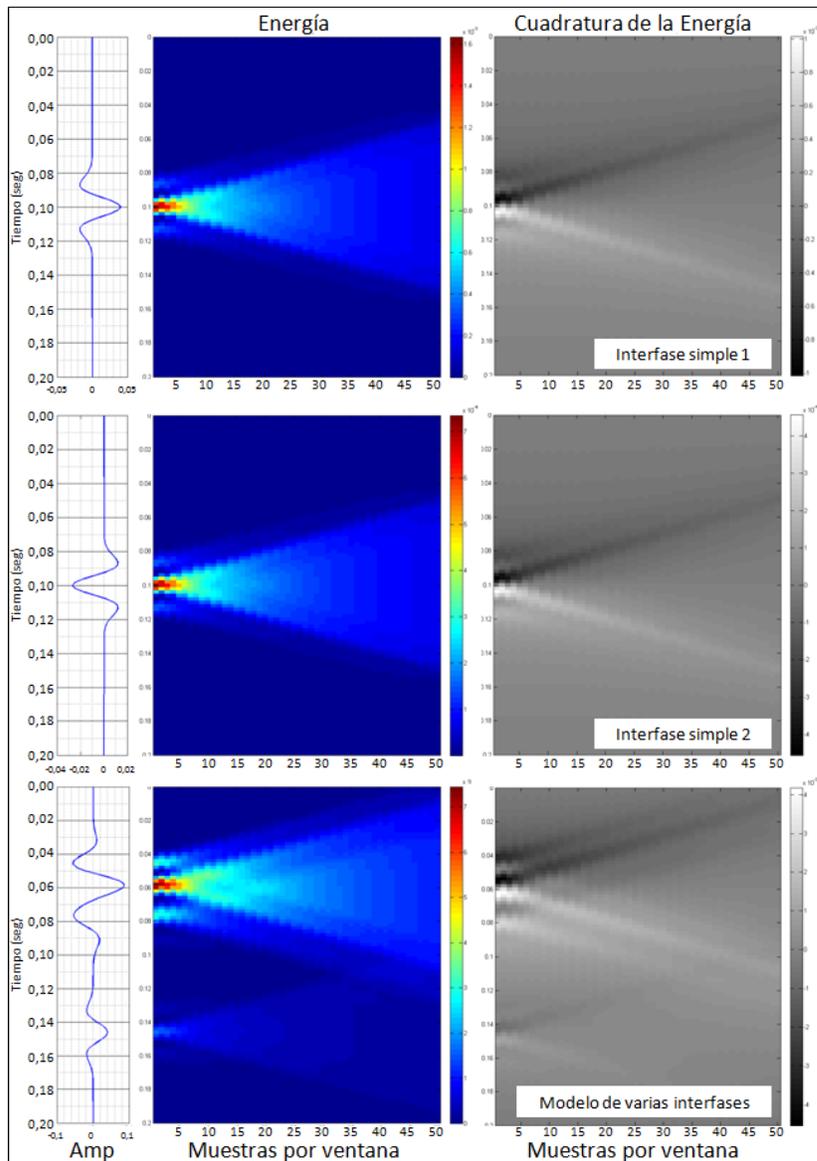


Figura 69. Atributos de energía de los modelos de interfase. En el panel central muestra la energía y en el panel derecho la cuadratura de la energía o pseudo-relieve. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el número de muestras usadas para el cálculo del atributo (de 1 a 50).

Atributos instantáneos

Los atributos instantáneos de los modelos de interfase son mostrados en la figura 70. A la izquierda está un panel con código de color que expresa la litología, luego la amplitud, donde se grafica la traza original (en negro), la cuadratura (en

verde) y la amplitud instantánea. En el centro está la fase instantánea seguida de la frecuencia y la segunda derivada de la de la fase.

En los dos primeros modelos, el de lutita-arena limpia y lutita-arena con gas, los atributos instantáneos expresaron resultados similares, exceptuando la fase instantánea. La amplitud instantánea solo varió en magnitud, la frecuencia instantánea y la 2^{da} derivada de la fase fueron iguales. La fase presentó una variación en el tiempo donde se ubica la interfase. Para el modelo 1, la fase cambió de signo positivo a signo negativo con valores de π y $-\pi$, respectivamente, mientras el modelo 2 pasó de una fase negativa a fase positiva con valores de $-\pi$ y π , respectivamente. Estas diferencias en fase se deben a la diferencia del signo en las trazas, y esta diferencia es constante con valor igual a π .

El modelo de varias interfases (figura 70-abajo) mostró mayor amplitud instantánea en la zona de interferencia sísmica. Además, la amplitud tuvo una perturbación en a nivel de la arena con agua. Esta perturbación generó una reducción en la frecuencia instantánea y un mínimo local en la curva de la 2^{da} derivada de la fase. Aunque se observó que hay una respuesta de estos tres atributos, los mismos no tienen una buena localización en tiempo y además sus curvas tienen una variación muy suave lo que puede hacer que no se perciban elementos delgados con facilidad. Adicionalmente, se observó que la frecuencia fue mayor en la reflexión generada por la arena delgada que contiene gas (34, 15 Hz) que por la arena de contiene agua (30, 35 Hz), pero este resultado es generado por el espesor de las capas y no por el fluido contenido. En el conjunto de capas delgadas, la fase instantánea no mostró diferencias importantes que aumenten la detectabilidad.

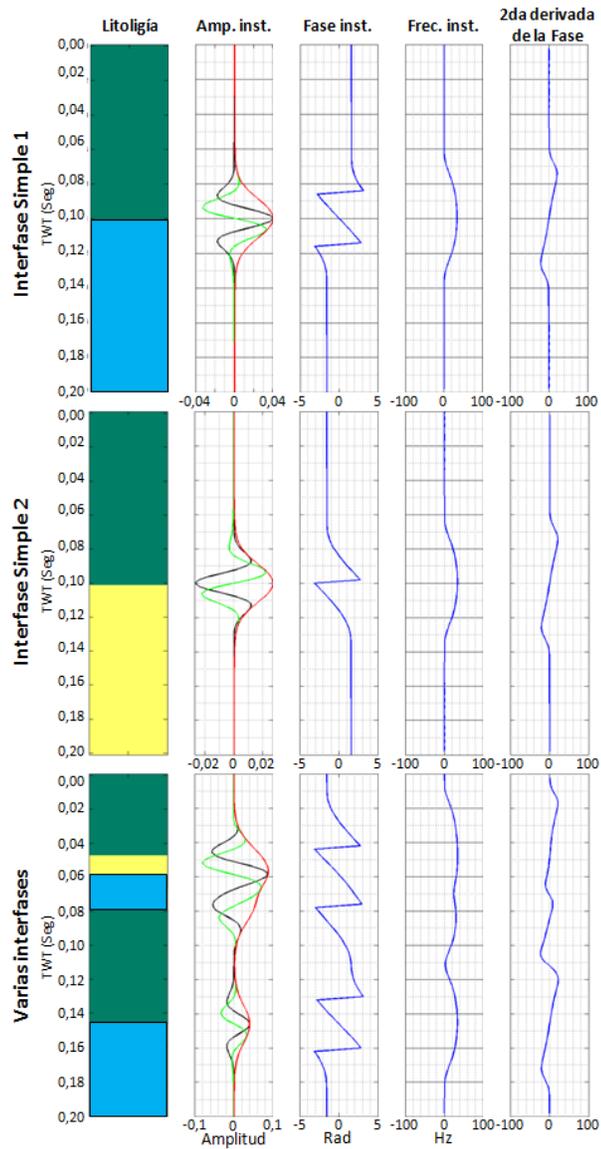


Figura 70. Atributos instantáneos de los modelos de interfase. De izquierda a derecha se visualiza la litología del medio; simultáneamente la traza sintética (negro), la cuadratura (verde) y la envolvente (rojo); la fase instantánea; la frecuencia instantánea, y la 2da derivada de la fase instantánea.

Atributos de descomposición espectral

La descomposición espectral fue realizada usando los métodos de *STFT* con ventanas de tiempo de 14 (figura 71), 28 (figura 72), 42 (figura 73) y 56 (figura 74) ms, *CWT* (figura 75) y *ST* (figura 76) en los modelos de (A) interfase simple lutita-arena, (B) lutita-arena con gas y (C) varias interfases. El despliegue en las figuras de

izquierda a derecha viene dado por la traza sintética, el panel de tiempo-frecuencia (con eje horizontal de 0 a 250 Hz) o tiempo-escala (con eje horizontal de 0 a 60) para la *CWT*, los atributos de frecuencia dominante y amplitud máxima, y la imagen RGB de las frecuencias 10 (rojo), 20 (verde) y 35 Hz (azul) o las escalas 40 (rojo), 20 (verde) y 10 (azul) para la *CWT*.

La observación más evidente fue que las respuestas de los atributos del análisis tiempo-frecuencia de las trazas de los modelos de lutita-arena y lutita-arena con gas sólo se diferenciaron en la magnitud de la amplitud. Es importante destacar que en la elaboración de los modelos no se consideró el factor Q , el cual es una cantidad asociada a la atenuación de la onda.

Los espectrogramas y escalograma del modelo de varias interfaces mostraron mayor energía en la zona de interferencia sísmica ubicada en los contactos lutita-arena con gas y arena con gas-arena con agua. También se observó que hay mayor frecuencia (o menor escala) en la arena con gas y esta frecuencia cayó en el intervalo de arena con agua. Sin embargo, este comportamiento no está asociado al fluido contenido, sino al espesor de esos intervalos.

Las *STFT* de ventanas de 14 y 28 ms separaron los eventos en tiempo, pero al examinar la distribución de energía, se observó que los eventos no están separados en la frecuencia y que gran parte de la energía cayó en frecuencia 0 Hz. Esto ocurre porque el cálculo y resolución de las componentes de frecuencia depende de la cantidad de datos utilizados. Al contrario, para las *STFT* de ventanas de 42 y 56 Hz, la *CWT* y la *ST* mostraron una mejor separación de la energía en el dominio de la frecuencia. Esto permitió escoger mejor las componentes en frecuencia para la visualización en las imágenes RGB.

STFT, ventana 14 ms.

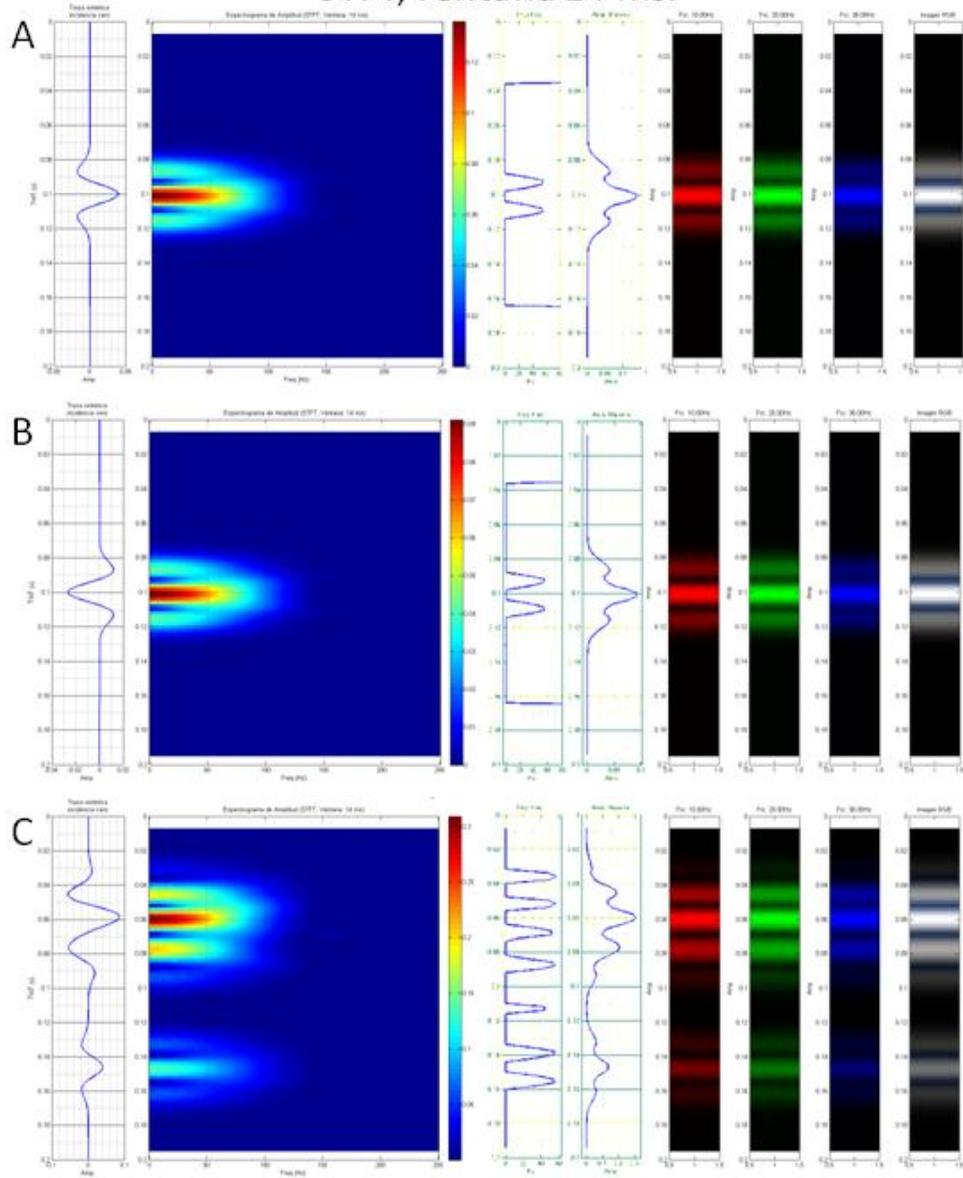


Figura 71. Atributos de descomposición espectral de la traza sintética de incidencia cero de los modelos de interfase simple usando la *STFT* con ventana de 14 ms.

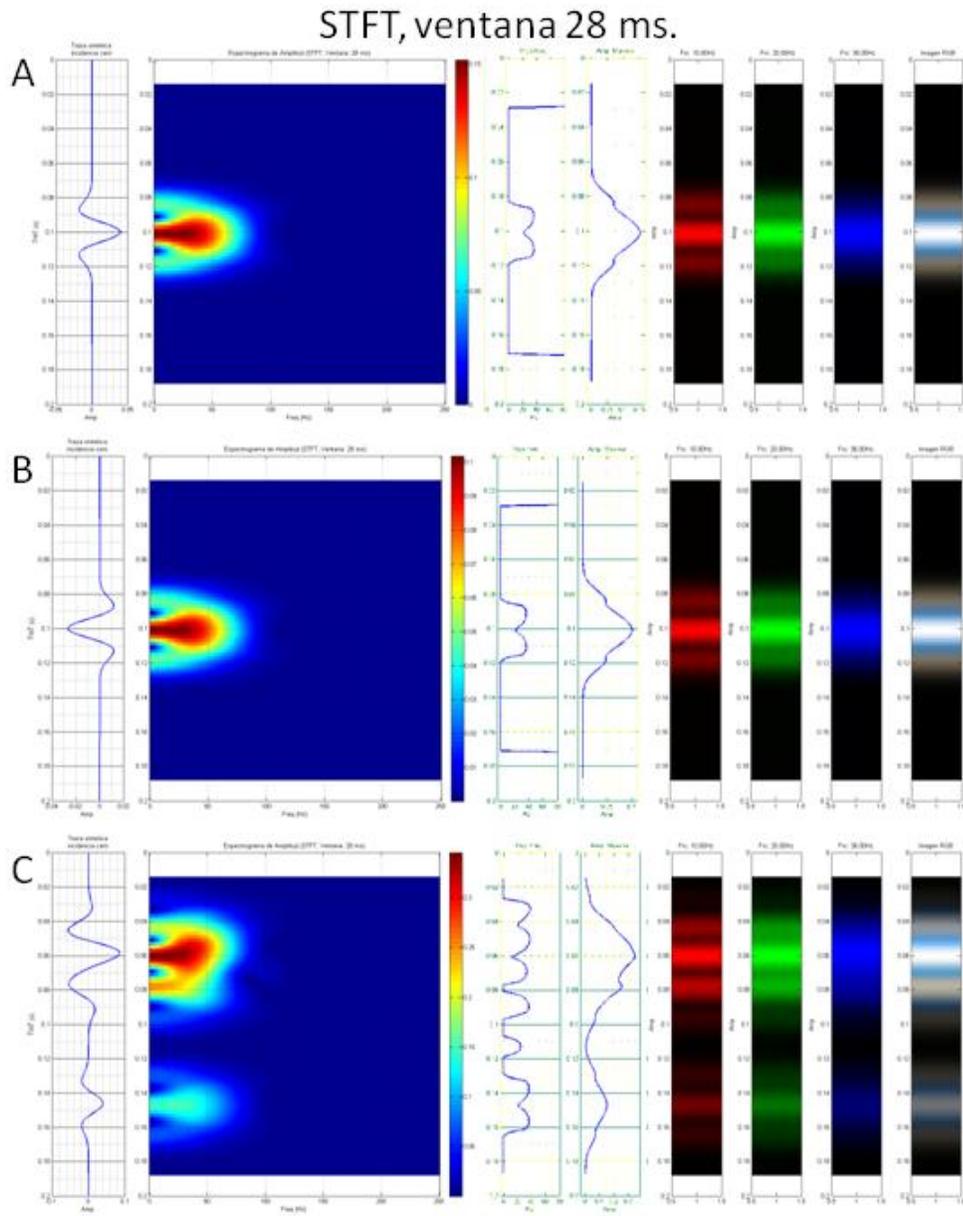


Figura 72. Atributos de descomposición espectral de la traza sintética de incidencia cero de los modelos de interfase simple usando la *STFT* con ventana de 28 ms.

STFT, ventana 42 ms.

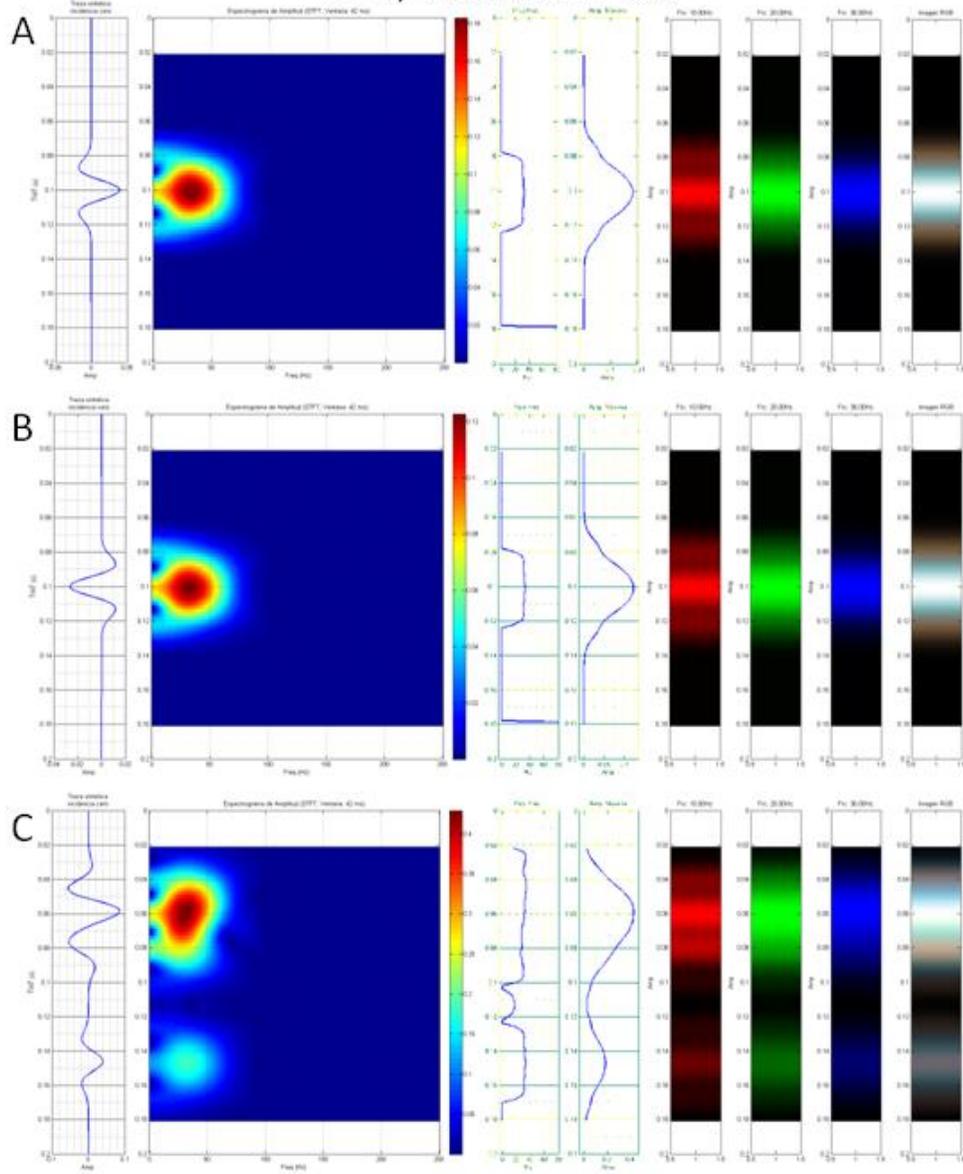


Figura 73. Atributos de descomposición espectral de la traza sintética de incidencia cero de los modelos de interfase simple usando la *STFT* con ventana de 42 ms.

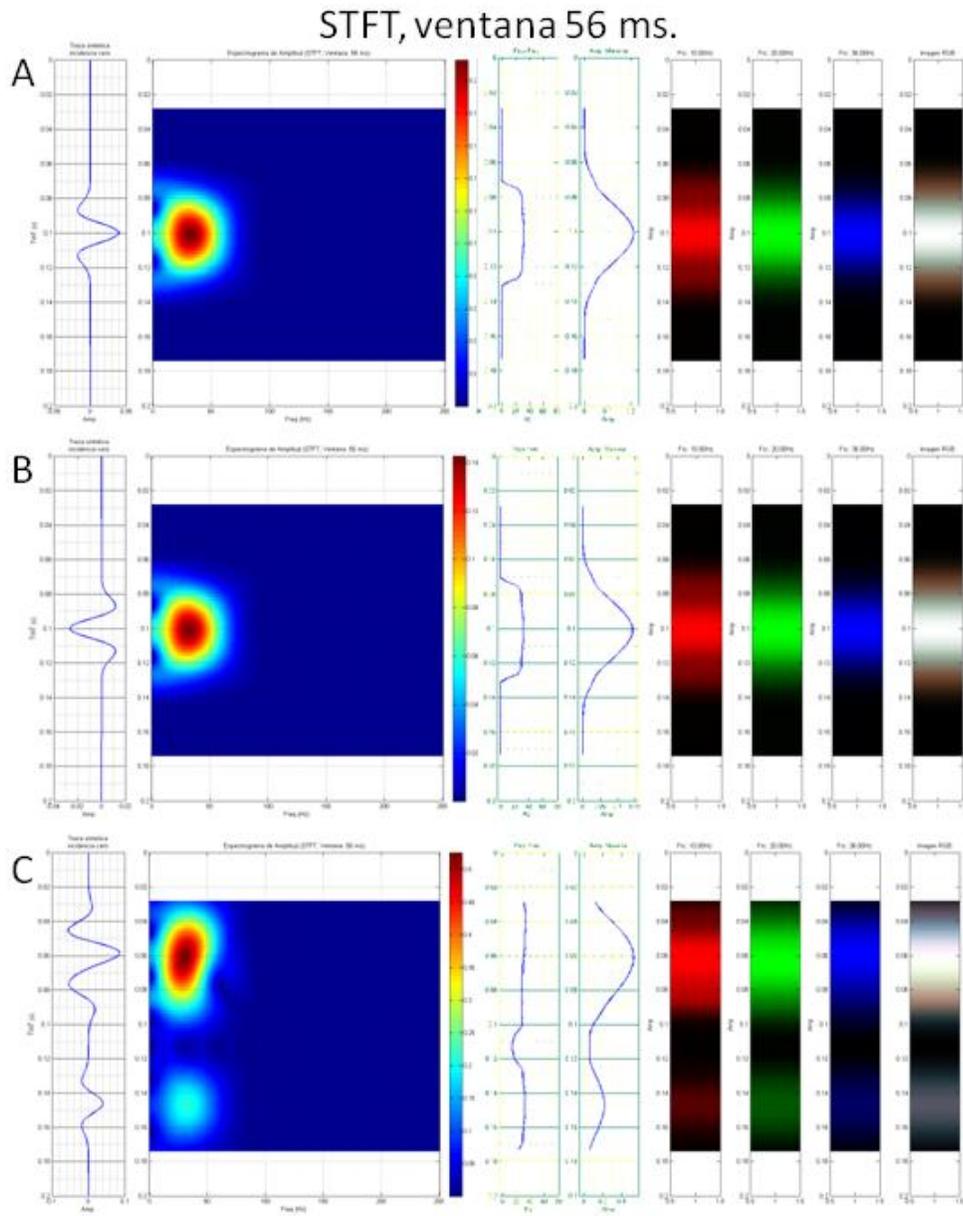


Figura 74. Atributos de descomposición espectral de la traza sintética de incidencia cero de los modelos de interfase simple usando la *STFT* con ventana de 56 ms.

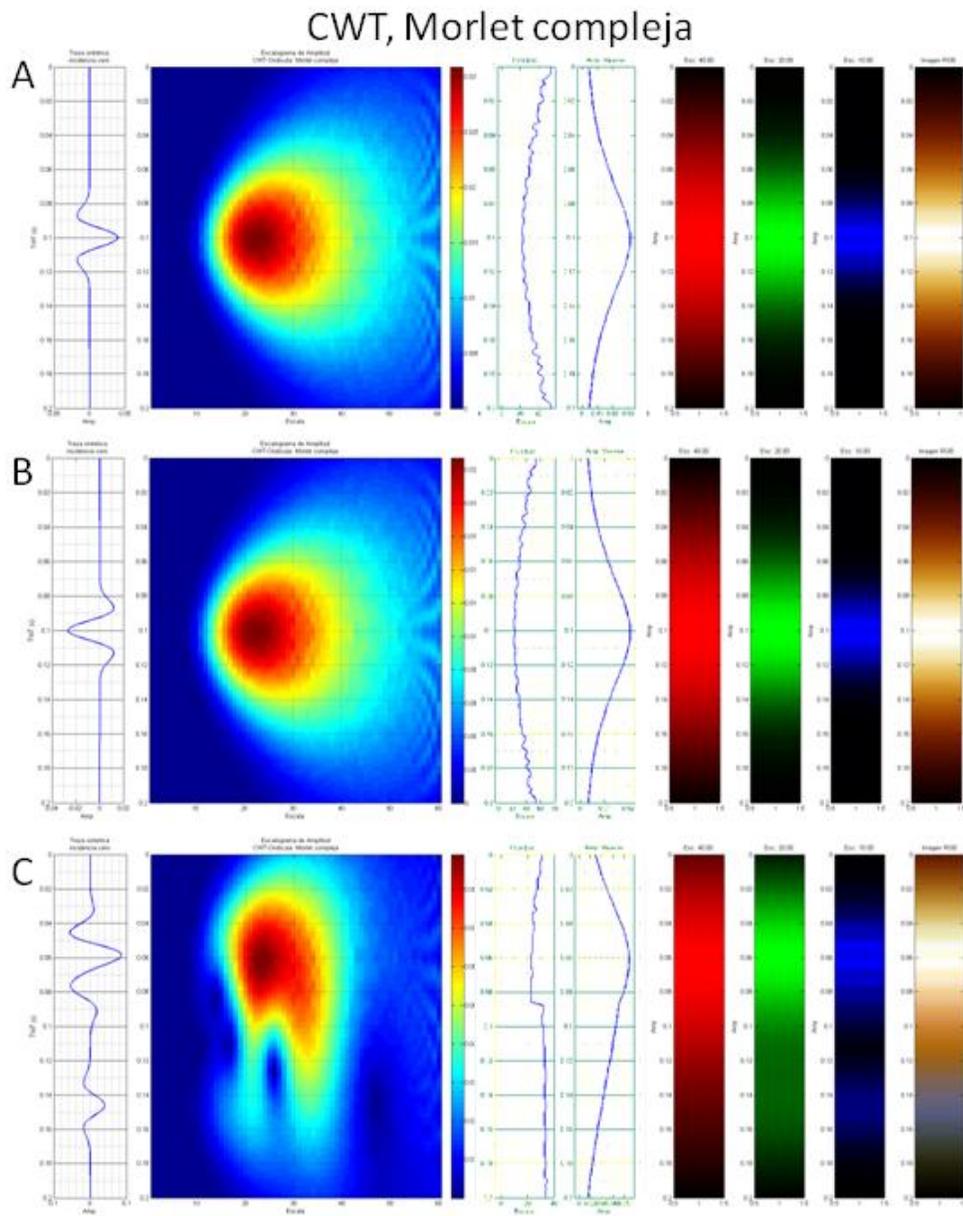


Figura 75. Atributos de descomposición espectral de la traza sintética de incidencia cero de los modelos de interfase simple usando la CWT.

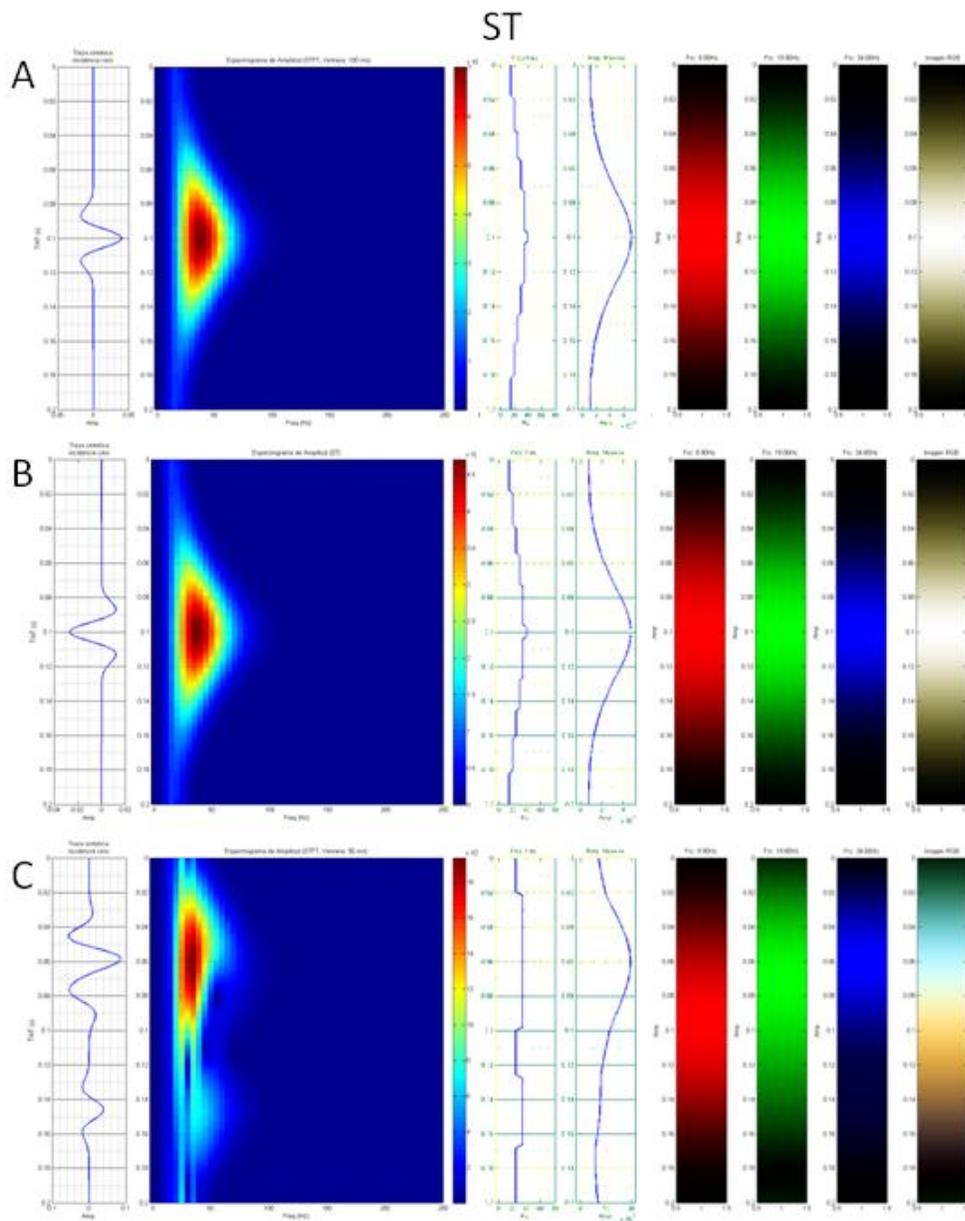


Figura 76. Atributos de descomposición espectral de la traza sintética de incidencia cero de los modelos de interfase simple usando la *ST*.

Modelo de cuñas

En esta sección se muestra los resultados de las respuestas sísmicas obtenidas de los modelos de cuñas. Aquí se observó el impacto de las variaciones laterales de los espesores de capas sobre la información desplegada en datos y atributos sísmicos.

Todas las figuras correspondientes a los modelos de cuña tienen el tiempo en *TW* en el eje vertical de 0 a 200 ms y el espesor en el eje horizontal de 0 a 150 pies. En la figura 77 se muestran los modelos de cuña resultantes después de convolucionar las cuñas mostradas en la figura 37 con la ondícula de Ricker de frecuencia 30 Hz. Además también se graficó la ubicación de los límites de resolución según los criterios de Rayleigh a y Widess. Las trazas de estos sismogramas fueron calculadas cada dos pies de espesor.

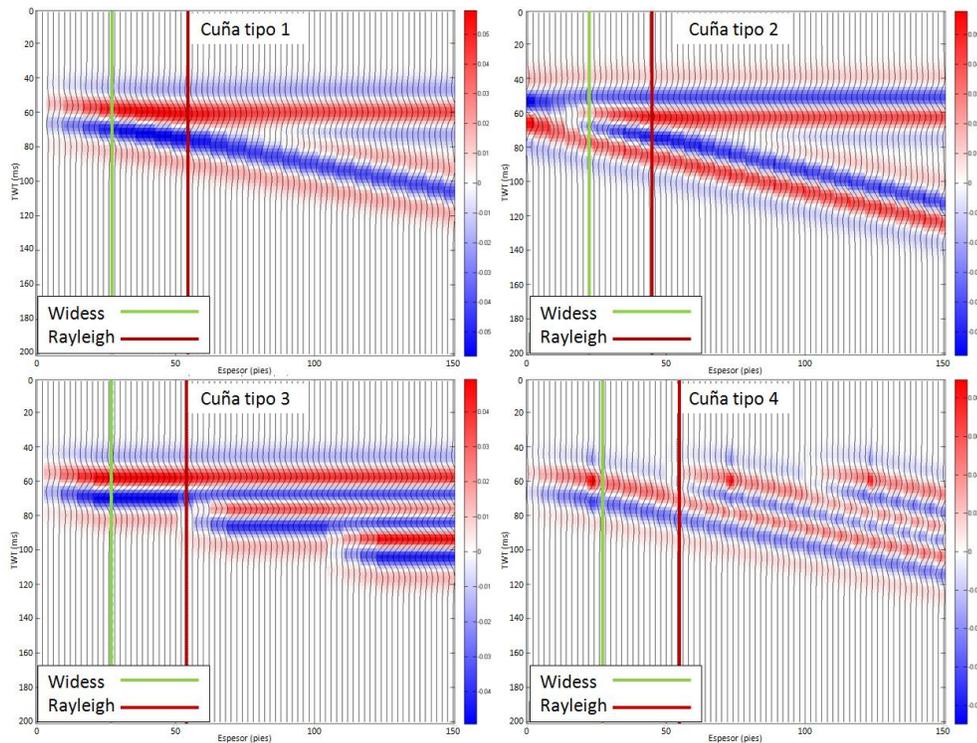


Figura 77. Modelos de cuñas convolucionados con la ondícula de Ricker de frecuencia 30 Hz.

En el modelo de cuña tipo 1 fue posible observar que en espesores menores al límite de resolución de Rayleigh no hay cambio en la forma de la onda aunque si hay variación en la amplitud. Esta amplitud comenzó a descender para espesores que están por debajo del límite de resolución de Widess y donde la cuña tiene espesor de dos pies o menos la amplitud es cero eliminando la detectabilidad de la capa.

El modelo tipo 2, está definido por una capa de espesor constante de 25 pies de lutita cubriendo una arena de espesor variable. En este modelo que aprecia que el

tope y base están permanentemente en una zona de interferencia sísmica y en el límite de resolución de Widess se suprime la respuesta sísmica de la arena.

Los modelos de cuñas tipo 3 y 4 son intercalaciones de arena y lutita de 25 pies de espesor. Ellos mantienen una amplitud constante hasta que sus espesores son reducidos en las zonas de acuñaamiento o truncamiento. En estas zonas se observó un aumento de su amplitud. Esto ocurre porque en estas zonas los modelos tienen un comportamiento similar a la zona de capas delgadas del modelo 1. Esta conducta permite detectar capas delgadas sin conocer su base, tope y espesor.

Energía y cuadratura de la energía

Las figuras 78 y 79 muestran la variación de los atributos de energía y su cuadratura, respectivamente, del modelo de cuña 1 en seis sub-gráficos basados en el número de muestras utilizadas para su cálculo. En ambos atributos se observó una buena representación del tope y base de las capas delgadas cuando estos eran calculados usando una ventana de cinco muestras, es decir, 8 ms.

Al usar una ventana de 10 muestras (o 18 ms), se observó una pérdida en la capacidad de distinguir el tope y base en las arenas más delgadas, no obstante, el atributo de energía mostró un aumento en la amplitud entre el límite de resolución de Rayleigh y de Widess permitiendo localizar zonas que están por debajo del límite de resolución. En la cuadratura de la energía se inició un desplazamiento vertical en sus componentes positiva y negativa la cual distorsionaba la imagen de la cuña original.

Cuando se calcularon los atributos de energía con ventanas más grandes, se formó un solapamiento del tope y de la base eliminando la capacidad predictiva de elementos delgados. La cuadratura mostró un desplazamiento mayor de sus componentes verticales. Esto implica que estos atributos se vuelven incapaces de resolver o detectar de capas delgadas.

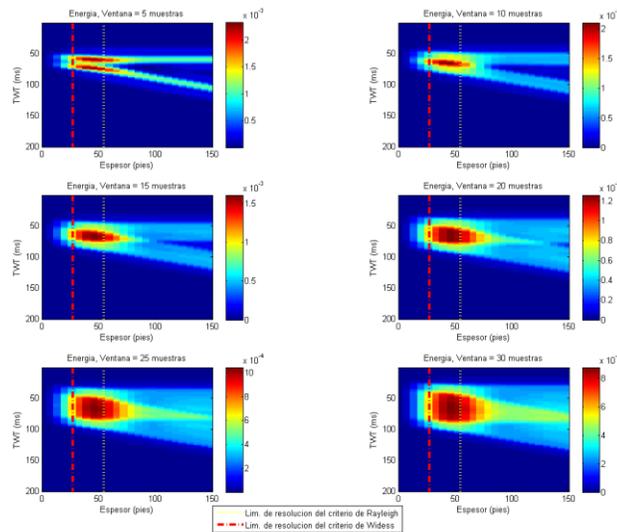


Figura 78. Variación del atributo de energía del modelo de cuñas 1. Cada sub-gráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

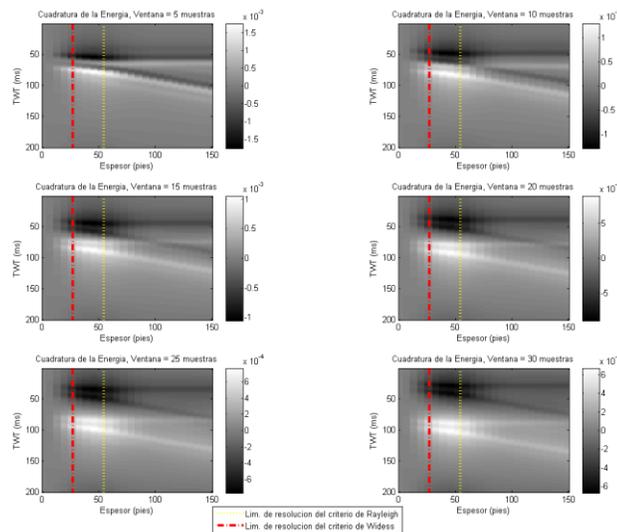


Figura 79. Variación del atributo de la cuadratura de la energía del modelo de cuñas tipo 1. Cada sub-gráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

Al observar los mismos atributos de energía (figura 80) y su cuadratura (figura 81) en el modelo de cuñas 2, la magnitud de la energía asociada al espesor de la capa de lutita de 25 pies que recubre la arena fue constante, pero esta magnitud se redujo y

casi se anuló en donde el cuerpo de arena alcanza su espesor pequeño hasta desaparecer. Posteriormente el cuerpo de lutita volvió a generar una respuesta de la energía sísmica. Es importante destacar que el comportamiento de la energía del cuerpo de lutita delgado es similar al cuerpo de arena con un espesor similar. Esto implica que el atributo de energía y su cuadratura permiten detectar espesores pequeños, sin lograr clasificar litologías.

En este modelo también se observó que estos atributos funcionaron bien para detectar bases y topes usando ventanas de cinco muestras (8 ms) o menos. Y que el atributo de energía respondió bien a ventanas de 10 muestras para detectar capas de espesores pequeños. El uso de ventanas más grandes no generó buenos resultados en ningún atributo.

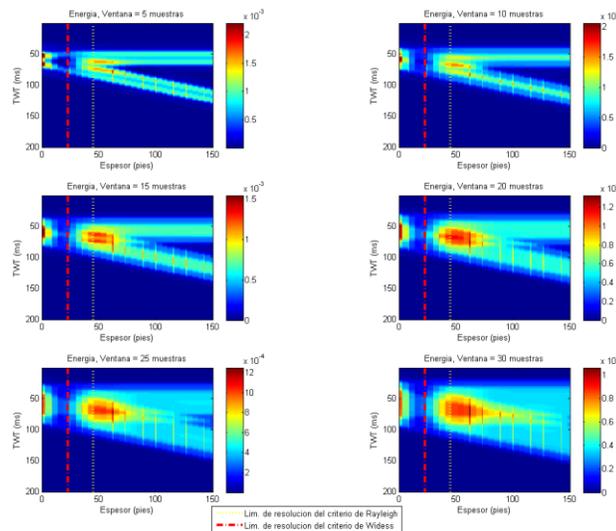


Figura 80. Variación del atributo de energía del modelo de cuñas tipo 2. Cada sub-gráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

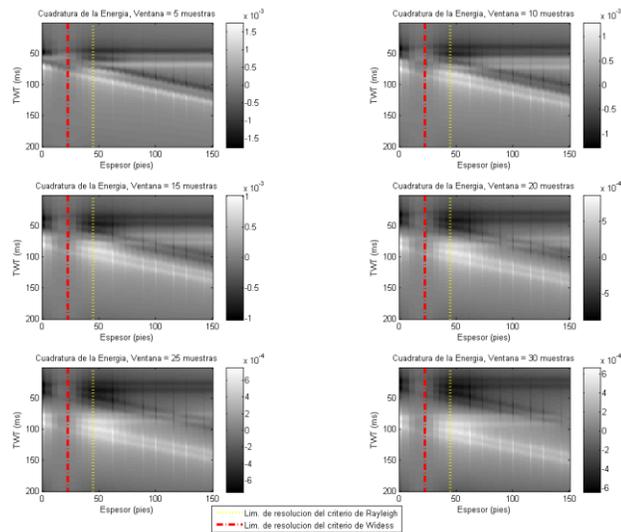


Figura 81. Variación del atributo de la cuadratura de la energía del modelo de cuñas tipo 2. Cada subgráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

La respuesta de la magnitud del atributo de energía de los modelos de cuña tipo 3 y 4 permitieron detectar terminaciones sísmicas similares a los *onlaps* y truncamientos. En efecto, en las figuras 82 (cuña tipo 3) y 83 (cuña tipo 4) se observó aumentos de la magnitud de la energía debido a la interferencia causada por el adelgazamiento de las capas cuando entran en contacto con la zona de acuñamiento o truncamiento. La cuadratura de la energía; mostrada en las figuras 84 (cuña tipo 3) y 85 (cuña tipo 4), también reveló un aumento de su amplitud en las zonas de terminaciones sísmicas.

Al igual que en los modelos de cuña tipo 1 y 2, la cantidad de muestras usadas en el cálculo de estos atributos fue determinante para identificar los cuerpos delgados. Por consiguiente, cuando se usó pocas muestras se alcanzó una mejor detección de las capas delgadas.

En el atributo de energía, es interesante señalar que al ser calculado con un mayor número de datos (una ventana de 30 ms) mostró un aumento en la magnitud con respecto a la cantidad de capas presentes. Este resultado podría utilizarse para fases

previas en interpretaciones sísmicas. El atributo de cuadratura no generó resultados de interés en ventanas mayores a 20 ms.

Los resultados obtenidos en los atributos de energía y cuadratura de la energía de los modelos de cuña tipo 3 y tipo 4, permiten realizar interpretaciones en zonas donde hay intercalaciones litológicas que experimentaron algún tipo adelgazamiento, bien sea ocasionado por la geometría de la depositación o por algún evento de meteorización posterior.

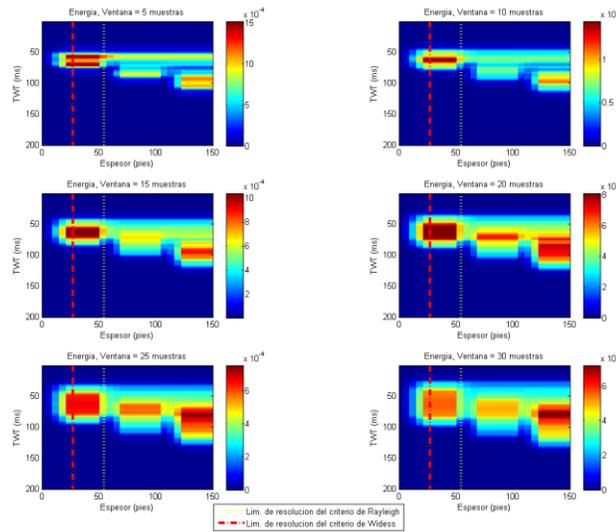


Figura 82. Variación del atributo de energía del modelo de cuñas tipo 3. Cada sub-gráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

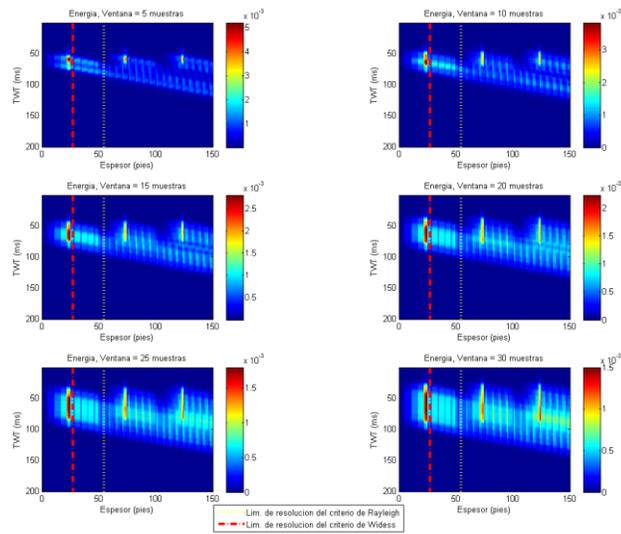


Figura 83. Variación del atributo de energía del modelo de cuñas tipo 4. Cada sub-gráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

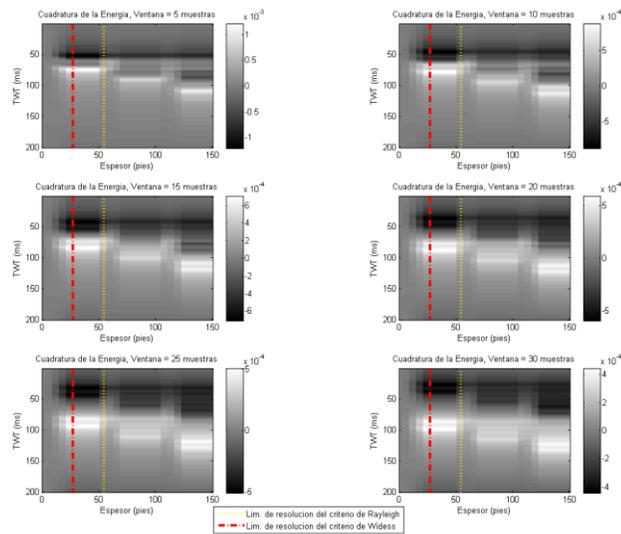


Figura 84. Variación del atributo de la cuadratura de la energía del modelo de cuñas tipo 3. Cada sub-gráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

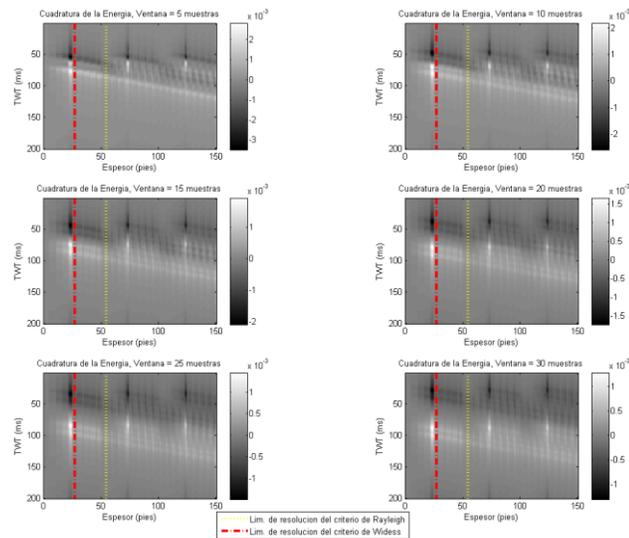


Figura 85. Variación del atributo de la cuadratura de la energía del modelo de cuñas tipo 4. Cada subgráfico representa el número de muestras utilizadas (5, 10, 15, 20, 25 y 30) para el cálculo. El eje vertical muestra el tiempo de 0 a 200 ms, el eje horizontal indica el espesor de la cuña de 0 a 150 pies.

Atributos instantáneos

En la figura 86 se presenta la amplitud instantánea de los cuatro modelos de cuñas generados. El modelo de cuñas tipo 1 manifestó un aumento de la amplitud en el punto de interferencia sísmica y luego una reducción hasta desaparecer la señal sísmica, tal como lo indican Copra y Marfurt (2007). Este mismo efecto en el aumento de la amplitud instantánea es observado en las terminaciones sísmicas de los acañamientos y truncamientos de los modelos de cuña tipo 3 y 4. El modelo de cuñas tipo 2 presentó un aumento en la energía en las zonas donde se acuño la arena interna y también en la zona donde convergieron las capas de lutita que cubren a esta arena. Lo que implica que no hay deferencia en el atributo debido a la litología, sin embargo, usando este atributo es posible definir disposiciones geométricas asociadas elementos estructurales y estratigráficos.

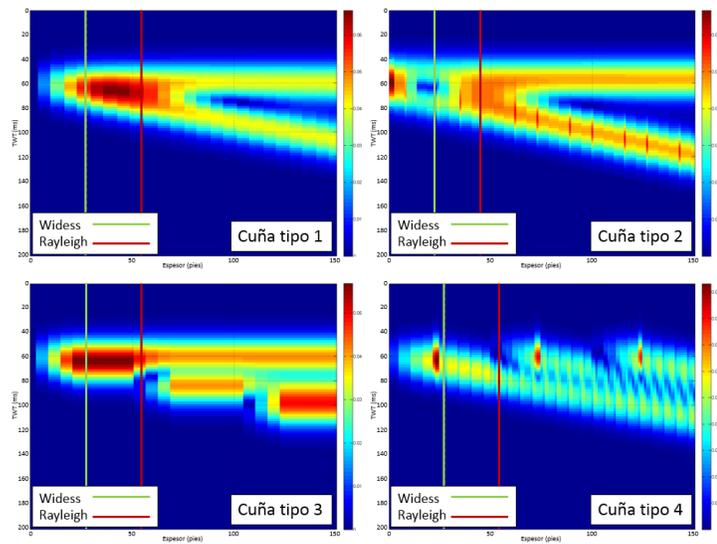


Figura 86. Amplitud instantánea de los modelos de cuña

El atributo de Amplitud instantánea tuvo un comportamiento similar al atributo de energía calculado con una ventana de datos de 10 muestras, es decir, 18 milisegundos.

El atributo de fase instantánea (figura 87), el cual se desplegó con una paleta de colores circular debido a que está acotado entre $-\pi$ y π , mostró muy bien los lineamientos geométricos de las cuñas. En el modelo de cuña dos se observó que la incorporación de una capa adicional generó una rotación en la fase y el cierre de la cuña interna de las arenas. Sin embargo en términos prácticos es difícil apreciar esa diferencia para usarla como una herramienta en la interpretación si no se tiene un conocimiento previo de la existencia de dicha capa. En los modelos tipo 3 y 4, se observa claramente los efectos de acuñamiento y truncamiento, pero al igual que el modelo tipo dos es difícil inferir cuantas capas forman cada reflexión.

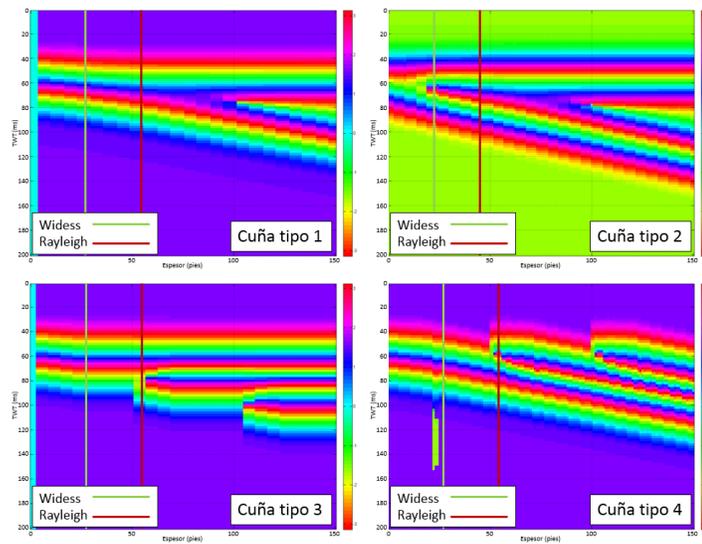


Figura 87. Fase instantánea de los modelos de cuña

Los atributos de frecuencia instantánea (figura 88) y aceleración de la fase (figura 89) mostraron resultados similares desde un punto de vista geométrico, esto se debe a que sus cálculos dependen de la misma variable. De hecho, la frecuencia instantánea usando la primera derivada de la fase y la aceleración en su segunda derivada.

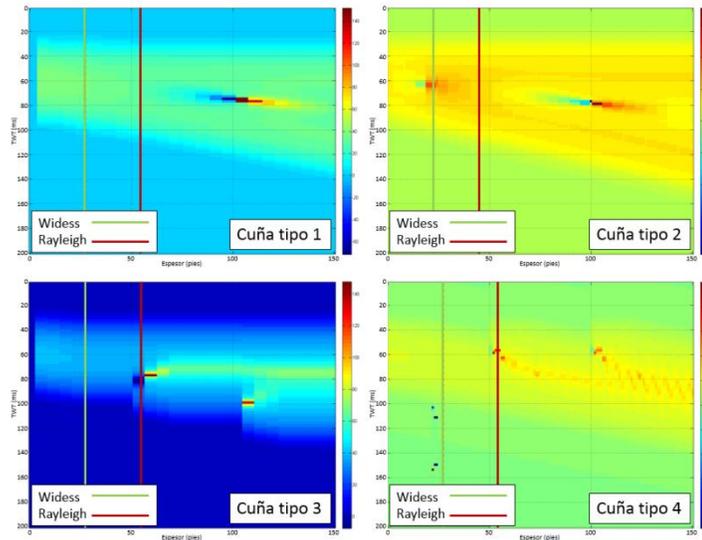


Figura 88. Frecuencia instantánea de los modelos de cuña

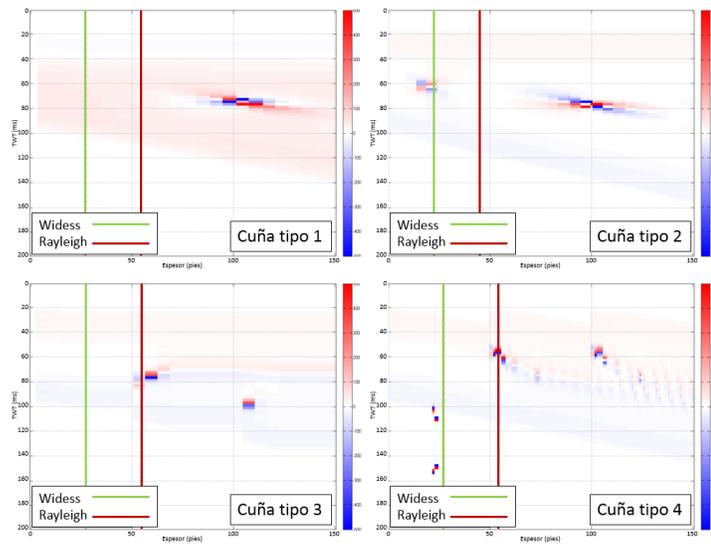


Figura 89. Aceleración de la fase instantánea de los modelos de cuña

Para los modelos de cuña tipo 1 y 2 la frecuencia instantánea mostró picos positivos que superaron los 140 Hz a la derecha (donde se ensancha la cuña) de donde la cuña alcanzó un espesor próximo a $\lambda/2$ y picos negativos a la izquierda de este espesor (donde se adelgaza la cuña). En el modelo de cuña tipo 2, la frecuencia mostró un comportamiento similar pero con menor intensidad donde la cuña de arena alcanzó el espesor cero.

En los modelos tipo 3 y 4, la frecuencia instantánea mostró picos altos (mayor a 140 Hz) entre las terminaciones sísmicas asociadas a los acunamientos y truncamientos y mostró un aumento de la frecuencia (que alcanzó los 60 Hz) en zonas donde se apilaban mayor cantidad de capas.

Atributos de descomposición espectral

Amplitud máxima y frecuencia dominante (STFT)

En las figuras 90, 91, 92 y 93 se muestran la amplitud máxima (arriba) y frecuencia dominante (abajo) de los modelos de cuña tipo 1, 2, 3 y 4, respectivamente, extraídas de la STFT con ventanas de cálculo con un ancho de 14, 28, 42 y 56 ms.

En términos generales, hubo una correspondencia entre la magnitud de la amplitud máxima y el tamaño de la ventana. Esto se debe a que mientras mayor es la ventana, mayor es la cantidad de datos usados en el cálculo de la *STFT*. Otro efecto sobre el atributo de amplitud fue que mientras menor fue la ventana, se obtuvo una mejor resolución de los eventos que componen la cuña. La frecuencia no tuvo buenos comportamientos en el uso de ventanas pequeñas, es decir, se observó ciertos delineamientos geométricos, pero no se obtuvo un resultado que describiera el comportamiento general de la señal a lo largo de la cuña.

En el modelo de cuña tipo 1 (figura 90) al comparar el comportamiento de la amplitud máxima y la frecuencia dominante con respecto al espesor de las caspas, se observó que la magnitud de la amplitud y de la frecuencia aumentó cuando se alcanzó el espesor de del límite de resolución $\lambda/4$. Sin embargo, cuando se siguió reduciendo el espesor por debajo del límite de resolución $\lambda/8$, la amplitud máxima comenzó a disminuir mientras la frecuencia siguió aumentando. Este comportamiento fue similar en el modelo de cuñas tipo 2 (figura 91), donde se alcanzó un máximo de frecuencia en la zona más delgada de la cuña de arena y luego otro máximo de frecuencia en la zona más delgada de la lutita.

En las terminaciones sísmicas generadas por los acuñamientos y truncamientos en las figuras 92 y 93, respectivamente, se observó un aumento de amplitud.

Adicionalmente, la frecuencia en los modelos 2, 3 y 4 manifestó un importante aumento, el cual superó los 70 Hz, con respecto a la cantidad de capas intercaladas.

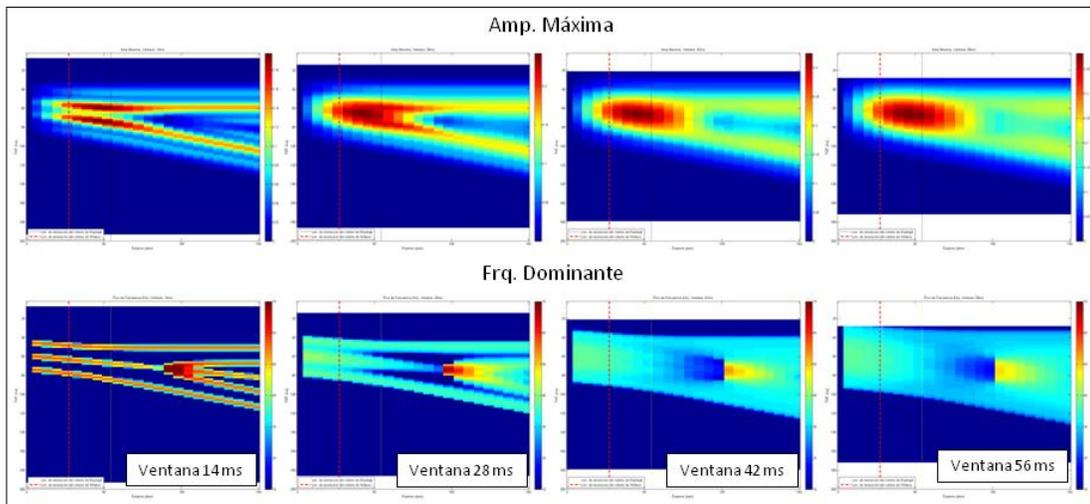


Figura 90. Atributos resaltantes de la cuña tipo 1 usando *STFT*. Arriba se muestra la amplitud máxima y abajo la frecuencia dominante de la cuña. De izquierda a derecha se muestra su variación en función del ancho de ventana usada en el cálculo de la *STFT* en milisegundos. La escala de color de la frecuencia está acotada entre 10 Hz (azul) y 70 Hz (rojo).

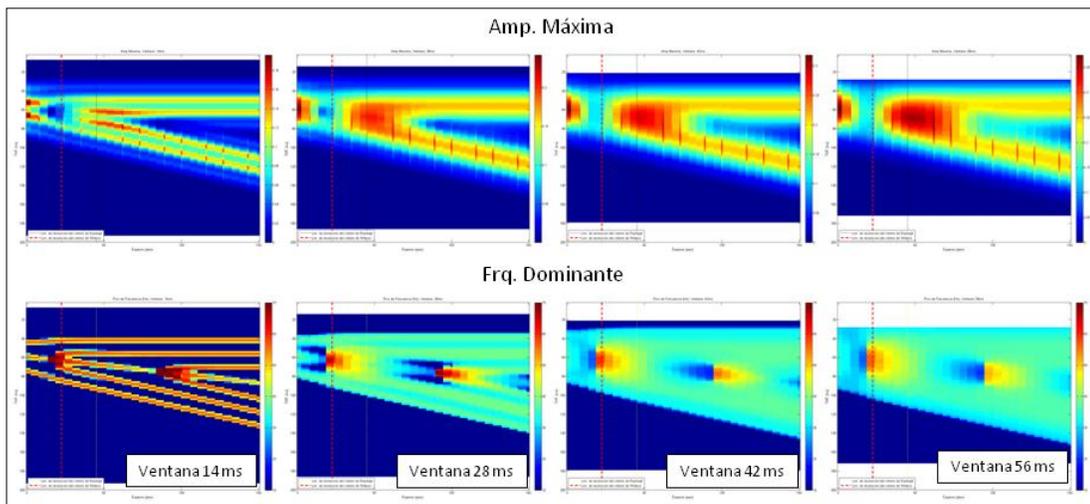


Figura 91. Atributos resaltantes de la cuña tipo 2 usando *STFT*. Arriba se muestra la amplitud máxima y abajo la frecuencia dominante de la cuña. De izquierda a derecha se muestra su variación en función del ancho de ventana usada en el cálculo de la *STFT* en milisegundos. La escala de color de la frecuencia está acotada entre 10 Hz (azul) y 70 Hz (rojo).

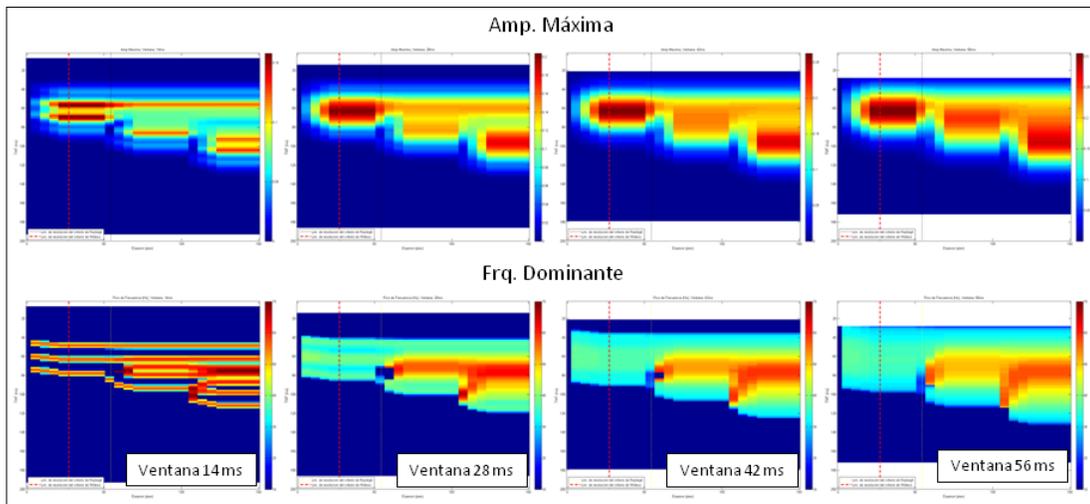


Figura 92. Atributos resaltantes de la cuña tipo 3 usando *STFT*. Arriba se muestra la amplitud máxima y abajo la frecuencia dominante de la cuña. De izquierda a derecha se muestra su variación en función del ancho de ventana usada en el cálculo de la *STFT* en milisegundos. La escala de color de la frecuencia está acotada entre 10 Hz (azul) y 70 Hz (rojo).

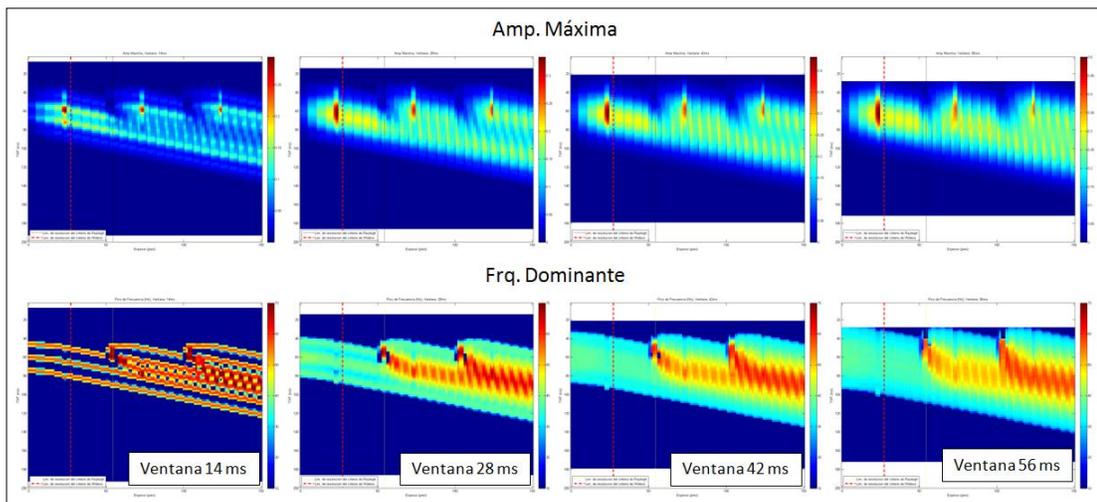


Figura 93. Atributos resaltantes de la cuña tipo 4 usando *STFT*. Arriba se muestra la amplitud máxima y abajo la frecuencia dominante de la cuña. De izquierda a derecha se muestra su variación en función del ancho de ventana usada en el cálculo de la *STFT* en milisegundos. La escala de color de la frecuencia está acotada entre 10 Hz (azul) y 70 Hz (rojo).

Imágenes RGB (STFT)

La figura 94 muestra una composición de las imágenes RGB generadas de los cuatro tipos de cuñas usando la TSFT con ventanas de 14, 28, 42 y 56 ms. las frecuencias seleccionadas para las componentes de las imágenes son 21 Hz en rojo, 35 Hz en verde y 42 Hz en azul. La figura 30 del marco metodológico muestra la paleta de colores RGB.

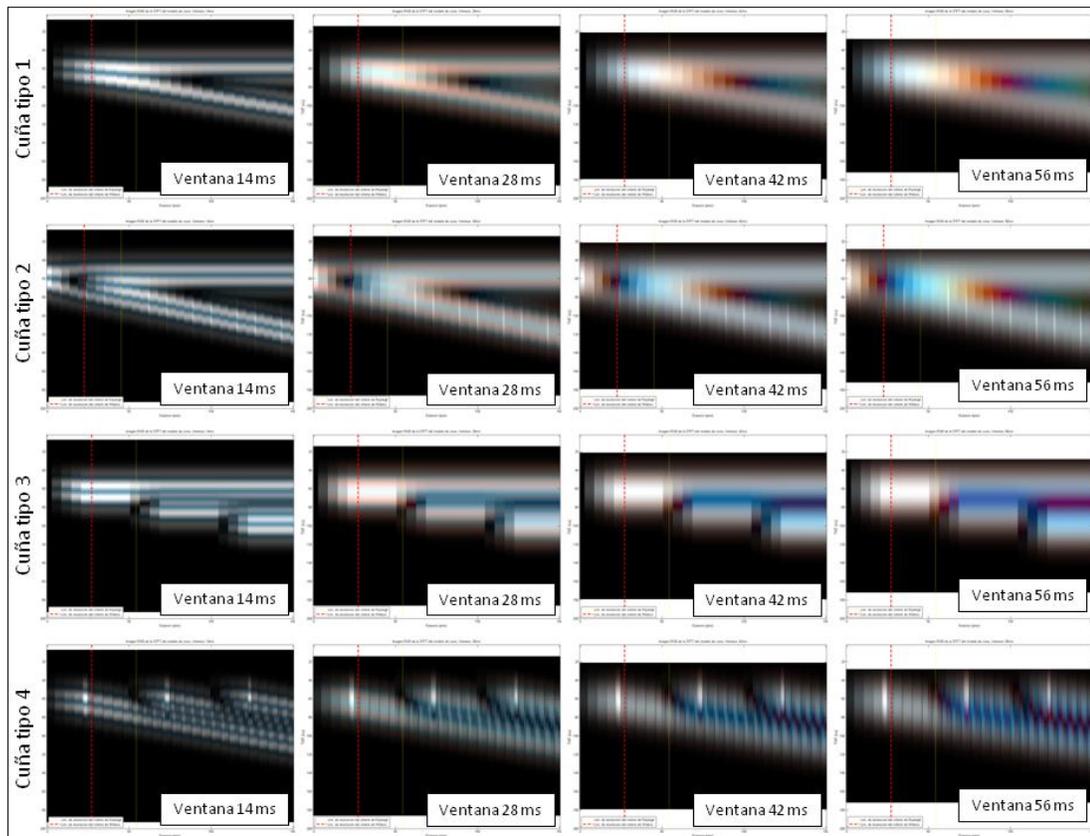


Figura 94. Imágenes RGB de los modelos de cuña basado en la STFT en ventanas 14, 28, 42 y 56 ms. Las componentes de frecuencias usadas fueron 21, 35 y 42 Hz en colores rojo, verde y azul, respectivamente.

Es notable que las imágenes realizadas usando la ventana de 14 ms en todos los modelos de cuña, resaltaron los eventos de las reflexiones con una muy pobre diferenciación de los elementos de frecuencia. En efecto, la expresión obtenida es

básicamente blanco y negro lo que significa la energía se distribuyó de forma muy similar en las tres componentes de frecuencia.

En ventanas mayores logró observarse una separación de colores de las tonalidades rojo, verde y azul. Esta separación fue más débil en la ventana de 28 ms, pero se observó una buena separación de las reflexiones. Usando la ventana de 56 ms se apreció una mejor separación de color pero se pierde información en las reflexiones. La ventana de 42 ms ofreció una buena relación de separación de los reflectores y las componentes de frecuencia.

En la cuña tipo 1 se observó que las tres componentes de frecuencia estuvieron presentes en el límite de resolución (color blanco) pero en la zona más delgada predominaron los colores azul y verde asociados a mayores frecuencias, mientras que en la dirección donde se engrosó la cuña prevaleció el color rojo representativo de menores frecuencias.

En el modelo tipo 2, se observó que hay una importante expresión del color blanco que sigue la geometría de la lutita de 25 pies de espesor. No obstante en el momento que la arena dentro de esta lutita alcanzó el espesor cero, se anularon las componentes verde y roja quedando solo la expresión de alta frecuencia. Donde la arena es más gruesa predominó el color rojo asociado a bajas frecuencias.

Las terminaciones sísmicas de los modelos tipo 3 y 4 se expresaron en color blanco, pero en la zona interna de la cuna se observó la supremacía del color azul. Esta expresión de altas frecuencias se debió a que estos modelos de cuñas están relleno de capas acopladas de espesores pequeños. En espesores mayores a 125 pies, se apreció una tonalidad purpura. Esto es causado por la combinación de altas y bajas frecuencias, donde las altas frecuencias son causadas por el relleno de la cuña, mientras que las bajas frecuencias fueron generadas por el espesor total de la cuña.

Amplitud máxima y frecuencia/escala dominante (*CWT* y *ST*)

Para seguir con el análisis de frecuencias se realizó las transformadas ondícula continua y *S* en los cuatro modelos de cuña. En las figuras 95 y 96 de la *CWT* y la *ST*, respectivamente. Arriba se desplegó la amplitud máxima y abajo la escala dominante, para la *CWT*, y la frecuencia dominante, en el caso de la *ST*.

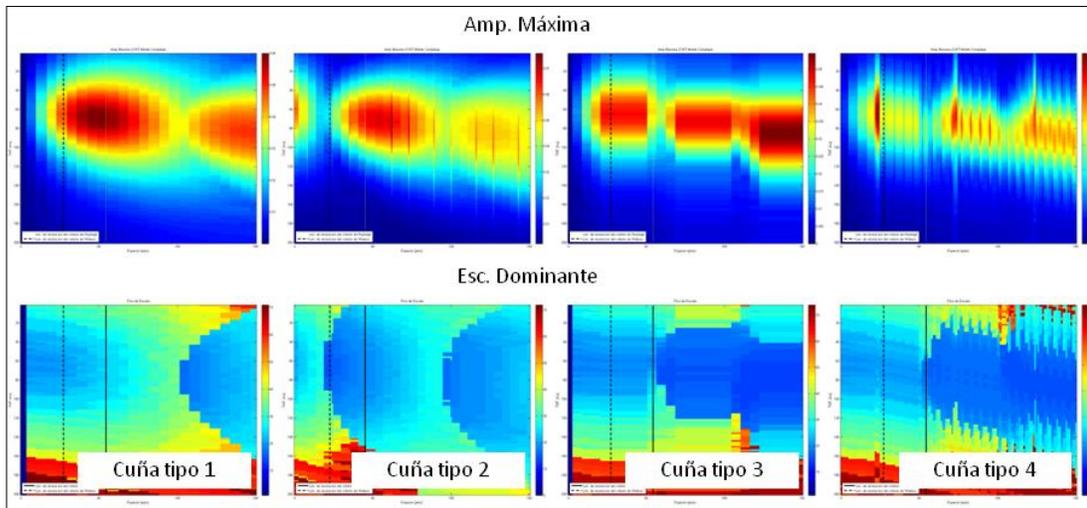


Figura 95. Atributos resaltantes usando la *CWT* de los modelos de cuña

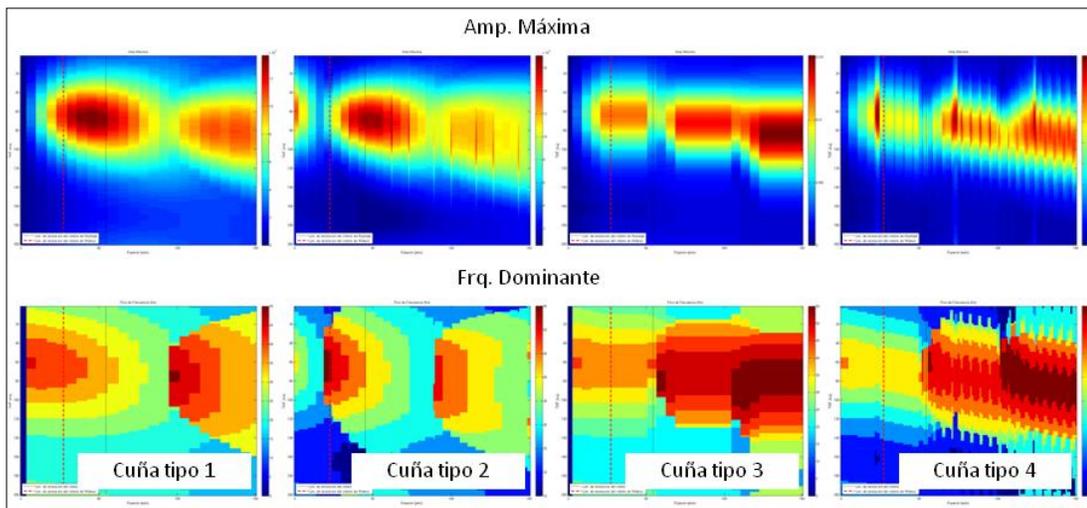


Figura 96. Atributos resaltantes usando la *ST* de los modelos de cuña

La amplitud máxima tuvo resultados similares en ambas transformadas. Evidenciándose el aumento de la amplitud en zonas donde los espesores se

adelgazaron a $\lambda/4$ y una reducción de la misma en espesores por debajo del límite de resolución de Widess $\lambda/8$. La detección de las terminaciones sísmicas de los modelos tipo 3 y 4 no fueron tan buenas como lo fue en las STFT de ventana pequeña, pero se observó un aumento en la amplitud con respecto a la cantidad de intercalaciones en ambos modelos.

La menor escala dominante obtenida en los cuatro modelos fue menor que 10 y la frecuencia dominante alcanzada en los modelos de cuña fue 50 Hz para el modelo tipo 1 y 55 Hz para los modelos tipo 2, 3 y 4. Se observó que tanto las áreas donde el espesor era pequeño (borde de la cuña) como en las zonas donde había mayor cantidad de intercalaciones se reflejó una escala pequeña en la *CWT* y una frecuencia mayor en la *ST*. Esto implica que el atributo de escala y frecuencia dominante es sensible a la cantidad de capas presentes en el medio.

Imágenes RGB (*CWT* y *ST*)

La figura 97 muestra las imágenes RGB de las transformadas ondícula continua (arriba) y *S* (abajo) de los cuatro modelos de cuña. La imagen de la transformada ondícula continua se construyó con las escalas son 7 en azul, 16 en verde y 30 en rojo. La escala 7 fue tomada debido a que la misma permitió ver la continuidad de los reflectores y las otras dos escalas permitieron observar la variación lateral de la energía. En el caso de la *ST* se tomó las frecuencias 20 en rojo, 35 en verde, y 50 Hz en azul. Para los modelos de cuña tipo 1 y 2, se observó que los colores asociados a frecuencias altas se localizaron al borde de la cuña y a medida que a las cuñas se engrosaron, el color predominante paso a ser el asociado a bajas frecuencias. Este comportamiento fue similar en los modelos tipo 3 y 4, sin embargo, en las zonas más gruesas de la cuña la expresión de colores fue de purpura a azul. Esto se debe a que hay una componente de baja frecuencia asociada al espesor total de la cuña y una componente de alta frecuencia asociada a la intercalación de capas delgadas.

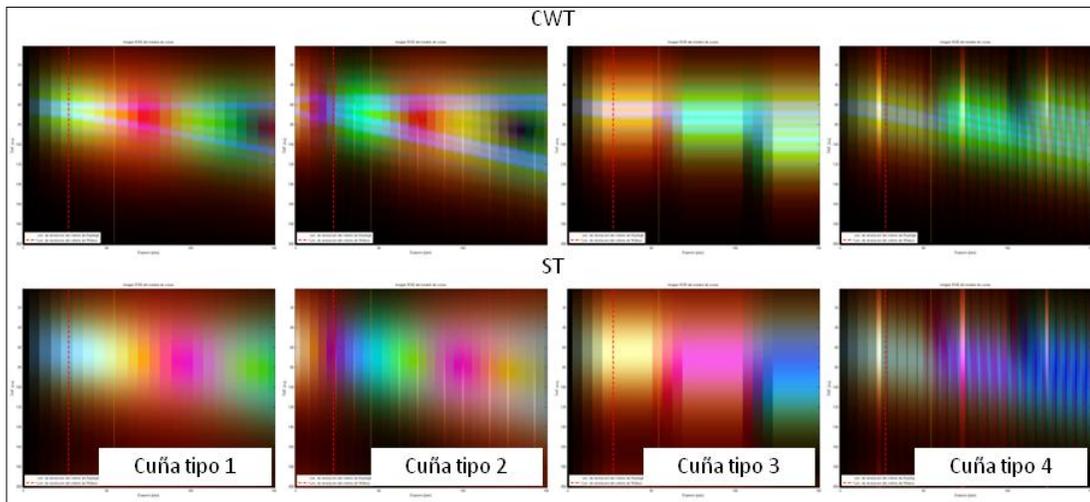


Figura 97. Imágenes RGB de la CWT (arriba) y ST (abajo) de los cuatro modelos de cuña. Las estalas seleccionadas en la CWT son 7 (azul), 16 (verde) y 30 (rojo) y la frecuencias 20 (rojo), 35 (verde) y 50 Hz (azul).

Al comparar las imágenes RGB de las STFT (figura 94) con las imágenes generadas de la CWT y ST (figura 97), se observó que las STFT tienen una mejor expresión de la geometría, pero las CWT y ST poseen una mejor separación de las componentes de frecuencias con respecto al espesor de la cuña.

La expresión de la energía de escalas menores a 10 en la CWT presentó muy baja magnitud, sin embargo al examinar a detalle los resultados obtenidos en bajas escalas se observó que existe una buena representación del medio (figura 98).

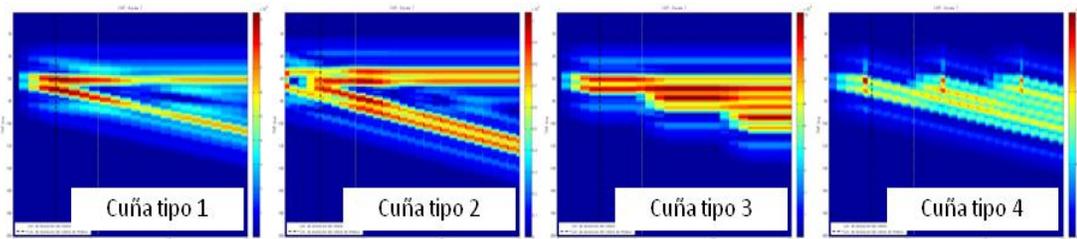


Figura 98. Magnitud de la escala 7 de la CWT de los modelos de cuña.

Análisis sobre trazas sísmicas

Para poder interpretar los atributos dentro del volumen sísmico 3D, primero se calcularon e interpretaron estos atributos en las trazas ubicadas en los pozos C1, C3, C4 y C5 dentro del intervalo de tiempo 1150 y 1850 ms en *datum* sísmico. Este intervalo incluye toda la información de la Formación Roblecito, pero también incluye parte de las formaciones Chaguaramas, La Pascua y el Cretácico. Los topes identificados en los pozos representan la interpretación sísmica de los horizontes Tope de Roblecito, MSF, Base de las lutitas y Base de Roblecito del más somero al más profundo.

Energía y cuadratura de la energía

La figura 99 contiene el registro GR escalado, la traza y los paneles de energía y su cuadratura de los pozos C1, C3, C4 y C5. Los paneles de energía mostraron una buena identificación de eventos para los cálculos realizados con pocas muestras, es decir cinco muestras (equivalente a una ventana de 8 ms) o menos. Así, la expresión en energía se correlacionó bien con el registro de GR escalado el cual representa la base o tope de un grupo de arenas. Al realizar el cálculo alrededor de 10 muestras, la energía fue mayor entre reflexiones. Al usar mayor número de muestras para el cálculo se superpuso la respuesta cubriendo los eventos de interés.

Al igual que los modelos de interfase simple, la cuadratura de la energía mostró buena relación para ventanas de pocas muestras, no obstante para ventanas mayores no generó buenos resultados apilándose señales producidas por las reflexiones cercanas. Esto se debe a que el atributo de cuadratura de la energía resalta los eventos de baja frecuencia los cuales están vinculados a grandes espesores.

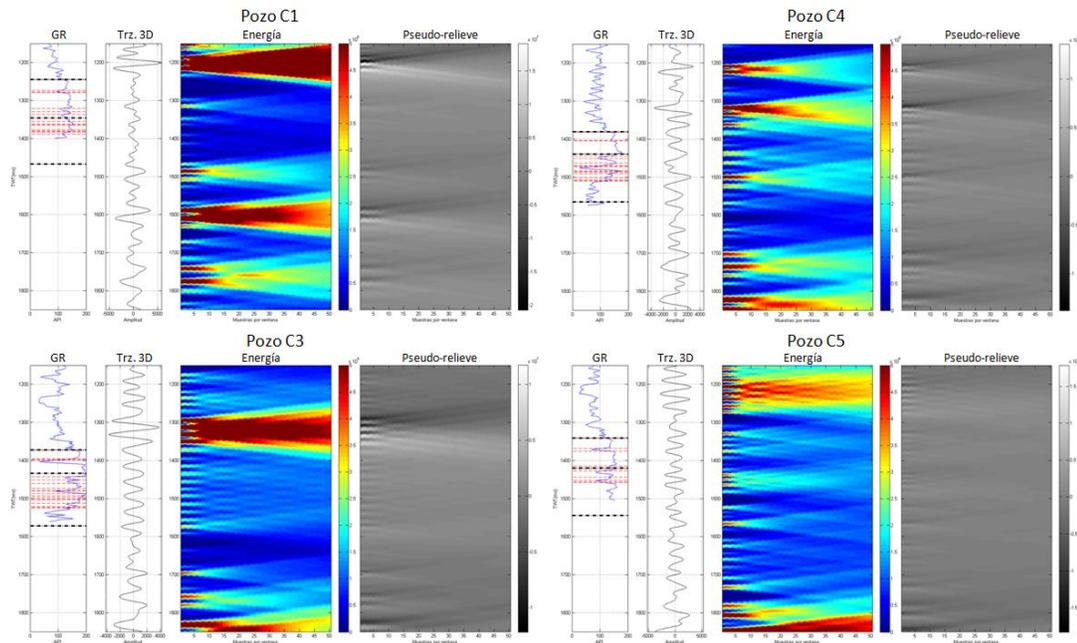


Figura 99. Variación del atributo de energía y su cuadratura en función de la cantidad de muestras usadas para su cálculo. A la izquierda se muestra el GR escalado, seguido de la traza sísmica 3D, el atributo de energía y su cuadratura. El eje vertical muestra el tiempo de 1150 a 1850 ms y el eje horizontal indica el número de muestras usadas 0 y 50.

Atributos instantáneos

La figura 100 contiene de izquierda a derecha los paneles del registro GR escalado, seguidos de la traza original con su cuadratura y la envolvente, la fase en el tercer panel, la frecuencia instantánea en el cuarto y la 2da derivada de la fase en el quinto, de los pozos C1, C3, C4 y C5. Los atributos desplegados en los pozos no mostraron resultados relevantes para poder definir capas delgadas. Sin embargo, la fase y la frecuencia reaccionaron mostrando una caída en la MFS del pozo C1 y en un grupo de arenas gruesas en el pozo C4. Este último evento se detectó en una zona donde la arena tiene un espesor cercano a $\lambda/2$, aproximadamente 74,42 pies. La frecuencia instantánea osciló entre valores de 20 y 40 Hz.

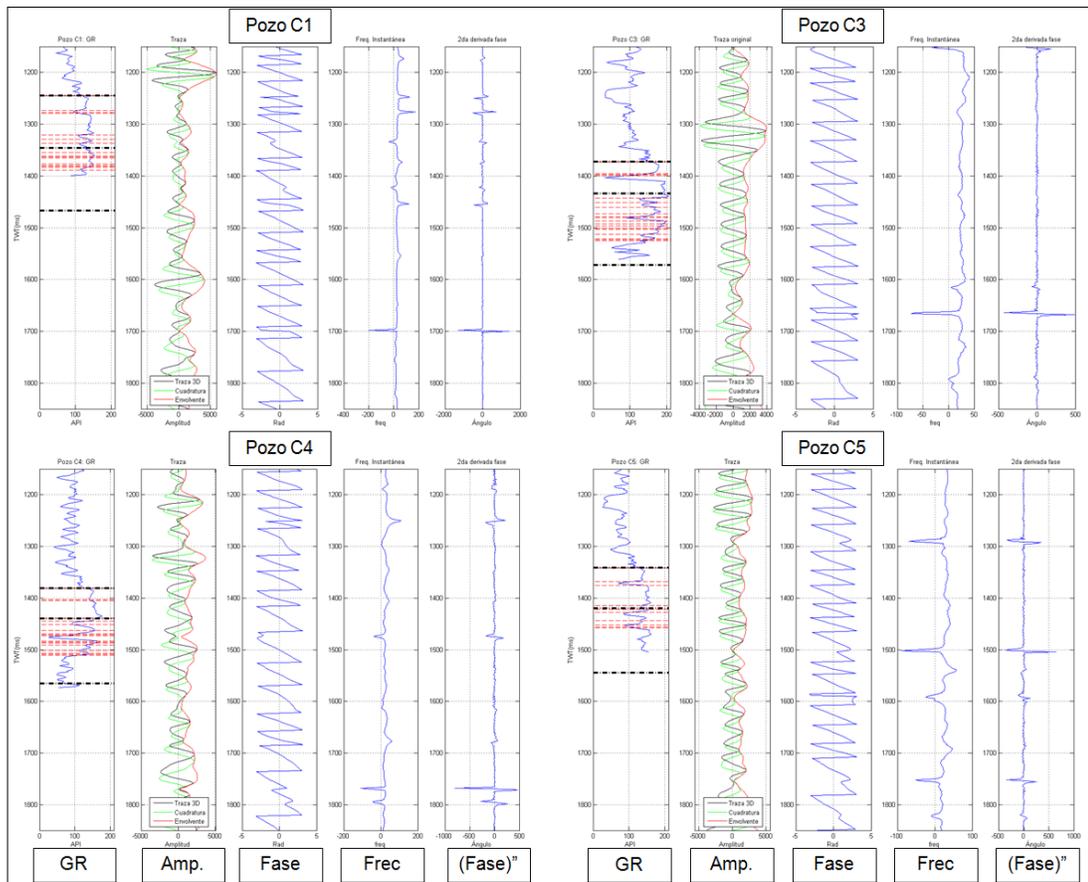


Figura 100. Atributos instantáneos de los pozos C1, C3, C4 y C5.

Transformada rápida de Fourier

El primer cálculo que se realizó sobre las trazas fue la transformada de Fourier mediante la *FFT*. En los espectros de amplitud (figura 101) se observó que la mayor parte del espectro de amplitud está contenido entre las frecuencias 10 y 50 Hz. Las frecuencias dominantes de los pozos son 27 Hz para el pozo C1, 25 Hz para el pozo C3, 32 Hz para el pozo C4 y 32 Hz para el pozo C5. Mientras que en el pozo C3 la mayor parte de la energía se concentró en su frecuencia dominante, se detectó la presencia de varios picos de amplitud asociados a distintas frecuencias en los pozos C1, C4 y C5. Adicionalmente, se observó un pico de baja frecuencia en el intervalo de 10 a 20 Hz.

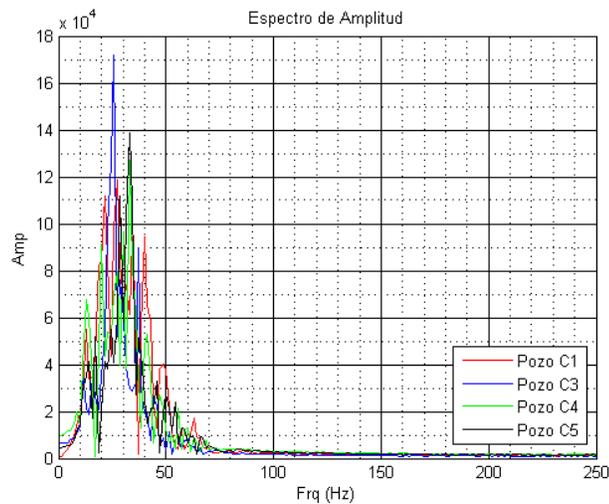


Figura 101. Espectro de amplitud de las trazas sísmicas en los pozos C1, C3, C4 y C5. El eje vertical muestra la amplitud y el eje horizontal indica la frecuencia entre 0 y 250 Hz.

Como se ha descrito en el marco teórico y experimentos previos, la transformada de Fourier por sí sola no permite discriminar la distribución de energía en el tiempo, esto implica que no es posible determinar cuál de los eventos dentro del espectro de amplitud está asociado a determinada formación geológica. Sin embargo, si se pudo conocer que la energía de las trazas sísmicas está dentro del intervalo de frecuencia de 10 a 70 Hz.

Transformadas de Fourier dependiente del tiempo

Se calculó las transformadas de Fourier dependientes del tiempo tomando ventanas de Hanning con un ancho en el tiempo de 28, 42 y 56 ms. El uso de ventanas más pequeñas no permitieron separar eventos en frecuencia y ventanas más grandes no permitieron distinguir eventos en el tiempo.

Los espectrogramas de la STFT del pozo C1 en las distintas ventanas (figura 102) mostraron una pérdida de energía en toda la Formación Roblecito. En este intervalo, el GR escalado es muy radiactivo lo que sugiere que se está en una zona muy lutíticas y que posiblemente, el espesor de las arenas no es lo suficientemente grande como para generar una respuesta sísmica, es decir, posiblemente el pozo C1 está en una zona donde los eventos sísmicos se superponen y se suman

destruictivamente. Cerca del tiempo 1320 y 1330 ms, se observó dos eventos de aumento en la amplitud en los tres espectrogramas y, además, los espectrogramas de ventanas de 42 y 56 ms indicaron que esos aumentos de amplitud ocurren en una ventana de frecuencia centrada en 35 Hz aproximadamente, Estos eventos coinciden con una caída del GR escalado lo cual puede estar asociado a cuerpos de arenas lutíticas apilados, los cuales se comportan como cuerpos de arenas de mayor espesor.

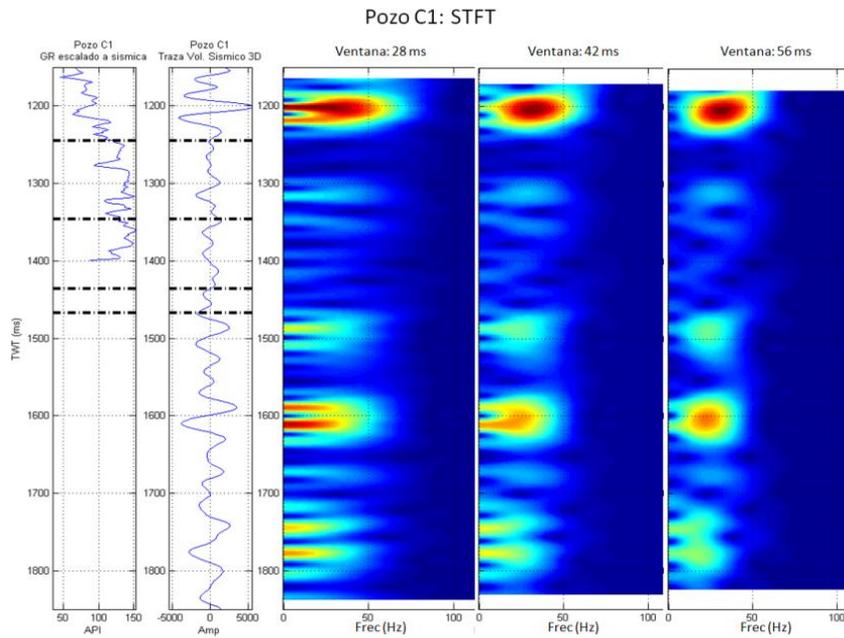


Figura 102. Espectrogramas del pozo C1 usando ventanas con apertura de 28, 42 y 56 ms. El eje vertical muestra el tiempo y el eje horizontal indica la frecuencia entre 0 y 250 Hz.

En el segundo panel de la figura 103 se observó que la traza sísmica del pozo C3 dentro de la Formación Roblecito tiene un comportamiento bastante singular, ya que a simple vista el mismo parece una sinusoidal de una sola frecuencia. Paralelamente, los espectrogramas de ventana 42 y 56 ms mostraron que la distribución de la energía con respecto a la frecuencia está mayormente centrada en 35 Hz. A los 1400 ms el GR escalado presenta un cuerpo de arena limpia asociado al grupo de arenas 1, formado por las arenas A1, A2 y A3. Este cuerpo de arena es detectable en los tres espectrogramas. El espectrograma de ventana más estrecha (28 ms) mostró un aumento de energía centrado en el cuerpo de arena mientras que los

espectrogramas de ventanas más grandes presentaron una caída en la energía. En el tiempo 1480 ms se mostró un comportamiento similar con un grupo de arenas lutíticas. En términos generales, el espectrograma de ventana pequeña permitió observar eventos donde había perturbaciones importantes en el GR escalado.

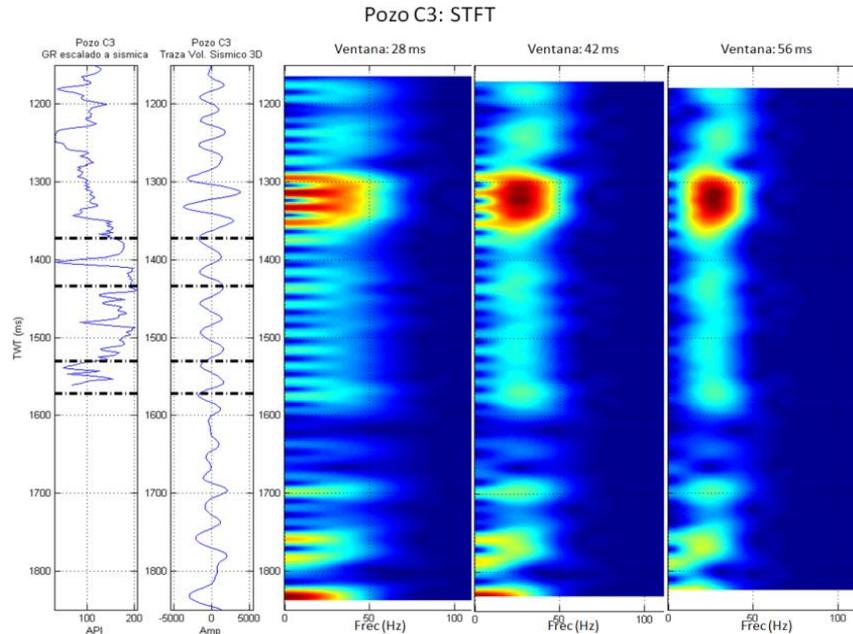


Figura 103. Espectrogramas del pozo C3 usando ventanas con apertura de 28, 42 y 56 ms. El eje vertical muestra el tiempo y el eje horizontal indica la frecuencia entre 0 y 250 Hz.

En los espectrogramas del pozo C4 (figura 104) hubo una respuesta de baja energía en las Arenas grupo 1, esto es debido ellas en este pozo son bastante delgadas (menos de 5 pies). Entre marcador de la MFS y la Base de lutitas se observó una clara respuesta a los cuatro paquetes de arena restantes en el espectrograma de 28 ms, asimismo en los espectrogramas de ventanas 42 y 56 ms se observó cambios en la frecuencia asociados a los paquetes de arenas, mostrando menores frecuencias en las arenas más limpias. Esto podría ser un indicador de fluido, ya que el mismo atenúa las altas frecuencias.

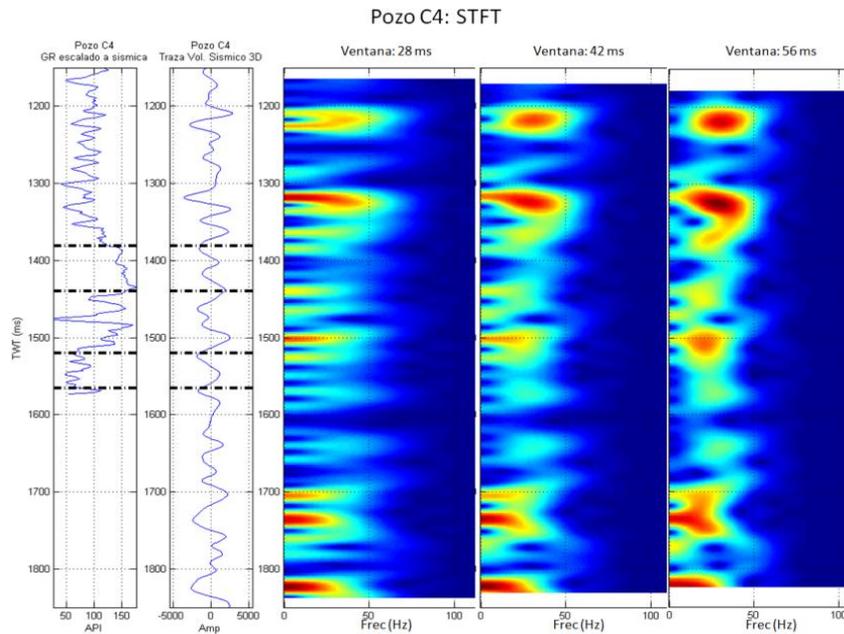


Figura 104. Espectrogramas del pozo C4 usando ventanas con apertura de 28, 42 y 56 ms. El eje vertical muestra el tiempo y el eje horizontal indica la frecuencia entre 0 y 250 Hz.

El pozo C5 está ubicado en un graben y, según el departamento de producción en comunicación interna, es un pozo no productor. Sin embargo no se descarta la presencia de gas que, aunque no es económicamente rentable, puede generar una respuesta sísmica. Sus espectrogramas (figura 105) detectaron energía entre frecuencias de 20 a 50 Hz y se correlaciona con grupos de arenas observados en el GR escalado. Estos grupos de arena de mayor espesor, se deben al aporte sedimentario simultáneo a la formación de la falla normal.

En el pozo C5, al igual que el pozo C3, se observó cierta uniformidad en dos partes de la traza sísmica, una entre el Tope de Roblecito y la MFS y otra entre la MFS y La Base de las lutitas. Según el espectrograma de ventana 56 ms, estos eventos alcanzaron su mayor energía en las frecuencias 30 y 38 Hz, respectivamente.

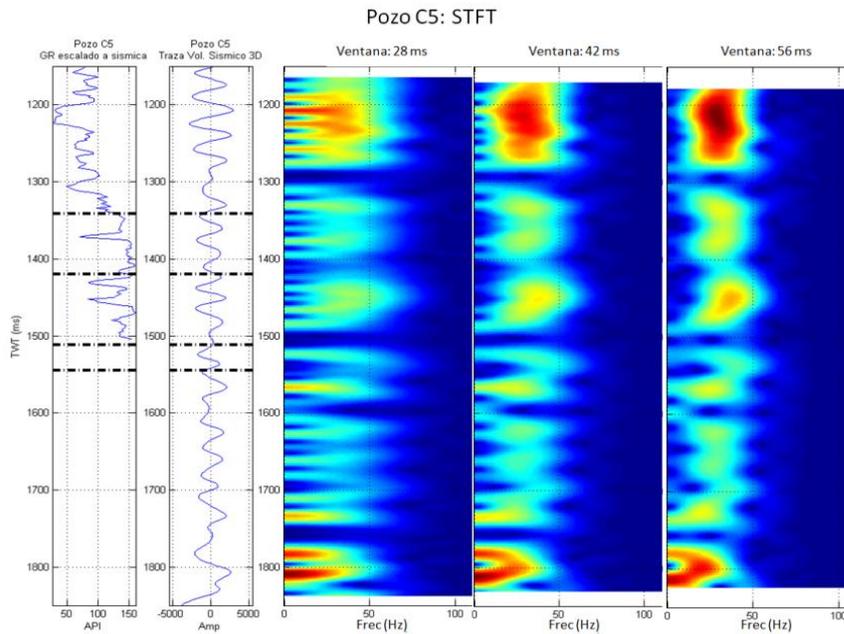


Figura 105. Espectrogramas del pozo C5 usando ventanas con apertura de 28, 42 y 56 ms. El eje vertical muestra el tiempo y el eje horizontal indica la frecuencia entre 0 y 250 Hz.

Transformada ondícula continua (CWT)

La transformada ondícula es definida en el dominio de la escala y no de la frecuencia. La lectura de las escalas grandes están asociadas a frecuencias pequeñas y las escalas pequeñas se vincula a altas frecuencias. En la figura 106 están los escalogramas de las trazas de los pozos C1, C3, C4 y C5. Al igual que en la *STFT*, el pozo C1 mostró una importante pérdida de energía en el intervalo correspondiente a la Formación Roblecito, sin embargo, por debajo de 1320 ms se observó un aumento de energía en una escala mayor a 45. Los pozos C3 y C5 manifestaron una distribución de energía casi uniforme con respecto a la escala (escala 30 en el pozo C3 y escala 23 en el pozo C5) debido a que sus trazas tienen un comportamiento similar a una sinusoidal. El pozo C4 mostró energía en escalas mayores a 30 lo que puede estar asociado a grupos de arenas gruesos o a presencia de fluido contenido en sus arenas especialmente en las arenas del grupo 3. Ningún escalograma mostro una buena separación de eventos en función del tiempo.

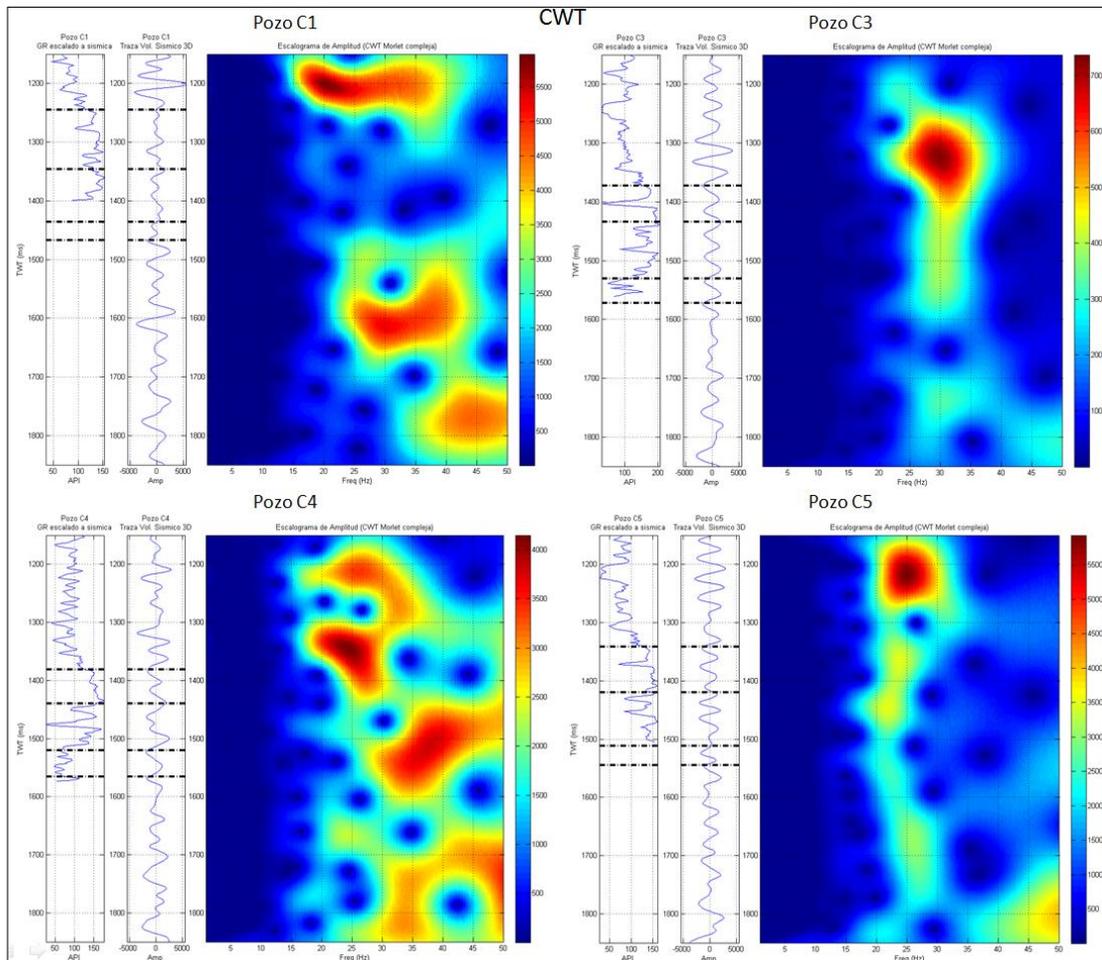


Figura 106. Escalogramas de amplitud de la *CWT* usando la ondícula de Morlet compleja. El eje vertical muestra el tiempo y el eje horizontal indica la escala entre 0 y 50.

Al igual que en los modelos de cuñas, al usar escalas menores a 10, es decir en muy alta frecuencia, se apreció una buena separación de eventos con respecto al tiempo, sin embargo para observar estos elementos fue necesario ajustar la paleta de colores. En la figura 107 se muestra el escalograma del pozo C4 con una paleta de colores exagerada para poder resaltar elementos de baja energía. Fue posible observar eventos que están estrechamente asociados al comportamiento del GR escalado, haciendo posible el uso de volúmenes de *CWT* de pequeñas escalas para interpretar capas delgadas.

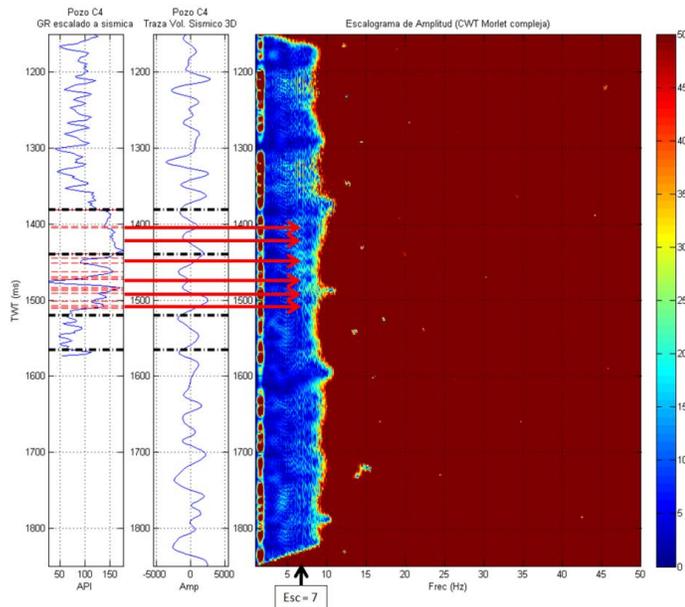


Figura 107. Relación entre el registro GR escalado y la *CWT* en bajas escalas. Al lado derecho se muestra el escalograma de amplitud de la *CWT* usando la ondícula de Morlet compleja del pozo C4 con paleta de colores exagerada. El eje vertical muestra el tiempo y el eje horizontal indica la escala entre 0 y 50. Las flechas rojas evidencian la relación entre el GR escalado y la respuesta de la *CWT* en bajas escalas.

Transformada S

La figura 108 contiene los espectrogramas de la transformada S de los pozos C1, C3, C4 y C5. En el pozo C1 también se evidenció la baja energía en el intervalo de la formación Roblecito, sin embargo, usando esta transformada se logró detectar más expresiones de energía en distintas componentes de frecuencia. Los pozos C3 y C5 también mostraron preferencialmente una componente uniforme de frecuencia, pero se evidenció pequeñas cantidades de energía distribuidas en otras componentes de frecuencia. El pozo C4 presentó bajas frecuencias por debajo de grupos de arenas limpias de importante espesor. En general la transformada S no mostró una buena separación de eventos en tiempo, pero sí mostró la mejor separación de eventos en frecuencia. En los cuatro espectrogramas fue posible ver componentes de baja frecuencia.

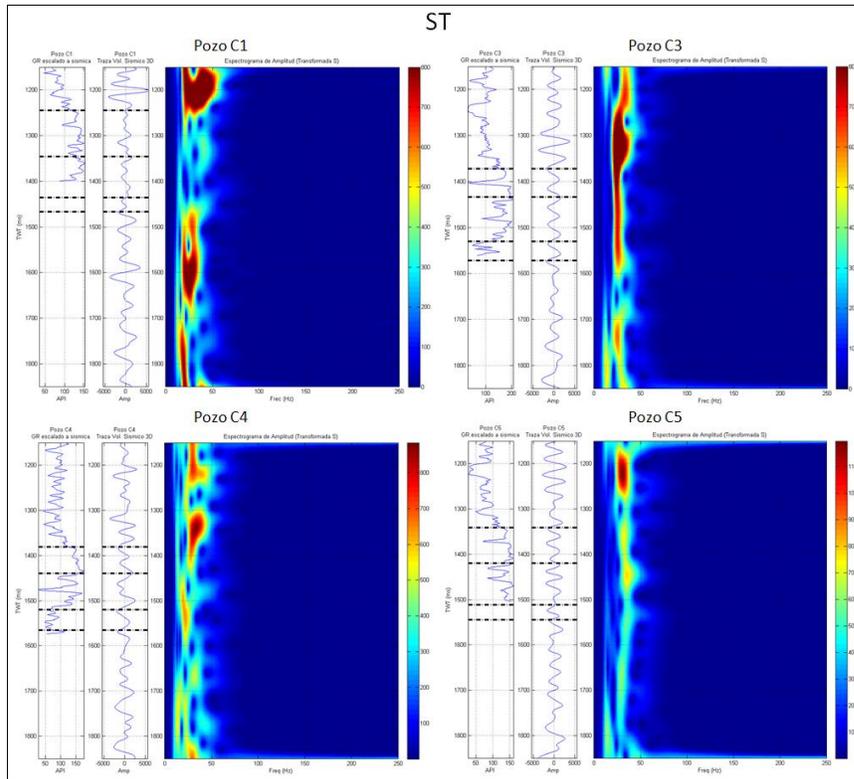


Figura 108. Espectrogramas de amplitud de la transformada S de los pozos C1, C3, C4 y C5. El eje vertical muestra el tiempo y el eje horizontal indica la frecuencia entre 0 y 250 Hz.

Volúmenes de atributos sísmicos

La mayoría de los volúmenes sísmicos fueron construidos usando las herramientas de análisis de OpendTect. Debido a que la CWT en el dominio de la frecuencia no existe en este programa, se utilizó Matlab para su cálculo y luego fue cargado en la estación de trabajo.

Los volúmenes de transformada S fueron construidos usando la herramienta de descomposición espectral de OpendTect en su opción de CWT, ondícula de Morlet. En la figura 109 se muestra los escalogramas de las trazas ubicadas en las posiciones de los pozos C1, C3, C4 y C5 calculados usando la transformada S en Matlab u Octave y los escalogramas obtenido de la CWT ondícula de Morlet del programa OpendTect y se apreció que se genera la misma respuesta.

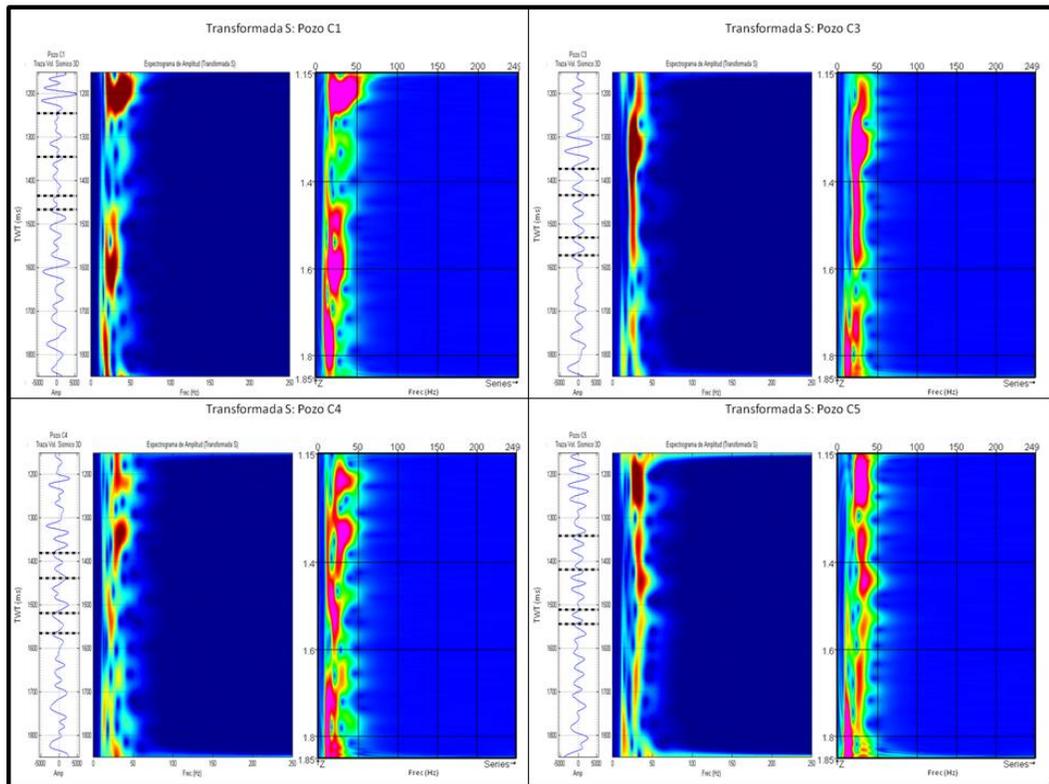


Figura 109. Comparación de espectrogramas de amplitud de la transformada S calculada usando Matlab/Octave (panel izquierdo) y el algoritmo del CWT de OpendTect (panel derecho) de las trazas sísmicas ubicadas en los pozos C1 (arriba-izquierda), C3 (arriba-derecha), C4 (abajo-izquierda) y C5 (abajo-derecha). El eje vertical muestra el tiempo entre 1150 y 1850 ms y el eje horizontal indica la frecuencia entre 0 y 250 Hz.

Al igual que las transformadas de Fourier dependiente del tiempo se generó volúmenes de frecuencia 21, 35 y 42 Hz para describir características subsísmicas asociadas a ambientes sedimentarios y también se generó volúmenes de baja frecuencia (entre 7 y 15 Hz) para determinar posible presencia de gas.

Villanueva (2013) utilizó las frecuencias 16, 24 y 32 Hz en su estudio basándose en la variación lateral la respuesta de los atributos. Sin embargo, en este estudio la selección de las frecuencias fue fundamentada en la localización de la energía dentro de los espectrogramas (STFT y ST) generados en el pozos. Las frecuencias seleccionadas fueron 21, 35 y 42, las cuales se representaron con los colores rojo, verde y azul, respectivamente.

En la Tabla 5 se listan los volúmenes sísmicos generados en función de los resultados obtenidos.

Tabla 5. Volúmenes sísmicos generados.

Atributo	Software	Observaciones
STFT-ventana 28 ms.	OpendTect	RGB de las frecuencias 21, 35 y 42 Hz.
STFT-ventana 42 ms.	OpendTect	RGB de las frecuencias 21, 35 y 42 Hz.
		Amplitud máxima
		Frecuencia dominante (pico de frecuencia)
		Promedio de la frecuencia
		Promedio cuadrático de la frecuencia
		Diferencia de la frecuencia dominante menos el promedio de la frecuencia
STFT-ventana 56 ms.	OpendTect	RGB de las frecuencias 21, 35 y 42 Hz.
CTW-Morlet compleja.	Matlab	RGB de las escalas 7, 16, 30.
Transformada S.	OpendTect	Usando la herramienta de descomposición espectral de transformada ondícula, ondícula de Morlet. RGB de las frecuencias 21, 35 y 42 Hz.
Energía-ventana 8 ms.	OpendTect	
Energía-ventana 20 ms	OpendTect	
Cuadratura de la energía-ventana 8 ms	OpendTect	Atributo instantáneo: Transformada de Hilbert aplicada a la energía calculada con una ventana de 8 ms.
Amplitud instantánea	OpendTect	Atributo instantáneo
Fase instantánea	OpendTect	Atributo instantáneo
Frecuencia instantánea	OpendTect	Atributo instantáneo
2da derivada de la fase instantánea	OpendTect	Atributo instantáneo. En el <i>software</i> es llamado aceleración de la fase.

Interpretación sísmica

En estudios previos se interpretaron los horizontes Base de Roblecito, MFS y Tope de Roblecito. Sin embargo, esa interpretación fue realizada en el volumen sísmico 3D y tuvo objetivos estructurales, es decir, no se enfocó en la extracción de características de capas delgadas.

En este trabajo, usando los atributos sísmicos calculados, especialmente los atributos de energía de ventana de 8 ms y CWT de escala 7, se agregó 4 nuevos horizontes asociados a grupos de arenas delgadas. Los nuevos horizontes interpretados son Arenas grupo 1, Arenas grupo 3, Arenas grupo 4 y la Base lutitas (Arenas grupo 5). El horizonte MFS fue asociado a las Arenas Grupo 2 y los horizontes Base y Tope de la Formación Roblecito no fueron asociados a ningún grupo de arenas. En la Tabla 2 se muestra la agrupación de arenas, y su horizonte asociado.

Interpretación de la base de las lutitas de la Fm. Roblecito

Al examinar el resultado del ajuste sísmica-pozo de los pozos C3 y C4 en la figura 110, se observó que el Tope de la Fm. Roblecito interpretado en pozo y sísmica coincidió perfectamente. No obstante, la Base de Roblecito en sísmica comparada con la arena más profunda de Roblecito interpretada en pozo obtuvo una diferencia importante de un ciclo completo en la señal sísmica.

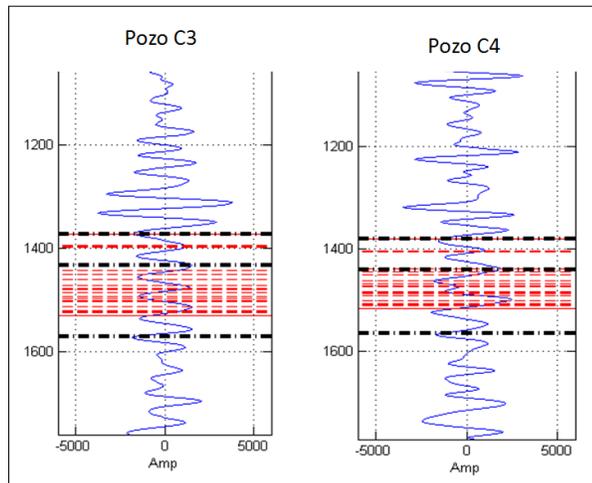


Figura 110. Ubicación de los horizontes sísmicos interpretados en sísmica (negro) y topes interpretados en pozo (rojo).

Además, luego de observar los registros de GR y de velocidad, en escala de TWT, se detectó una disminución en la curva GR y un aumento en las velocidades de onda (figura 111) que indican un cambio de una litología donde predomina la lutita a

un medio arenoso. Estas observaciones podrían evidenciar el contacto de las formaciones Roblecito y La Pascua, no obstante para los objetivos de este trabajo y por la falta de evidencia paleontológica, se tomó la decisión de nombrarlo como Base de las lutitas.

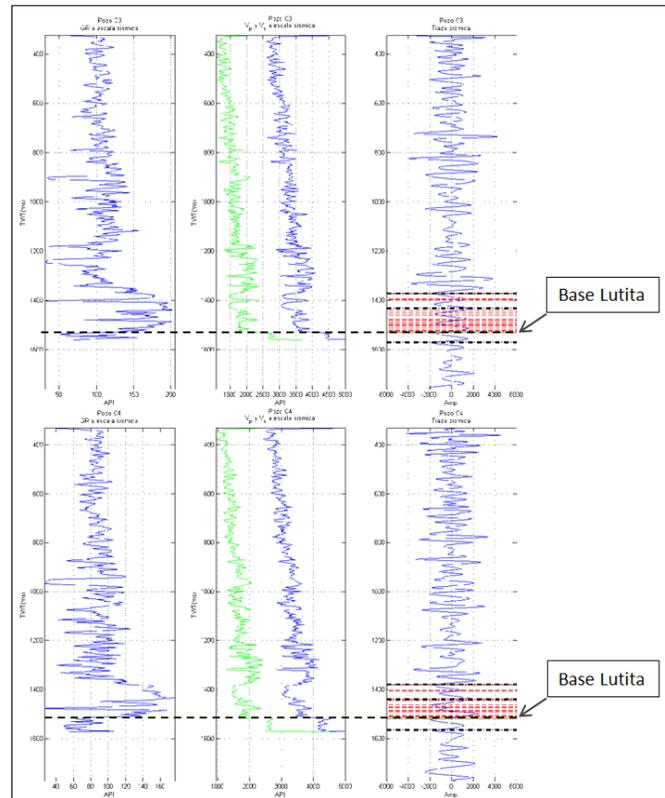


Figura 111. Detección de la base de la lutita de la Fm. Roblecito mediante los registros de pozo a escala sísmica. Registro GR (izquierda), V_p y V_s (centro) y traza sísmica 3d (derecha) en los pozos C3 (arriba) y C4 (abajo) graficadas en tiempo doble de viaje luego del ajuste sísmica-pozo.

La interpretación estructural de este nuevo horizonte fue realizada usando los datos sísmicos 3D originales. Se inició correlacionando las semillas de los pozos C3 (1531 ms en TWT) y C4 (1520 ms en TWT), posteriormente se realizó la interpretación por bucles y se completó con interpretación inline y crossline con intervalos de cada 10 líneas en ambas direcciones (figura 112). Posteriormente, se generó interpoló el horizonte mediante el método de mínima curvatura controlado por las fallas.

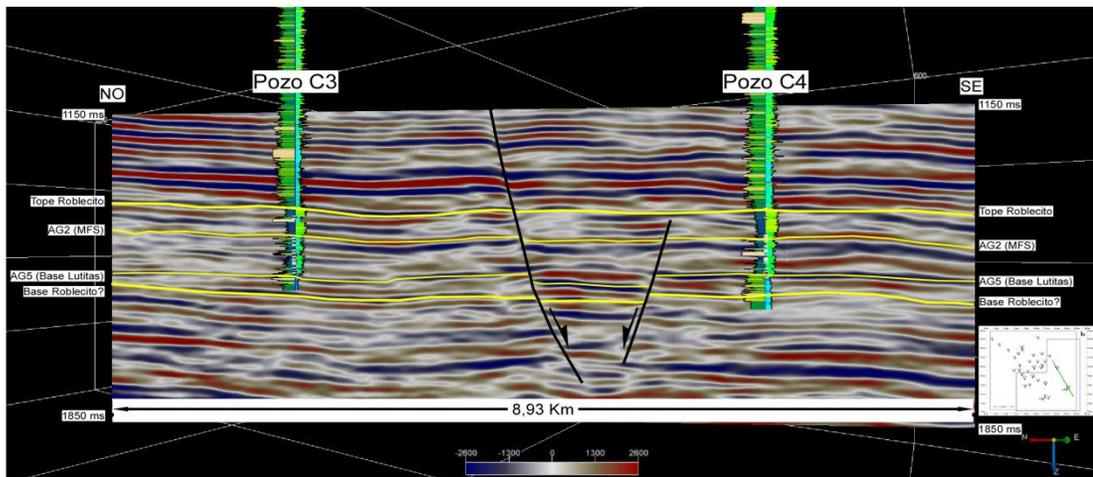


Figura 112. Amplitud sísmica de la línea arbitraria entre los pozos C3 y C4.

Interpretación de horizontes de arenas

Mientras que los horizontes sísmicos Tope de Roblecito, MFS, Base lutita y Base de Roblecito fueron interpretados usando la amplitud sísmica convencional, los horizontes Arenas grupo 1, Arenas grupo 3 y Arenas grupo 4 fueron detectados por los atributos sísmicos.

Mediante los atributos de energía y CWT de escala 7 fue posible correlacionar eventos asociados a capas delgadas en todo el volumen sísmico. En efecto, en la figura 113 se muestra la amplitud sísmica y los atributos de energía y pseudo-relieve calculados usando una ventana de 8 ms y el atributo de CWT con escala siete de la línea arbitraria que pasa por los pozos C3 y C4. Al lado derecho se muestra la interpretación. Los horizontes sísmicos se pintaron en color amarillo, en líneas rojas punteadas se dibujaron intercalaciones de arena que no tuvieron representación en todo el volumen sísmico y en negro se indicaron las fallas presentes.

Al igual que en los modelos de cuñas tipo 3 y 4, fue notable la capacidad de estos atributos en resaltar elementos asociados a capas delgadas, especialmente las reflexiones producidas por los acunamientos. Principalmente la energía y la CWT revelaron eventos delgados que pudieron ser correlacionados lateralmente, mientras que el atributo de pseudo-relieve resaltó las características estructurales del medio.

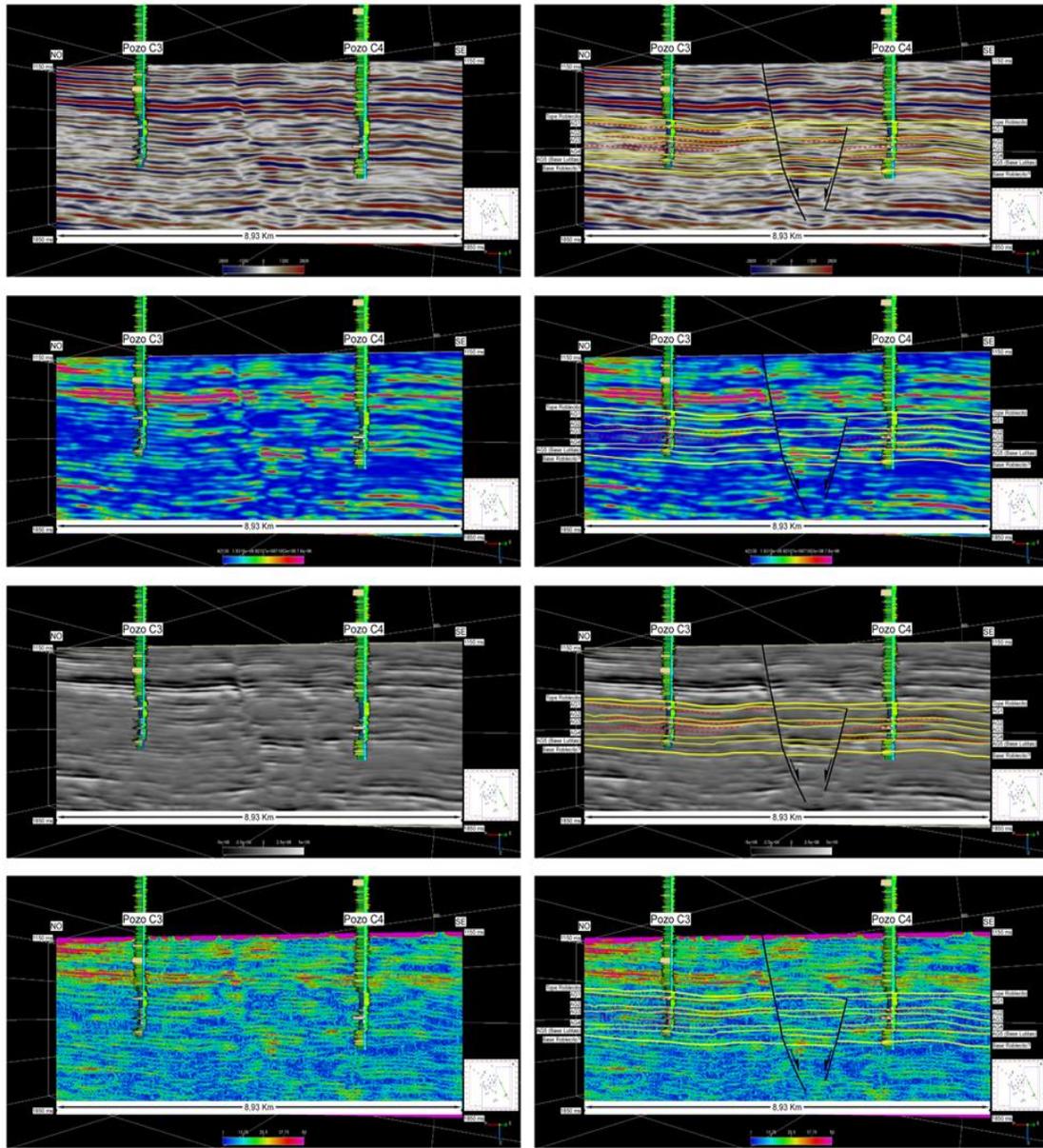


Figura 113. Atributos sísmicos de la línea arbitraria entre los pozos C3 y C4. De arriba abajo se despliega la amplitud, la energía con $v = 8$ ms, el pseudo-relieve con $v = 8$ ms y la CWT con escala 7.

A la izquierda se despliega la línea sin interpretar y a la derecha la línea interpretada.

La amplitud instantánea (figura 114, arriba) no fue capaz de mostrar capas delgadas pero permitió observar aumentos en la magnitud dentro de las zonas donde se interpretó de intercalaciones de arenas. Si estas anomalías están ubicadas en cuñas

o altos estructurales lo que podría implicar la acumulación de algún tipo de fluido dentro de estas arenas.

En la fase instantánea (figura 114, abajo) tampoco se pudo observar capas delgadas, sin embargo el atributo ofreció excelente imagen de la configuración estratigráfica del área.

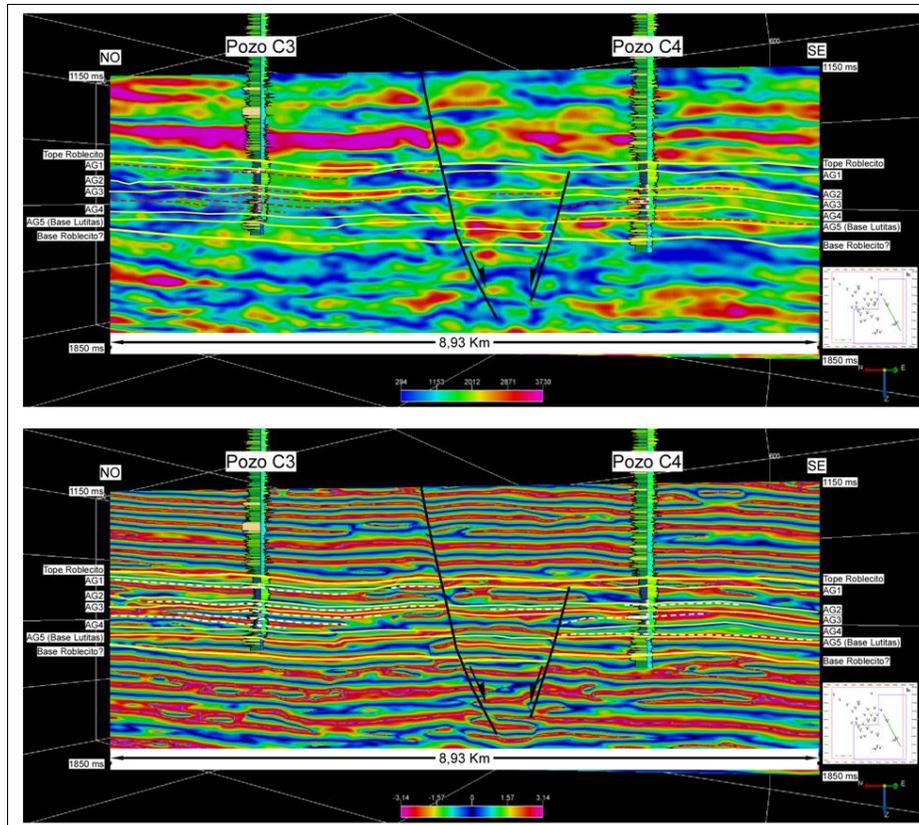


Figura 114. Amplitud instantánea (arriba) y fase instantánea (abajo) en la línea arbitraria de los pozos C3-C4.

Algunos cuerpos aislados de arenas pudieron ser interpretados usando atributos instantáneos como la frecuencia o aceleración de la fase. En la figura 115 se muestra la interpretación de la arena A10, con un espesor de 40 pies, y A11, con espesor de 20 pies, en el pozo C4 mediante la frecuencia instantánea y 2da derivada de la fase de la línea arbitraria de los pozos C3 y C4.

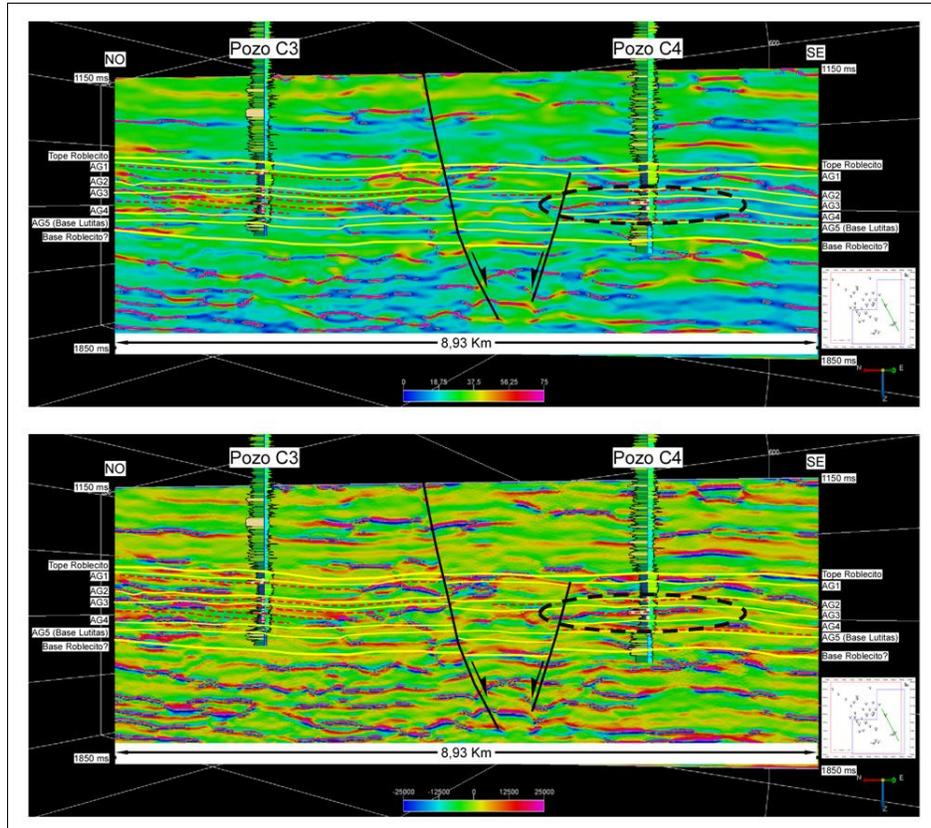


Figura 115. Detección de cuerpos de arena mediante los atributos de frecuencia instantánea (arriba) y aceleración de la fase (abajo) en el pozo C4.

Los atributos de amplitud máxima y frecuencia dominante, permitieron corroborar la interpretación de intercalaciones de arenas delgadas. En la figura 116, dentro del ovalo se interpretó mediante los atributos de energía un conjunto de capas que aparente mente está asociado a intercalaciones de lutitas y arenas, en esta zona se detectó una caída en la amplitud máxima y un aumento en la frecuencia dominante que llegó hasta los 50 Hz. Este comportamiento es similar al observado en las respuestas de la amplitud máxima y frecuencia dominante generado por los modelos de cuña tipo 3 y tipo 4 en la zona de apilamiento de capas mostrado en las figuras 92 y 93.

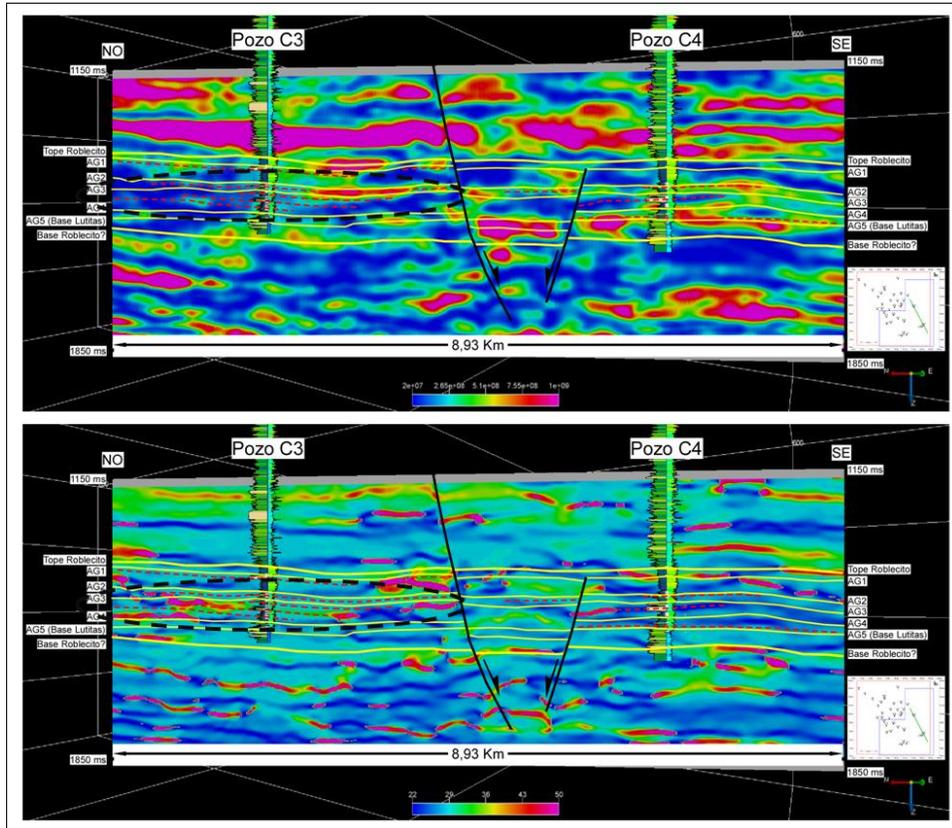


Figura 116. Atributos de amplitud máxima (arriba) y frecuencia dominante (abajo) calculados mediante la STFT con ventana de 42 ms en la línea arbitraria de los pozos C3-C4. La frecuencia está mostrada entre 22 y 50 Hz

Otro indicador interesante en el momento de interpretar las zonas de arenas delgadas fue el uso de las imágenes RGB. La figura 117 muestra las distintas imágenes RGB de los atributos de STFT calculados con ventanas de 28, 42 y 56 ms y la ST. Para la construcción de estas imágenes se seleccionó las frecuencias 21, 35 y 42 Hz desplegadas con los colores rojo, verde y azul, respectivamente.

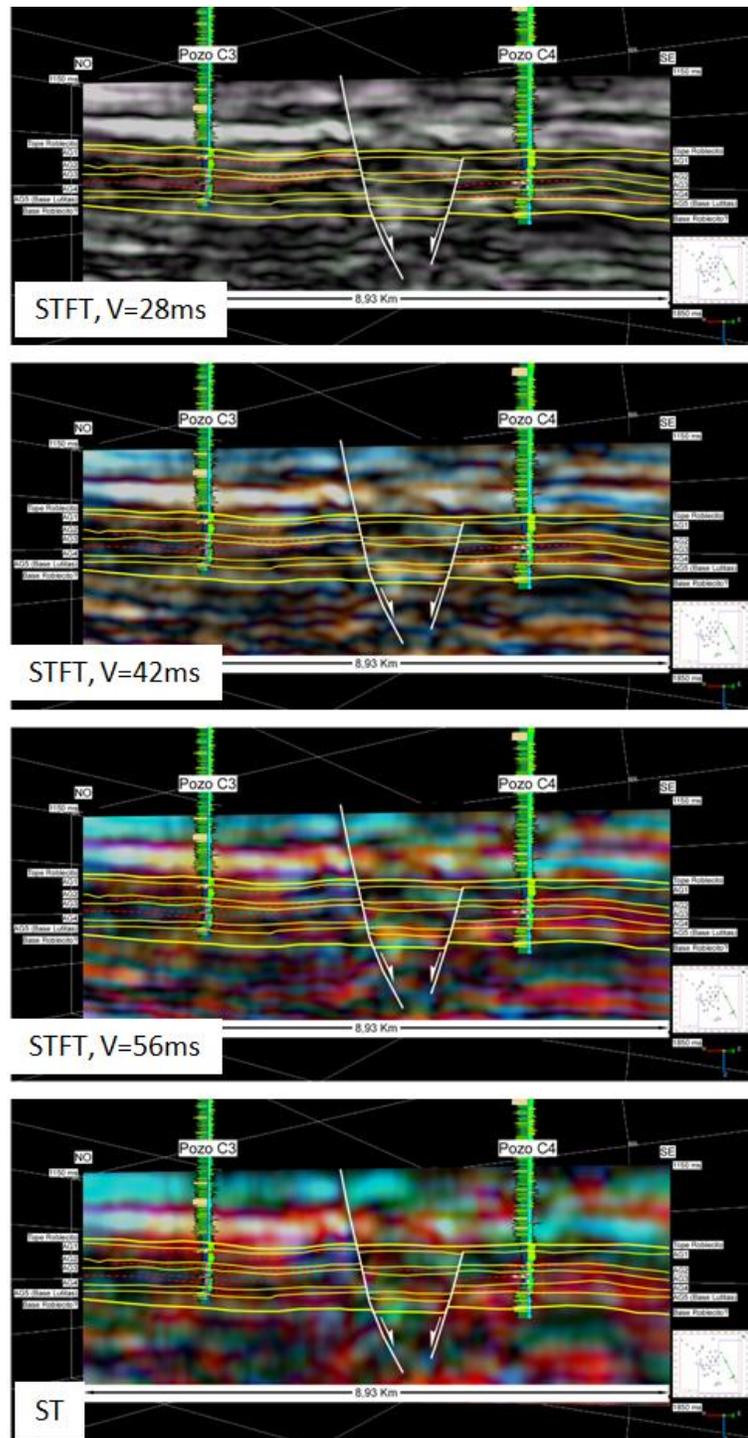


Figura 117. Imágenes RGB de las STFT con ventana de 28, 42 y 56 ms y la ST de la línea arbitraria que pasa por los pozos C3 y C4. La frecuencias seleccionadas son 21 (rojo), 35 (verde) y 42 Hz (azul).

La RGB de la STFT con ventana de 28 ms. casi no mostró ninguna diferencia entre las componentes, de hecho en la imagen predominan los colores blanco y negro debido a que las componentes tenían una amplitud muy similar. Sin embargo cuando se observó el resto de las imágenes RGB, se pudo diferenciar las zonas de alta frecuencia, primordialmente azules, y las áreas de baja frecuencia, donde predominaron los colores rojos.

Al igual que los modelos de cuña tipos 3 y 4, se observó que las zonas donde existe intercalaciones de capas delgadas, hay una expresión purpura. Esta expresión se debe a una componente de baja frecuencia en rojo, que en términos geológicos puede indicar un depocentro, el cual está relleno de capas delgadas que generan la componente de alta frecuencia que se expresa en azul.

Después de que los horizontes fueron interpretados en todo el volumen sísmico cada 10 *inline* y *crossline* se realizó la interpolación usando el método mínima curvatura controlado por las fallas. La figura 118 contiene los mapas estructurales en *TWT* de los horizontes Tope de Roblecito, Arenas grupo 1, MFS (Arenas grupo 2), Arenas grupo 3, Arenas grupo 4, Base de las lutitas y base de Roblecito.

Los horizontes de la Formación Roblecito poseen características estructurales similares, siendo monoclinales con una orientación N42°O y buzamiento norte de bajo ángulo y están afectados por el sistema de fallas normales de orientación N46°E heredado del Graben de Espino (INPEX. 2009 y Pérez, 2009A). Este sistema de fallas posee mayor desplazamiento en los horizontes más profundos y el mismo decrece hacia el tope de la formación.

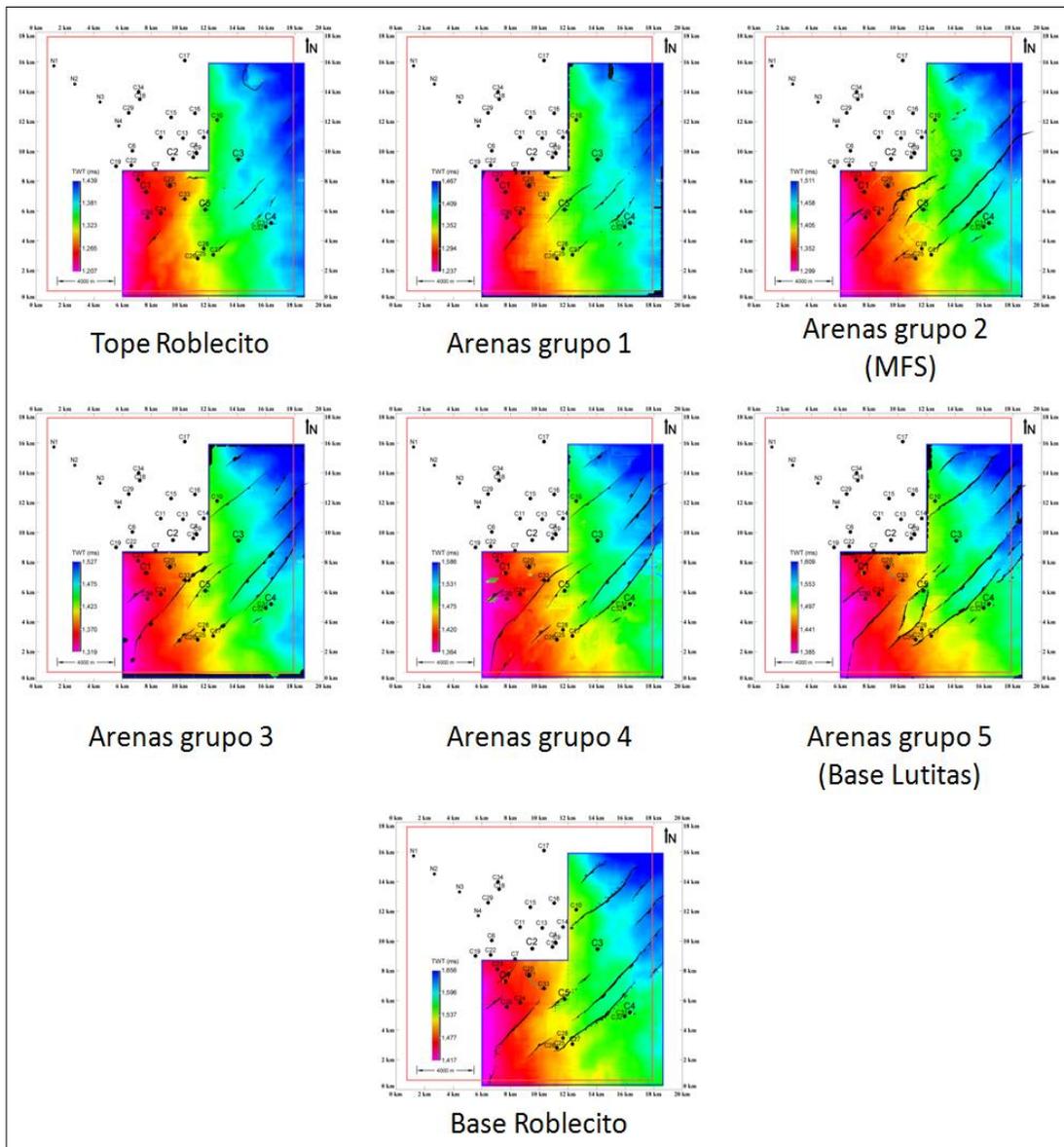


Figura 118. Mapas estructurales en TWT.

Interpretación de características estratigráficas

Debido a que el interés de este proyecto son las arenas de la Formación Roblecito, en esta sección sólo se trabajó sobre los horizontes sísmicos Arenas grupo 1, MFS (Arenas grupo 2), Arenas grupo 3, Arenas grupo 4 y Base de las lutitas (Arenas grupo 5). Estos están vinculados con sedimentación costera y de llanura

costera en los horizontes más profundos y los horizontes de la parte superior se relacionan a paleo ambientes costeros a marino-costeros.

Arenas Grupo 1

El horizonte Arenas Grupo 1, donde están contenidas las arenas A1, A2 y A3, es el más somero. Según la geología local, la parte superior de Roblecito está caracterizada por un ambiente costero a marino costero, eso implica que sus rasgos estratigráficos están controlados por canales y por el oleaje. En la figura 119 se muestran los atributos de energía, amplitud instantánea y Máxima amplitud (STFT con ventana 42 ms.), en óvalos se identificaron seis zonas de anomalía alta que pueden estar asociados a acumulaciones de arena. Al ver el comportamiento de la frecuencia dominante dentro de estos óvalos (figura 120), se notó una disminución dentro de estas regiones. El atributo de frecuencia también permitió observar algunas zonas de alta frecuencia (mayor a 45Hz) con geometrías similares a canales.

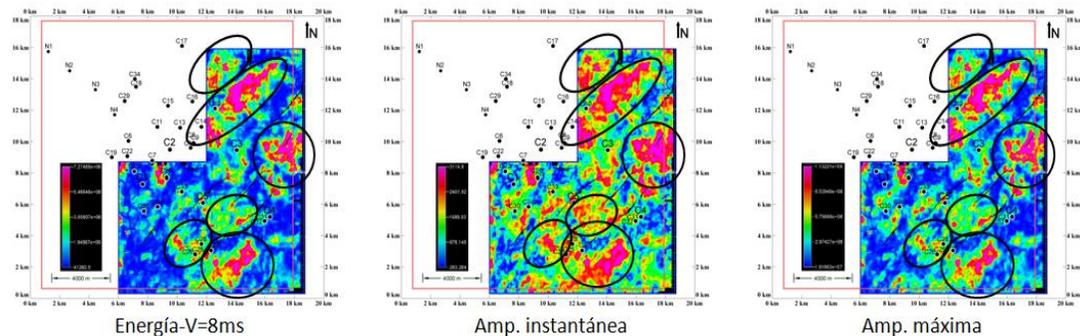


Figura 119. Atributos de energía, amplitud instantánea y amplitud máxima de la Arenas Grupo 1. Los círculos y óvalos señalan cambios litológicos que pueden estar asociados a barras de arena.

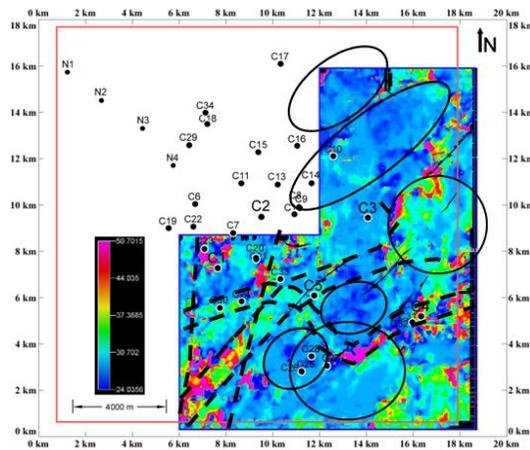


Figura 120. Atributo de frecuencia dominante de la Arenas Grupo 1. La barra de colores está acotada entre 24 y 50 Hz.

En la figura 121 se presenta la imagen RGB de la STFT con ventana de 42 ms. A la izquierda está la imagen sin interpretar y a la derecha su interpretación. Se detectó la presencia de dos canales. El primer canal (identificado por el número 1) tiene dirección NE y aparentemente alimenta un abanico aluvial (identificado como 3). Este abanico aluvial tiene alta frecuencia y alta amplitud lo cual representa una zona de acumulación de capas delgadas. El segundo canal, identificado como 2, tiene dirección EO, presentando altas frecuencia en su extremo este. Este canal coincide con la interpretación hecha por Villanueva (2013) sobre un mapa de isofrecuencia de 32 Hz (figura 122).

Las anomalías detectadas en los atributos energía y amplitud también fueron vistas en la componente de baja frecuencia de la imagen RGB (4, 5, 6, 7 y 8 de la figura 121). Estas anomalías de geometría alargada, dirección NE, y con una reducción en la frecuencia pudieran estar asociados a barras costeras generadas por la redistribución de sedimentos producto del oleaje.

Al oeste del volumen se detectó una anomalía importante con dirección NS (figura 121) y que puede estar asociada a un gran canal o conjunto de canales. Esta anomalía fue observada con claridad en la imagen RGB y el volumen de frecuencia dominante mostró elementos de frecuencia que alcanzó los 50 Hz. La hipótesis de

este canal se reforzó después de realizar observaciones sobre secciones sísmicas en otros atributos. En efecto, en la Figura 123 se muestra un acercamiento sobre la línea arbitraria que une a los pozos C1 y C5, en ella se observó una variación en el atributo de fase instantánea de un ciclo completo, además esta variación también fue rastreable en secciones sísmicas vecinas.

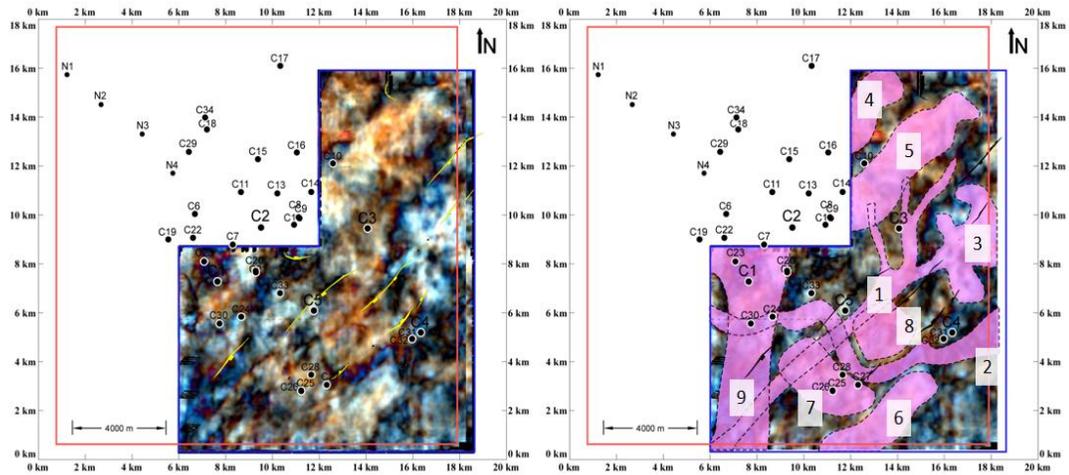


Figura 121. Imagen RGB de las Arenas Grupo 1. A la izquierda la imagen sin interpretar y a la derecha la imagen interpretada.

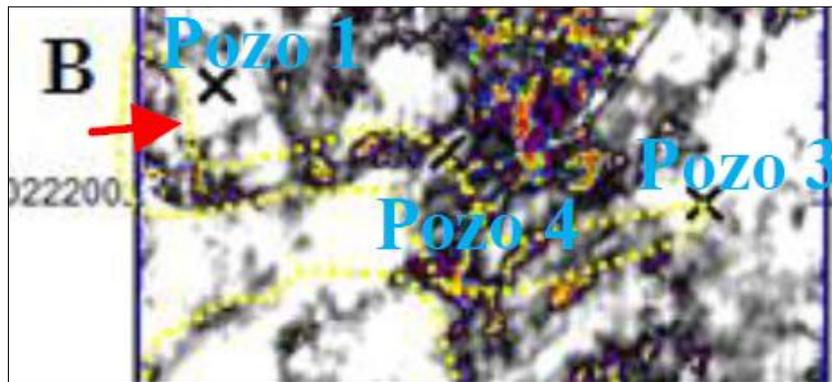


Figura 122. Interpretación de un canal usando un mapa de isofrecuencia a 42 Hz (tomado y modificado de Villanueva, 2013).

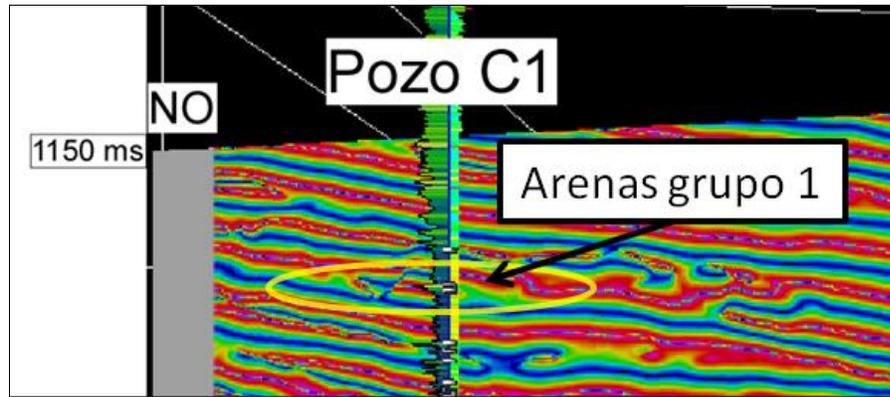


Figura 123. Acercamiento sobre la fase instantánea en el pozo C1 sobre el grupo de arenas 1.

Según la interpretación de pozo del departamento de producción, los pozos C27 y C28 son potenciales productores de gas y los pozos C9 y C12 son potencialmente productores de petróleo en las arenas A1 y A2. Además, los pozos C9 y C12 son productores de gas y agua, respectivamente, en la arena A3. Desafortunadamente, los pozos C9 y C12 están fuera de los datos sísmicos, no obstante, están suficientemente cerca y en la misma dirección de la barra de arena identificada por el número 5 que respondió a los atributos de energía, amplitud y descomposición espectral. Los pozos C27 y C28 están localizados en las anomalías 2 y 7, coincidiendo la primera con un canal interpretado en el mapa de facies mostrado en la figura 124.

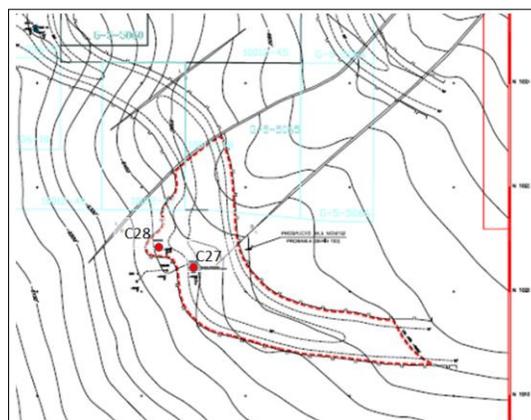


Figura 124. Mapa de facies de las arenas A1 y A2 (tomado y modificado de Pestman, 2002)

Arenas Grupo 2 (MFS)

Este horizonte está ubicado sobre una superficie de máxima de inundación por lo que se esperaría encontrar una capa importante de lutita y no arenas. Sin embargo, la interpretación de las arenas realizada por el departamento de producción fue basada en la litoestratigrafía (González, 2009) y no en la cronoestratigrafía. Además, el espesor de la lutita en el área es lo suficientemente pequeño como para permitir ver elementos sísmicos que están por encima o debajo de ella.

En la figura 125 se muestra dentro de óvalos las zonas de mayor magnitud dentro de los volúmenes de energía (ventana 8 ms), amplitud instantánea y amplitud máxima. También se observó que gran parte de esas zonas coinciden con bajas frecuencias en el atributo de frecuencia dominante (figura 126). Estos dos elementos de magnitud y frecuencia permitan inferir que se está en presencia de cuerpos de espesor próximo al límite de resolución.

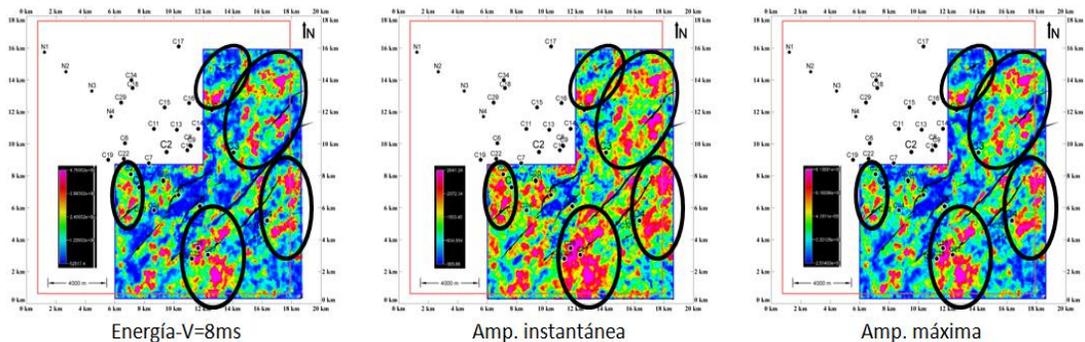


Figura 125. Atributos de energía, amplitud instantánea y amplitud máxima de la Arenas Grupo 2. Los círculos y óvalos señalan cambios litológicos que pueden estar asociados a barras de arena.

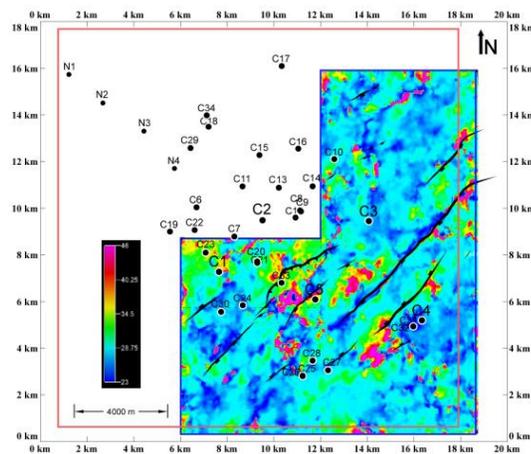


Figura 126. Atributo de frecuencia dominante de la Arenas Grupo 2. La barra de colores está acotada entre 23 y 46 Hz.

En la figura 127 se despliega la imagen RGB de la STFT con ventana de 42 ms y su interpretación al lado derecho. Se interpretó dos canales con dirección NE identificados con los números 1 y 2, y cuatro cuerpos que pudieran ser barras de arenas producidas por el retrabajo del oleaje.

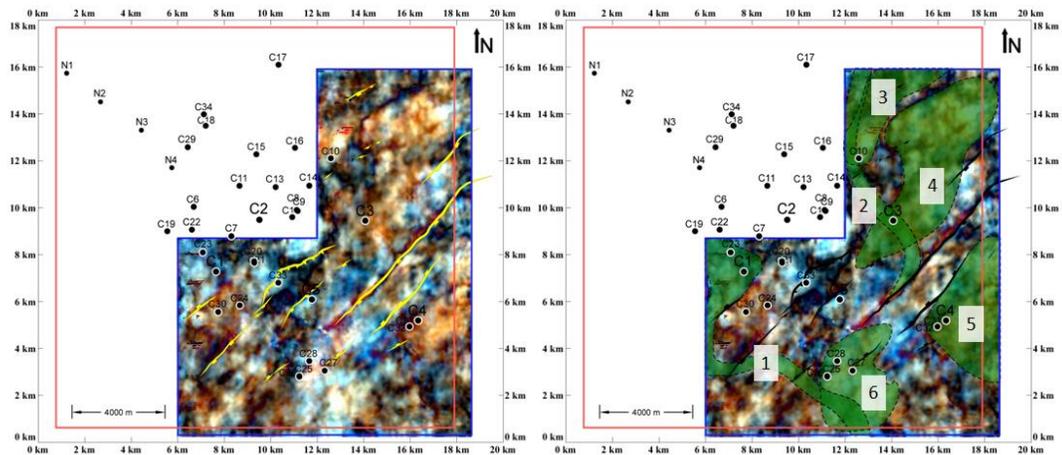


Figura 127. Imagen RGB de las Arenas Grupo 2. A la izquierda la imagen sin interpretar y a la derecha la imagen interpretada.

Este nivel incluye las arenas A4, A5, y A6. La arena A4 ha probado condensado en los pozos C1, C2 y C3 y ha sido interpretado en los pozos C20 y C33. La arena A5 ha probado gas en el pozo C2 y ha sido interpretado en los pozos C1,

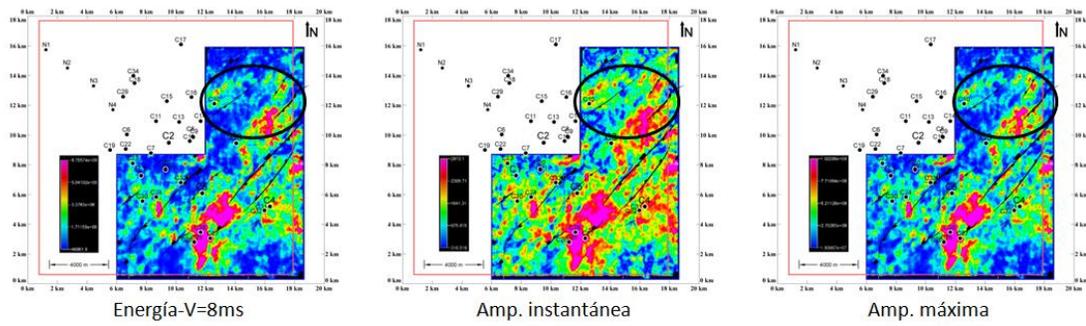


Figura 129. Atributos de energía y amplitud máxima de la Arenas Grupo 3. El área identificada con el ovalo muestra una zona con dos características estratigráficas distintas, un pequeño delta y un meandro.

En la figura 130 se presenta la imagen RGB de la STFT con ventana de 42 ms y su interpretación a la derecha. En su zona oeste se observa un área de alta frecuencia evidenciado por la composición de colores verde y azul y en la zona este se observa un comportamiento de baja frecuencia. Se detecto cuatro canales con dirección preferencial NE. Al norte se observó el solapamiento de los canales 3 (meandro) y 4 (canal distributivo). Adicionalmente se observó tres zonas de baja frecuencia que pueden ser producto del apilamiento de arenas producto del oleaje.

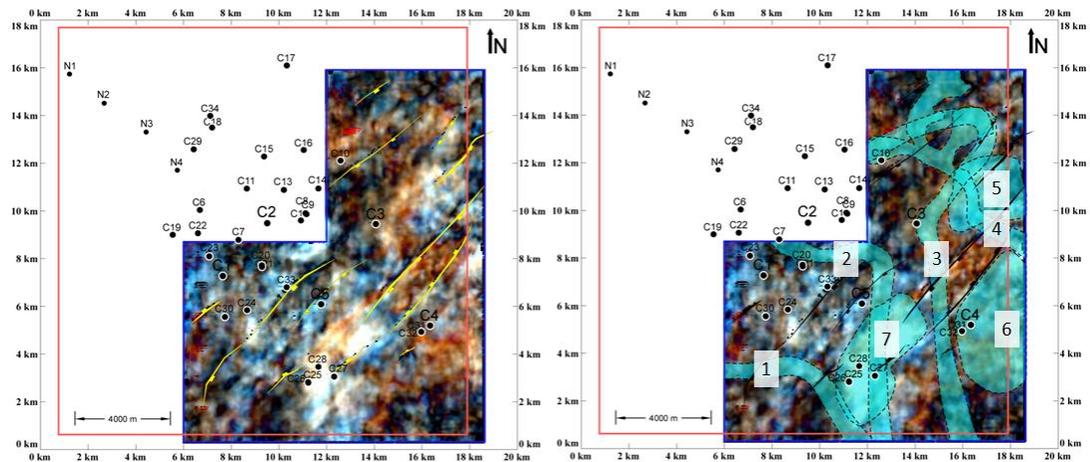


Figura 130. Imagen RGB de las Arenas Grupo 3. A la izquierda la imagen sin interpretar y a la derecha la imagen interpretada.

Las arenas involucradas en este horizonte son A7, A8, A9 y A10. Según el departamento de producción la arena A7 fue probado gas en los pozos C30 y C33 en

interpretado en el pozo C3; en la arena A8 se interpretó petróleo en el pozo C32; en la arena A9 se probó gas en el pozo C21 y en la arena A10 se interpretó gas en el pozo C2. Los atributos de energía y amplitud máxima aumentaron su magnitud en estos pozos a la vez que el atributo de frecuencia dominante (figura 131) mostró una caída, sin embargo esta disminución en frecuencia no fue muy importante en el pozo C33.

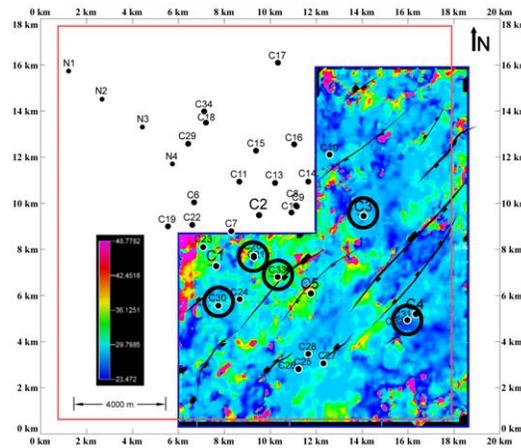


Figura 131. Atributo de frecuencia dominante de la Arenas Grupo 3. La barra de colores está acotada entre 23 y 48 Hz.

En la figura 132 muestra la interpretación de un canal fluvial de la arena A7 en el pozo C10 en el mapa de facies, realizado con datos de pozo. Este canal coincide con la ubicación de los canales 3 y 4 interpretados en la figura 130.

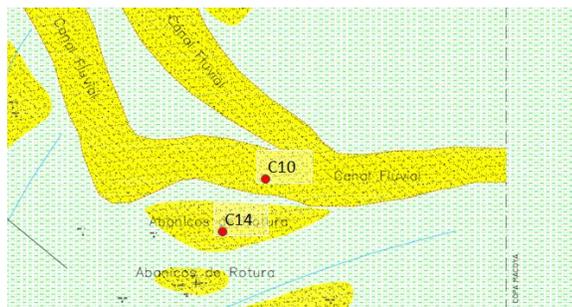


Figura 132. Mapa de facies de la arena A7 (tomado y modificado de Pestman, 2002)

Arenas Grupo 4

En este horizonte fue posible observar en los tributos de energía, amplitud instantánea y amplitud máxima una acumulación de sedimentos producido al mismo tiempo que el desplazamiento de las fallas asociadas al graben. También se detectó otras anomalías que pueden interpretarse como acumulaciones de arenas producto la estratigrafía próximo-costera de baja pendiente y acumulaciones de sedimentos en canales (figura 133).

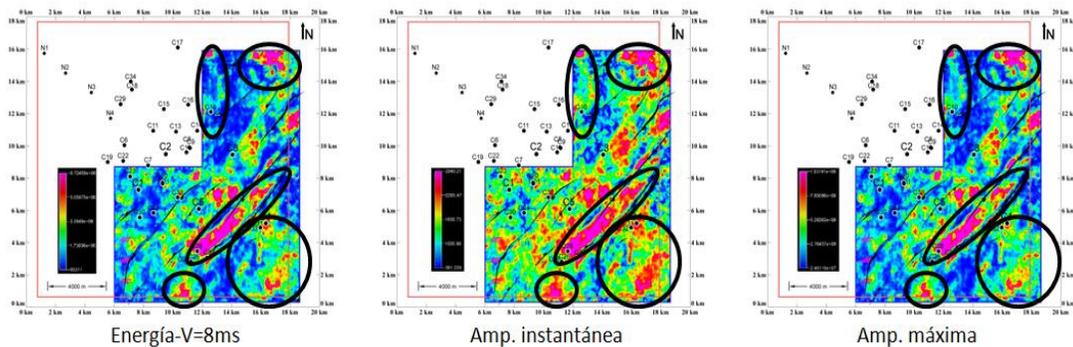


Figura 133. Atributos de energía y amplitud máxima de la Arenas Grupo 4. Las áreas identificadas con óvalos muestran zonas con acumulaciones de sedimento. El óvalo alargado con orientación de N48°E refleja la acumulación de sedimentos simultanea a la formación de la falla.

En la imagen RGB (figura 134) también se observó la acumulación de sedimentos dentro del graben, sin embargo este depósito carece de importancia debido a que está localizado en un bajo estructural. Se detectaron cuatro canales, uno es un meandro identificado con el número 1, está localizado en la zona SO del volumen, este canal fue detectado mediante el uso de las componentes de frecuencias 35 y 42 Hz. Este canal se encuentra oculto debido a la una acumulación de sedimentos entre del fallamiento normal. Otro canal identificado con el número 2 es más ancho y visible con frecuencias menores, está ubicado al centro del volumen con orientación EO. Finalmente, hay dos canales identificados con los números 3 y 7, poseen una orientación NE y NS, respectivamente, los cuales aparentemente desembocan en cuerpos de arena ubicados en la esquina NE del volumen sísmico.

En la esquina SE del volumen sísmico se detectó un cuerpo aislado, identificado con el numero 4, el cual puede estar asociado a las arenas A10 y A11. La figura 135 muestra los atributos de fase y frecuencia instantánea sobre el pozo C4. En esta imagen es posible ver las arenas A10, agrupada en el horizonte Arenas Grupo 3, y A11, agrupada en el horizonte Arenas Grupo 4.

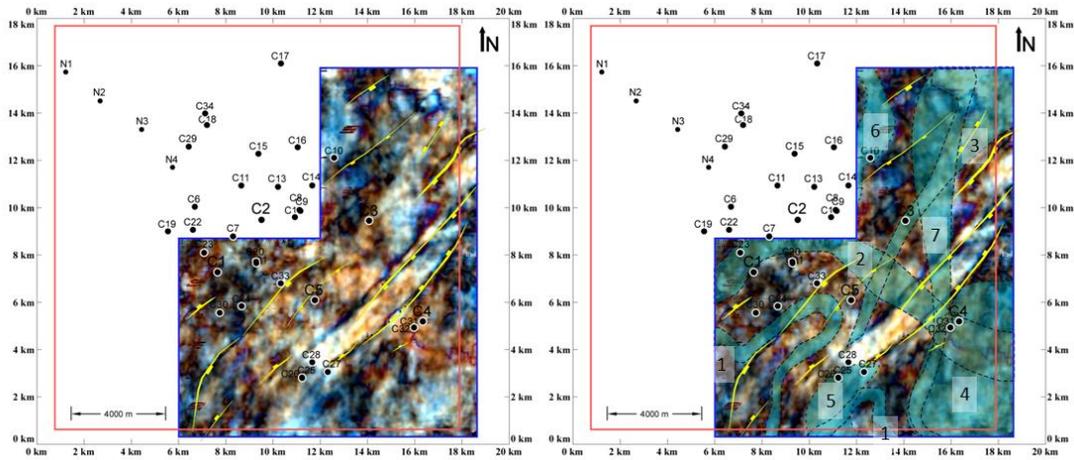


Figura 134. Imagen RGB de las Arenas Grupo 4. A la izquierda la imagen sin interpretar y a la derecha la imagen interpretada.

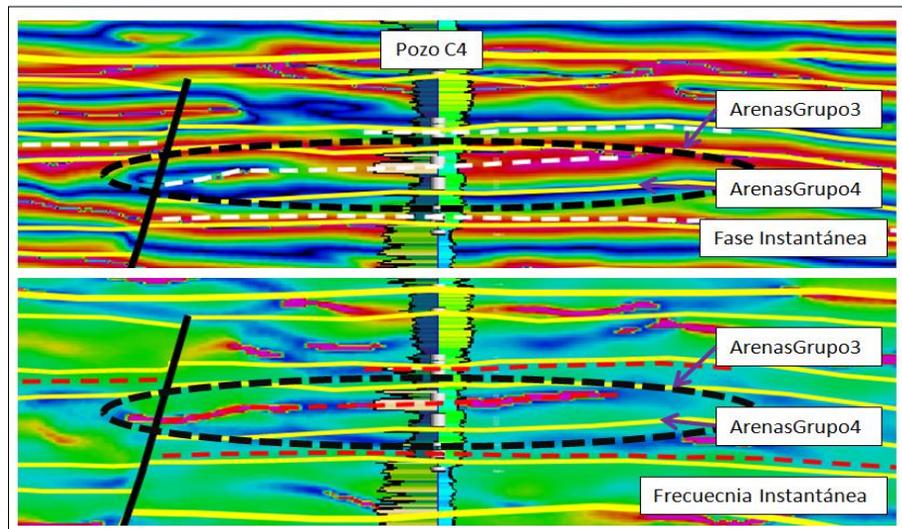


Figura 135. Atributos de fase y frecuencia instantánea en el pozo C4.

En la figura 134 se encontraron dos cuerpos, identificados con los números 5 y 6, relativamente anchos, que contienen altas frecuencias. Adicionalmente, estos

cuerpos presentaron anomalías en la magnitud de los atributos de energía y amplitud (figura 133). Al examinar el atributo de frecuencia dominante en la Figura 136 se observó estas anomalías coincidieron con un aumento importante en la frecuencia. Es posible que estos cuerpos sean parte de canales abandonados donde se depositaron una cantidad importante de sedimentos. Sin embargo, el cuerpo identificado con el número 6 ha sido interpretado en los pozos C8, C9, C10, C11, C13 y C14 como una barra correspondientes a la arena A11a cual contiene condensado, siendo el pozo C10 el único dentro de los datos sísmicos (figura 137).

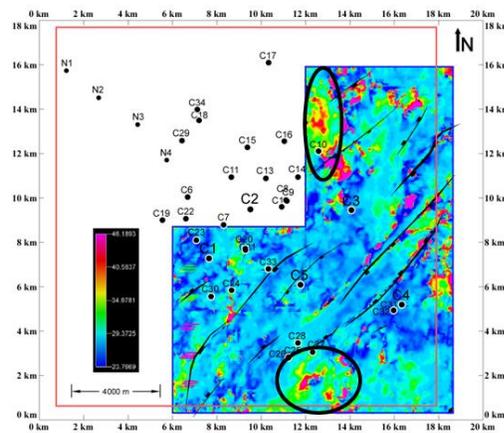


Figura 136. Atributo de frecuencia dominante de la Arenas Grupo 4. La barra de colores está acotada entre 23 y 46 Hz.

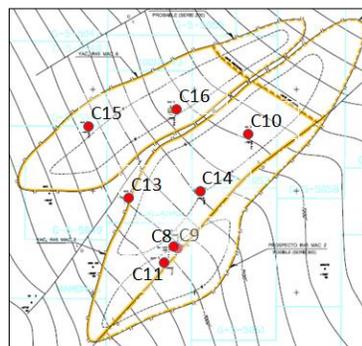


Figura 137. Mapa de facies de la arena A11 (tomado y modificado de Pestman, 2002)

Arenas Grupo 5 (Base lutita)

En los atributos de energía y amplitud mostrados en la figura 138 se evidenció claramente la separación de un área de baja energía al oeste del volumen y otra de alta energía al este del volumen. En la zona de alta energía se visualizó la tendencia norte-sur de dos grupos de anomalías, lo que sugiere que la deposición de sedimentos en este nivel tuvo esta dirección. Además, al igual que el horizonte Arenas Grupo 4, se observó la influencia del graben en la acumulación de sedimentos.

Otro aspecto importante en este horizonte fue observado en la frecuencia dominante (figura 139). En este atributo refuerza la hipótesis de separar este nivel en una zona de alta frecuencia, alcanzando valores mayores a los 49 Hz, la cual está ubicada al suroeste del volumen y una región de baja frecuencia al este.

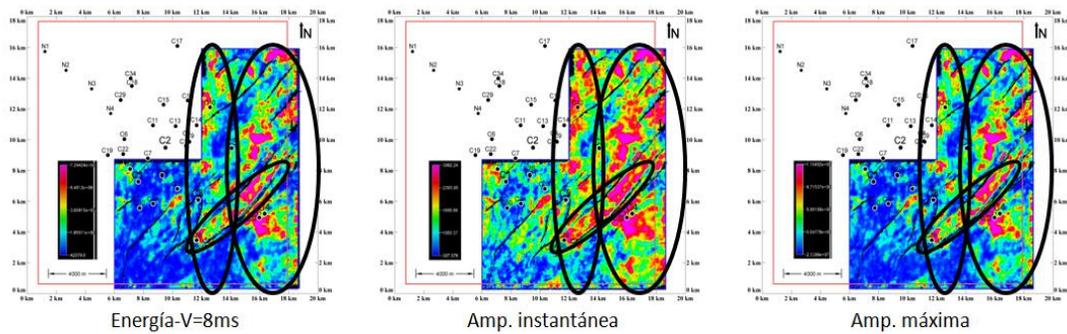


Figura 138. Atributos de energía y amplitud máxima de la Arenas Grupo 5. El óvalo alargado con orientación de N48°E refleja la acumulación de sedimentos simultanea a la formación de la falla.

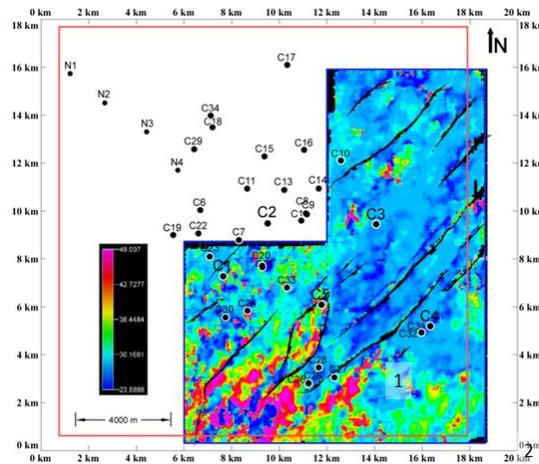


Figura 139. Atributo de frecuencia dominante de la Arenas Grupo 5. La barra de colores está acotada entre 23 y 49 Hz.

Este comportamiento que divide el volumen en dos zonas debido a su magnitud y frecuencia es heredado por la imagen RGB (figura 140). Así, el oeste de la imagen presenta tonalidades básicamente azules, mientras que en el este hay una variación que incluye todo el espectro de colores, desde blanco hasta negro, predominando el color naranja.

Aunque no hay pozos en el suroeste, las características observadas en los volúmenes de amplitud, frecuencia y la imagen RGB son similares a las respuestas dadas por los modelos de cuñas tipo 3 y 4, donde se originó una caída en la amplitud máxima acompañada de una aumento de frecuencia dominante y colores azules en arreglos de apilamiento de varias capas delgadas.

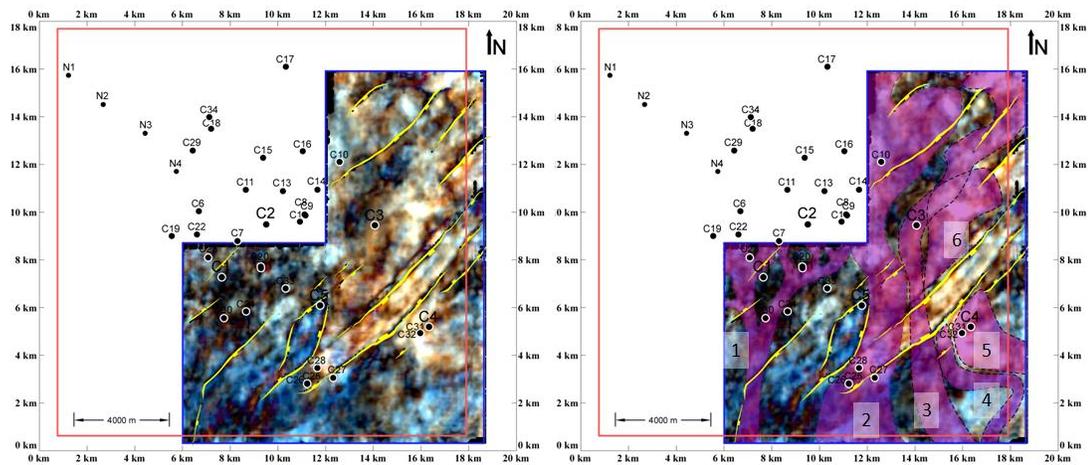


Figura 140. Imagen RGB de las Arenas Grupo 5. A la izquierda la imagen sin interpretar y a la derecha la imagen interpretada.

Con respecto a las características estratigráficas, se pudo observar que está cuatro canales identificados con los números 1, 2, 3 y 4. Estos canales tienen dirección norte-sur. Además existen dos cuerpos identificados con el número 5 y 6. Estos cuerpos pueden haber sido generados por la migración de los canales 3 y 4, además que es posible que originalmente fuesen el mismo cuerpo que fue cortado por el graben. En este grupo de arenas el pozo C3 probó gas. No obstante, en la figura 141 se la interpretación de facies correspondiente a la arena A19 que el cual puede asociarse al cuerpo 6. En este mapa el geocuerpo ha sido interpretado como una llanura de inundación. Aunque la interpretación difiere en el tipo de geocuerpo, lo relevante es que ambas interpretaciones coinciden mostrando un ambiente fluvial dominado por canales y cuerpos aislados. Sin embargo, se recomienda revisar la naturaleza de los cuerpos 5 y 6 debido a que los pozos no poseen la capacidad de ver las variaciones laterales del ambiente.

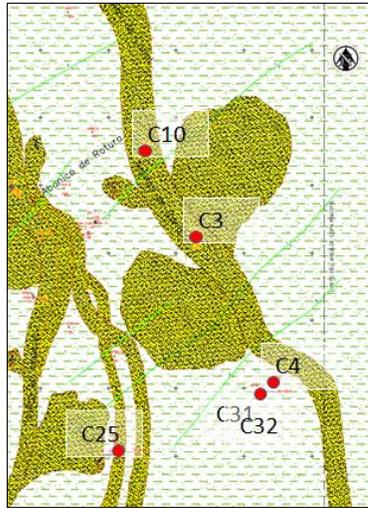


Figura 141. Mapa de facies de la arena A19 (tomado y modificado de Pestman, 2002)

Integración de geocuerpos y estructura

Como se observó previamente, la estructura geológica de la Fm. Roblecito dentro del campo Copa Macoya es muy sencilla y se describe como un monoclinal con orientación noroeste y buzamiento noreste y además, posee fallas normales producidas por el graben de Espino. En este escenario es difícil definir la acumulación de hidrocarburos usando sólo el entrapamiento estructural.

En la figura 142 se ilustra los canales y acumulaciones de arena sobre los mapas estructurales de los horizontes interpretados. Las lutitas de la Fm. Roblecito son el sello de sus propios yacimientos. En la esquina inferior derecha de la figura 142 se muestra la configuración geométrica de los yacimientos, donde las lutitas se pintan en verde, el agua en azul y el hidrocarburo en rojo. Según este esquema se espera que la acumulación de hidrocarburos se origine al suroeste de las barras de arena y donde los canales tengan concavidad hacia el noroeste. En los mapas se dibujó óvalos que delimitan estas áreas donde pueda acumularse hidrocarburos.

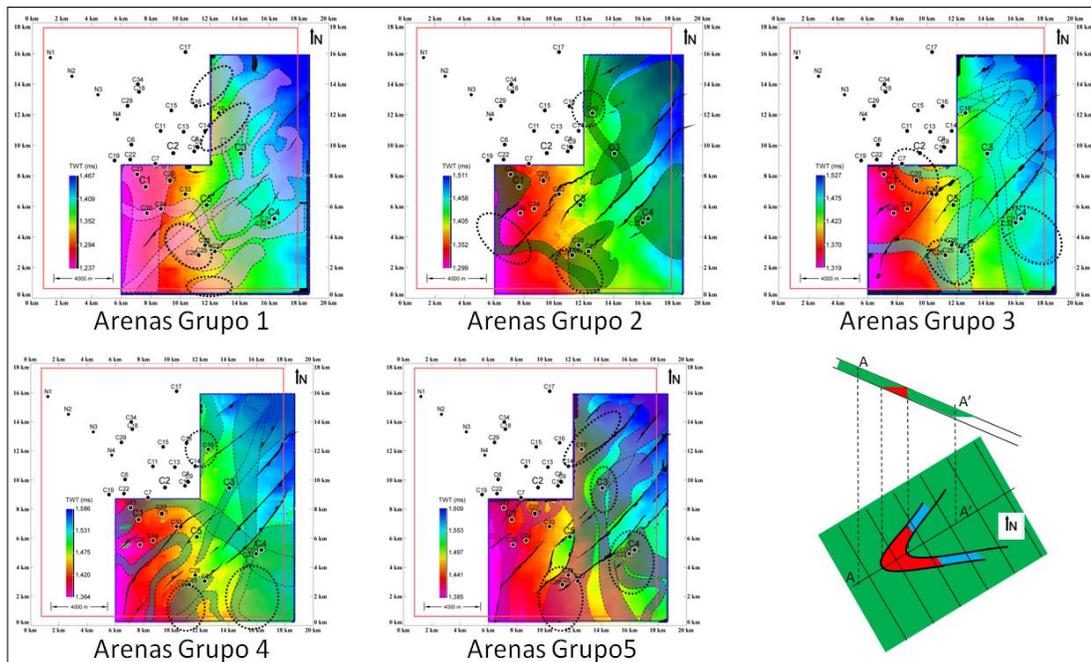


Figura 142. Superposición de las características estratigráficas en los mapas estructurales y esquema de la disposición de los yacimientos.

En la figura 143 se presenta la superposición de las características estratigráficas de todos los horizontes junto a su sistema de fallas. Fue posible observar que varios cuerpos (canales o barras) coinciden geográficamente en distintos niveles. Sin embargo, en tres óvalos (identificados con las letras A, B y C) se agruparon aquellos polígonos cuya intersección involucró todos los horizontes interpretados. Lo importante de esta técnica es que aumenta la probabilidad de perforar capas de arena. Adicionalmente, se pudo observar que las intersecciones de los óvalos B y C están ubicadas en altos estructurales, así como dos cuerpos del óvalo A. La intersección total dentro del óvalo A fue de 2,393 km², del óvalo B fue de 2,033 km² y del óvalo C fue de 0,642 km², produciendo un total de 5,068 km². Si se integra la información extraída de las figuras 137 y 138, se puede presumir que la mayor cantidad de éxito para detectar arenas con contenido de gas es precisamente en estas intersecciones.

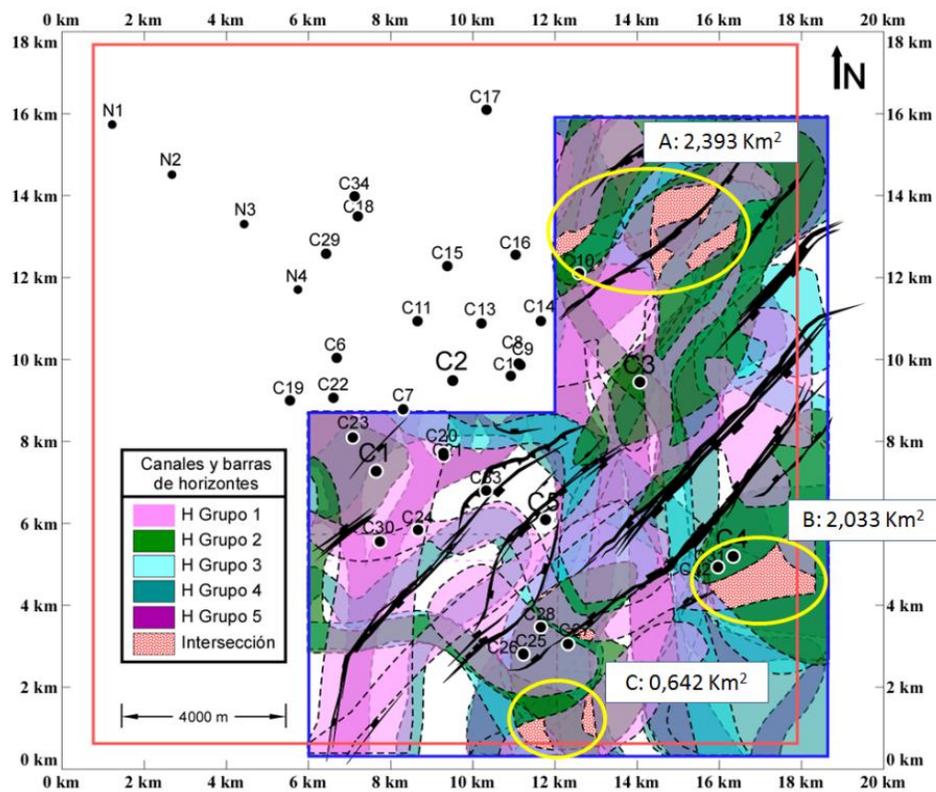


Figura 143. Superposición de las características estratigráficas de todos los horizontes sísmicos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Los atributos de energía y pseudo-relieve calculados con cinco o menos muestras, es decir, una ventana de 8 ms, resaltaron interfases de capas delgadas. Al calcular el atributo de energía con un número de 10 muestras, es decir, una ventana de 18 a 20 ms, se resaltaron capas delgadas con espesores cercanos al límite de frecuencia $\lambda/4$. Sin embargo, el atributo de pseudo-relieve inició un solapamiento en la señal el cual oculta los rasgos geológicos haciendo que dicho atributo perdiese interés en el momento de la interpretación.

Los atributos instantáneos no fueron capaces de interpretar de forma directa capas delgadas. Sin embargo, la amplitud instantánea mostró aumento en su magnitud en zonas donde hay capas delgadas. La fase instantánea fue eficiente revelando la geometría de elementos estratigráficos en modelos de cuñas y secciones sísmicas. Tanto la frecuencia instantánea como la aceleración de la fase presentaron anomalías en arenas con espesores cercanos a $\lambda/2$ que fueron rastreables lateralmente.

Los espectrogramas y el escalograma obtenidos fueron usados para analizar la distribución de energía en una frecuencia dada en función del tiempo. De estos paneles se seleccionó trazas asociadas a frecuencias y escalas determinadas con las cuales se construyó volúmenes de frecuencia o escala para crear imágenes combinadas RGB. Adicionalmente, se extrajo atributos resaltantes que permiten concentrar la atención en las componentes de frecuencia de la señal de estudio que tienen más energía. Al tener la amplitud máxima en zonas de alta frecuencia, se puede inferir que se está en una zona de capas delgadas.

Las *STFT* calculadas con ventanas de 14 y 28 ms, permitieron ver elementos en secciones sísmicas, pero no separaron bien características en frecuencia. Para observar estas características se utilizó la *STFT* con ventana de 42 ms.

La CWT con escala igual a siete resaltó reflectores de tope y base de apilamientos de capas delgadas, mostrando un comportamiento similar al atributo de energía calculado con una ventana de 8 ms. Combinando estos atributos se interpretó horizontes que no fueron observables en los datos sísmicos convencionales.

La transformada S permitió observar mayores diferencias en la frecuencia pero no generó importantes diferencias en el tiempo.

Para la interpretación de capas delgadas se agrupó las arenas individuales en paquetes que generaron la misma respuesta sísmica. Para determinar estos grupos se uso el registro de GR escalado. En áreas donde se observó baja frecuencia dentro de un contexto geológico válido, como por ejemplo entrapamientos estratigráficos, se infirió la presencia de gas.

Los atributos estudiados no permitieron llevar a cabo una clasificación litológica directamente, pero sí lograron establecer una configuración geométrica de los eventos estratigráficos y estructurales con la cual se pudo inferir un modelo geológico donde ubicar posibles acumulaciones de arena.

Los atributos de energía, amplitud instantánea y amplitud máxima junto con las imágenes RGB fueron útiles durante la interpretación realizada en planta (*horizon slices*) para la delineación de cuerpos de arenas y canales. Además, el atributo de frecuencia dominante mostró una reducción en sus valores en aquellas zonas donde se había probado o interpretado gas, condensado o petróleo.

Varios de los cuerpos interpretados usando los atributos mostraron similitud con mapas de facies realizados antes de la adquisición sísmica usando datos de pozos.

Integrando la información estructural con los cuerpos y canales interpretados, y usando un esquema de los yacimientos esperados, se delimitó posibles zonas donde se haya acumulado hidrocarburos, haciendo énfasis en las regiones donde se interceptaron geocuerpos de distintos horizontes.

BIBLIOGRAFÍA

- Abell, B., Shao, S., Pyrak-Nolte, L. (2014). Measurements of elastic constants in anisotropic media. *Society of Exploration Geophysicists, Geophysics*, V. 79, No. 5, p. D349–D362.
- Aki, K., Richards, G. (1980). *Quantitative seismology: Theory and methods*. San Francisco, CA: W. H. Freeman and Co.
- Arnstein, R., Cabrera, E., Russomanno, F., Sanchez, H. (1985). Revisión Estratigráfica de la Cuenca de Venezuela Oriental. *Mem. VI Congreso Geológico de Venezuela*, Tomo I, p. 41-69.
- Audemar F. E., Serrano, C. (2001). Future Petroliferous Provinces of Venezuela, from: *Petroleum Provinces of the Twenty-first Century*, Edited by Marlan W. Downey, Jack C. Threet, and William A. Morgan. *American Association of Petroleum Geologists. AAPG Memoir 74*, p. 353-372.
- Blumentritt, H. y Marfurt, K. (2007). Highlight volumes: Condensing spectral decomposition to two volumes. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007*: 861-864.
- Bortfeld, R. (1961) Approximations to the reflection and transmission coefficients of plane longitudinal and transverse waves: *Geophysical Prospecting*, V. 9, No. 4, p. 485-502.
- Bourke, L., Delfiner, P., Felt, T., Grace, M., Luthi, S., Serra, O., Standen, E. (1989). Using formation Microscanner images, *The Schlumberger Technical Review*, 37, p. 16–40.
- Bracewell, R. N. (1965). *The Fourier transform and its applications*. McGraw-Hill.
- Brown, A. (2011). *Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data*. 7th Edition. The American Association of Petroleum Geologists, and the Society of Exploration Geophysicists. Oklahoma, U.S.A.

- Castagna, J., Chopra, S., Al-Jarrah, F. (2014). Chapter 2: Rock-physics foundation for AVO analysis, AVO, Investigations in geophysics N° 16. Society of Exploration Geophysicists, p. 15-33.
- Chigne, N. (1989). Guarumen-Carora, Perspectivas para la exploración en regímenes tectónicos complejos. VII Congreso Geológico Venezolano. Tomo III, p. 1393-1417.
- Chopra, S., Castagna, J. (2014). AVO, Investigations in geophysics N° 16. Society of Exploration Geophysicists.
- Chopra, S. y Marfurt, K. (2007). Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization. Geophysical Developments Series N° 11. Society of Exploration Geophysicists.
- Claerbout, J. F. (2004), Earth Sounding Analysis, Processing versus Inversion, Blackwell Scientific Publications
- Comité interfilial de estratigrafía y nomenclatura (1997). Léxico estratigráfico de Venezuela, LEV). PDVSA_INTEVEP. Obtenida el 14 de mayo de 2015, de <http://www.pdv.com/lexico/>
- Daal, A., Gonzáles, A., Hernández, V., Uzcátegui, M., Rodríguez, H., Pizón, J., Choppin, H. (1989, Evolución de la región occidental de la Cuenca Oriental de Venezuela. Mem. VII Congreso. Geológico de Venezuela, Tomo I, p. 386-402.
- Daubechies, I. (1988). Orthogonal bases of compactly supported wavelets. Communications in Pure and Applied Mathematics, 41, p. 909-996.
- Daubechies, I. (1992). Ten Lectures on Wavelets, Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).
- Dejtrakulwong, P. (2012). Rock physics and seismic signatures of sub-resolution sand-shale systems. Tesis de Ph.D., Universidad Stanford.

- Di Croce, J. Bally, A., y Vail, P. (1999). Sequence stratigraphy of the Eastern Venezuela Basin. *Caribbean Basins. Sedimentary Basins of the World*, V. 4, p. 419-476.
- Dvorkin, J., Gutierrez, M. Grana, D. (2014). *Seismic reflections of rock properties*. Cambridge University Press.
- EXGEO (2008). Informe final de procesamiento de datos sísmicos del Campo Copa Macoya GV-08-CM-K-01. Reporte interno.
- Eva, A., Bruke, K., Mann, P., Wadge, G. (1989). Four-phase tectonostratigraphic development of the southern Caribbean. *Marine and Petroleum Geology*, V. 6, p. 9-21.
- Fatti, J. L., Smith G. C., Vail, P. L., Strauss, P. J. y Levitt P. R. (1994). Detection of gas in sandstones reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the geostack technique. *Society of Exploration Geophysicists, Geophysics*, V. 59, No. 9, p. 1362–1376.
- Feo Codecido, G., Smith, F., Aboud, N., Di Giacomo, E. (1984). Basement and Paleozoic rocks of the Venezuelan Llanos basins. *Geological Society of America Memoirs* (1984, 162, p. 175-188
- Frisch, W., Meschede, W., Sick, M. (1992). Origin of the Central American ophiolites: evidence from paleomagnetic results. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 104, 1301-1314.
- González de Juana, C., Iturralde, J., Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*, Tomos I y II.
- González, P. (2009) Reporte interno, Gas Guarico.
- Grana, D. (2014). Probabilistic approach to rock physics modeling. *Society of Exploration Geophysicists, Geophysics*, V. 79, No 2 p. D123-D143.

- Grossman, A., Morlet, J. (1984). Decompositions of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*. 15(4), p. 723-736.
- Herron, D. (2011). First steps in seismic interpretation. The Society of Exploration Geophysicists. Oklahoma, U.S.A.
- Hilterman, F. J. (1975) Amplitude of seismic waves-A quick look. *Society of Exploration Geophysicists, Geophysics*, V. 40, No. 5, p. 745-762.
- Ingle V. K., Proakis, J. G. (2006) *Digital Signal Processing Using MATLAB*, 3rd edition. CENGAGE Learning Custom Publishing.
- Inpex (2009). Informe final proyecto sísmico CM06K3D Campo Copa Macoya. Reporte interno. Inpex, Caracas.
- Inter-Rock (2006). Evaluación petrofísica Área Mayor de Copa Macoya. Reporte interno.
- Iturralde-Vinent, M. (2003). The conflicting paleontologic versus stratigraphic record of the formation of the Caribbean Seaway. *AAPG Memoir* 79, pp. 75-88.
- Kallweit, R., Wood, L. (1982). The limits of resolution of zero-phase wavelets. *Society of Exploration Geophysicists, Geophysics*, V. 47, No 7 p. 1035-1046.
- Kamen, E., Heck, B. (2008). *Fundamentos De Señales Y Sistemas usando la Web y Matlab*. 3ra edición. Pearson Educación.
- Kaplan, S. T., Ulrych, T. J. (2007). Phase Unwrapping: A Review of Methods and a Novel Technique. *Let it Flow, CSPG CSEG Convention*, P. 534-537
- Karl, J. H. (1989). *An introduction to Digital Signal Processing*, Academic Press.
- Kiser, G. (1992). Cuencas sedimentarias de Venezuela. *Boletín Sociedad Venezolana de Geólogos*, 45, P. 7-27.
- Liner, C. (2004). *Elements of 3D seismology*, 2nd ed. Department of Geosciences, University of Tulsa, PennWell.

- Malfait, B.T., Dinkelman, M.G. (1972). Circum-Caribbean tectonic and igneous activity and the evolution of the Caribbean plate. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83: 251-272.
- Mann, P. (1999). Caribbean Sedimentary Basins: Classification and Tectonic Setting from Jurassic to Present. *Caribbean Basins. Sedimentary Basins of the World*. V. 4, p. 3-31.
- Marfurt, K. (2014). 3D Seismic attributes for prospect identification & reservoir characterization. SEG Continuing Education Course, SEG Annual Meeting Denver.
- MathWorks (s.f.A.). Spectrogram. Obtenida el 6 de marzo de 2016, de <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>
- MathWorks (s.f.B.). Wavelet scalogram using 1d wavelet analysis. Obtenida el 6 de marzo de 2016, de <http://www.mathworks.com/help/wavelet/examples/wavelet-scalogram-using-1d-wavelet-analysis.html?searchHighlight=scalogram>
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J. (2009). *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*, 2nd ed. Cambridge University Press.
- Méndez, O. (1985). Historia geológica graficada de la Cuenca Oriental de Venezuela. Mem. VI Congreso. Geológico de Venezuela, Tomo II, p. 1000-1040.
- Motiscka, P. (1985). Vulcanismo mesozoico en el subsuelo de la faja petrolífera del Orinoco, Estado Guárico, Venezuela. Caracas, Memorias VI Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geólogos, 3:1929-1943.
- Mukerji, T., Mavko, G., Mujica, D., and Lucet, N. (1995). Scale-dependent seismic velocity in heterogeneous media. *Geophysics*, V. 60, No. , p. 1222-1233.
- OpendTect, (2015). OpendTect Attributes Matrix. Obtenida el 14 de mayo 2015, de http://opendtect.org/wiki/opendtect_attributes_matrix/pmwiki.php/Main/HomePage.

- Oppenheim, A., Schafer, R. (2011). Tratamiento de señales en tiempo discreto. 3ra edición, Prentice Hall.
- Oppenheim, A., Willsky, A. (1996). Señales y sistemas. 2da edición. Prentice Hall.
- Parnaud, F., Y. Gou, J.-C. Pascual, I. Truskowski, O. Gallango, H. Passalacqua, and F. Roure (1995). Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuela basin, in A. J. Tankard, R. Suárez S., H. J. Welsink, Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 741-756.
- Partyka, G., Gridley, J., y López, J. (1999). Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization, *The Leading Edge*, V. 18, No. 3, p. 353-360.
- Partyka, G. (2001). Seismic Thickness Estimation: Three approaches pros and cons: SEG International Exposition and Annual Meeting San Antonio, Texas. p. 119-123.
- Payton, C. E. (1977). Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir 26, p. 165-184.
- Patterson, J., Wilson, J. (1953). Oil fields of Mercedes region, Venezuela, *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, V. 37 No.12, p. 2705-2733.
- Peirson III, A. L. (1965). Geology of the Guárico mountain front. (Geología del flanco sur de las montañas de Guárico). *Bol. Inform., Asoc. Venez. Geol. Min. y Petr.*, V. 8, No. 7, p. 183-212.
- Pérez, Y. (2009A). Reporte interno: informe final proyecto sísmico CM06K3D, Campo Copa Macoya. Reporte interno, Gas Guárico.
- Pérez, Y. (2009B). Caracterización geofísica de la Formación Chaguaramas en el Campo Copa Macoya. Trabajo de grado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Pestman, P. (2002) Reporte Interno. Teikoku Oil & Gas.

- Pindell, J.L., Barrett, S.E. (1990). Geologic evolution of the Caribbean region. In: G. Dengo and J.E. Case, Editors, The Caribbean Region. The Geology of North America, V. H, The Geological Society of America, Boulder, CO, pp. 405-432.
- Puryear, C. I., Tai, S. y Castagna, J. P. (2008). Comparison of frequency from CWT and MPD spectral decomposition of a complex turbidite channel model. SEG Annual Meeting, Las Vegas.
- Rao, R. M., Bopardikar, A. S. (1998). Wavelet transform: Introduction to theory and application. Addison Wesley Longman, Inc.
- Richards, P. G. y Frasier, C. W. (1976) Scattering of the amplitude fidelity of elastic waves from depth-dependent inhomogeneities. Geophysics, V. 41, No. 3, p. 441-458.
- Rio, P., Mukerji T., Mavko, G., y Marion, D. (1996). Velocity dispersion and upscaling in a laboratory-simulated VSP. Geophysics, V. 61, No. 2, p. 584-593
- Robertson, J. y Nogami, H. (1984). Complex seismic trace analysis of thin beds. Society of Exploration Geophysicists, Geophysics, V. 49. No 4: p. 344 352.
- Ross, M.I., Scotese, C.R. (1988). A hierarchical tectonic model of the Gulf of Mexico and Caribbean region. Tectonophysics, 155: 139-168.
- Schenk C. (2000). Guárico Sub-Basin Assessment Unit 60980102, U.S. Geological Survey Petroleum assessment 2000 - Description and results. U.S. Geological Survey World Energy Assessment team. Obtenida el 14 de mayo 2015, de <http://energy.cr.usgs.gov/WEcont/regions/reg6/p6/tps/AU/au609812.pdf>
- Sheriff, R., Geldart, L. (1995). Exploration Seismology, 2nd ed. Cambridge University Press.
- Sheriff, R. (2002). Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics, 4th ed. Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Oklahoma, U.S.A.

- Shuey, R.T, (1985). A simplification of the Zoeppritz equations. Society of Exploration Geophysicists, Geophysics, V. 50, No. 4, p. 609–614.
- Sidney Burrus, C., McClellan, J., Oppenheim, A., Parks, T., Schafer, R., Schuessler, H. (1998). Ejercicios de tratamiento digital de señales utilizando Matlab v.4. Prentice Hall.
- Simm, R., Bacon, M. (2014). Seismic amplitude: An interpreter's handbook. Cambridge University Press.
- Sinha, S., Routh, P., Anno, P. y Castagna, J. (2005). Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. Society of Exploration Geophysicists, Geophysics, V. 70, no. 6, p. P19–p25.
- Sistema de Información Geográfico del Turismo en Venezuela, (SIGaVenezuela). (2015). Mapa Político-Administrativo del Estado Guárico. Recuperado 25 de mayo, 2015, <http://sigavenezuela.com.ve/guaricoinfog.html#prettyPhoto/0/>
- Smith, G. C. Y Gidlow, P. M. (1987) Weighted staking for rock property estimation an detection of gas. Society of Exploration Geophysicists, Geophysics, V. 35, No. 9, p. 993–1014.
- Stockwell, R.G., Mansinha, L., y Lowe, R.P. (1996). Localization of the complex spectrum: The S transform, IEEE Transactions os signal Processing, V. 44, No 4.
- Taner, M. T., Koehler, F., y Sheriff, R. E., (1979). Complex seismic trace analysis. Society of Exploration Geophysicists, Geophysics, V. 44, No 6 p. 1041-1063.
- Teikoku (2004, Geological and Geophysical Evaluation of East Copa Macoya area, Eastern Venezuela Basin. Reporte interno Teikoku, Caracas.
- Timoshenko, S.P., Goodier, J.N. (1934). Theory of Elasticity. New York: McGraw-Hill.

- Torrence, C., y Compo, G. (1998). A practical guide to wavelet analysis: Bulletin of the American Meteorological Society, 79, No 1, 61-78.
- Villanueva, S. (2013). Aplicación de atributos sísmicos como delineadores de geocuerpos en la Formación Roblecito, Campo Copa Macoya, Edo. Guárico. Trabajo de grado de ingeniería geofísica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Wessel P, Smith W. (2015). Generic Mapping Tools (GMT). Ver. 5.1.2. School of Ocean and Earth Sciences and Technology. University of Hawaii, EEUU <http://gmt.soest.hawaii.edu/>
- Widess, M. (1973). How thin is a thin bed? Society of Exploration Geophysicists, Geophysics, V. 38, No 6 p. 1176-1180.
- Wilson, J.T. (1966). Are the structures of the Caribbean and Scotia arcs analogous to ice rafting? Earth Planet. Sci. Lett., 1: 335-338.
- Yilmaz, Özdoğan. (2001). Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic Data. Society of Exploration Geophysicists. V. 1. Series: Investigations in Geophysics, V. 10, Tulsa, EEUU.
- Yoris, F., Ostos, M. (1997). Capítulo 1: Geología de Venezuela, WEC: Venezuela Evaluación de Pozos. Schlumberger, 1, p. 1-36.
- Zeng, H. (2009). How thin is a thin bed? An alternative perspective. Society of Exploration Geophysicists, The Leading Edge, V. 28. No 10 p. 1192-1197.
- Zeng, H., Marfurt, K. (2015). Recent progress in analysis of seismically thin beds. Society of Exploration Geophysicists y American Association of Petroleum Geologists, Interpretation, V. 3, No 3 p. SS15-SS22.