

Tesis defendida por
Viridiana Herrera Juárez
y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Antonio González Fernández
Director del Comité

M. C. Juan Manuel Espinosa Cardeña
Miembro del Comité

M. C. Moisés Castro Delgado
Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández
Coordinador del programa de
Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

21 de marzo de 2013

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



Programa de Posgrado en Ciencias
en Ciencias de la Tierra

**Propuesta de una fuente que emplea audio para exploración
sísmica de refracción somera**

Tesis

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

Presenta:

Viridiana Herrera Juárez

Ensenada, Baja California, México

2013

Resumen de la tesis de Viridiana Herrera Juárez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

Propuesta de una fuente que emplea audio para exploración sísmica de refracción somera

Resumen aprobado por:

Dr. Antonio González Fernández
Director de Tesis

Los métodos sísmicos de refracción constituyen una alternativa en la exploración somera del subsuelo (decenas de metros) debido a su alta resolución y precisión. La principal limitación en los estudios someros es la velocidad de adquisición de información en campo, que depende en gran medida del tipo de fuente sísmica empleada: si se usa un marro es necesario golpear varias veces, además la forma de la onda producida es muy variable. Las caídas de peso son más consistentes pero costosas. Los explosivos toman tiempo para hacer perforaciones, aunado al problema evidente de su manejo. Los disparos también son problemáticos en México, debido al control de armas. Investigaciones recientes reportan la utilización de fuentes acústicas para la detección de objetos explosivos enterrados a poca profundidad. La penetración de la onda acústica en el subsuelo hace que los fluidos contenidos en los poros de las rocas produzcan oscilaciones que se propagan en todas direcciones, fenómeno conocido como acoplamiento sismo acústico. En este trabajo se implementa un prototipo de fuente sísmica, basada en audio con el fin de reducir el trabajo de campo. Existen equipos acústicos con energía suficiente para realizar investigaciones a profundidades de interés en estudios de ingeniería civil, impacto ambiental y geohidrología. Se plantean dos alternativas: bocinas y vibradores, ambos utilizados en la reproducción de música y películas que permiten la emisión de frecuencias adecuadas, desde aproximadamente 5 a 500 Hz, intervalo similar al producido por los marros. Se probaron tanto formas de onda impulsivas como barridos de frecuencias. Uno de los atributos del prototipo es que las formas de onda generadas son controlables a través de los archivos de audio. Como prueba final se realizó un perfil sísmico de refracción, directo e inverso, en un sitio de prueba con 24 geófonos separados un metro cada uno empleando la bocina, el vibrador y un marro, para comparar la respuesta del terreno ante las vibraciones producidas por cada fuente. Tanto los registros sísmicos (sismogramas) correspondientes a la bocina como al vibrador indican tres estratos con velocidades de propagación similares a las obtenidas mediante el uso de marro. Sin embargo, las profundidades de los modelos de capas derivados de cada sismograma no corresponden. Las diferencias se atribuyen a efectos del medio en la transmisión de las ondas acústicas.

Palabras clave: **Fuente sísmica acústica, acoplamiento sismo acústico, refracción sísmica somera.**

Abstract of the thesis presented Viridiana Herrera Juárez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with emphasis in Applied Geophysics.

Proposal of an audio source for seismic exploration of shallow refraction

Abstract approved by:

Dr. Antonio González Fernández
Thesis Director

Seismic refraction methods are an alternative in the shallow subsurface exploration (tens of meters) due to their high resolution and accuracy. The main limitation in shallow studies is the speed of data acquisition in the field, which depends largely on the type of seismic source that is used: if using a hammer it must hit several times, and the waveform produced is very variable. Weight falls are more consistent but expensive. For explosives it takes time to drill, coupled with the obvious problem of handling. Explosives are specially problematic in Mexico due to gun control. Furthermore, recent research report using acoustic sources for detecting shallow buried explosive. The acoustic wave penetration into the ground causes the fluids contained in the pores of the rock to produce oscillations that propagate in all directions, a phenomenon known as seismic to acoustic coupling. In this work we implement a seismic source prototype, based in audio, to reduce the fieldwork time. There is acoustic equipment with enough power to conduct investigations at depths of interest in civil engineering studies, environmental impact and hydrogeology. Two alternatives are proposed: speakers and shakers, both used in the reproduction of music and movies, that allow the issuance of appropriate frequencies, from about 5 to 500 Hz, a range similar to that produced by hammers. We tested both impulsive waveforms and frequency sweeps. One of the attributes of the proposed prototype is that the generated waveforms are controllable through the audio files. As a final test we conducted a seismic refraction profile, forward and reverse, in a test site with 24 geophones spaced one meter each, using a speaker, a shaker and a hammer, to compare the response of the ground to the vibrations produced by each source. For both seismic records (seismograms), the speaker and the shaker, the model includes three strata with propagation velocities similar to those obtained by using the hammer. However, the depths of the layers of the models derived from each seismogram do not correspond. The differences are attributed to environmental effects on the transmission of acoustic waves.

Keywords: acoustic seismic source, seismic to acoustic coupling, shallow seismic refraction.

Dedicatorias

A papá y mamá por todo su apoyo, por creer en mí, por enseñarme a luchar y crecer cada día más, los amo.

A mis hermanos Lorena y Mauricio por llenarme de valentía, los quiero.

A mis sobrinos, por enseñarme a amar de otra manera.

A mis tíos, Leticia Juárez y Pedro Lindoro por estar siempre a mi lado y dejarme tan bellos recuerdos de la infancia. Los quiero.

A mi amiga y compañera: Alejandra, por todo tu apoyo, por las aventuras y las batallas.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me fue otorgado así como al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por las facilidades para concretar mis estudios de maestría.

A mi director de tesis Dr. Antonio González Fernández por el apoyo, confianza y disposición para el desarrollo de esta tesis. También agradezco al resto de mi comité de tesis M. C. Juan Manuel Espinosa Cardeña y M. C. Moisés Castro Delgado por sus comentarios y sugerencias. Gracias a los tres.

Un agradecimiento especial a Luis Carlos Gradilla Martínez quien fue pieza clave para el desarrollo de este trabajo, gracias por tu tiempo y esfuerzo.

Al personal técnico que labora en esta institución, en especial a José Mojarro, Sergio Arregui y Humberto Benítez que siempre me recibieron y atendieron en las crisis computacionales.

Un agradecimiento al personal administrativo, en especial a Martha Elva Barrera que siempre me atendió con eficiencia y amabilidad.

Por todo tu apoyo, confianza, paciencia, motivación y cariño: Gracias Alejandra.

A mis amigos Elia, Martín, Almendra, Tania, Olaf, Nancy, Minerva y Dulce, porque siempre me sacaron una sonrisa y redujeron la tensión de los hombros, por las noches de rumikub, café y ping pong. Gracias por su cariño, los quiero.

A todas las personas con las que conviví y pude pasar buenos momentos: Samuel, Florian, Xóchitl, Javier, Clemente, Cristina y Claudia.

Al círculo de danza Ollin-Coatl de Ensenada por enseñarme otra forma de ver las cosas y sobre todo por los tesoros de la tradición, Tlazocamati.

A todos aquellos que pese a la distancia siempre me apoyaron y motivaron con sus palabras.

Sin uno solo de ustedes, esto no habría sido posible. A todos muchas gracias.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	i
Resumen en inglés.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Tabla de contenido	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	x
1. Introducción	1
1.1 Objetivos	3
2. Marco teórico.....	4
2.1 Acoplamiento sismo-acústico	4
2.2 Principio de Fermat	4
2.3 Principio de Huygens.....	4
2.4 Ley de reflexión	5
2.5 Ley de refracción.....	5
2.6 Método de refracción sísmica.....	7
2.6.1 Curvas de tiempo vs. distancia	10
2.6.2 Cálculo del modelo de capas	10
2.6.3 Tiempos de intersección	11
Capas horizontales	11
Capas inclinadas.....	14
2.7 Equipo	17
2.7.1 Geófonos	17
2.7.2 Unidad de almacenamiento	19
2.7.3 Fuente.....	20
Explosivos.....	21
Caídas de peso	21
Buffalo gun.....	21
Fuentes acústicas	22
3. Prototipo de fuente sísmica propuesta	23
3.1 Equipo de audio	23
3.2 Software de audio	24
3.3 Formas del audio.....	25
3.4 Seismic Unix.....	28
4. Calibración de geófonos	29

5. Resultados.....	37
5.1 Tendidos dentro de las instalaciones del CICESE	37
5.1.1 Resultados	38
5.2 Tendido en el poblado de Maneadero	44
5.2.1 Curvas de tiempo vs. distancia	51
5.2.2 Cálculo de modelos.....	53
6. Discusión.....	57
6.1 Discusión.....	57
6.2 Comparación de la respuesta obtenida con marro, vibrador y bocina.....	58
7. Conclusiones y recomendaciones	60
Referencias bibliográficas	61

Lista de figuras

Figura		Página
1	Diagrama esquemático de la ley de reflexión.....	5
2	Diagrama esquemático de la ley de refracción. Modificado de Sheriff & Geldart, 1995, p. 63.....	6
3	Esquema del modo de operación de la refracción sísmica.....	8
4	Sismograma obtenido al efectuar un tendido de 24 geófonos con un tiempo total de registro de 0.1 s.....	9
5	Modelo de dos capas planas y horizontales con su correspondiente curva de tiempo vs. distancia. Modificado de Redpath, 1973, p.5.....	12
6	Modelo de cuatro capas planas y horizontales con su correspondiente curva de tiempo vs. distancia. Modificado de Redpath, 1973, p. 6.....	13
7	Levantamiento sísmico de un refractor inclinado. a) Tiro directo en el que la trayectoria de los rayos posee una dirección descendente. b) Tiro inverso con trayectoria de rayos ascendente.....	14
8	Levantamiento sísmico con dos tiros, directo e inverso. a) Disposición de los tiros.....	15
9	Diagrama Esquemático de un geófono. Modificado de Evans, 1999, p. 49.....	18
10	Esquema de los componentes del prototipo de la fuente.....	24
11	Equipo empleado para la fuente. a) Amplificador. b) Bocina. c) Vibrador.....	24
12	Barrido de frecuencias con duración de 15 segundos.....	25
13	Acercamiento de la zona de bajas frecuencias del barrido mostrado en la figura 10.....	26
14	Pulsos separados cada medio segundo con duración total de 15 segundos.....	26

Figura		Página
15	Chirridos separados cada segundo con duración total de 15 segundos.....	27
16	Espectro de frecuencias obtenido con Audacity (barrido entre 15 y 400 Hz).....	27
17	Esquema de una mesa vibratoria mecánica. Modificado de Evans, 1997, p. 59.....	29
18	Curva de respuesta de un geófono marca Sercel modelo L-10A.....	30
19	Paneles de la caja para la bocina.....	31
20	Caja de la bocina.....	31
21	Curva de respuesta de la bocina dentro de la caja (Gradilla Martínez, 2011, comunicación personal).....	31
22	Pruebas para calibrar geófono. a) Esponja de poliuretano sobre marco de la bocina. b) Caja llena con polifil. c) Disminución de vibraciones externas. d) Geófono enterrado en un vaso con arena, se encuentra suspendido mediante ligas....	33
23	Disposición de elementos óptima para la calibración.....	34
24	Espectro de frecuencia del geófono L-10A marca Sercel calibrado con audio (Barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz).....	35
25	Espectro de frecuencia del geófono enterrado en el suelo, ya es posible encontrar una respuesta del terreno (Barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz).....	35
26	Espectro de frecuencia del geófono enterrado a 1 y 5 metros de la bocina, el espectro restante se hizo a 5 metros con un volumen mayor (Barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz).....	36
27	Vibrador. a) Montado sobre una tabla de madera. b) Montado sobre una placa metálica. c) Tornillos en la placa metálica para mejorar el acoplamiento placa – suelo.....	43
28	Localización del perfil sísmico de refracción somera.....	45

Figura		Página
29	Localización de las líneas realizadas por Vega en 1989 con sus respectivos sondeos. Modificado de Vega, 1989, p. 27.....	46
30	Sección geológica de la línea 1. Modificado de Vega, 1989, p. 43.....	47
31	Registro del tiro directo efectuado con el marro.....	48
32	Registro del tiro directo efectuado con la bocina.....	48
33	Registro del tiro directo efectuado con el vibrador.....	49
34	Registro del tiro inverso efectuado con el marro.....	49
35	Registro del tiro directo efectuado con la bocina.....	50
36	Registro del tiro directo efectuado con el vibrador.....	50
37	Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con el marro.....	51
38	Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con la bocina.....	52
39	Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con el vibrador.....	52
40	Modelo de capas inclinadas obtenido al emplear como fuente el marro.....	55
41	Modelo de capas inclinadas obtenido al emplear como fuente la bocina.....	55
42	Modelo de capas inclinadas obtenido al emplear como fuente el vibrador.....	56
43	Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con las tres fuentes...	59

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Características del equipo empleado para la fuente.....	24
2	Dimensiones de la caja para la bocina.....	30
3	Número de registros y características de la prueba del 17 de enero.....	39
4	Número de registros y características de la prueba del 27 de febrero.....	39
5	Número de registros y características de la prueba del 20 de marzo.....	40
6	Número de registros y características de la prueba del 30 de marzo.....	40
7	Número de registros y características de la prueba del 20 de abril.....	41
8	Número de registros y características de la prueba del 24 de abril.....	42
9	Número de registros y características de la prueba del 18 de mayo.....	42
10	Número de registros y características de la prueba del 27 de junio.....	44
11	Información obtenida de las curvas de tiempo vs. distancia.....	53

1. Introducción

Los métodos sísmicos de refracción constituyen una alternativa viable en la exploración somera (decenas de metros) del subsuelo debido a su alta resolución y precisión. La principal limitación en los estudios sísmicos someros es la velocidad de adquisición de información en campo, la cual depende en gran medida del tipo de fuente sísmica que se utilice.

Dado que la base de la exploración sísmica de refracción radica en la generación de ondas elásticas, tanto el tipo de fuente como su modo de operación son de vital importancia para la obtención de buenas señales en el equipo de registro. La detonación de explosivos es una fuente que libera ondas con la cantidad de energía necesaria para viajar en el subsuelo y ser registradas, además de la forma impulsiva que dichas explosiones generan, ideal para la lectura de tiempos de arribo. Sin embargo, existe un peligro en el manejo de explosivos, lo cual ha dado lugar a restricciones legales, relacionadas con el transporte, almacenamiento y manipulación de éstos.

Por otro lado la construcción de señales útiles a partir de impactos mecánicos y fuentes similares de baja energía mediante la correcta y sincronizada adición de impactos individuales, condujo a la utilización de caídas de peso o disparos de escopeta los cuales no requieren excavaciones como en el caso de los explosivos, lo cual implica una optimización de tiempo y menos trabajo. El uso y traslado de los equipos de caída de peso en ocasiones puede resultar complicado, principalmente en zonas accidentadas o que cuentan con accesos limitados, aunado al elevado costo de dichas herramientas. En cuanto a los disparos con escopetas también son problemáticos, debido al control de armas en México.

El uso del marro como fuente sísmica mecánica, muy popular en estudios de exploración sísmica de refracción somera, permite la generación de ondas con la energía y penetración necesaria para determinar características del suelo tales como el espesor de la capa intemperizada y la profundidad de basamentos en los cuales cimentar obras de ingeniería civil; las principales limitantes de este tipo de fuente radican en el tiempo necesario para obtener registros en grandes áreas además de lo cansado que puede resultar, dado que se requiere golpear repetidamente contra una placa metálica colocada en el piso.

La introducción de nuevos tipos de fuente ofrece distintas ventajas, entre las que destacan las económicas y operacionales; por todo ello, en el presente trabajo se implementa un prototipo de fuente sísmica basada en audio. Cuando una onda sonora se propaga por el aire e incide en la superficie del suelo, provoca que el aire contenido en los poros del terreno oscile, tales oscilaciones inducen al terreno vibraciones que pueden ser detectadas en la superficie con geófonos verticales. Éste fenómeno conocido como *acoplamiento sismo-acústico* ha sido empleado con éxito en la detección de explosivos enterrados a poca profundidad (Xiang y Sabatier, 2000, Sabatier y Xiang, 2001, Sabatier, 2006).

Para el funcionamiento del prototipo generamos señales mediante software (libre), las cuales contienen intervalos de frecuencia deseados, lo cual hace de ésta una fuente muy controlable, en contraste con los explosivos y las caídas de peso; el software permite la creación de barridos de frecuencia u otras formas de onda.

Posteriormente las señales, que pueden reproducirse en cualquier dispositivo de audio (celular, iPod, computadora, etc.), se conectan a un amplificador y éste a su vez a una bocina o vibrador colocado en el suelo, para que de este modo la onda se propague por el subsuelo generando movimientos del terreno, los cuales se registran y almacenan con ayuda de un sismógrafo y geófonos.

Para corroborar que los sensores responden a las vibraciones inducidas al reproducir el audio, se propone un método alternativo para la calibración de geófonos.

Después de realizar pruebas con distintas formas de onda, usamos aquella que consideramos más adecuada para registrar una línea sísmica, para lo cual empleamos tres tipos de fuente: el marro, la bocina y el vibrador, a fin de comparar los resultados obtenidos con cada una de ellas.

1.1 Objetivos

El objetivo general del presente trabajo radica en la implementación de un prototipo de una fuente de energía para exploración sísmica de refracción somera que emplee audio y al mismo tiempo sea económica, controlable, sin limitaciones en zonas de difícil acceso para vehículos y que optimice el trabajo en el campo.

Para corroborar que los geófonos responden a las vibraciones generadas por el audio, se propondrá una técnica de calibración óptima que emplee audio.

Como otro objetivo particular buscaremos encontrar la forma de onda (impulsiva, emergente o una mezcla de ambas) y el procesamiento de datos que permita obtener registros con señales más impulsivas y al mismo tiempo disminuir el ruido.

Por último, se realizará un perfil sísmico de refracción directo e inverso en un sitio de prueba empleando la fuente propuesta y una fuente convencional (marro) con la finalidad de comparar los resultados correspondientes a cada tipo de fuente.

2. Marco teórico

2.1 Acoplamiento sismo-acústico

Cuando una onda sonora se propaga por el aire e incide en la superficie del suelo, provoca que el aire contenido en los poros del terreno oscile. La oscilación resultante depende tanto de la frecuencia y amplitud de la perturbación acústica como de las propiedades elásticas del medio propagante. Este fenómeno conocido como *acoplamiento sismo-acústico* puede ser registrado por uno o más geófonos enterrados sobre la superficie de algún área de interés posibilitando la detección de heterogeneidades en el subsuelo localizadas a profundidades someras. Los principios fundamentales que rigen la propagación de los movimientos ondulatorios producidos son idénticos a los que gobiernan la propagación de ondas luminosas, los cuales se enuncian a continuación.

2.2 Principio de Fermat

La geometría de las trayectorias seguidas por los rayos está gobernada por este principio, el cual establece que la trayectoria que un rayo dado sigue entre dos puntos es aquella que requiere el tiempo mínimo de recorrido.

2.3 Principio de Huygens

El principio de Huygens establece que cada punto en un frente de onda es una fuente secundaria de ondas esféricas que viajan con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda. Se conoce con el nombre de *rayos* a las líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda, tales líneas corresponden a las trayectorias de propagación de las ondas.

2.4 Ley de reflexión

Cuando un rayo que se propaga por un medio incide con cierto ángulo θ_i respecto a la normal de una discontinuidad, la cual se debe a un cambio en las propiedades elásticas del medio, parte de la energía es reflejada con un ángulo θ_r , dicho ángulo será igual al ángulo del rayo incidente θ_i , siempre que el rayo incidente, el reflejado y la normal se encuentren en un mismo plano (figura 1).

$$\theta_i = \theta_r \quad (1)$$

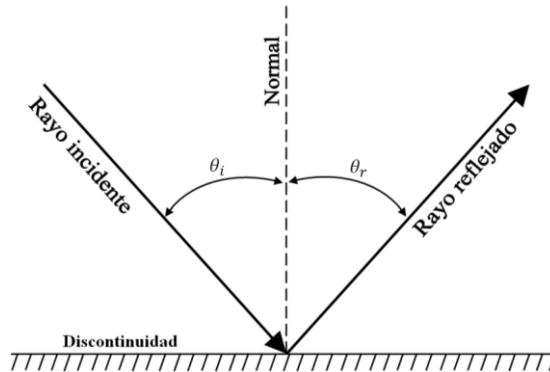


Figura 1. Diagrama esquemático de la ley de reflexión.

2.5 Ley de refracción

Como ya se mencionó anteriormente, cuando en su camino un rayo encuentra una interfaz entre dos medios con distintas propiedades elásticas, una parte de la energía de este rayo se refleja y permanece en el medio inicial, mientras que el resto de dicha energía se transfiere con un cambio de dirección al segundo medio.

Consideremos un frente de onda AB, el cual incide en la interfaz entre dos medios con velocidades V_1 y V_2 respectivamente, como se muestra en la figura 2. Si el frente es curvo, simplemente consideraremos a A y B lo suficientemente cerca el uno del otro de modo que AB sea plano; cuando AB ocupa la posición A'B' cuando A toca la interfaz, la energía en B' aún debe recorrer la distancia B'R para tocar la

superficie. Considerando que Δt es el intervalo de tiempo en que la energía en A' recorre la distancia A'T y en el mismo intervalo la energía en B' llega a R, así, de los triángulos A'B'R y A'TR tenemos que

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{V_1\Delta t}{A'R} \quad (2)$$

y que

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{V_2\Delta t}{A'R} \quad (3)$$

Entonces:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{V_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{V_2} \quad (4)$$

El ángulo θ_2 es el ángulo de refracción y la ecuación (4) es, en síntesis, la ley de refracción, también llamada ley de Snell.

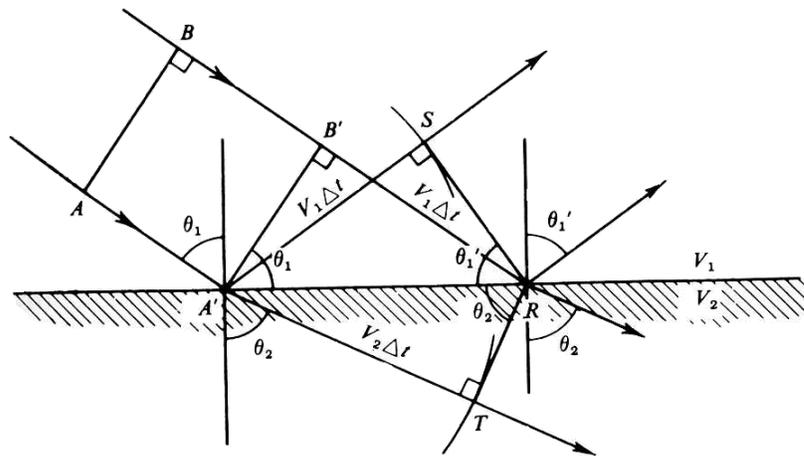


Figura 2. Diagrama esquemático de la ley de refracción. Modificado de Sheriff & Geldart, 1995, p. 63.

Cuando la velocidad del segundo medio es menor que la del primero, el ángulo de refracción será menor al de incidencia, por el contrario, si la velocidad del segundo

medio es más grande que la del primero, el ángulo de refracción alcanza los 90° cuando

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (5)$$

En este caso el rayo refractado viaja a lo largo de la interfaz y el ángulo de incidencia se denomina *ángulo crítico*, θ_c , evidentemente

$$\text{sen } \theta_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (6)$$

Si el ángulo de incidencia es mayor que θ_c , es imposible satisfacer la ley de refracción puesto que $\text{sen } \theta_c$ no puede exceder la unidad, es en este caso cuando ocurre la reflexión total.

Al hablar de ondas que se reflejan y se refractan, conduce en la práctica a dos técnicas de exploración sísmica: Método de reflexión y Método de refracción. En ambos se utilizan fuentes, equipos de registro y sensores similares, lo que las diferencia es la técnica de campo y la banda de frecuencias que se utilizan para registrar las ondas sísmicas. Por ser de nuestro interés a continuación se describe el de refracción sísmica.

2.6 Método de refracción sísmica

El modo básico en el que opera el método de refracción sísmica se ilustra en la figura 3 y se explica a continuación:

1. Se coloca un *tendido sísmico* o *línea de refracción*, dicha línea consiste en sensores enterrados en el suelo denominados *geófonos*.

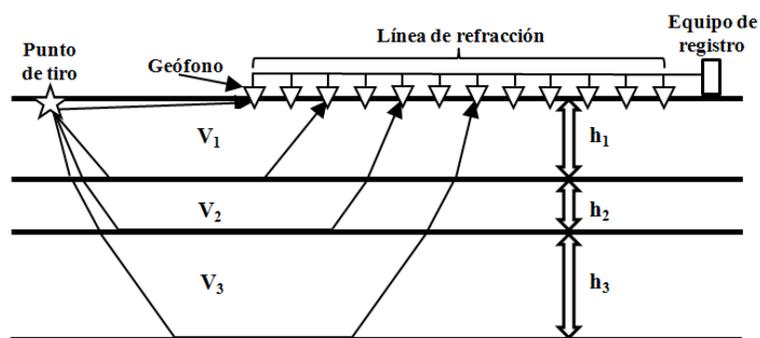


Figura 3. Esquema del modo de operación de la refracción sísmica.

2. En un extremo del tendido se ubica el *punto de disparo* y mediante el uso de alguna *fuerza* (marro, caídas de peso, detonación de explosivos o vibradores), se generan ondas sísmicas de manera artificial, a esto se le conocerá como *tiro directo*.
3. Las ondas generadas se propagan por el subsuelo hasta encontrar interfaces en las cuales la energía es refractada de forma crítica y regresa a superficie.
4. Cuando la energía regresa a la superficie, los geófonos son los responsables de registrar los *tiempos de arribo*, es decir, el tiempo que demoran las ondas en viajar del punto de disparo a cada punto de la línea de refracción.
5. Finalmente, los tiempos de arribo son enviados de los geófonos a una unidad de almacenamiento denominada *sismógrafo*, la cual está constituida por varios elementos que tienen por función amplificar los pequeños impulsos eléctricos que llega a los sismo detectores; eliminar perturbaciones que enmascaran los impulsos útiles mediante dispositivos; usualmente llamados filtros; graficar los impulsos recibidos por los geófonos y, mediante un sistema de marcado del tiempo, determinar el que ha transcurrido desde el instante de generación de la onda hasta su recepción por el sismo detector o geófono.

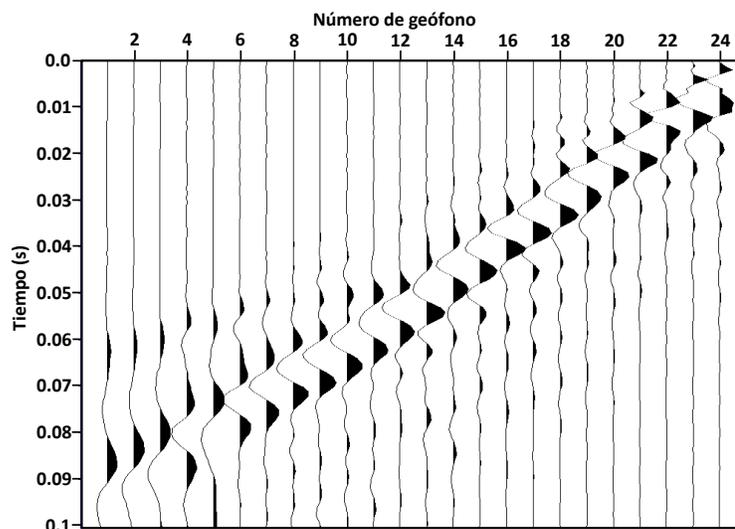


Figura 4. Sismograma obtenido al efectuar un tendido de 24 geófonos con un tiempo total de registro de 0.1 s.

Una vez realizado el proceso anterior se procede a ubicar el punto de tiro en el extremo opuesto de la línea de refracción para realizar un *tiro inverso* y si se desea obtener información más detallada del subsuelo, el punto de tiro se coloca en el centro de la línea a fin de efectuar un *tiro intermedio*.

Los tiempos de arribo obtenidos y las distancias conocidas constituirán los datos crudos (figura 4), los cuales posteriormente son procesados para obtener información de las variaciones de la velocidad con la profundidad, para finalmente realizar interpretaciones.

La suposición principal del método de refracción sísmica es que la velocidad de las capas aumenta con la profundidad, de lo contrario, el método no permitirá identificar tales capas.

Generalmente la presencia de capas muy delgadas conlleva a malas interpretaciones, ya que no alcanzan a producir primeros arribos; además, en el caso de que una capa posea velocidad menor a la del estrato superior, no habrá refracción sísmica; por tanto no habrá indicios de su presencia.

2.6.1 Curvas de tiempo vs. distancia

Una vez obtenidos los datos en campo deben leerse los tiempos de los primeros arribos registrados en cada geófono, ya sea, en la unidad de adquisición o en una computadora con el software adecuado. Tales tiempos son graficados contra la correspondiente distancia entre el punto de tiro y cada geófono. La finalidad principal de estas *curvas de tiempo vs. distancia* es identificar las secciones que pertenecen a un mismo refractor. El conjunto de puntos pertenecientes a un mismo refractor constituye lo que se denomina *dromocrona*.

La primera dromocrona representa la onda que se propaga a través de la primera capa de forma directa y su pendiente $\Delta t/\Delta x$ corresponde al inverso de la velocidad de la primera capa, esto es $1/V_1$.

A cierta distancia crítica x_c , le toma menos tiempo a la onda viajar hacia la superficie desde la segunda capa, donde es refractada de forma crítica a lo largo de la interfaz con una velocidad V_2 , finalmente se propaga a lo largo de la capa superior y vuelve a la superficie, donde los geófonos registrarán los tiempos de arribo; la segunda dromocrona, caracterizada por un cambio de pendiente respecto al de la onda directa, se grafica con estos tiempos. Los restantes cambios de pendiente en la curva de tiempo vs. distancia corresponden a las distintas capas que la onda encuentra en su camino.

Las dromocronas, excepto para la onda directa, no pasan a través del origen, sino que se proyectan al eje del tiempo. Con estos tiempos de intersección y las velocidades calculadas, es posible determinar la profundidad de las capas.

2.6.2 Cálculo del modelo de capas

Existen distintas metodologías para el cálculo de modelos sísmicos de capas, planas horizontales e inclinadas, según las necesidades de cada problema se

empleará uno u otro. Los métodos más comunes son: tiempos de intersección, distancia crítica, frentes de onda, tiempos de retardo y trazado de rayos.

Dado que la elaboración de modelos detallados no es uno de los objetivos del presente trabajo y sólo se construirán para corroborar la funcionalidad de la fuente propuesta, en esta sección sólo se describirá el método de *tiempos de intersección* para capas horizontales e inclinadas, que es el que se empleó para interpretar las curvas de tiempo vs. distancia del perfil de refracción realizado en el sitio de prueba.

2.6.3 Tiempos de intersección

Siguiendo a Redpath (1973) y Lillie (1999) se describe el método para capas planas horizontales e inclinadas

Capas horizontales

Como se observa en la figura 5, de la curva de tiempo vs. distancia podemos emplear las pendientes de las dromocronas para calcular las velocidades de las capas, así como los tiempos de intersección.

Mediante trigonometría y aplicando la ley de Snell, el tiempo de arribo del rayo refractado con trayectoria ABCD de la figura 4 puede calcularse mediante

$$t = \frac{2Z_1 \cos \theta}{v_1} + \frac{x}{v_2} \quad (7)$$

donde x es la distancia horizontal entre la fuente y el primer geófono.

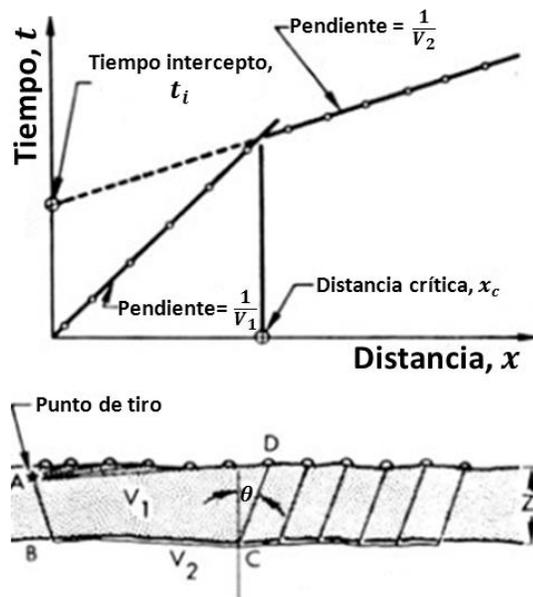


Figura 5. Modelo de dos capas planas y horizontales con su correspondiente curva de tiempo vs. distancia. Modificado de Redpath, 1973, p. 5.

Si tomamos en cuenta que a una distancia $x = 0$, el tiempo t es igual al tiempo intercepto t_i ; entonces podemos reescribir (7) del siguiente modo

$$Z_1 = \frac{t_i V_1}{2 \cos \theta} \quad (8)$$

esto es

$$Z_1 = \frac{t_i V_1}{2 \cos[\text{sen}^{-1}(V_1/V_2)]} \quad (9)$$

Puesto que la información necesaria se obtiene de la curva de tiempo vs. distancia, es posible calcular el espesor de la primera capa empleando la ecuación (9).

El método de tiempos de intercepción puede extenderse al caso de capas múltiples como el que se muestra en la figura 6.

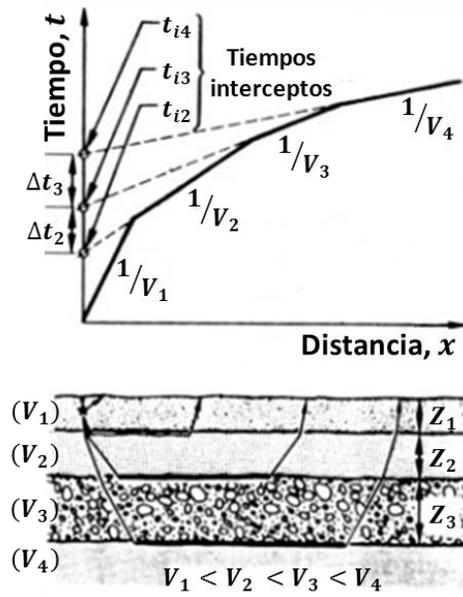


Figura 6. Modelo de cuatro capas planas y horizontales con su correspondiente curva de tiempo vs. distancia. Modificado de Redpath, 1973, p. 6.

A continuación se presentan las ecuaciones necesarias para calcular los espesores de las capas de la figura 6; dado que la derivación de tales ecuaciones es la misma que en el caso de dos capas, sólo se presentan los resultados.

$$Z_1 = \frac{t_{i2} V_1}{2 \cos[\text{sen}^{-1}(V_1/V_2)]} \quad (10)$$

$$Z_2 = \frac{V_2 \left\{ t_{i3} - t_{i2} \frac{\cos[\text{sen}^{-1}(V_1/V_3)]}{\cos[\text{sen}^{-1}(V_1/V_2)]} \right\}}{2 \cos[\text{sen}^{-1}(V_2/V_3)]} \quad (11)$$

$$Z_3 = \frac{V_3 \left\{ t_{i4} - t_{i2} \frac{\cos[\text{sen}^{-1}(V_1/V_4)]}{\cos[\text{sen}^{-1}(V_1/V_2)]} - \frac{2Z_2 \cos[\text{sen}^{-1}(V_2/V_4)]}{V_2} \right\}}{2 \cos(\text{sen}^{-1} V_3/V_4)} \quad (12)$$

Empleando la curva de tiempo vs. distancia además de las ecuaciones (10), (11) y (12), se puede conocer la velocidad y espesor de cada capa, a excepción de la última; para la cual sólo será posible calcular la velocidad, ya que la onda se refracta de manera crítica a lo largo de la interfaz.

Capas inclinadas

Generalmente las capas del subsuelo no son completamente horizontales y planas, sino que tienden a poseer inclinación, por ello la velocidad calculada por el método de tiempos de intercepción es una *velocidad aparente*. Dicha velocidad conlleva a un error en el cálculo de las profundidades de los modelos. Tal profundidad será válida sólo para un punto a lo largo de la línea (Redpath, 1973).

Para una interfaz inclinada como la que se muestra en la figura 7, la velocidad aparente de la capa inferior, tanto del tiro directo como la del inverso, serán distintas de la velocidad real de la capa refractora.

Cuando los rayos de la refracción crítica recorren una trayectoria del punto de tiro hacia los receptores de manera descendente, como en la figura 7a, emergen con un ángulo pequeño, lo que produce una velocidad aparente V_{2d} , inferior a la velocidad real V_2 . En caso de llegar de manera ascendente (como en la figura 7b) la velocidad aparente V_{2u} , será mayor a la real V_2 , dado que, los rayos emergen con un ángulo mayor.

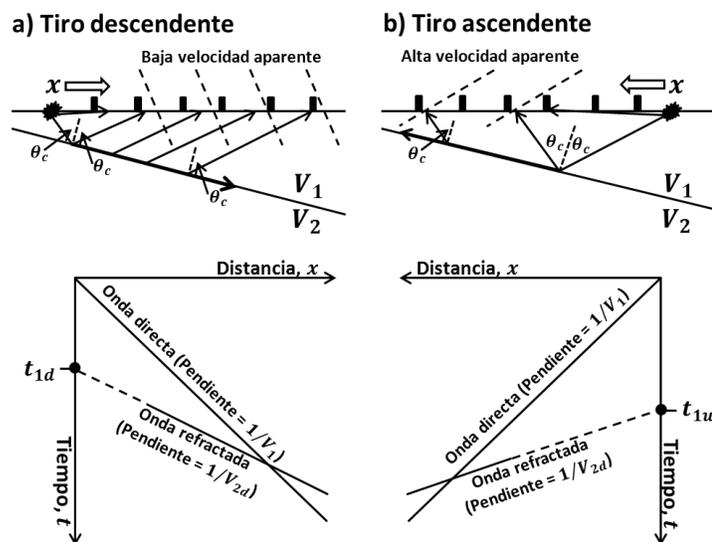


Figura 7. Levantamiento sísmico de un refractor inclinado. a) Tiro directo en el que la trayectoria de los rayos posee una dirección descendente. b) Tiro inverso con trayectoria de rayos ascendente.

Modificado de Lillie, 1999, p. 87.

Un levantamiento sísmico con tiro directo e inverso, como el de la figura 8, posee información suficiente para elaborar un modelo de capas inclinadas. Para tal interfaz con pendiente, los tiros descendente (t_{1d}), y ascendente (t_{1u}), son distintos

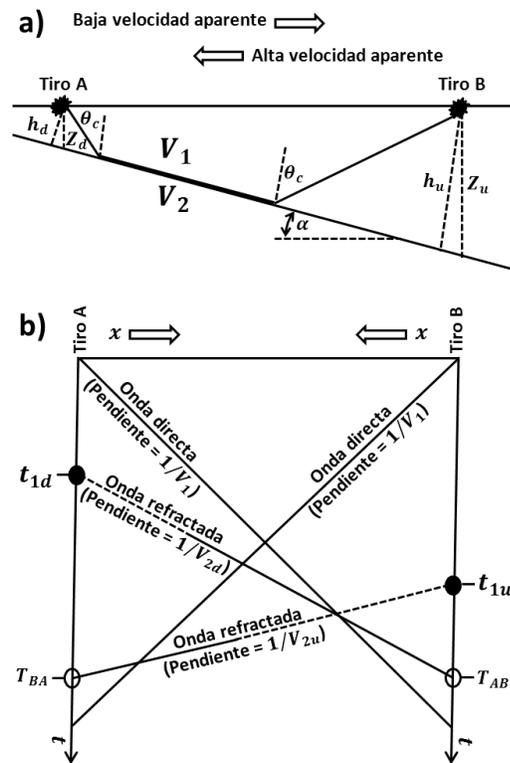


Figura 8. Levantamiento sísmico con dos tiros, directo e inverso. a) Disposición de los tiros. b) Curvas de tiempo vs. distancia. Modificado de Lillie, 1999, p. 88.

$$t_{1d} \neq t_{1u} \quad (13)$$

Para que el siguiente análisis sea correcto, los tiempos de viaje de A hacia B (t_{AB}) y de B hacia A (t_{BA}) deberán ser iguales

$$t_{AB} = t_{BA} \quad (14)$$

Entonces las velocidades aparentes de los tiros descendente y ascendente serán

$$V_{2d} = \frac{V_1}{\text{sen}(\theta_c + \alpha)} \quad (15)$$

$$V_{2u} = \frac{V_1}{\text{sen}(\theta_c - \alpha)} \quad (16)$$

donde

V_{2d} = Velocidad aparente del tiro descendente.

V_{2u} = Velocidad aparente del tiro ascendente.

V_1 = Velocidad de la capa superior.

θ_c = Ángulo crítico.

α = Ángulo de inclinación de la interfaz.

θ_c y α , pueden determinarse resolviendo para V_{2d} y V_{2u} simultáneamente

$$\alpha = \frac{\text{sen}^{-1}(V_1/V_{2d}) - \text{sen}^{-1}(V_1/V_{2u})}{2} \quad (17)$$

$$\theta_c = \frac{\text{sen}^{-1}(V_1/V_{2d}) + \text{sen}^{-1}(V_1/V_{2u})}{2} \quad (18)$$

Las velocidades reales pueden determinarse con ayuda de la curva de tiempo vs. distancia (figura 8b), para V_1 basta con la pendiente del rayo directo y para V_2 con la ley de Snell

$$V_1 = \frac{1}{\text{pendiente de la onda directa}} \quad (19)$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\text{sen} \theta_c} \quad (20)$$

Las distancias perpendiculares a la interfaz serán

$$h_d = \frac{V_1 t_{1d}}{2 \cos \theta_c} \quad (21)$$

$$h_u = \frac{V_1 t_{1u}}{2 \cos \theta_c} \quad (22)$$

Finalmente las profundidades verticales de la primera capa en cada punto de tiro se calcularán mediante

$$Z_d = \frac{h_d}{\cos \alpha} \quad (23)$$

$$Z_u = \frac{h_u}{\cos \alpha} \quad (24)$$

Donde Z_d es la profundidad cuando el tiro es descendente y Z_u cuando es ascendente.

Puesto que la extensión del método a múltiples capas prácticamente resulta un proceso iterativo, resultaría redundante presentar las ecuaciones para continuar calculando las profundidades y velocidades reales (Lillie, 1999).

2.7 Equipo

Como ya se explicó con anterioridad, el modo en que opera la exploración requiere de equipo especializado en dos etapas. La primera es la generación de vibraciones, para la cual existen diversos tipos de fuente que se analizan más adelante. La otra etapa la constituye el registro de los tiempos de arribo, el equipo empleado para tal fin se describe a continuación.

2.7.1 Geófonos

El primer eslabón en la cadena del proceso de registro lo constituyen los geófonos, puesto que es el instrumento que se encuentra en contacto directo con el suelo y de esta manera es que puede transformar los movimientos del terreno en señales eléctricas.

Como se observa en la figura 9, los elementos esenciales para que un geófono opere son: un imán, un conductor y un resorte. En la figura 9 el conductor se representa con un alambre que pasa entre los dos polos del imán; en la realidad, el conductor es un largo alambre de cobre enrollado en forma de bobina cilíndrica. Esta bobina posee una masa, la cual determina la fuerza necesaria para que los resortes, mantengan la bobina entre los polos del imán.

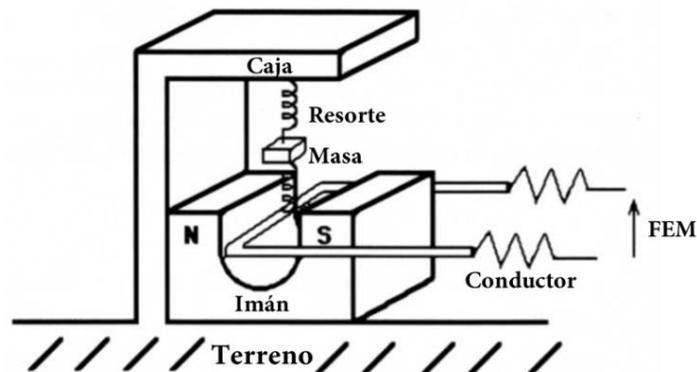


Figura 9. Diagrama esquemático de un geófono. Modificado de Evans, 1999, p. 49.

Si el suelo se mueve hacia arriba, tanto la caja como el imán se moverán con él. En principio la masa intentará permanecer en su mismo sitio debido a la inercia o se moverá hacia abajo con respecto del imán y la caja. Posteriormente el resorte ejercerá sobre la masa, una fuerza hacia arriba hasta moverla en tal dirección. Cuando el terreno, el imán y la caja dejen de moverse, la inercia de la masa provoca que se siga moviendo hasta que el resorte de abajo la detenga. Si la caja ya no se mueve hacia abajo, el resorte inferior seguirá tirando de la masa hacia abajo hasta que el resorte superior se extienda lo suficiente para detener el movimiento descendente. La masa comienza a moverse hacia arriba de nuevo. Por lo tanto, el movimiento inicial del terreno provoca que la masa oscile entre los dos resortes. Dado que la energía está siendo constantemente disipada en los resortes y el aire, el movimiento de la masa disminuirá gradualmente en amplitud. Éste comportamiento es llamado *movimiento armónico simple amortiguado*.

De acuerdo con la ley de Faraday, el movimiento del conductor a través del campo magnético, causa que se induzca una fuerza electromotriz (FEM), que es proporcional a la velocidad del movimiento del terreno. Esta FEM causa una corriente de flujo que es enviada y registrada en el sismógrafo.

En el espectro de frecuencias un geófono idealmente debe dar la misma amplitud en todas las frecuencias, es decir, tener una respuesta plana, pero debido a sus características eléctricas y mecánicas, éste responde de distinta manera frente a cada frecuencia. Como resultado, en la práctica la respuesta del geófono no es la misma para todas las frecuencias.

En trabajos de refracción sísmica se utilizan geófonos verticales con un rango de frecuencias bajas entre 8 a 10 Hz. Los geófonos empleados en todas las pruebas del presente trabajo, corresponden al modelo L – 10A de la marca Sercel con respuesta plana en un intervalo de frecuencias entre 10 y 30 Hz.

2.7.2 Unidad de almacenamiento

Es el equipo responsable de digitalizar y almacenar la información que los geófonos han detectado; tiempos de arribo, frecuencias y amplitudes con que las ondas viajan desde la fuente hasta los sensores. La información es enviada desde los geófonos hasta la unidad de almacenamiento mediante un cable al cual están conectados tanto los sensores como la unidad almacenadora.

Existe diversidad de unidades de almacenamiento, las sencillas sirven únicamente para digitalizar y almacenar la información que después se descargará en equipo de cómputo con el software necesario para el procesado de datos.

Hoy en día existen equipos bastante sofisticados que permiten visualizar los datos en pantallas o papel impreso, incluso pueden estar provistos de software capaz de

añadir ganancia a los datos, amplificarlos, filtrarlos, efectuar análisis de espectros y otros procesos más específicos según el equipo con que se cuente.

Para todas las pruebas realizadas en el presente trabajo, el equipo de registro empleado fue un StrataVisor NZXP de la marca Geometrics.

2.7.3 Fuente

Generalmente la fuente suele ser el elemento más grande y pesado de todo el equipo de exploración sísmica de refracción, por lo que, si la fuente tiene un fácil acceso al área de estudio, el resto del equipo no presentará problemas para hacerlo.

La elección de la fuente es una pieza clave para los estudios sísmicos de refracción; de no ser la adecuada, los datos resultarán inservibles. Tal decisión debe basarse en los siguientes puntos:

- a) Penetración a la profundidad deseada.
- b) Anchura de banda para la resolución requerida.
- c) Razón señal a ruido pertinente.
- d) Zona de exploración y medio ambiente adecuados.
- e) Posibilidad y costos.

Una fuente ideal debe generar ondas que:

- a) Contengan suficiente energía.
- b) Sean de corta duración, con el objetivo de visualizar interfaces estrechamente separadas.
- c) Sean repetibles
- d) No generen ruido o generen el menos posible.

A continuación se analizan algunas de las fuentes más empleadas.

Explosivos

Para el uso de explosivos se requiere cavar pozos, lo cuales serán cargados con el material explosivo, esto se realiza con la finalidad de que la energía no se disipe por el aire, y que viaje a través de las capas del subsuelo. Esta fuente genera ondas con bastante energía y una amplia anchura de banda. Pese a sus atributos sísmicos, el uso de explosivos conlleva inconvenientes como: el riesgo que se corre al transportar y manipular material explosivo, los elevados costos para la perforación de pozos de tiro, limitaciones en lugares con asentamientos próximos, implicaciones ambientales y el ruido generado por el colapso del pozo, al momento de la detonación.

Caídas de peso

Según las necesidades del estudio, el peso empleado en esta fuente puede variar desde unos cuantos kilogramos hasta toneladas. Generalmente los estudios poco profundos emplean marros, con los cuales se debe golpear en repetidas ocasiones; estos golpes generan formas de onda muy variable además de resultar cansado. La ventaja del uso de marros es el bajo costo y fácil acceso.

Buffalo gun

Otra fuente de energía empleada es la detonación de cartuchos de escopeta en pequeños orificios previamente cavados en el suelo. Los cartuchos se introducen en un dispositivo de disparo conocido como Buffalo gun, el cual se conforma de un tubo que en un extremo tiene una recámara para la explosión y en el otro un gatillo que, simultáneamente, inicia la explosión del cartucho y el registro en el sismógrafo. Tanto la aplicación como la profundidad alcanzada por esta fuente

dependerán de la variación de la profundidad del tiro y la carga del cartucho empleada.

Aunque las características de la señal generadas con ésta fuente están, en gran medida, determinadas por la naturaleza del cartucho disparado, las frecuencias generadas son más altas que las producidas por fuentes mecánicas.

Fuentes acústicas

Xiang y Sabatier (2000) implementaron con éxito una fuente acústica para localizar minas enterradas a poca profundidad. Ellos emplearon una bocina para emitir ondas acústicas a distintas frecuencias y con ayuda de geófonos enterrados en el suelo, monitorearon la respuesta del terreno. Tales sensores se encontraban dispuestos en forma de malla con el fin de cubrir determinada área en la que se encontraba enterrada una mina desactivada la cual, fue posible localizar.

Bajo la hipótesis de que el comportamiento natural de los elefantes salvajes cambiaría ante estímulos sísmicos significativos, O'Connell-Rodwell y colaboradores (2006) realizaron un estudio en el Parque Nacional Etosha, Namibia. Con ayuda de un vibrador reprodujeron réplicas sísmicas de las vocalizaciones de baja frecuencia que estos animales son capaces de emitir. Al monitorear a los elefantes estos autores pudieron observar claros cambios en el comportamiento de estos animales asociados a la reproducción de las señales.

3. Prototipo de fuente sísmica propuesta

En la figura 10 se muestra un esquema de los componentes que constituyen el prototipo de fuente sísmica basada en audio que se desarrolló en este trabajo. Los componentes principales y las características de la fuente acústica se describen a continuación.

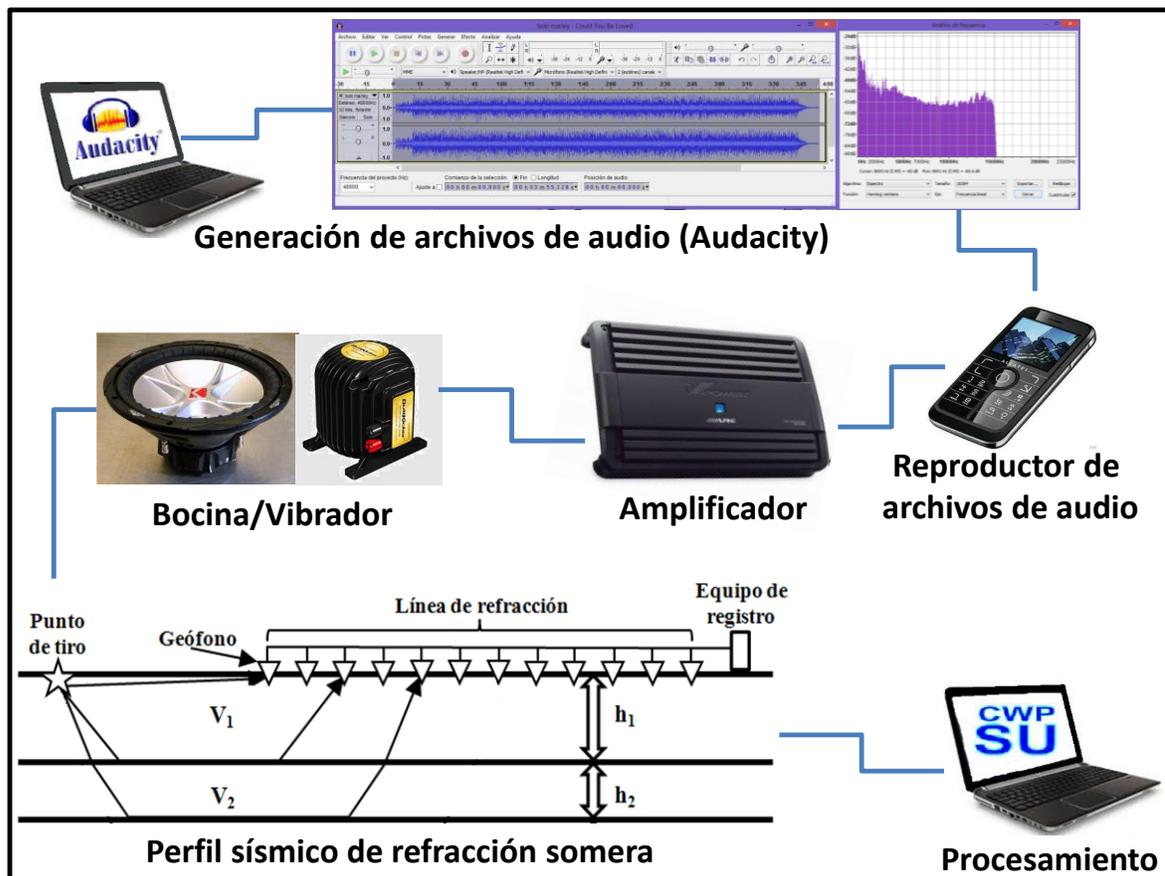


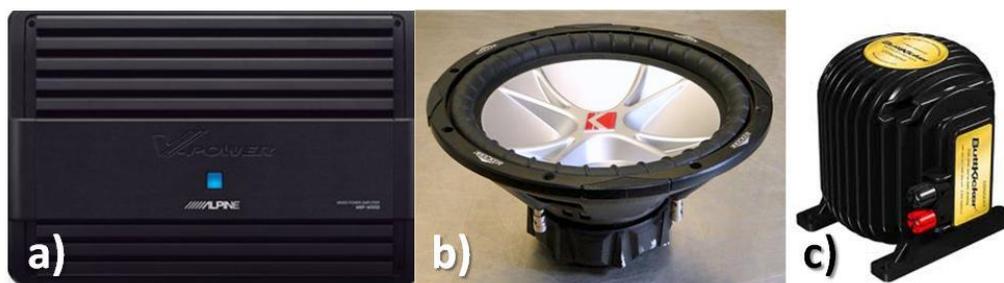
Figura 10. Esquema de los componentes del prototipo de la fuente.

3.1 Equipo de audio

El presente trabajo propone una nueva fuente para exploración sísmica que emplea audio. Las características del equipo empleado se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características del equipo empleado para la fuente

Equipo	Marca	Modelo	Respuesta de frecuencia (Hz)
Amplificador	Alpine	MRP – M1000	20 – 200
Bocina	Kicker	CVR15	25 – 500
Vibrador	Buttkicker	Concert	5 – 200

**Figura 11.** Equipo empleado para la fuente. a) Amplificador. b) Bocina. c) Vibrador.

Además de los tres elementos de la figura 11, se utilizó un celular como reproductor de audio, éste puede ser sustituido por cualquier otro reproductor (iPod, Tablet, Laptop, etcétera).

3.2 Software de audio

El programa Audacity es un editor de audio de libre acceso para distintos sistemas operativos. Audacity fue creado por Dominic Mazzoni y Roger Dannenberg en 1999 en la Universidad de Carnegie Mellon y fue publicado como software de acceso abierto en SourceForge.net en mayo de 2000.

Entre algunas de las cosas que se pueden efectuar con Audacity están:

- Grabar audio en vivo.
- Convertir cintas y grabaciones a sonido digital o CD.
- Generar y editar archivos, MP3, WAV y AIFF.

- Cortar, copiar, unir y mezclar sonidos.
- Cambiar la velocidad o el tono de una grabación.
- Importar y exportar archivos WAV, MP3, AIFF, AU, FLAC.
- Analizar el espectro de las señales.
- Aplicar diversos filtros a las señales.

3.3 Formas del audio

Empleando el programa Audacity, se generaron distintos archivos de audio; según los resultados y necesidades que surgieron durante el desarrollo de este trabajo, se varió el intervalo de frecuencias. Los tipos de audio que empleamos fueron los siguientes:

1. Barrido de frecuencias (*sweep*). La forma de la onda es sinusoidal, al emplear frecuencias bajas con la bocina, se disminuyó la amplitud para tener una respuesta óptima del altavoz.

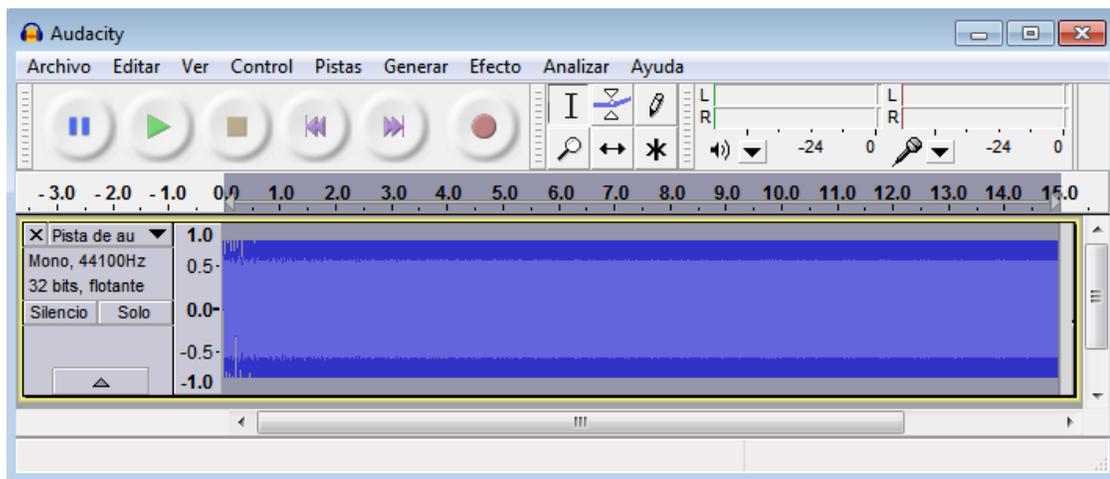


Figura 12. Barrido de frecuencias con duración de 15 segundos.

La figura 13 corresponde a un acercamiento de la zona de bajas frecuencias del barrido que se muestra en la figura 12.

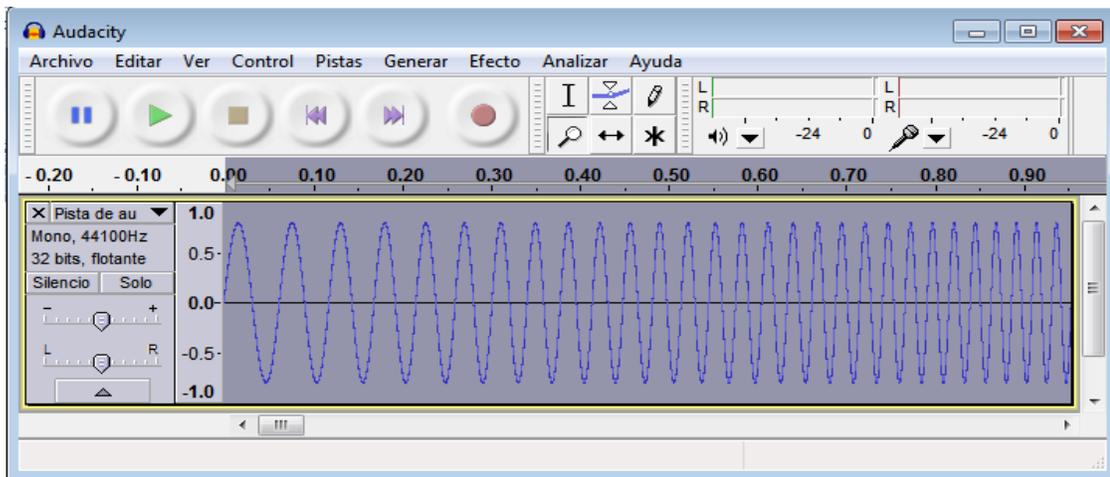


Figura 13. Acercamiento de la zona de bajas frecuencias del barrido mostrado en la figura 10.

2. Pulsos. La separación entre pulsos en la mayoría de las pruebas fue de medio segundo. Los picos se obtuvieron filtrando picos (*spikes*).

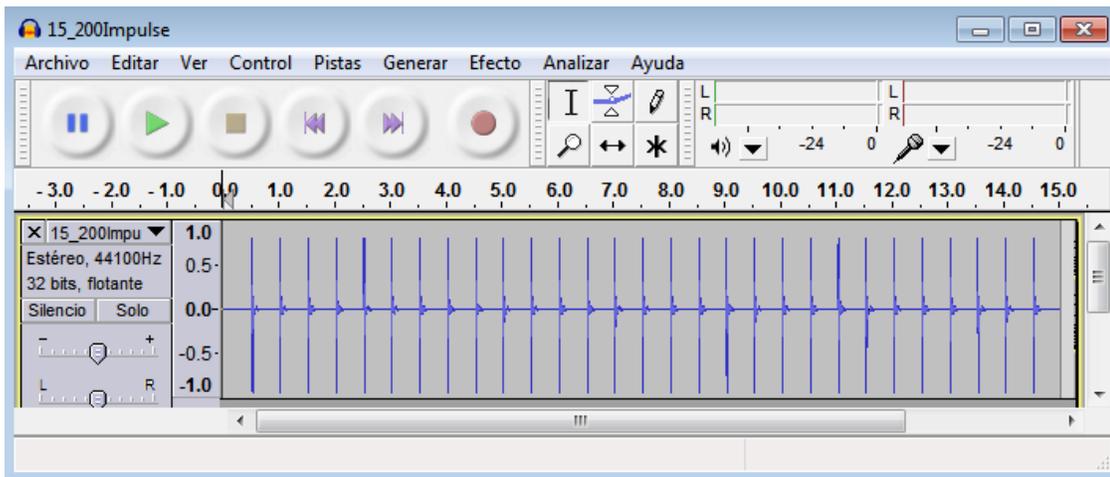


Figura 14. Pulsos separados cada medio segundo con duración total de 15 segundos.

3. Chirrido o *chirp* por sus siglas en inglés (Compressed High Intensity Radar Pulse). Consiste de una mezcla de los dos anteriores, cada segundo se encuentra un barrido de frecuencias comprimido. Este tipo de señales generalmente se emplean en radares.

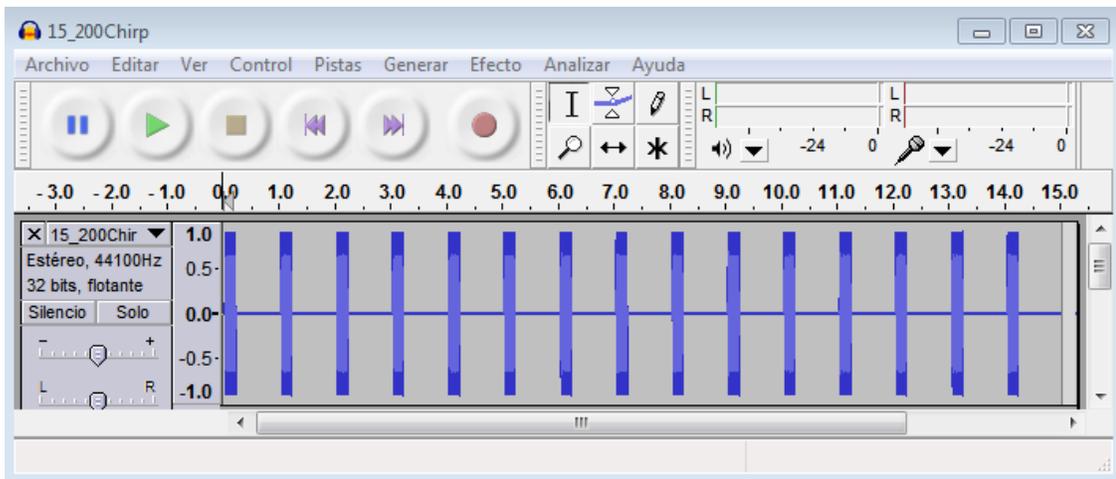


Figura 15. Chirridos separados cada segundo con duración total de 15 segundos.

En cada prueba se especificará cuál de estas formas se empleó, así como el intervalo de frecuencias y separaciones. La figura 16 es un ejemplo de los espectros de frecuencia que Audacity permite elaborar.

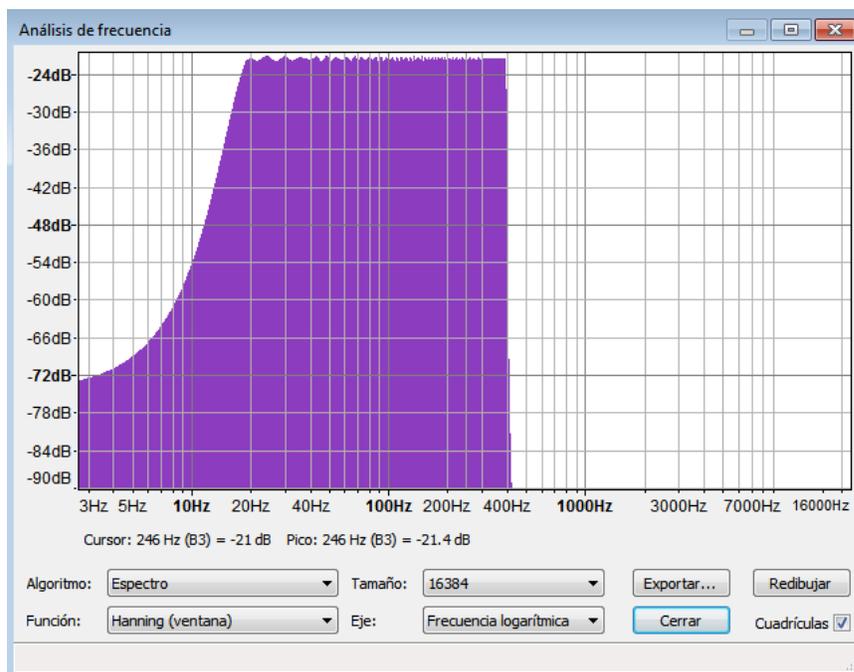


Figura 16. Espectro de frecuencias obtenido con Audacity (barrido entre 15 y 400 Hz).

3.4 Seismic Unix

A finales de los 70 Einar Kjartansson empezó a desarrollar un programa que pudiera realizar tareas relativas al procesamiento sísmico. En 1986, con ayuda de Shuki Ronen, introdujo su programa al Centro de fenómenos ondulatorios en Colorado School of Mines. Fue hasta entonces que con ayuda de Ronen y otros estudiantes que fortaleció y estabilizó el programa. Actualmente es un software de código abierto cuyas rutinas corren en una terminal de Unix y numerosos usuarios contribuyen con mejoras al código.

Las gráficas de los registros y espectros de frecuencias presentes en este trabajo se obtuvieron con ayuda de este programa. Cabe mencionar que las amplitudes de los espectros no tienen unidades relacionadas directamente al movimiento del terreno, ya que sólo se necesitan amplitudes relativas dentro de cada traza sísmica o entre trazas.

4. Calibración de geófonos

Hoy en día, la calibración de geófonos se realiza en un laboratorio de las siguientes maneras:

- **Mecánicamente**, se emplea una mesa vibratoria que hace vibrar una bobina calibrada (geófono de referencia) y el geófono a calibrar (figura 17). La salida eléctrica de ambos geófonos es graficada para comparar sus respuestas.
- **Eléctricamente**, se efectúa suministrando un impulso eléctrico al geófono, el impulso provocará que la bobina interna se mueva; así, mediante la determinación de las amplitudes y los tiempos de retardo, pueden calcularse los parámetros del geófono.

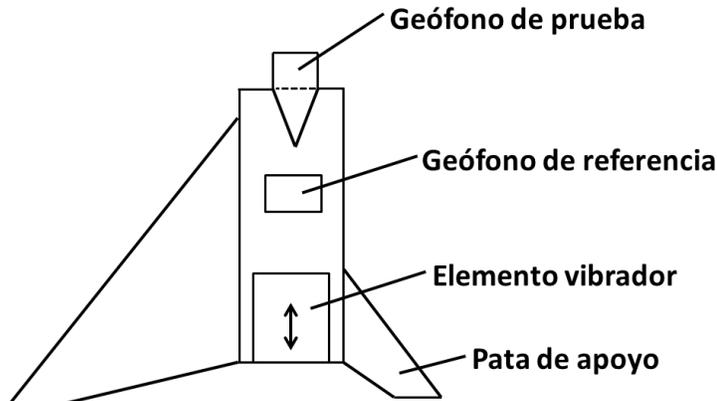


Figura 17. Esquema de una mesa vibratoria mecánica. Modificado de Evans, 1997, p. 59.

En el presente trabajo se propone una metodología alternativa para la calibración de geófonos. Se presenta como ejemplo la calibración de un geófono con este método. La figura 18 muestra una foto del sensor y la curva de respuesta de éste.

Para la calibración empleando audio, se generó un barrido de frecuencias de 15 a 400 Hz. El archivo con formato WAV y duración de 15 segundos se almacenó en un celular que, posteriormente, fue conectado al amplificador y éste a su vez a la bocina.

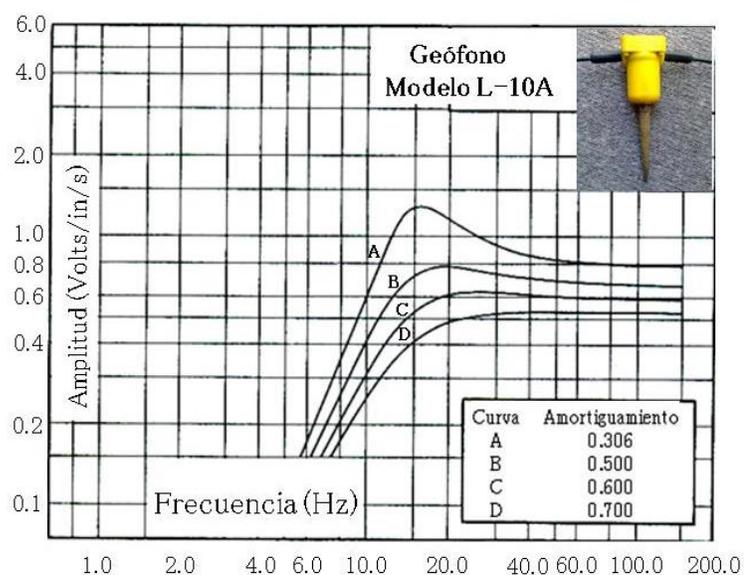


Figura 18. Curva de respuesta de un geófono marca Sercel modelo L-10A.

Con la finalidad de obtener un sonido con la mayor fidelidad a la señal emitida por el reproductor, la bocina se colocó dentro de una caja sellada (figuras 19 y 20) construida en base a las recomendaciones del fabricante.

Tabla 2. Dimensiones de la caja para la bocina.

Dimensiones de la caja		
<ul style="list-style-type: none"> La caja se hizo con Plancha de fibra de densidad media (MDF) de 1.9 cm de espesor. 		
Panel A (cm)	Panel B (cm)	Panel C (cm)
36.8 x 36.8	36.8 x 27.9	33 x 27.9

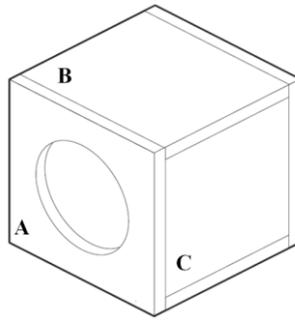


Figura 19. Paneles de la caja para la bocina.

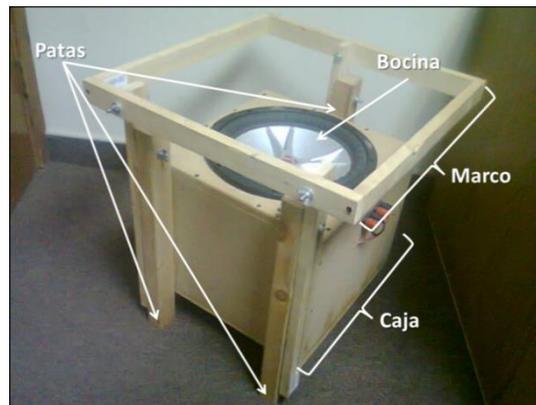


Figura 20. Caja de la bocina.

La bocina dentro de la caja tiene su propia respuesta ante las vibraciones emitidas. Empleando el programa BassBox 6 Pro e indicando las dimensiones y características de la caja, se obtuvo la curva de respuesta (figura 21).

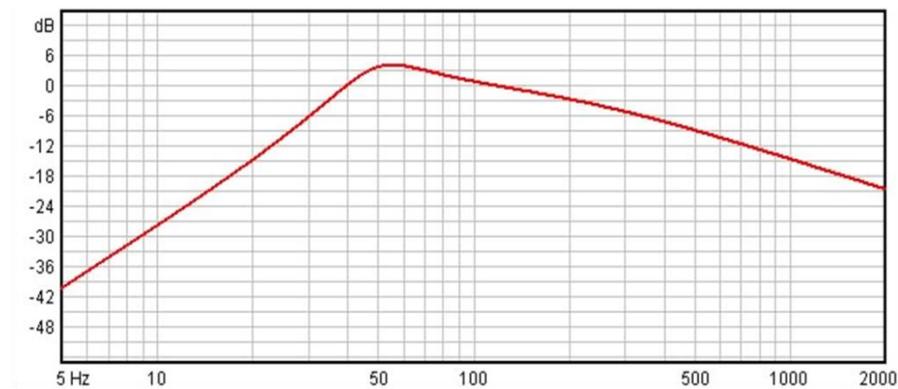


Figura 21. Curva de respuesta de la bocina dentro de la caja (Gradilla Martínez 2011, comunicación personal).

La primera prueba consistió en colocar la bocina en el suelo y sobre el marco de ésta, poner una esponja de poliuretano, la cual tenía un geófono clavado (figura 22a). Se reprodujo el barrido de frecuencias y se dejó que el StrataVisor registrara por 16 segundos. Al graficar el espectro de frecuencias del registro no se encontró una respuesta congruente entre la respuesta del geófono y la de la bocina en la caja.

A fin de obtener una mejor respuesta, se rellenó la caja de la bocina con polifil no compactado (figura 22b), en esta ocasión la bocina se colocó sobre un escritorio. La respuesta seguía siendo irregular y presentaba varios picos, correspondientes a resonancias en el sistema.

Para disminuir las vibraciones que el escritorio pudiera inducir en el sistema, se colocaron materiales amortiguadores (figura 22c), en el orden siguiente (de la bocina al escritorio): gomas (una en cada pata), una tabla y esponjas. Cabe mencionar que sobre cada esquina de la tabla se pusieron un par de placas metálicas para añadir masa y así dar mayor estabilidad.

Dado que la esponja sobre el marco no daba buenos resultados, enterramos el geófono en un vaso. En una primera prueba, una persona detuvo el vaso a unos centímetros de la bocina, dado que la persona inducía vibraciones al vaso, colocamos el vaso en el suelo y entre dos personas sujetaron la bocina.

Pese a las variaciones en el sistema, la respuesta obtenida seguía sin ser la esperada (comportamiento suave y sin picos de frecuencia). Debido a ello suspendimos el vaso cerca de la bocina con ayuda de ligas sujetas al marco. Notamos que al humedecer la arena, se lograba un mejor acoplamiento (figura 22d).

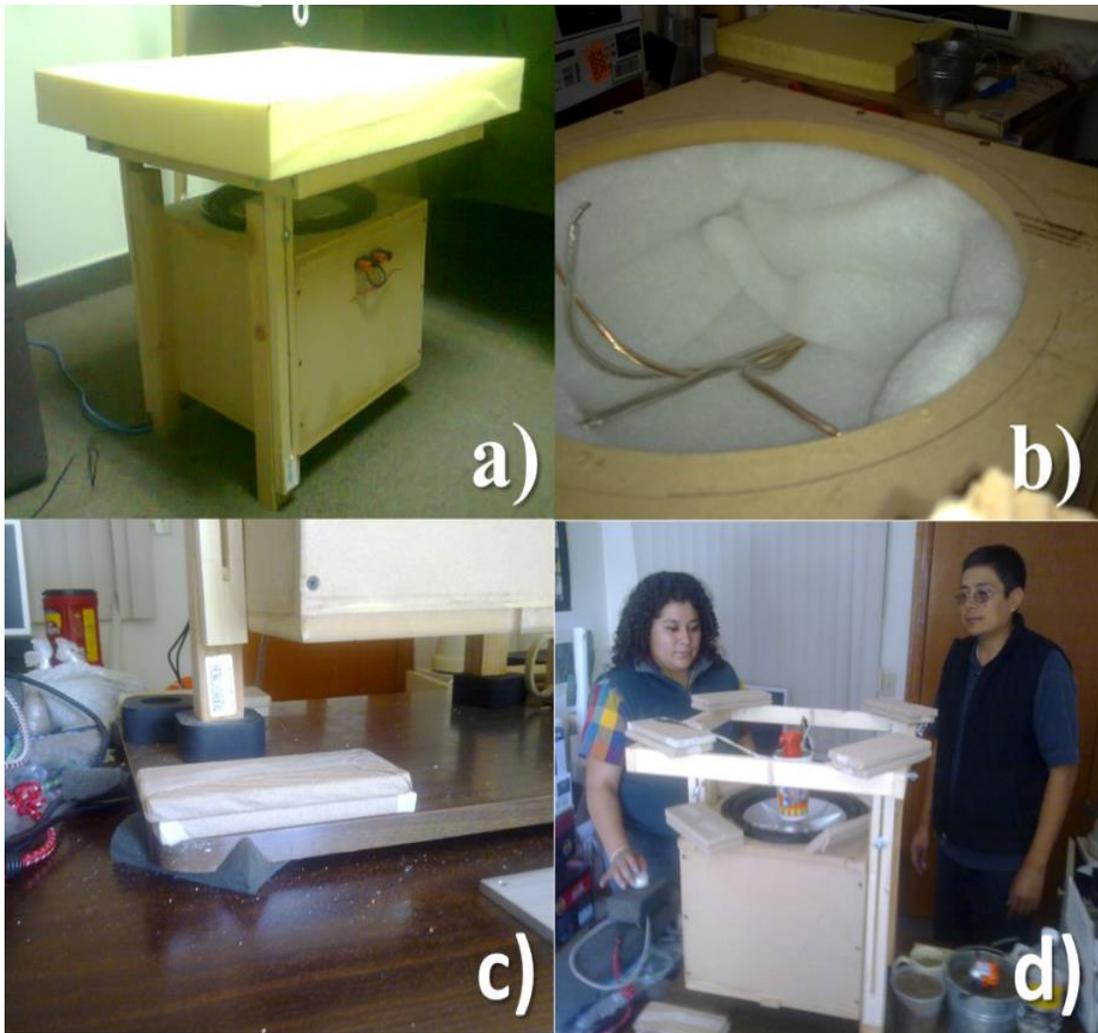


Figura 22. Pruebas para calibrar geófono. a) Esponja de poliuretano sobre marco de la bocina. b) Caja llena con polifil. c) Disminución de vibraciones externas. d) Geófono enterrado en un vaso con arena, se encuentra suspendido mediante ligas.

Considerando que el rebote de la señal en paredes y techo podría estar causando perturbaciones en los registros realizamos más pruebas en zonas abiertas.

La disposición de elementos con la que se obtuvo la mejor respuesta fue la que se observa en la figura 23. En ella el vaso se encuentra suspendido del mismo modo pero el marco está separado de la caja sobre unas gomas. Las placas sobre el marco se colocaron para reducir vibraciones no deseadas.



Figura 23. Disposición de elementos óptima para la calibración.

La figura 24 presenta el espectro de frecuencia del geófono L-10A, obtenido con el arreglo óptimo de los elementos. Se observa una máxima amplitud cerca de los 50 Hz y una respuesta plana aproximadamente a los 150 Hz. Si bien existen diferencias con la curva de respuesta que el fabricante establece (figura 18), el espectro corresponde con el barrido de frecuencias que se reprodujo (de 15 a 400 Hz), lo cual indica que el geófono responde de manera correcta y puede ser calibrado con audio. Además el pico máximo corresponde al de la respuesta de la bocina con la caja.

El procedimiento de calibración consistiría en comparar entre sí varios geófonos iguales, con el fin de detectar diferencias entre ellos. Las diferencias entre las respuestas de cada geófono se atribuirán al desgaste que con el tiempo hubiera sufrido el sistema interno del geófono.

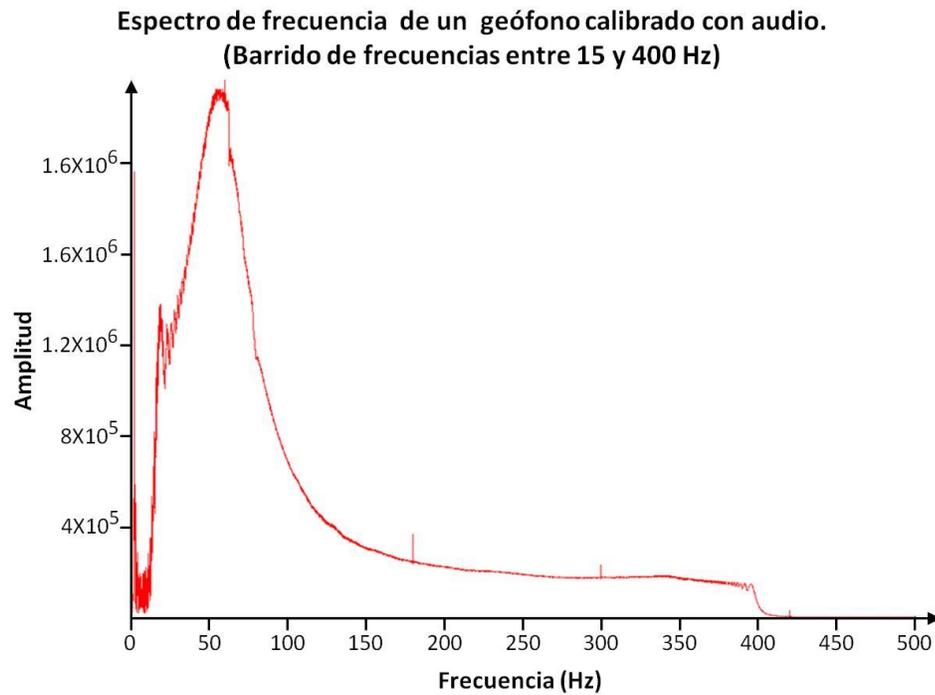


Figura 24. Espectro de frecuencia del geófono L-10A marca Sercel calibrado con audio (Barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz).

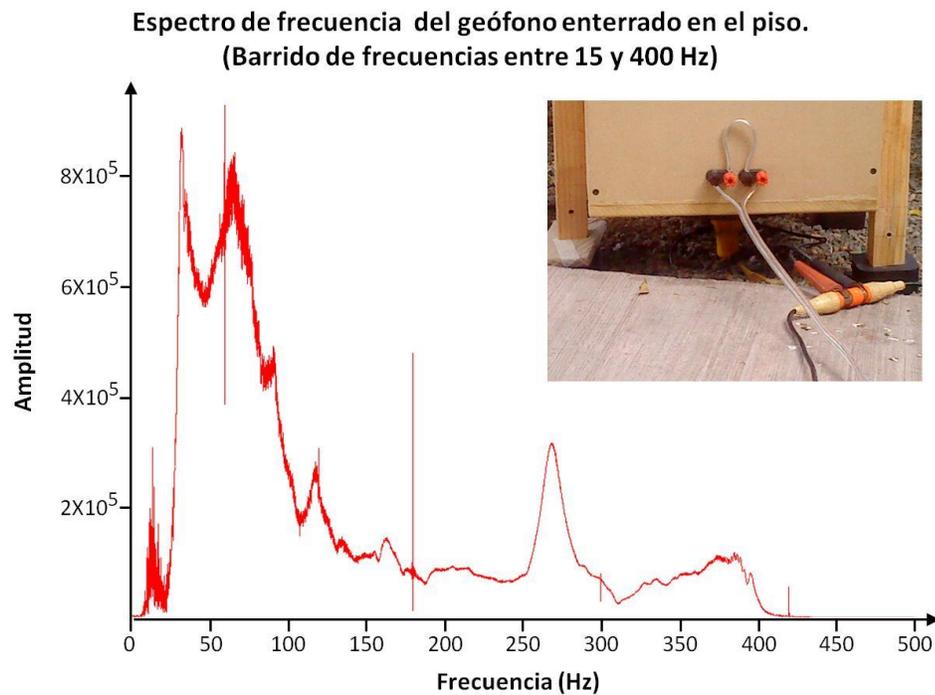


Figura 25. Espectro de frecuencia del geófono enterrado en el suelo, ya es posible encontrar una respuesta del terreno (Barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz).

Para comprobar si un geófono clavado en el piso, utilizando la bocina como fuente, era capaz de registrar la respuesta del terreno, se hizo una prueba. El espectro de la figura 25 corresponde al mismo geófono de las pruebas de calibración, pero ahora clavado en el suelo; la bocina se colocó hacia abajo a unos centímetros del sensor. Como en esta ocasión el registro va acompañado de una respuesta del terreno, el espectro es distinto al de la figura 24.

En la figura 26 se muestran tres espectros de frecuencia, el de color rojo corresponde al geófono enterrado a un metro de la bocina. Para el verde se desplazó la bocina hasta tener una separación horizontal de 5 metros con el geófono. Puede observarse una disminución en amplitud debida al incremento de la separación entre el geófono y la bocina. Para el espectro restante (color azul) nada se movió, sino que se aumentó el volumen. Tal aumento produce amplitudes semejantes a las del geófono separado un metro de la bocina.

**Espectro de frecuencia del geófono enterrado a 1 y 5 metros de la bocina.
(Barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz)**

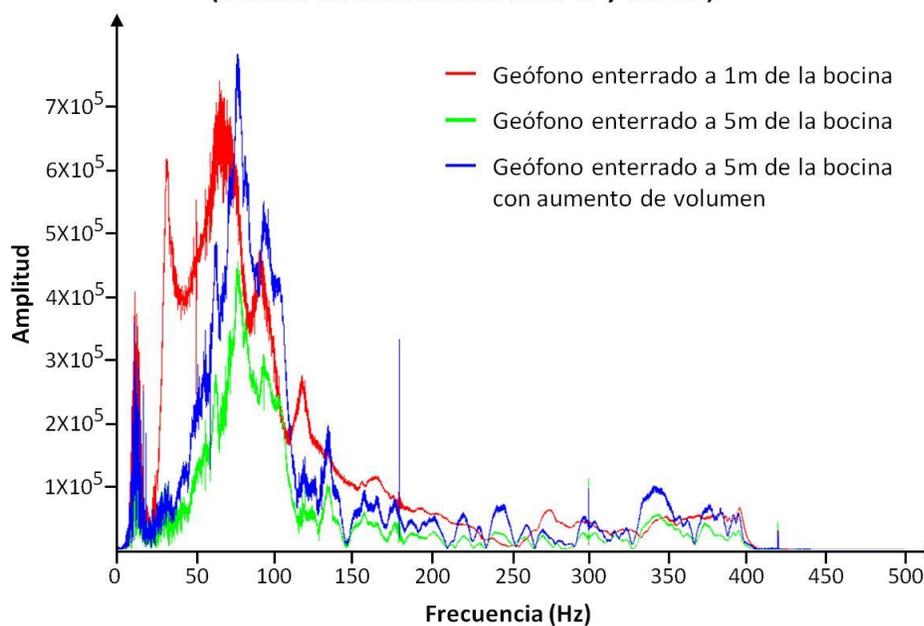


Figura 26. Espectro de frecuencia del geófono enterrado a 1 y 5 metros de la bocina, el espectro restante se hizo a 5 metros con un volumen mayor (Barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz).

5. Resultados

5.1 Tendidos dentro de las instalaciones del CICESE

Puesto que el geófono presentaba una respuesta correspondiente con las vibraciones que la bocina inducía, se realizaron líneas sísmicas dentro de las instalaciones del CICESE. En todas las pruebas la bocina apuntaba hacia el suelo. El objetivo era que el sonido produjera vibraciones que se transmitieran por el subsuelo. Las pruebas se realizaron en tres áreas distintas:

1. Frente al cubículo 6 de Ciencias de la Tierra. La parte superficial presentaba grava y materiales sueltos.
2. En la jardinera ubicada a un lado de Física Aplicada, en ella se observaron materiales suaves que permitieron un buen acoplamiento entre los geófonos y el terreno.
3. Detrás de Telemática, donde el suelo se encontraba más consolidado y duro que en las zonas anteriores.

En algunas pruebas se tomaron registros empleando el marro como fuente, esto con la finalidad de comparar la respuesta obtenida con esta técnica comúnmente practicada. Para conocer el intervalo de frecuencias que los golpes de marro producían, se graficaron los espectros empleando Seismic Unix.

Como en la calibración de geófonos, la duración de los archivos de audio fue de 15 segundos y el tiempo de registro, 16 segundos. Todas las pruebas se hicieron con tendidos de 12 geófonos separados un metro, a excepción de la realizada en Telemática que se hizo con 24. La distancia entre la fuente y el primer receptor fue de 1 metro.

Una vez realizada cada prueba se calculó la velocidad de la onda directa esto con el objetivo de constatar que los geófonos estaban registrando la respuesta del terreno ante las vibraciones inducidas por el audio en el subsuelo y no la onda que se propagaba por el aire.

Dado que la amplitud alcanzada por cada pulso y chirrido era pequeña, se realizó la siguiente rutina de apilamiento para cada registro:

1. Se cortó cada pulso, es decir, cada medio segundo para los pulsos y cada segundo para los chirridos.
2. Se pegaron los segmentos de registro, uno tras otro.
3. Se ordenaron los segmentos de modo que quedaran juntos los de un mismo canal.
4. Se apilaron los pulsos.

Una vez realizado el proceso anterior, se obtuvieron pulsos de mayor amplitud y menor nivel de ruido; en el caso de los pulsos la respuesta es muy impulsiva como la que se obtiene con el marro.

5.1.1 Resultados

A continuación se presentan las especificaciones y resultados de cada prueba.

En el caso de los barridos de frecuencias resultó complicado identificar el primer arribo en los registros, por ello las velocidades correspondientes a tales registros no se muestran en la tabla 3. Observamos que la velocidad de los pulsos es muy semejante a la del sonido (la cual es de 343 m/s a 20 °C a nivel del mar).

Tabla 3. Número de registros y características de la prueba del 17 de enero.

Prueba del 17 de enero				
Características generales:				
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó frente al cubículo 6. • El suelo se encontraba seco. 				
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros	V_{prom} (m/s)
Golpe con marro	N/A	~10 - ~360	13	502
Bocina en el suelo	Barrido	30 - 400	12	---
	Pulsos	30 - 400	12	344
Bocina levantada	Barrido	30 - 400	6	---
	Pulsos	30 - 400	6	361

Debido a lo anterior realizamos una segunda prueba, en ésta colocamos esponjas alrededor de la bocina con la finalidad de aislar el sonido (tabla 4). Se realizaron dos registros de barridos para ver si cambiaba la respuesta del equipo y los primeros arribos eran más evidentes que en los registros de la prueba anterior, tal cosa no ocurrió por lo que ya no se calcularon las velocidades.

Tabla 4. Número de registros y características de la prueba del 27 de febrero.

Prueba del 27 de febrero				
Características generales:				
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó frente al cubículo 6. • El suelo se encontraba seco. • Se colocaron esponjas alrededor de la bocina para aislar el sonido. 				
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros	V_{prom} (m/s)
Bocina	Barrido	30 - 400	2	---
	Pulsos	30 - 400	5	348

Como la respuesta que estábamos obteniendo con la bocina no era favorable, decidimos sustituirla por el vibrador, en una prueba siguiente (tabla 5). Cabe

destacar que el suelo se encontraba húmedo debido a lluvias de días previos a la prueba. En los registros realizados con la bocina, los barridos continuaban sin ser de utilidad.

Tabla 5. Número de registros y características de la prueba del 20 de marzo.

Prueba del 20 de marzo				
Características generales:				
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó frente al cubículo 6. • El suelo se encontraba húmedo. 				
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros	V_{prom} (m/s)
Vibrador	Barrido	15 - 200	5	---
	Pulsos	15 - 200	4	359

Pese a que el vibrador no emite sonidos, las velocidades continuaban cerca de las velocidades del sonido. Tal efecto se atribuyó a que el terreno pudiera presentar velocidades similares a las del sonido. Debido a lo anterior, se repitió la prueba frente al cubículo 6 para tener registros con las tres fuentes bajo las mismas condiciones (tabla 6).

Tabla 6. Número de registros y características de la prueba del 30 de marzo.

Prueba del 30 de marzo				
Características generales:				
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó frente al cubículo 6. • El suelo se encontraba seco. 				
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros	V_{prom} (m/s)
Golpe con marro	N/A	~10 - ~420	6	558
Bocina	Barrido	15 - 200	2	---
	Pulsos	15 - 200	1	339
Vibrador	Barrido	15 - 200	2	---
	Pulsos	15 - 200	3	343

Las velocidades obtenidas con la bocina y el vibrador son semejantes a las de la propagación del sonido además, difieren de las obtenidas con marro. Éste fenómeno se atribuyó a los materiales sueltos y poco compactados de la zona. Por ello se decidió cambiar de lugar y se efectuó una prueba en la jardinera de Física aplicada (tabla 7) antes de efectuar modificaciones a las fuentes de audio.

Tabla 7. Número de registros y características de la prueba del 20 de abril.

Prueba del 20 de abril				
Características generales:				
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó en la jardinera de Física Aplicada. • El suelo se encontraba seco. 				
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros	V_{prom} (m/s)
Golpe con marro	N/A	~10 - ~420	6	710
Bocina	Barrido	15 - 200	2	---
	Barrido	30 - 400	2	---
	Pulsos	15 - 200	2	406
	Pulsos	30 - 400	2	406
Vibrador	Barrido	15 - 200	2	---
	Pulsos	15 - 200	2	551

En la prueba del 20 de abril se observaron cambios en las velocidades obtenidas con las tres fuentes. En todos los casos, la velocidad aumentó. Cambiamos de lugar nuevamente, los resultados se muestran en la tabla 8.

Para los barridos del 24 de abril empleamos la autocorrelación que consiste en extraer la traza más cercana a la fuente y compararla con el registro completo. Esperábamos obtener una respuesta impulsiva como la del marro y los pulsos apilados, lo cual no sucedió.

Tabla 8. Número de registros y características de la prueba del 24 de abril.

Prueba del 24 de abril				
Características generales:				
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó en Telemática. • El suelo se encontraba seco. 				
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros	V_{prom} (m/s)
Golpe con marro	N/A	~40 - ~460	2	497
Bocina	Barrido	15 - 200	2	---
	Barrido	30 - 400	2	---
	Pulsos	15 - 200	2	373
	Pulsos	30 - 400	2	373
Vibrador	Barrido	15 - 200	2	---
	Pulsos	15 - 200	3	322

El equipo de registro también permite realizar la autocorrelación, conectando el celular al amplificador y al equipo de registro al mismo tiempo. Los registros obtenidos tampoco permitieron obtener velocidades con los barridos. El resultado de la autocorrelación no es de fase mínima, por lo que resulta difícil apreciar los primeros arribos.

Tabla 9. Número de registros y características de la prueba del 18 de mayo.

Prueba del 18 de mayo			
Características generales:			
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó en la jardinera de Física Aplicada. • El suelo se encontraba seco. • Autocorrelación de los barridos efectuada por el equipo de registro. 			
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros
Bocina	Barrido	30 - 400	3
Vibrador	Barrido	15 - 200	3

En la prueba del 24 de abril se observa que las velocidades del vibrador siguen estando por debajo de las correspondientes al marro. Atribuimos la disipación de energía a la tabla sobre la que se encontraba el vibrador (figura 27a), por lo que decidimos sustituirla por una placa metálica (figura 27b), que además tiene tornillos en las esquinas que pueden ajustarse, para un mejor acoplamiento entre el suelo y la placa.

Los resultados con la modificación del vibrador se muestran en la tabla 10.

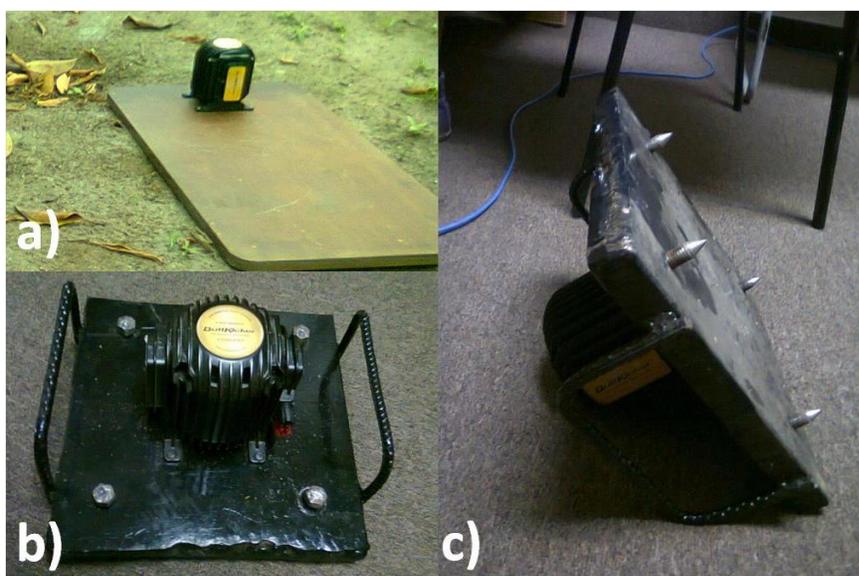


Figura 27. Vibrador. a) Montado sobre una tabla de madera. b) Montado sobre una placa metálica. c) Tornillos en la placa metálica para mejorar el acoplamiento placa – suelo.

En esta última prueba se realizaron registros también con los chirridos.

Mediante la orden `sushape` de `Seismic Unix` se aplicó un filtro de Wiener a los barridos; para tal fin se debe introducir un archivo de entrada (un registro de pulso apilado) y un archivo que contenga la señal deseada (barridos).

Tabla 10. Número de registros y características de la prueba del 27 de junio.

Prueba del 27 de junio				
Características generales:				
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba se efectuó en la jardinera de Física aplicada. • El suelo se encontraba seco. • Vibrador montado sobre placa metálica. 				
Fuente	Forma del audio	Frecuencias (Hz)	Número de registros	V_{prom} (m/s)
Vibrador	Barrido	15 - 200	2	386
	Pulsos	15 - 200	2	425
	Chirridos	15 - 200	2	460

5.2 Tendido en el poblado de Maneadero

Se realizó un perfil sísmico de refracción, directo e inverso, paralelo a la línea de costa, en un sitio de prueba localizado en el poblado de Maneadero localizado a 12 km al sur de la ciudad de Ensenada, Baja California (figura 28).

El Valle de Maneadero es una pequeña cuenca sedimentaria, rellena de sedimentos productos de la erosión de formaciones geológicas más antiguas que lo rodean y que han sido transportados por escurrimientos hacia las zonas bajas.

Vega (1989) realizó un estudio de resistividad utilizando sondeos eléctricos verticales y de polarización inducida a lo largo de dos perfiles perpendiculares a la línea de costa (figura 29). A partir de su estudio Vega propuso dos secciones geológicas. Debido a que nuestro perfil sísmico pasa de forma perpendicular entre los sondeos S4 y S5 de la línea 1 que este autor realizó, describiremos tal sección (figura 30) a continuación.

Se presenta una primera capa superficial con espesor aproximado de 2 m en su parte más delgada al oeste y 20 m al este, tal capa se asocia al suelo residual y

presenta gran contenido de arcillas y algunas gravas. Por debajo de la primera capa y de oeste a este se presentan tres zonas:

- ✓ La primera (zona 4) está asociada a formaciones de arenas y gravas saturadas de agua salobre.
- ✓ La segunda (zona 3) forma una zona de transición entre el agua dulce y la salada; está asociada a materiales del tipo gravas y gravillas limpias saturadas de agua con menos contenido de sales
- ✓ La tercera (zona 2) que yace debajo de la segunda está asociada principalmente a material arcilloso saturado de agua dulce.



Figura 28. Localización del perfil sísmico de refracción somera (coordenadas UTM en metros).

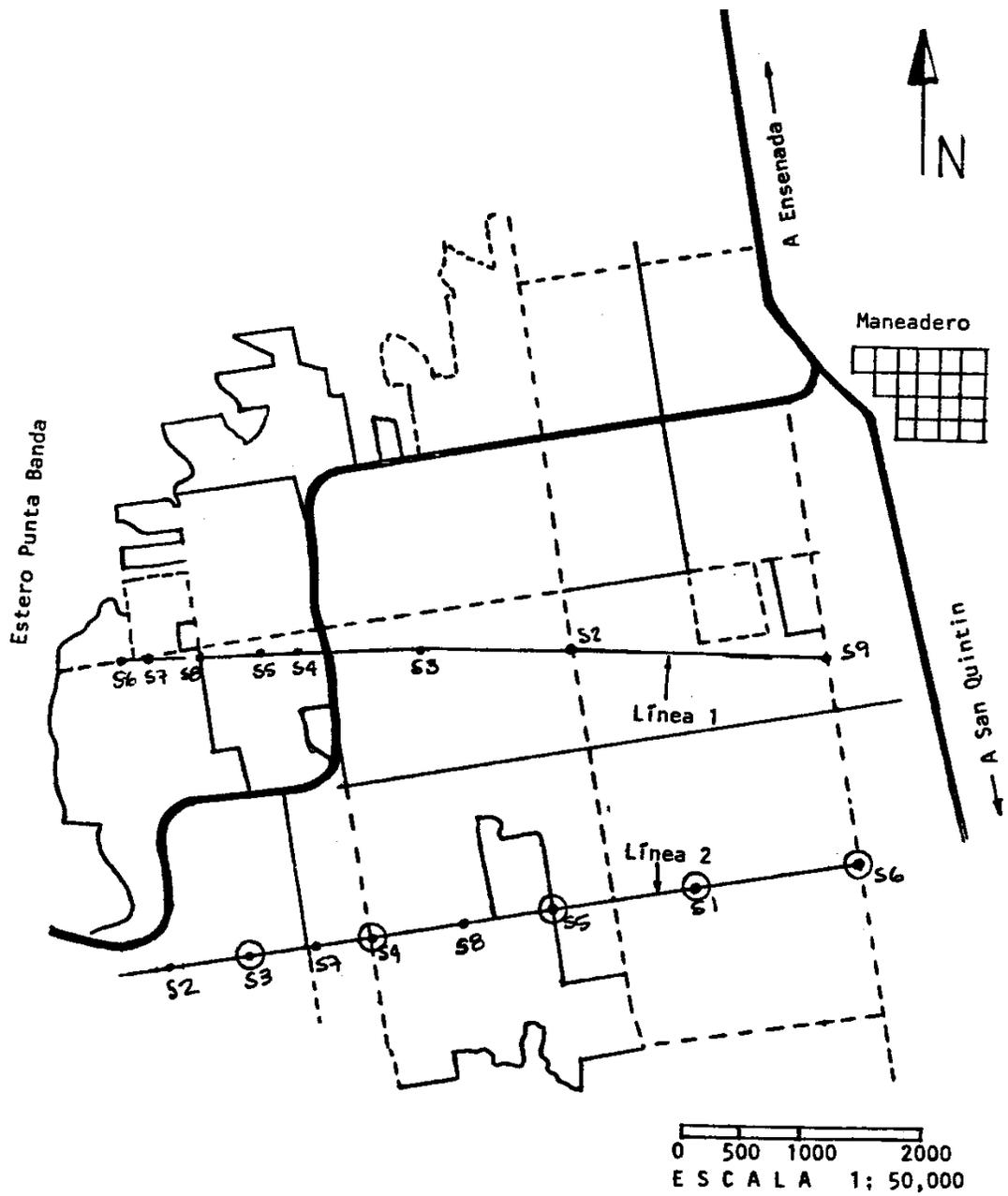


Figura 29. Localización de las líneas realizadas por Vega en 1989 con sus respectivos sondeos.
Modificado de Vega, 1989, p. 27.

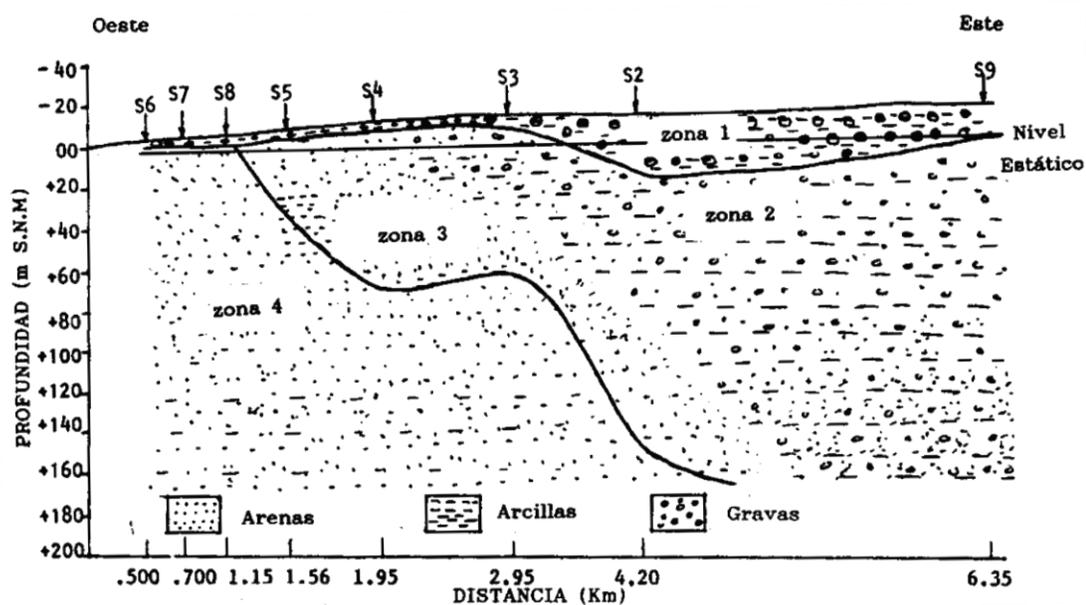


Figura 30. Sección geológica de la línea 1. Modificado de Vega, 1989, p. 43.

Para el perfil sísmico se colocó un tendido de 24 geófonos separados un metro uno de otro. Las fuentes empleadas (marro, bocina y vibrador) se colocaron a unos centímetros del primer geófono.

La forma de audio empleada para tomar registros con la bocina y el vibrador, corresponde a pulsos separados cada medio segundo con duración total de 15 segundos y contenido de frecuencias entre los 15 y 200 Hz.

Una vez realizado el trabajo en campo y con ayuda de Seismic Unix se graficaron los registros con la intención de identificar la onda directa y las ondas refractadas (de haberlas).

Las figuras 32, 32 y 33 muestran los registros directos obtenidos con cada fuente, en los cuales fue posible identificar la onda directa y dos ondas refractadas. Los registros de los tiros inversos se muestran en las figuras 34, 35 y 36.

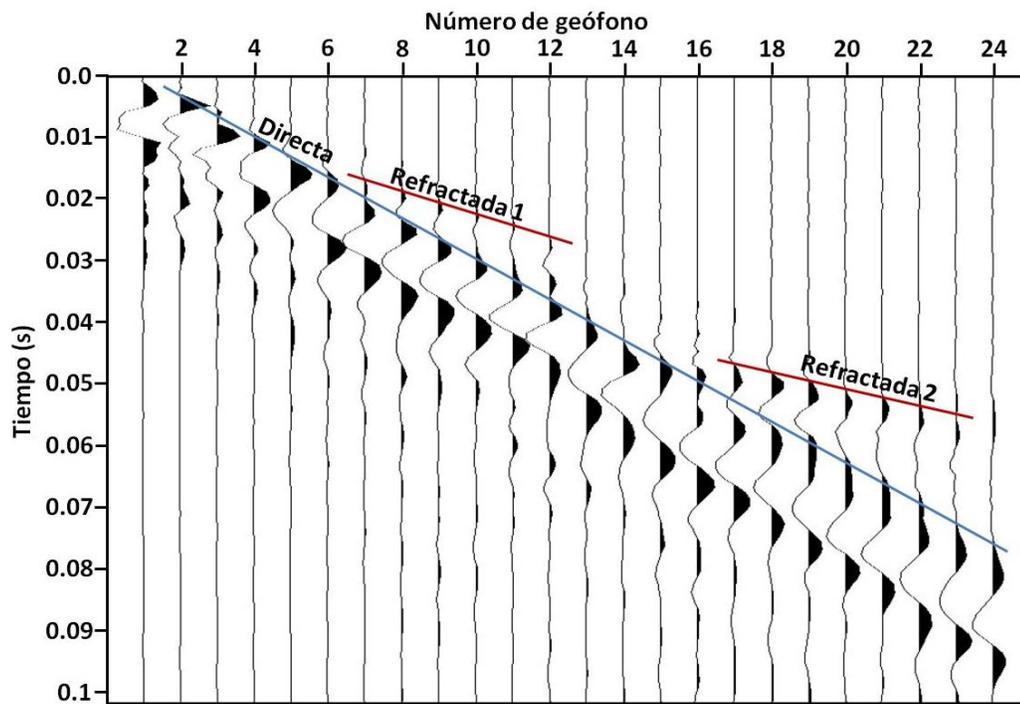


Figura 31. Registro del tiro directo efectuado con el marro.

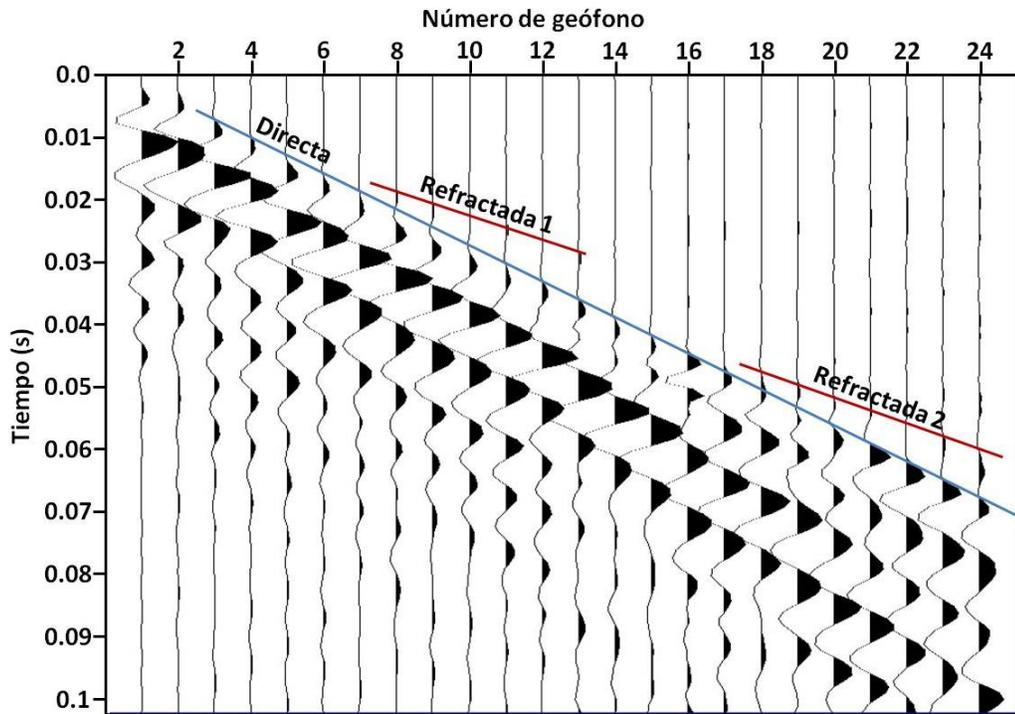


Figura 32. Registro del tiro directo efectuado con la bocina.

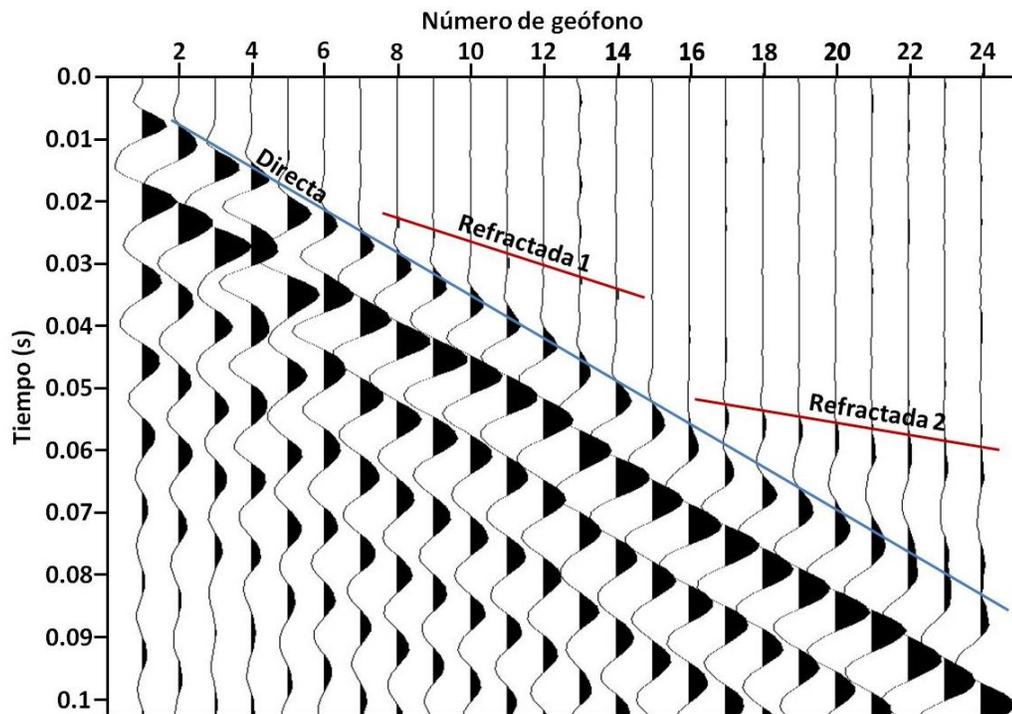


Figura 33. Registro del tiro directo efectuado con el vibrador.

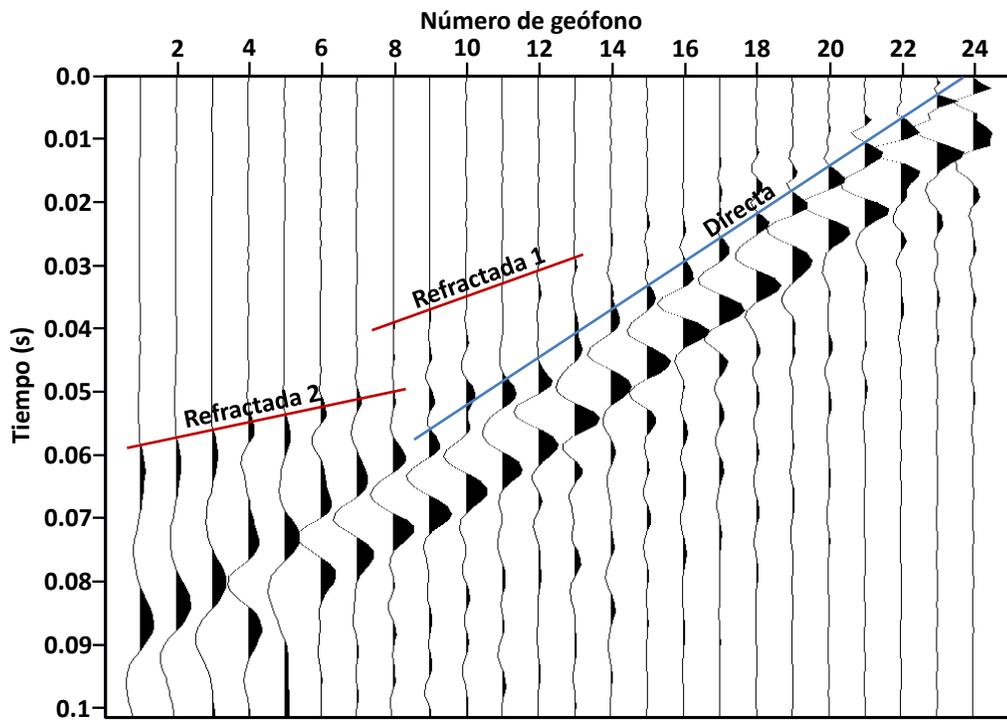


Figura 34. Registro del tiro inverso efectuado con el marro.

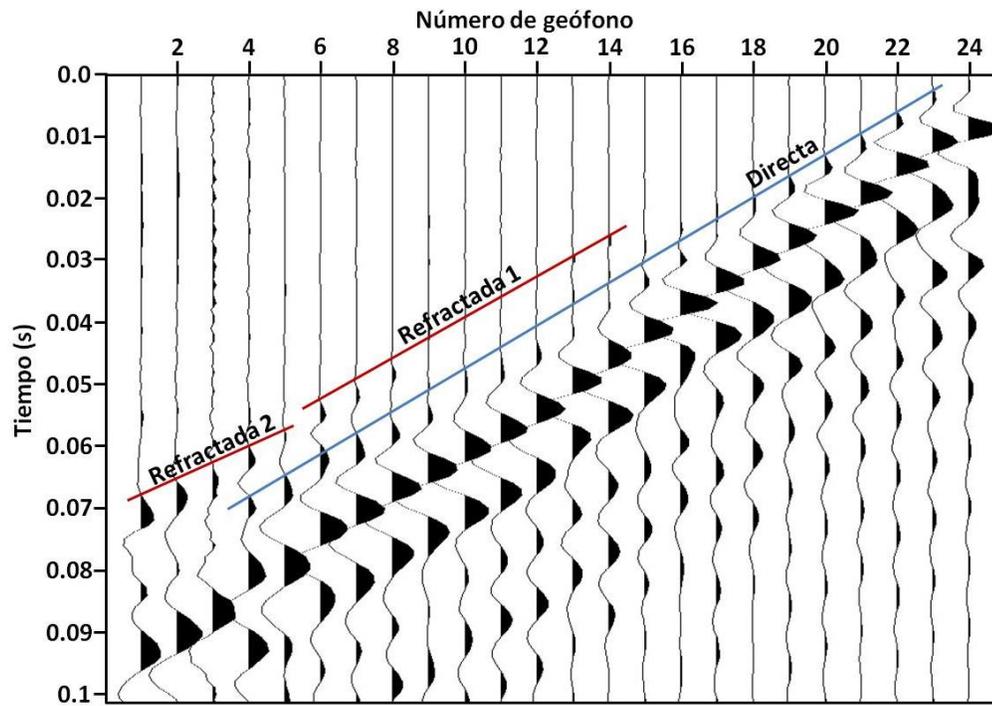


Figura 35. Registro del tiro directo efectuado con la bocina.

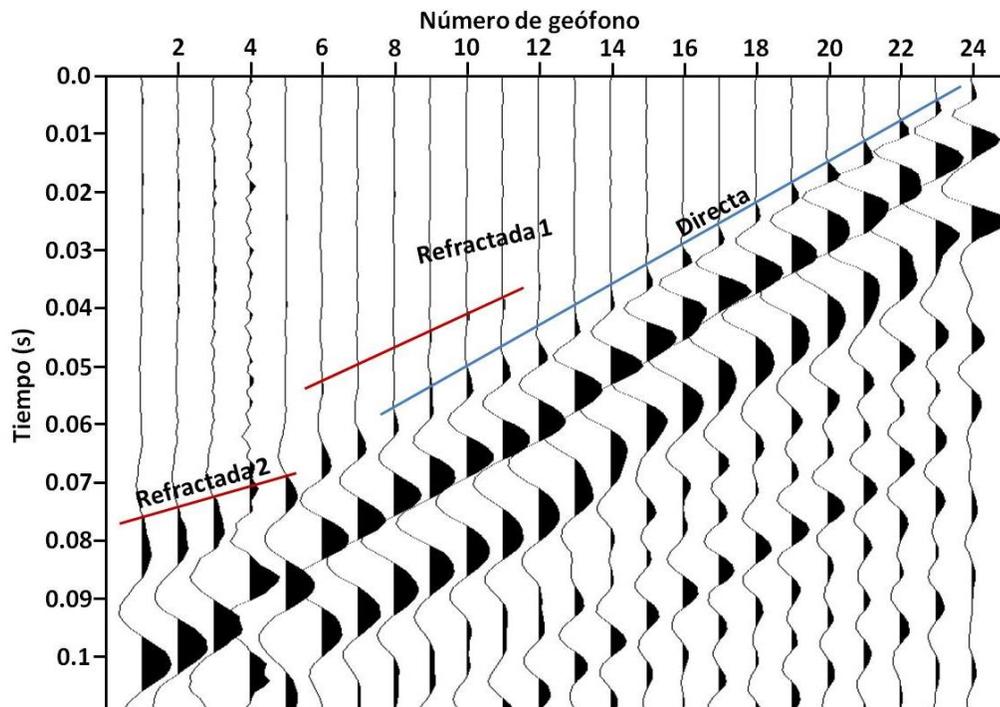


Figura 36. Registro del tiro directo efectuado con el vibrador

5.2.1 Curvas de tiempo vs. distancia

Una vez graficados los registros, se identificaron los tiempos correspondientes a los primeros arribos y, empleando el software de Matlab, se graficaron las curvas tiempo - distancia que se muestran en las figuras 37, 38 y 39.

Aunque en el registro es muy claro (figura 31) en la curva de tiempo vs. distancia del tiro directo efectuado con el marro, resulta complicado identificar a los 6 m el cambio de pendiente entre las dromocronas directa y refractada 1. Lo anterior no ocurre en el tiro inverso, en el cual los tres cambios de pendiente son evidentes.

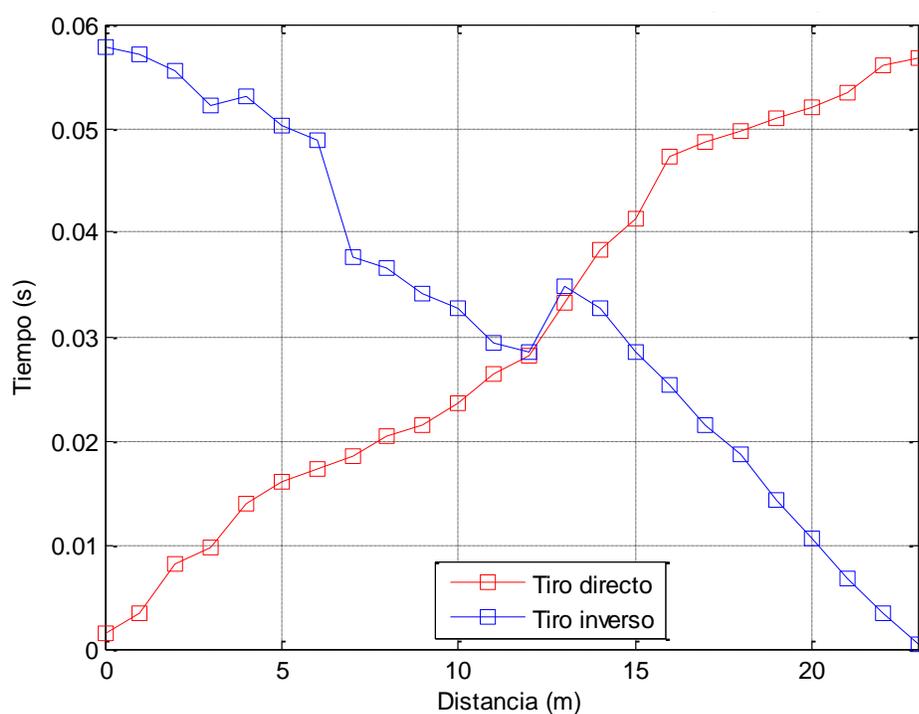


Figura 37. Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con el marro.

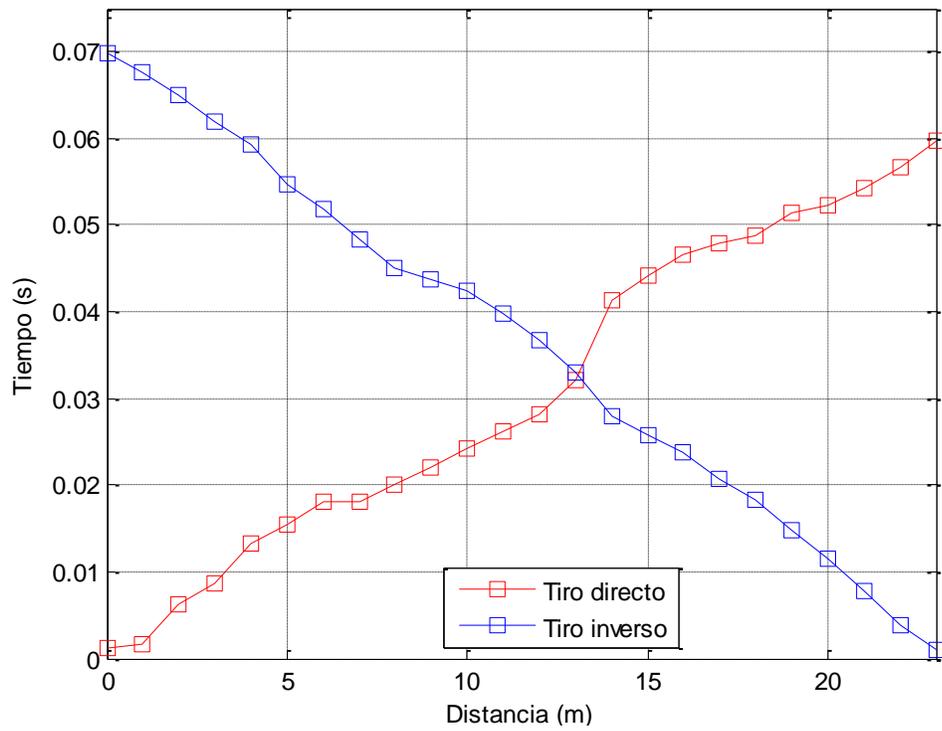


Figura 38. Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con la bocina.

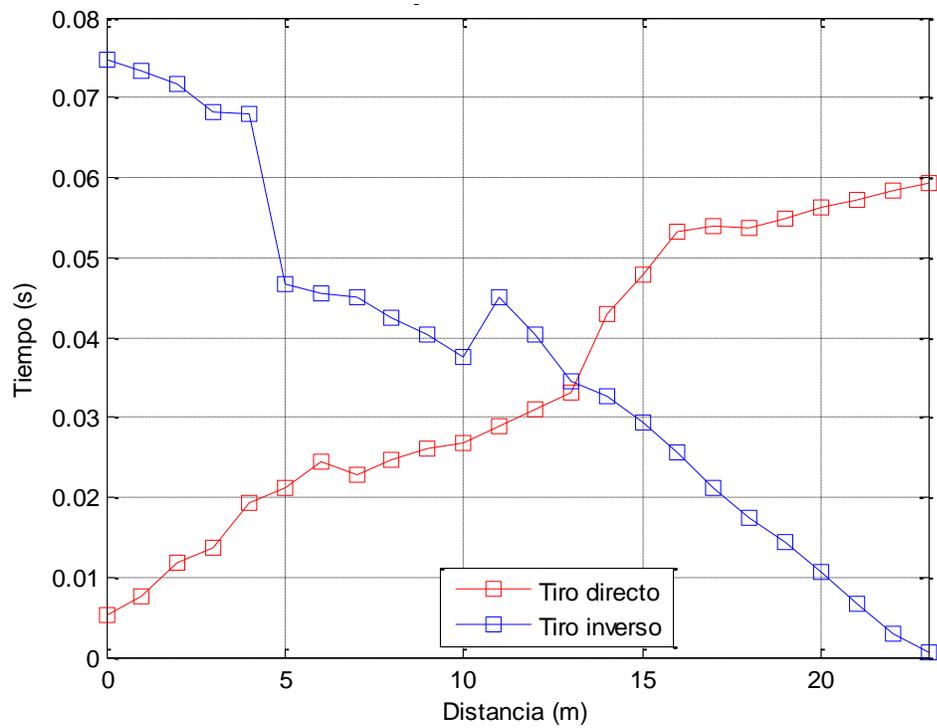


Figura 39. Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con el vibrador.

Las curvas de tiempo vs. distancia correspondientes a la bocina no muestran con claridad los cambios de pendiente. En contraste con la bocina, la identificación de dromocronas en las curvas del vibrador es muy clara.

5.2.2 Cálculo de modelos

En base a las curvas de tiempo vs. distancia se obtuvo la siguiente información:

Tabla 11. Información obtenida de las curvas de tiempo vs. distancia.

Fuente	Onda	Tiro directo		Tiro inverso	
		Velocidad (m/s)	Tiempo intercepto (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo intercepto (s)
Marro	Directa	307	N/A	267	N/A
	Refractada 1	634	0.0073	585	0.0119
	Refractada 2	845	0.0287	801	0.0294
Bocina	Directa	347	N/A	304	N/A
	Refractada 1	490	0.005	365	0.0055
	Refractada 2	563	0.0173	413	0.0097
Vibrador	Directa	292	N/A	270	N/A
	Refractada 1	592	0.0122	421	0.0063
	Refractada 2	1036	0.0372	610	0.0356

Retomando las ecuaciones 15 a 24 y empleando la información de la tabla 11, se efectuó el cálculo del modelo obtenido al emplear el marro como fuente.

Como ya se mencionó en el cálculo del modelo de capas inclinadas, la velocidad de los rayos que emergen de manera ascendente (V_{2u}) es mayor a la de los rayos que lo hacen de manera descendente (V_{2d}). Considerando que las velocidades de los tiros directos son mayores que las correspondientes a los inversos, tenemos que para el cálculo de la primera capa:

$$V_1 = 307 \text{ m/s}$$

$$V_{2d} = 585 \text{ m/s} \quad t_{1d} = 0.0119 \text{ s}$$

$$V_{2u} = 634 \text{ m/s} \quad t_{1u} = 0.0073 \text{ s}$$

$$\alpha_1 = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{307 \text{ m/s}}{585 \text{ m/s}}\right) - \text{sen}^{-1}\left(\frac{307 \text{ m/s}}{634 \text{ m/s}}\right)}{2} = 1.4^\circ$$

$$\theta_{c1} = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{307 \text{ m/s}}{585 \text{ m/s}}\right) + \text{sen}^{-1}\left(\frac{307 \text{ m/s}}{634 \text{ m/s}}\right)}{2} = 30.3^\circ$$

$$V_2 = \frac{307 \text{ m/s}}{\text{sen}^{-1}(30.3^\circ)} = 608 \text{ m/s}$$

$$h_d = \frac{(307 \text{ m/s}) \times (0.0119 \text{ s})}{2 \cos(30.3^\circ)} = 2.1 \text{ m}$$

$$h_u = \frac{(307 \text{ m/s}) \times (0.0073 \text{ s})}{2 \cos(30.3^\circ)} = 1.3 \text{ m}$$

$$Z_d = \frac{2.1 \text{ m}}{\cos(1.4^\circ)} = 2.1 \text{ m}$$

$$Z_u = \frac{1.3 \text{ m}}{\cos(1.4^\circ)} = 1.3 \text{ m}$$

Para el cálculo de la segunda capa se considera la siguiente información:

$$V_2 = 307 \text{ m/s}$$

$$V_{3d} = 801 \text{ m/s} \quad t_{2d} = 0.0294 \text{ s}$$

$$V_{3u} = 845 \text{ m/s} \quad t_{2u} = 0.0287 \text{ s}$$

Como el proceso de cálculo se vuelve iterativo, no desarrollamos el correspondiente a la siguiente capa. En la figura 40 se muestra el modelo obtenido.

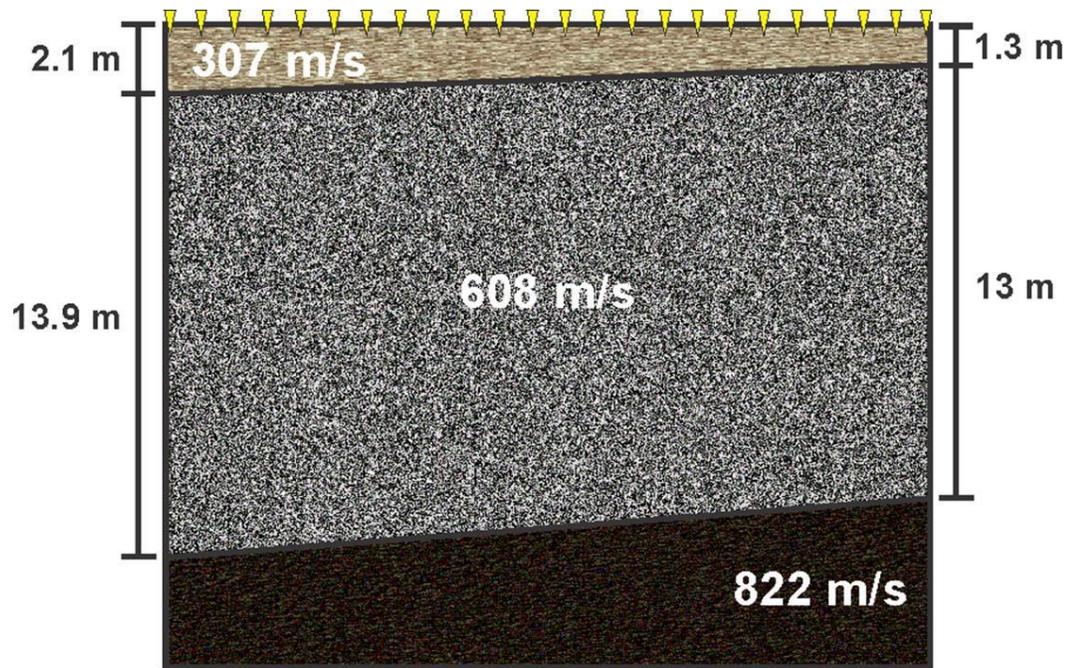


Figura 40. Modelo de capas inclinadas obtenido al emplear como fuente el marro.

Puesto que el cálculo de los modelos correspondientes al resto de las fuentes se efectúa del mismo modo, sólo se presentan los modelos en las figuras 41 y 42.

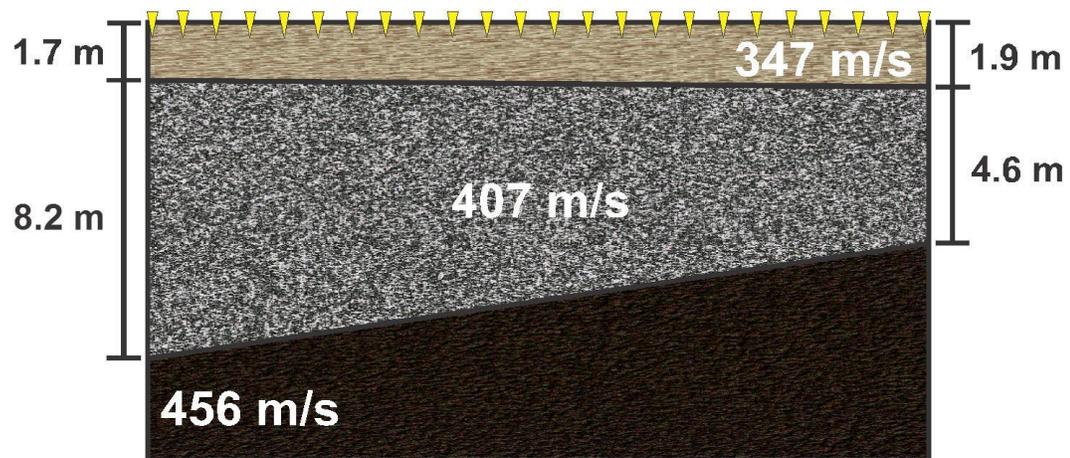


Figura 41. Modelo de capas inclinadas obtenido al emplear como fuente la bocina.

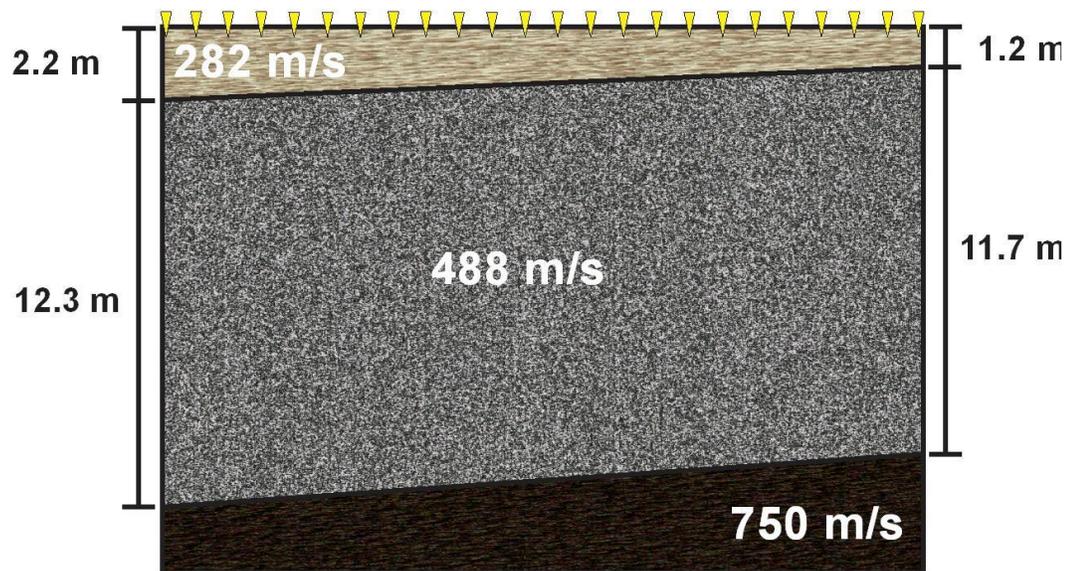


Figura 42. Modelo de capas inclinadas obtenido al emplear como fuente el vibrador.

6. Discusión

6.1 Discusión

El proceso de calibración de geófonos empleando señales de audio demostró ser eficiente pues los sensores responden a las vibraciones inducidas por la bocina. Debe tomarse en cuenta que la señal registrada será la resultante de la convolución entre la respuesta del geófono, la caja de la bocina y la señal inducida. Este método de calibración ha demostrado ser más económico y práctico que otros, como el uso de mesas vibratorias e inducción de voltajes.

En este y otros trabajos -Xiang y Sabatier (2000)- se ha probado que el acoplamiento sismo-acústico, generado por la reproducción de archivos de audio empleando bocinas, puede ser registrado por uno o más geófonos enterrados en algún área de interés. Gracias al acoplamiento sismo-acústico es posible detectar heterogeneidades en el terreno.

Un factor determinante para la existencia de un buen acoplamiento es la porosidad de los materiales dispuestos en el terreno, además de la presencia de materiales sueltos que provocan un mal acoplamiento, como ocurrió en las primeras pruebas realizadas frente al cubículo 6 de Ciencias de la Tierra.

Como se pudo notar en las pruebas dentro de las instalaciones del CICESE, debe ponerse especial atención en la onda aérea, dado que al ser en ocasiones más rápida que las vibraciones del terreno será lo que se registre en primer lugar generando ruido en la señal sísmica.

Uno de los puntos destacables del presente trabajo es el control de las señales empleadas; tal como O'Connell-Rodwell et al. (2006), generamos señales con un contenido de frecuencias óptimo, tales frecuencias se pueden variar de acuerdo a

las necesidades de cada estudio; es decir, se tiene un amplio control de la señal inducida, no así en el caso de otras fuentes como las caídas de peso, los explosivos y otras herramientas empleadas en exploración sísmica.

Al igual que O'Connell-Rodwell et al. (2006), Sabatier (2006) empleó vibradores para reproducir frecuencias deseadas y registrar las vibraciones con distintos instrumentos con el objetivo de detectar minas enterradas a distintas profundidades. En base a esos trabajos se plantea la posibilidad de emplear esta nueva fuente con fines arqueológicos.

6.2 Comparación de la respuesta obtenida con marro, vibrador y bocina

En relación a al experimento de campo en el sitio de prueba, la figura 43 muestra las curvas de tiempo vs. distancia de los tres tipos de fuente, en la cual pueden observarse claras diferencias en los tiempos de los tiros inversos, lo cual conlleva a obtener profundidades distintas del lado en el que se efectuó tal tiro. Aunque existe similitud entre los tiros directos del marro y la bocina, los modelos obtenidos son distintos (figuras 40 y 41) tanto en profundidad como en velocidad. De las tres fuentes, la bocina es la que menos alcanza a penetrar y la que arroja el modelo con más diferencias. Tales diferencias pueden asociarse a un mal acoplamiento sismo-acústico producto de la presencia de gravas y agua (dulce y salada) en la parte superficial de la sección geológica propuesta por Vega (1989).

Pese a que las curvas del vibrador son las que más difieren de las del marro, ambos modelos (figuras 40 y 42) alcanzan profundidades cerca de los 14 metros y poseen velocidades semejantes.

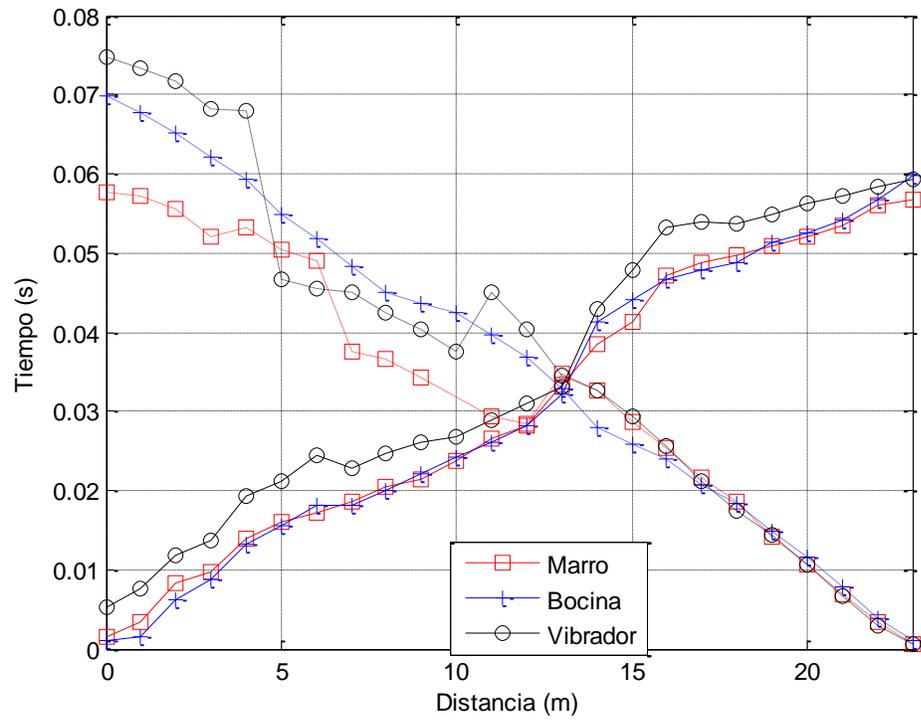


Figura 43. Curvas de tiempo vs. distancia obtenidas con las tres fuentes.

7. Conclusiones y recomendaciones

1. El prototipo de fuente posee características que le dan ventajas ante las fuentes comúnmente usadas como la fácil transportación e instalación, lo cual permite realizar levantamientos en zonas con accesos limitados y reducir el trabajo en campo.
2. Al generar los archivos de audio podemos tener amplio control en las señales y variar el contenido de frecuencias de acuerdo a los objetivos de la exploración.
3. La calibración de geófonos empleando audio demostró ser eficiente, práctica y económica.
4. El acoplamiento sismo-acústico dependerá en gran medida de los materiales sueltos que pudieran estar presentes en el terreno así como la porosidad de los materiales dispuestos.
5. De todas las pruebas realizadas y del tendido en Maneadero, concluimos que los resultados del vibrador son de mejor calidad que los obtenidos al usar la bocina, debido a que para la bocina gran parte de la energía se pierde en el aire.
6. Debido a la profundidad de penetración de la fuente, se recomienda su uso para estudios someros, de unas decenas de metros.
7. Puede intentarse enterrar la bocina para evitar pérdida de energía en el aire, aunque demoraría tiempo y requeriría más trabajo en campo, el control en la señal emitida se conservaría.
8. Se recomienda su aplicación en estudios con fines arqueológicos y búsqueda de objetos enterrados.

Referencias bibliográficas

- Dobrin, Milton B. (1976). Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill. Third edition. New York.
- Evans, Brian J. (1997). A handbook for seismic data acquisition in exploration. Number 7. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists. Fourth edition. South Yale St.
- Evenden, B. S., Stone, D. R. & Anstey, N. A. (1971). Geoexploration monographs. Seismic Prospecting Instruments. Gebruder Bronntraeger. Second edition. Berlín. 2 v.
- Lara Racioppi, José Antonio. (2007). Modelado Sísmico con Seismic Unix, Modelado Sísmico a partir de perfiles de velocidad generados con el método de triangulación usando el paquete computacional Seismic Unix. (Tesis de Licenciatura, Universidad Simón Bolívar, Sertenejas). Recuperado de: <http://www.gc.usb.ve>.
- Lillie, Robert J. (1999). Whole earth geophysics: an introductory textbook for geologist and geophysicists. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
- O'Connell-Rodwell, C. E., Wood, J. D., Rodwell, T. C., Puria, S., Partan, S. R., Keefe, R., Shriver, D., Arnason, B. T. & Hart., L. A. (2006). Wild Elephant (*Loxodonta africana*) Breeding Herds Respond to Artificially Transmitted Seismic Stimulati. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. Vol. 59, pp. 842-850.
- Sheriff, R. E. & Geldart, L. P. (1995). Exploration Seismology. Cambridge University Press. Second edition. New York.
- Redpath, Bruce B. (1973). Seismic refraction exploration for engineering site investigations, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory, Technical Report E-73-4, Livermore, California.
- Rosales Climent, Cristina Isabel. (2001). Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. (Tesis de

Licenciatura, Universidad del Valle facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Santiago de Cali). Recuperado de: <http://www.osso.org.co>.

Sabatier, J. M. (2006). Advances in acoustic landmine detection. In: battlefield acoustic sensing for ISR applications (RTO-MPSET-107), Neuilly-sur-Seine.

Sabatier, J. M., & Xiang, N. (2001). An Investigation of Acoustic-to-Seismic Coupling to Detect Buried Antitank Landmines. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* 39, 1146-1154.

Vega Aguilar, Mario Esteban. (1989). Combinación de sondeos de resistividad y polarización inducida en el estudio de un acuífero costero. (Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

Xiang, N. & Sabatier, J. M. (2000). Landmine detection measurements using acoustic-to-seismic coupling. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets. Proc. SPIE 4038, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V*, 645.