

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS P MEDIANTE EL USO DEL  
PAQUETE DE CÓDIGO ABIERTO SEISMIC UN\*X A PARTIR DEL  
CONJUNTO DE DATOS SINTÉTICOS MARMOUSI2**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Barrios G., Alexa K.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geofísico

Caracas, 2021

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS P MEDIANTE EL USO DEL  
PAQUETE DE CÓDIGO ABIERTO SEISMIC UN\*X A PARTIR DEL  
CONJUNTO DE DATOS SINTÉTICOS MARMOUSI2**

**TUTOR ACADÉMICO:** Ing. Vincenzo De Lisa

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Barrios G., Alexa K.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geofísico

Caracas, 2021

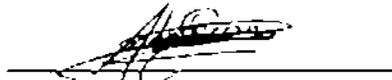
Caracas, 2 de septiembre de 2021

## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bra. **Alexa Karole Barrios González**, titulado:

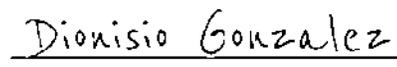
***“MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS P MEDIANTE EL USO DEL PAQUETE DE CÓDIGO ABIERTO SEISMIC UN\*X A PARTIR DEL CONJUNTO DE DATOS SINTÉTICOS MARMOUSI2”***

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO**.



---

Prof. Andrés Espeso  
Jurado



---

Prof. Dionisio González  
Jurado



---

Prof. Vincenzo De Lisa  
Tutor Académico

## AGRADECIMIENTOS

Enormemente agradecida por haber sido recibida por la máxima Casa de Estudios del país, que me dio la oportunidad de formarme como profesional y como persona. Agradecida con el Departamento de Geofísica por recibirme en sus aulas y a todos los profesores que por vocación allí laboran y fueron partícipes en mi educación.

La elaboración de este proyecto no hubiese sido posible sin la asesoría de mi Tutor, el Profesor Vincenzo De Lisa, que con su ayuda y paciencia a pesar de las dificultades de la distancia hizo todo a su alcance para culminar el trabajo.

La realización de este proyecto se lo debo enteramente a mi fallecido abuelo Miguel González y a mi abuela Yamile Salih, quienes me dieron un hogar y se preocuparon por mi educación y bienestar, sin ellos nada en mi vida sería posible, todo lo que tengo se los debo a ustedes y a su amor por mí, este logro es enteramente suyo.

A Carlos Montañez por su insistencia y apoyo y a nuestra pequeña niña Miranda Lucía, sin ustedes a mi lado probablemente no hubiese tenido la convicción para continuar y cumplir la meta, los amo.

A mi fallecida madre Carolina, sé que en el fondo siempre quiso lo mejor para mí.

A mis tíos Elimay y Miguel, quienes siempre me dieron su apoyo moral y ayuda cuando lo necesité.

A los compañeros y amigos que hice en el camino, Ali Madriz, Akira Bello, Carlos Araque y Geraldine Torres, que en ese viaje de campo largo formamos un vínculo especial que perduró en el tiempo.

A Giancarlo Zorrilla, quien ha sido mi amigo durante toda la carrera y siempre me ayudó en las tareas, informes y proyectos, estuvo allí cuando lo necesitaba como compañero de estudios y como amigo para escucharme y aconsejarme.

**Barrios G., Alexa K.**

**MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS P MEDIANTE EL USO DEL  
PAQUETE DE CÓDIGO ABIERTO SEISMIC UN\*X A PARTIR DEL  
CONJUNTO DE DATOS SINTÉTICOS MARMOUSI2**

**Tutor Académico:** Prof. Vincenzo De Lisa

**Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y  
Geofísica, Año 2021.**

**Palabras clave:** Modelado, Marmousi2, Seismic Un\*x, *sufdmod2*, método de  
diferencias finitas.

**RESUMEN**

La presente investigación se centra en elaborar un modelado con el conjunto de datos sintéticos Marmousi2, ampliado y mejorado por Martin (2004) a partir del modelo original Marmousi, utilizando el paquete de código abierto y gratuito Seismic Un\*x, para probar el potencial de procesamiento de este en modelos geológicos complejos. A través de la herramienta *sufdmod2* que utiliza el método tradicional de diferenciación explícita de segundo orden, fue posible realizar 9 pruebas para el mallado original de 1,25 m x 1,25 m y 9 pruebas para el mallado de 12,5 m x 12,5 m, Hubo un total de 13601 trazas en el modelado de 1,25 m y 1360 trazas en el modelado de 12,5 m. Con la finalidad de comprobar la precisión de los resultados acústicos de *sufdmod2*, las pruebas 06 y 09 reproducen los experimentos publicados en la tesis de Martin (2004), cada una calculó: firma de la fuente, registro del disparo, perfil sísmico vertical e instantáneas del frente de ondas. Los resultados obtenidos para estas pruebas coinciden con los obtenidos por el algoritmo *E3D* que usó Martin (2004). Por último, se recomienda continuar el uso de *sufdmod2* para el modelado acústico por DF en modelos complejos, simular con Marmousi2 la adquisición de datos sísmicos con parámetros cercanos a la realidad e investigar la secuencia adecuada que proporcione una imagen fiel del modelo, entre otros.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	<b>Página</b>
CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
INDICE DE CONTENIDO.....	vi
INDICE DE TABLAS.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	x
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Objetivos de la investigación.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Origen del modelo Marmousi2.....	2
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO..	5
2.1. Historia Geológica.....	5
2.2. Modelo Marmousi vs. Marmousi2.....	5
2.3. Modificación del modelo.....	6
2.4. Extensión de los horizontes.....	7
2.5. Configuración de la capa de agua.....	7
2.6. Capas de transición por encima del fondo marino.....	8
2.7. Trampas de hidrocarburos.....	8
2.8. Propiedades de las capas.....	9
2.9. Acumulaciones de hidrocarburos.....	11
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	13
3.1. Método de reflexión sísmica.....	13
3.2. Investigaciones previas.....	15
3.3. Conceptos.....	16
3.3.1. Aproximaciones de diferencias finitas.....	16
3.3.2. Dispersión de la malla.....	19
3.3.3. Condiciones en los bordes del modelo.....	19
3.4. Seismic Un*x.....	20
3.5. Modelado sísmico por diferencias finitas con Seismic Unix: esquema sufdmod2.....	20

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y PROCESOS.....	22
4.1. Plataforma computacional.....	22
4.1.1. Equipos informáticos.....	22
4.1.2. Sistema Operativo.....	22
4.1.3. Programas adicionales.....	23
4.2. Ubicación y descarga de los datos de Marmousi2.....	23
4.3. Descompresión del archivo descargado.....	24
4.4. Resultados de la descompresión.....	24
4.5. Preparación de los datos para el modelado.....	25
4.6. Graficación.....	26
4.7. Remuestreo de los modelos de densidades y velocidades P.....	27
4.8. Modelado sísmico con Seismic Un*x: sufdmod2.....	29
4.9. Generación de los datos sintéticos.....	31
4.10. Resultados.....	32
4.10.1 Ondícula fuente.....	33
4.10.2 Efecto de la dispersión.....	33
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	36
5.1 Tiempo de Ejecución.....	36
5.2 Validación de los resultados.....	36
5.3. Firma de la fuente.....	37
5.3.1 Ondícula Ricker Prueba 01.....	39
5.3.2 Ondícula Ricker Prueba 02.....	39
5.3.3 Ondícula Ricker Prueba 03.....	39
5.3.4 Ondícula Ricker Prueba 04.....	39
5.3.5 Ondícula Ricker Prueba 05.....	41
5.3.6. Ondícula Ricker Prueba 06.....	42
5.3.7. Ondícula Ricker Prueba 07-08-09.....	42
5.3.8. Ondícula Ricker: análisis espectral.....	43
5.3.9. Registro sísmico.....	45
5.3.10. Perfil sísmico vertical (VSP).....	47
5.3.11. Frente de ondas.....	48
5.3.12. Modelado utilizando fuente sísmica horizontal.....	49
5.4. Detalles de la ejecución.....	50
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
6.1. Conclusiones.....	52
6.2. Recomendaciones.....	53
BIBLIOGRAFÍAS.....	55

ANEXOS.....	57
A. Script para la graficación de los modelos de densidad y velocidad marmousi 2: graficarmodelos.sh.....	58
B. Script para remuestrear el modelo.....	59
C. Script para el modelado sísmico utilizando el modelo marmousi2 de 12,5 x 12,5 m. El script ejecuta las nueve pruebas y genera un reporte llamado tejec.txt.....	62
D. Script para el modelado sísmico utilizando el mallado original de marmousi2.un solo disparo por ejecución. Genera y presenta un reporte.....	66
E. Instrucciones para obtener el grafico del espectro de amplitud de la ondícula Ricker.....	69
F. script que presenta en pantalla la secuencia animada de las ondas...	70
G. Disparos obtenidos de las pruebas 01, 04, 05,07,08.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Dimensiones de los modelos.....	7
2. Velocidades y densidades para las litologías.....	11
3. Especificaciones de los equipos de computación utilizados.....	22
4. Listado del contenido de la carpeta elastic-marmousi-model.....	25
5. Resumen del modelado cuadrícula 1,25m y 12,5 m.....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Ubicación de la cuenca de Cuanza en Angola en el continente africano.....	3
2. Modelo estructural original Marmousi.....	3
3. Mapa geológico de la cuenca de Cuanza.....	6
4. Velocidad de la onda P para (a) Marmousi original y (b) Marmousi2.....	6
5. Horizontes del modelo Marmousi2.....	7
6. Capas de transición Marmousi2.....	8
7. Espesor de las capas de Marmousi2.....	9
8. Modelo Marmousi2, elementos estructurales, horizontes y litologías.....	10
9. Unidades de hidrocarburos. (a) Descripción general que muestra la ubicación de las unidades y áreas de hidrocarburos que se muestran con mayor detalle en (b) y (c). (b) Ubicación de unidades de hidrocarburos en un entorno estructural relativamente simple. (c) Ubicación de unidades de hidrocarburos en ambiente estructuralmente complejo.....	12
10. Reflexión y refracción.....	13
11. Rayos generando CMP en el subsuelo en ángulos de incidencia crecientes para las fuentes S1-4 y los receptores R1-4. Durante el procesamiento sísmico, estas trazas componen el apilamiento CMP.....	14
12. Perfil sísmico vertical.....	14
13. Coordenadas en el dominio discreto.....	17
14. Visualización del esquema de extrapolación por diferencias finitas. Extrapolación del campo en el nivel tiempo n+1, considerando los niveles n y n-1.....	18
15. Descompresión del archivo elastic-marmousi-model.tar.gz y tiempos obtenidos con el comando time.....	24
16. Gráfico de las densidades en el modelo Marmousi2.....	26
17. Gráfico de las velocidades P del modelo Marmousi2.....	27
18. Modelo de las velocidades P: intervalo 12.5x12.5 m.....	28
19. Modelo de las velocidades P: intervalo 25x25 m.....	28
20. Modelo de velocidades P: intervalo 50x50 m.....	29
21. Ondícula de Ricker. (a) Representaciones en el dominio del tiempo y (b) en el dominio de la frecuencia, $f_M$ es la frecuencia pico.....	33
22. Malla 1,25 m, tiempo aproximado del fotograma 300 ms.....	34
23. Malla 12,5 m, tiempo aproximado del fotograma 300 ms.....	34
24. Malla 12,5 m, tiempo aproximado del fotograma 300 ms.....	34
25. Comparación de dos disparos sintéticos (a) Modelo original 1,25 x 1,25 m. (b) Modelo con malla 12,5 x 12,5 m.....	35

26. Ondícula fuente Ormsby. (a) en el dominio del tiempo (b) espectro de amplitud.....	37
27. Ejemplo ondícula Ricker generada por sufdmod2. (a) En el dominio del tiempo (b) En el dominio de la frecuencia.....	37
28. Ondícula Ricker para el modelo 1,25 x 1,25 m, 5 s de longitud en tiempo.....	38
29. Espectro de amplitud de la ondícula de la figura 27.....	38
30. Ondícula Ricker calculada para la prueba 01. (a) Modelo original (b) Modelo remuestreado.....	39
31. Ondícula Ricker calculada en la prueba 04, el modelo original, longitud 5s.....	40
32. Ondícula fuente prueba 04, primeros 100 ms.....	40
33. Ondícula Ricker calculada en la prueba 05, modelo original, longitud 5s.....	41
34. Ondícula fuente prueba 04, primeros 100 ms.....	41
35. Ondículas Ricker calculadas en la prueba 06.....	42
36. Ondículas calculadas en las pruebas 07, 08, 09 para el modelo de 1,25 m.....	42
37. Ondículas calculadas en las pruebas 07, 08, 09 para el modelo de 12,5 m.....	43
38. a) espectro de amplitud ondícula Ricker prueba 01. (b) Ampliación con valor anómalo en 0 Hz.....	44
39. (a) espectro de amplitud ondícula Ricker prueba 07. (b) Ampliación con valor anómalo en 0 Hz.....	44
40. (a) (b) (c) (d) (e) espectro de amplitud ondícula Ricker prueba 04, 05, 06, 08, 09 respectivamente.....	45
41. Figura modificada de la tesis de Martín utilizando E3D, (b) es el disparo calculado por sufdmod2. Clave: (1) Onda directa (2) Reflexión del fondo marino (3) Reflexiones (4) Múltiple del fondo marino (5) Refracciones y onda precursora.....	46
42. Figura modificada de la tesis de Martín utilizando E3D, (b) es el disparo calculado por sufdmod2. Clave: (1) Onda directa (2) Reflexión del fondo marino (3) Múltiple del fondo marino (4) Múltiple del fondo marino de segundo orden (5) Refracciones y onda precursora.....	47
43. Vista de los primeros 2,5 s del VSP. (a) Respuesta elástica (Martín 2004) (b) respuesta acústica del programa sufdmod2.....	48
44. Fotograma t=1.4 s x=5000 m.....	49
45. Respuesta del modelo acústico Marmousi2 a una fuente sísmica plana horizontal.....	49
46. Momentos en que se alternan dos núcleos trabajando al 100%.....	50
47. Temperaturas máximas detectadas por los sensores.....	50
48. Efecto de cpulimit (a) en la ejecución con 50% máximo. (b) reducción de la temperatura máxima temperatura.....	51

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

El modelado sísmico es una técnica computacional que simula la propagación de ondas sísmicas en el subsuelo, calculando la respuesta de la Tierra frente a la perturbación de una fuente y que un conjunto de sensores registra. Una aplicación importante del modelado es la evaluación y diseño de las adquisiciones sísmicas, para comprobar la validez de las geometrías de grabación y es una herramienta fundamental en la interpretación.

En este Trabajo Especial de Grado usaré Seismic Unix (SU), el cual es un paquete educativo, de investigación y procesamiento sísmico de código abierto y gratuito; contiene una gran variedad de herramientas de estudio y procesamiento relacionadas con la propagación de ondas y la generación de imágenes sísmicas, desarrollado en el “*Center for Wave Phenomena (CWP)*” en “*Colorado School of Mines (CSM)*”, actualmente se encuentra en la plataforma Github administrado por el profesor jubilado del CWP John Stockwell.

SU ofrece una colección de programas para el procesamiento y modelado de datos sísmicos. Comparado con los costosos software comerciales y cerrados, SU permite la libre descarga y modificación de sus códigos. Dentro de SU está el programa `sufdmod2`, que realiza el modelado acústico mediante el método de diferencias finitas en dos dimensiones.

La presente investigación se enfoca en analizar los resultados de este programa en sus tres modalidades: registro, perfil sísmico vertical y animación del frente de onda. El modelo geológico pertenece al mejorado y ampliado paquete de datos sintéticos Marmousi2. En este caso, sólo se usarán los datos de las velocidades P y densidades de las rocas que pertenecen a este complejo modelo geológico.

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar la capacidad y eficiencia del programa de modelado de ondas P `sufdmod2` de la plataforma de software libre `Seismic Un*x`, aplicándolos al modelo de velocidad de ondas P y densidades de las rocas que pertenecen al complejo modelo geológico `Marmousi2`.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Establecer una metodología de trabajo para el modelado acústico en `Seismic Un*x`.
- Observar el comportamiento de las ondas sísmicas P simuladas por el programa `sufdmod2` al pasar por el modelo geológico.
- Precisar las ventajas y limitaciones de este software como herramienta válida en proyectos de investigación práctica y académica.

## **1.3. Justificación**

Con este proyecto, resalta la importancia del uso del código abierto como lo es `Seismic Un*x` puesto que se encuentra disponible ampliamente para el público a través de descarga gratuita y que por esto mismo ayudará a investigaciones tanto en el área pública como privada. Destaca su accesibilidad y la variedad de herramientas que permiten al usuario el modelaje de datos, que en este caso se usaron `Marmousi2`. Además, este proyecto aportará nueva metodología sobre el uso de `Seismic Un*x` en el modelado de datos, así también emitirá conclusiones sobre su desempeño y uso para futuros usuarios que deseen optar por este software.

## **1.4. Origen y ubicación del modelo `Marmousi2`**

El modelo `Marmousi` original fue creado por un equipo de geólogos, geofísicos e informáticos del Instituto Francés de Petróleo (IFP) en 1988 (Martin et al., 2006), con la intención de producir datos sísmicos complejos que requieren técnicas de procesamiento avanzadas para obtener una imagen terrestre correcta.

En líneas generales, es un complicado set de datos acústicos 2D basado en la geología de la cuenca de Cuanza en Angola, esta se encuentra en el noroeste de Angola (figura

1), en la costa atlántica de África Occidental, es de aproximadamente 300 km de largo en sentido norte-sur y 170 km de ancho este-oeste (Brognon y Verrier, 1966).

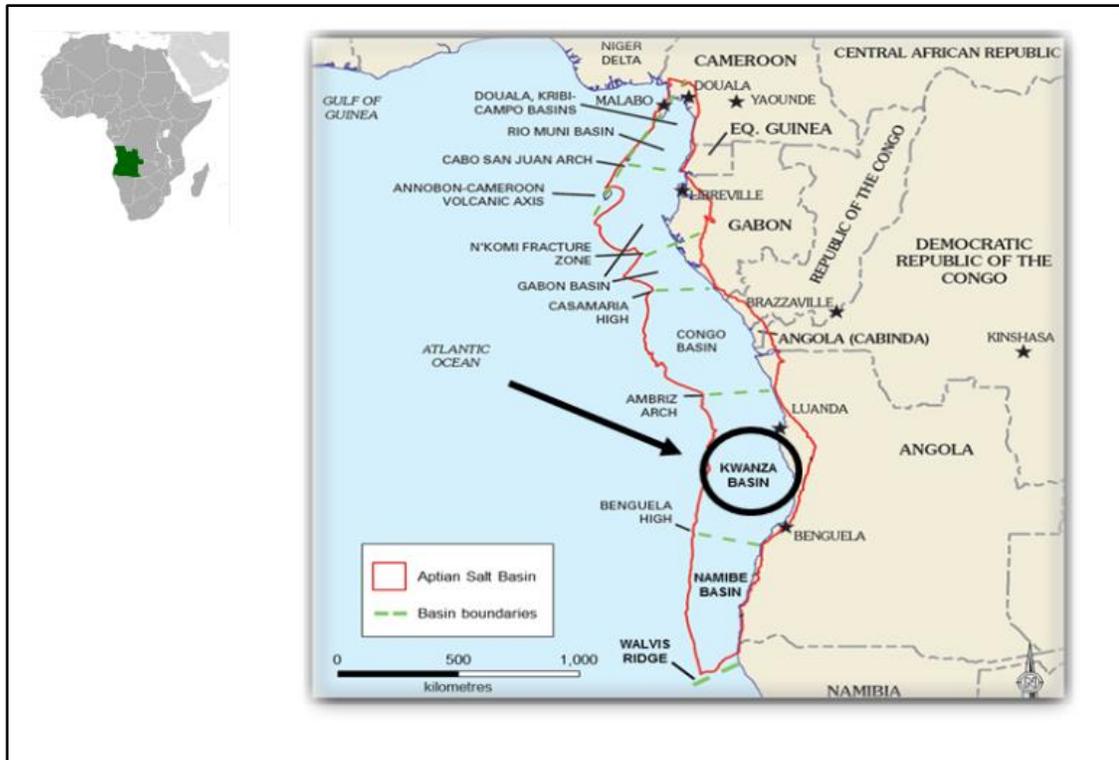


Figura 1. Ubicación de la cuenca de Cuanza en Angola en el continente africano. Fuente: Wiltshire y Write (2016).

El modelo Marmousi se basa en el perfil geológico de la siguiente figura:

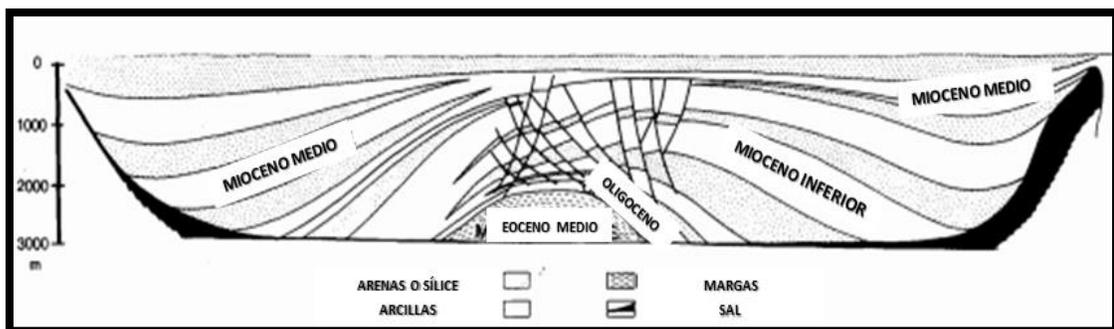


Figura 2. Modelo estructural original Marmousi. Fuente: Bourgeois et al. (1991).

Desde su creación, el modelo y sus datos sintéticos acústicos de diferencias finitas, han sido usados para múltiples propósitos geofísicos, entre los que destacan su uso para el taller sobre aspectos prácticos de la inversión de datos sísmicos en la reunión número

52 de la EAEG en 1990, y hasta el día de hoy sigue siendo uno de los conjuntos de datos geofísicos más publicados (Martin et al., 2006).

Por su parte, Irons (2014), cita que el set de datos Marmousi2, creado por Allied Geophysical Laboratories (AGL), es una extensión y mejora elástica del modelo clásico Marmousi, aumentando el número de horizontes, su profundidad e incluyendo valores  $V_s$  al modelo.

## CAPITULO II

### MARCO GEOLÓGICO Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

#### **2.1. Historia Geológica**

La cuenca Cuanza es una de las cuencas de márgenes pasivos en el margen de África occidental que se formó como producto de la separación de Sudamérica y África y la formación del Atlántico Sur. Contiene una secuencia de carbonato-evaporita del Cretácico Inferior y una secuencia arcillosa-arenosa del Cretácico Superior y Terciario. El basamento cristalino precámbrico está parcialmente cubierto por rocas extrusivas y sedimentos de lavado de granito. Los sedimentos superficiales y subsuperficiales de la cuenca consisten en estratos del Cretácico Inferior y Superior, Paleoceno, Eoceno y Mioceno, cuya geología se puede apreciar en la figura 3 (Brognon y Verrier, 1966).

A este respecto, Bourgeois et al. (1991) describen brevemente que:

*La historia geológica consta de dos fases bastante distintas; la primera corresponde a una sedimentación continua (de margas y carbonatos). Posterior a ello, estos depósitos se doblaron ligeramente y luego se erosionaron. La segunda fase comenzó con el depósito de una serie isópaca evaporítica salífera. En esta, se depositó una serie arcillo-margosa rica en materia orgánica. Estos sedimentos fueron seguidos por un depósito grueso de sedimentos detríticos arcillosos-arenosos cuyo espesor de facies estaba gobernado por arrastre lateral de sal, resultante de la presión de la sobrecarga. Además, vinculado a este arrastre de sal, que puede localmente causar la desaparición completa de la sal, aparecieron fallas de crecimiento inclinadas que se encontraban activas continuamente durante la deposición de la serie detrítica.*

#### **2.2. Modelo Marmousi vs. Marmousi2**

Martin (2004) creó Marmousi2 modificando y extendiendo el modelo Marmousi original. Marmousi2 tiene 3,5 km de profundidad y 17 km de ancho, encapsulando el modelo original. Complementa el modelo incorporando velocidades de ondas S. Contiene más horizontes, lo que hace del modelo estratigráficamente más complejo que su predecesor (figura 4). Adicionalmente, la capa de agua fue extendida a 450 m (Irons, 2014).

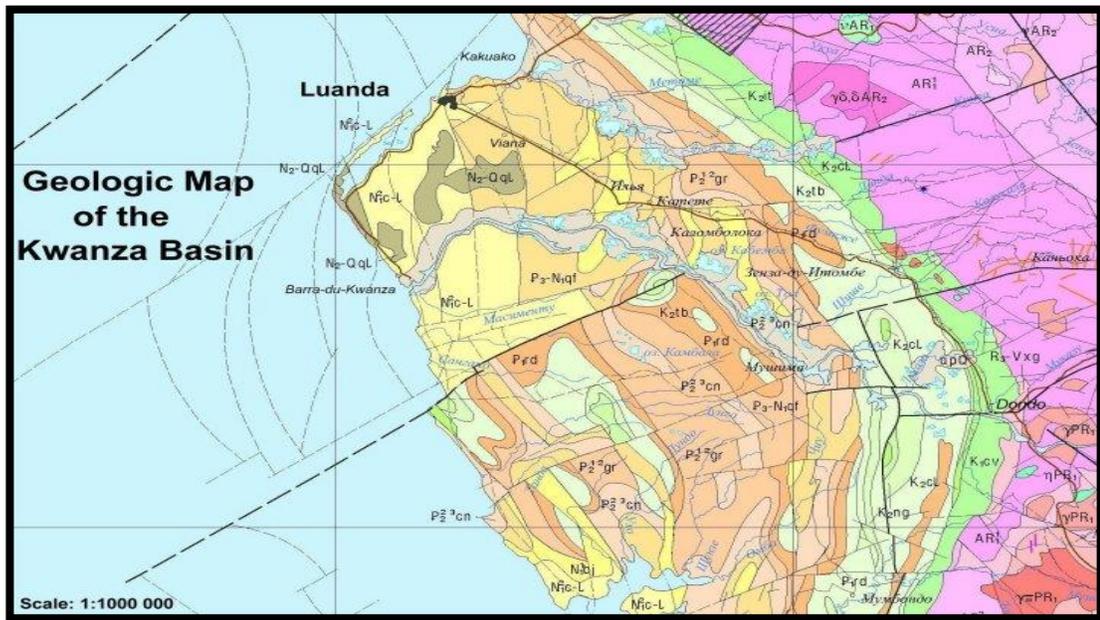
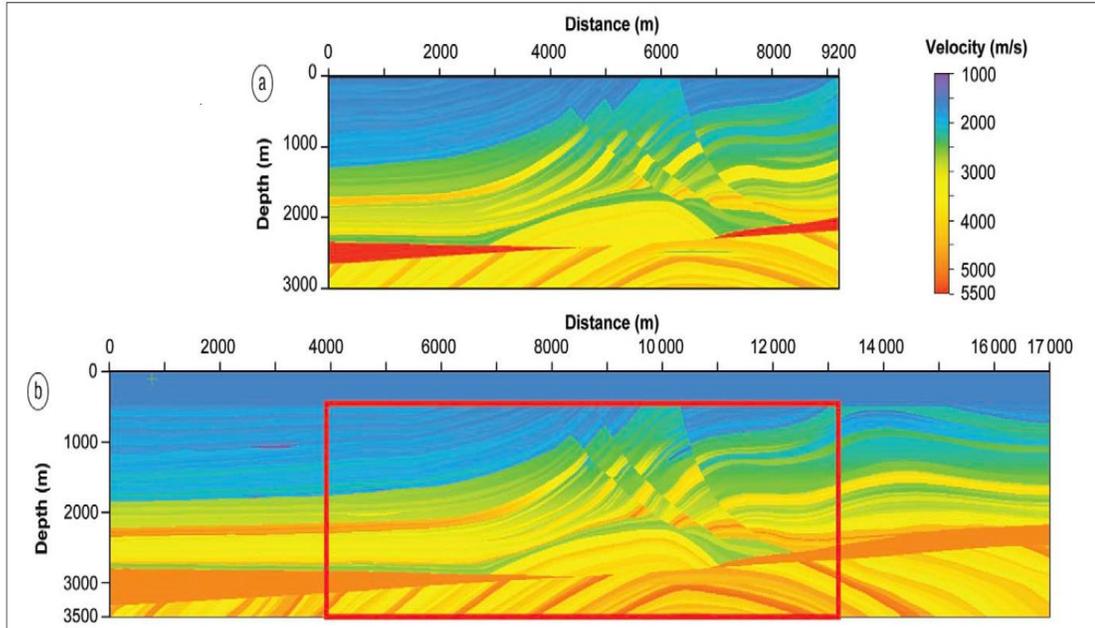


Figura 3. Mapa geológico de la cuenca de Cuanza. Fuente: <http://www.geologicallocations.com/africa/angola/Kwanza.htm>

Figura 4. Velocidad de la onda P para (a) Marmousi original y (b) Marmousi2. Fuente: Martin, et al., 2006.



### 2.3. Modificación del modelo

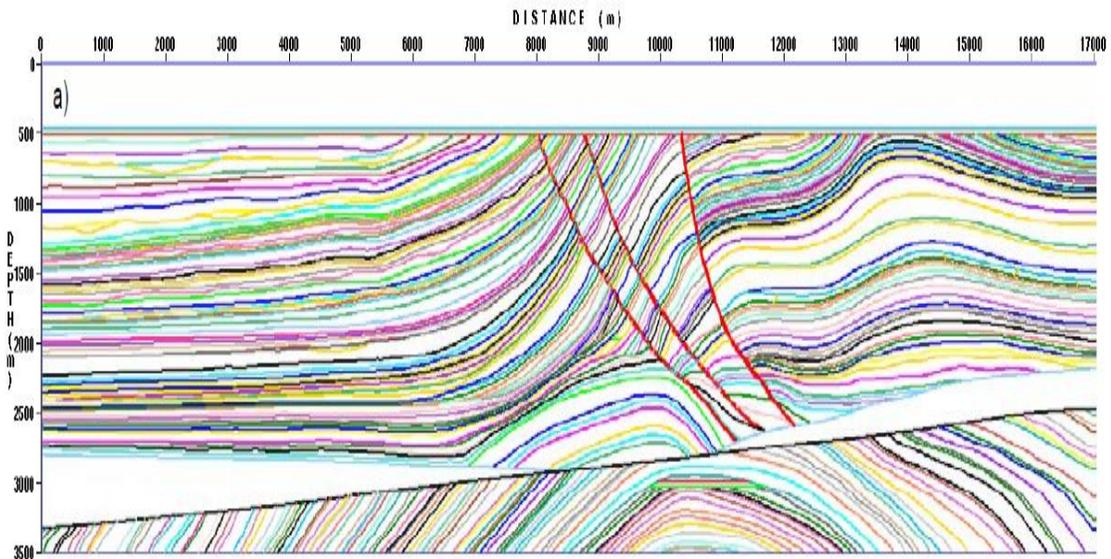
Las dimensiones de ambos modelos se muestran en la tabla 1. El modelo Marmousi original se encuentra ubicado cerca del centro de Marmousi2 (figura 4).

**Tabla 1. Dimensiones de los modelos**

	<b>Marmousi</b>	<b>Marmousi2</b>
Longitud de la línea (X)	0 – 9.2 km	0 – 17 km
Profundidad (Z)	0 – 3 km	0 – 3.5 km
Espesor capa de agua	32 m	450 m

#### **2.4. Extensión de los horizontes**

Martin (2004), agregó 41 nuevos horizontes para un total de 199. La expansión de los horizontes cumple con dos objetivos: primero para reducir la complejidad estructural en la nueva área expandida y así producir una respuesta con componentes estructuralmente complejas como simples; segundo crear una posible expansión geológica (figura 5).



**Figura 5. Horizontes del modelo Marmousi2. Fuente: Martin (2004)**

#### **2.5. Configuración de la capa de agua**

Se modificó la profundidad de los horizontes para hacerlos más acorde a la adquisición y procesamiento en agua profunda, cambiándolos a 468 m (siendo anteriormente 32 m aprox. de profundidad) para ubicar el fondo marino a una profundidad de 500 m. Luego, se enderezó el horizonte para hacerlo perfectamente plano con una profundidad de 505 m.

## 2.6. Capas de transición por encima del fondo marino

Martin (2004) agregó dos capas de transición por encima del fondo marino original para reducir el efecto de “fondo marino duro”. Estas capas son perfectamente planas con grosores de 25 m y 30 m, creando un nuevo fondo marino a una profundidad de 450 m (Figura 6).

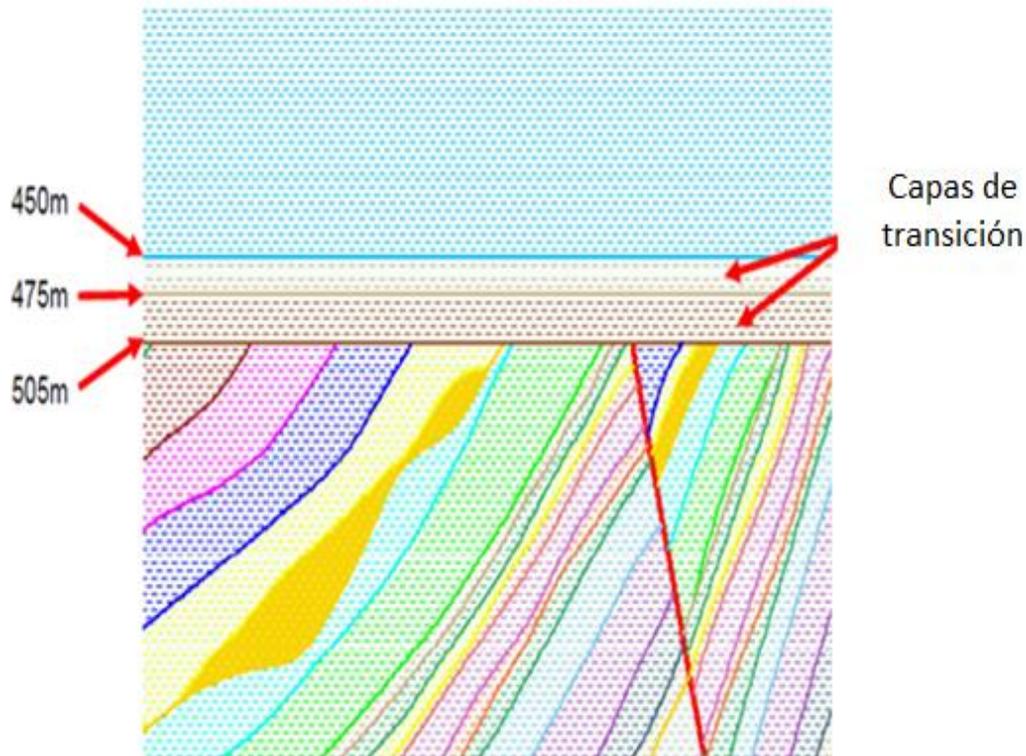


Figura 6. Capas de transición Marmousi2. Fuente: Tomado y modificado de Martin (2004)

## 2.7. Trampas de hidrocarburos

Martin (2004), incorporó horizontes adicionales para incluir acumulaciones de hidrocarburos al modelo (Figura 8). Es importante mencionar, que los espesores de las capas del modelo original no fueron modificados preservando la resolución sísmica. La figura 7 muestra una parte del modelo, resaltando algunas capas y sus espesores aproximados. Normalmente, las capas sedimentadas tienen un espesor de 20 – 100 m, también alcanzan espesores mínimos cercano a cero en terminaciones por adelgazamiento o disminución (“*pinchouts*”) y truncamientos.

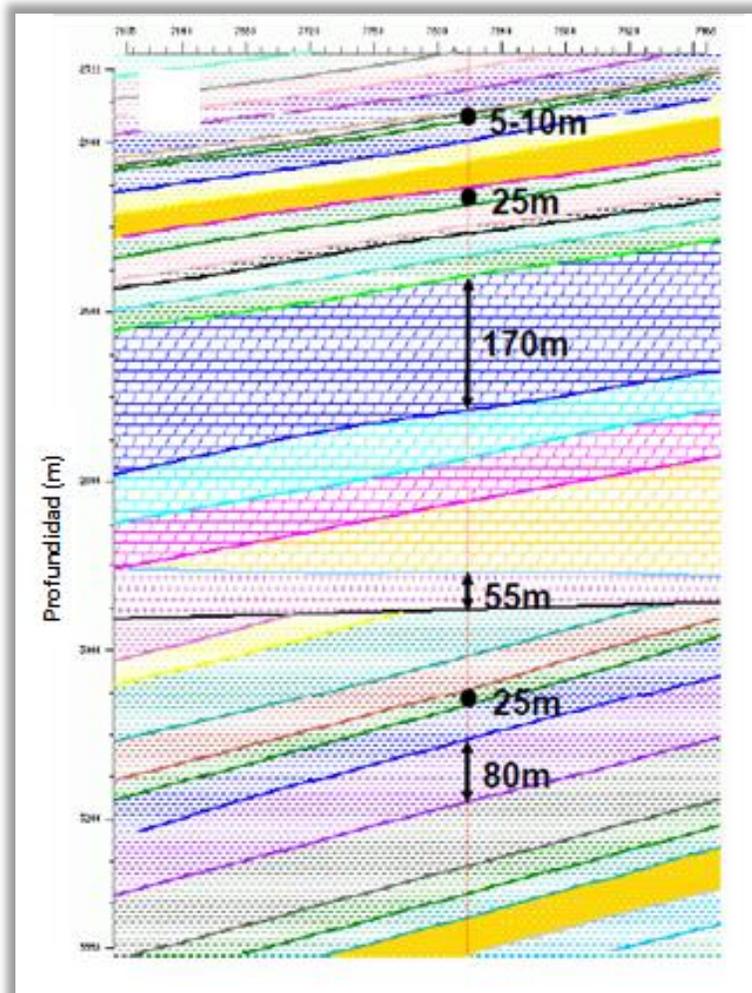


Figura 7. Espesor de las capas de Marmousi2. Fuente: Tomado y modificado de Martin (2004)

## 2.8. Propiedades de las capas

El modelo Marmousi original es acústico, por lo que sólo soporta la propagación de ondas compresivas. Marmousi2, es un modelo completamente elástico que tiene datos de ondas compresivas y de corte. Para definir este modelo, fue necesario asignar, litología, velocidad de onda S, densidad y velocidad de onda P a cada capa. La sección está compuesta de unidades de esquisto con capas ocasionales de arena. El centro del área es un anticlinal con fallas complejas compuesto por margas, una inconformidad y una capa de sal separada de las margas de las unidades más profundas del anticlinal, el cual también está conformado mayormente por esquisto con arena (Figura 8) (Martin, Marfurt, y Wiley, 2006).

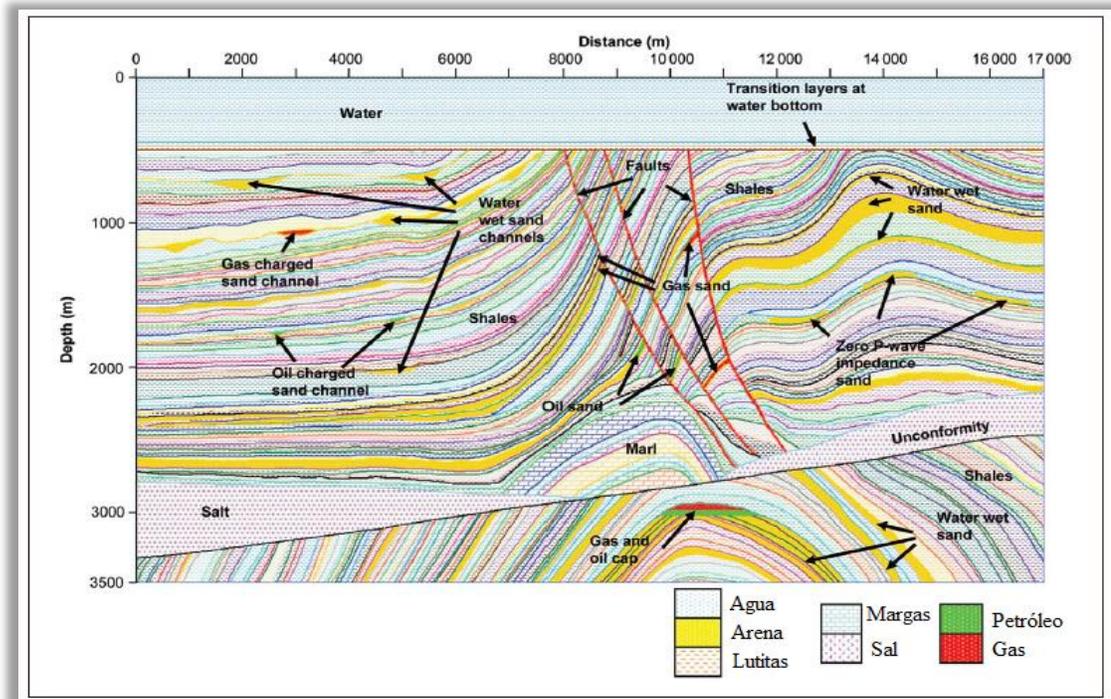


Figura 8. Modelo Marmousi2, elementos estructurales, horizontes y litologías. Fuente: Tomado y modificado de Martin, Marfurt, y Wiley (2006).

Al modelo geológico Marmousi2 se le asignaron las propiedades de las capas partiendo de los siguientes lineamientos:

- Preservar las capas de agua y sal del modelo original.
- Asignar a las primeras dos capas de transición similares a sedimentos de esquistos suaves modernos.
- Todas las capas que contienen hidrocarburos deben ser de arena.
- El anticlinal por encima de la estructura de sal, está compuesto por margas (esquisto carbonatado, definidas en este modelo como 70% esquisto y 30% caliza)
- Todas las otras capas son de arena o esquisto, con la mayoría de las capas siendo de esquisto. Las capas de arena fueron elegidas asumiendo que la arena es típicamente menos densa que el esquisto.
- Sin importar la litología asignada, a las capas le fueron dadas velocidades de onda P idénticas al modelo Marmousi original.
- Reducir la Vp de la capa de sal de 5500 m/s al valor comúnmente utilizado de 4500 m/s

Martin (2004) explica en su tesis que se les asignó a las capas velocidad de la onda P del modelo original Marmousi, esta velocidad se define como una velocidad constante o utilizando una definición de gradiente de velocidad estándar ( $V = V_0 + kZ$ ). Además, asume que las velocidades reales de las capas permanecerán sin cambios por el aumento en profundidad. Por su parte, también comenta haber aplicado las transformadas Greenburg y Castagna (1992) para obtener la velocidad de la onda S a partir de la velocidad de la onda P, y “Transformadas ARCO” de Castagna et al. (1993) para obtener la densidad a partir de la velocidad de la onda P. A continuación se muestra la tabla 2 con los valores de  $V_p$ ,  $V_s$  y densidad para Marmousi2:

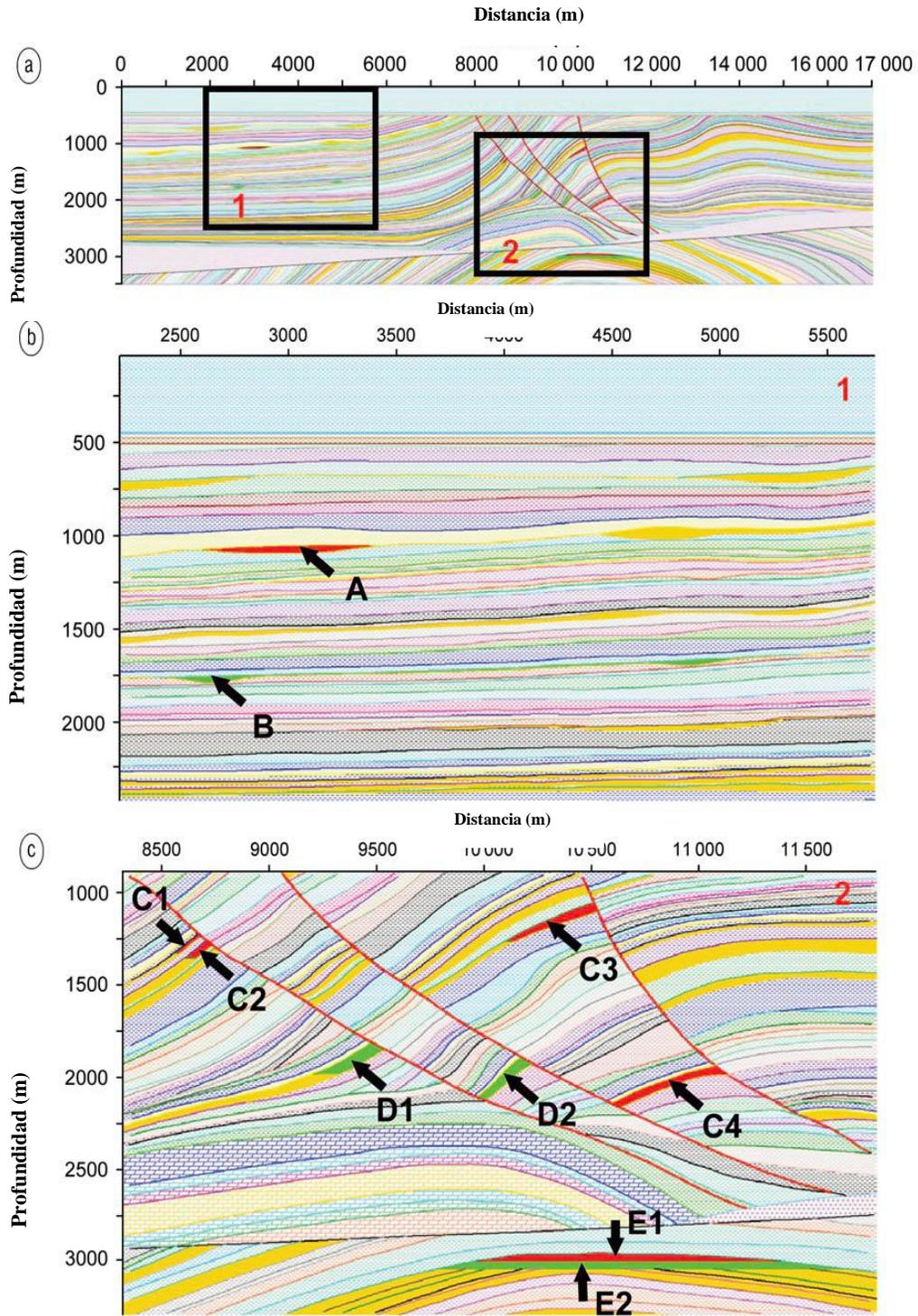
**Tabla 2. Velocidades y densidades para las litologías**

	$V_P$ (m/s)	$V_S$ (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Agua	1500	0	1.01
Arena	Marmousi	$V_S = 0.804 V_P - 856$	$\rho = 0.2736 V_P^{.261}$
Lutitas	Marmousi	$V_S = 0.770 V_P - 867$	$\rho = 0.2806 V_P^{.265}$
Sal	4500	2600	2.14
Calizas	Marmousi	$V_S = 1.017 V_P - 0.055 V_P^2 - 1030$	$\rho = 0.3170 V_P^{.225}$

## 2.9. Acumulaciones de hidrocarburos

Martin (2004), añadió acumulaciones de hidrocarburos en el modelo estructural Marmousi2. La Figura 9 muestra la ubicación de estas acumulaciones (rojo para gas y verde para petróleo):

- Zona **1** entorno estructuralmente simple, figura 9 (a).
- Zona **2** ambiente estructuralmente complejo con anticlinal profundo, figura 9 (a).
- Yacimiento **A**, gas, superficial, zona 1, figura 9 (b).
- Yacimiento **B**, petróleo, arena poco profunda, zona 1, figura 9 (b).
- Yacimientos **C1, C2, C3, C4**, gas, zona 2, figura 9 (c).
- Yacimientos **D1, D2**, petróleo, zona 2, figura 9 (c).
- **E1** y **E2** representan el contacto gas-petróleo en un anticlinal profundo, figura 9 (c)



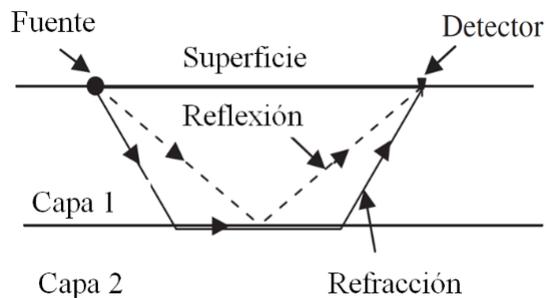
**Figura 9. Unidades de hidrocarburos. (a) Descripción general que muestra la ubicación de las unidades y áreas de hidrocarburos que se muestran con mayor detalle en (b) y (c). (b) Ubicación de unidades de hidrocarburos en un entorno estructural relativamente simple. (c) Ubicación de unidades de hidrocarburos en ambiente estructuralmente complejo. Fuente: Martín et. al., 2006.**

## CAPITULO III MARCO TEÓRICO

### 3.1. Método de reflexión sísmica

Gadallah y Fisher (2009), apuntan que el método sísmico es bastante simple en concepto. Este utiliza una fuente de energía artificial para producir ondas sísmicas (similares al sonido) que viajan a través de la Tierra hasta detectores de movimiento en tierra o presión en el mar. Los detectores convierten el movimiento o las variaciones de presión en electricidad que se registra mediante instrumentos electrónicos.

Hay dos caminos entre la fuente y el receptor de particular interés: reflexión y refracción. En la Figura 10, las capas 1 y 2 difieren en el tipo de roca, en la velocidad a la que viajan las ondas sísmicas (velocidad acústica o sísmica) y la densidad (masa por unidad de volumen). Cuando las ondas sísmicas encuentran el límite entre las capas 1 y 2, parte de la energía se refleja de regreso a la superficie en la capa 1 y parte se transmite a la capa 2. Si la velocidad sísmica de la capa 2 es más rápida que en la capa 1, habrá un ángulo en el que la onda sísmica transmitida se dobla o refracta para viajar a lo largo del límite entre capas, como se muestra en la Figura 10. Estos dos tipos de trayectorias son la base de los estudios de refracción y reflexión sísmica.



**Figura 10. Reflexión y refracción. Tomado y modificado de: Gadallah and Fisher (2009)**

El objetivo del método sísmico 2D es obtener una imagen bidimensional del subsuelo en la cual podamos identificar potenciales acumulaciones de hidrocarburos. Un paso importante para este caso, es agrupar los datos adquiridos en familias de puntos medios comunes (pmc, en inglés “*common mid points, cmp*”). Un CMP es un conjunto de trazas que tienen el mismo punto medio entre fuente y receptor, Figura 11.

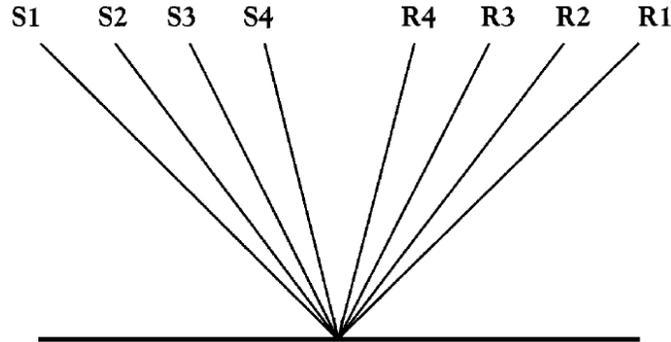


Figura 11. Rayos generando CMP en el subsuelo en ángulos de incidencia crecientes para las fuentes S1-4 y los receptores R1-4. Durante el procesamiento sísmico, estas trazas componen el apilamiento CMP.  
Fuente: Gadallah y Fisher (2009)

El perfil sísmico vertical (psv, en inglés: *vertical seismic profiling, vsp*) es otro método de adquisición donde los detectores son colocados en un pozo a diferentes profundidades y la fuente está en la superficie. Un aspecto importante del psv es que se logra grabar el campo de ondas descendentes y el campo de ondas ascendentes o reflexiones, Figura 12. Esta característica permite obtener una imagen del subsuelo cercana al pozo superior a aquella obtenida con el método 2D.

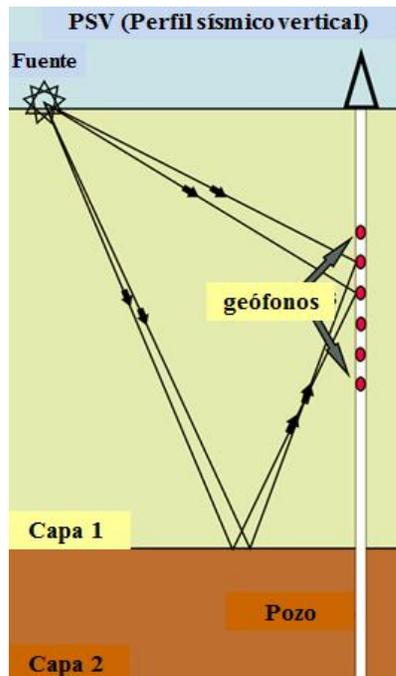


Figura 12: Perfil sísmico vertical. Tomado y modificado de: <https://mbfsz.gov.hu/en/geophysics/vertical-seismic-profiling-vsp>

### **3.2. Investigaciones previas**

Lara (2002), generó distintos modelos bidimensionales con Seismic Un\*x en el área de El Macal, Cuenca Petrolífera Oriental, norte del Estado Monagas. Por ser una zona geológicamente compleja, el modelado contribuyó a determinar el modelo que mejor se ajusta a la respuesta sísmica real y afinar los parámetros de adquisición en un levantamiento sísmico 3D.

Por su parte, Vieira (2007) explica en su tesis de grado el procesamiento básico de datos sísmicos sintéticos con Seismic Un\*x a partir del modelado de estructuras simples. Concluyó que es posible el procesamiento de datos reales o modelado de secciones de mayor complejidad física y estructural que probarían un mayor alcance de los programas contenidos en SU.

De igual forma, Lara (2007) generó un modelo de velocidades para una línea sísmica semiregional ubicada en la Cuenca Oriental, zona central de Monagas, este representa una estructura altamente compleja debido al abundante fallamiento a lo largo de la extensión de la línea. En este caso, usó el método de Triangulación Ajustada de Delaunay y la simulación de propagación ondas mediante el esquema de diferencias finitas. En el mismo trabajo Lara anotó que los resultados del modelado mediante SU son satisfactorios enfatizando que este tipo de estudio permitirá ampliar la visión y entendimiento del fenómeno sísmico y ofrecer un método de corroboración de los estudios de sísmicas reales.

Por su parte, Pérez (2008) apoyándose de los trabajos Vieira (2007) y Lara (2007), utiliza el entorno de SU como herramienta pedagógica en pregrado. Para ello usa ejercicios que permiten el modelado de estructuras con diferentes grados de complejidad y pocas interfaces, como la construcción de perfiles de velocidad, densidad y lentitud cuadrática a través del método de Triangulación de Delaunay y el método de diferencias finitas de segundo orden.

Así mismo, Oliveira (2011), usando programas de modelado y procesamiento de SU seleccionó algunos modelos geológicos representativos de estructuras propicias a la acumulación de hidrocarburos tales como: domo salino, anticlinales y trampas combinadas, entre otros. Generó registros de campo sintéticos con el objetivo de ejemplificar su manipulación y visualización. Aplicó etapas de procesamiento

destacando características peculiares en los mismos. Expuso que los modelos desarrollados no son tan complejos como la realidad geológica del subsuelo subrayando la importancia del modelado directo por trazado de rayos para conocer lo que ocurre con la propagación de la energía sísmica en medios con diferentes estructuras propicias a la acumulación de hidrocarburos.

Finalmente, Rodríguez (2013), investigó la aplicación del modelado de diferencias finitas 2D de SU en la técnica de refracción por lapso de tiempo (en inglés: *time-lapse refraction*) en situaciones de fugas de gas someros. De los resultados concluyó que el método es una buena herramienta para monitorear los cambios de velocidad debido a la fuga de gas en capas poco profundas. Un aporte adicional es que la investigación demostró que el modelado de SU no está limitado a la sísmica de reflexión.

Los modelos mencionados en los trabajos previos no poseen la complejidad y presencia de hidrocarburos como en Marmousi2. Como se ha explicado en la sección previa, Marmousi2 es un modelo intencionalmente diseñado para ser geológicamente complejo con trampas de gas, petróleo y una capa de sal ubicada en su unidad más profunda.

### 3.3. Conceptos

#### 3.3.1. Aproximaciones de diferencias finitas

La ecuación de onda (1) en dos dimensiones en su forma continua viene dada por:

$$\text{Ecuación 1. } \frac{\partial^2 p(x,z,t)}{\partial t^2} = c^2(x,z) + \left[ \frac{\partial^2 p(x,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(x,z,t)}{\partial z^2} \right] + s(x,z,t)$$

Donde  $p(x,z,t)$  es variación de presión del medio o desplazamiento de partículas;  $c$  representa la velocidad de propagación y  $s$  es la fuente. La expresión dentro los paréntesis cuadrados es el operador de Laplace o Laplaciano de la función  $p(x,z,t)$ .

Las variables  $x,z$  son el espacio cartesiano.

Para la resolver la ecuación (1) es útil el método de diferencias finitas (MDF) siendo la solución explícita la más popular en la comunidad sísmica por su relativo bajo costo computacional.

En análisis numérico, el método de las diferencias finitas es utilizado para calcular de manera numérica las soluciones a las ecuaciones diferenciales parciales. Todos los métodos de diferencias finitas se basan en aproximaciones de la serie de Taylor y la precisión de la solución depende del número de términos utilizados en la representación de la serie de Taylor de la función. Por lo tanto, se obtiene una versión discreta de la ecuación de onda. Son requeridas las condiciones iniciales o punto de partida a partir del cual se propagaría el campo de onda.

Para resolver la Ecuación 2 es necesario discretizar el tiempo y el espacio y considerando que  $\Delta x$ ,  $\Delta z$ ,  $\Delta t$  son los intervalos de discretización de las respectivas variables, entonces:

**Ecuación 2.**  $p(x, z, t) \rightarrow p_{i,k}^n = p(i\Delta x, k\Delta z, n\Delta t)$

**Ecuación 3.**  $c(x, z) \rightarrow c_{i,k} = c(i\Delta x, k\Delta z)$

**Ecuación 4.**  $s(x, z, t) \Rightarrow s_{i,k}^n(i\Delta x, k\Delta z, n\Delta t)$

De esta manera, tenemos que en las funciones discretas los subíndices  $i, k$  representan el espacio y el superíndice  $n$  el tiempo, Figura 12.

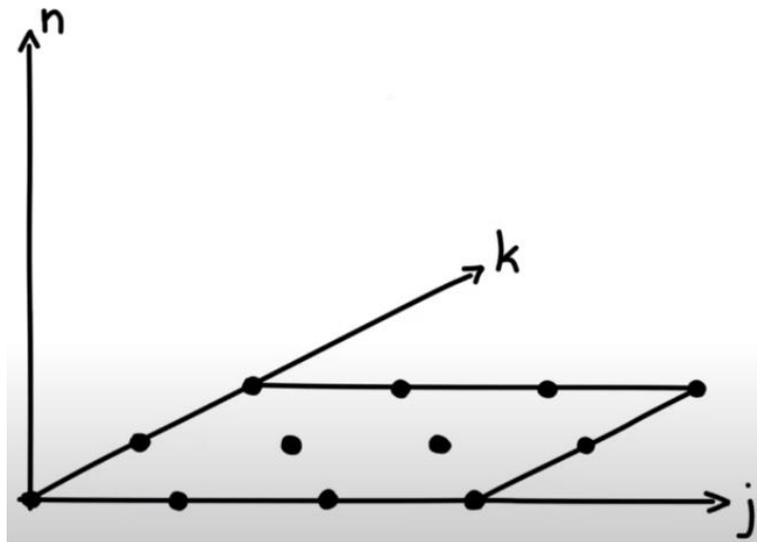


Figura 12: Coordenadas en el dominio discreto. (Tomado y modificado del curso del profesor Heiner Igel)

De la expansión de Taylor de segundo orden obtenemos:

**Ecuación 5.**  $\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \approx \frac{p_{(i,k)}^{n+1} - 2p_{(i,k)}^n + p_{(i,k)}^{n-1}}{\Delta t^2}$

**Ecuación 6.**  $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \approx \frac{p_{(i+1,k)}^n - 2p_{(i,k)}^n + p_{(i-1,k)}^n}{\Delta x^2}$

**Ecuación 7.**  $\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \approx \frac{p_{(i,k+1)}^n - 2p_{(i,k)}^n + p_{(i,k-1)}^n}{\Delta z^2}$

Sustituyendo las tres aproximaciones anteriores en la ecuación 8, se obtiene:

**Ecuación 8.**  $\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \approx \frac{p_{(i,k)}^{n+1} - 2p_{(i,k)}^n + p_{(i,k)}^{n-1}}{\Delta t^2} = c_{i,k}^2 \left[ \frac{p_{(i+1,k)}^n - 2p_{(i,k)}^n + p_{(i-1,k)}^n}{\Delta x^2} + \frac{p_{(i,k+1)}^n - 2p_{(i,k)}^n + p_{(i,k-1)}^n}{\Delta z^2} \right] + s_{(i,k)}^n$

Finalmente si  $\Delta x = \Delta z$  y despejamos para que el superíndice  $n+1$  esté del lado izquierdo de la igualdad, obtenemos:

**Ecuación 9.**  $p_{i,k}^{n+1} = \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} c_{i,k}^2 [p_{i+1,k}^n - 2p_{i,k}^n + p_{i-1,k}^n + p_{i,k+1}^n - 2p_{i,k}^n + p_{i,k-1}^n] + \Delta t^2 s_{i,k}^n + 2p_{i,k}^n - p_{i,k}^{n-1}$

La ecuación anterior conduce a un esquema de extrapolación en donde tenemos a la izquierda el valor futuro del campo de presión en  $n+1$  y el lado derecho es función del presente en  $n$  y el tiempo pasado en  $n-1$ , figura 13.

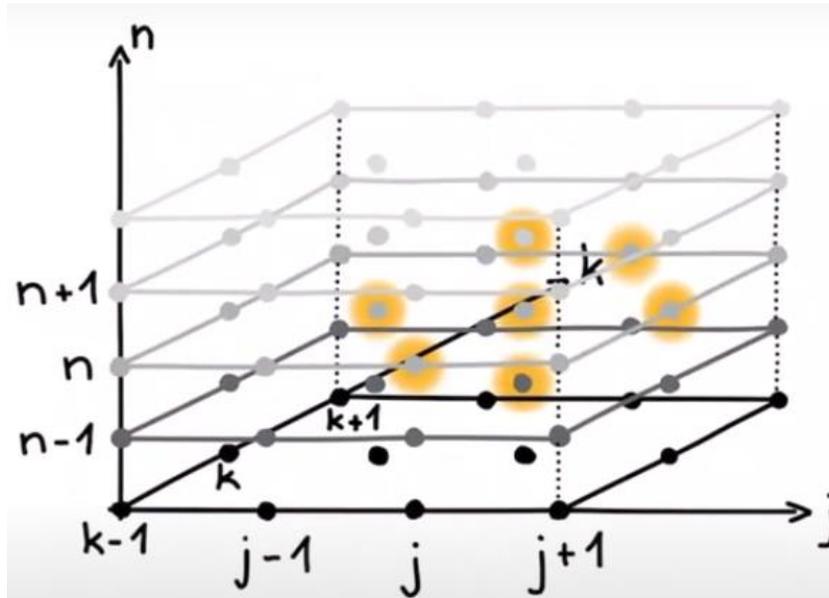


Figura 13. Visualización del esquema de extrapolación por diferencias finitas. Extrapolación del campo en el nivel tiempo  $n+1$ , considerando los niveles  $n$  y  $n-1$  (Tomado y modificado del curso del profesor Heiner Igel)

### 3.3.2. Dispersión de la malla

El fenómeno numérico llamado dispersión significa que la fase de velocidad de una onda es una función de la frecuencia, incluso cuando las propiedades del material no dependen de la frecuencia. La velocidad de dispersión ( $v_{FD} = \frac{\omega}{k}$ ) es una función de la velocidad media, el tamaño de la cuadrícula, el paso de tiempo, el número de onda y los coeficientes finitos diferentes. Por tanto, se observa una dispersión numérica dependiente de la frecuencia debido a un muestreo inadecuado de los campos de onda en el espacio y el tiempo. Además, pueden aparecer errores debido a truncamiento de términos de orden superior en la expansión de la serie de Taylor.

Como se indicó anteriormente, es necesario seleccionar un tamaño de cuadrícula correcto para evitar la dispersión numérica. Es posible definir cuántos puntos de cuadrícula se necesitan en términos de longitud de onda en la mitad superior de la frecuencia de potencia.

Los mejores resultados para cuadrículas gruesas, utilizando un método explícito de segundo orden, se obtienen con al menos 10-11 puntos de cuadrícula por longitud de onda.

Mientras que para esquemas de cuarto orden o métodos implícitos, es posible utilizar una cuadrícula fina que contenga alrededor de 5 puntos de longitud de onda.

Por otro lado, se debe asegurar que la relación entre el muestreo temporal y el muestreo espacial sea limitada. Para el esquema de segundo orden discutido aquí, la relación se puede elegir de acuerdo con la condición Courant-Friedrichs-Levy:

**Ecuación 10.**  $v_{max} \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq C_{max}$

Donde  $v_{max}$  es la máxima velocidad en el modelo,  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo y  $\Delta x = \Delta z$  es el espaciado de la cuadrícula. Los valores de  $C_{max}$  cambian con el método utilizado para resolver la ecuación discretizada y nunca debe ser mayor que 1.

### 3.3.3. Condiciones en los bordes del modelo

Para evitar reflexiones no deseadas provenientes de los límites del modelo, es necesario establecer límites de superficie no libres (absorbentes). De esta forma se atenuarían las reflexiones de ondas en los lados límites absorbentes. Dado que las reflexiones

provenientes de la superficie libre son parte del experimento sísmico real, no se debe colocar ninguna superficie absorbente en el borde superior.

### **3.4. Seismic Un\*x**

Seismic Un\*x (SU) es un aglomerado de software de código abierto que fue respaldado por el *Center for Wave Phenomena* (CWP) en el Colorado School of Mines (CSM). El paquete proporciona una colección de programas, bibliotecas, herramientas gráficas y aplicaciones fundamentales para el procesamiento y modelado de datos sísmicos, ejecutándose en los sistemas operativos UNIX y GNU-Linux. SU no tiene interfaz gráfica propia, funciona bajo líneas de comando en el entorno de una terminal. Por ser de código abierto y bajo licencia BSD (*Berkeley Software Distribution*), el acceso y modificación a los códigos fuente es libre, por lo tanto puede usarse para crear aplicaciones más complicadas. En la codificación predomina el lenguaje de programación C con algunas funciones en Fortran. Las salidas graficas por pantalla utilizan el servidor Xorg mientras que en la impresión adopta el lenguaje de descripción de páginas PostScript.

SU tiene su génesis a finales de los 70' con el *Stanford Exploration Project* (SEP) con el nombre SY. En 1986 SY llega al CWP siendo modificado y ampliado para convertirse en SU. En 1986 John Stockwell se hace cargo del desarrollo y expansión del paquete.

El número conocido de usuarios SU es de miles y ha sido instalado por lo menos en 82 países. SU ha recibido premios como el *University to Industry Award* from the Colorado Chapter of the Technology Transfer Society en 1994 y el *Society of Exploration Geophysicists Special Commendation* en 2002. En enero de 2018 Stockwell se jubiló del CSM pero continúa con el mantenimiento del paquete en la plataforma GitHub con la colaboración de entusiasta geocientíficos internacionales.

### **3.5. Modelado sísmico por diferencias finitas con Seismic Unix: esquema `sufdmod2`**

El comando `Sufdmod2` de Seismic Un\*x utiliza el método tradicional de diferenciación explícita de segundo orden para la ecuación de onda acústica sobre un modelo del

subsuelo. Da la solución numérica para la ecuación de onda mediante una expansión de segundo orden de la serie de Taylor para esta ecuación. Los archivos de entrada de Sufdmod2 son modelos de velocidad y densidad muestreados uniformemente. Este comando proporciona dos archivos de salida, uno que contiene las ondas [nx] [nt] para el tiempo y otro para la línea horizontal de sismogramas [nx] [nt] que contiene el shotgather.

SU ofrece la posibilidad de obtener películas de propagación de ondas y disparos para una o varias tomas. En esos archivos es posible identificar diferentes fenómenos (reflexión, refracción, difracción e interferencia) a lo largo de los modelos del subsuelo. Para garantizar la estabilidad sufdmod2 calcula por defecto el intervalo  $\Delta t$  apropiado mediante la fórmula:

**Ecuación 11.**  $\Delta t = h / (2.0 * V_{max})$

Siendo  $h$  es el valor mínimo entre  $\Delta x$  y  $\Delta z$ .

Otro parámetro importante es la frecuencia máxima ( $f_{max}$ ). Como consecuencia del fenómeno numérico llamado dispersión, la fase de velocidad de una onda es una función de la frecuencia, incluso si las propiedades del material no dependen de la frecuencia. Teóricamente las soluciones para la ecuación de onda dadas por el modelado de diferencias finitas representan una buena aproximación de la solución continua, siempre que el muestreo espacial sea mucho menor que la longitud de onda. Cuando la longitud de onda está en el orden del muestreo espacial, las soluciones discretas no coinciden con las soluciones continuas. Por lo tanto, si  $f_{max}$  no se ajusta con cuidado, la dispersión tendrá lugar. Para obtener un dato simulado lo más similar posible a la realidad, los valores de  $f_{max}$  deben ser elegido en el rango de los levantamientos sísmicos reales (20Hz - 60Hz).

La manera que sufdmod2 considere los bordes absorbentes es mediante el parámetro de absorción "abs". Si abs=0,1,1,1 significa que el borde superior es libre (no absorbente), tal como sucedería en un levantamiento marino con la interfaz agua/aire. En el siguiente capítulo se explicará con detalle los parámetros utilizados en sufdmod2.

## CAPÍTULO IV

### METODOLOGÍA Y PROCESOS

#### 4.1. Plataforma computacional

##### 4.1.1. Equipos informáticos

Los datos originales de Marmousi2 están distribuidos en una cuadrícula de  $\Delta x = \Delta z = 1,25$  m. En el experimento se utilizó la cuadrícula original y una segunda con nuevos intervalos  $\Delta x = \Delta z = 12,5$  m. El modelado se ejecutó en dos diferentes equipos cuyas características principales están detalladas en la siguiente tabla:

**Tabla 3:** Especificaciones de los equipos de computación utilizados

<b>Característica</b>	<b>Cuadrícula <math>\Delta x = \Delta z = 1,25</math> m</b>	<b>Cuadrícula <math>\Delta x = \Delta z = 12,5</math> m</b>
Tipo	Escritorio	Portátil
Marca	Dell	VIT
Modelo	D01U	P2412
Procesador	Intel® Core i5-2390T	Intel® Core i3-4000M
Reloj	2.7 GHz	2.40 GHz
Cache	3 MB Intel® Smart Cache	3 MB Intel® Smart Cache
Cantidad de núcleos	2	2
Cantidad de procesos	4	4
Arquitectura	64 bits	64 bits
Orden bytes	Little Endian	Little Endian
Procesador gráfico	HD Intel® 2000	Intel® HD Graphics 4600
Memoria RAM	8 GB	2 GB (DDR3)
Disco duro	1T GB	500 GB SATA
Pantalla		LED 14WXGA (1366x768)
Monitor	SAMSUNG® 943SNXPLUS	SAMSUNG® de 25,5"

##### 4.1.2. Sistema Operativo

El sistema operativo usado es Zorin OS Lite 15.3 de 64 bits para la portátil VIT, que es ideal para computadoras con bajos recursos. El equipo Dell tiene instalado la versión Zorin 15.3 Education de 64 bits.

Zorin OS es una distribución del sistema operativo GNU/Linux, hecho en Irlanda, basado en Ubuntu, orientada principalmente a usuarios novatos en GNU/Linux, y a su vez familiarizados con el sistema operativo Windows.

Antes de incorporar la portatil VIT y PC Dell al proyecto se hicieron pruebas con sufdmod2 en las siguientes plataformas:

- Ubuntu 16.04 en Windows 10 en el “Windows Subsystem for Linux 1” y Xming.
- Zorin OS Lite 32 bits, instalado en VirtualBox y Windows 10 como sistema anfitrión.

Los resultados preliminares comprobaron que estos dos ambientes son compatibles con Seismic Un\*x.

#### **4.1.3. Programas adicionales**

En el trabajo, además de Zorin OS (Lite y Education) y Seismic Un\*x, algunas figuras fueron retocadas con Gimp y Microsoft PowerPoint.

#### **4.2. Ubicación y descarga de los datos de Marmousi2**

Los datos están disponibles libremente en el sitio Wiki de la SEG (*Society of Exploration Geophysicists*), en la dirección: [https://wiki.seg.org/wiki/AGL\\_Elastic\\_Marmousi](https://wiki.seg.org/wiki/AGL_Elastic_Marmousi). Al final del artículo se encuentra la dirección de descarga: [https://s3.amazonaws.com/open.source.geoscience/open\\_data/elastic-marmousi/elastic-marmousi-model.tar.gz](https://s3.amazonaws.com/open.source.geoscience/open_data/elastic-marmousi/elastic-marmousi-model.tar.gz)

En el navegador, haciendo clic sobre la dirección iniciará la descarga del archivo: [elastic-marmousi-model.tar.gz](https://s3.amazonaws.com/open.source.geoscience/open_data/elastic-marmousi/elastic-marmousi-model.tar.gz)

El archivo tiene un tamaño de 146 MB y está en el formato .tar.gz muy utilizado por los usuarios de GNU/Linux. El modelo tiene licencia “Creative Commons Attribution 4.0 International License”. Para ver una copia de la licencia, visitar <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

#### **4.3. Descompresión del archivo descargado**

Abrir una ventana terminal en el directorio donde se encuentra el archivo *elastic-marmousi-model.tar.gz*, en escribir el comando:

```
time tar -xzyf elastic-marmousi-model.tar.gz
```

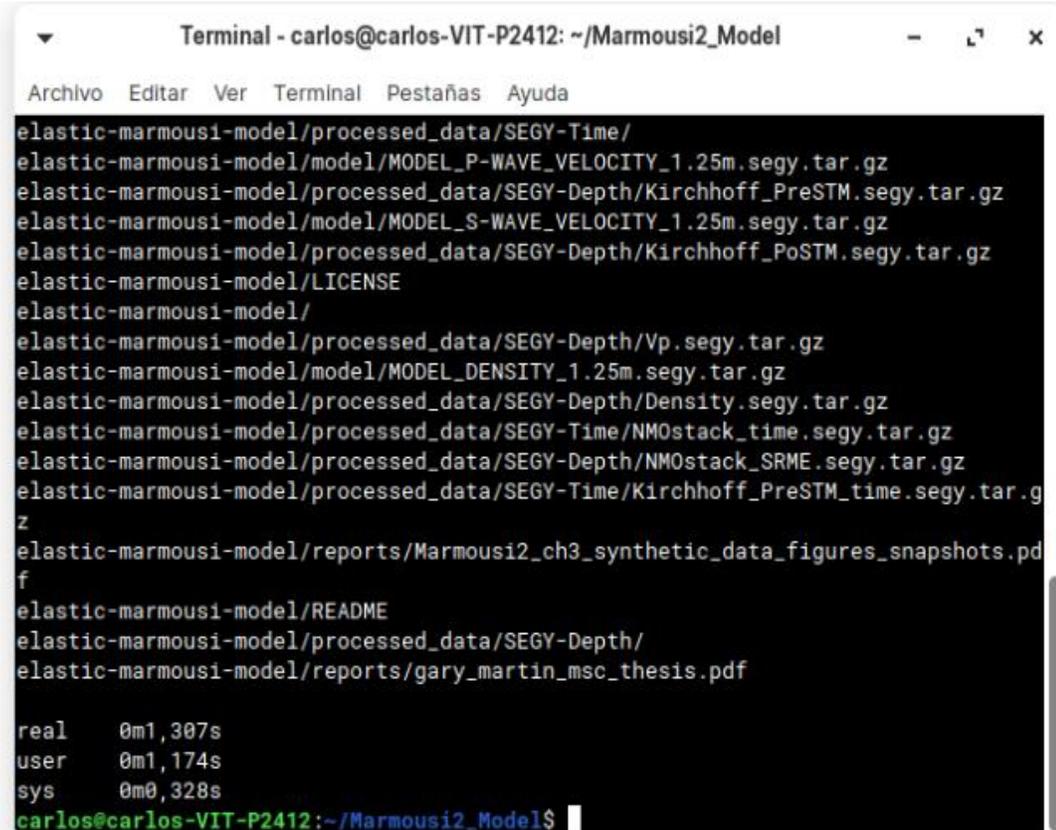
`time` es un comando GNU/Linux que se utiliza para determinar la duración de ejecución de un comando, en este caso del programa `tar`.

La instrucción `tar -xzyf elastic-marmousi-model.tar.gz`, es otra función de GNU/Linux que descomprimirá el archivo `.tar.gz`.

En la pantalla aparecen la lista de directorios y archivos que se están descomprimiendo y al final `time` presenta tres líneas con los tiempos medidos (Figura 14) los cuales son: `real` (tiempo real o tiempo de ejecución total), `user` (tiempo de usuario), `sys` (tiempo del sistema).

#### 4.4. Resultados de la descompresión

Luego de la descompresión se crea la carpeta `elastic-marmousi-model`, que a su vez contiene los archivos y subcarpetas descritas en la tabla 4.



```
Terminal - carlos@carlos-VIT-P2412: ~/Marmousi2_Model
Archivo Editar Ver Terminal Pestañas Ayuda
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Time/
elastic-marmousi-model/model/MODEL_P-WAVE_VELOCITY_1.25m.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Depth/Kirchhoff_PreSTM.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/model/MODEL_S-WAVE_VELOCITY_1.25m.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Depth/Kirchhoff_PoSTM.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/LICENSE
elastic-marmousi-model/
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Depth/Vp.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/model/MODEL_DENSITY_1.25m.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Depth/Density.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Time/NM0stack_time.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Depth/NM0stack_SRME.segy.tar.gz
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Time/Kirchhoff_PreSTM_time.segy.tar.gz
z
elastic-marmousi-model/reports/Marmousi2_ch3_synthetic_data_figures_snapshots.pdf
f
elastic-marmousi-model/README
elastic-marmousi-model/processed_data/SEGY-Depth/
elastic-marmousi-model/reports/gary_martin_msc_thesis.pdf

real    0m1,307s
user    0m1,174s
sys     0m0,328s
carlos@carlos-VIT-P2412:~/Marmousi2_Model$
```

Figura 14. Descompresión del archivo `elastic-marmousi-model.tar.gz` y tiempos obtenidos con el comando `time`.

**Tabla 4. Listado del contenido de la carpeta elastic-marmousi-model**

<b>Nombre</b>	<b>Contenido</b>
LICENSE (archivo de texto)	Descripción de la licencia “ <i>Creative Commons</i> ”
README (archivo de texto)	Información importante de lectura obligatoria
model (subdirectorio)	Datos del modelo Marmousi2
processed_data (subdirectorio)	Resultados obtenidos por Martin (2004)
reports (subdirectorio)	Documentos de la investigación doctoral de Martin (2004)

#### **4.5. Preparación de los datos para el modelado**

Los valores de las densidades y velocidades están en formato SEG-Y que es un formato estándar de la Sociedad de Exploración Geofísica (SEG) para almacenar datos sísmicos. Para el modelado es necesario convertir estos datos SEG-Y al formato binario de una cuadrícula regular. Los pasos para esta conversión son:

1. Crear la carpeta de trabajo Marmousi2\_Model.
2. Seleccionar en la carpeta model los archivos comprimidos:
  - MODEL\_DENSITY\_1.25m.segy.tar.gz
  - MODEL\_P-WAVE\_VELOCITY\_1.25m.segy.tar.gz
3. Copiar los archivos seleccionados en la carpeta Marmousi2\_Model
4. Abrir una ventana terminal dentro la carpeta Marmousi2\_Model.
5. En la ventana terminal ejecutar lo siguiente comandos:
  - `time tar -xzvf MODEL_DENSITY_1.25m.segy.tar.gz`
  - `time tar -xzvf MODEL_P-WAVE_VELOCITY_1.25m.segy.tar.gz`
6. Las dos instrucciones anteriores dan como resultado los archivos SEG-Y:
  - MODEL\_DENSITY\_1.25m.segy
  - MODEL\_P-WAVE\_VELOCITY\_1.25m.segy
7. Este paso consiste en convertir el formato SEG-Y al formato interno SU mediante la ejecución del programa segyread:
  - `time segyread tape=MODEL_DENSITY_1.25m.segy >m2-densidad-1.25m.su`
  - `time segyread tape=MODEL_P-WAVE_VELOCITY_1.25m.segy >m2-velocidadP-1.25m.su`

8. El último paso de la conversión consiste en obtener la malla uniformemente distribuida mediante las siguientes instrucciones:

- `time sustrip<m2-densidad-1.25m.su>m2-densidad-1.25m.bin`
- `time sustrip<m2-velocidadP-1.25m.su >m2-velocidadP-1.25m.bin`

Los archivos finales `m2-densidad-1.25m.bin` y `m2-velocidadP-1.25m.bin` son los datos acústicos representados por mallado a intervalos de 1,25 m en profundidad (z) y 1,25 m (x) en distancia horizontal, en formato binario.

#### 4.6. Graficación

Para visualizar el modelo de densidad y velocidad se ejecuta el script graficar Modelo.sh (Anexo A), mediante la instrucción `sh graficarModelo.sh`. La figura 15 y 16, representan la distribución de densidades y velocidades P respectivamente con un mallado 1,25 x 1,25 m.

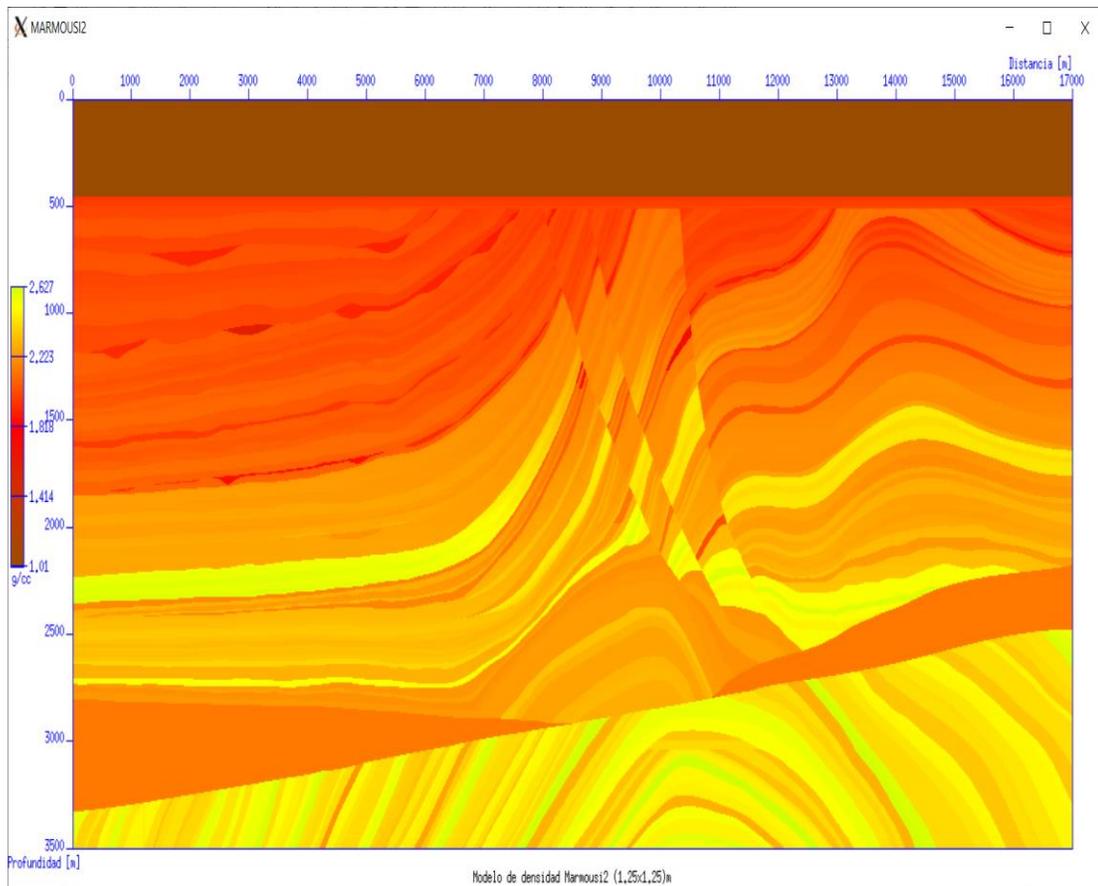


Figura 15. Gráfico de las densidades en el modelo Marmousi2

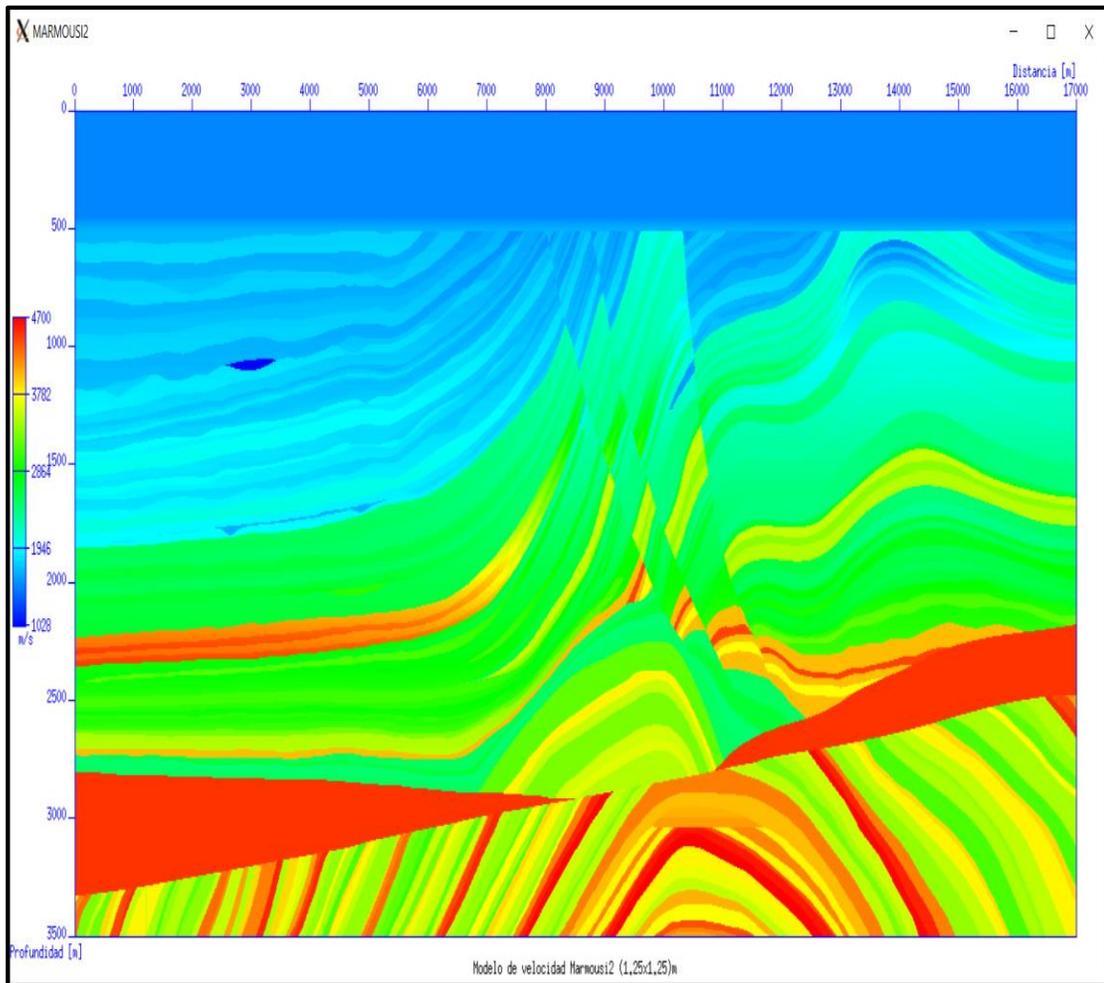
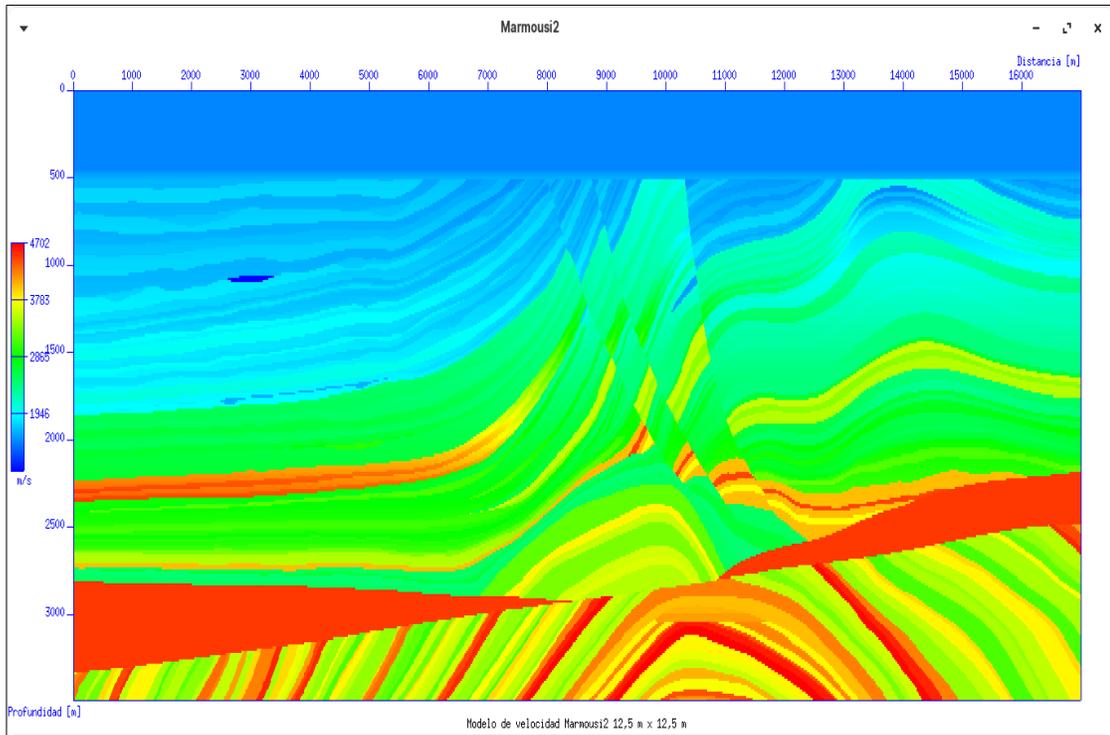


Figura 16. Gráfico de las velocidades P del modelo Marmousi2

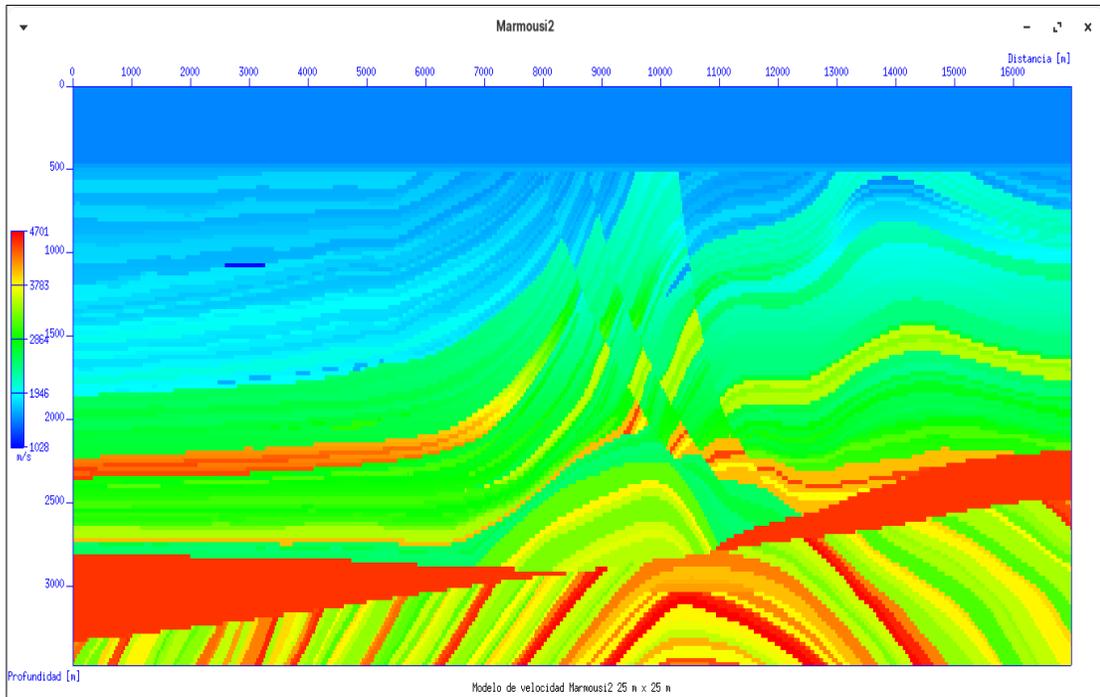
Una inspección visual comprobó comparativamente que los modelos son iguales a los publicados por Martin (2004).

#### 4.7. Remuestreo de los modelos de densidades y velocidades P

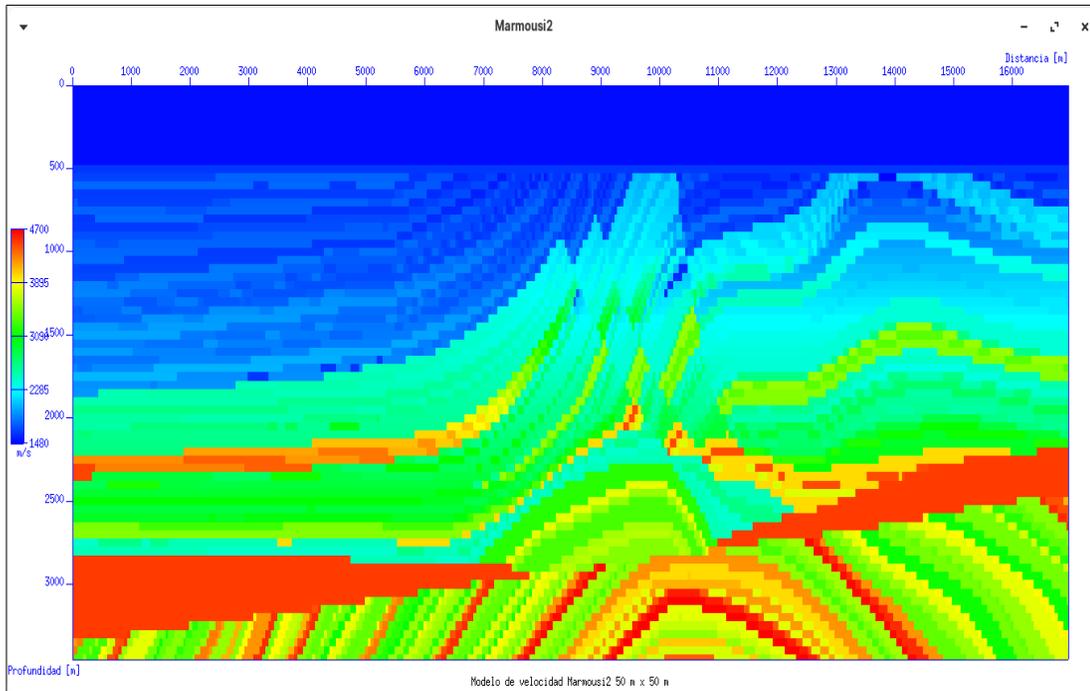
El intervalo de la cuadrícula original es de 1,25 m x 1,25 m. El programa `sufdmod2` considera este valor como la distancia entre los receptores. En las pruebas para obtener resultados más reales se remuestrearon a distancias de 12.5x12.5 m, 25x25 m y 50x50 m. Las nuevas mallas se obtienen ejecutando el script `remuestrear.sh` (Anexo B) Ejecutando el script `graficarModelos.sh`, se obtienen las figuras 17, 18, 19. Nótese el efecto de “pixelado” a medida que aumentan los intervalos.



**Figura 17. Modelo de las velocidades P: intervalo 12.5x12.5 m**



**Figura 18. Modelo de las velocidades P: intervalo 25x25 m**



**Figura 19. Modelo de velocidades P: intervalo 50x50 m**

#### **4.8. Modelado sísmico con Seismic Un\*x: *sufdmod2***

El programa *sufdmod2* calcula la respuesta sísmica del modelo Marmousi2 mediante el método tradicional diferenciación explícita de segundo orden.

El programa calcula cuatro resultados dada una ubicación de la fuente y el número de receptores:

- Animación de la propagación del frente de ondas
- Respuesta de los detectores a la propagación (registro de disparo)
- Perfil sísmico vertical.
- La firma de la fuente

**Sufdmod2** simula la propagación de ondas acústicas en modelos de velocidades mediante el desarrollo de series de Taylor de segundo orden calculando soluciones numéricas a la ecuación de onda en un modelo espaciado uniformemente. Lara (2002), explica que se trata de un arreglo bidimensional que contiene los valores densidad y velocidad de onda P para cada punto de malla donde se desarrollan las diferencias finitas. Vieira (2007), resume y define los parámetros que usa la rutina de *sufdmod2* que se explican a continuación:

- **Sintaxis:**  
`sufdmod2 < infile nx= nz= tmax= xs= zs= [parámetros opcionales dfile= hsfile=] > outfile`
- **Archivo de entrada (infile):** es el nombre del archivo binario que contiene la malla uniforme de valores de velocidad (vfile [nx][nz]). La densidad es opcional y se introduce igualando el parámetro **dfile=** con el nombre del archivo binario correspondiente (dfile [nx][nz]).
- **Parámetros:**  
 nz= número de muestras en z (primera dimensión)  
 dz=1.0: intervalo de muestreo en z  
 nx= número de muestras en x (segunda dimensión)  
 dx=1.0: intervalo de muestreo en x (intervalo entre los receptores gx)  
 fx=0.0: primera muestra en x  
 fz=0.0: primera muestra en z  
 nt=1+tmax/dt: número de muestras temporales (dt es determinado para que la condición de estabilidad del modelo se cumpla)  
 mt=1: número de pasos de tiempo (dt) por paso de tiempo de salida. Define el intervalo de tiempo en que resuelve la ecuación de onda.
- **Parámetros relacionados con la fuente:**  
 zs=: ubicación z de la fuente  
 xs=: ubicación x de la fuente
- **Parámetros relacionados con los receptores:**  
 hsz=: coordenada z de la línea horizontal del sismograma (profundidad de los receptores)  
 vsx=: coordenada z de la línea vertical del sismograma  
 tmax=: tiempo máximo para el modelado de la propagación. Corresponde con el mayor tiempo en el que será resuelta la ecuación de propagación de ondas acústicas. En términos de adquisición, el tiempo máximo de grabación
- **Parámetros de la fuente:**  
 sstrength=1.0: nivel de energía de la fuente  
 pw=0: fuente puntual

pw=1: utiliza como fuente ondas planas horizontales

mono=0: utiliza como fuente una ondícula Ricker

mono=1 utiliza como fuente un solo valor de frecuencia. Valor por defecto (2\*fpeak)

fmax=vmin/(10.0\*h): frecuencia máxima de la ondícula (Hz)

fpeak=0.5\*fmax: frecuencia pico de la ondícula (Hz)

- **Otros parámetros:**

abs=1,1,1,1: absorción en los bordes del modelo; tope superior, izquierda, tope inferior, derecha

=0,1,1,1: para condición de superficie libre en el borde superior del modelo (i.e. agua/aire)

- **Archivo de salida (outfile):** archivo con formato “su” que contiene la caracterización de las ondas acústicas desde el tiempo cero hasta “tmax” con incremento “mt”.

El archivo de salida (outfile) de *sufdmod2* será visualizado mediante una película que muestra la posición de las ondas acústicas para todos los instantes de tiempo. Para esto, se utiliza el comando *suxmovie*, que despliega la película en la pantalla o el comando *supsmovie*, que genera un archivo que contiene las imágenes que conforman la película en formato PostScript.

- **Archivo de salida opcionales:**

vsfile= nombre del archivo de salida para el perfil sísmico vertical.

hsfile= nombre del archivo de salida del registro de disparo (“shot gather”)

ssfile= nombre del archivo de salida para la fuente puntual

Visualizar los primeros dos archivos mediante los programas *suximage* (en la pantalla) o *supsimimage* para obtener un archivo PostScript. La fuente se visualiza con *suxwigb* o *supswigb*.

#### 4.9. Generación de los datos sintéticos

Para analizar el comportamiento y resultados de *sufdmod2* se programaron nueve pruebas simulando diferentes situaciones de adquisición. Los modelos de entrada fueron los datos originales de 1,25 m x 1,25 m y el mallado de 12,5 m x 12,5 m. El

programa utiliza como intervalo de receptores la distancia X que corresponde a cada mallado distribuidos a lo largo de todo el modelo para un total de 13601 trazas en el modelado de 1,25 m y 1360 trazas en el modelado de 12,5 m, esto es para cada disparo con geometría de tendido dividido (“*split spread*”). En todas las pruebas la fuente fue una ondícula Ricker de frecuencia pico de 40 Hz y máxima de 80 Hz ubicada en la posición 7100 m ( $x_s=7100$ ). Los códigos utilizados, están en el anexo C para el modelo 12.5 x 12,5 m; y anexo D para el modelo de 1,25 x 1,25 m. Los parámetros principales y resultados de las pruebas están resumidos en la tabla 5. A excepción de la prueba 02 en todas las demás la fuente fue Ricker puntual.

**Tabla 5: Resumen del modelado cuadrícula 1,25m y 12,5 m**

Número de prueba	Profundidad fuente (m)	Profundidad receptores (m)	Fuente tipo	Superficie	Genera ondícula (1,25 m)	Genera ondícula (12,5 m)	Genera disparo (1,25 m)	Genera disparo (12,5 m)	Genera VSP (1,25 m)	Genera VSP (12,5 m)	Genera película (1,25 m)	Genera fotograma (12,5 m)
1	0	0	Puntual	Absorbente	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
2	0	0	Planas	Absorbente	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
3	0	0	Puntual	Libre	No	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí
4	5	5	Puntual	Libre	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
5	5	7	Puntual	Libre	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
6	10	5	Puntual	Libre	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
7	10	5	Puntual	Absorbente	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
8	5	10	Puntual	Libre	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
9	10	450	Puntual	Libre	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

#### 4.10. Resultados

En las 18 pruebas *sufdmod2* calculó los VSP y los fotogramas para la animación de la expansión de la onda. En la prueba 02 se utilizó como fuente ondas planas horizontales en vez de fuente puntual. Para los demás escenarios, el modelo original computó todas las salidas, pero en el caso del modelo de 12,5 m, en algunos casos, el modelado no calculó disparo u ondícula fuente. A continuación se presentan las salidas gráficas obtenidas y su descripción según el tipo de salida gráfica dada por el programa de modelado.

#### 4.10.1 Ondícula fuente

La variable *mono* de *sufdmod2* define cual fuente sísmica se utilizará en el modelado. Si *mono*=1 la fuente es de una sola frecuencia. Cuando *mono*=0 la fuente es una ondícula Ricker. La ondícula de Ricker se utiliza a menudo en modelado y cómputo de sismogramas sintéticos (Figura 20). Nombrado por Norman H. Ricker (1896–1980), geofísico estadounidense. La ondícula de fase cero, es la segunda derivada de la función gaussiana o la tercera derivada de la función de densidad de probabilidad normal. La frecuencia  $f_M$  es la frecuencia pico de la ondícula (Sheriff, 2002).

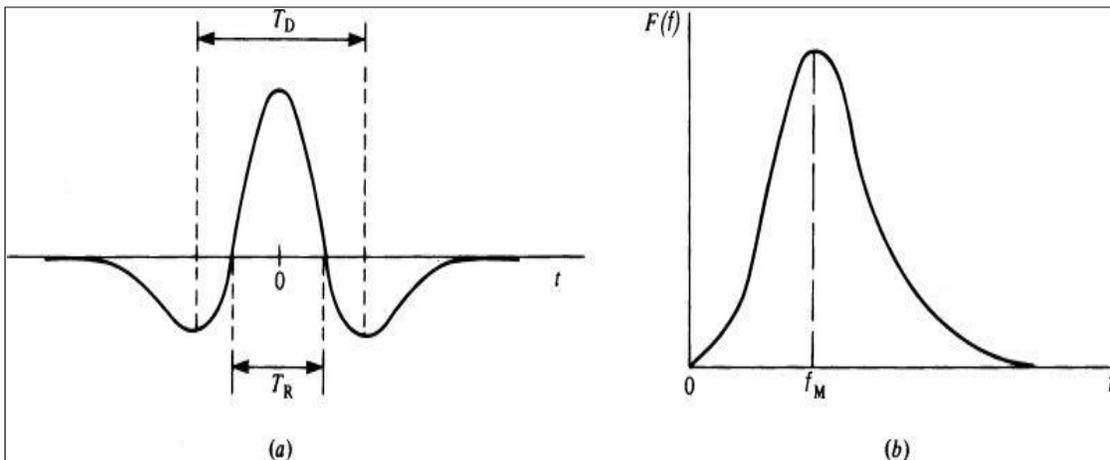


Figura 20: Ondícula de Ricker. (a) Representaciones en el dominio del tiempo y (b) en el dominio de la frecuencia,  $f_M$  es la frecuencia pico (Sheriff 2002, descargado desde [wik.seg.org](http://wik.seg.org))

La ondícula de Ricker utilizada en todas las pruebas fue: frecuencia pico de 40 Hz y frecuencia máxima de 80 Hz.

#### 4.10.2 Efecto de la dispersión

El programa *sufdmod2* calcula una traza sísmica en cada posición vertical de la cuadrícula de los modelos obteniendo un total de 13601 trazas en el modelado de  $\Delta x = \Delta y = 1,25$  m. Este intervalo difícilmente se emplearía en una situación real de adquisición. Lo ideal es que sobre el modelo original *Marmousi2* se calcule la traza sísmica a un intervalo más práctico como por ejemplo 12,5 m. Dado que *sufdmod2* no posee esta flexibilidad la única manera es incrementar los intervalos mediante un remuestreo. El efecto en el cambio del espaciamiento se hace evidente cuando la onda aún está viajando en el agua. Las figuras 21, 22 y 23 ilustran los resultados de este cambio.

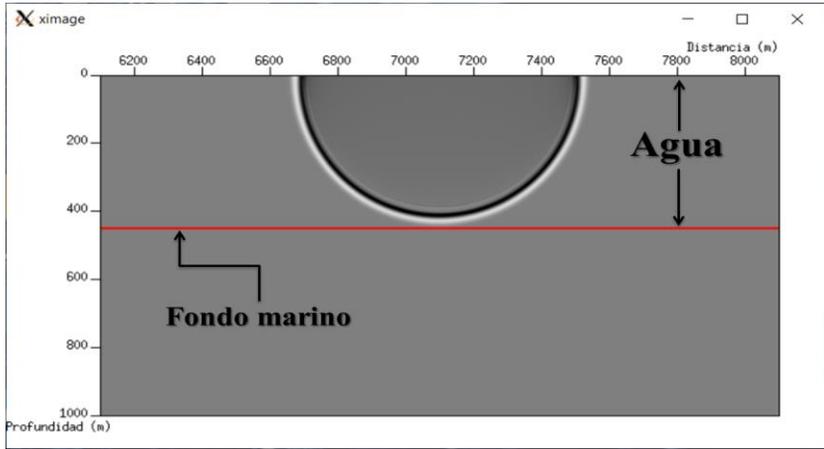


Figura 21: Malla 1,25 m, tiempo aproximado del fotograma 300 ms

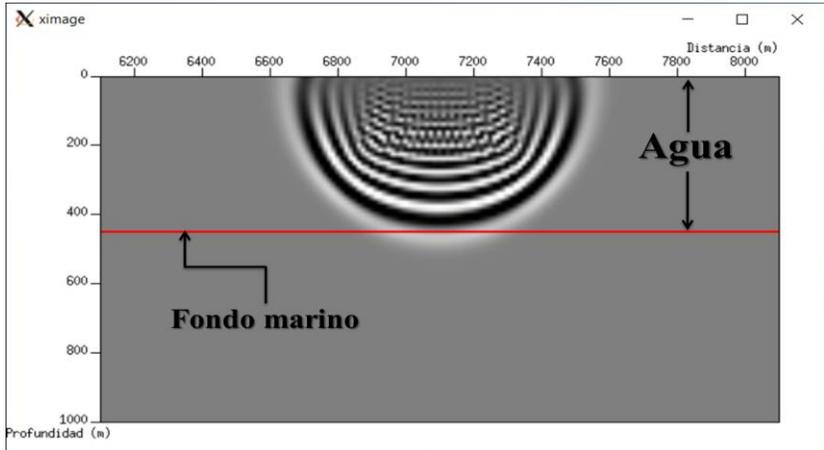


Figura 22: Malla 12,5 m, tiempo aproximado del fotograma 300 ms

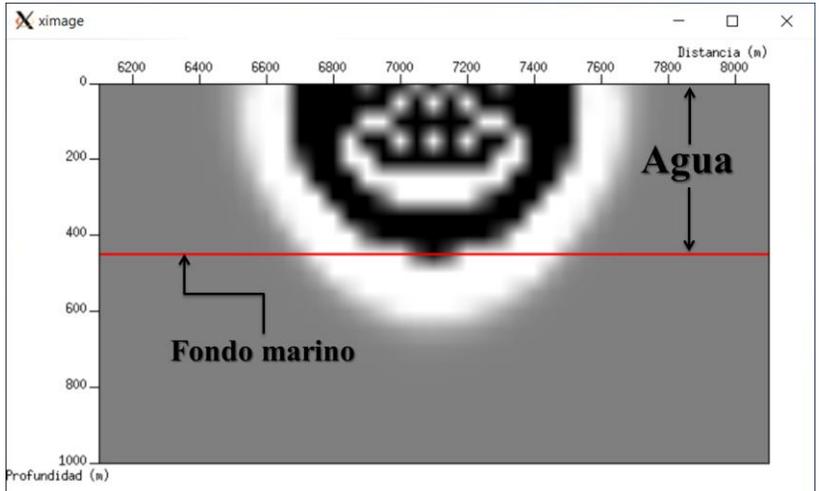


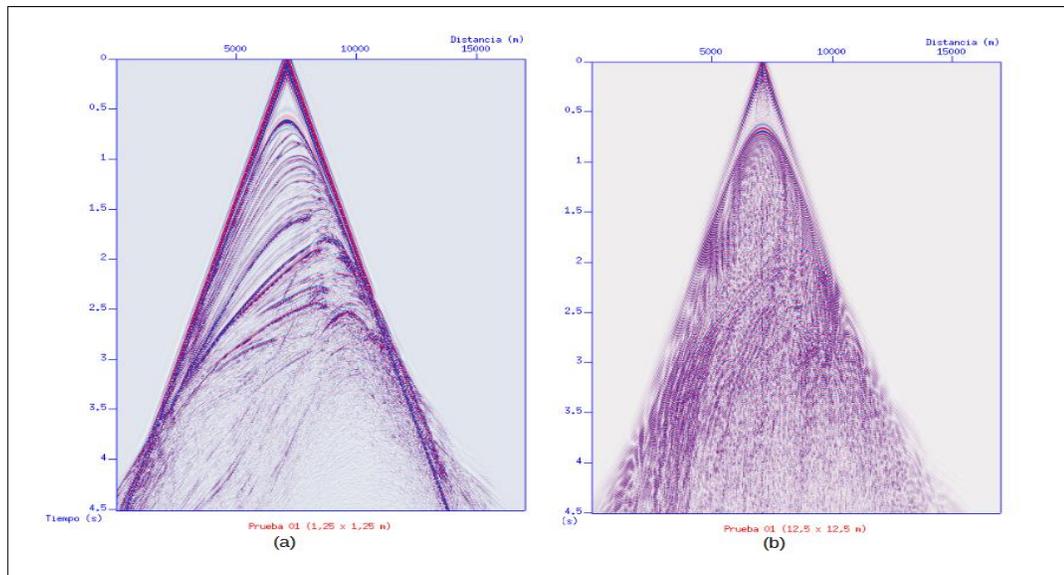
Figura 23: Malla 50 m, tiempo aproximado del fotograma 300 ms

En la figura 21, con los intervalos del modelo original, se nota como el frente de onda viaja en la capa de agua sin interferencias. La figura 22 y 23 que corresponden a mallas de 12,5 m y 50 m aparecen frentes de ondas secundarios, este fenómeno se conoce como dispersión del campo de onda que ocurre cuando aumentamos el intervalo de la malla conservando la misma frecuencia máxima de la fuente. Martin (2004) enfatiza que para un tamaño apropiado de la malla debe aplicarse la siguiente formula:

**Ecuación 12.** 
$$\Delta_{x,z} = \frac{V_{min}}{f_{max} * NLO}$$

Donde  $V_{min}$  es la velocidad mínima en el modelo,  $f_{max}$  es la frecuencia máxima y NLO es el número de muestras por longitud de onda. Martin (2004) aconseja que NLO tenga un valor de 5 para evitar la dispersión. Si  $V_{min} = 1500$  m/s y  $f_{max} = 80$  Hz;  $\Delta x = \Delta y = 3,75$  m. con lo cual los nuevos modelos Marmousi2 creados por Martin (2004) satisfacen ampliamente este criterio.

Los efectos creados por la dispersión son evidentes cuando comparamos los disparos calculados con diferentes intervalos del mallado. La figura 24 nos enseña dos disparos obtenidos con los mismos parámetros de modelado. La diferencia es que la figura 24(a) se obtuvo con el modelo Marmousi2 con el mallado original de 1,25 x 1,25 m. La figura 24(b) es el resultado de tener el mallado de 12,5 x 12,5 m. y es evidente que los efectos de la dispersión son tan severos que enmascaran las reflexiones primarias.



**Figura 24: Comparación de dos disparos sintéticos (a) Modelo original 1,25 x 1,25 m. (b) Modelo con malla 12,5 x 12,5 m**

## **CAPITULO V**

### **RESULTADOS**

#### **5.1. Tiempo de Ejecución**

Tener acceso al recurso computacional estable fue problemático. Para el tratamiento inicial de los datos, i.e. descarga del modelo, descompresión y conversión a formato binario es posible completarlo en máquinas de modesta capacidad. Como la autora de esta investigación disponía únicamente de una portátil VIT-P2412 (tabla 3) con capacidad muy limitada para modelar con el mallado 1,25x1,25 m, el tutor académico, profesor De Lisa Vincenzo, puso a disposición su equipo de escritorio Dell-D01U (tabla 3) para los cálculos intensivos.

- Debido al distanciamiento social a causa de la pandemia COVID-19, la estrategia de trabajo fue:
- Desarrollar y probar los parámetros y script con el modelo de 12,5x12,5 m en la máquina VIT
- Validadas las pruebas anteriores enviar las instrucciones al profesor De Lisa
- Ejecución en la computadora Dell sobre el modelo Marmousi2 de 1,25x1,25 m.
- El tiempo total promedió 4 horas/disparo en el modelo original y 1,3 minutos/disparo en el modelo 12,5x12,5 m.

Cada una de las pruebas calculó:

- Firma de la fuente
- Registro del disparo
- Perfil sísmico vertical
- Instantáneas del frente onda

#### **5.2. Validación de los resultados**

Con la finalidad de comprobar la precisión de los resultados acústicos de `sufdmod2`, las pruebas 06 y 09 reproducen los experimentos publicados en la tesis de Martin (2004) quien utilizó el algoritmo de modelado sísmico E3D del laboratorio nacional Lawrence Livermore y que calcula la respuesta elástica (Ondas P y S). Obviamente se compararon sólo los resultados acústicos (ondas P).

### 5.3. Firma de la fuente

La firma de la fuente u ondícula fuente, es un parámetro importante en el modelado sísmico. Martin (2004) utilizó la ondícula Ormsby 5-10-60-80Hz, figura 25.

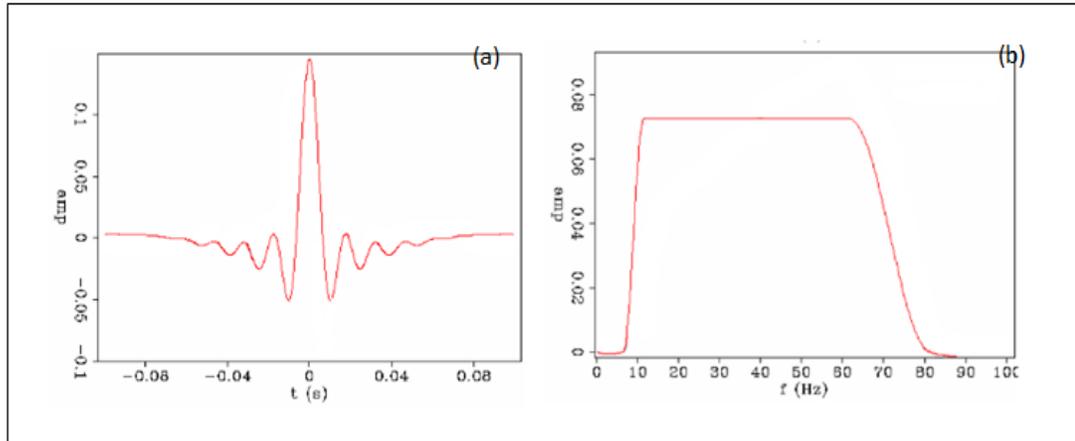


Figura 25: Ondícula fuente Ormsby. (a) en el dominio del tiempo (b) espectro de amplitud. Modificado de Martin (2004)

En `sufdmod2` la única opción es la ondícula Ricker, las figuras 26 (a) y 26 (b) muestran las características en tiempo y frecuencia de esta fuente donde  $f_m=40$  Hz,  $f_{Max}=80$  Hz.

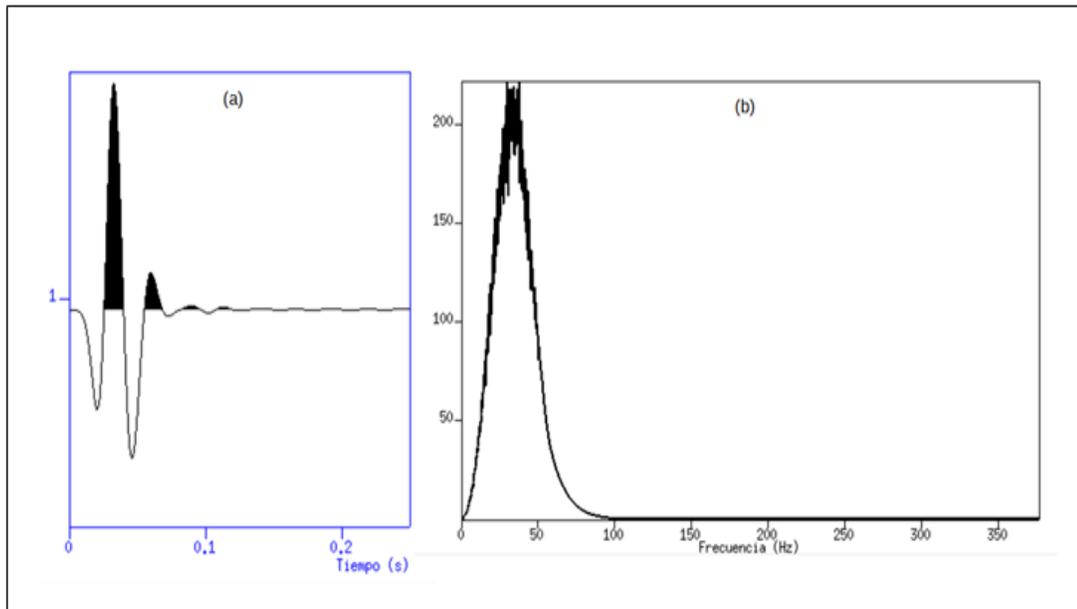


Figura 26: Ejemplo ondícula Ricker generada por `sufdmod2`. (a) En el dominio del tiempo (b) En el dominio de la frecuencia

Dos hechos son importantes al ejecutar `sufdmod2`:

- Genera la ondícula fuente con la misma longitud máxima de tiempo proporcionada por el usuario, 5 s para este caso, figura 27.
- Determina automáticamente el intervalo de muestreo  $\Delta t$  para la estabilidad del esquema mediante la fórmula  $\Delta t = \frac{h}{2 * V_{max}}$ ;  $h = \text{valormínimo}(\Delta x, \Delta z)$ ; lo que significa que en el caso de 1,25x1,25 m  $\Delta t=0,000132979$  s y para 12.5x12.5 m  $\Delta t=0,00132929$  s. La figura 28 nos muestra el espectro de amplitud donde la frecuencia máxima es superior a la frecuencia máxima de 80 Hz.

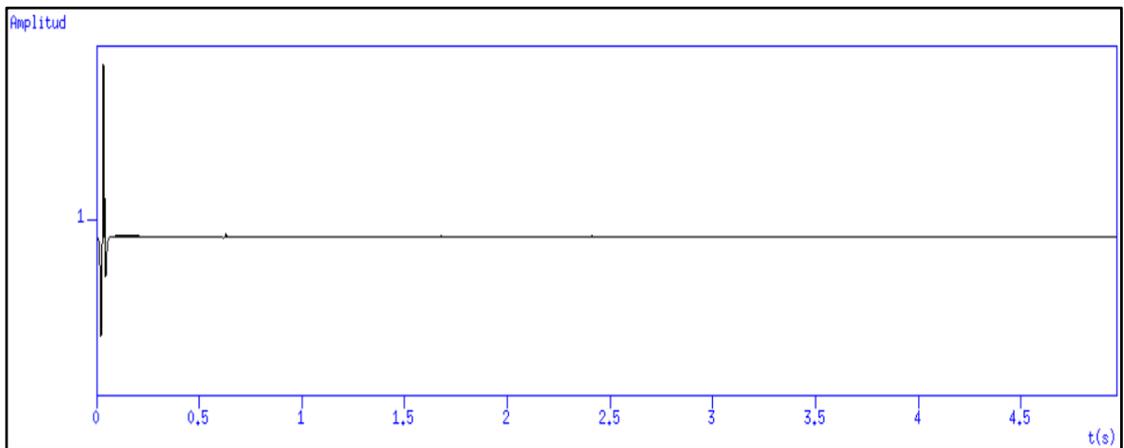


Figura 27: Ondícula Ricker para el modelo 1,25 x 1,25 m, 5 s de longitud en tiempo

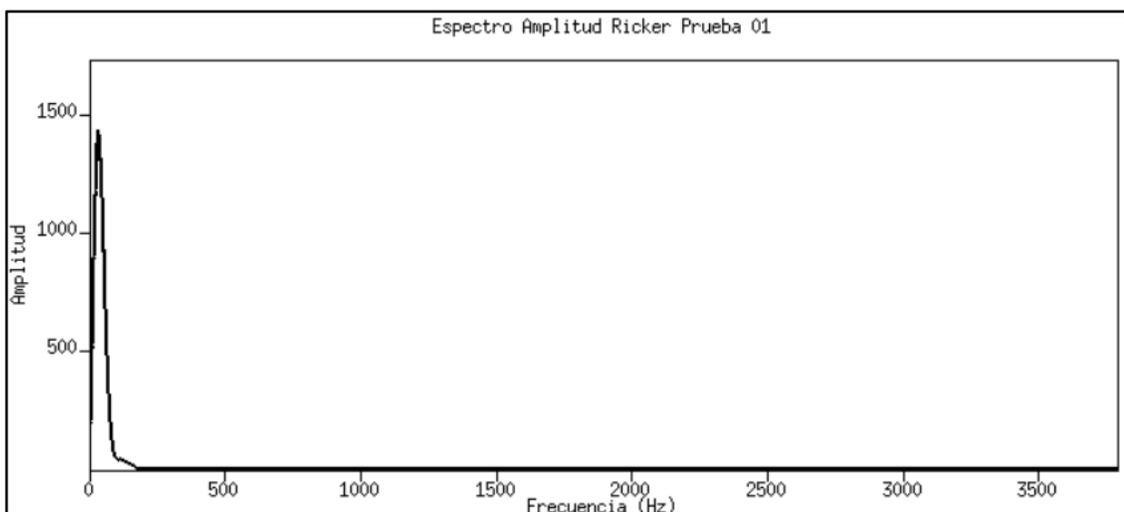


Figura 28: Espectro de amplitud de la ondícula de la figura 27

### 5.3.1 Ondícula Ricker Prueba 01

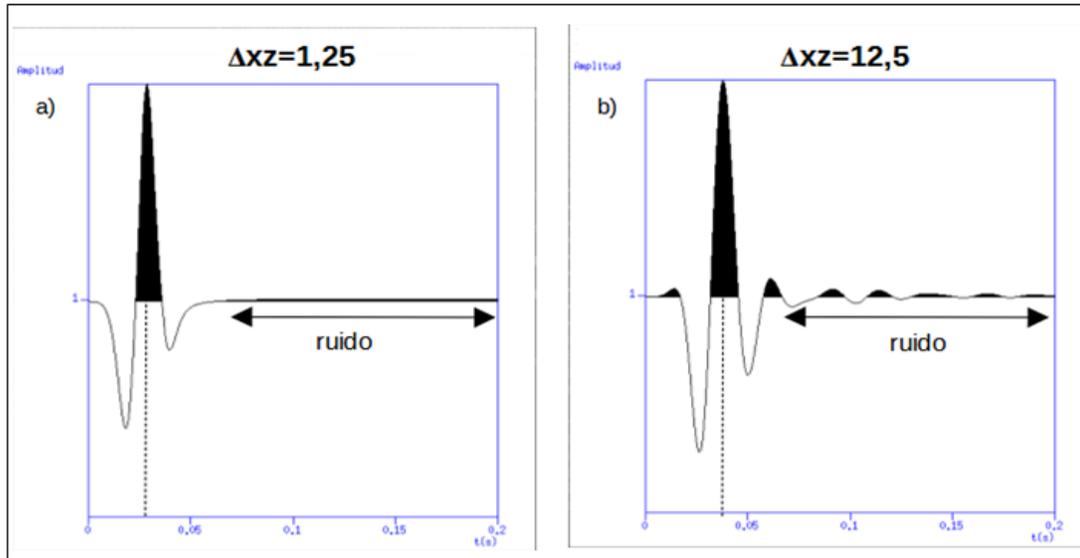


Figura 29: Ondícula Ricker calculada para la prueba 01. (a) Modelo original (b) Modelo remuestreado

En la figura 29 se observa que la ondícula Ricker generada no es simétrica con respecto a un eje de simetría, notándose que a mayores tiempos la presencia de ruido se observa con más fuerza en la figura 29-b) como consecuencia de la distorsión. En ambos casos el ruido se extiende hasta los 5 s.

### 5.3.2 Ondícula Ricker Prueba 02

La prueba 02 no genera ondícula Ricker por usar como fuente ondas planas horizontales.

### 5.3.3 Ondícula Ricker Prueba 03

En la prueba 03 `sufdmod2` no calculó ondícula Ricker en ambos modelos

### 5.3.4 Ondícula Ricker Prueba 04

Para el modelo de 12,5 m, `sufdmod2` no calculó la ondícula fuente. La figura 30 presenta la totalidad de la traza con poco ruido después del pulso principal. La figura 31 exhibe los primeros 100 ms, aquí notamos que la ondícula es más parecida a la Ricker teórica pero es diferente a la de la prueba 01 figura 29-a)-b)

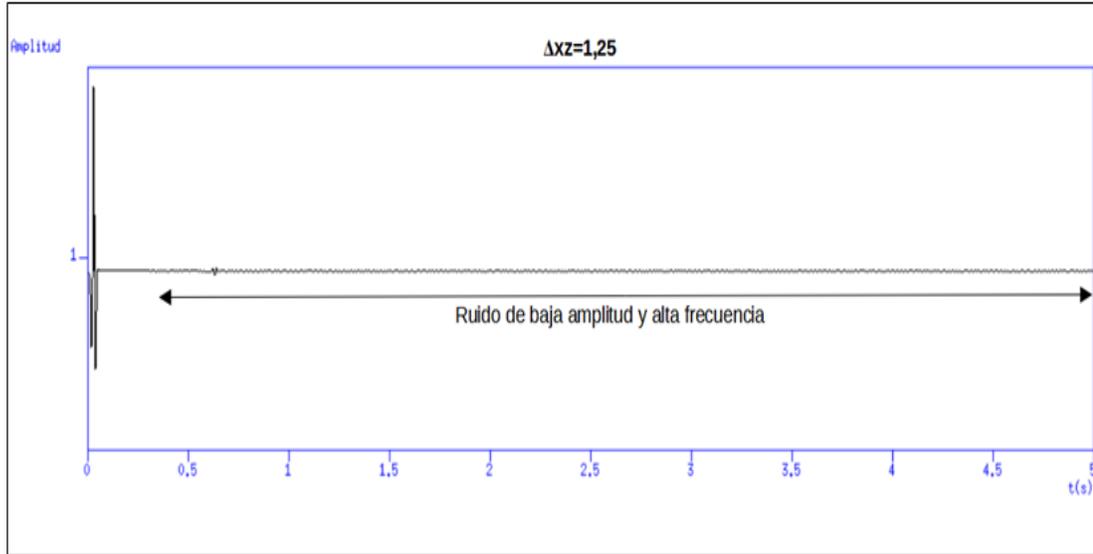


Figura 30: Ondícula Ricker calculada en la prueba 04, el modelo original, longitud 5s

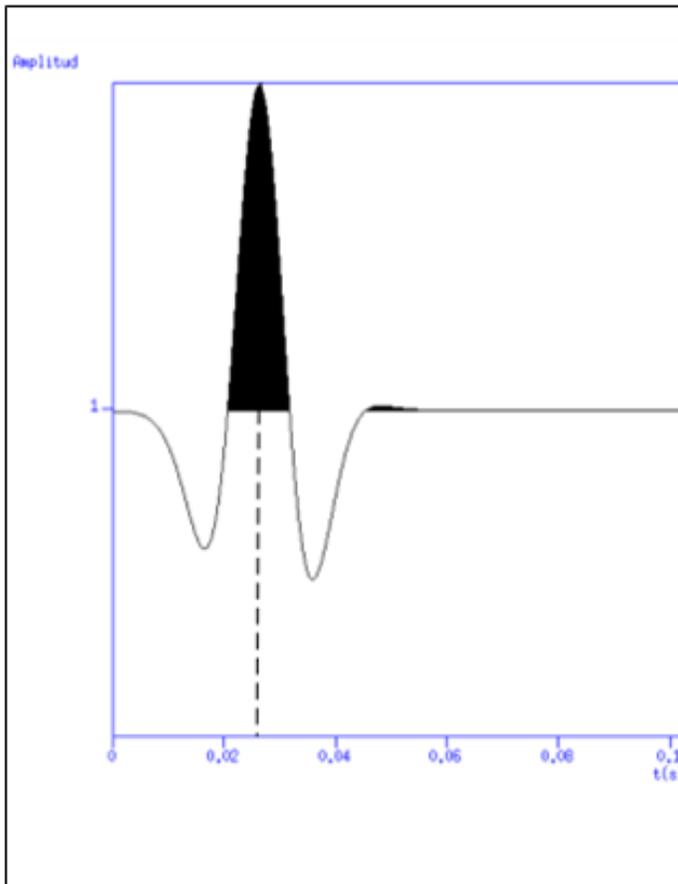


Figura 31: Ondícula fuente prueba 04, primeros 100 ms

### 5.3.5 Ondícula Ricker Prueba 05

Esta prueba los resultados son iguales a la prueba 4 (Figuras 32 y 33)

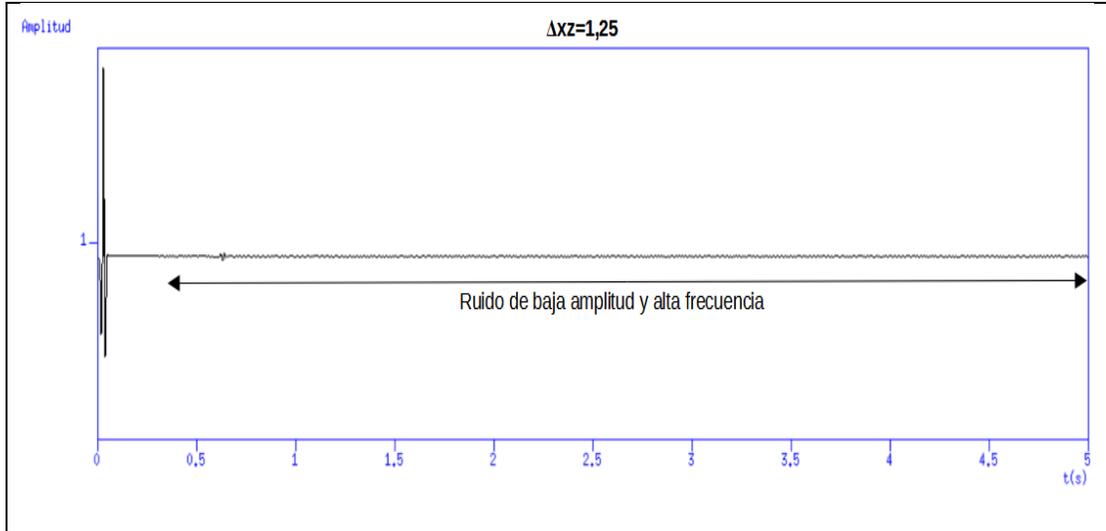


Figura 32: Ondícula Ricker calculada en la prueba 05, modelo original, longitud 5s

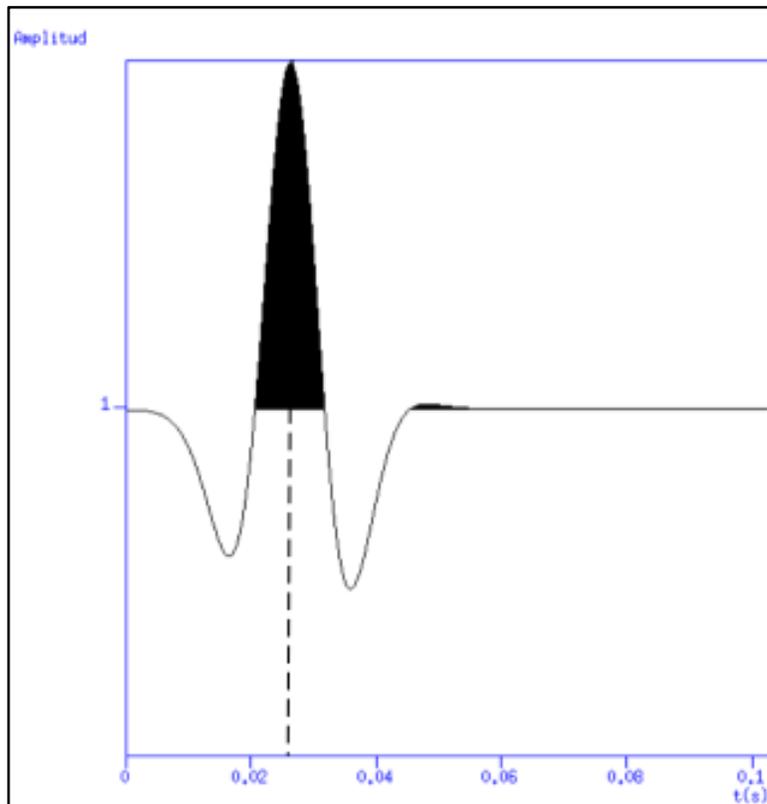


Figura 33: Ondícula fuente prueba 05, primeros 100 ms

### 5.3.6. Ondícula Ricker Prueba 06

En la figura 34 (a) y (b) están las ondículas calculadas en ambos modelos. La figura 34 (a) es similar a la 33 mientras que la figura 34 (b) muestra la influencia causada por la dispersión.

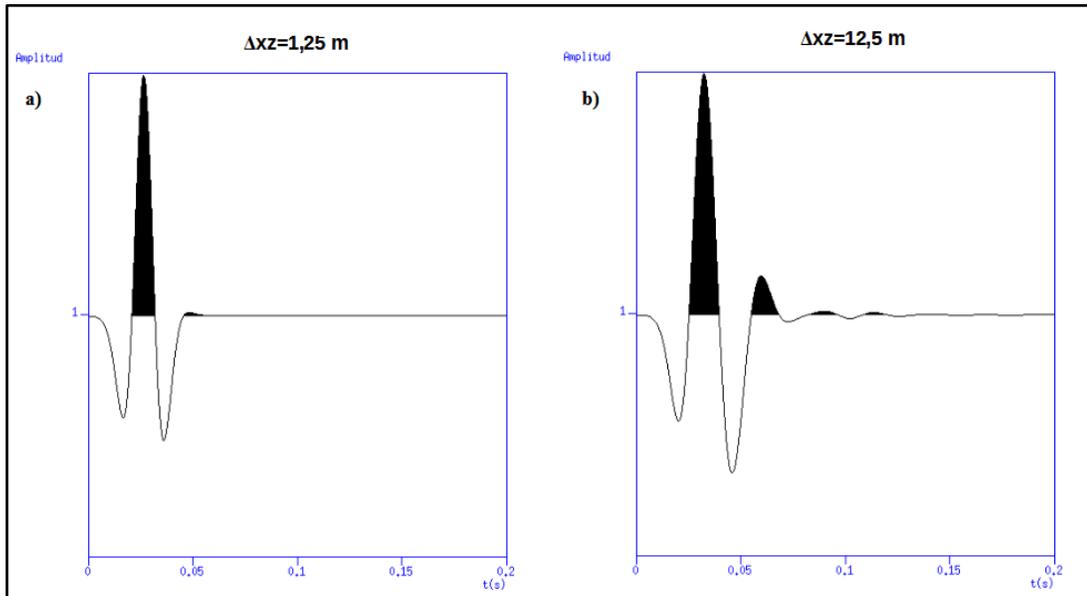


Figura 34: Ondículas Ricker calculadas en la prueba 06

### 5.3.7. Ondícula Ricker Prueba 07-08-09

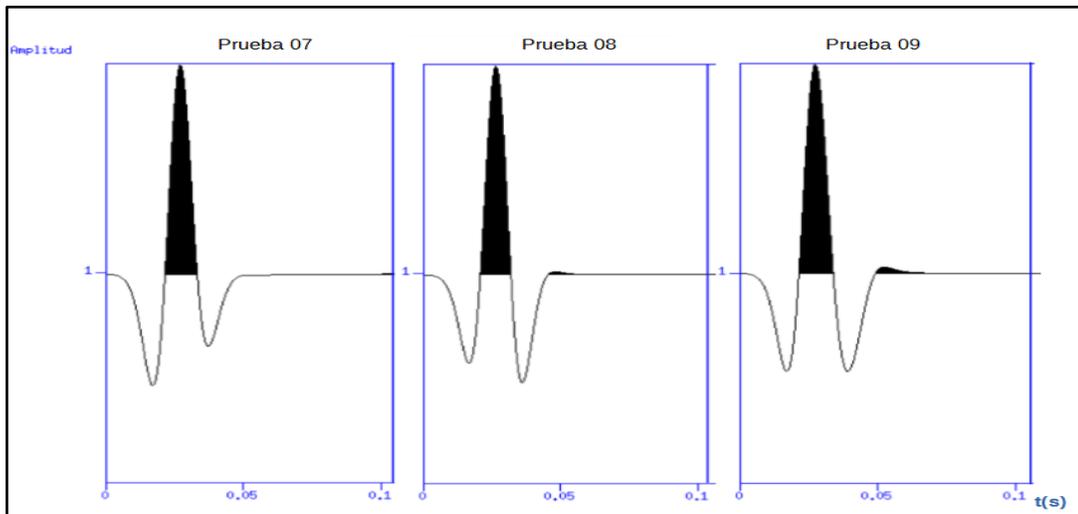


Figura 35: Ondículas calculadas en las pruebas 07, 08, 09 para el modelo de 1,25 m

En la figura 36 encontramos las ondículas Ricker computadas en las pruebas 07, 08,09 con base al modelo Marmousi2 inicial. Aún cuando los parámetros de diseño son los mismos, son visibles ciertas diferencias en las formas de las ondículas. La ondícula de la prueba 09 es la que mejor exhibe una similitud con la ondícula Ricker teórica. La figura 36 muestra las ondículas obtenidas con el segundo modelo cuya malla es más separada. La dispersión sigue siendo evidente y en las pruebas 07 y 09 mientras que en la prueba 08 no hay ondícula.

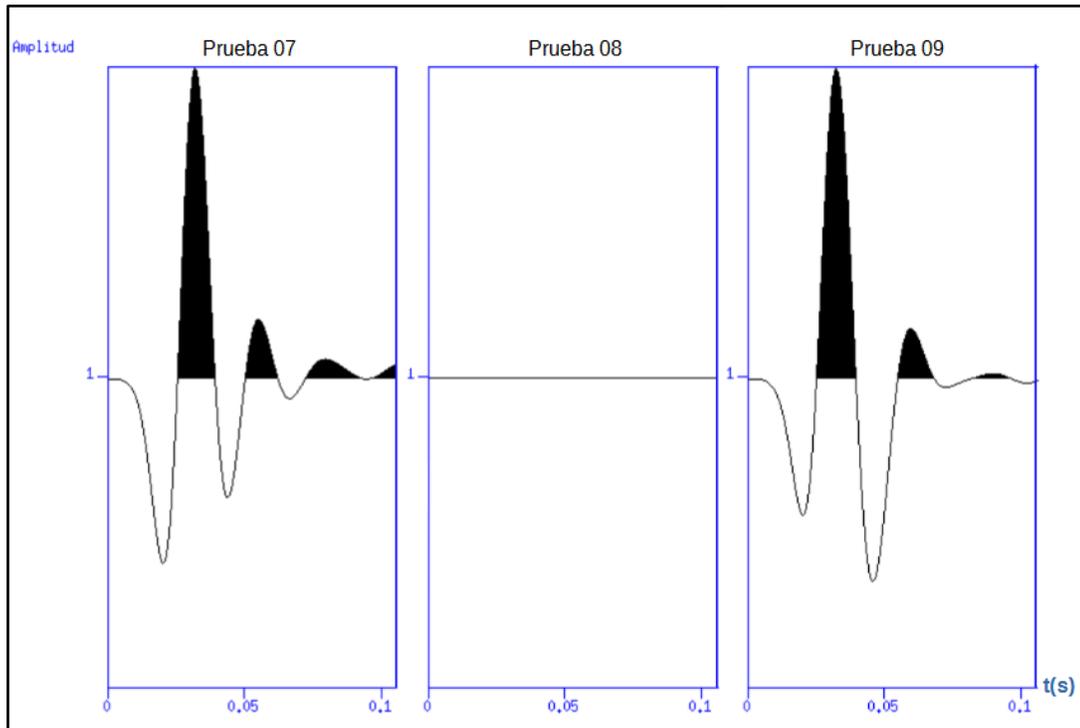
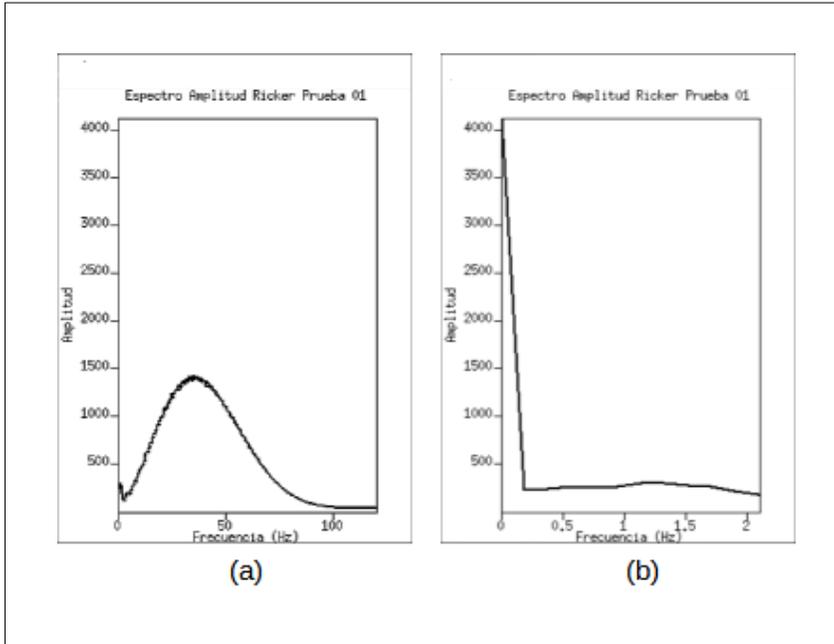


Figura 36: Ondículas calculadas en las pruebas 07, 08, 09 para el modelo de 12,5 m

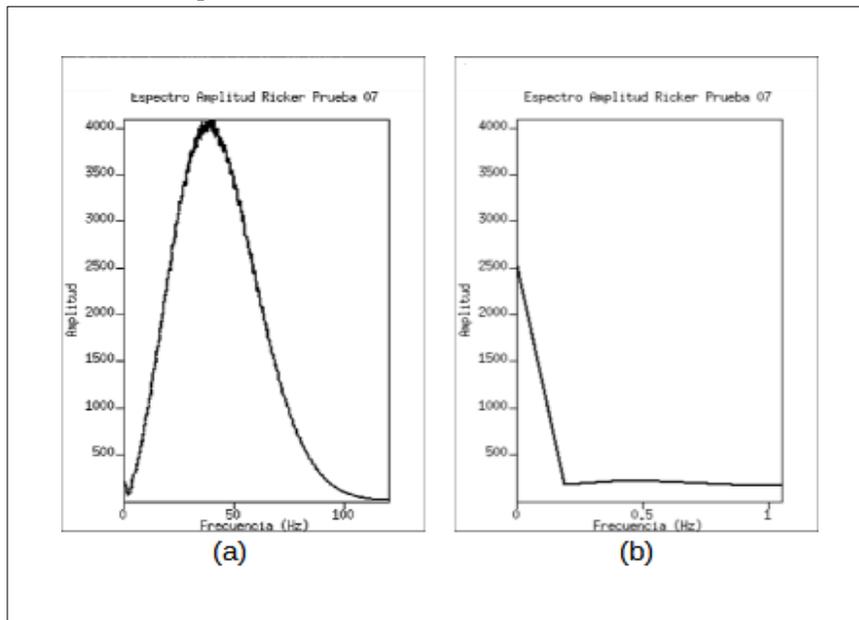
### 5.3.8. Ondícula Ricker: análisis espectral

Completando el estudio de la ondícula fuente vamos a analizarla en el dominio de la frecuencia. Solamente estudiaremos el modelo de 1,25x1,25 m debido a que el segundo modelo está influenciado por la dispersión. En Seismic Un\*x el proceso necesita tres pasos: primero calcular la transformada de Fourier a la ondícula con *sufft*, segundo extraer el espectro de amplitud utilizando *suamp*, tercero graficar con *xgraph* (ver anexo E).

En las pruebas 02 y 03 no hay ondícula fuente. Las pruebas 01 y 07 presentan valores anómalos de amplitud en las frecuencias cero, figuras 37 y 38. En las demás pruebas los resultados son consistentes aun cuando tienen pequeñas diferencias, figura 39.



**Figura 37: (a) espectro de amplitud ondícula Ricker prueba 01  
(b) Ampliación con valor anómalo en 0 Hz**



**Figura 38: (a) espectro de amplitud ondícula Ricker prueba 07  
(b) Ampliación con valor anómalo en 0 Hz**

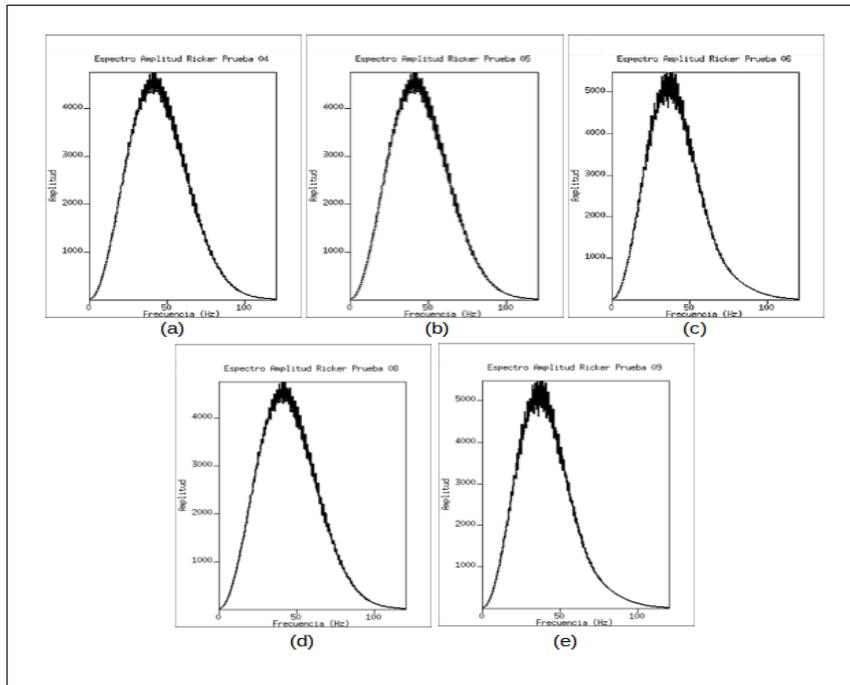


Figura 39: (a) (b) (c) (d) (e) espectro de amplitud ondícula Ricker prueba 04, 05, 06, 08, 09 respectivamente

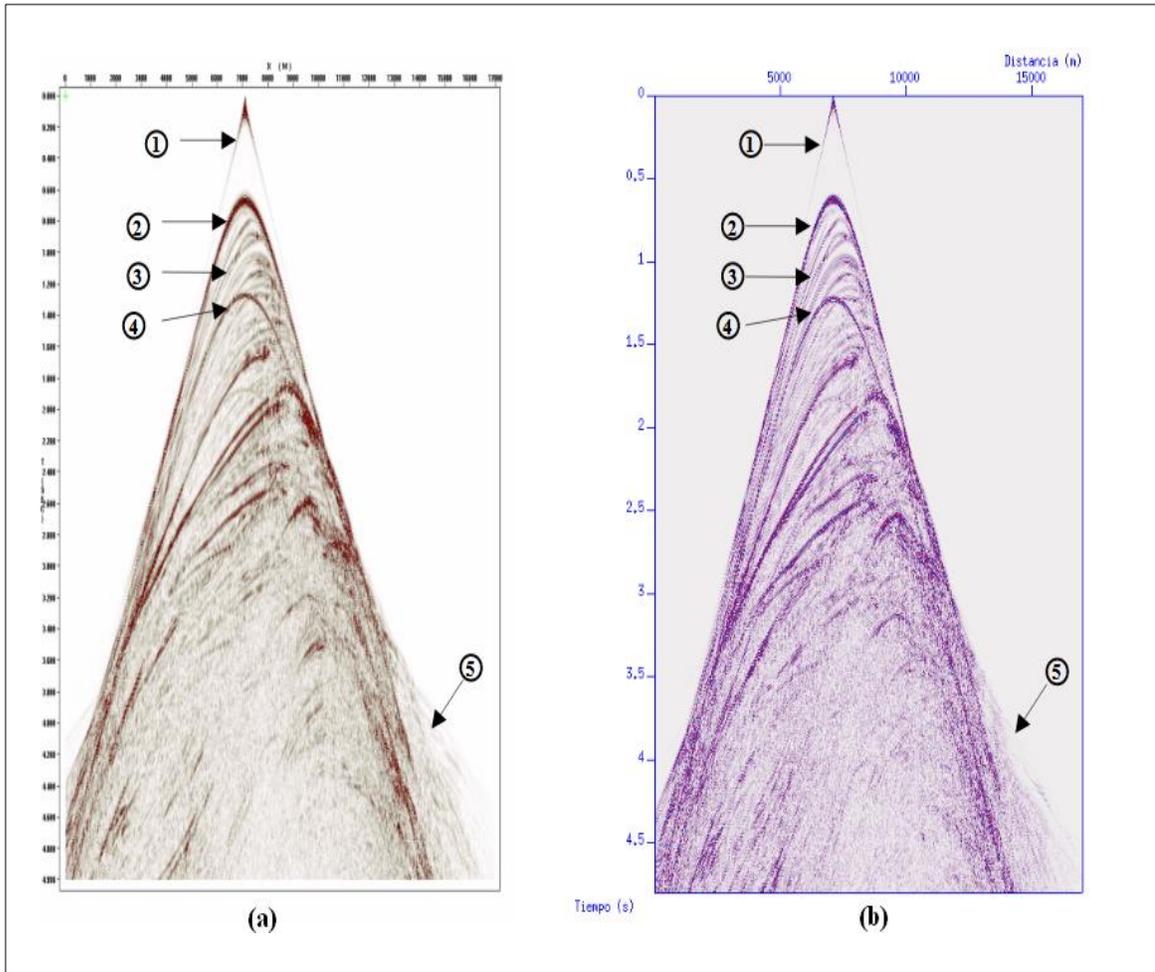
### 5.3.9. Registro sísmico

Conocido como línea horizontal de sismogramas (“*horizontal line of seismograms*”) por `sufdmod2`, se le conoce también como registro de campo y es un conjunto de trazas una al lado de la otra que tienen la misma ubicación de la fuente. Para este proyecto, sólo se van analizar las pruebas 06 y 09 puesto que mantienen los mismos parámetros de profundidad de la fuente y receptores. Los demás disparos se encuentran en el Anexo F. La configuración es la siguiente:

- Posición de la fuente  $X_{fuente}=7100$  m, con un tendido dividido y receptores distribuidos a lo largo de todo el modelo.
- Prueba 06  $Z_{fuente}=10$  m, espaciamiento entre receptores  $Z_{receptores}=5$  m.
- Prueba 09  $Z_{fuente}=10$  m, espaciamiento entre receptores  $Z_{receptores}=450$  m.

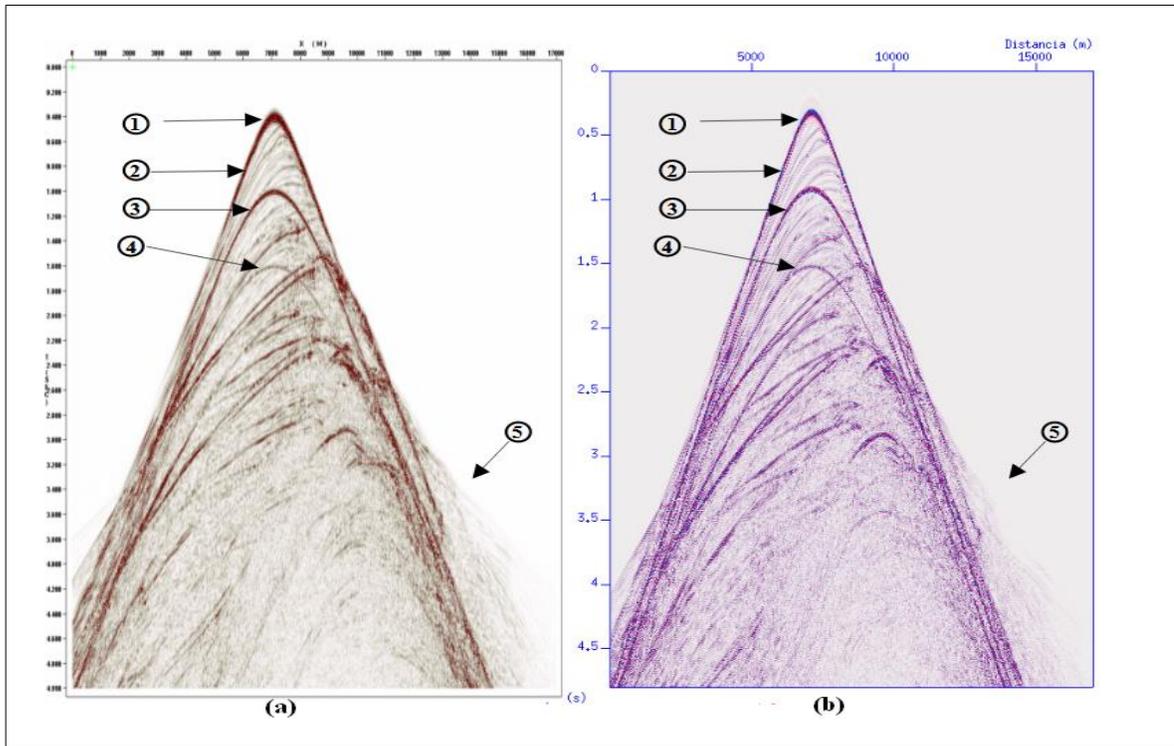
Los archivos generados son relativamente grandes (2 GB), `sufdmod2` calcula una traza por cada posición vertical del mallado y utiliza el intervalo de muestreo estimado para la estabilidad en el cálculo por diferencias finitas.

En cada disparo obtenemos 13601 trazas con un  $\Delta t=0,000132979$  ms y 37601 muestras/traza. Para comparar aplicamos primero un filtro pasa-banda de fase cero 5-10-60-80 con el programa *sufilter*, lo que permite aproximar los resultados al ancho de banda usado por Martin (2004) en su tesis doctoral.



**Figura 40:** (a) Figura modificada de la tesis de Martin utilizando E3D, (b) es el disparo calculado por *sufdm2*. Clave: (1) Onda directa (2) Reflexión del fondo marino (3) Reflexiones (4) Múltiple del fondo marino (5) Refracciones y onda precursora.

La figura 40 muestra comparativamente los resultados de Martin (2004) en (a) y en (b) lo que se obtuvo del modelado con *sufdm2* de la prueba 06. El experimento simula un disparo como si fuera grabado en un levantamiento marino convencional. A pesar de que las escalas de colores no son idénticas, se aprecia claramente una gran correlación de eventos en ambas gráficas.



**Figura 41:** (a) Figura modificada de la tesis de Martin utilizando E3D, (b) es el disparo calculado por sufdmod2. Clave: (1) Onda directa (2) Reflexión del fondo marino (3) Múltiple del fondo marino (4) Múltiple del fondo marino de segundo orden (5) Refracciones y onda precursora.

La figura 41 muestra comparativamente los resultados de Martin (2004) en (a) y en (b) lo que se obtuvo del modelado con sufdmod2 de la prueba 09. La prueba simula una adquisición utilizando cable de fondo oceánico (OBC). A pesar de que las escalas de colores no son idénticas se aprecia claramente una gran correlación de eventos en ambas gráficas.

### 5.3.10. Perfil sísmico vertical (VSP)

La ubicación del VSP está en la posición  $x=10300$  m, la fuente está en la posición  $x=10275$  m. La figura 42-(a) muestra la respuesta elástica vertical calculada por el programa E3D (Martin, 2004) y la figura 42 (b) el resultado acústico computado por sufdmod2.

Martín (2004) interpreta que su VSP “muestra que la energía que se propaga hacia la tierra es predominantemente energía de onda P, pero que se está produciendo una conversión de modo considerable [de ondas P a S]”. El resultado de sufdmod2 es de ondas P pura. Aun así, es posible identificar muchas similitudes en ambos registros en

donde la energía descendente tiene una inclinación hacia el lado derecho de la figura, la energía ascendente inclina hacia el lado izquierdo.

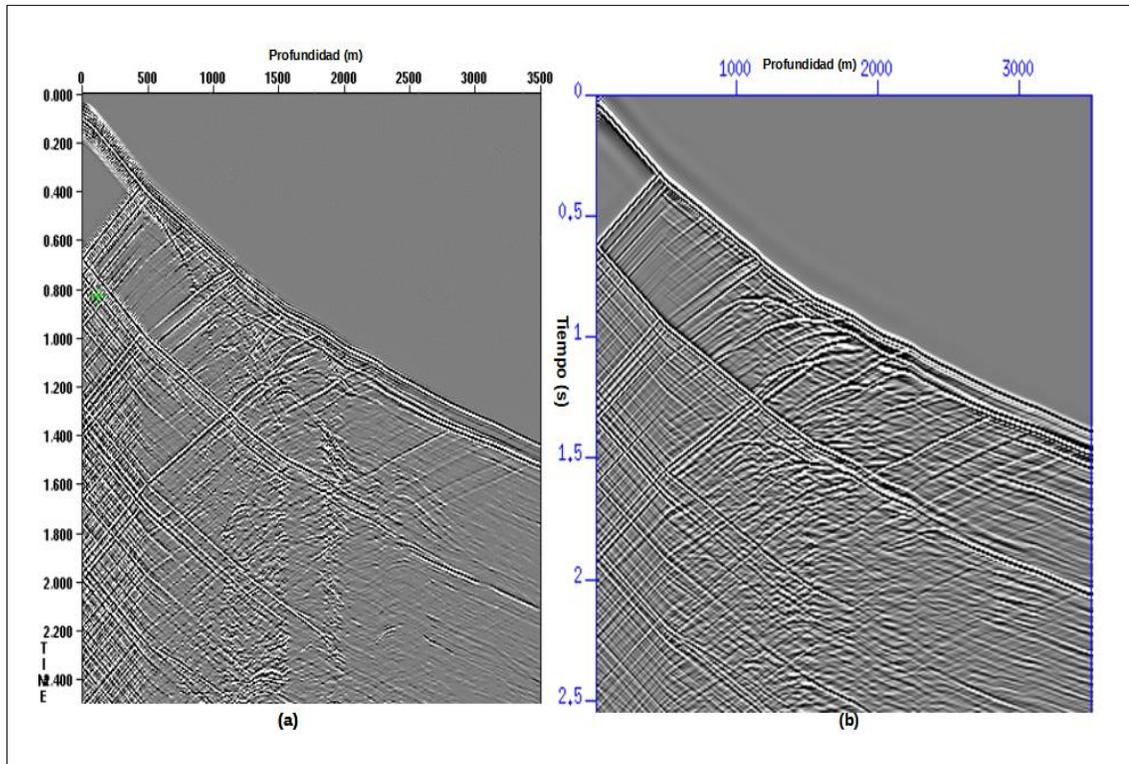


Figura 42: Vista de los primeros 2,5 s del VSP. (a) Respuesta elástica (Martin 2004) (b) respuesta acústica del programa sufdmod2.

### 5.3.11. Frente de ondas

El archivo de ondas de sufdmod2 contiene los fotogramas de los frentes de ondas P. El intervalo de tiempo entre fotogramas es 100 ms para un total de 51 cuadros desde 0 s hasta 5 s.

La figura 43 es la imagen del fotograma en  $t=1.4$  s  $X_{fuente}=5000$  m,  $Z_{fuente}=10$  m,  $Z_{receptores}=5$  m. A la izquierda se observa el calculado por sufdmod2, sobrepuesto al modelo de velocidades P (1,25 x 1,25 m) en colores, a la derecha se encuentra la misma figura tomada de la tesis de Martin (2004). En el centro se etiquetan las características principales existentes en ambos casos. Son claras las similitudes en los dos. La diferencia es que en la presentación de Martin la respuesta es elástica con ondas P (azul-amarillo) y S (rosado-verde), mientras que a la derecha es la repuesta acústica, ondas

P (negro-gris-blanco). La instantánea muestra la presencia de múltiples, reflexiones primarias y reflexiones desde la superficie libre.

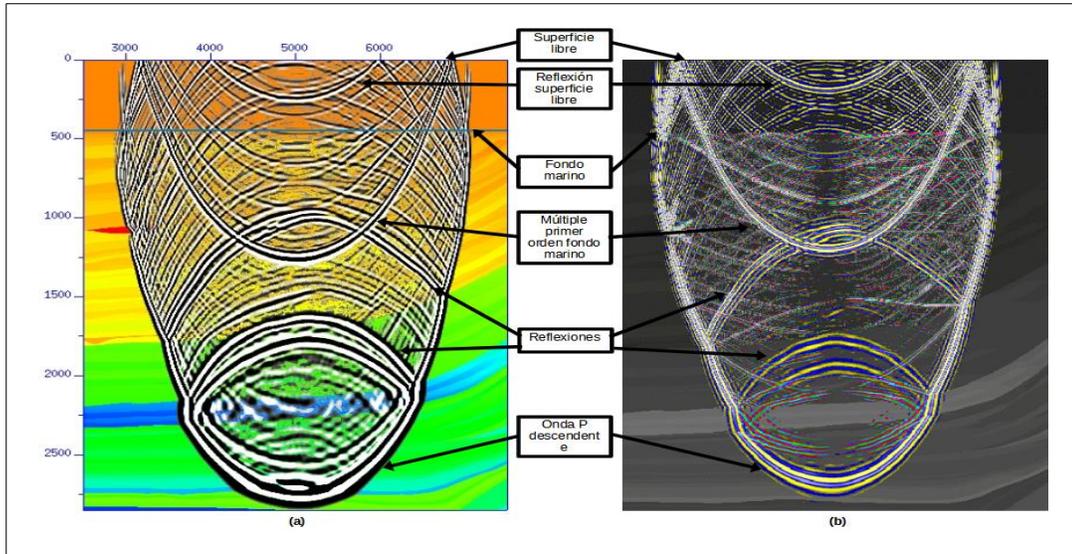


Figura 43: Fotograma  $t=1.4$  s  $x=5000$  m

### 5.3.12. Modelado utilizando fuente sísmica horizontal

Con el parámetro  $pw=1$  sufdmod2 computa el modelado utilizando como fuente sísmica ondas planas horizontales en lugar de una fuente puntual. La figura 44 es el resultado de esta opción que tiene una apariencia similar a una sección apilada antes de la migración.

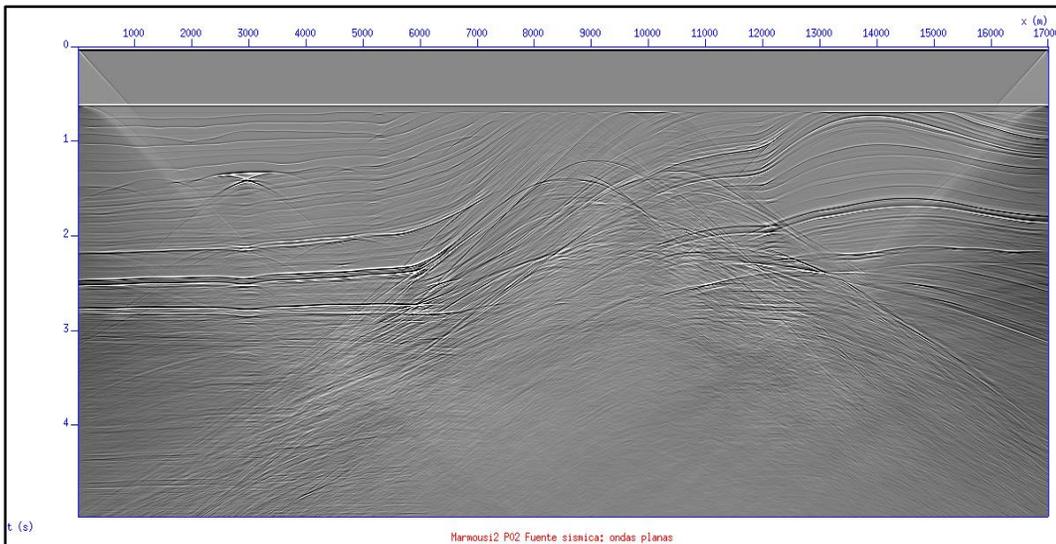


Figura 44: Respuesta del modelo acústico Marmousi2 a una fuente sísmica plana horizontal.

## 5.4. Detalles de la ejecución

Debido a que la capacidad de los recursos computacionales disponibles está en la categoría media-baja, particularmente en el cómputo intensivo del modelo original con un pequeño intervalo de la malla, durante los tiempos de cálculo se monitoreó la temperatura de los núcleos y carga de los CPUs mediante las aplicaciones Psensor y Monitor respectivamente. La figura 45 muestra un interesante comportamiento en donde se alterna el uso de dos núcleos, con el tiempo todos los CPUs son utilizados consecutivamente en serie. La figura 46 es tomada del programa Psensor, el recuadro amarillo indicando las máximas temperaturas en °C detectadas por los sensores en los núcleos del procesador a una capacidad del 100%.

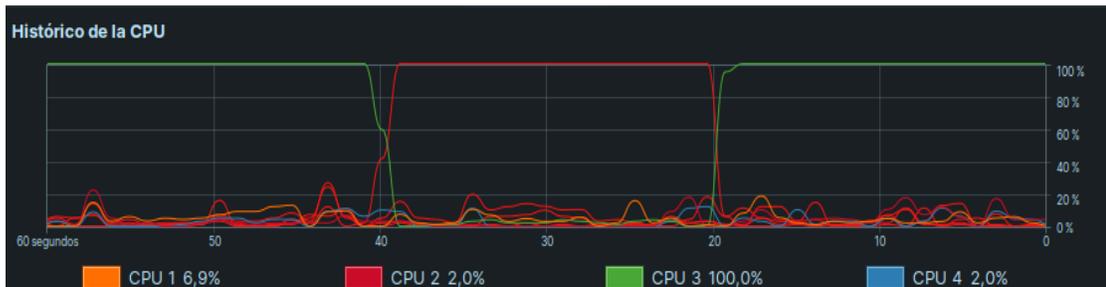
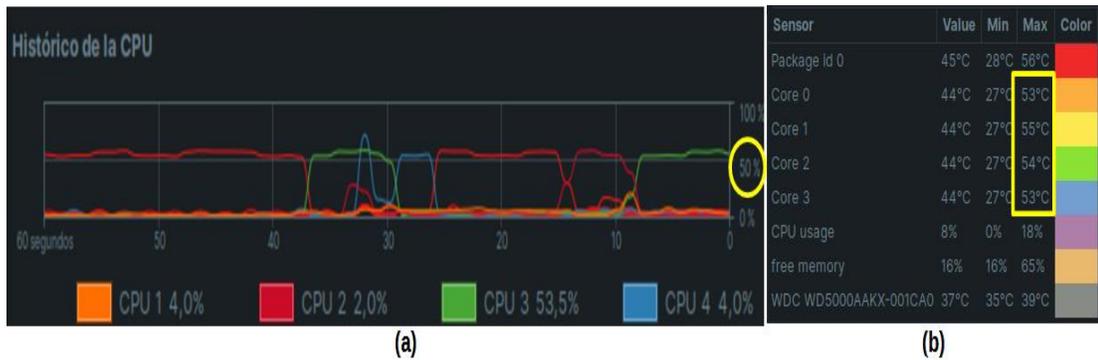


Figura 45: Momentos en que se alternan dos núcleos trabajando al 100%. (De Lisa, 2021)

Sensor	Value	Min	Max	Color	Graph
Package id 0	72°C	29°C	76°C	Red	<input type="checkbox"/>
Core 0	59°C	28°C	72°C	Orange	<input checked="" type="checkbox"/>
Core 1	64°C	28°C	76°C	Yellow	<input checked="" type="checkbox"/>
Core 2	72°C	28°C	73°C	Light Green	<input checked="" type="checkbox"/>
Core 3	65°C	28°C	75°C	Light Blue	<input checked="" type="checkbox"/>
CPU usage	13%	0%	23%	Purple	<input type="checkbox"/>
free memory	1%	1%	57%	Orange	<input type="checkbox"/>
WDC WD5000AAKX-001CA0	43°C	36°C	43°C	Grey	<input type="checkbox"/>

Figura 47: Temperaturas máximas detectadas por los sensores.

Según varias publicaciones para un procesador Core i5 la temperatura óptima (media) oscila entre 60 y 80 °C, la cifra más alta medida es de 76 °C. La herramienta *cpulimit* modera el uso de CPU de un proceso. Por ejemplo, si limitamos el máximo al 50 %, figura 48-(a), la temperatura de los núcleos disminuye, figura 48-(b), pero el tiempo de cálculo es 50% mayor (de 4 h aumenta a 6 h en promedio).



**Figura 48: Efecto de cpulimit (a) en la ejecución con 50% máximo. (b) reducción de la temperatura máxima temperatura (De Lisa 2021)**

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- La presente investigación estudió el comportamiento y resultados del programa de modelado sísmico directo *sufdmod2* utilizando el modelo complejo y expandido Marmousi2 (libremente disponible).
- El programa *sufdmod2* calcula la solución acústica de la ecuación de onda en dos dimensiones por diferencias finitas (segundo orden).
- Los resultados de *sufdmod2* son: ondícula fuente, disparo, perfil sísmico vertical, fotogramas de la expansión de ondas para la animación.
- Los resultados sintéticos de *sufdmod2* obtenidos en las pruebas 06 y 09 coinciden con los obtenidos por el algoritmo *E3D* (Martin, 2004) aun cuando este último calcula la respuesta elástica y utiliza como fuente una ondícula Ormsby.
- De las pruebas obtenidas con *sufdmod2* tenemos:
  - El modelado depende de la velocidad máxima en el modelo y del tamaño  $\Delta z$  y  $\Delta x$  de la malla.
  - En intervalos pequeños de  $\Delta z$  y  $\Delta x$  el modelado es más estable en cambio mayor es el número de trazas, número de muestras por segundo y tiempo de cómputo.
  - Utilizando Marmousi2 y mallado de 1,25 x 1,25 m, *sufdmod2* produce archivos con alta densidad de datos: 13601 trazas/disparo, 2801 muestras/trazas, intervalo de muestreo estable 0,000132979 ms.
  - Valores mayores de  $\Delta z$  y  $\Delta x$  acorta el tiempo de cómputo pero los resultados están contaminados por el fenómeno de la dispersión.
  - Dos tipos de fuente sísmicas: la puntual Ricker y ondas planas horizontales.
  - La forma de las ondículas Ricker calculadas en las nueve pruebas no coinciden exactamente con la forma teórica, no son simétricas, varía según su profundidad

y la profundidad de la línea de receptores. La prueba 09 es la que mayor similitud tiene.

- Los análisis espectrales de las fuentes calculadas también presentan diferencias. En particular las pruebas 01 y 07, tienen valores anómalos de amplitud en la frecuencia cercana a 0 Hz.
- El modelado con ondas planas horizontales produce como registro de disparo una sección similar a la que se obtiene después de apilamiento y antes de la migración.
- Colocar la línea de receptores horizontales sobre la superficie libre calcula el VSP y los fotogramas mas no produce los archivos de disparo y ondícula.
- Es posible utilizar *sufdmod2* en máquinas equipadas con procesador de cuatro núcleos Intel® Core i5-2390T (lanzado al mercado el 11/02/2011) y 8 GB RAM. Utilizando el CPU a su máxima capacidad el programa tarda en promedio 4 horas para completar los cálculos. Si solo se quieren obtener los fotogramas el tiempo disminuye a un promedio de 3 horas.

## 6.2. Recomendaciones

1. Se recomienda el uso del programa libre y gratuito *sufdmod2* de la librería Seismic Un\*x para el modelado acústico por diferencia finitas en modelos complejos.
2. Simular con Marmousi2 la adquisición de datos sísmicos con parámetros cercanos a la realidad.
3. Con los datos previamente adquiridos investigar en el campo del procesamiento la secuencia adecuada que proporcione una imagen fiel del modelo.
4. Investigar a fondo los resultados obtenidos con la fuente plana horizontal.
5. Aplicar un filtro pasa-banda apropiado a los datos sintéticos.
6. Utilizar la aplicación GNU-Linux *cpulimit* para no someter el uso del CPU a su máxima capacidad por tiempos prolongados generando así menos calor. Sin embargo esto aumenta el tiempo de cómputo: si limitamos la capacidad máxima al 50% el tiempo de cómputo aumentará en un 50%.

7. Tener acceso a equipos con gran capacidad de cómputo.
8. A nivel de programación se sugieren las siguientes modificaciones:
  - Paralelizar el algoritmo.
  - Flexibilidad en el cálculo de número de trazas por disparos.
  - Incluir más opciones de ondículas fuente.
9. Continuar la investigación con los siguientes programas de modelado:
  - *Sufdmod2\_pml*, que utiliza las condiciones de absorción de borde mediante el método de “capa perfectamente combinada (“*perfectly matched layer*”, PML).
  - *suea2df*, que calcula la respuesta 2D elástica y anisotrópica, cuarto orden en el espacio, supuestamente similar al programa *E3D*.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bourgeois, A., Bourget, M., Lailly, P., Poulet, M., Ricarte, P. Versteeg, R. (1991). *Marmousi, model and data*, in Versteeg, R., and Grau, G., Eds., The Marmousi experience: Proc. 1990 EAEG workshop on Practical Aspects of Seismic Data Inversion: Eur. Asson. Expl. Geophysics: 5–16.
- Brognon, Georges P. y Verrier, Georges R. (1966). Oil and geology in Cuanza basin of Angola. AAPG Bulletin. (Vol. 50): 108-158.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L., y Kan, T.K., 1993, Rock Physics – The link between rockproperties and AVO response: in Castagna, J.P., and Backus, M.M., eds., Offset dependent reflectivity – Theory and practice of AVO anomalies, Society of Exploration Geophysics. Investigations in Geophysics. (Nº. 8): 135-171.
- Gadallah, Mamdouh R. y Fisher, Ry. (2009). Exploration Geophysics. Editorial Springer.
- Greenburg, M.L. y Castagna, J.P., 1992. Shear-wave velocity estimation in porous rocks: Theoretical formulation, preliminary verification and applications, Geophysical Prospecting. (40): 195-210.
- Heiner, I. "Computers, Waves, Simulations: A Practical Introduction to Numerical Methods using Python". [Consultado en 16/06/2021]. Obtenido on line de: <https://www.coursera.org/learn/computers-waves-simulations>
- Irons, T. (2014). Madagascar Datasets. Marmousi Model. Synthetic 2D acoustic model. Colorado School of Mines (CSM). [Consultado en 05/07/2020]. Obtenido on line de: <http://www.ifp.fr/IFP/en/aa.html>.
- Irons, T. (2014). *Madagascar Datasets. Marmousi2 Model*. Synthetic 2D elastic model. Colorado School of Mines (CSM). [Consultado en 05/07/2020]. Obtenido on line de: <http://www.agl.uh.edu/>
- Lara G., Anny J. (2002). Modelado Sísmico en el Oriente de Venezuela para Evaluar Diferentes Diagnósticos y Geometrías de Adquisición. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero geofísico. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Lara R., J. A. (2007). Modelado sísmico con Seismic Unix: Modelado sísmico a partir de perfiles de velocidad generados con el método de triangulación usando el paquete computacional Seismic Unix. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero geofísico. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Venezuela.
- Martin, G. S., Marfurt, Kurt J. y Wiley, Robert. (2006). Marmousi2: An elastic upgrade for Marmousi. The Leading Edge. University of Houston. USA.: 156-166.

- Martin, Gary S. (2004). The Marmousi2 Model, Elastic Synthetic Data, and an Analysis of Imaging and Avo in a Structurally Complex Environment. A thesis presented to the Faculty of the Department of Geosciences. In partial fulfillment of the requirements for the Degree Master of Science. University of Houston.
- Oliveira S., Andrei G. (2011). Modelamento e processamento de dados sísmicos usando o software livre Seismic Unix. Departamento de geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Pérez C., Verónica Y. (2008). Utilización del paquete de SEISMIC UNIX para la Enseñanza de la Sísmica. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero geofísico. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Venezuela.
- Rodriguez, Paola. (2013). 2-D finite difference modelling and analysis of shallow gas leakage scenarios, using time-lapse refraction. Department of petroleum engineering and applied geophysics. Norwegian University of Science and Technology.
- Sheriff, Robert E. (2002). Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. 4<sup>th</sup> Ed. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. [Consultado en 06/07/2018]. Obtenido on line de: <https://es.scribd.com/document/344971112/Sheriff-2002>
- Stocwell, John W. y Cohen, Jack K. (2008). The new SU user's manual. Center of Wave Phenomena. Colorado School of Mines. Golden, Colorado, USA.
- Stocwell, John W. (2012). A course in Geophysical Image Processing with Seismic Unix. Center for Wave Phenomena. Golden, Colorado, USA.
- Vieira P., Adelo A. (2007). Modelado básico de datos sísmicos preapilados y su correspondiente secuencia de procesamiento utilizando los programas del paquete Seismic Unix. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero geofísico. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Venezuela.
- Wiltshire, James y Write Stephen. (2016). Pre-salt of West Africa, twin or distant relative of Brazil sub-surface. [Consultado en 05/07/2018]. Obtenido on line de: <http://gaffney-cline-focus.com/pre-salt-of-west-africa-twin-or-distant-relative-of-brazil-sub-surface>.

## **ANEXOS**

## [ANEXO A]

### SCRIPT PARA LA GRAFICACIÓN DE LOS MODELOS DE DENSIDAD Y VELOCIDAD MARMOUSI 2: GRAFICARMODELOS.SH

```
#!/bin/bash
clear
# Script para graficar modelos en formato binarios.

#*****
#*****
# Presentacion en pantalla

ximage <m2-velocidadP-12.5m.bin \
      n1=280 n2=1360 d1=12.5 d2=12.5 legend=1 \
      units=" m/s" wbox=1360 hbox=640 \
      title="Modelo de velocidad Marmousi2 12,5 m x 12,5 m" \
\
      titlecolor=black cmap=hsv2 windowtitle=Marmousi2 \
      labell1="Profundidad [m]" label2="Distancia [m]"
blockinterp=1&

ximage <m2-velocidadP-25m.bin \
      n1=140 n2=680 d1=25 d2=25 legend=1 \
      units=" m/s" wbox=1360 hbox=640 \
      title="Modelo de velocidad Marmousi2 25 m x 25 m" \
      titlecolor=black cmap=hsv2 windowtitle=Marmousi2 \
      labell1="Profundidad [m]" label2="Distancia [m]"
blockinterp=1&

ximage <m2-velocidadP-50m.bin \
      n1=70 n2=340 d1=50 d2=50 legend=1 \
      units=" m/s" wbox=1360 hbox=640 \
      title="Modelo de velocidad Marmousi2 50 m x 50 m" \
      titlecolor=black cmap=hsv2 windowtitle=Marmousi2 \
      labell1="Profundidad [m]" label2="Distancia [m]"
blockinterp=1&

exit
```



```

echo "dz2= " $dz2
dx2=$(echo "1/$dz2" | bc)
echo "dx2= " $dx2

#####
#####
#~ # Inicializa el archivo reporte
#~ echo "-----"
" >> $reporte
#~ echo "Fecha y hora" >> $reporte
#~ date >> $reporte

#~ # TAREA 1: Modificar encabezados modelos

sushw <$dens key=tracf,tracl a=1,1 b=0,0 j=1,1 c=1,1 \
    >dens1.temp

sushw <$velo key=tracf,tracl a=1,1 b=0,0 j=1,1 c=1,1 \
    >velo1.temp

# TAREA 2: Remuestreo para obtener una malla de $dxdz2 m

suresamp <dens1.temp rf=$dz2 | suwind key=tracl j=$dx2 \
    >$dens2

suresamp <velo1.temp rf=$dz2 | suwind key=tracl j=$dx2 \
    >$velo2

#~ # PASO 4: Imprimir salidas estadisticas de la ejecucion:
#~ echo
"=====
====="
#~ echo "    Densidades: valores iniciales min max (primero -
ultimo)    "
#~ echo
#~ surange <den_125_tracfl.su key=tracf,tracl,dt
#~ echo
#~ echo "    Densidades: valores finales min max (primero -
ultimo)    "
#~ echo
#~ surange <den_$dxdz_nuevo.su key=tracf,tracl,dt
#~ echo "Conversion a formato binario den_$dxdz_nuevo.bin"
sustrip <$dens2 >$dens3

```

```

#~ echo
"=====
===="
#~ echo "    Velocidades P: valores iniciales min max (primero
- ultimo)    "
#~ echo
#~ surange <pvel_125_tracfl.su key=tracf,tracl,dt
#~ echo
#~ echo "    Velocidades P: valores finales min max (primero -
ultimo)    "
#~ echo
#~ surange <pvel_$dxdz_nuevo.su key=tracf,tracl,dt
#~ echo "Conversion a formato binario pvel_$dxdz_nuevo.bin"
sustrip <$velo2 >$velo3
#~ echo
#~ echo
"=====
===="
#~ echo "Recursos:"

rm -f *.temp

exit#

```

[ANEXO C]

**SCRIPT PARA EL MODELADO SÍSMICO UTILIZANDO EL MODELO MARMOUSI2 DE 12,5 X 12,5 M. EL SCRIPT EJECUTA LAS NUEVAS PRUEBAS Y GENERA UN REPORTE LLAMADO TEJEC.TXT.**

```
#!/bin/bash

#set -x
clear
#####
#####
#####          SHELL SCRIPT PARA REPRODUCIR LAS 9 PRUEBAS
#####
#####
#####
#####
# Modelos de velocidad P y densidad:
velo=m2-velocidadp-12.5m.bin
dens=m2-densidad-12.5m.bin

#####
#####
##          Modelado mediante diferencias finitas sufdmod2
##
## Para identificar las variables referirse al texto de la
tesis      ##
## Tambien utilizar las ayudas de Seismic Un*x
##
#####
#####

echo "-----" >tejec.txt
echo "Prueba numero 1" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 1"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba01.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=0 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=0 \
    vsfile=vsp-prueba01.su \
    hsfile=disparo-prueba01.su \
    ssfile=ricker40hz-prueba01.su \
    abs=1,1,1,1 verbose=1
echo "-----" >>tejec.txt
```

```

echo "Prueba numero 2" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 2"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba02.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=0 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=1 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=0 \
    vsfile=vsp-prueba02.su \
    hsfile=disparo-prueba02.su \
    ssfile=ricker40hz-prueba02.su \
    abs=1,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt
echo "Prueba numero 3" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 3"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba03.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=0 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=0 \
    vsfile=vsp-prueba03.su \
    hsfile=disparo-prueba03.su \
    ssfile=ricker40hz-prueba03.su \
    abs=0,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt
echo "Prueba numero 4" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 4"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba04.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=5 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=5 \
    vsfile=vsp-prueba04.su \
    hsfile=disparo-prueba04.su \
    ssfile=ricker40hz-prueba04.su \
    abs=0,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt
echo "Prueba numero 5" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 5"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba05.su \

```

```

        nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=5 tmax=5 \
        sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
        fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=7 \
        vsfile=vsp-prueba05.su \
        hsfile=disparo-prueba05.su \
        ssfile=ricker40hz-prueba05.su \
        abs=0,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt
echo "Prueba numero 6" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 6"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba06.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=10 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=5 \
    vsfile=vsp-prueba06.su \
    hsfile=disparo-prueba06.su \
    ssfile=ricker40hz-prueba06.su \
    abs=0,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt
echo "Prueba numero 7" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 7"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba07.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=10 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=5 \
    vsfile=vsp-prueba07.su \
    hsfile=disparo-prueba07.su \
    ssfile=ricker40hz-prueba07.su \
    abs=1,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt
echo "Prueba numero 8" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 8"

time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba08.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=5 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=10 \

```

```

vsfile=vsp-prueba08.su \
hsfile=disparo-prueba08.su \
ssfile=ricker40hz-prueba08.su \
abs=0,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt
echo "Prueba numero 9" >>tejec.txt
echo "Ejecutando prueba numero 9"
time -ap -o tejec.txt sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >ondas-prueba09.su \
    nx=1360 nz=280 xs=7100 zs=10 tmax=5 \
    sstrength=1 pw=0 mt=4 dx=12.5 dz=12.5 \
    fmax=80 fpeak=40 vsx=7125 hsz=450 \
    vsfile=vsp-prueba09.su \
    hsfile=disparo-prueba09.su \
    ssfile=ricker40hz-prueba09.su \
    abs=0,1,1,1

echo "-----" >>tejec.txt

#####
#####
# Graficacion de los resultados
#suxmovie <ondas-prueba01.su \
#      n1=280 ntr=1279760 n2=1360 loop=1 clip=0.1 \
#      title="Prueba 1"\
#      width=1800 height=600&
#
#suximage <disparo-prueba01.su perc=99.5 xbox=650 title="Pruea
1"&
#
#suxwigb <vsp-7125.su perc=99&
#suxwigb <ricker40hz-prueba01.su xlend=0.07 style=normal
interp=1 title="Ricker 40Hz"&
#
#supsmovie <ondas-prueba01.su
#####
#####

```

## [ANEXO D]

### SCRIPT PARA EL MODELADO SÍSMICO UTILIZANDO EL MALLADO ORIGINAL DE MARMOUSI2.UN SOLO DISPARO POR EJECUCIÓN. GENERA Y PRESENTA UN REPORTE.

```
#!/bin/bash

#set -x
clear

# Script para el modelado por diferencias finitas 2D
# 10-Julio-2020: creacion, Vincenzo De Lisa.
# 07-Junio 2021: genera automaticamente nombre archivo reporte

##### DATOS DEL USURIO
#####
# Archivos de entrada:
id="P01-7100-1.25m"
velo=m2-vp-1.25m.bin      # Archivo de velocidades P
dens=m2-den-1.25m.bin    # Archivo de las densidades

nx=13601                  # Numero de muestras x (2da
dimension)
nz=2801                   # Numero de muestras z (1a
dimension)

xs=7100                   # Coordenada x de la fuente
zs=0                      # cordenada z de la fuente"
tmax=5                    # tiempo maximo (s)

sstrength=1.0            # Nivel de energía de la fuente
pw=0                     # =0 fuente puntual; =1 onda plana
horizontal
mt=752                   # Número de pasos de tiempo (dt)
# por paso de tiempo de salida
dx=1.25                  # intervalo de muestreo en x
dz=1.25                  # intervalo de muestreo en z
fmax=80                  # Fuente Ricker frecuencia maxima
fpeak=40                 # Fuente Ricker frecuencia pico

vsx=7200                  # Posicion x del VSP
hsz=0                    # Profundiad de los receptores
```

```

vsfile=vsp-$id.su          # Archivo VSP
hsfile=disparo-$id.su     # Archivo disparo
ssfile=ondicula-$id.su    # Archivo ondicula
wfile=ondas-$id.su       # Archivo frentes de ondas

abs=1,1,1,1              # Condicion absorcion en los bordes
del modelo                # tope, izquierda,fondo, derecha
                           # =0 no absorcion en el borde del
modelo

#####
#####
# Inicializar archivo reporte
tiempo=`date +%Y_%m_%d_%H_%M_%S`;
reporte="sufdmod2-$id.txt"

echo "-----"
>$reporte
echo "Inicio de la ejecucion: $tiempo"
>>$reporte
echo " "
>>$reporte
echo " Nombre prueba: $id"
>>$reporte
echo "nx=$nx nz=$nz xs=$xs zs=$zs tmax=$tmax"
>>$reporte
echo "hsz=$hsz mt=$mt dx=$dx dz=$dz pw=$pw"
>>$reporte
echo "fpeak=$fpeak fmax=$fmax abs=$abs"
>>$reporte
echo " "
>>$reporte

echo "Ejecutando modelado sufdmod2"

echo "=== sufdmod2: inicio del modelado $tiempo ==="
echo "                               $id"

## Modelado mediante diferencias finitas
time -f "\t%E real,\t%U user,\t%S sys" -ao $reporte sufdmod2 \
    <$velo dfile=$dens >$wfile \

```

```

        nx=$nx nz=$nz xs=$xs zs=$zs tmax=$tmax
sstrength=$sstrength \
        pw=$pw mt=$mt dx=$dx dz=$dz fmax=$fmax fpeak=$fpeak \
        vsx=$vsx hsz=$hsz vsfile=$vsfile hsfile=$hsfile
ssfile=$ssfile \
        abs=$abs

tiempof=`date '+%Y_%m_%d_%H_%M_%S'`;
echo " "
>>$reporte
echo "Fin de la ejecucion: $tiempof"
>>$reporte
echo "-----"
>>$reporte

echo "=== sufdmod2: fin de la ejecucion ==="

cat $reporte

exit#

```

## [ANEXO E]

### INSTRUCCIONES PARA OBTENER EL GRAFICO DEL ESPECTRO DE AMPLITUD DE LA ONDÍCULA RICKER.

El usuario deberá sustituir a nombreondicula.su por el nombre real del archivo que desea analizar.

```
#!/bin/bash

#set -x
clear#

#####
#####
sufft <nombreOndicula.su | suamp mode=phase | suxgraph
linewidth=1 \
    #linecolor=0 width=600 height=400 \
    #label1="Frecuencia (Hz)" label2="Fase (radianes)"
style=normal \
    #title="Espectro Fase Ricker"&
#####
#####
```

## [ANEXO F]

### SCRIPT QUE PRESENTA EN PANTALLA LA SECUENCIA ANIMADA DE LAS ONDAS.

El usuario sustituirá el nombre archivo Ondas.su con uno apropiado. El tiempo para que inicie la animación puede tardar varios minutos. Para controlar la animación utilice:

Botón 1 del ratón	Zoom de ventana elastica
Botón 2 del ratón	mueve en dirección contraria la animación
Botón 3 del ratón	detiene o inicia la animación
Tecla q or Q	sale de la animación (Quit)
Tecla s or S	detener la pantalla y cambia al modo de pasos (Stop)
Tecla b or B (Backward)	retrocede un fotograma a la vez
Tecla f or F	avanza un fotograma a la vez (Forward)
Tecla n or N	igual que 'f'
Tecla c or C	establece la visualización en modo continuo

-----  
-----  
  
#!/bin/bash

#set -x  
clear#

echo "Ejecutando suxmovie"  
suxmovie <archivoOndas.su \  
    n1=2801 ntr=693651 n2=13601 loop=1 clip=0.01 \  
    width=1400 height=600 sleep=1 \  
    title="Fotograma %g"&

-----  
-----

[ANEXO G]

DISPAROS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS 01, 04, 05,07,08

