

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación en
Geofísica Aplicada**

**Firma característica de una caverna generada por
una explosión nuclear subterránea en datos de
exploración sísmica 2D.**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Stephany Ortiz Aguilar

Ensenada, Baja California, México

2018

Tesis defendida por

Stephany Ortiz Aguilar

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Jonás de Dios De Basabe Delgado
Director de tesis

Dr. Mario González Escobar

Dr. Pratap Narayan Sahay Sahay

Dra. Vanesa Magar Brunner



Dr. Jonás de Dios De Basabe Delgado
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Stephany Ortiz Aguilar © 2018

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta Stephany Ortiz Aguilar como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

Firma característica de una caverna generada por una explosión nuclear subterránea en datos de exploración sísmica 2D.

Resumen aprobado por:

Dr. Jonás de Dios De Basabe Delgado
Director de tesis

Las inspecciones *in situ* (OSI) constituyen uno de los pilares del régimen de verificación del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (CTBT por sus siglas en inglés). El objetivo de las OSI es verificar si alguna prueba nuclear se ha llevado a cabo en un sitio, identificando por medio de algún estudio geofísico la presencia de una caverna, pozo o dispositivo que indique que el tratado ha sido violado. El estado del arte, al momento de la redacción de esta tesis, no reporta información de datos sísmicos, simulados o reales, en los que se estudie el comportamiento de cavernas generadas por explosiones nucleares. Por tanto, la investigación realizada en simulación de propagación de ondas aporta una metodología para identificar, localizar y reconocer este tipo de estructuras en datos sísmicos. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación de propagación de ondas elásticas, en el dominio del tiempo, en un medio bidimensional con una caverna generada por una explosión nuclear subterránea. La ecuación de onda se resuelve con el método de elementos espectrales, usando polinomios de orden 4 y elementos cuadrilateros. Se proponen y resuelven modelos de complejidad incremental, para tamaños de cavidades de 1 kilotón (kt), 10 kt, 20 kt, 100 kt y 600 kt, que ayudan a determinar el efecto de la estructura final en los datos sísmicos. El método de elementos espectrales resuelve satisfactoriamente el problema de la caverna. Como resultado de las simulaciones, se obtienen trazas en las que se observa el efecto de las estructuras: a) las cavidades se comportan como puntos o cuerpos difractores, dependiendo de su tamaño, mientras que b) las cavernas, que son estructuras más complejas, se comportan como dos cuerpos difractores concéntricos.

Palabras clave: OSI, CTBT, caverna, simulación de propagación de ondas elásticas, método de elementos espectrales, trazas sísmicas.

Abstract of the thesis presented by Stephany Ortiz Aguilar as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Applied Geophysics.

Characteristic signature of a cavern generated by an underground nuclear explosion in 2D seismic exploration data.

Abstract approved by:

Dr. Jonás de Dios De Basabe Delgado
Thesis Director

On Site Inspections are an essential component of the verification regime of The Comprehensive Nuclear-Test-Ban-Treaty (CTBT). The purpose of the OSI is to verify if some nuclear test has been carried out, identifying with a Geophysical technique the presence of a cavern, hole or some device that indicates the violation of the treaty. The state of the art, at the moment of writing this thesis, does not report seismic data, simulated or real, in which the behavior of a cavern created by an underground nuclear explosion can be observed. The research in wave propagation simulation offers a methodology to identify, locate and recognize these structures in seismic data. In the present work, we present the results of elastic wave propagation simulation, in time domain, in a bidimensional media with a cavern caused by an underground nuclear explosion. The wave equation is solved with spectral element method, employing polynomials of order 4 and quadrilateral elements. We propose and solve models of incremental complexity, for caverns of sizes of 1 kiloton (kt), 10 kt, 20 kt, 100 kt and 600 kt, that help to establish the effect of the final structure in seismic data. The spectral element method solves the problem of a cavern satisfactorily. As result of the simulations, we obtain seismic traces in which we can observe the effect of the structures: a) the cavities behave like points or diffractor bodies, depending on their sizes; b) the caverns, which are more complex structures, behave like two concentric diffractor bodies.

Keywords: OSI, CTBT, cavern, elastic wave propagation simulation, spectral element method, seismic traces.

Dedicatoria

A Dios, a mis padres, hermanos y esposo.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por la oportunidad de crecer académicamente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 613346.

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) por permitirme hacer uso de la estación de trabajo y de la licencia del Software Trelis.

A mi director de tesis, el Dr. Jonás de Dios De Basabe, por su paciencia, enseñanzas, consejos y constante apoyo a lo largo de mi estancia, dentro y fuera de la institución. Por la invitación y motivación a formar parte del capítulo estudiantil SEG-CICESE.

A los miembros de mi comité: Dra. Vanesa Magar, Dr. Pratap Sahay y Dr. Mario González, por sus contantes aportaciones para la realización de esta tesis.

A mi esposo Josué por su amor, infinita paciencia, tolerancia y constantes palabras de aliento y motivación.

A mis padres y hermanos por su apoyo y amor.

A mis compañeros de generación y a todos aquellos con los que conviví en mi estancia en CICESE, en especial a Javier por su constante ayuda en la revisión y corrección del escrito de tesis.

A cada uno de los miembros del grupo de física de rocas por cada reunión, consejo y aportación.

A mis amigos más cercanos, Lili y Gabriel, por su amistad y por cada momento agradable que pasamos juntos.

A todo el personal administrativo, por el apoyo y ayuda proporcionada, por las sorpresas y reuniones.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Trabajos relacionados	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
Capítulo 2. Marco teórico	
2.1. Configuración estructural de la caverna	6
2.2. Método de elementos espectrales (SEM)	9
2.2.1. Formulación débil de la ecuación de onda	10
2.2.2. Errores numéricos de discretización	13
2.2.2.1. Dispersión numérica	14
2.2.2.2. Criterio de estabilidad	14
Capítulo 3. Metodología	
3.1. Modelo geológico	16
3.1.1. Propiedades elásticas de la roca	17
3.2. Modelos incrementales	18
3.3. Tamaños de cavernas	19
3.4. Simulación numérica	20
3.4.1. Elaboración de mallas	20
3.4.2. Implementación de SEM	27
3.4.3. Diseño de adquisición	28
3.5. Sección monocanal	29
Capítulo 4. Resultados y Discusión	
4.1. Caso homogéneo	32
4.1.1. Representación del campo de ondas	33
4.2. Cavidades	35
4.2.1. Representación del campo de ondas	40
4.3. Cavernas	45

Tabla de contenido (continuación)

4.3.1. Representación del campo de ondas	50
4.4. Sección monocanal	54
Capítulo 5. Conclusiones	
5.1. Trabajo futuro	58
Literatura citada	59
Anexo 1	62
Anexo 2	63

Lista de figuras

Figura	Página
1. Caverna en pozo	8
2. Caverna en túnel	9
3. Propuesta de modelo geológico	16
4. Modelos incrementales.	18
5. Interfaz gráfica del software Trelis.	21
6. Geometría de un semiespacio con una caverna creada con el software Trelis.	22
7. Malla de un semiespacio con una caverna de 20 kt empleando el algoritmo pave.	23
8. Ejemplo de malla generada con Trelis para un semiespacio homogéneo. . .	23
9. Malla de un semiespacio con una cavidad de 1 kt.	24
10. Malla de un semiespacio con una caverna de 1 kt.	24
11. Malla de un semiespacio con una cavidad de 20 kt.	25
12. Malla de un semiespacio con una caverna de 20 kt.	25
13. Malla de un semiespacio con una caverna de 600 kt.	27
14. Arreglo geométrico de adquisición sísmica.	29
15. Trazas del caso homogéneo U_x	32
16. Trazas del caso homogéneo U_z	33
17. Snapshots para el caso homogéneo: Componente horizontal y vertical . . .	34
18. Trazas para el caso de una cavidad de 1 kt U_x	36
19. Trazas para el caso de una cavidad de 1 kt U_z	36
20. Trazas para el caso de una cavidad de 10 kt U_x	37
21. Trazas para el caso de una cavidad de 10 kt U_z	38
22. Trazas para el caso de una cavidad de 20 kt U_x	39
23. Trazas para el caso de una cavidad de 20 kt U_z	39
24. Snapshots para una cavidad de 20 kt: Componente horizontal y vertical . .	41
25. Trazas para el caso de una cavidad de 100 kt U_x	42
26. Trazas para el caso de una cavidad de 100 kt U_z	42
27. Trazas para el caso de una cavidad de 600 kt U_x	43
28. Trazas para el caso de una cavidad de 600 kt U_z	44
29. Trazas para el caso de una caverna de 1 kt U_x	46
30. Trazas para el caso de una caverna de 1 kt U_z	46

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
31. Trazas para el caso de una caverna de 10 kt Ux	47
32. Trazas para el caso de una caverna de 10 kt Uz	48
33. Trazas para el caso de una caverna de 20 kt Ux	49
34. Trazas para el caso de una caverna de 20 kt Uz	49
35. Snapshots para una Caverna de 20 kt: Componente horizontal y vertical . .	51
36. Trazas para el caso de una caverna de 100 kt Ux	52
37. Trazas para el caso de una caverna de 100 kt Uz	52
38. Trazas para el caso de una caverna de 600 kt Ux	53
39. Trazas para el caso de una caverna de 600 kt Uz	54
40. Sección monocanal para la cavidad de 20 kt	55
41. Sección monocanal para la caverna de 20 kt	56
42. Medio poroso	62
43. Representación del campo de ondas en un Snapshot	63

Lista de tablas

Tabla	Página
1.	Propiedades elásticas del granito. 17
2.	Propiedades elásticas de la zona fragmentada. 18
3.	Zonas afectadas por UNE 20
4.	Nomenclatura de ondas. 31

Capítulo 1. Introducción

Las explosiones nucleares son un tema de interés a nivel mundial ya que sus efectos no se restringen únicamente a la zona geográfica en la que se realizan, particularmente cuando las cargas nucleares que se detonan son de gran tamaño y el material radioactivo no logra ser contenido en el subsuelo.

Los efectos de un ensayo nuclear dependen del tipo de explosión (subterránea, bajo el agua, en superficie o en la atmósfera), de la cantidad de material detonado, de la profundidad y de las condiciones de la zona en la que se realiza el ensayo. Sin embargo, sin importar el tamaño, éstas representan un riesgo tanto para el medio ambiente, como para el ser humano debido a la cantidad de material radiactivo generado y emitido por la explosión (Adushkin y Leith, 2001).

1.1. Antecedentes

El primer ensayo nuclear que se realizó fue en 1945, con una carga de casi 20 kilotones (kt). La bomba fue detonada por Estados Unidos en Nuevo México; a partir de esta fecha otros países con capacidad nuclear, como la URSS, Reino Unido y Francia, comenzaron a realizar pruebas nucleares en diferentes partes del planeta: en la atmósfera, bajo el agua y en la superficie (CTBTO, 2010). Como consecuencia de varios ensayos nucleares al aire libre, los niveles de radiación en la atmósfera de la Tierra estaban muy por encima del de los sitios de prueba, que son lugares designados específicamente para realizar pruebas nucleares, por lo que se necesitaba crear un organismo que regulara diferentes aspectos de los ensayos. En 1963 se creó el primer tratado de prohibición (Limited Test Ban Treaty) en el que se prohibían las detonaciones en superficie, bajo el agua y en la atmósfera; las limitantes impuestas por este tratado, que sólo fue firmado por tres de los cuatro países que contaban con armas nucleares en ese entonces (Estados Unidos, Reino Unido y la URSS), no eran suficientes para asegurar que la radiación emitida por una detonación nuclear pudiera ser contenida en el área donde se realizaban los ensayos, por lo que en 1974 Estados Unidos y la URSS acordaron que la carga máxima de material detonado sería de

150 kt, además de que debían realizar ensayos únicamente en sitios designados. Sin embargo, estas restricciones sólo las cumplieron los países involucrados en el tratado, por lo que otros como China, Francia, Reino Unido, etc., seguían realizando pruebas nucleares con cargas considerablemente grandes (Adushkin y Leith, 2001).

Por ello, en 1996 se propuso el primer Tratado internacional que busca la participación de todos los países del mundo con y sin armamento o capacidad nuclear. Dicho tratado prohíbe la realización de todo tipo de ensayos nucleares sin importar la zona en la que se realizan, el tamaño o el propósito de la prueba. El Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (TPCEN o CTBT por sus siglas en inglés) no ha entrado en vigor, ya que algunos países con potencial nuclear no han firmado ni ratificado este convenio, entre ellos destacan India y Pakistán, que realizaron ensayos en 1998, así como Corea del Norte que detonó dispositivos nucleares en 2006, 2009, 2013, 2016 y el más reciente en 2017. El objetivo del Tratado es el de prevenir que nuevas armas nucleares sean desarrolladas, así como el evitar que las existentes sean detonadas. Todo esto con el fin de fomentar la paz mundial, la protección del medio ambiente y el bienestar del ser humano (salud).

El CTBT cuenta con un régimen de verificación para asegurarse de que ningún evento nuclear pase desapercibido. Este régimen se compone de tres ramas, la primera es el Sistema Internacional de Monitoreo (IMS) que está formado por diferentes estaciones distribuidas en todo el planeta: sísmicas, hidroacústicas, infrasónicas y de radionucleidos. La función principal de las estaciones es monitorear y definir la zona en la que se sospecha que se llevó a cabo un ensayo nuclear, midiendo de manera global las ondas sísmicas generadas por la explosión (estaciones sísmicas), los niveles de radiactividad en la atmósfera (estaciones de radionucleidos), las ondas propagadas en el mar (estaciones hidroacústicas) y aquellas cuyas frecuencias son imperceptibles para el oído humano (< 20Hz).

La segunda rama del régimen de verificación son las inspecciones *in situ*, OSI por sus siglas en inglés (on Site Inspection), que son las mediciones de verificación final que se realizan directamente sobre el área sospechosa. Este tipo de estudios son de gran importancia ya que algunas pruebas nucleares que se realizan en el subsuelo, a cierta profundidad, no presentan evidencias o vestigios de su realización en la superficie, por lo que demostrar y/o verificar que un evento nuclear se llevó a cabo en esa

zona depende de los resultados de estos (Westphal y Rubin, 1964).

Las inspecciones *in situ* (McCann *et al.*, 1987) constan de diferentes técnicas geofísicas entre las que se encuentran la sísmica de fuente controlada, la prospección magnética, gravimétrica, MT, sondeos eléctricos verticales, tomografías, etc.; utilizadas para detectar anomalías como cavidades, túneles, pozos, cables o cualquier evidencia que pruebe que se realizó un ensayo nuclear, lo que implicaría una violación al CTBT.

Hasta el momento sólo se han realizado dos inspecciones *in situ* porque el Tratado no ha entrado en vigor y por lo tanto no se cuenta con la autorización y los permisos para realizar este tipo de estudios en el territorio del país o países sospechosos de realizar un ensayo nuclear. Como consecuencia, la información relacionada con este tipo de escenarios es escasa, por lo que la simulación o modelado numérico resulta una herramienta muy útil para obtener resultados aproximados a los que se obtendrían en campo.

En este trabajo se presentan los resultados de la simulación de propagación de ondas en un medio con una estructura generada por una explosión nuclear. Estos podrían representar una contribución importante para las Inspecciones *in situ* a la hora de interpretar secciones sísmicas, ya que a través de los sismogramas sintéticos, productos de la simulación, se puede conocer el comportamiento de este tipo de estructuras en la sísmica, lo que facilitaría su caracterización.

Por último, la tercer rama del régimen de verificación es el centro internacional de datos con sede en Viena, cuya principal tarea es la de recibir y procesar lo datos recabados en las diferentes estaciones y distribuirlos a cada uno de los países que forman parte del tratado.

1.2. Trabajos relacionados

En el conocimiento del autor, no existe un trabajo en el que se describa el efecto de una caverna generada por una explosión nuclear subterránea en los datos sísmicos. Sin embargo, en la literatura se encuentran reportados diferentes casos en los que se

busca y encuentra la firma sísmica de cavernas con características específicas.

Uno de estos trabajos es el reportado por Coren *et al.* (1998), donde utilizan la simulación numérica de propagación de onda acústica, usando el método de elementos espectrales, como una herramienta para identificar el comportamiento de una cavidad rellena de salmuera embebida en un medio de dos capas. Ellos realizan una comparación de datos reales con los resultados de la simulación (datos sintéticos) para detectar la ubicación de cavidades rellenas de agua en una mina de sal.

Mohanty (2011) emplea el método de diferencias finitas para generar una sección sísmica de offset zero (apilado) con la finalidad de localizar cavidades cuadradas rellenas de aire y agua en un medio estratificado. Los algoritmos del modelado de offset cero están basados en la ecuación de onda acústica unidimensional. Una vez que obtiene los resultados del modelado, hace una comparación de la sección numérica con una sección de datos reales de alta resolución, ambas secciones migradas en profundidad, y logra identificar y ubicar las cavidades presentes en la zona de estudio.

Esterhazy *et al.* (2017) estudian la aplicabilidad del método de elementos espectrales en la propagación de ondas acústicas, en el dominio de la frecuencia, en un escenario generado por una explosión subterránea. El modelo que utilizan consiste de un semiespacio bidimensional con una cavidad localizada en el centro de éste. Debido a que la cavidad es muy pequeña comparada con el medio, utilizan elementos triangulares para discretizar el semiespacio. Ellos concluyen que el método de elementos espectrales resuelve satisfactoriamente el problema de la cavidad.

El trabajo que se presenta a continuación sería el primero en considerar una estructura más compleja, incluyendo una cavidad y zona fragmentada, resolviendo la ecuación de onda elástica en el dominio del tiempo con el método de elementos espectrales, considerando elementos cuadriláteros para discretizar la derivada espacial.

1.3. Hipótesis

Una cavidad generada por una explosión nuclear presenta una firma sísmica característica que la hace reconocible en datos sísmicos de exploración.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Encontrar la firma sísmica característica de una caverna, resultado de una explosión nuclear, por medio de simulaciones numéricas de propagación de ondas en modelos con cavidades.

1.4.2. Objetivos específicos

- Discretizar modelos de complejidad incremental de las cavidades.
- Hacer la simulación de propagación de ondas en los diferentes modelos.
- Generar sismogramas de cada uno de los modelos.
- Comparar los sismogramas sintéticos para determinar el efecto de las cavernas en los datos sísmicos.

Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se describen los modelos geológicos reportados en la literatura para cavernas generadas por una explosión nuclear subterránea, así como el método numérico con el que se realizan las simulaciones de propagación de ondas.

2.1. Configuración estructural de la caverna

El término "ensayo nuclear subterráneo" se define como la detonación casi simultánea de una o más cargas nucleares dentro de una excavación subterránea (un túnel o pozo). Las dimensiones y la configuración estructural de una roca después de una explosión nuclear subterránea dependen de diferentes factores como el tipo de emplazamiento utilizado para la prueba, de la cantidad de material detonado (kt), de las condiciones geológicas de la zona y de la profundidad a la que se realiza la explosión (estructura camuflada o expuesta) (Adushkin y Leith, 2001).

En base al tipo de emplazamiento, las explosiones nucleares subterráneas pueden ser clasificadas en dos grupos: *explosiones en pozo o en túnel*. Los efectos de cada una de ellas, en la roca encajonante, difieren considerablemente principalmente en los espesores de las zonas afectadas por la explosión (Belyashov *et al.*, 2014).

Existen diferentes modelos geológicos reportados en la literatura:

- Johnson *et al.*(1959) definen el radio de la cavidad generada por una explosión subterránea con un emplazamiento en túnel.
- Boardman *et al.* (1964) describen los modelos generados por una explosión nuclear en cuatro diferentes tipos de roca, así como las propiedades elásticas de cada una de ellas.
- Higgins (1969), en este modelo se especifican las zonas afectadas por una explosión subterránea en una roca granítica.
- Rodean (1968) describe el modelo de una cavidad en sal.

Todos los modelos mencionados anteriormente cuentan con información sobre los radios de la cavidad generada por una explosión, sin embargo, los modelos presentados por Adushkin y Spivak (2004) son los más completos, ya que cuentan con información tanto de los alcances de las zonas de daño como de las velocidades de propagación de las ondas P, que es información necesaria para la implementación de la simulación numérica.

Basados en estudios realizados en el sitio de prueba Semipalatinsk, Adushkin y Spivak (2004) establecieron los modelos geológicos tanto para las explosiones en pozo como en tunel. Ellos definen las siguientes zonas de desintegración para una explosión en **pozo** (fig. 1):

1. **Cavidad.** *Con un radio de $10-13.6 \text{ m/kt}^{1/3}$.* Generalmente está llena de gas, suele estar rodeada por una capa delgada de roca fundida, consecuencia de las altas temperaturas. Al fondo de ésta se depositan restos de roca, cuyos tamaños varían desde los 3 a 5 cm.
2. **Zona de roca triturada.** *Con un espesor relativo de $3-4 \text{ m/kt}^{1/3}$.* Las rocas en esta zona se han transformado en material suelto con fragmentos de no más de 3 cm de diametro.
3. **Zona de roca fragmentada.** *Con distancias de $24-34 \text{ m/kt}^{1/3}$.* Zona formada por fragmentos de roca cuyos tamaños van de los 2 a los 7 cm de diametro. Generalmente esta zona presenta una forma asimétrica determinada por las condiciones de la roca antes de la explosión.
4. **Zona de intenso fracturamiento.** *Con espesores de $50-55 \text{ m/kt}^{1/3}$.* Zona caracterizada por la aparición de nuevas grietas a lo largo de microfisuras, la dirección suele ser radial.
5. **Zona de bloque fracturado.** *Con un radio de $65-70 \text{ m/kt}^{1/3}$.* En esta zona no se forman nuevas grietas, las pre-existentes a la detonación son "abiertas" ante el paso de las ondas por la roca.
6. **Zona de cambios locales irreversibles.** *Con radios de más de $100 \text{ m/kt}^{1/3}$.* Se refiere a la zona máxima donde pueden ocurrir los siguientes eventos: desplazamientos anómalos de rocas, apertura y activación de fallas y grietas en la zona,

etc.

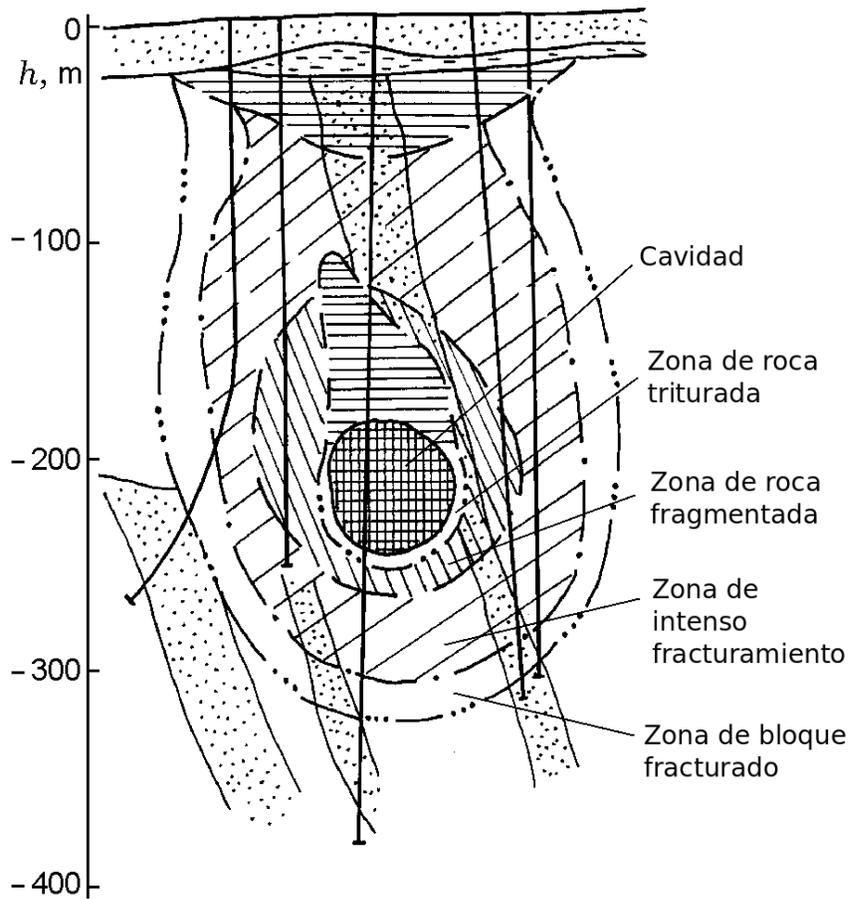


Figura 1. Configuración estructural de una caverna generada por una explosión nuclear en pozo (Adushkin et al., 2004).

Las zonas afectadas por una explosión en **túnel** son:

1. **Cavidad.** Con un radio de $7-10 \text{ m}/kt^{1/3}$.
2. **Zona de roca triturada.** Localizada a distancias de $12-14 \text{ m}/kt^{1/3}$ desde el epicentro de la explosión.
3. **Zona de deformación inelástica de las rocas.** Es observada a distancias de $35-40 \text{ m}/kton^{1/3}$. Dentro de esta zona se encuentran dos subzonas:
 - a) **Subzona de fragmentación** A distancias de $20-25 \text{ m}/kt^{1/3}$. Se caracteriza por presentar pequeños trozos de roca al inicio de la zona y piezas de docenas de centímetros en zonas más alejadas del punto de detonación.

- b) **Subzona de nuevas grietas** A distancias de hasta $35-40 \text{ m/kt}^{1/3}$. El número total de grietas incrementa en un factor de 2 a 4 veces más que antes de la explosión.
4. **Zona de deformación inelástica de bloque (Macizo)**. A distancias de hasta $120-130 \text{ m/kt}^{1/3}$. No se generan nuevas grietas en esta zona, sin embargo las pre-existentes pueden alcanzar espesores de hasta 10-50 mm en zonas débiles. (La velocidad de la onda P decrece en un 5-10% del valor inicial)
5. **Zona de deformación inelástica local**. Localizada a distancias de $200-220 \text{ m/kt}^{1/3}$.

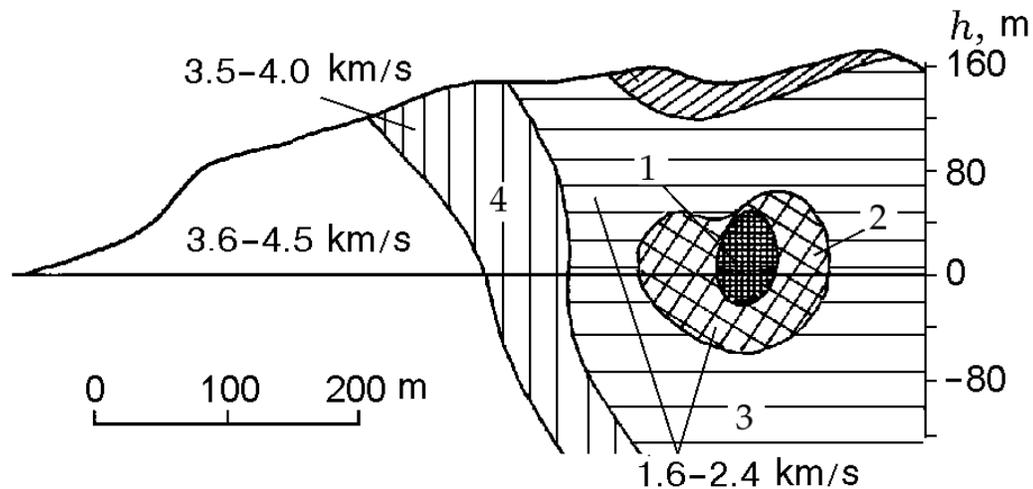


Figura 2. Configuración estructural de una caverna generada por una explosión nuclear de 12.5 kt con emplazamiento en túnel: 1)Cavidad, 2) Zona de roca triturada, 3) Zona de deformación inelástica de las rocas, 4) Zona de deformación inelástica de bloque (Adushkin *et al.*, 2004).

Conforme aumenta la profundidad a la que se realiza un ensayo nuclear, también lo hacen la densidad de la roca y la presión litostática, lo que resulta generalmente en una reducción de tamaños de las zonas de deformación mencionadas anteriormente, así como en una configuración estructural cuasi-esférica (Belyashov *et al.*, 2014).

2.2. Método de elementos espectrales (SEM)

La simulación de propagación de ondas es considerada una técnica predictiva cuyo principal objetivo es entender y determinar el comportamiento de las ondas en un

medio con características específicas.

Existen diferentes métodos con los que se puede obtener la solución numérica de la ecuación de onda, sin embargo, tomando en cuenta las condiciones y características del problema de la caverna, en este trabajo se utiliza el método de elementos espectrales ya que es capaz de resolver problemas con superficies irregulares, además de ser un método que converge rápidamente.

El método de elementos espectrales (Cohen, 2002) o SEM por sus siglas en inglés (Spectral Element Method), es una variante de elementos finitos (Hughes, 2000) que usa polinomios de orden superior para representar el campo de ondas, con lo que se reduce la dispersión y anisotropía numérica (De Basabe y Sen, 2007).

SEM presenta ciertas ventajas sobre otros métodos numéricos, por ejemplo, el que los elementos puedan deformarse a tal grado que estos se ajusten a la topografía o a la forma del medio que quiera ser discretizado, y es que SEM está basado en la formulación débil (integral) de la ecuación de onda lo que permite el manejo de elementos de diferentes tamaños. Sin embargo, este método también presenta cierto inconveniente relacionado con la malla que se utiliza para resolver la derivada espacial, si ésta no se define adecuadamente puede introducir errores numéricos como las ondas espurias (Sanz *et al.*, 1990).

2.2.1. Formulación débil de la ecuación de onda

Partiendo de la ecuación de movimiento en notación indicial (Aki y Richards, 2002):

$$\rho \partial_{tt} u_i = \sigma_{ij,j} - m_{ij,j} - f_i \quad \text{en } \Omega \times (0, T), \quad \text{con } i, j = 1, 2, \dots, d, \quad (1)$$

donde d son las dimensiones, $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ es una región del espacio, $(0, T)$ es el dominio en el tiempo, u_i es el vector de desplazamiento, σ_{ij} es el tensor de esfuerzos, $m_{ij,j}$ el tensor de momento y f_i es un vector de fuerzas, los dos últimos representan el término de fuente.

El tensor de esfuerzos, definido por la ley de Hooke, para un medio isotrópico está

dado como:

$$\sigma_{ij} = \lambda u_{k,k} \delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

donde λ y μ son los parámetros elásticos de Lamé y δ_{ij} es la delta de Kronecker.

Sustituyendo la definición del tensor de esfuerzos en términos del desplazamiento en la ecuación 1, se obtiene la ecuación de onda elástica:

$$\rho \partial_{tt} u_i - (\lambda u_{k,k} \delta_{ij})_{,j} - (\mu(u_{i,j} + u_{j,i}))_{,j} = m_{ij} + f_i \quad \text{en } \Omega \quad (3)$$

Con las siguientes condiciones:

$$u_i = 0 \quad \text{en } \Gamma_g \quad (4)$$

$$\lambda u_{k,k} n_j + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) n_j = 0 \quad \text{en } \Gamma_h \quad (5)$$

$$u_i = \partial_t u_i = 0 \quad \text{para } t = 0 \quad (6)$$

donde $\Gamma_h \cup \Gamma_g = \partial\Omega$ (frontera de Ω) y n_i es un vector unitario ortogonal a la frontera del dominio ($\partial\Omega$).

Si multiplicas la ecuación 3 por un vector arbitrario w_i , llamado vector de prueba, e integras sobre Ω , aplicando el teorema de Gauss, se obtiene la forma débil de la ecuación de onda elástica:

$$\int_{\Omega} (\lambda u_{i,i} w_{j,j} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) w_{i,j}) dx dz + \partial_{tt} \int_{\Omega} \rho u_i w_i dx dz = \int_{\Omega} (m_{ij,j} + f_i) w_i dx dz \quad (7)$$

donde

$$u_i, w_i \in S = \{ \varphi \mid \int_{\Omega} (|\varphi|^2 + |\nabla \varphi|^2) < \infty, \quad \varphi = 0 \quad \text{en } \Gamma_g \}$$

S es el espacio de funciones en el que buscamos la solución del problema y es un espacio de Sobolev de primer orden (H^1) sujeto a las condiciones de frontera. Es importante mencionar que dentro de este espacio se encuentra una solución única al problema (Sanz *et al.*, 1990).

Para poder discretizar la ecuación anterior en 2D, que consta de un espacio funcional de dimensión infinita S , es necesario introducir un subespacio de dimensiones finitas S_h . El subespacio finito S_h se compone de combinaciones lineales de $N_i(x, z)$ con $i = 1, 2, \dots, \eta$, donde η es el número de nodos, conocidas como funciones bases, és-

tas se definen haciendo una división del dominio Ω en elementos y se caracterizan por tener soporte local, es decir, las funciones valen 1 en un nodo y cero en el resto de ellos.

Si $u_i \in S$ es la solución que buscamos, el Método de los Elementos Finitos proporciona una solución aproximada $u_h(x, z, t) \in S_h$ dada por:

$$u_h^i(x, z, t) = \sum_{j=1}^{\eta} \alpha_j^i(t) N_j(x, z), \quad (8)$$

donde i representa la componente del desplazamiento, sea x o z , α_j^i son los coeficientes de las aproximaciones de las componentes horizontal y vertical del vector de desplazamiento. El término h hace referencia a una longitud característica asociada con el tamaño de la discretización del dominio Ω .

Sustituyendo u_i por la aproximación $u_h^i(x, z, t)$, $w_i = (N_i, 0)^T$ y $w_i = (0, N_i)^T$ en la formulación débil de la ecuación de onda elástica, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias lineales:

$$M_{ij} \partial_{tt} \alpha_j^x + K_{ij}^1 \alpha_j^x + K_{ij}^2 \alpha_j^z = F_i^x \quad (9)$$

y

$$M_{ij} \partial_{tt} \alpha_j^z + K_{ij}^3 \alpha_j^x + K_{ij}^4 \alpha_j^z = F_i^z \quad (10)$$

donde M_{ij} es la matriz de masa, $K_{ij}^{1,2,3,4}$ las matrices de rigidez y α_j^x y α_j^z son los coeficientes de aproximación del desplazamiento

Las matrices de las ecuaciones 9 y 10 están definidas como (De Basabe, 2011):

$$M_{ij} = \int_{\Omega} \rho N_i N_j dx dz, \quad (11)$$

$$K_{ij}^1 = \int_{\Omega} ((\lambda + 2\mu) N_{i,x} N_{j,x} + \mu N_{i,z} N_{j,z}) dx dz, \quad (12)$$

$$K_{ij}^2 = \int_{\Omega} (\lambda N_{i,x} N_{j,z} + \mu N_{i,z} N_{j,x}) dx dz, \quad (13)$$

$$K_{ij}^3 = \int_{\Omega} (\lambda N_{i,z} N_{j,x} + \mu N_{i,x} N_{j,z}) dx dz, \quad (14)$$

$$K_{ij}^4 = \int_{\Omega} ((\lambda + 2\mu) N_{i,z} N_{j,z} + \mu N_{i,x} N_{j,x}) dx dz, \quad (15)$$

$$F_i^x = \int_{\Omega} f_x N_i dx dz, \quad (16)$$

$$F_i^z = \int_{\Omega} f_z N_i dx dz. \quad (17)$$

La matriz M_{ij} está determinada por la distribución de densidades dentro del dominio, las matrices $K_{ij}^{1,2,3,4}$ se obtienen de las propiedades elásticas del medio y los vectores F_i^x y F_i^z a partir de la fuente usada para generar las ondas (De Basabe, 2011).

Nótese que, para poder resolver numéricamente el problema, es necesario realizar la inversión de la matriz de masa en cada paso de tiempo y he aquí la importancia de utilizar nodos que hacen que estas matrices sean diagonales y fácilmente invertibles.

En SEM hay diferentes tipos de nodos, sin embargo para este trabajo se utilizan los nodos de Gauss Lobatto Legendre (GLL) (Cohen, 2002).

2.2.2. Errores numéricos de discretización

En el modelado de la propagación de ondas elásticas existen varios errores asociados a diferentes efectos numéricos, dependiendo de la discretización en tiempo y en espacio. Para evitar alguno de ellos la selección de las mallas espaciales y temporales deben hacerse cuidadosamente.

2.2.2.1. Dispersión numérica

La dispersión numérica es un tipo de ruido relacionado con la discretización espacial, se presenta cuando la velocidad de propagación de las ondas en el semiespacio es diferente a la velocidad real.

En el caso del método de elementos espectrales, Komatitsch y Tromp (1999) proponen la siguiente condición para evitar que se presente dispersión:

$$\lambda_{min} = \frac{Nl + 1}{\Delta h}, \quad \Delta h = \frac{Nl + 1}{\lambda_{min}} \quad (18)$$

donde λ_{min} es la longitud de onda, Nl es el orden de los polinomios usados para representar las funciones en un elemento y Δh es el tamaño del elemento. Es decir, según la relación 18, se requieren $Nl + 1$ nodos por longitud de onda para evitar que el fenómeno de dispersión numérica aparezca.

Por otro lado, De Basabe y Sen (2007) realizan un análisis de dispersión numérica y reportan que para tener un mínimo efecto de dispersión en los datos, haciendo uso de polinomios de orden 3 ó mayores, se requieren de 4 a 5 nodos por longitud de onda con una pérdida de precisión mínima.

La longitud de onda mínima en el semiespacio es calculada mediante la siguiente relación:

$$\lambda_{min} = \frac{V_{min}}{f}. \quad (19)$$

La velocidad que se considera en esta restricción es la de la onda más lenta, en este caso corresponde a la velocidad de las ondas superficiales.

2.2.2.2. Criterio de estabilidad

Se dice que un método o algoritmo numérico es estable si la diferencia entre la solución exacta y la solución numérica se mantiene acotada ó constante conforme el

índice de tiempo avanza.

El tamaño de paso o salto en tiempo (Δt) es un factor que está directamente relacionado con la precisión de los resultados obtenidos (De Basabe y Sen, 2007) .

En el presente trabajo la discretización de la derivada temporal se realiza haciendo uso del método de diferencias finitas centradas de segundo orden, cuyo criterio de estabilidad es:

$$\Delta t_{max} = C \frac{h_{min}}{V_{max}}, \quad (20)$$

donde C es una constante que depende del método que se esté utilizando para discretizar la derivada espacial, h_{min} es el tamaño del elemento más pequeño presente en la malla y V_{max} es la velocidad máxima de propagación de la onda. Para el método de elementos espectrales de orden 4, C es igual a 0.12 (De Basabe y Sen (2010)).

Capítulo 3. Metodología

3.1. Modelo geológico

Tomando como base los modelos presentados en el capítulo anterior y por simplificación a la hora de realizar el mallado para SEM, se considera una estructura geológica completamente esférica, además se toma la consideración de que el medio antes de la detonación es completamente homogéneo e isotrópico, por lo que la zona de bloque fracturado no es considerada en este diseño.

En la figura 3 se muestra el modelo de la caverna propuesto para las simulaciones numéricas.

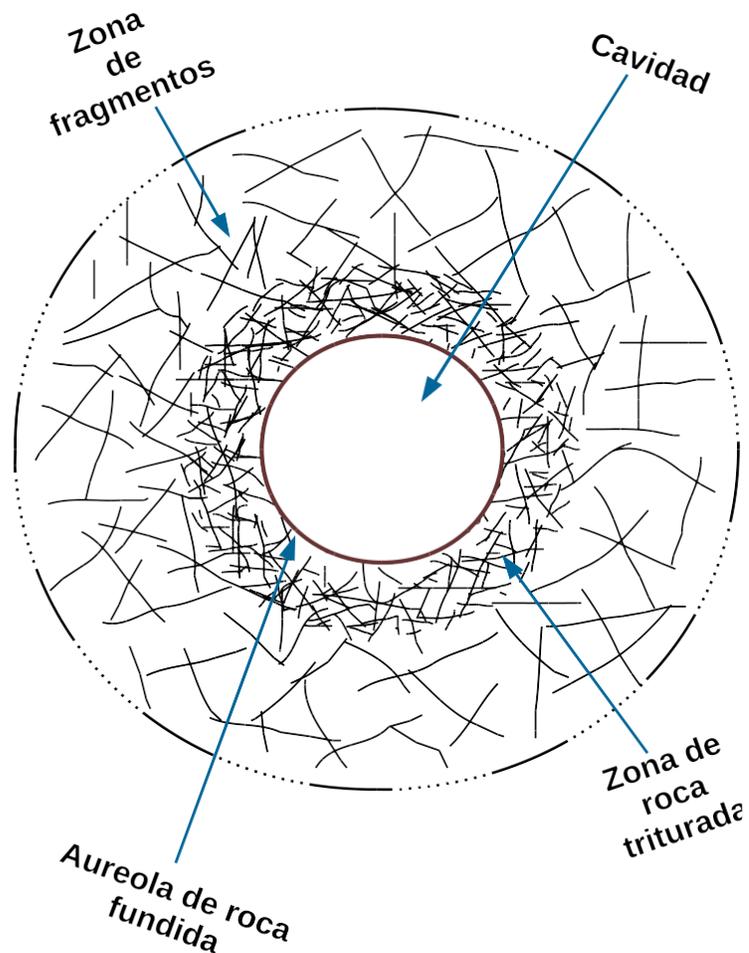


Figura 3. Configuración estructural de una caverna ideal generada por una explosión nuclear, modificada de Terhune (1972).

3.1.1. Propiedades elásticas de la roca

Las propiedades de un granito, utilizado como una de las rocas principales para realizar ensayos nucleares, reportadas por Boardman *et al.* (1964) se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Propiedades elásticas del granito.

Densidad, estado natural, g/cm^3	2.67
Densidad de grano, g/cm^3	2.69
Porosidad, %	0.9
Velocidad compresional, km/s	5.52
Velocidad de corte, km/s	3.38

Las propiedades de la zona fragmentada no están reportadas en la literatura, sin embargo es posible calcularlas a partir de información reportada por Adushkin y Spivak (2004), dónde se especifica la velocidad de propagación de la onda P ($2.4km/s$) y el aumento de la porosidad de esta zona.

Tomando la relación entre V_p y V_s de la tabla 1 (granito),

$$\frac{V_{p_{gran}}}{V_{s_{gran}}} = \frac{5.52km/s}{3.38km/s} \approx 1.64, \quad (21)$$

y asumiendo que la velocidad de la onda P en la zona fragmentada es $2.4km/s$, la velocidad de la onda de corte en esta zona es:

$$V_{s_{zf}} = \frac{V_{p_{zf}}}{1.64} \approx 1.54km/s. \quad (22)$$

Considerando que la porosidad en la zona fragmentada aumenta 5 veces la inicial (granito sano), es decir, 5.4% y que la densidad de grano es $2.69g/cm^3$ (tabla 1), se puede calcular la densidad de la roca en la zona fragmentada con la siguiente relación (Ver Anexo 1):

$$\rho_{zf} = (1 - \eta_0)\rho_{gran} \quad (23)$$

dónde ρ_{zf} es la densidad de la roca fragmentada, η_0 la porosidad de la misma zona y ρ_{gran} es la densidad de grano.

Entonces, la densidad de la zona de fragmentos es:

$$\rho_{zf} = (1 - 0.054)2.69g/cm^3 = 2.54g/cm^3 \quad (24)$$

Tabla 2. Propiedades elásticas de la zona fragmentada.

Densidad, g/cm^3	2.54
Porosidad, %	5.4
Velocidad compresional, km/s	2.40
Velocidad de corte, km/s	1.50

En lo que respecta a la cavidad, se considera que está vacía y por lo tanto las ondas no se propagan a través de ella.

3.2. Modelos incrementales

En el presente trabajo se proponen realizar modelos de complejidad incremental, a fin de que la respuesta sísmica de la estructura final generada por la explosión nuclear pueda ser identificada y diferenciada de otras, por ejemplo de una caverna natural, que presenta una estructura más sencilla.

Estos modelos consisten en:

- 1) Caso homogéneo,
- 2) Semiespacio que contiene únicamente una cavidad generada por la explosión y
- 3) Semiespacio que considera tanto a la cavidad como la zona de roca fragmentada.

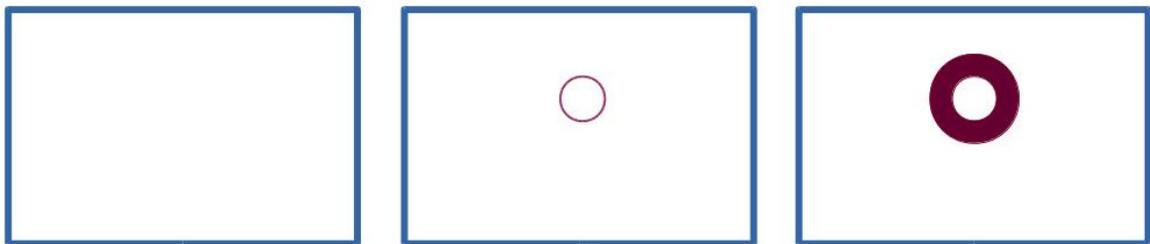


Figura 4. Modelos incrementales.

Las propiedades elásticas que se emplean para cada modelo son las enlistadas en las tablas 1 y 2. Para el modelo 1) se emplean las propiedades de un granito sano; para el modelo 2) se considera el mismo semiespacio con una cavidad vacía, por lo que las ondas no se propagan a través de ella. Por último, en el modelo 3) se utilizan las propiedades elásticas tanto del granito no alterado como las de la zona fragmentada, y al igual que en el modelo 2) la cavidad está vacía.

Se propusieron modelos más complejos en los que se incluían la zona de fracturas y la zona de escombros dentro de la caverna, sin embargo, al momento de la realización de la tesis no se contaba con la información necesaria para poder realizar la simulación numérica (propiedades elásticas). Además de que para poder resolver el modelo de la caverna incluyendo fracturas, era necesario hacer uso de otro método numérico: Galerkin Discontinuo (De Basabe *et al.*, 2011).

3.3. Tamaños de cavernas

Se propusieron 5 diferentes tamaños de cavidades y cavernas en función de la carga detonada: 1 kt, 10 kt, 20 kt, 100 kt y 600 kt.

El alcance de cada zona afectada por la explosión nuclear, para las diferentes cargas detonadas, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Alcance de las zonas afectadas por UNE en función de la carga detonada.

Carga detonada	Zonas afectadas	Distancia en metros
1 kt	Cavidad	10m.
	Zona de roca triturada	4m.
	Zona de roca fragmentada	25m.
10 kt	Cavidad	22m.
	Zona de roca triturada	9m.
	Zona de roca fragmentada	54m.
20 kt	Cavidad	27m.
	Zona de roca triturada	11m.
	Zona de roca fragmentada	62m.
100 kt	Cavidad	46m.
	Zona de roca triturada	19m.
	Zona de roca fragmentada	116m.
600 kt	Cavidad	85m.
	Zona de roca triturada	34m.
	Zona de roca fragmentada	211m.

Los modelos de interés para este trabajo son los tres primeros, ya que según Johnson *et al.* (1959), las explosiones nucleares que no presentan evidencias en la superficie son aquellas cuya carga detonada es menor a 19 kt a una profundidad de 400 m.

3.4. Simulación numérica

3.4.1. Elaboración de mallas

La malla o la discretización espacial, es uno de los requisitos más importantes a la hora de implementar SEM ya que los resultados de la simulación numérica dependen directamente de la calidad de ésta. La malla puede introducir diferentes errores numéricos como la dispersión o aparición de ondas espurias, que son fenómenos que no tienen una interpretación física.

Para generar las mallas de los diferentes escenarios geológicos (modelos incrementales) se hace uso del programa Trelis (Csimsoft¹), que es un software especializado

¹<https://www.csimsoft.com>

en el diseño y creación de mallas de alta calidad para el método de elementos finitos (Csimsoft, 2013-2018).

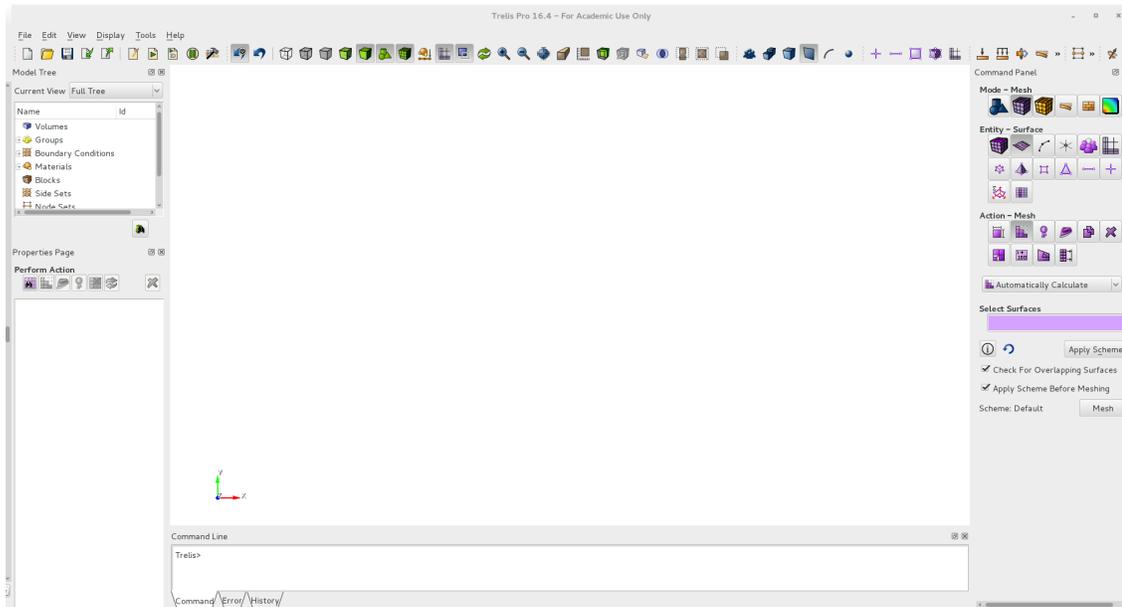


Figura 5. Interfaz gráfica del software Trelis.

Trelis cuenta con una serie de algoritmos para realizar distintos mallados que se adapten mejor a las condiciones del problema que se presente. Las mallas pueden hacerse con elementos triangulares ó cuadriláteros en dos dimensiones, y con hexaedros o tetraedros para casos tridimensionales.

Los elementos utilizados en este trabajo son cuadriláteros, ya que se trata de un caso en dos dimensiones, además de que el software que se emplea para realizar la simulación (SWP) funciona únicamente con este tipo de elementos.

Para poder elaborar una malla en Trelis, primero es necesario definir la geometría que represente el escenario geológico del problema, indicando si es un caso 2D o 3D, para ello se cuenta con una serie de formas básicas que pueden combinarse entre ellas. Para el caso bidimensional es importante definir el plano en el que va a ser creada la geometría.

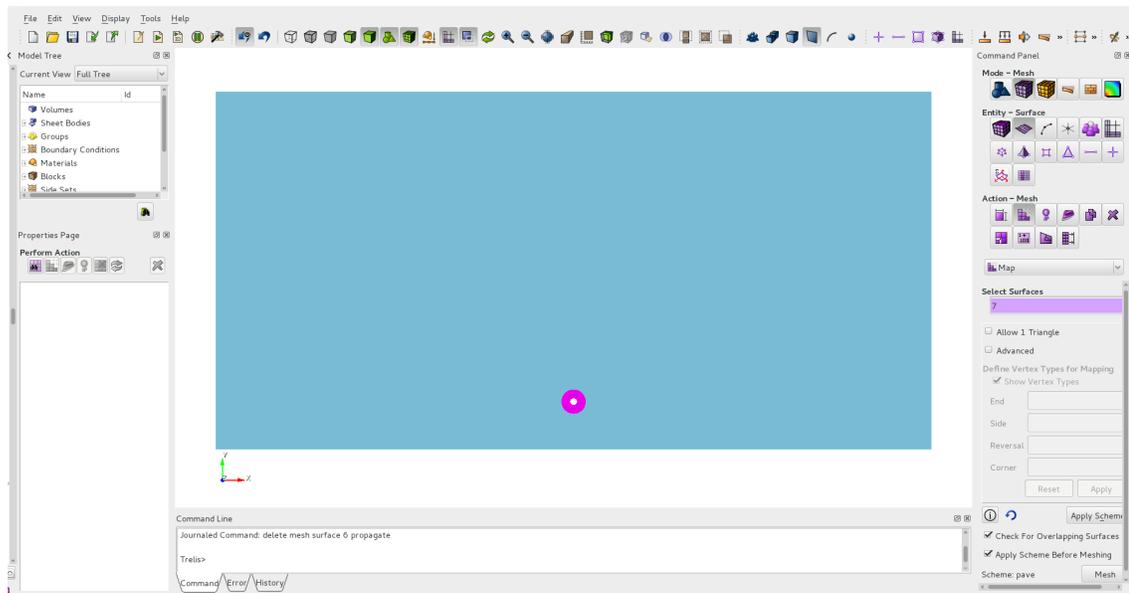


Figura 6. Geometría de un semiespacio con una caverna creada con el software Trelis.

Una vez que se tiene la geometría, se procede a realizar el mallado: debe indicarse la superficie que se desea discretizar, el algoritmo que quiere utilizarse y el tamaño de los elementos.

Los algoritmos con los que cuenta Trelis para discretizar una geometría bidimensional son: Map, Submap, Pave, QuadDominant, Trimesh, TriPrimitive, Circle, Hole, Polyhedron, TriAdvance y TriDelaunay. Los dos primeros se emplean en casos en los que las superficies son regulares, la forma de los elementos es completamente cuadrada. El tercer algoritmo hace un ajuste en el tamaño y forma de los elementos a fin de que estos se ajusten a superficies irregulares, solo emplea elementos cuadrados. El algoritmo QuadDominant, ajusta las superficies irregulares con elementos que en su mayoría son cuadriláteros, sin embargo, también permite la aparición de algunos triángulos. Trimesh y TriPrimitive ajustan superficies haciendo uso de elementos triangulares. Circle y Hole son algoritmos que se emplean para casos en los que se quiere discretizar un cuerpo circular. Polyhedron es un algoritmo que ajusta superficies irregulares permitiendo que los elementos tengan un número arbitrario de lados; por último TriAdvance y TriDelaunay son algoritmos que discretizan escenarios irregulares buscando que los elementos triangulares sean lo más regulares posible (Csimsoft, 2013-2018).

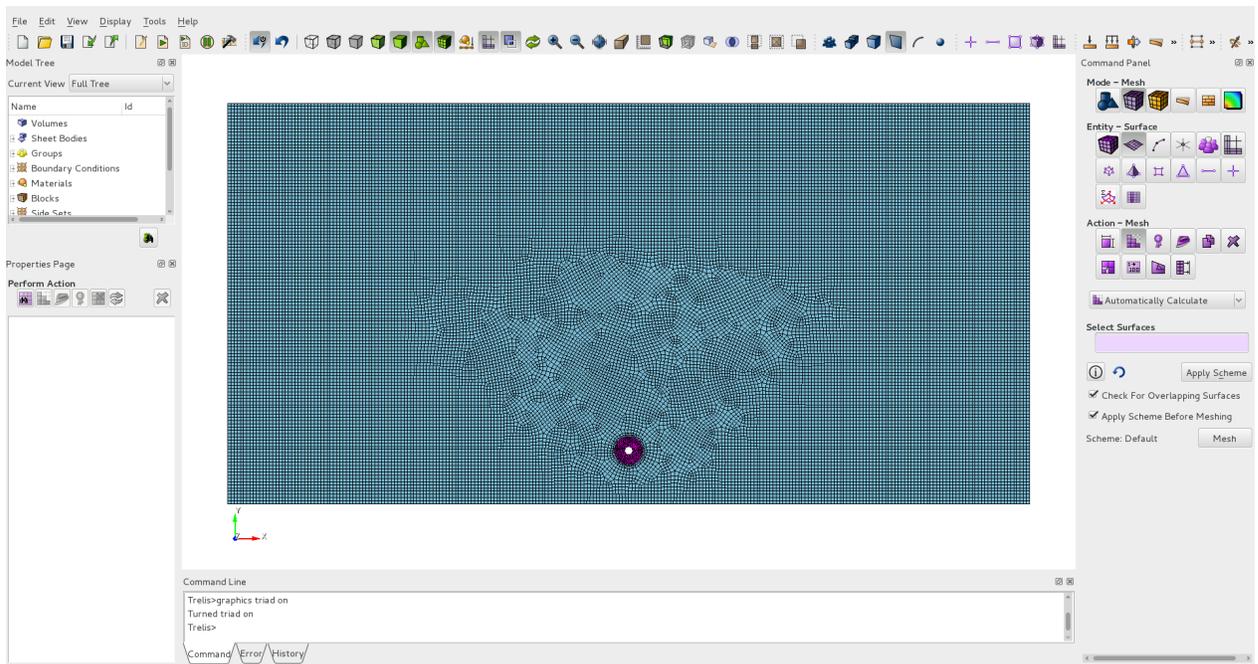


Figura 7. Malla de un semiespacio con una caverna de 20 kt empleando el algoritmo pave.

Para generar las mallas de los modelos incrementales se utilizaron dos algoritmos: en el caso del semiespacio homogéneo se usó el algoritmo *Submap*, ya que es una superficie regular y por lo tanto todos los elementos son cuadrados (fig. 8); para los modelos de la cavidad y la caverna se utilizó el algoritmo *Pave*, que fue el que ajustó adecuadamente los elementos cuadriláteros a la forma de la estructura (Ver figuras 9 y 10).

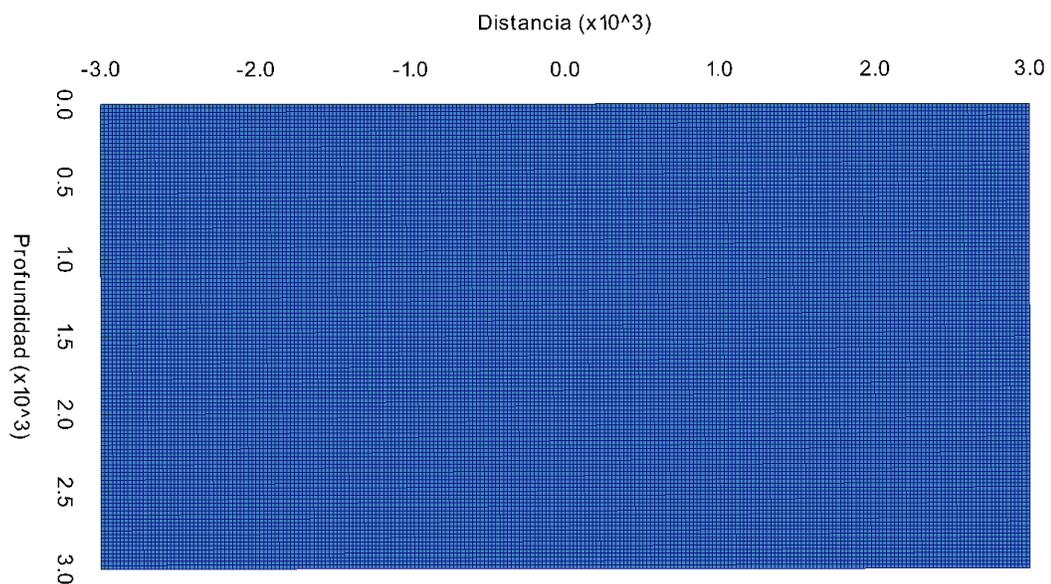


Figura 8. Ejemplo de malla generada con Trelis para un semiespacio homogéneo.

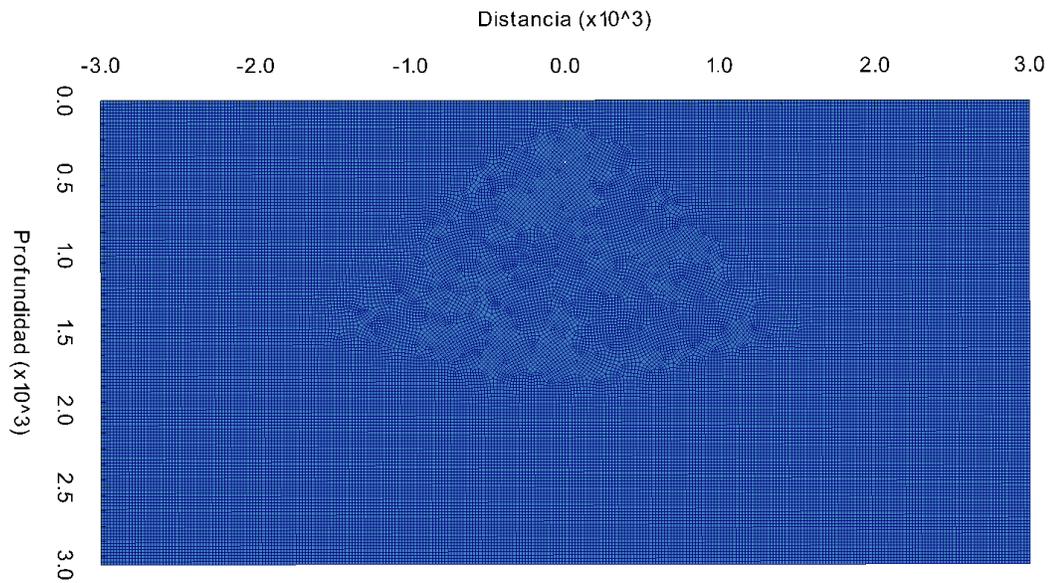


Figura 9. Malla de un semiespacio con una cavidad de 1 kt.

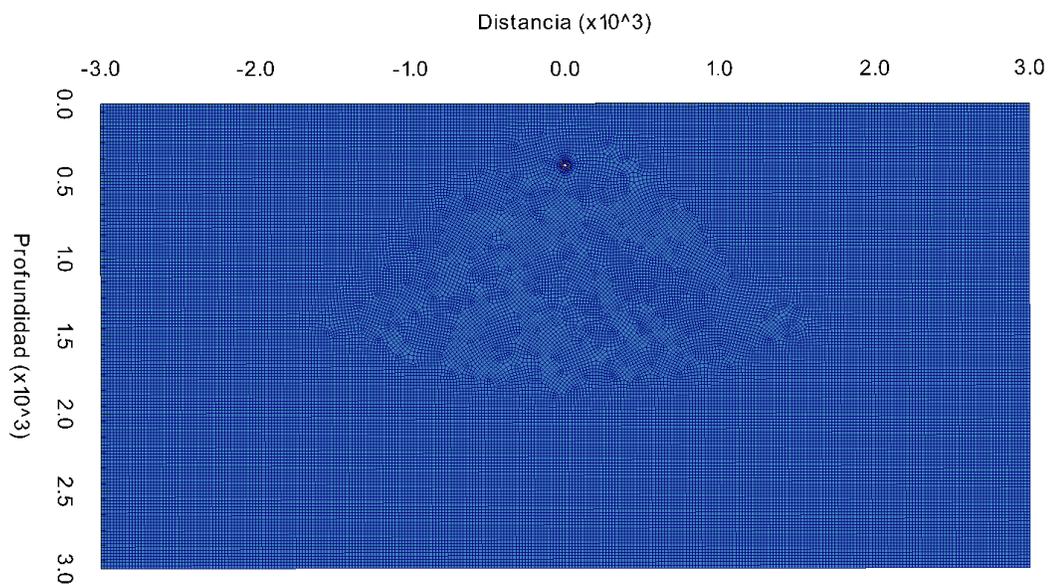


Figura 10. Malla de un semiespacio con una caverna de 1 kt.

En los modelos de la cavidad y la caverna, se puede observar que el mallado no es simétrico, a pesar de que la configuración de la estructura si lo es. También es importante notar que la zona de elementos deformados es más extensa en los modelos de las cavernas, que son modelos que incluyen la zona fragmentada (Ver figuras 11 y 12).

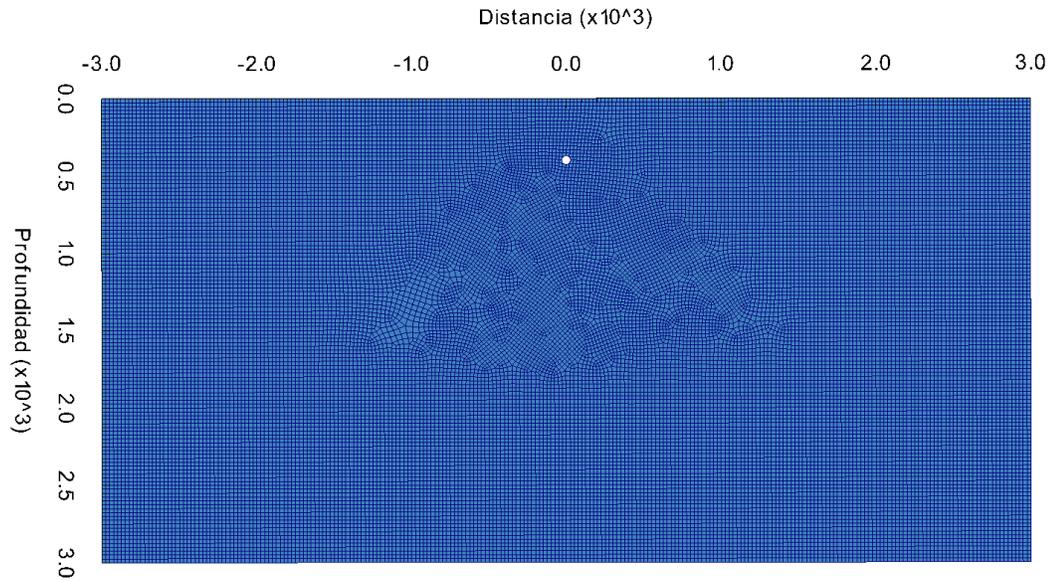


Figura 11. Malla de un semiespacio con una cavidad de 20 kt.

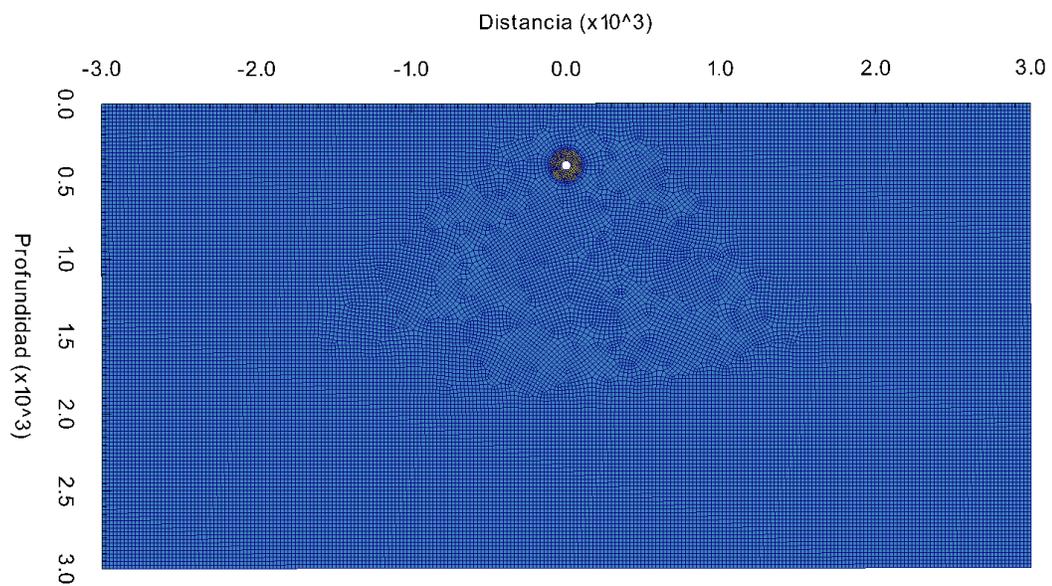


Figura 12. Malla de un semiespacio con una caverna de 20 kt.

En el presente trabajo, la malla es diseñada de tal forma que se evita utilizar algún tipo de condición en las fronteras, es decir, se considera un semiespacio lo suficientemente grande para no tener el efecto de las reflexiones en los bordes laterales a la hora de obtener los registros del campo de ondas. Las condiciones que se implementan son la de superficie libre en $z=0$ y condiciones tipo Neumann en los bordes laterales de la malla.

Los tamaños de las mallas para los diferentes modelos que se generan (cavidades

y cavernas) son los mismos: 6000 metros en el eje x y 3000 metros de profundidad (z). Se considera que z aumenta hacia abajo, como en la mayoría de los problemas de sismología.

La ubicación de la cavidad para todos los escenarios es $(0, 400)m$, lo que se modifica en cada modelo son las dimensiones de la cavidad y zona fragmentada, según sea el caso. Sin embargo, estas modificaciones hacen que el mallado para cada caso sea diferente como se observa en las figuras 9 y 10.

Como se menciona en el capítulo anterior, los elementos en la malla deben tener un tamaño máximo para que el fenómeno de la dispersión numérica no se presente. El tamaño de los elementos está determinado por la longitud de onda más pequeña, que en este caso, corresponde a la de las ondas superficiales (Rayleigh).

Si suponemos que $V_{os} \approx 0.9V_S$ para un coeficiente de Poisson $\nu = 0.25$ ($\alpha = \sqrt{3\beta}$)(Mavko *et al.*, 2009), donde V_{os} es la velocidad de las ondas superficiales y V_S la velocidad de las ondas de corte, entonces para el dominio que corresponde al granito sano la velocidad de las ondas de Rayleigh es:

$$0.9 * 3.38 \text{ km/s} = 3.042 \text{ km/s} \quad (25)$$

Si consideramos una fuente cuya frecuencia pico es de 50 Hz, entonces la longitud de onda mínima en el granito será:

$$\lambda_{min} = \frac{3042m/s}{50Hz} = 60.84m \quad (26)$$

Para la sección que corresponde a la zona fragmentada, el tamaño del elemento está determinado por la longitud de onda de la onda S, es decir:

$$\lambda_{min} = \frac{1500m/s}{50Hz} = 30m \quad (27)$$

Se realizaron diferentes pruebas para determinar el tamaño óptimo del elemento con las propiedades elásticas mencionadas en las tablas 1 y 2, esto debido a que las mallas son irregulares y los elementos no son completamente cuadrados en los casos de la cavidad y la caverna. Para el caso homogéneo el tamaño óptimo del elemento es de 25 m en cada lado, en el caso de la cavidad el tamaño mínimo del elemento es de 9m

y el máximo de 42 m; para la caverna el tamaño mínimo y máximo es de 4 m y 50 m, respectivamente.

Además de considerar el tamaño de los elementos para evitar el fenómeno dispersivo, también es importante considerar la zona en la que se presentan los cambios de velocidades, por ejemplo, en el contacto granito sano-cavidad, granito sano-zona fragmentada o en la iterfase zona fragmentada-cavidad. La transición del tamaño de los elementos debe ser gradual para que los resultados de SEM sean correctos (Komatitsch y Tromp, 1999). Este problema es resuelto adecuadamente por el software Trelis. En la figura 13 se puede observar el ajuste que hace el programa en los elementos para que haya una transición de un medio a otro, nótese el tamaño de los elementos en el borde entre la zona fragmentada (color amarillo) y la parte del granito (color azul).

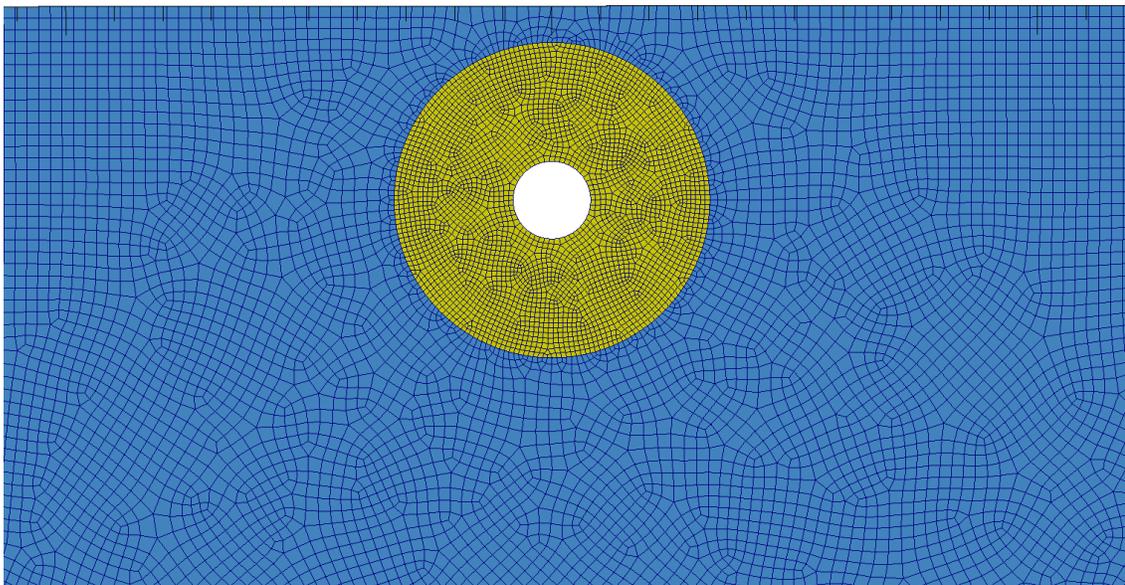


Figura 13. Malla de un semiespacio con una caverna de 600 kt.

3.4.2. Implementación de SEM

Para implementar el método de elementos espectrales se usó el código SWP (Seismic Wave Propagation) desarrollado por el Dr. De Basabe en lenguaje C++ (De Basabe, 2009).

Con este software se puede realizar la simulación de propagación de ondas acústi-

cas y elásticas empleando diferentes métodos numéricos como diferencias finitas con mallado intercalado, elementos espectrales de diferentes ordenes y Galerkin Discontinuo, en dos y tres dimensiones, para discretizar la derivada espacial.

Dentro del código se puede escoger el tipo de operador que se desea utilizar para discretizar la derivada temporal, además se consideran los coeficientes para la estabilidad de los diferentes métodos. También es posible seleccionar entre varios tipos de fuentes sísmicas: fuente tensorial, fuente vectorial con orientación vertical u horizontal, ondas planas, etc. Las condiciones de frontera absorbentes, tipo Neumann y las de superficie libre también están incluidas dentro del código.

Como resultado de la simulación pueden obtenerse sismogramas, trazas sísmicas y snapshots (representación del campo de ondas) en diferentes formatos: binarios, Exodus II, Netcdf, etc.

En este trabajo se utiliza el método de elementos espectrales de orden 4 para discretizar la derivada espacial, el operador de diferencias finitas de segundo orden centradas para discretizar la derivada temporal, además se emplea una fuente vectorial, tipo Ricker, orientada verticalmente con una frecuencia pico de 50Hz.

3.4.3. Diseño de adquisición

Se refiere al arreglo o configuración con la que se haría una prospección sísmica en el terreno sobre la caverna generada por la explosión nuclear, simulando una inspección en sitio (OSI).

El arreglo consta de 66 geófonos colocados sobre la superficie del terreno, con una distancia entre ellos de 12.5 metros. La posición del primer receptor es (-406.25,0), y siendo una configuración simétrica, la posición del último receptor es (406.25,0). La fuente se encuentra localizada en la posición (0,0) (Ver figura 14).

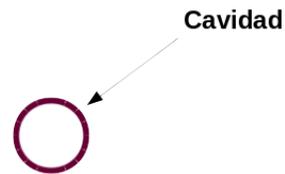
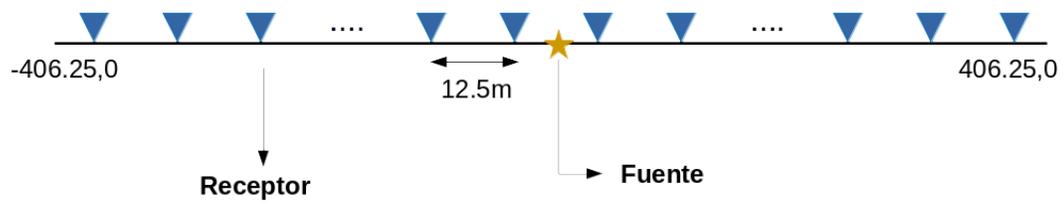


Figura 14. Arreglo geométrico de adquisición sísmica.

Con esta configuración es que se obtienen los sismogramas que se presentan en la sección de resultados. Por lo tanto, cada "gather" cuenta con 66 trazas. El intervalo de muestreo es el mismo para todos los datos: 0.08 milisegundos (calculado a partir de la ecuación 20). El tiempo de grabación es de 528 milisegundos que corresponden a 6600 muestras.

3.5. Sección monocanal

Una sección monocanal es la imagen preliminar del subsuelo que se obtendría al realizar un levantamiento con un sólo par fuente-receptor, que se mueven juntamente a lo largo de un arreglo manteniendo constante la distancia entre ellos (offset).

Para obtener las secciones que se presentan en el capítulo 4, se emplea la configuración representada en la figura 14, asumiendo que la fuente se mueve a lo largo del tendido cada 25 metros, siendo (-400,0) la posición del primer disparo y (400,0) la del

último. De esta forma se obtienen 33 *gathers* (conjunto de trazas) de la misma región del espacio.

Las secciones solo se generan para la cavidad y caverna de 20 kt, que son las de mayor interés en este trabajo, debido a que estas representan el límite de la carga que puede ser detonada a una profundidad de 400 metros sin presentar indicios en superficie; además solo se elaboran para la componente vertical del desplazamiento.

En cada disparo se guardan los registros de los 66 geófonos, sin embargo, para crear la sección monocanal sólo se considera la información proporcionada por el receptor que se encuentra más cerca de la fuente (offset cercano positivo).

Capítulo 4. Resultados y Discusión

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones numéricas para los tres modelos de complejidad incremental.

Los resultados se dividen en tres secciones: la primera es la sección del caso homogéneo, la segunda corresponde al modelo incremental de la cavidad y la tercer sección corresponde a la del modelo de la caverna. Se presentan gathers con su correspondiente interpretación, así como algunos snapshots en dónde puede observarse la interacción de los diferentes frentes de ondas y las estructuras. Los “snapshots” son instantáneas en las que se visualiza la propagación del campo de ondas a diferentes tiempos. En este trabajo sólo se presentan snapshots para el caso homogéneo (fig. 17) y para las estructuras de 20 kilotonnes (fig. 24) y 35).

Para facilitar la interpretación, en la tabla 4 se presenta la nomenclatura utilizada en los gathers con su respectiva descripción. Las letras “zf” y “cv” representan la zona en la que se refleja la onda incidente: zona fragmentada o cavidad.

Tabla 4. Nomenclatura de ondas.

Nomenclatura	Descripción
DP	Onda Directa P.
DS	Onda Directa S.
PPcv	Onda incidente P y reflejada P.
PScv	Onda incidente P y reflejada S.
SPcv	Onda incidente S y reflejada P.
SScv	Onda incidente S y reflejada S.
PPPcv	Primer multiple de PP, reflejada P.
PPScv	Primer multiple de PP, reflejada S.
PPPPcv	Segundo multiple de PP, reflejada P.
PPzf	Onda incidente P y reflejada P en zona fragmentada.
PSzf	Onda incidente P y reflejada S en zona fragmentada.
SPzf	Onda incidente S y reflejada P en zona fragmentada.
SSzf	Onda incidente S y reflejada S en zona fragmentada.

4.1. Caso homogéneo

El primer modelo incremental es el caso de un medio homogéneo. A continuación se presentan los gathers (figuras 15 y 16) y algunos snapshots (fig.17) correspondientes a este modelo.

En los gathers sólo están presentes los arribos de las ondas P y S directas. En los snapshots se observa el patron de radiación de la fuente utilizada en la simulación numérica, se aprecian el frente de onda de la onda P, el de la onda S y las ondas superficiales.

En los snapshots de ambas componentes, horizontal y vertical, se aprecia el fenómeno de la divergencia esférica: conforme el frente de ondas se propaga la amplitud disminuye.

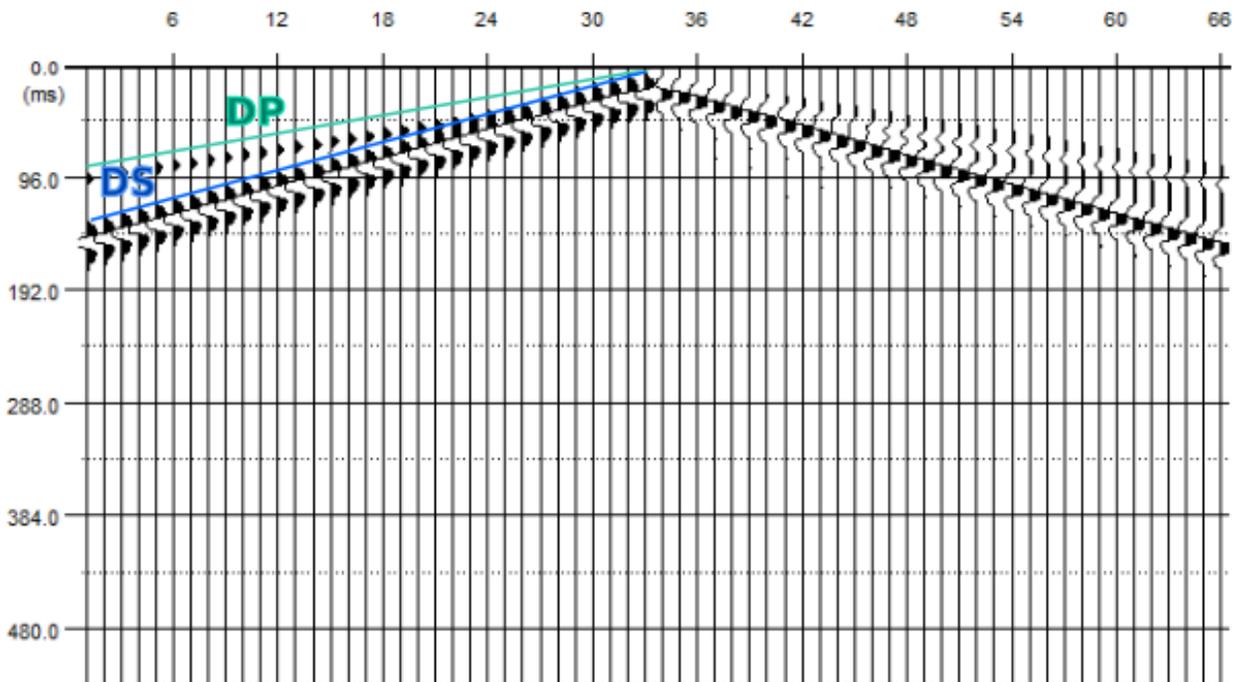


Figura 15. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio homogéneo.

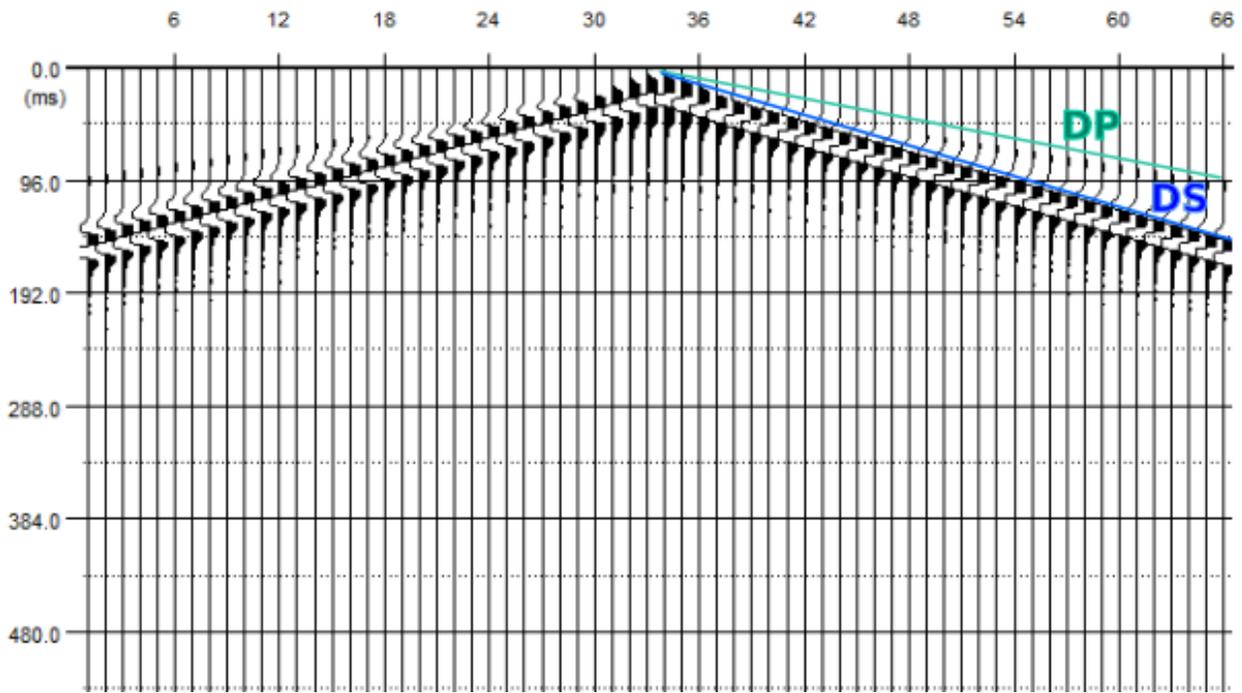
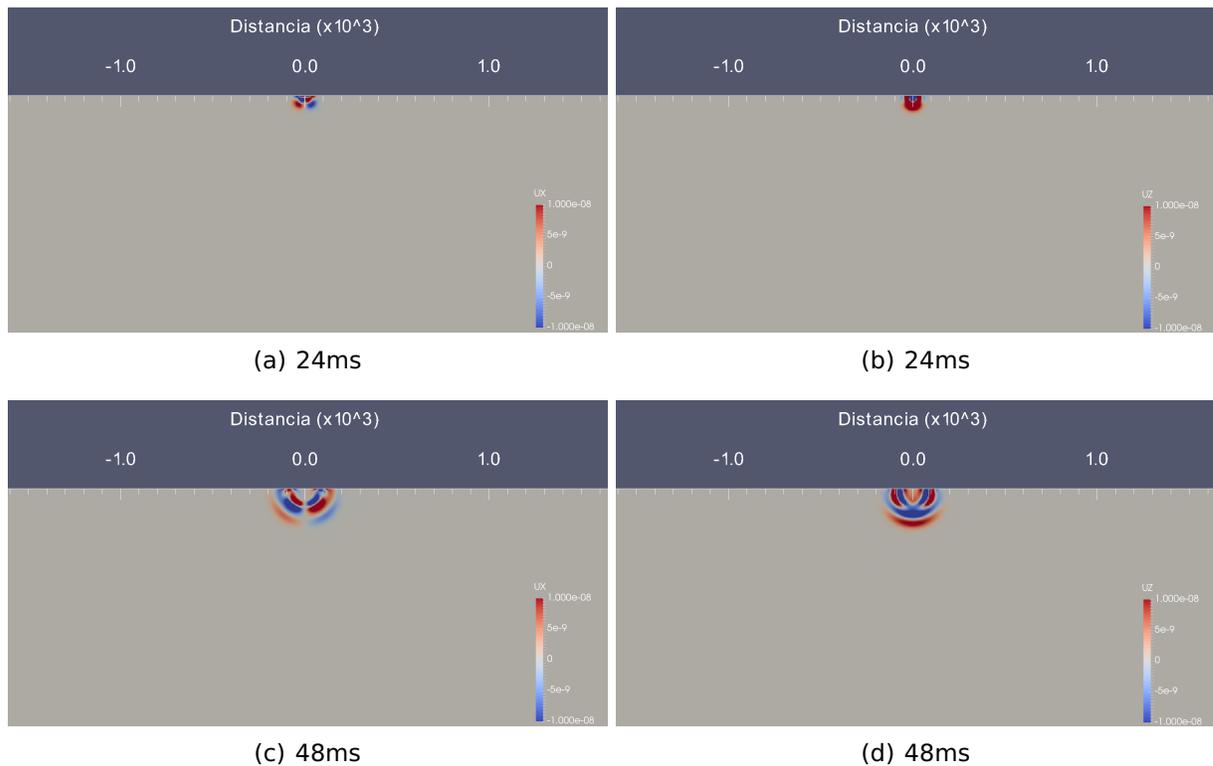


Figura 16. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio homogéneo.

4.1.1. Representación del campo de ondas



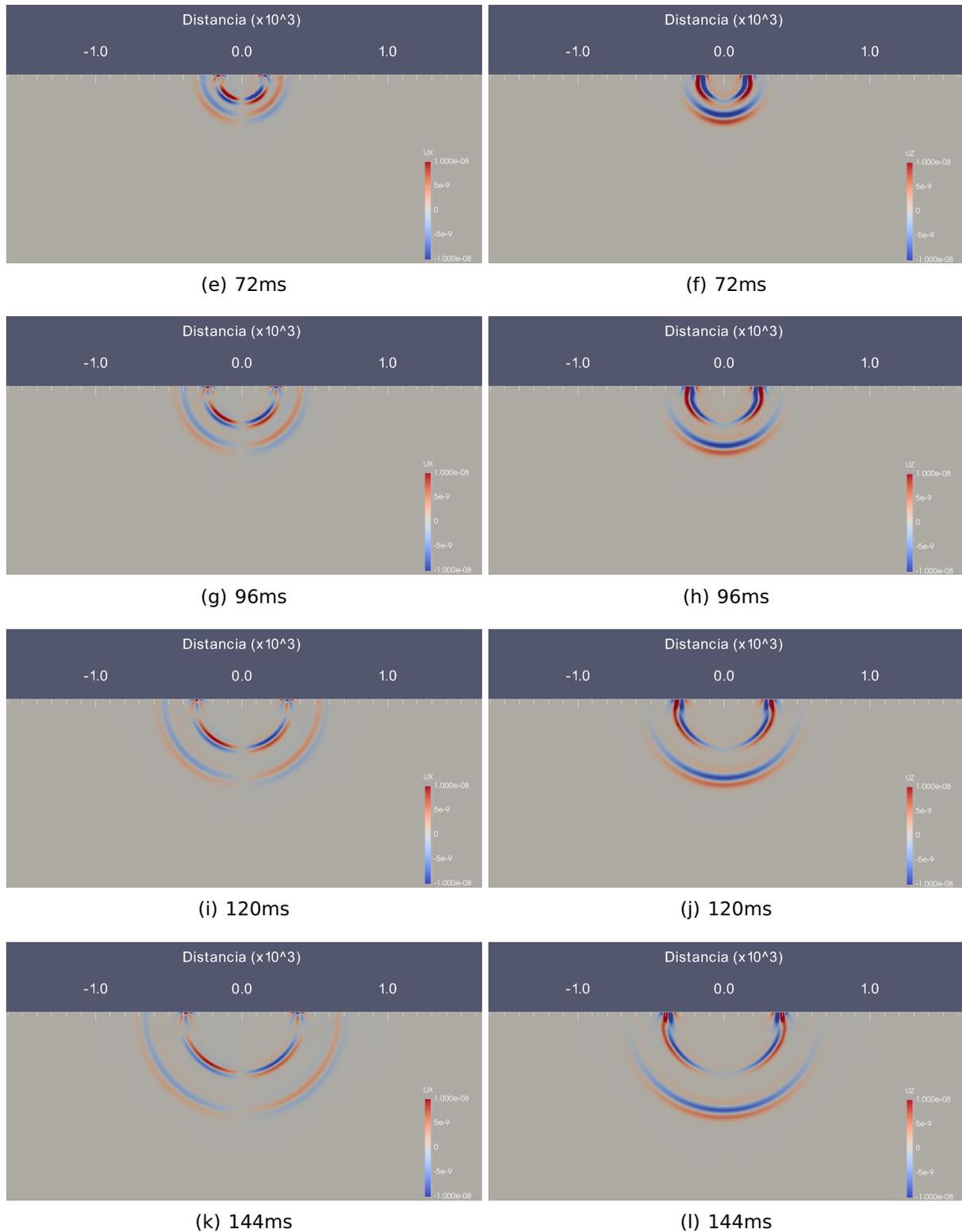


Figura 17. Propagación del campo de ondas en un medio homogéneo. Imágenes en la columna izquierda corresponden a la componente horizontal del desplazamiento (U_x), imágenes en la columna derecha corresponden a la componente vertical del desplazamiento (U_z).

4.2. Cavidades

En esta sección se muestran los resultados de las simulaciones para las cavidades de 1, 10, 20, 100 y 600 kilotones. Además en la subsección de 20 kilotones se presentan snapshots en los que se observa la propagación del campo de ondas.

1 kilotón

Las reflexiones más notorias en los gathers son las correspondientes a la onda P incidente: PP_{CV} y PS_{CV} , sobre todo en las trazas de la componente vertical (fig. 19); las amplitudes de la onda SS_{CV} son pequeñas y sólo se observan en algunas trazas de offset lejano, sin embargo, se puede inferir la forma del frente de onda siguiendo la tendencia de las amplitudes. En la componente vertical (fig. 19) las amplitudes de la onda PP_{CV} son continuas y coherentes, mientras que para la onda PS_{CV} se desvanecen conforme el offset se reduce, lo mismo pasa para la onda SS_{CV} . Esto debido al *scattering* generado por la forma de la cavidad, cuando la onda P incide en la superficie de la cavidad la energía es dispersada rápidamente. En la componente horizontal (fig. 18) las amplitudes de todos los frentes de ondas, en el offset cercano, son nulas debido al patrón de radiación de la fuente utilizada en las simulaciones.

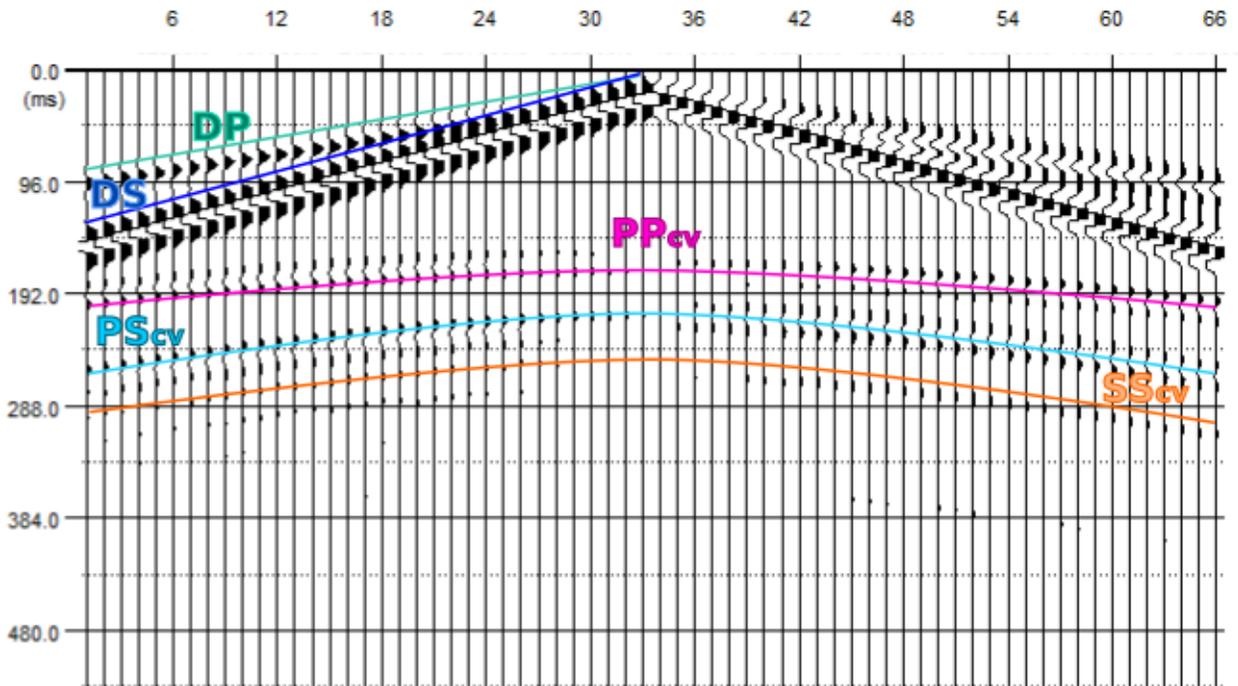


Figura 18. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 10m.

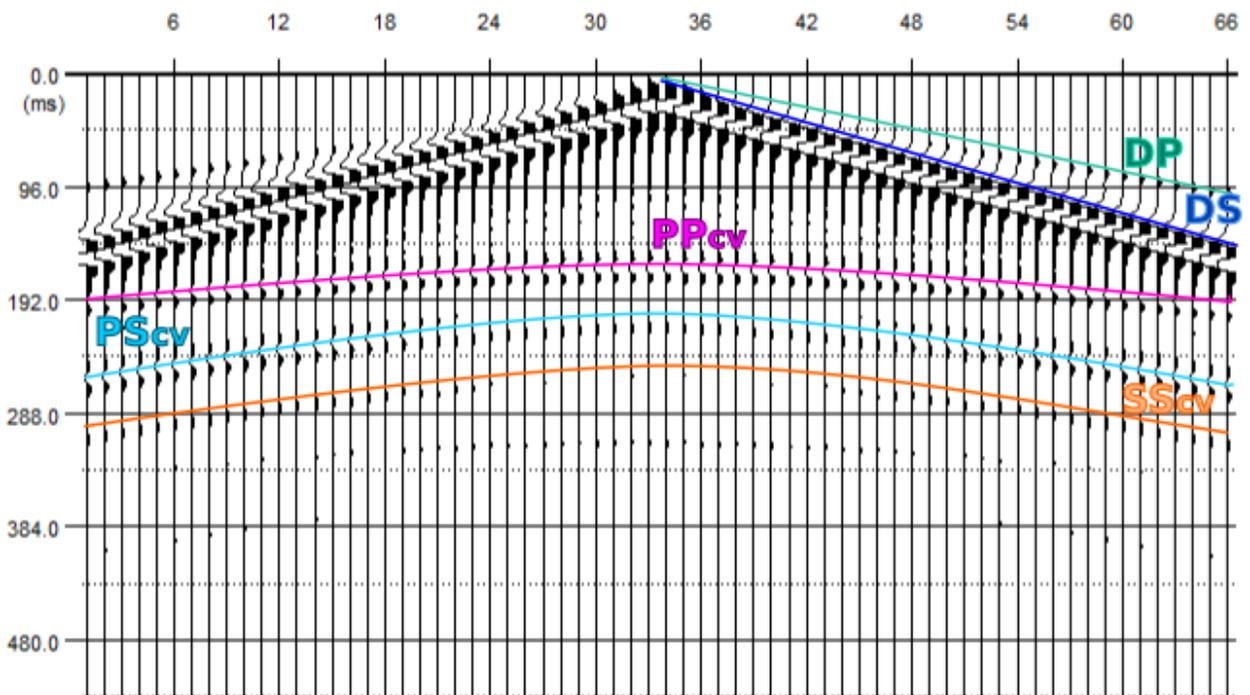


Figura 19. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 10m.

10 kilotones

En los gathers de la cavidad de 10 kilotones se observan amplitudes más definidas, las ondas PP_{CV} y PS_{CV} pueden delinearse en ambas componentes, las amplitudes del frente de onda SS_{CV} son claras y permiten determinar con mayor precisión el arribo de la onda. En la componente vertical (fig. 21) puede observarse el primer múltiple de la onda P, la onda PPP_{CV} , mientras que en la componente horizontal (fig. 20) las amplitudes que la definen no son coherentes.

Debajo del frente de onda PPP_{CV} se logran distinguir amplitudes que pudieran ser asociadas a otra onda, sin embargo su tendencia no es clara en ninguno de los gathers de las componentes, por lo que se decidió no marcarla.

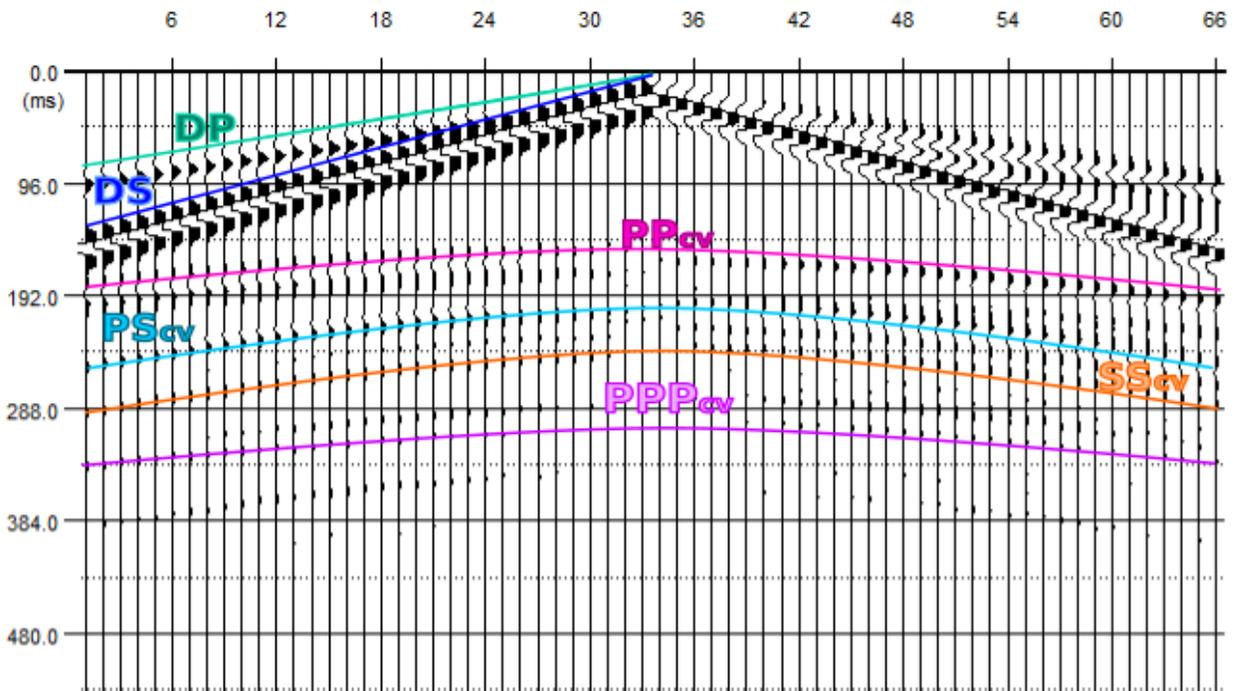


Figura 20. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 22m.

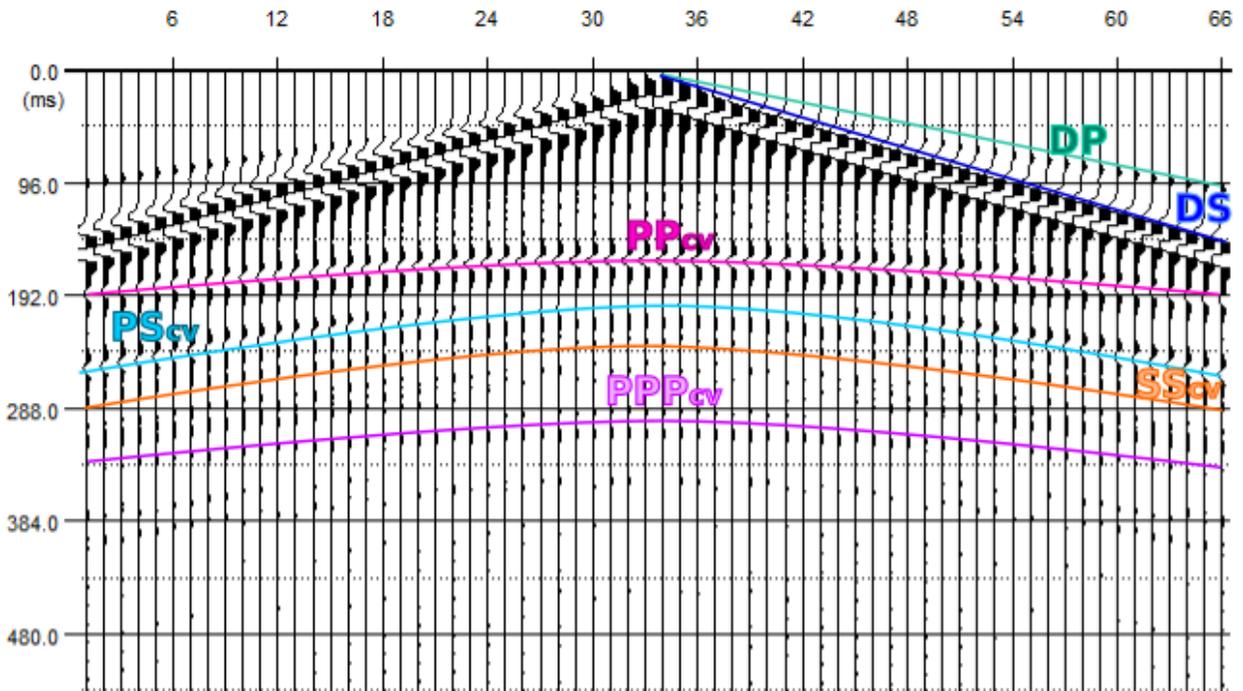


Figura 21. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 22m.

20 kilotones

Para este tamaño de cavidad las amplitudes de las ondas PP_{cv} y PS_{cv} son continuas para todos los offsets en la componente vertical (fig. 23), la onda SS_{cv} se define claramente en ambas componentes, los extremos del frente de onda de la onda PPP_{cv} son más evidentes en la componente horizontal (fig. 22), mientras que en offsets cercanos, se puede definir mejor en la componente vertical.

Por debajo del multiple PPP_{cv} se observa la onda PPS_{cv} que logra definirse apropiadamente en la componente horizontal, en la componente vertical las amplitudes asociadas a esta onda no están bien definidas.

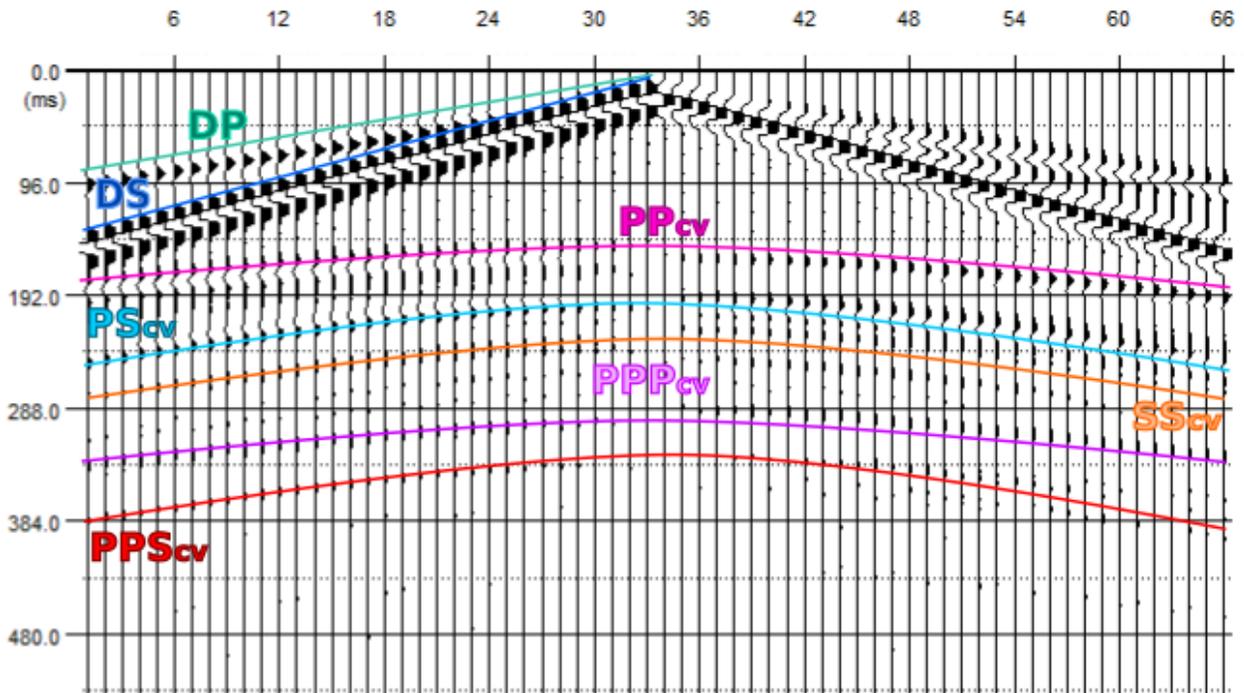


Figura 22. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 27m.

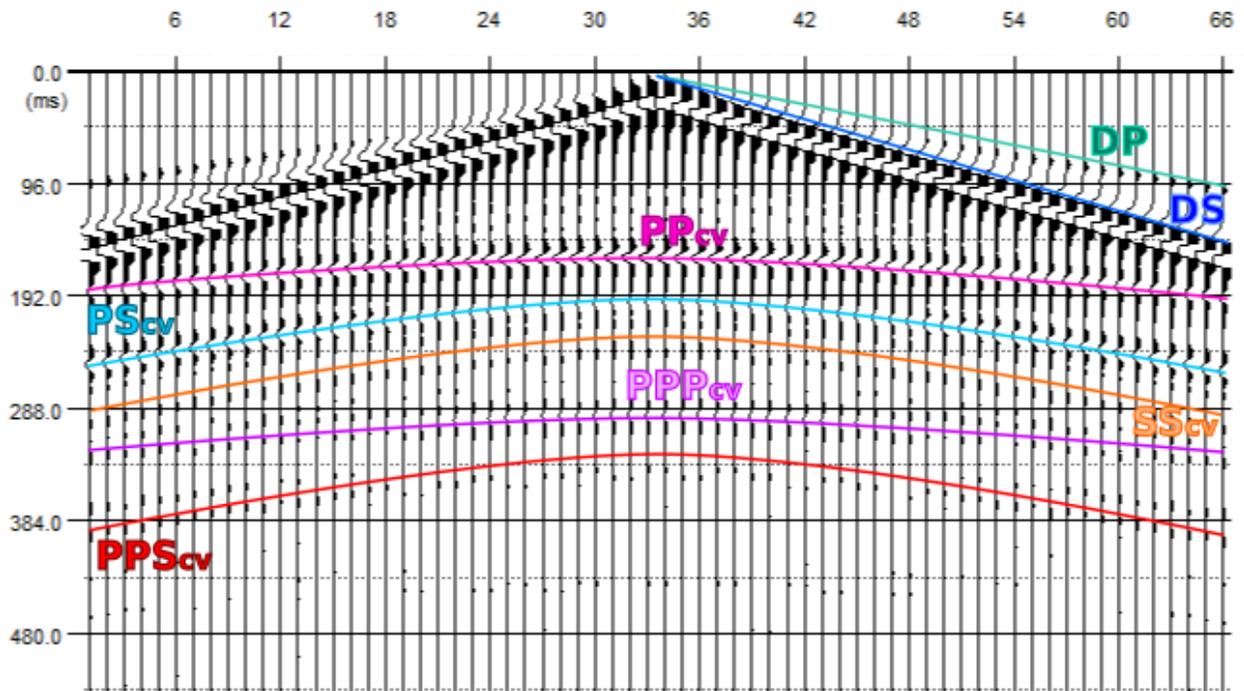
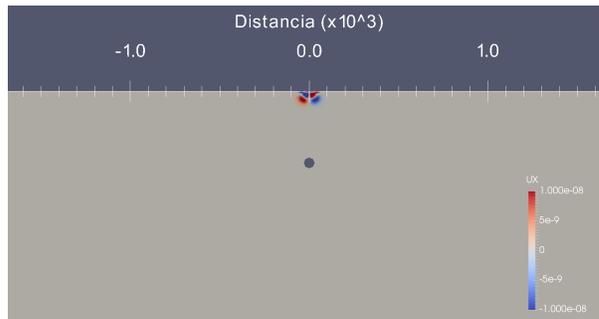
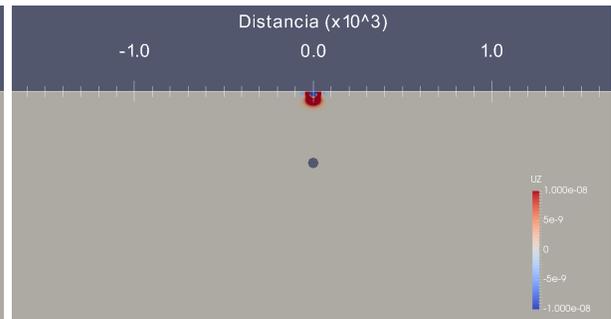


Figura 23. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 27m.

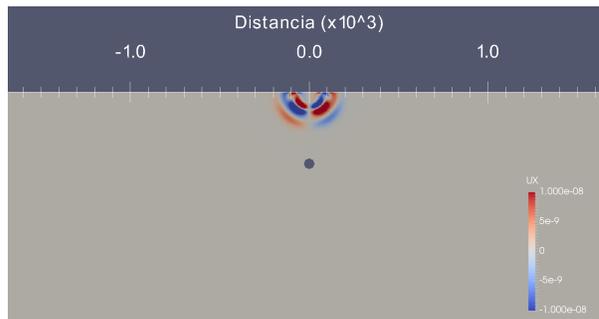
4.2.1. Representación del campo de ondas



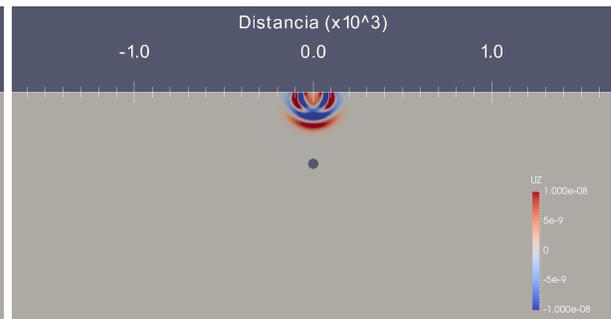
(a) 24ms



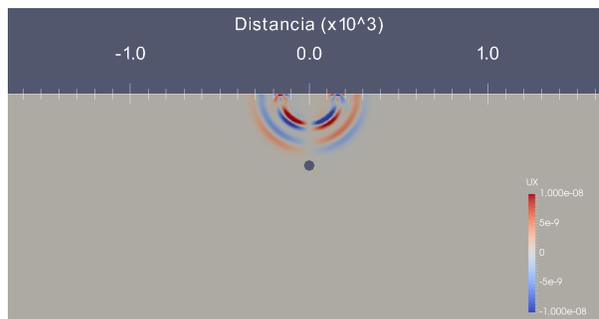
(b) 24ms



(c) 48ms



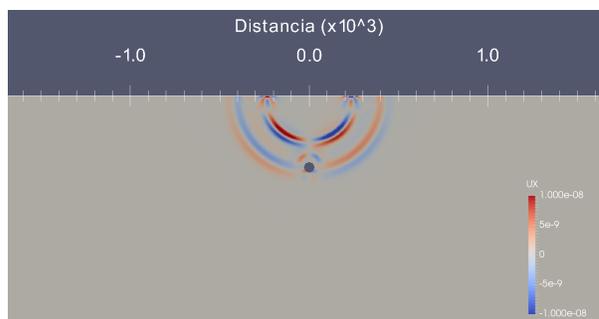
(d) 48ms



(e) 72ms



(f) 72ms



(g) 96ms



(h) 96ms

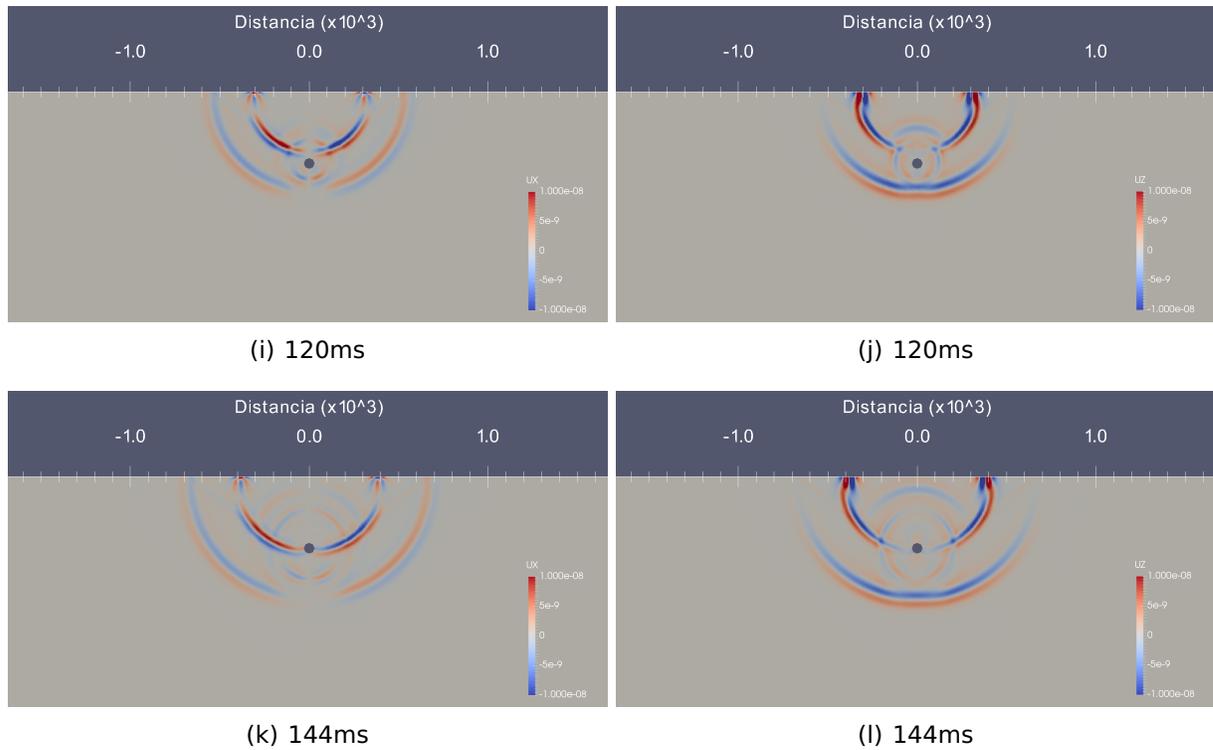


Figura 24. Propagación del campo de ondas en un medio con una cavidad de 20 kt. Imágenes en la columna izquierda corresponden a la componente horizontal del desplazamiento (U_x), imágenes en la columna derecha corresponden a la componente vertical del desplazamiento (U_z).

100 kilotones

En los gathers de ambas componentes se encuentran presentes y bien definidos los arribos de las ondas PP_{CV} y PS_{CV} , las amplitudes asociadas al frente de onda PPP_{CV} ya son continuas en la componente vertical (fig.26), asimismo el frente de onda PPS_{CV} puede definirse con mayor precisión en los offsets cercanos: entre las trazas 21 y 45 de la componente vertical.

Las ondas SS_{CV} y PSS_{CV} se definen claramente de la traza 1 a la 32 en la componente horizontal (fig.25), aunque su presencia en la componente vertical no es tan evidente.

Debajo de la onda PSS_{CV} se observan amplitudes dispersas en el centro del gather, por lo que no es posible definir otro frente de onda.

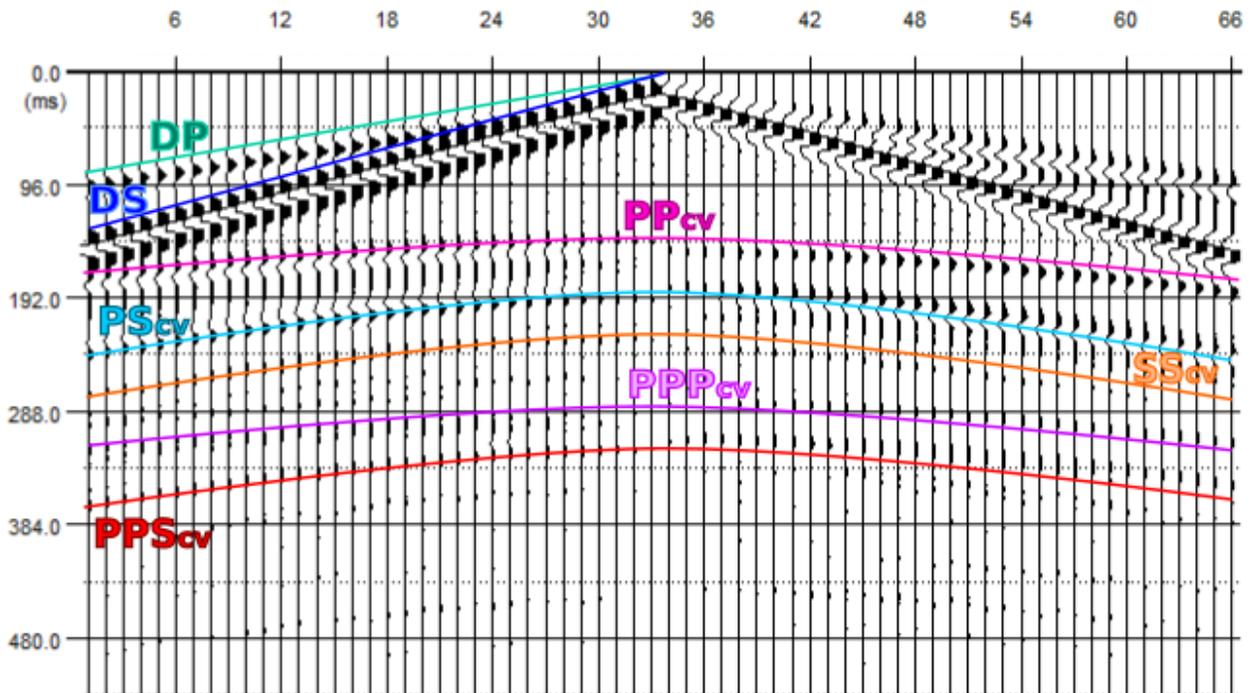


Figura 25. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 50m.

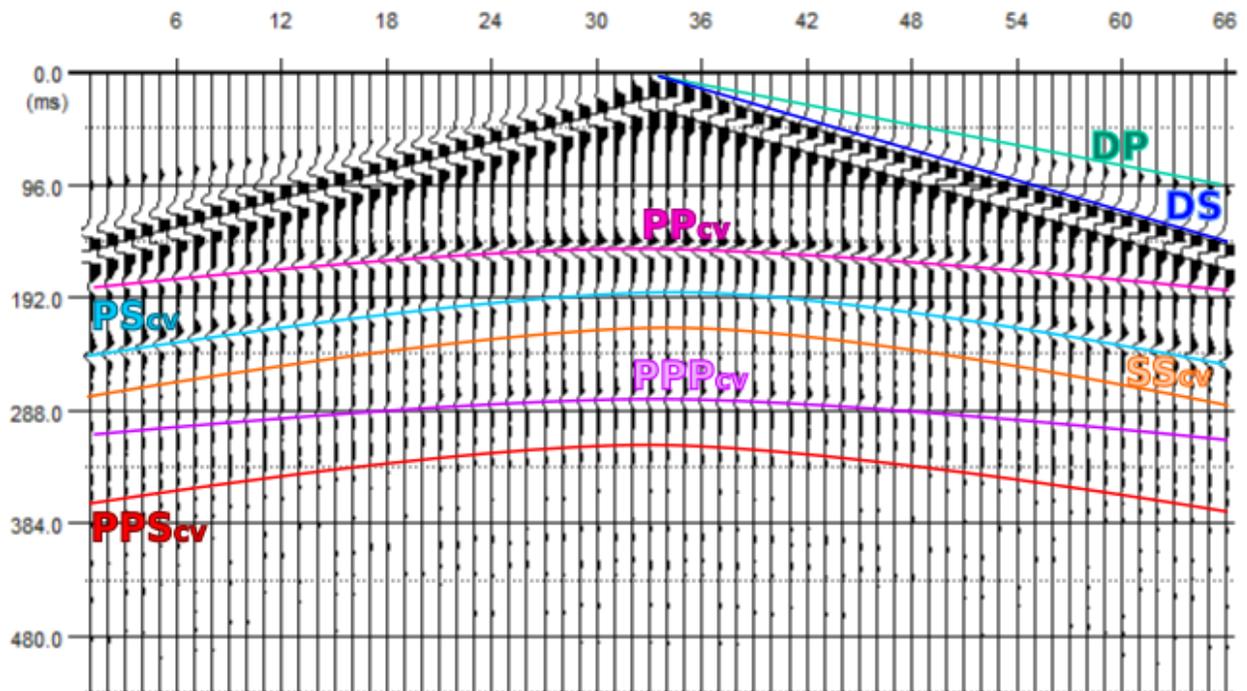


Figura 26. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 50m.

600 kilotones

La cavidad de 600 kilotones no resulta de interés para este trabajo, ya que los efectos de una explosión nuclear de dicha magnitud serían evidentes en la superficie del terreno. Sin embargo, es un buen ejemplo para mostrar el efecto de una estructura de grandes dimensiones en los datos sísmicos.

Los frentes de ondas PP_{cv} , PS_{cv} y PPP_{cv} se observan y definen fácilmente en todas las trazas de la componente vertical (fig.28). Las ondas SS_{cv} y PSS_{cv} son más notorias en la componente horizontal (fig.27), sin embargo, en la componente vertical se infiere su comportamiento siguiendo la tendencia de las amplitudes en las trazas de offset lejano.

Debajo del frente de onda PSS_{cv} , están presentes amplitudes que parecieran definir nuevos frentes de ondas, sin embargo resulta difícil determinar a qué onda corresponde cada uno debido al fenómeno de la conversión de ondas.

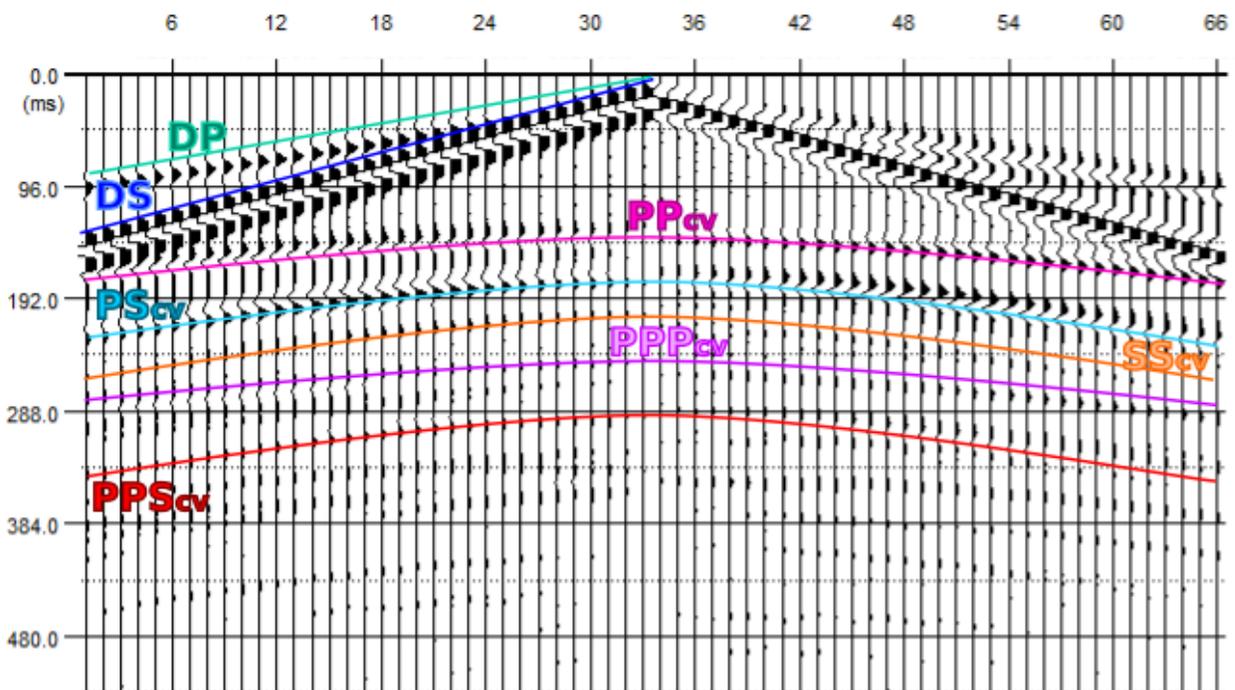


Figura 27. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 85m.

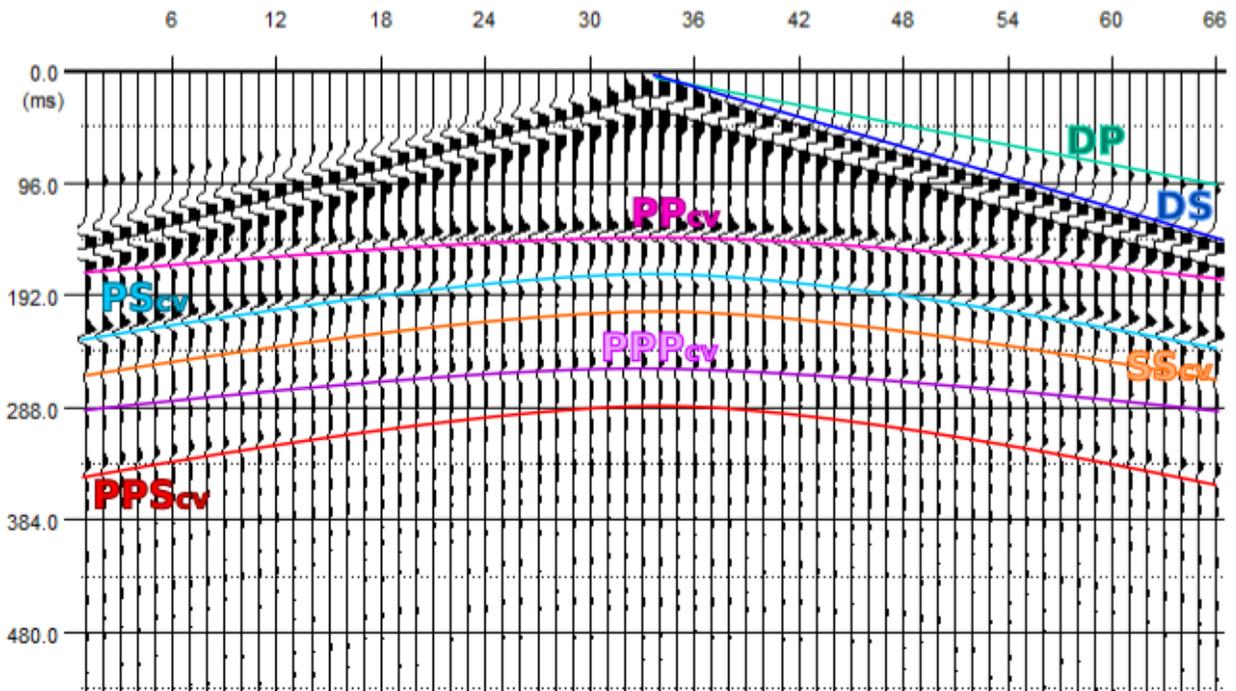


Figura 28. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 85m.

Todas las cavidades logran ser detectadas tanto por la onda P como por la onda S, a pesar de que las dimensiones de la cavidad más pequeña (1 kilotón) son menores a la longitud de onda mínima.

En todos los gathers se pueden observar claramente los arribos de las ondas directas P y S, se puede distinguir una onda de la otra con sólo observar la tendencia de los primeros arribos de éstas dos, entre más pronunciada es la recta que une a los primeros arribos, menor es la velocidad, por lo tanto la onda S tiene una pendiente más inclinada que la onda P.

Para las estructuras de menores dimensiones (1 kt y 10 kt), las amplitudes de las reflexiones de las ondas en la cavidad no están bien definidas y resulta difícil determinar con precisión la llegada del frente de onda a los receptores. Conforme aumentan el tamaño de la cavidad, el efecto de ésta se hace más evidente en los datos sísmicos, un ejemplo son las cavidades de 1 kt (fig. 18 y 19) y 20 kt (fig. 22 y 23), para la cavidad más pequeña sólo se detectan, con dificultad, las ondas PP, PS y SS, mientras que para la cavidad de 20kt es posible definir de manera más clara las ondas PP, PS, SP, SS e inclusive los primeros múltiples de las reflexiones de PP (PPP y PPS). Este efecto

se asocia al *scattering* generado por la forma de las estructuras: cuando las cavidades son pequeñas comparadas con la longitud de onda se comportan como un punto difractor, cuando las dimensiones de las estructuras son considerablemente mayores a la longitud de onda su comportamiento es el de cuerpos, que debido a su forma, difractan las ondas. Para poder identificar y determinar cada frente de onda en los gathers se utilizaron snapshots, que son imágenes en las que se observa la propagación del campo de ondas.

4.3. Cavernas

En esta sección se presentan los resultados de la simulación para el tercer modelo de complejidad incremental. Las cavernas son estructuras más complejas que las cavidades, ya que incluyen una zona fragmentada cuyo espesor depende del tamaño de la carga detonada. Las reflexiones en la zona fragmentada se definen con líneas punteadas y las reflexiones en la cavidad se presentan con líneas continuas. Para la interpretación se utilizaron snapshots y los gathers de la componente horizontal, que son los datos que se observan más limpios.

1 kilotón

En los gathers de la caverna de 1 kilotón los frentes de onda más claros, en ambas componentes, son PP_{zf} y PP_{cv} . Las ondas PS_{zf} y SP_{zf} , así como las ondas PS_{cv} y SP_{cv} , coinciden en su tiempo de arribo en el offset cero, conforme aumenta el offset se pueden diferenciar una de la otra con la pendiente de la hipérbola que representa a cada frente de onda. Es importante mencionar que debido al espesor de la zona fragmentada, la onda PP_{cv} llega antes que la onda PS_{zf} a los receptores. La onda SS_{zf} puede delinearse sin mayor problema en las dos componentes. Debajo de esta onda se pueden observar otras reflexiones, sin embargo, debido al fenómeno de la conversión de ondas y a la cercanía entre la interfaz de la zona fragmentada y la superficie de la cavidad no es posible determinar a qué onda corresponde cada curva.

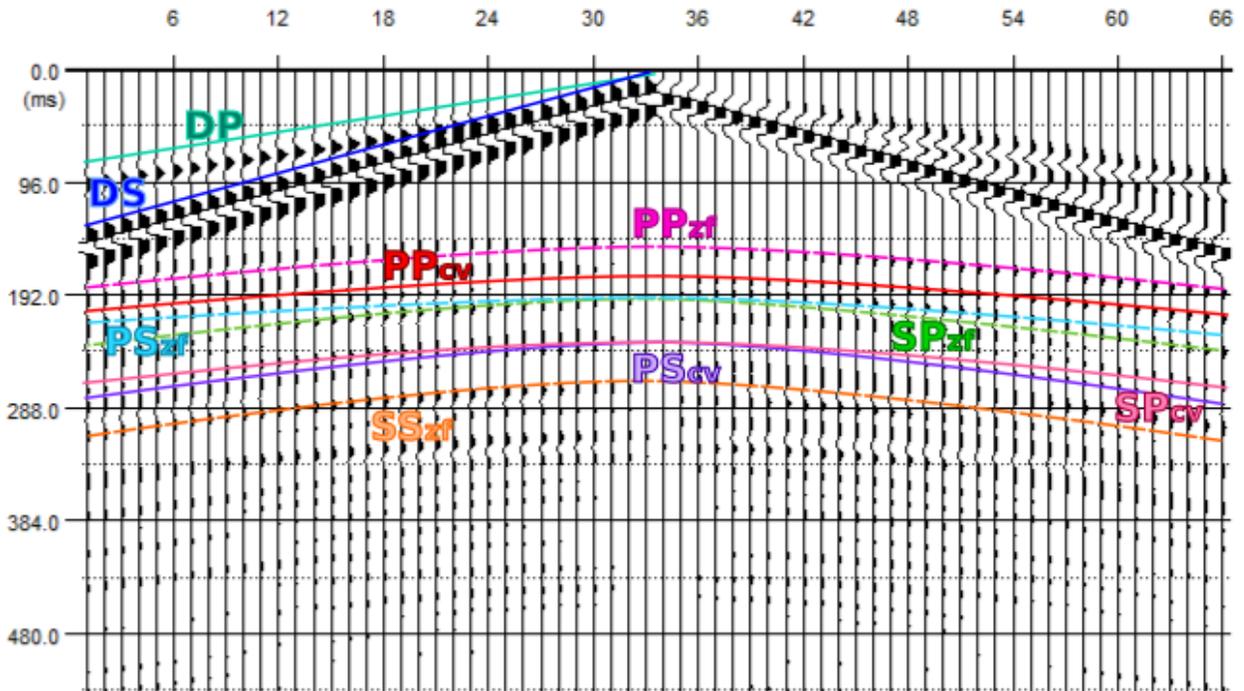


Figura 29. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 10m y zona de roca fragmentada de 30m.

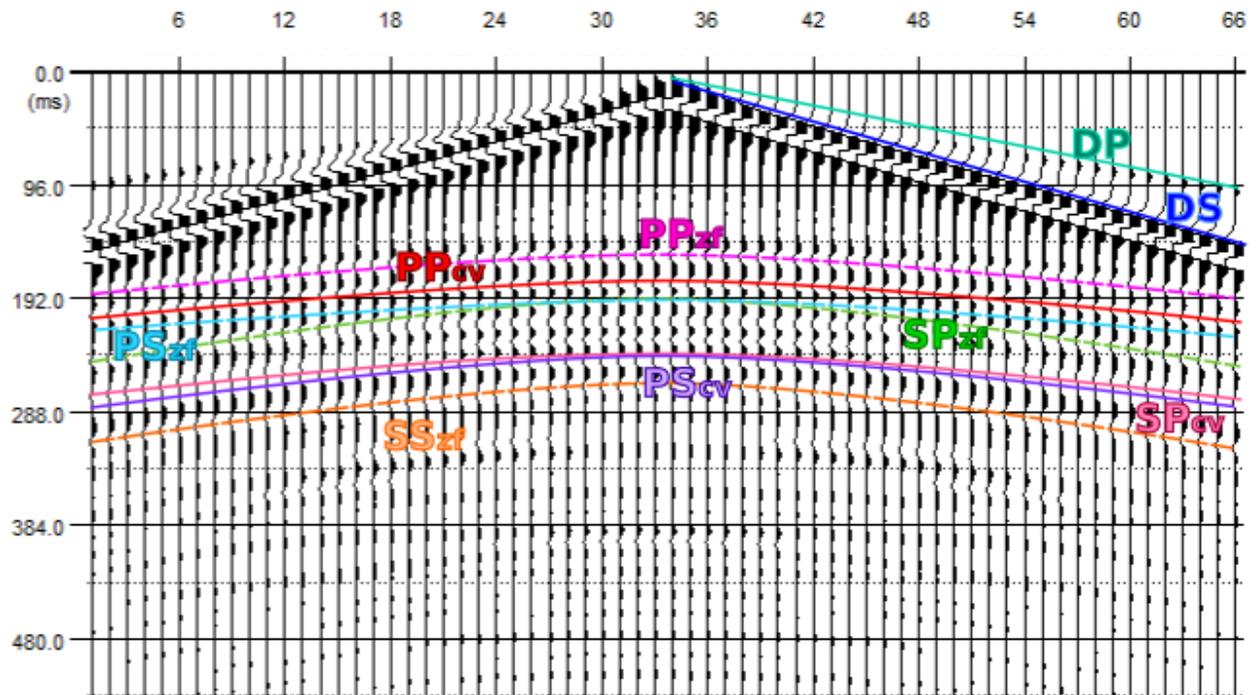


Figura 30. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 10m y zona de roca fragmentada de 30m.

10 kilotones

La interpretación de estos gathers fue más sencilla que la de los de la cavidad de 1kt, debido al aumento en el espesor de la zona fragmentada.

Las amplitudes de las ondas PP_{zf} y PP_{cv} son mayores que en el caso de 1kt, así que delinearlas no fue problema. La onda PS_{zf} parece estar enmascarada, en las trazas de offset lejano, por otro frente de onda en la componente vertical (fig. 32), sin embargo, en la componente horizontal (fig. 31) es posible delinear la onda en todas las trazas.

El frente de onda SS_{zf} se observa mejor en la componente vertical, mientras que la onda PS_{cv} se reconoce en la componente horizontal.

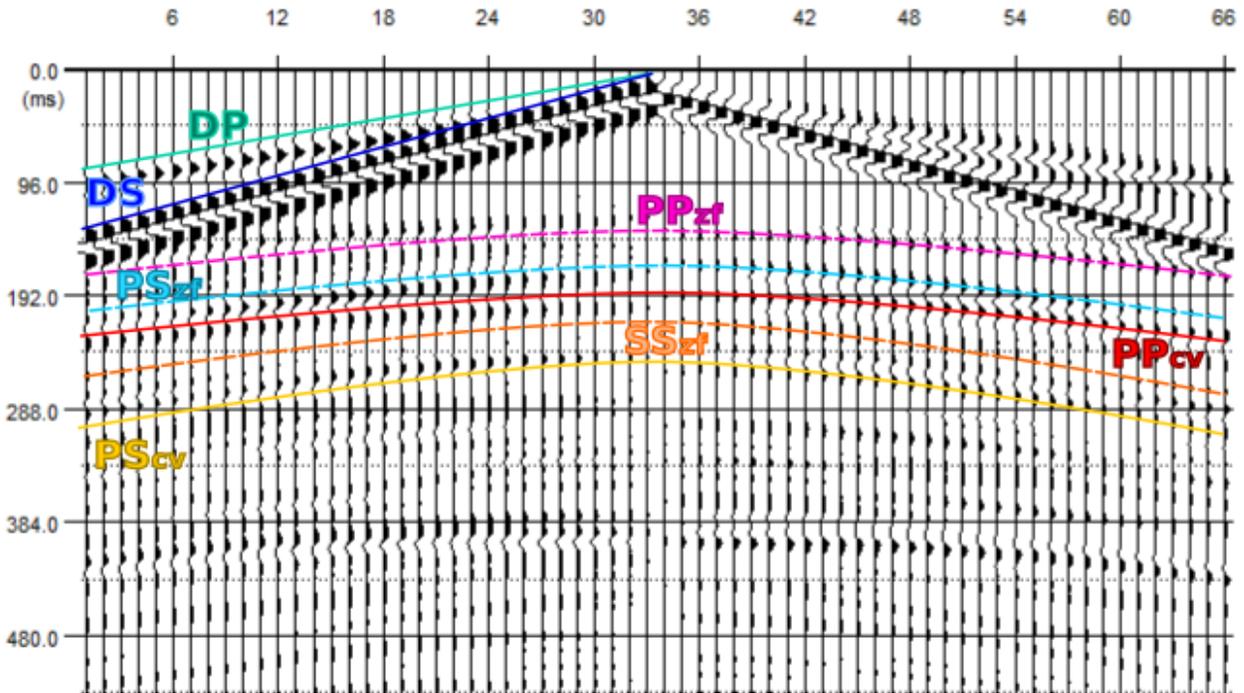


Figura 31. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 22m y zona de roca fragmentada de 65m .

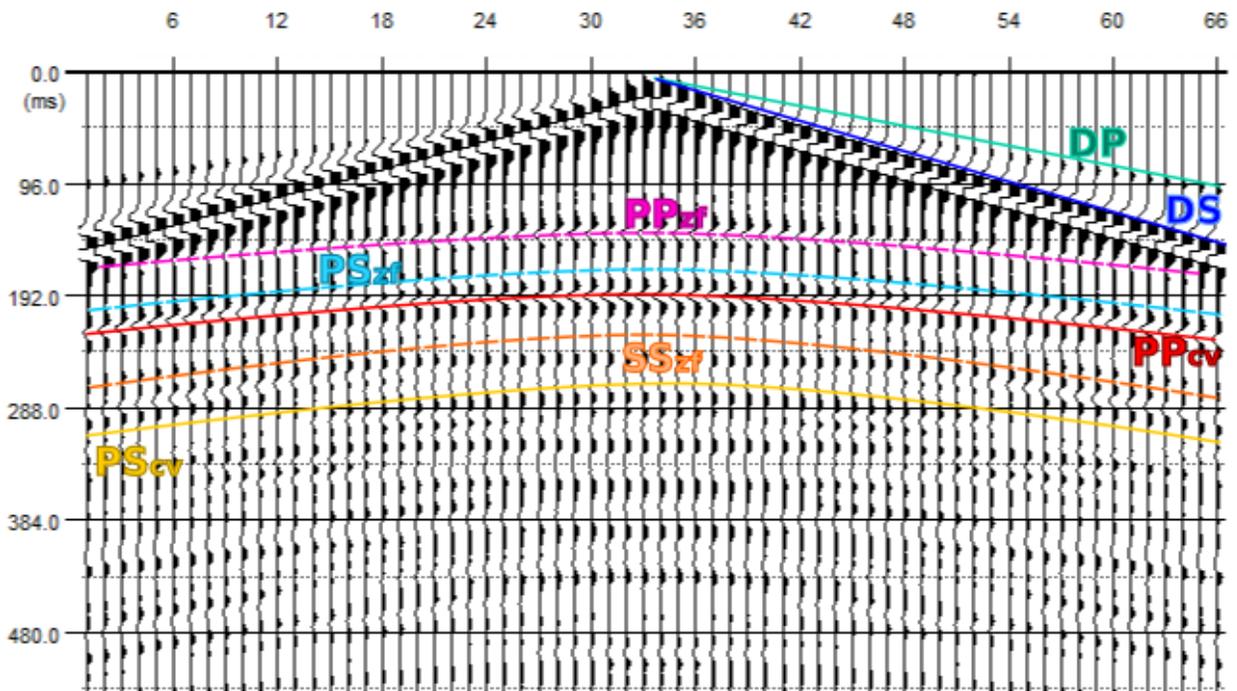


Figura 32. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de 22m de radio y zona fragmentada de 65m.

20 kilotones

Igual que en los casos anteriores, las ondas PP_{zf} y PP_{cv} son las más claras y fáciles de determinar. El rango de trazas en las que se observa la onda PS_{zf} , en la componente vertical (fig. 34) es de la traza 19 a la 49, mientras que en la componente horizontal (fig. 33), la onda es visible en todas las trazas. Las ondas SS_{zf} y PS_{cv} son más evidentes en la componente horizontal.

Los gathers de esta caverna y los de la de 10 kt son muy similares, difieren muy poco en los tiempos de arribo y en las amplitudes de los distintos frentes de ondas. La diferencia en los tiempos de arribo está relacionada con los tamaños de la cavidad y de las zonas fragmentadas. En lo que respecta a las amplitudes, cabe mencionar que estas son mayores para la estructura de 20kt y es que conforme la caverna aumenta de tamaño la dispersión de energía se reduce (scattering).

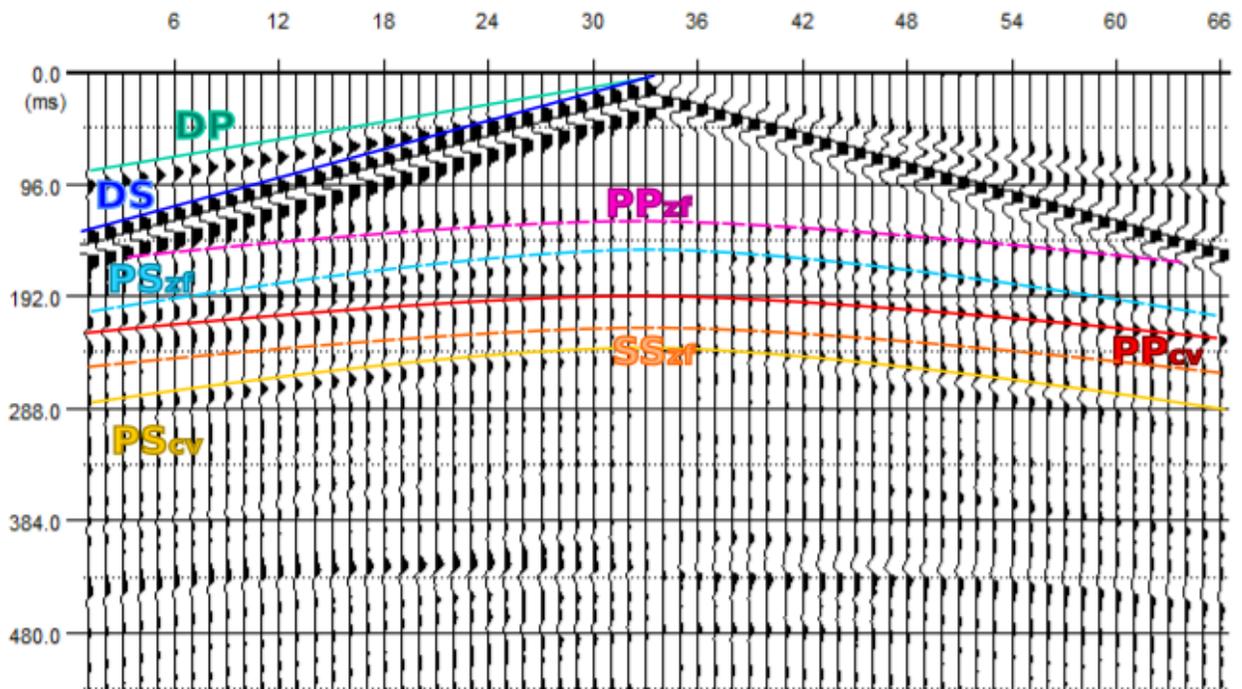


Figura 33. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 27m y zona de roca fragmentada de 75m.

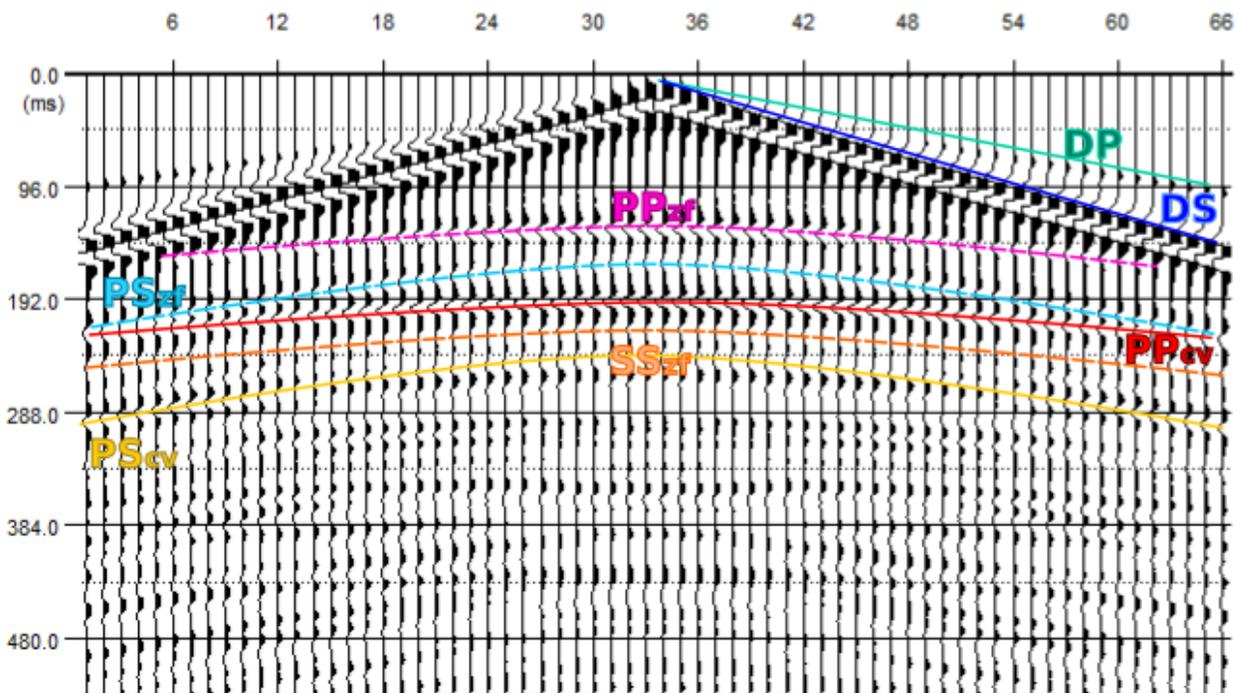
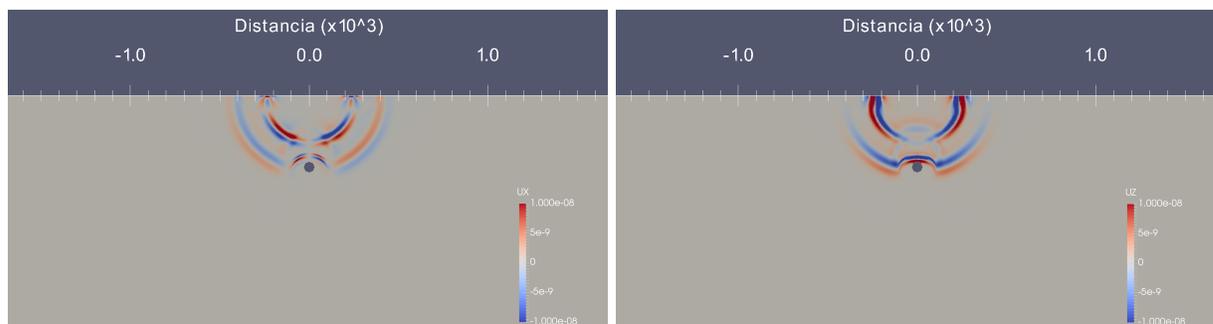
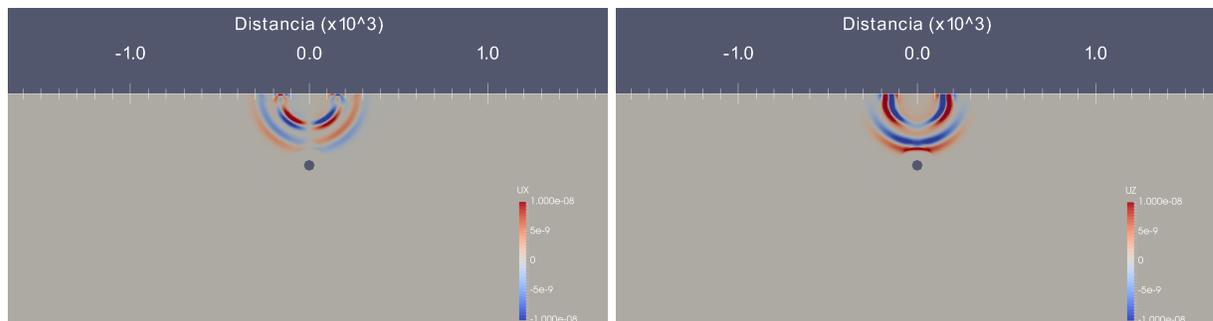
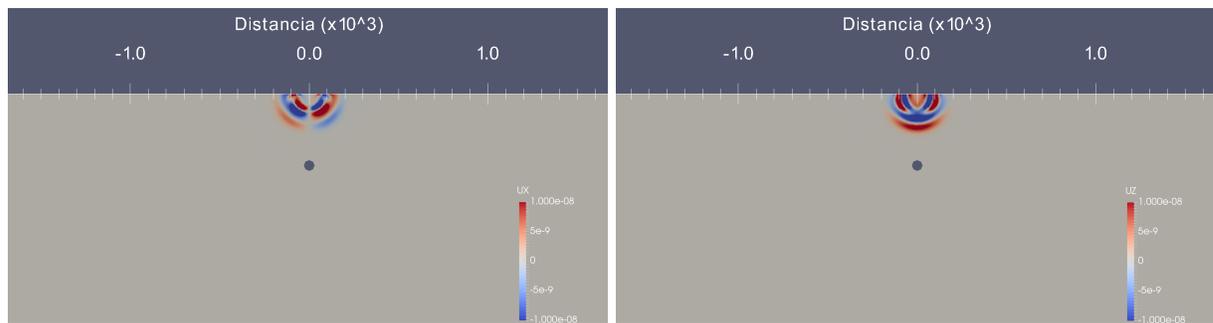
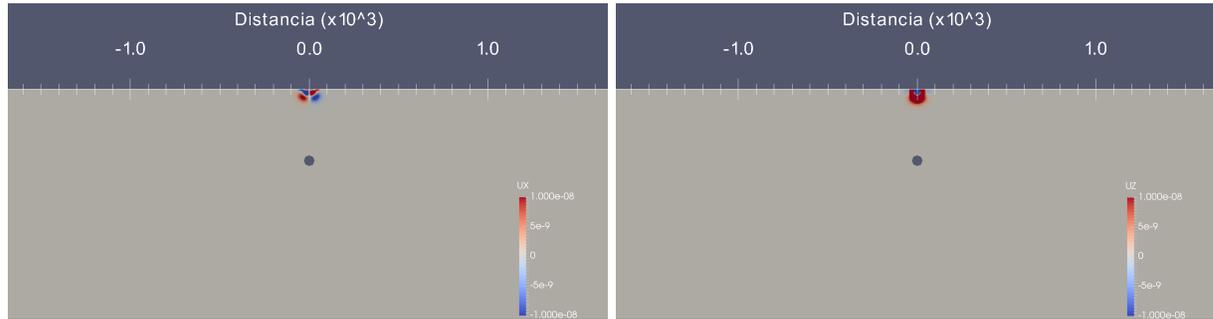


Figura 34. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 27m y zona de roca fragmentada de 75m.

4.3.1. Representación del campo de ondas



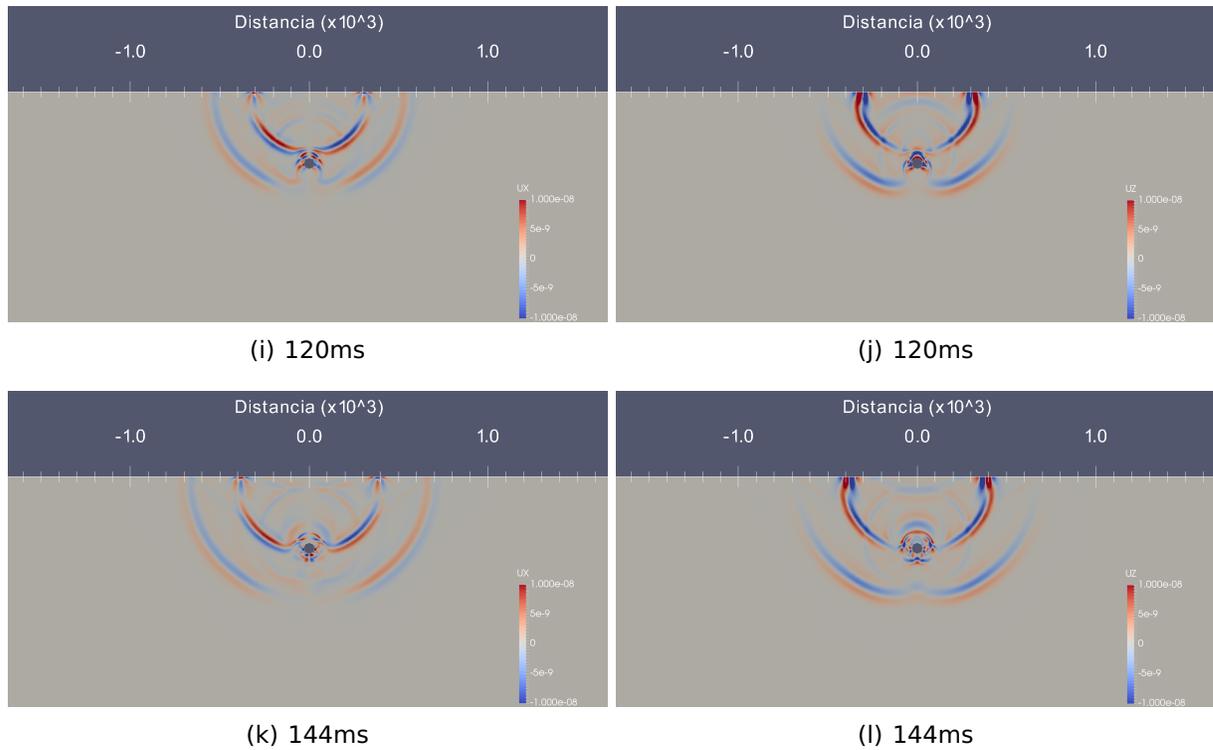


Figura 35. Propagación del campo de ondas en un medio con una caverna de 20 kt. Imágenes en la columna izquierda corresponden a la componente horizontal del desplazamiento (U_x), imágenes en la columna derecha corresponden a la componente vertical del desplazamiento (U_z).

100 kilotonnes

Al incrementar el tamaño de la estructura las amplitudes de los frentes de onda son más coherentes, por lo que los arribos se definen con mayor precisión. Las ondas que se observan en ambas componentes son: PP_{zf} , PP_{cv} , SS_{zf} , PS_{cv} y SS_{cv} . La distancia entre los tres primeros frentes de onda es de apenas una decena de milisegundos, mientras que la diferencia de tiempo entre las ondas SS_{zf} , PP_{cv} , PS_{cv} y SS_{cv} es mayor.

La diferencia más evidente entre los gathers de la caverna de 100kt y los anteriores se refleja principalmente en los tiempos de arribo, al incrementarse el tamaño de la cavidad y de la zona fragmentada el tiempo que requieren las ondas para llegar a las interfaces y regresar a los receptores es menor, por lo que los frentes de onda se muestran desplazados varias unidades de tiempo hacia arriba en comparación a los gathers de las cavernas de menores dimensiones.

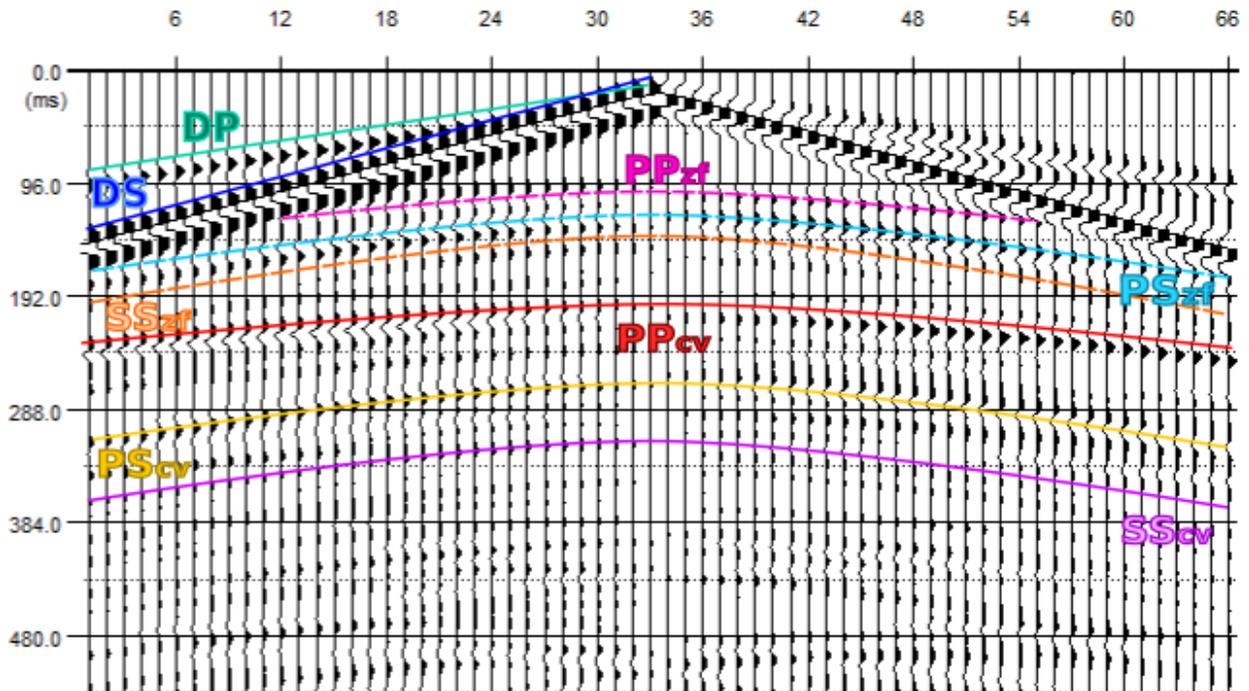


Figura 36. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 50m y zona de roca fragmentada de 135m.

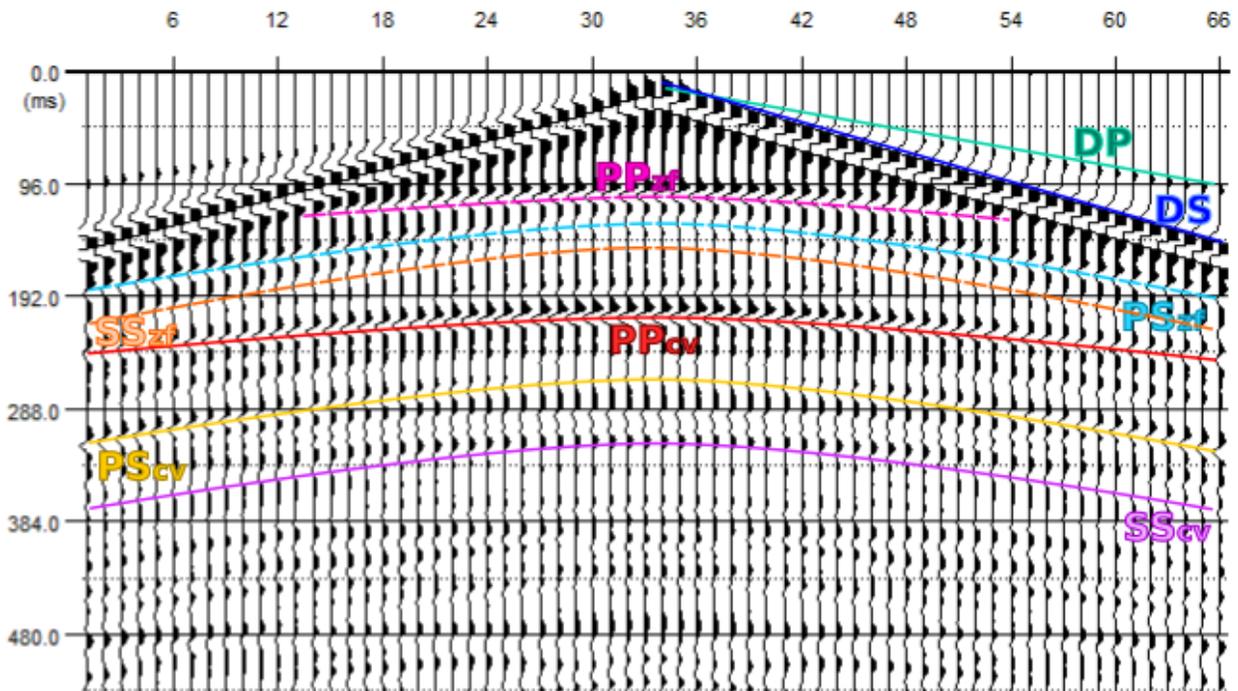


Figura 37. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 50m y zona de roca fragmentada de 135m.

600 kilotones

En la caverna de 600 kt la distancia entre la interfaz de la zona fragmentada y la superficie del terreno es de apenas 70m, por lo que el tiempo que requieren las ondas para llegar a dicha discontinuidad y viajar de regreso a los receptores es muy pequeño.

Los tiempos de arribo de las ondas PP_{zf} , PS_{zf} y SS_{zf} son muy cercanos a los tiempos de arribo de las ondas directas P y S, por lo que resulta complicado definir estas ondas en los gathers. Las ondas que se reflejan en la superficie de la cavidad, PP_{cv} y PS_{cv} , son evidentes en las trazas de ambas componentes ya que las amplitudes son continuas. La diferencia de tiempos entre las ondas SS_{zf} y PP_{cv} se debe al espesor de la zona fragmentada.

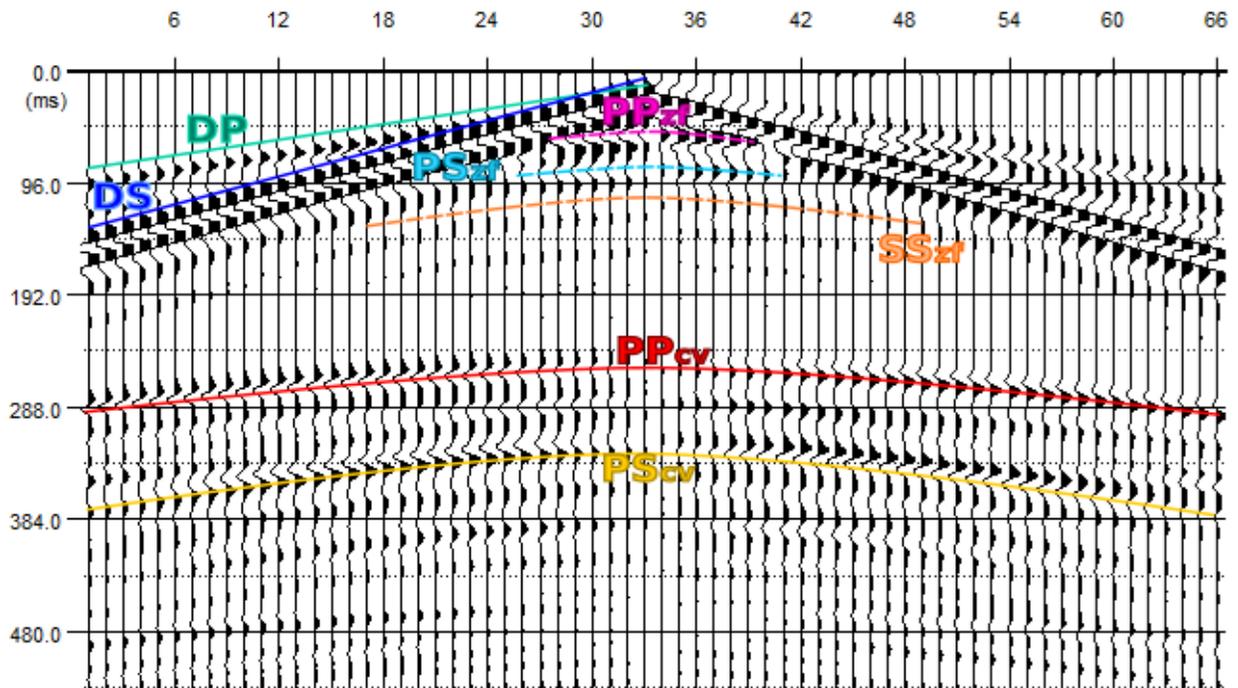


Figura 38. Componente horizontal del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 85m y zona de roca fragmentada de 245m.

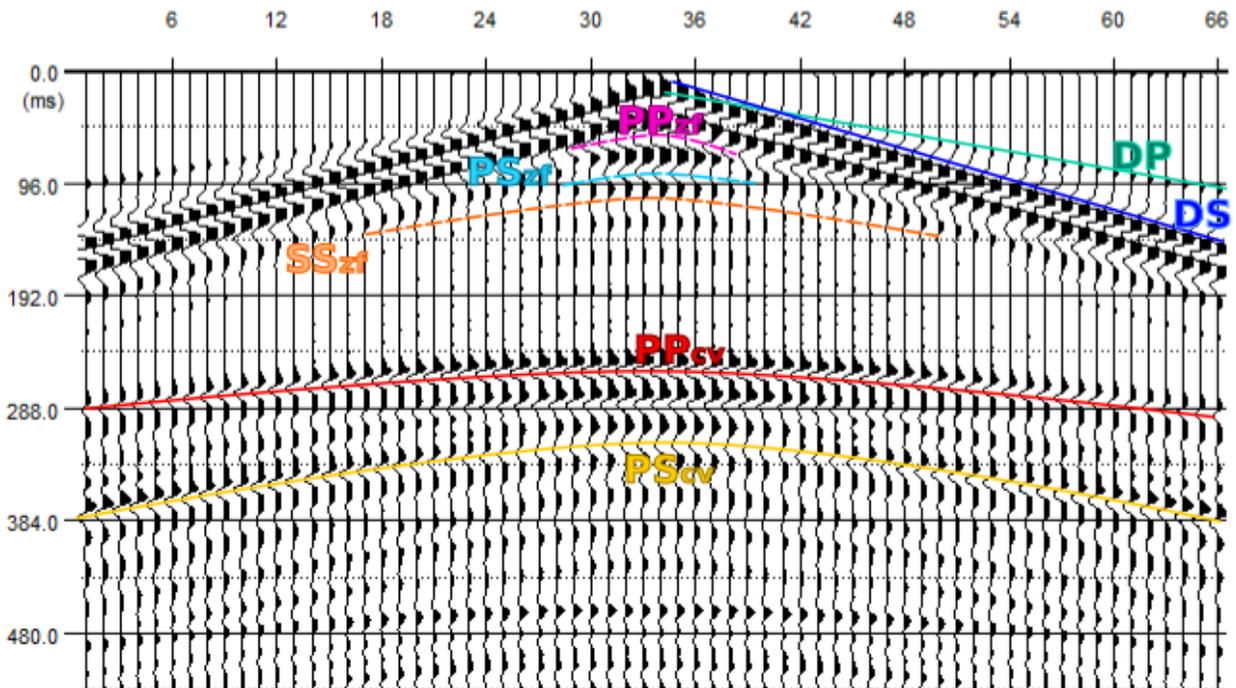


Figura 39. Componente vertical del desplazamiento de campo de ondas en un medio con una cavidad de radio de 85m y zona de roca fragmentada de 245m.

4.4. Sección monocanal

En ambas secciones no se logra diferenciar el arribo de la onda P y el de la onda S directas, ésto se debe a que las secciones son de offset cercano y dada la distancia a la que se encuentran el receptor y la fuente (6.25 metros) no es posible distinguir una de la otra.

En la sección monocanal correspondiente a la cavidad de 20 kt (fig. 40) los arribos de las ondas PP_{cv} y SS_{cv} son los más claros de identificar en todas las trazas debido a la continuidad de las amplitudes. En cuanto a las ondas PS_{cv} , PPP_{cv} y PPS_{cv} resulta complicado identificar sus arribos, ya que sus amplitudes son casi nulas en los extremos de la sección, es decir, cuando la fuente y el receptor se localizan más lejos de la cavidad.

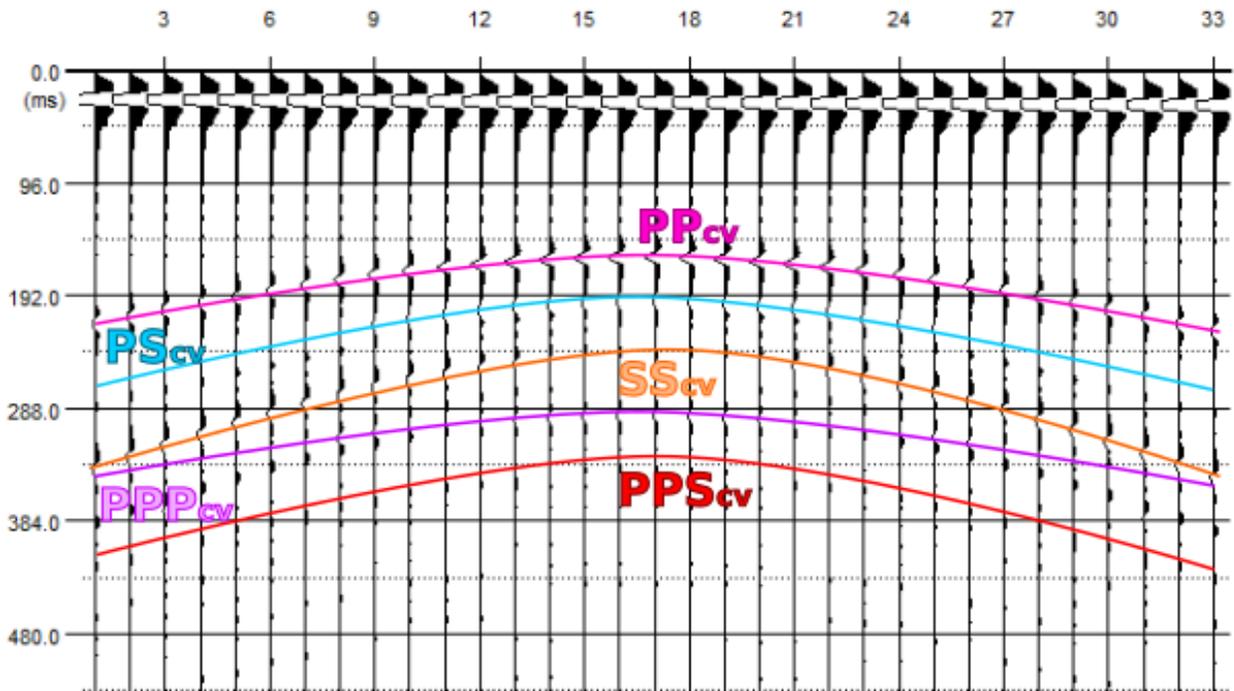


Figura 40. Sección monocanal de offset cercano para una cavidad con un radio de 22m.

En el caso de la sección monocanal de la caverna (fig.41) se definen las mismas ondas que en el gather de 20 kt (fig. 34). Aunque por debajo de estos frentes de ondas se observen amplitudes que pueden ser relacionadas a otras ondas, resulta complicado determinar a qué onda corresponde cada arribo, esta complejidad se debe a la conversión de ondas en cada interfase.

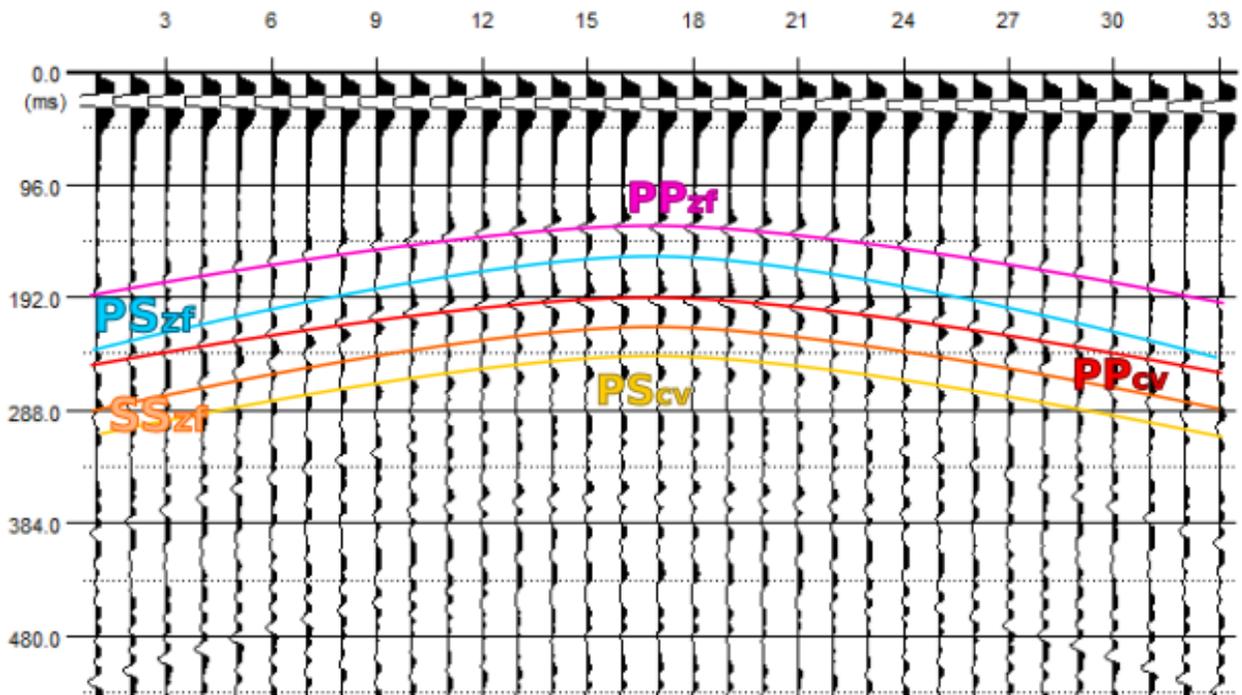


Figura 41. Sección monocanal de offset cercano para una caverna con un radio de 22m y una zona de fragmentos de 65m de espesor.

Capítulo 5. Conclusiones

El método de elementos espectrales logra resolver satisfactoriamente el problema de la caverna con elementos cuadriláteros, sin importar si la cavidad es demasiado pequeña comparada con el semiespacio que se discretiza.

A través de la simulación numérica de propagación de ondas se logran obtener gathers para cada modelo de complejidad incremental: caso homogéneo, caso de un semiespacio con cavidad y el caso de un semiespacio con una caverna. Con sólo una comparación visual de los gathers, se pueden determinar claramente los efectos de una cavidad y de una caverna, con estructura más compleja, en los datos sísmicos.

El efecto de una cavidad en la sísmica depende de su tamaño: cuando la cavidad es más pequeña que la longitud de onda se comporta como un punto difractor, que en un caso real puede ser interpretado como un escalón ó un acuñamiento; cuando las dimensiones de la cavidad son mayores a la longitud de onda se comportan como cuerpos difractores que debido a su estructura no pueden ser definidos por completo en las secciones sísmicas, sólo puede visualizarse la cima de la estructura, por lo que pueden llegar a confundirse con la cima de un pliegue o con algún intrusivo con una forma similar.

Respecto a la caverna, sus efectos en la sísmica son más complejos debido al fenómeno de la conversión de ondas en cada interface, por lo que la interpretación se torna complicada. En los gathers de las cavernas se pueden apreciar tanto el efecto de la zona fragmentada como el de la cavidad por separado. La caverna tiene un comportamiento particular en los datos sísmicos: el de dos cuerpos difractores concéntricos. La contribución de la zona fragmentada hace que las cavernas se puedan distinguir de otros cuerpos difractores, ya que este comportamiento es difícil de encontrar en condiciones naturales.

5.1. Trabajo futuro

Aunque el modelo que se propone en este trabajo para determinar el efecto de una caverna en la sismica es más complejo que el presentado por Esterhazy *et al.* (2017), los resultados pueden mejorarse al considerar modelos en los que se incluyan los efectos de las fracturas y de los escombros depositados al fondo de la cavidad.

Asimismo, podría implementarse una simulación numérica en tres dimensiones para considerar los efectos del volumen de la caverna. En los modelos también podrían incluirse una serie de estratos que se trunquen con los bordes de la cavidad a fin de hacer modelos cada vez más realistas.

De igual manera, podrían realizarse simulaciones de cavidades y cavernas en otro tipo de rocas como aluviones, tobas y sal, considerando las diferentes estructuras generadas según el tipo de material en el que se realiza la detonación.

Literatura citada

- Adushkin, V. y Spivak, A. (2004). Changes in properties of rock massifs due to underground nuclear explosions. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, **40**(6): 624–634.
- Adushkin, V. V. y Leith, W. S. (2001). The containment of soviet underground nuclear explosions. Reporte técnico 01-312, United States Department of the Interior, Geological Survey.
- Aki, K. y Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*. University Science Books, segunda edición. pp. 11–21.
- Belyashov, A., Shaitorov, V., y Yefremov, M. (2014). Application of geophysical techniques in identifying une signatures at semipalatinsk test site (for osi purposes). *Pure and Applied Geophysics*, **171**(3-5): 751–761.
- Boardman, C. R., Rabb, D. D., y McArthur, R. D. (1964). Responses of four rock mediums to contained nuclear explosions. *Journal of Geophysical Research*, **69**(16): 3457–3469.
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A., y Di Filippo, G. (2010). Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*, **58**(4): 685–695.
- Cohen, G. C. (2002). *Higher-order numerical methods for transient wave equations*. Springer. pp. 169–181.
- Coren, F., Priolo, E., Pregarz, A., Persoglia, S., y Padoan, G. (1998). Numerical modelling assisted analysis of the seismic image of a brine-filled cavity. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **39**(3): 181–198.
- Coussy, O. (1995). *Mechanics of porous continua*. Wiley. p. 2.
- Csimsoft (2013-2018). Trelis 16.5 user documentation: Advanced meshing for challenging simulations. Url: <https://csimsoft.com/help/trelishelp.htm>.
- CTBTO (2010). The preparatory commission for the comprehensive nuclear-test-ban treaty organization (ctbto preparatory commission). Url: <https://www.ctbto.org>.
- De Basabe, J. D. (2009). *High-order finite element methods for seismic wave propagation*. Tesis de doctorado, The University of Texas at Austin.
- De Basabe, J. D. (2011). Elementos finitos de orden superior para propagación de ondas sísmicas. *GEOS*, **31**(2): 1–18.
- De Basabe, J. D. y Sen, M. K. (2007). Grid dispersion and stability criteria of some common finite-element methods for acoustic and elastic wave equations. *Geophysics*, **72**(6): T81–T95.
- De Basabe, J. D. y Sen, M. K. (2010). Stability of the high-order finite elements for acoustic or elastic wave propagation with high-order time stepping. *Geophysical Journal International*, **181**(1): 577–590.
- De Basabe, J. D., Sen, M. K., y Wheeler, M. F. (2011). Seismic wave propagation in fractured media: a discontinuous galerkin approach. En: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 2920–2924.

- Esterhazy, S., Schneider, F., Perugia, I., y Bokelmann, G. (2017). Application of high-order finite-element method to the p-wave propagation around and inside an underground cavity. *Geophysics*, **82**(4): T197–T206.
- Grandjean, G. y Leparoux, D. (2004). The potential of seismic methods for detecting cavities and buried objects: experimentation at a test site. *Journal of Applied Geophysics*, **56**(2): 93–106.
- Gualtieri, L. (2014). *Modeling the secondary microseismic noise generation and propagation*. Tesis de doctorado, Institut de Physique du Globe de Paris (France) and Universita di Bologna (Italy).
- Higgins, G. H. (1970). Underground nuclear explosions. Reporte técnico, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, California.
- Hughes, T. J. (2000). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications.
- Johnson, G. W., Higgins, G. H., y Violet, C. E. (1959). Underground nuclear detonations. *Journal of Geophysical Research*, **64**(10): 1457–1470.
- Komatitsch, D. y Tromp, J. (1999). Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. *Geophysical journal international*, **139**(3): 806–822.
- Mavko, G., Mukerji, T., y Dvorkin, J. (2009). *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media*. Cambridge University Press.
- McCann, D., Jackson, P., y Culshaw, M. (1987). The use of geophysical surveying methods in the detection of natural cavities and mineshafts. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **20**(1): 59–73.
- Mohanty, P. R. (2011). Numerical modeling of p-waves for shallow subsurface cavities associated with old abandoned coal workings. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **16**(4): 165–175.
- Rodean, H. C. (1968). Understanding and constructively using the effects of underground nuclear explosions. *Reviews of Geophysics*, **6**(3): 401–445.
- Sanz, F., Serón, F. J., Kindelan, M., y Pérez, C. (1990). El método de los elementos finitos para el modelado de ondas con un procesador vectorial. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, **6**(4): 573–594.
- Simm, R., Bacon, M., y Bacon, M. (2014). *Seismic Amplitude: An interpreter's handbook*. Cambridge University Press. pp. 1–10.
- Sweeney, J. y Mellors, R. (2014). Application of active seismic and electrical methods to detect and characterize subsurface effects of an underground explosion. Reporte técnico, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
- Terhune, R. W. (1972). Prediction of underground nuclear explosion effects in wagon wheel sandstone. *Nuclear Technology*, **15**(3): 431–446.
- Westphal, W. H. y Rubin, S. (1964). Techniques of on-site inspection. *Geophysics*, **29**(2): 250–258.

Xinjun, L., Muen, T., Qiang, T., y Zenghu, M. (2016). The availability and limitation of geophysical at the on-site inspection. june. Atlantis Press, pp. 367–369.

Anexo 1

Cálculo de la densidad de una roca porosa.

Tenemos una roca inicial con una densidad ρ_0 , un volumen V_0 y una masa M_0 , posteriormente la misma roca presenta cierta porosidad η_0 , por lo que deberá manifestarse un cambio en la masa y densidad de la roca, más no en el volumen de la misma.

La masa de la nueva roca es igual a la diferencia entre la masa inicial menos la masa faltante en los poros, es decir:

$$M' = M_0 - \eta_0 M_0 = (1 - \eta_0) M_0.$$

Por lo tanto, la densidad de la roca porosa (frame) se define como:

$$\rho' = \frac{M'}{V_0} = \frac{(1 - \eta_0) M_0}{V_0} = (1 - \eta_0) \rho_0,$$

donde $\rho_0 = M_0/V_0$.

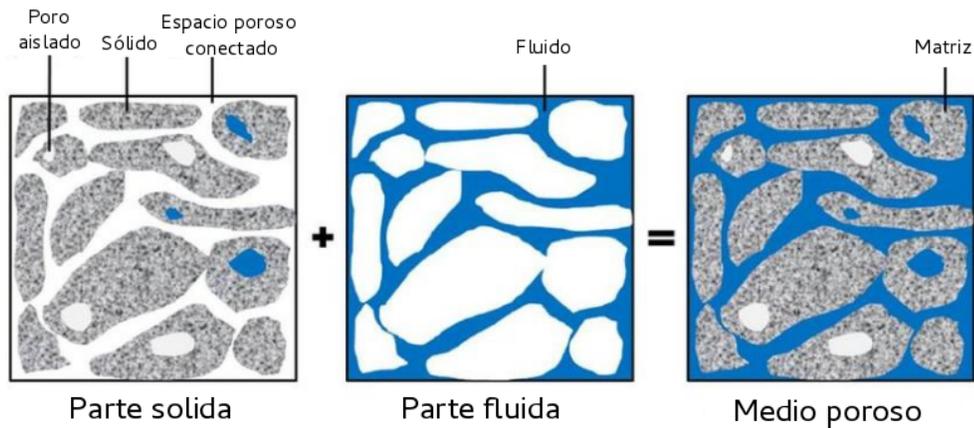


Figura 42. Medio poroso visto como la superposición de dos medios continuos, modificada de Coussy (1995).

Anexo 2

Snapshots: Representación del campo de ondas.

Los snapshots son imágenes instantáneas tomadas en determinado tiempo, en las que se puede observar el estado o la condición de los diferentes frentes de ondas en un semiespacio.

Las ondas que se observan en un snapshot son:

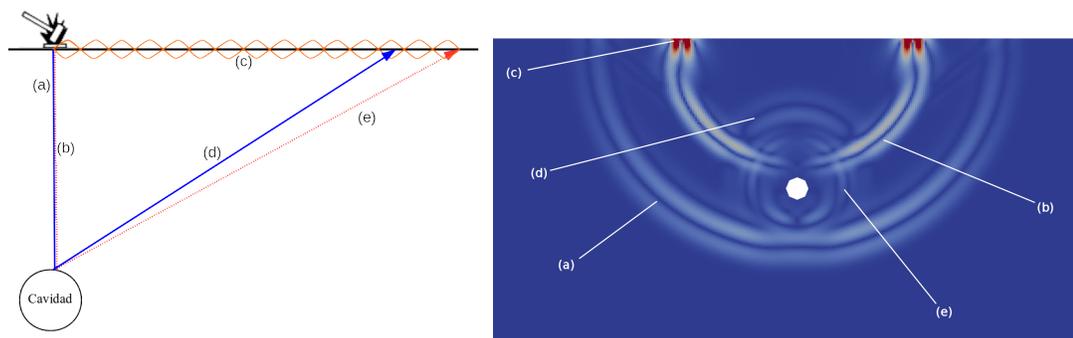


Figura 43. Representación del campo de ondas en un snapshot, modificada de Gualtieri (2014).

- (a) Onda P incidente.
- (b) Onda S incidente.
- (c) Ondas superficiales.
- (d) Onda P reflejada.
- (e) Onda S reflejada.