



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

Evaluación del método de medición del perfil de velocidad de ondas de corte SPT-sísmico

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

PEDRO PABLO TRONCOSO ACUÑA
CONCEPCIÓN-CHILE
2018

Profesor Guía: Gonzalo Montalva Alvarado
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

La velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) es una propiedad del suelo de gran importancia para la ingeniería geotécnica y la ingeniería sísmica, ya que está estrechamente relacionada con la rigidez y, por lo tanto, influye en todos aquellos fenómenos que involucren solicitaciones dinámicas en el suelo.

El objetivo de esta tesis fue evaluar la efectividad del método de medición del perfil V_s , llamado SPT-*Uphole* o SPT-sísmico. En este ensayo se disponen varios geófonos en la superficie, adyacente a una perforación geotécnica, con el fin de registrar las ondas de corte generadas en el ensayo SPT.

Se implementó el sistema de medición necesario para realizar el ensayo en terreno y, mediante simulaciones numéricas del fenómeno, se evaluó la metodología para abordar el procesamiento de los datos. Se realizaron seis mediciones en sitios de distintas características geotécnicas y fueron procesadas con el método propuesto.

El SPT-sísmico, al usar como materia prima el ensayo de prospección geotécnica más popular del país, se presenta como una alternativa más en las mediciones directas del perfil de velocidad de ondas de corte (V_s). La opción de tener una medición invasiva del perfil V_s aprovechando el ensayo SPT hacen de este ensayo particularmente conveniente en cuanto a su configuración. La similitud de los resultados intra método obtenidos vía el ensayo SPT-sísmico y su correspondencia con la estratigrafía del sitio, demuestra la validez del ensayo, su factibilidad y efectividad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer el apoyo económico otorgado por Conicyt en el marco del proyecto de investigación Fondecyt 11121404 “*Site Terms as a Tool for Better Seismic Intensity Prediction*”.

Quisiera agradecer también a mi familia por el gran apoyo en esta etapa de mi vida.

Al profesor Gonzalo Montalva le agradezco por su dedicación durante la realización de esta tesis.

Agradecer además a las consultoras de Ingeniería: Ruz y Vukasovic y Liem por la buena disposición en el acceso a los sondajes.

Finalmente, agradecer a Diego Inzunza y Gonzalo Valenzuela por su apoyo y amistad a lo largo de este magíster.



TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	ii
Agradecimientos	iii
Tabla de contenidos	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo general	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis de trabajo	4
1.5 Metodología	4
1.6 Principales resultados y conclusiones	5
1.7 Organización de la tesis	5
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Estado del arte ensayo SPT-sísmico	7
2.3 Casos de aplicación del ensayo SPT-sísmico:	8
2.4 Conclusiones	8
CAPÍTULO 3 PROPAGACIÓN DE ONDAS	9
3.1 Introducción	9
3.2 Conclusiones	15
CAPÍTULO 4 DETERMINACIÓN DEL PERFIL V_s	16
4.1 Introducción	16
4.2 Tiempos de viaje	16
4.3 Primer estrato	19

4.4	Rotación de registros	20
4.5	Método de reducción	21
4.5.1	Método del intervalo.....	22
4.5.2	Método del directo.....	22
4.5.3	Método del intervalo modificado	24
4.6	Procesamiento de las señales	29
4.7	Conclusiones.....	29
CAPÍTULO 5 EQUIPAMIENTO Y CONFIGURACIÓN ENSAYO		30
5.1	Introducción.....	30
5.2	Detalle del sistema de medición	30
5.3	Conclusión	31
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS BASADOS EN SEÑALES SINTÉTICAS		32
6.1	Modelación numérica	32
6.1.1	Modelo de la carga	32
6.1.2	Modelo del suelo	33
6.2	Resultados simulación	34
6.3	Método de reducción	35
6.4	Efecto de receptores lejanos	36
6.4.1	Efecto de la onda de <i>Rayleigh</i>	36
6.4.2	Efecto zona del frente de ondas.....	38
6.4.3	Efecto onda P reflejada de onda SV incidente	40
6.5	Conclusiones.....	42
CAPÍTULO 7 METODOLOGÍA ENSAYO		43
7.1	Sobre las variaciones erráticas del perfil Vs.....	44
CAPÍTULO 8 RESULTADOS MEDICIONES		46

8.1	Introducción.....	46
8.2	Casos de estudio.....	46
8.2.1	Sitio en Laraquete.....	46
8.2.2	Sitio en Cosmito.....	48
8.2.3	Sitio en Curanilahue.....	49
8.2.4	Sitio en San Pedro de la Paz.....	52
8.3	Conclusiones y resultados.....	53
CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES.....		54
REFERENCIAS.....		55



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Perfiles Vs modelos de suelo (simulación 1) 13

Tabla 6.1 Perfiles Vs modelos de suelo (simulación 2) 33



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Plano vertical de la propagación de ondas debido a una carga vertical, puntual y súbita en un semiespacio.....	9
Figura 3.2 (a) Dependencia azimutal del mayor movimiento generado por el frente de ondas esférica. (b) Zona del frente de ondas captado por los receptores en superficie. Receptores más cercanos al eje de perforación registran zona superior del frente de ondas	10
Figura 3.3 Vista plano vertical. Componentes del movimiento de partícula.....	10
Figura 3.4 Componente vertical (a), componente horizontal (b) y componente Q (c). Receptor virtual a 6 metros del sondaje. Fuente pulso de Ricker de 100 Hz. En verde punto característico de la señal. Perfil B	11
Figura 3.5 Movimiento de partícula (normalizado) en un modelo de suelo elástico estratificado ante una carga puntual y transiente a 20 metros de profundidad. En rojo: Ángulo de la ley de <i>Snell</i> . En azul: Ángulo tangente a la propagación esférica.....	12
Figura 3.6 Razón entre el valor entre el V_s modelado y estimado. Perfiles Tabla 3.1. (a) Comparación entre V_s estimado con las componentes horizontales y Q. (b) Comparación entre V_s estimado con las componentes verticales y Q	14
Figura 3.7 Registros de geófonos en superficie en el ensayo SPT-sísmico (sondaje de 20 metros). (a) Registro geófono horizontal a 5.11 metros del sondaje. (b) Registro geófono horizontal a 11.11 metros del sondaje	15
Figura 4.1 Señales verticales generadas por ensayos SPT a 9.4 y 10.3 metros de profundidad, captadas por un receptor a 11.1 metros del sondaje	17
Figura 4.2 Señales de un geófono horizontal a 5.5 metros del sondaje, generadas por ensayos SPT entre 5.2 y 13.4 metros de profundidad (Sondaje 1 sitio 1). Gris: Todos los golpes. Negro: La media de las señales. Rojo: Punto característico 1. Verde: Punto característico 2. Azul: Punto característico 3.....	18

Figura 4.3	Tiempo de viaje onda. El tiempo de viaje de la onda en el ensayo SPT 2 es la suma del tiempo t_1 más el desfase de tiempo Δt_i	19
Figura 4.4	Señales horizontales (a) y verticales (b) de ensayos SPT- <i>Uphole</i> . Geófono a 6 metros del sondaje (sitio 4). Gris: Señales. Negro: Media. Rojo: Punto característico 1. Azul: Punto característico 2. Verde: Punto característico 3	20
Figura 4.5	Método del intervalo. (a) Configuración ensayo SPT- <i>Uphole</i> . (b) Configuración ensayo <i>Downhole</i>	23
Figura 4.6	Método directo. (a) Señales de la simulación ensayo SPT- <i>Uphole</i> en perfil Vs B y receptor a 2 metros. (b) Ajuste de la recta a los puntos característicos	23
Figura 4.7	Reducción de las señales obtenidas de la simulación numérica del ensayo <i>Downhole</i> en los perfiles Vs: B (a), C (b) y D (c). Efecto de la posición de la fuente en el ensayo <i>Downhole</i> (método de determinación de tiempo <i>crossover</i> (Robertson <i>et al.</i> 1986) y método de reducción del intervalo (ASTM 2008)). (d) Señales ensayo <i>Downhole</i> virtual	25
Figura 4.8	Nomenclatura usada en el método del intervalo modificado	26
Figura 4.9	Reducción de las señales obtenidas de la simulación numérica del ensayo <i>Downhole</i> (método de determinación de tiempo <i>crossover</i> (Robertson <i>et al.</i> 1986) y método de reducción del intervalo modificado (Kim <i>et al.</i> 2004)). Efecto del uso del método intervalo modificado con la inclusión de la ley de <i>Snell</i> . Perfiles B (a), C (b) y D (c)	28
Figura 5.1	Configuración sistema de adquisición implementado	31
Figura 6.1	Señales (componente Q) obtenidas de la simulación numérica del ensayo SPT- <i>Uphole</i> , modelo Vs perfil B y pulso de <i>Ricker</i> de 100 Hz. (a) Receptor a 2 metros del eje del sondaje. (b) Receptor a 10 metros del eje del sondaje.....	34
Figura 6.2	Perfiles Vs obtenidos de la simulación numérica y reducción del ensayo SPT- <i>Uphole</i> , modelo Vs perfil B y pulso de <i>Ricker</i> de 100 Hz. (a) Receptor a 2 metros del eje del sondaje. (b) Receptor a 10 metros del eje del sondaje	35

Figura 6.3	Efecto onda <i>Rayleigh</i> . (a) Registros componente vertical geófono virtual a 11 metros del sondaje. Modelo semiespacio velocidad de onda de corte de 300 [m/s]. Profundidades de la fuente de 1 a 10 metros. (b) Comparación de los tiempos de viajes simulados y teóricos. Cuando la fuente se ubica más superficialmente predomina en el registro la onda de <i>Rayleigh</i>	37
Figura 6.4	Efecto de la zona del frente de onda. Señales de receptores a una gran distancia del pozo en comparación con la profundidad de la fuente, son afectadas por la mayor velocidad de los estratos inferiores. Esto provoca una sobreestimación del valor de V_s en algún estrato en más del 10% del valor modelado	39
Figura 6.5	Efecto zona del frente de onda. (a) Perfil V_s 3. (b) Registros componente vertical geófono virtual a 10 metros del sondaje. (c) Comparación de los tiempos de viajes simulados y teóricos	40
Figura 6.6	Tipo de ondas generadas por una fuente interior vertical. Las únicas ondas que se manifiestan en superficie son la onda P, S y la onda P reflejada de la onda S incidente	41
Figura 6.7	Efecto onda P reflejada de onda S. (a) Registros componente horizontal geófono virtual a 8 metros de la perforación. Modelo de velocidades de ondas de corte semiespacio de 100 m/s. Profundidades de la fuente de 1 a 10 metros. (b) Comparación de los tiempos de viajes simulados y teóricos	41
Figura 7.1	Efecto de la longitud de onda en la resolución del perfil V_s invertido. (a) Pulso de <i>Ricker</i> de 50Hz. (b) Pulso de <i>Ricker</i> de 150Hz. Perfil V_s B (Tabla 6.1)	45
Figura 8.1	Sitio en Laraquete, Sondaje 1. (a) Perfíes V_s estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de V_s	46
Figura 8.2	Sitio en Laraquete, Sondaje 2. (a) Perfiles V_s estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de V_s . (d) Estratigrafía sondajes 1 y 2 en sitio Laraquete	47
Figura 8.3	Sitio en Cosmito. (a) Perfíes V_s estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de V_s . (d) Estratigrafía	48

Figura 8.4	Sitio en Curanilahue, Sondaje 1. (a) Perfies Vs estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de Vs. (d) Estratigrafía	50
Figura 8.5	Sitio en Curanilahue, Sondaje 2. (a) Perfies Vs estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de Vs. (d) Información de estratigrafía.....	51
Figura 8.6	Sitio en San Pedro. (a) Perfies Vs estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de Vs. (d) Estratigrafía	52



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La velocidad de propagación de ondas de corte es una propiedad del suelo de gran importancia para la ingeniería geotécnica y la ingeniería sísmica. Está estrechamente relacionado con la rigidez y, por lo tanto, influye en la respuesta del suelo ante solicitaciones dinámicas como terremotos o vibración de fundaciones. Además, es un importante dato de entrada en el análisis de la interacción suelo-estructura (Kim y Stewart 2003), evaluación de la susceptibilidad de licuación (Andrus y Stokoe 2000), como caracterizador de propiedades geotécnicas en suelos (Klein y Santamarina 2005, Ohta y Goto 1978, Oh *et al.* 2017, Chang y Cho 2010), cálculo de asentamientos (Stokoe *et al.* 2010), entre otras aplicaciones.

Si bien existen varios métodos para medir la velocidad de propagación de ondas de corte, en la práctica cada uno presenta ventajas y desventajas. Por ejemplo, en las mediciones del tipo invasivas o directas del perfil V_s se encuentran los ensayos *Downhole*, *Crosshole*, *Uphole* y *P-S suspension logging*. Estos ensayos, si bien requieren de la creación y apropiada implementación de perforaciones (poco viables económica y prácticamente en proyectos cotidianos), se consideran los más confiables por la comunidad ingenieril para medir el perfil V_s . Estos métodos se basan en mediciones locales de la velocidad a múltiples profundidades, por lo que muestran disminuciones mínimas en la resolución con el aumento de la profundidad.

Otros ensayos para medir el perfil V_s son los llamados ensayos de ondas superficiales. Estos ensayos tienen la ventaja de ser de relativo bajo costo al evitar costosas perforaciones, pero se les considera de menor confiabilidad que los métodos invasivos por su falta de robustez y dificultad en resolver estratos de menor velocidad en profundidad (Asten y Boore 2005, Garofalo *et al.* 2016). Los ensayos de ondas superficiales, no estiman la velocidad de propagación de ondas de corte directamente, sino que consisten en la búsqueda del modelo de estratigrafía que mejor se ajuste a los datos de la dispersión de las ondas *Rayleigh* o *Love* medidas en terreno. Dicha búsqueda sufre, como muchos de los procesos matemáticos inversos, de la no unicidad de la solución y, por lo tanto, la falta de robustez de las mediciones (Foti *et al.* 2009, Luke *et al.* 2003). Este potencial error

se ve acentuado por aspectos tales como: la variabilidad propia de las mediciones de velocidad de ondas de superficie, la errónea identificación del primer modo de vibración de las ondas de *Rayleigh* (Zhang y Chan 2003), la heterogeneidad lateral de las propiedades del suelo, entre otros.

Introducido por Ohta *et al.* (1978) y luego desarrollado por Bang y Kim (2007), el ensayo SPT-sísmico o SPT-*Uphole* se sitúa como otro de los mencionados ensayos invasivos y directos del perfil Vs. La configuración de este ensayo es similar a la del ensayo *Uphole*, es decir, la fuente se dispone en el interior de la masa de suelo y los receptores en la superficie. Tiene la ventaja de aprovechar la perforación que requiere el ensayo SPT y la generación de ondas de corte que provoca indirectamente la penetración de la cuchara normalizada en el suelo. En este trabajo se continúa la exploración del ensayo SPT-sísmico para validarlo como un ensayo que presenta las buenas características de los ensayos invasivos, pero con la ventaja de ser menos costoso y operativamente más eficiente, ya que usa la perforación necesaria para realizar el ensayo SPT.

Este ensayo se enfoca en la modelación numérica y la simulación simplificada del fenómeno de propagación de ondas en el ensayo SPT-sísmico. Se modela con la ayuda del método *direct stiffness method for layered soils* (Kausel y Roësset 1981), una carga puntual, vertical y súbita al interior de un medio elástico estratificado. La simulación se realiza para tener una idea de la forma de propagación de las ondas involucradas en el fenómeno y su efecto en los métodos de reducción usados. Se usan los métodos de reducción, o de interpretación de señales de ensayos sísmicos usuales (Kim *et al.* 2004), para inferir el que más se acerca a los perfiles Vs modelados y para identificar y sobrellevar aspectos potencialmente nocivos en dicha interpretación.

Se realizó una campaña de mediciones del ensayo SPT-sísmico, se caracterizan las frecuencias predominantes de las señales generadas en terreno y, en función de esto, se adopta la frecuencia predominante de la fuente modelada. Se presenta además el efecto de la longitud de las ondas generadas en relación a la resolución capaz de obtenerse con este (y con los demás) ensayo geofísico invasivo.

Por las características del ensayo, en cuanto a la cantidad de golpes del ensayo SPT y por lo tanto la numerosa generación de ondas, fue posible evaluar la variabilidad en la determinación de los

tiempos de viaje. La numerosa cantidad de perfiles capaces de ser inferido –tanto por la cantidad de geófonos usados, como de las distintas estimaciones de los tiempos de viaje– hace del ensayo SPT-sísmico un ensayo muy redundante y favorece así la estimación confiable del perfil de ondas de corte. En relación a esto último, fue posible estimar además la variabilidad aparente intra-método de la estimación del valor de V_s .

Se discuten algunos aspectos del trabajo de Bang y Kim (2007) relacionados con la determinación de los tiempos de viaje de las ondas. Se propone una nueva forma de procesar que facilita la ejecución del ensayo.

Se investiga además el efecto nocivo de la onda *Rayleigh* en el ensayo. Se ha observado, tanto en las simulaciones como en los registros medidos, que ensayos SPT relativamente superficiales presentan esta irrupción y se discute y propone la estrategia a adoptar para conseguir un perfil V_s confiable.

1.2 Objetivo general

Validar el ensayo SPT-sísmico como un método confiable y práctico de medición del perfil de V_s .

1.3 Objetivos específicos

Comprender el fenómeno de propagación de ondas generadas por una carga vertical, puntual y súbita dentro de la masa de suelo y su incidencia en los métodos de reducción del perfil V_s .

Analizar los métodos de reducción del perfil V_s en ensayos invasivos descritos en la literatura y su efectividad en la reducción de las señales numéricas simuladas.

Validar el método más exacto de acuerdo a la modelación numérica del fenómeno.

Implementar el sistema de medición requerido en el ensayo SPT-sísmico.

Usar el sistema de medición implementado para la ejecución en terreno del ensayo estudiado.

1.4 Hipótesis de trabajo

El ensayo SPT genera ondas de corte con la suficiente amplitud y calidad para ser medidas por geófonos dispuestos en superficie y así estimar el perfil de velocidad de ondas de corte del sitio.

1.5 Metodología

Se implementó un sistema de medición con una tarjeta de adquisición de datos, la cual digitaliza la señal eléctrica analógica que producen los geófonos ante el movimiento generado por el paso del frente de ondas.

Se implementó el software necesario para la comunicación entre la tarjeta y el computador, el almacenamiento de datos, además de la comunicación física entre los geófonos y la tarjeta de adquisición de datos.

Una vez implementado el sistema de medición, se realizaron mediciones en terreno de la propagación de ondas de corte generadas en el ensayo SPT. Dichas mediciones se complementaron con una recopilación de la información de estratigrafía para estudiar posteriormente la correspondencia entre el perfil de Vs con la estructura de capas y tipo de suelo en el sitio.

Mediante códigos implementados en ambiente MATLAB, se procesaron los registros de velocidades medidos por los geófonos en terreno. Luego, se crearon códigos tanto para el procesamiento de las señales como para el cálculo del perfil de Vs según los métodos de reducción (pasar de señales a un perfil Vs) encontrados en la literatura.

Se estudiaron cuantitativamente los perfiles de Vs obtenidos con los distintos métodos de reducción descritos en la literatura. Luego, con la ayuda de la modelación numérica del fenómeno, se optó por el método de reducción que mejor predecía los perfiles Vs modelados.

Finalmente, se describió la metodología para procesar los datos y se evaluó la variabilidad aparente de las mediciones del perfil Vs en los sitios estudiados.

1.6 Principales resultados y conclusiones

A la luz de los resultados de las simulaciones numéricas en el modelo del ensayo SPT, se propuso una metodología para abordar el procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo. Esta metodología consideró la evaluación de los métodos de reducción disponibles en la literatura y la pertinencia o las falencias de cada uno de estos para predecir con exactitud el perfil Vs. La similitud de los perfiles Vs inferidos a partir de la estimación independiente de cada geófono, demuestra la precisión del ensayo y su variabilidad es cuantificada. Con todo esto se valida el ensayo como uno más de los ensayos invasivos de medición del perfil Vs, pero con la ventaja de ser operativamente más eficiente al aprovechar la perforación que, en general, requiere una campaña de exploración geotécnica.

1.7 Organización de la tesis

La tesis se estructura en seis capítulos. El segundo capítulo explora el estado del arte del ensayo y casos de aplicación en la literatura. El capítulo 3 detalla conceptos asociados a la propagación de ondas útiles a la hora de inferir el perfil Vs. El cuarto capítulo presenta un completo análisis de los métodos de interpretación de los datos obtenidos en el ensayo SPT-sísmico y conceptos asociados a la propagación de ondas útiles a la hora de inferir el perfil Vs. El quinto presenta la implementación en terreno del ensayo. El sexto capítulo presenta la modelación numérica simplificada del ensayo SPT-sísmico y la validación de los métodos de reducción disponibles. El séptimo capítulo resume la metodología recomendada para ejecutar el ensayo. El octavo capítulo

presenta los resultados obtenidos en terreno y el cálculo de los perfiles de Vs con la metodología validada. Finalmente, el noveno capítulo narra las conclusiones del trabajo.



CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Estado del arte ensayo SPT-sísmico

El trabajo de Ohta *et al.* (1978) fue el primero en usar el ensayo SPT como fuente sísmica para generar y estimar la velocidad de ondas de corte. En los registros horizontales obtenidos identifican el tiempo en que el movimiento de partícula se torna predominantemente horizontal y lo establecen como el tiempo de arribo del frente de ondas de corte. El método de reducción usado si bien no queda claro posiblemente sea el método directo o de la pendiente (Kim *et al.* 2004). Tampoco se documenta las distancias a las que ubicaron los geófonos. Recomiendan el uso del apilamiento de las N señales generadas por los golpes del ensayo SPT, para mejorar la calidad de la señal a medida que la fuente se genera más profundamente.

Bang y Kim (2007) desarrollaron una metodología que incluye la estimación de los tiempos de arribo del frente de ondas, y la interpretación de esos tiempos para estimar el perfil Vs. Usan el método de reducción intervalo modificado (Bang y Kim 2007, Bang *et al.* 2014, Kim *et al.* 2004) el cual permite incorporar en el análisis el efecto de la ley de Snell. Esto transforma el proceso de reducción de un mero cálculo algebraico a una búsqueda iterativa de los valores de Vs en conjunto con la ruta de rayo de las ondas gobernada por la ley de refracción.

Pedrini y Giacheti (2013) proponen el uso de un golpe de martillo de mano en lugar del martillo del ensayo SPT para obtener una forma funcional de la fuente más simple. De esta forma, según dicha publicación, se facilita la identificación de los tiempos de arribo del frente de ondas. Propone el uso de un golpe vertical hacia arriba en la cabeza de golpe del ensayo SPT para usar la propiedad de polaridad reversa de las ondas S y detectar así, de manera más fácil, el tiempo de arribo de la onda de corte.

2.3 Casos de aplicación del ensayo SPT-sísmico:

Ha sido usado recientemente para caracterizar sísmicamente sitios y para correlacionar con el número de golpes del ensayo SPT (Akin *et al.* 2016, Akin *et al.* 2011).

2.4 Conclusiones

El trabajo desarrollado por Bang y Kim (2007) es el que más ha avanzado en proponer una completa metodología para efectuar el ensayo SPT-sísmico. En esta metodología, sin embargo, hay procedimientos poco prácticos a la luz de las señales obtenidas en ensayos reales como la determinación de los tiempos de llegada del frente de ondas. Carece de una modelación numérica adecuada del fenómeno y por lo tanto no aborda algunos aspectos como el efecto de las ondas superficiales y de la fuente muy superficial en la errónea estimación del perfil V_s . Si bien dicha publicación aborda el tema de la evaluación de distintos métodos de reducción, esta se realiza en base a tiempos teóricos que difieren de una propagación con longitudes de ondas similares a los espesores de los estratos. Finalmente, no hay una cuantificación de la variabilidad en el perfil V_s estimado con el ensayo con el fin de evaluar la precisión de este método de medición.

CAPÍTULO 3 PROPAGACIÓN DE ONDAS

3.1 Introducción

Según las simulaciones realizadas, se aprecia que la aplicación de una fuerza puntual, vertical y súbita en un medio homogéneo, genera un frente de ondas que se propaga en todas las direcciones con una forma esférica (Figura 3.1). Esto resulta en que, dependiendo de la ubicación de la fuente y del receptor, la onda pueda llegar con mayor energía en una componente que en otra. Por ejemplo, al ver la Figura 3.2 (a), es claro que a medida que la fuente se ubica más profundamente la componente en la que predomina el movimiento de la onda SV es la componente horizontal. Esto último fue evidenciado en primera instancia en la publicación de Ohta *et al.* (1978) y demuestra la importancia de que los geófonos usados sean biaxiales.

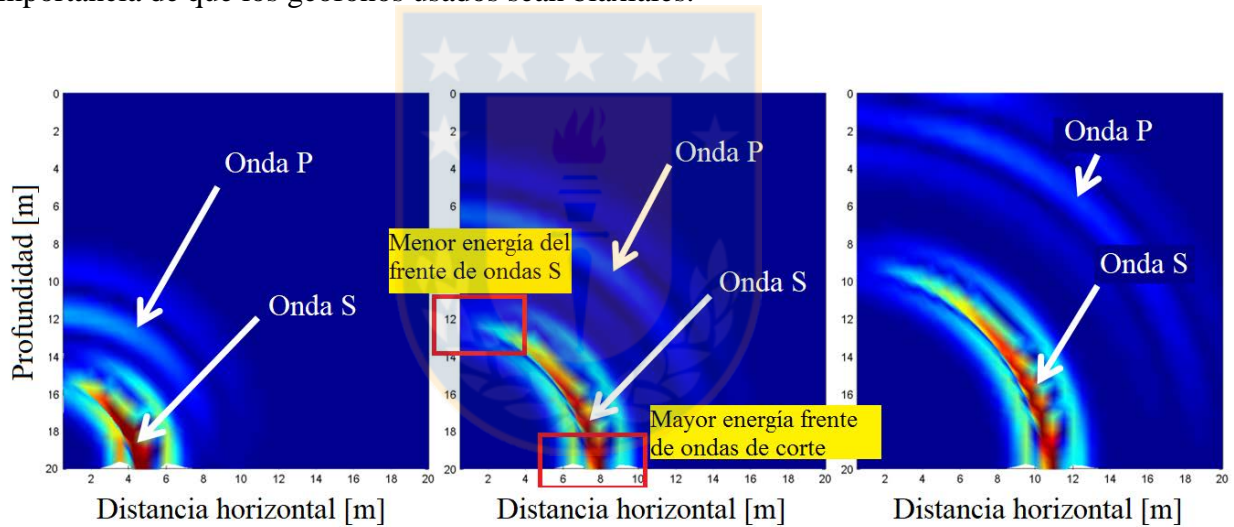


Figura 3.1 Plano vertical de la propagación de ondas debido a una carga vertical, puntual y súbita en un semiespacio

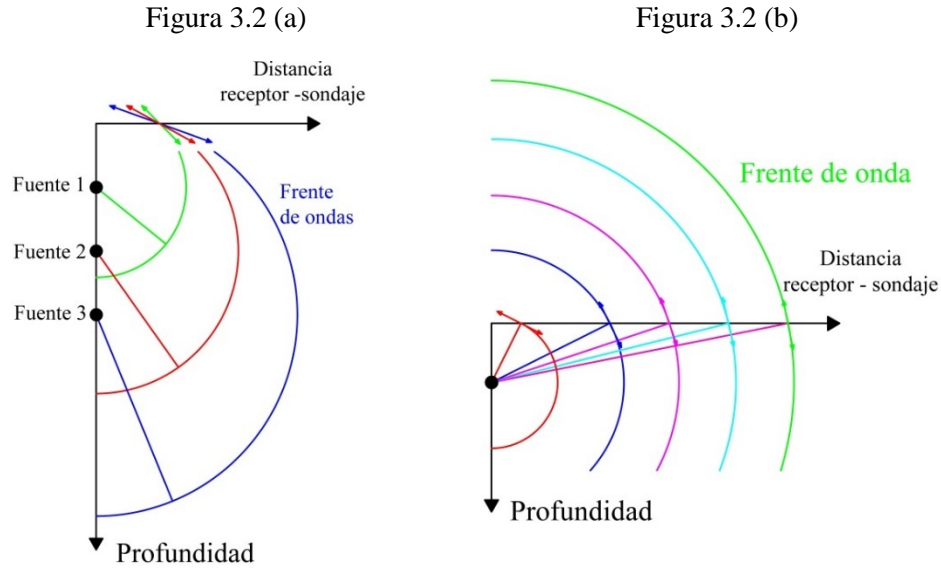


Figura 3.2 (a) Dependencia azimutal del mayor movimiento generado por el frente de ondas esférica. (b) Zona del frente de ondas captado por los receptores en superficie. Receptores más cercanos al eje de perforación registran zona superior del frente de ondas

En el procesamiento de los datos reales, para evitar esta dependencia azimutal de la mayor energía en el movimiento, se recomienda el uso de la componente Q (Figura 3.3). Rotar los registros aumenta la manifestación de la onda de corte y, por lo tanto, facilita la determinación de la tendencia de la onda S –puntos característicos de la señal (CP)– en el conjunto de registros (Figura 3.4). La combinación de las señales es posible solo si los geófonos tienen la misma respuesta de fase y amplitud ante el movimiento en superficie.

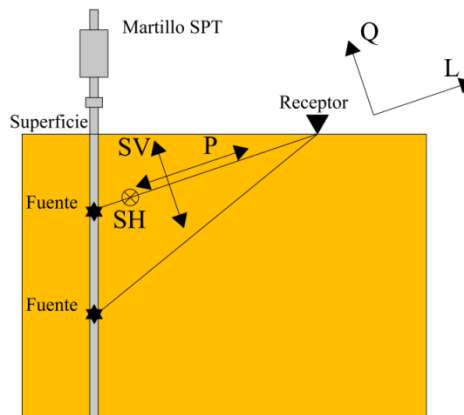


Figura 3.3 Vista plano vertical. Componentes del movimiento de partícula

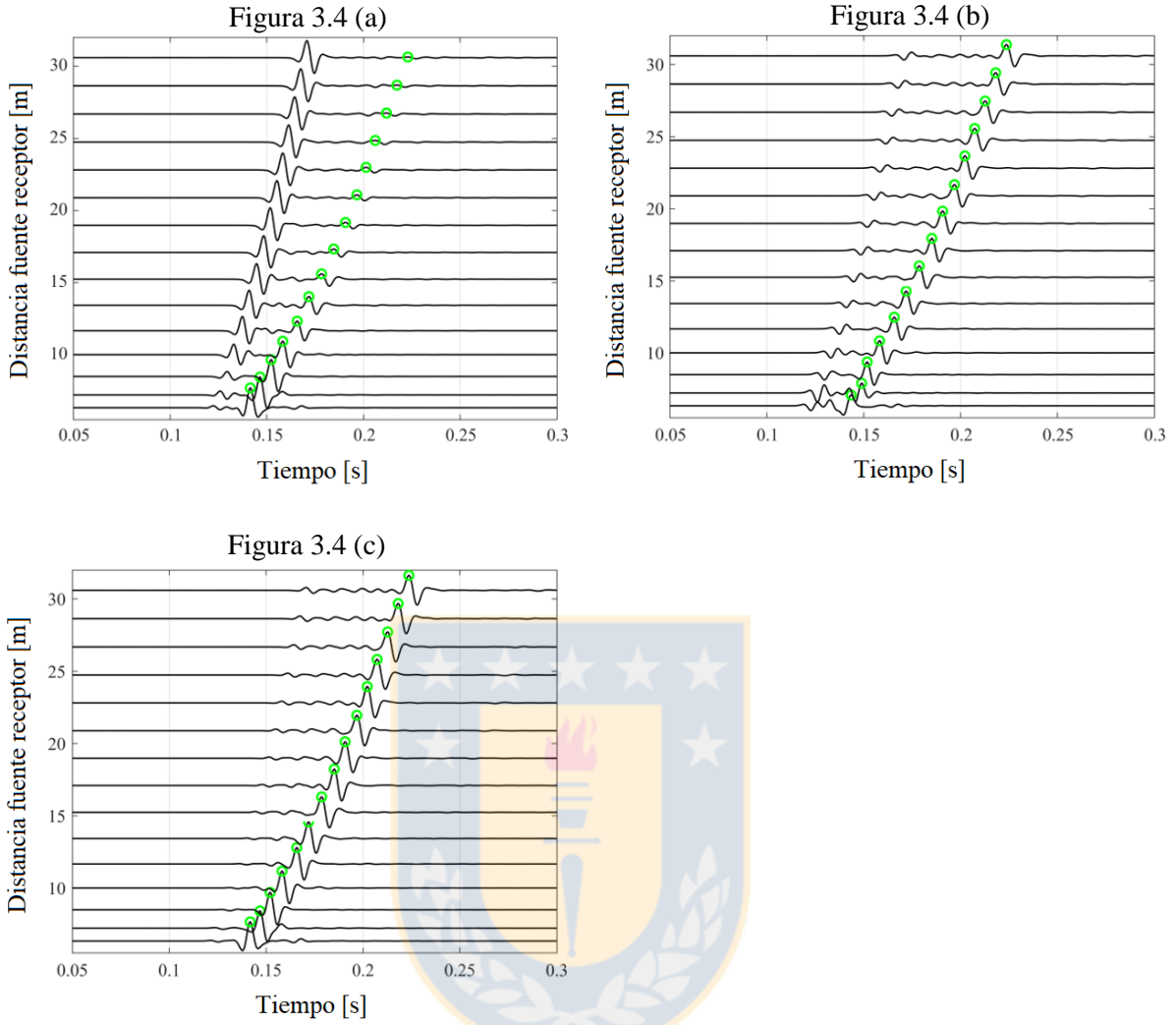


Figura 3.4 Componente vertical (a), componente horizontal (b) y componente Q (c). Receptor virtual a 6 metros del sondaje. Fuente pulso de Ricker de 100 Hz. En verde punto característico de la señal. Perfil B

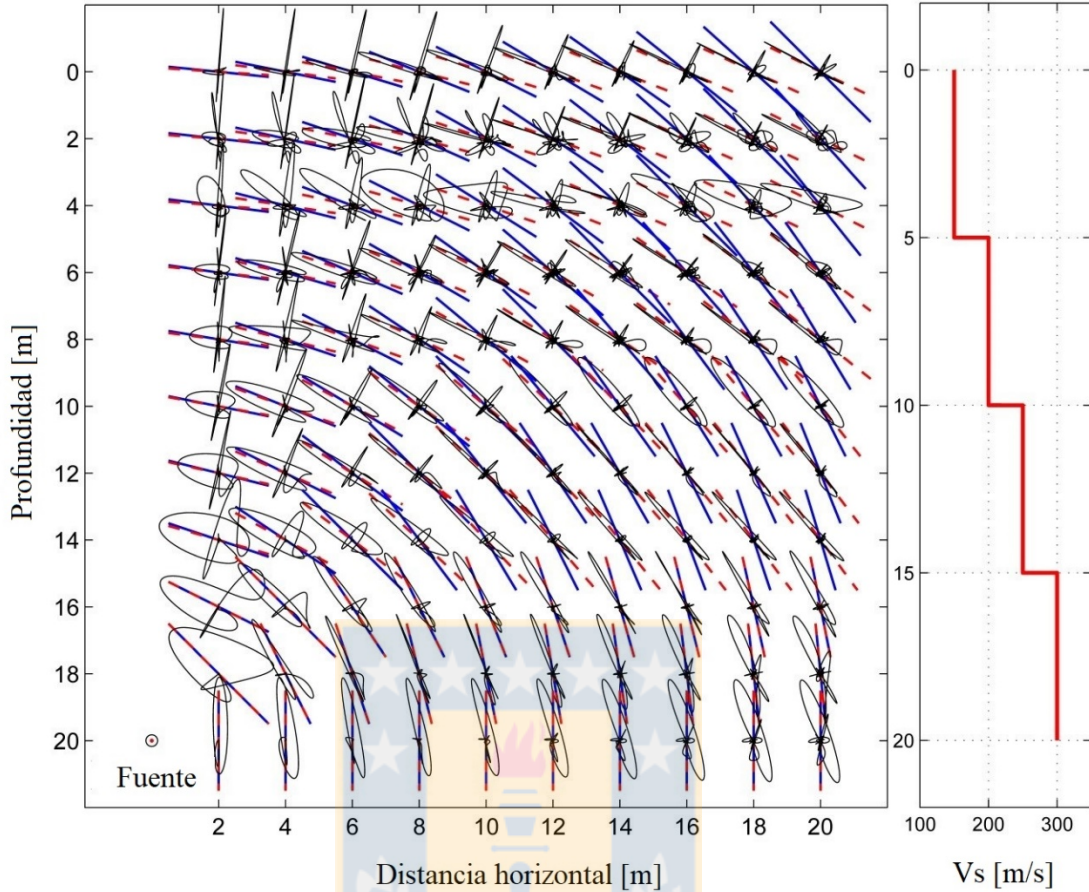


Figura 3.5 Movimiento de partícula (normalizado) en un modelo de suelo elástico estratificado ante una carga puntual y transiente a 20 metros de profundidad. En rojo: Ángulo de la ley de *Snell*. En azul: Ángulo tangente a la propagación esférica

En la Figura 3.5, se puede ver el movimiento de partícula de puntos en el interior y en la superficie ante una carga puntual, vertical y transiente (pulso de *Ricker* de 100 Hz) ubicada a 20 metros de profundidad. El valor de la frecuencia del pulso fue definido en base a la frecuencia principal de las señales obtenidas en terreno. Al notar el movimiento de partícula de los puntos adyacentes a este ensayo SPT virtual, se puede apreciar claramente como el frente de ondas de corte es el que domina el movimiento de la partícula con un movimiento aproximadamente tangencial a la propagación esférica del frente de ondas (línea azul, Figura 3.5). Debido al aumento de la rigidez en profundidad del modelo (derecha, Figura 3.5), se ve que el frente de ondas se asemeja más a una propagación con forma de elipsoide y que tiende a asemejarse, sobre todo en las zonas alejadas del sondaje, a una propagación de rayo compatible con la ley de Snell (línea roja, Figura 3.5).

Debido a que la ruta de la onda según la ley de refracción requiere conocer las velocidades de propagación del perfil de suelo, la cual de hecho se está tratando de estimar en el ensayo, se requeriría de un proceso iterativo para el cálculo del perfil Vs, la actualización de la ruta de la onda y la rotación de las señales (Bang y Kim 2007). Sin embargo, según las modelaciones realizadas, la estimación del perfil de velocidad de ondas de corte no pareciera depender de la componente de los registros usados, e inclusive, las componentes horizontales y verticales se presentan susceptibles de ser usadas confiablemente.

En la Figura 3.6 se muestra la razón de los valores Vs modelados y estimados –perfiles en la Tabla 3.1 y detalles de la simulación en el capítulo 4–. La estimación de Vs en los perfiles se calculó con el método del intervalo modificado con la inclusión de la ley de Snell (Bang y Kim 2007, Kim *et al.* 2004) y con la metodología presentada a lo largo de esta publicación. La estimación del tiempo de viaje se realizó a partir de los puntos característicos en la señal de la Figura 3.4. El resultado de esta simulación muestra que cualquier componente usada en la determinación de los tiempos de viaje es capaz de predecir confiablemente el perfil Vs.

Tabla 3.1 Perfiles Vs modelos de suelo (simulación 1)

Perfil Vs 1			Perfil Vs 2			Perfil Vs 3			Perfil Vs 4			Perfil Vs 5		
Estrato		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)
Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)	
0	∞	100	0	2	110	0	2	120	0	2	130	0	∞	200
			2	4	130	2	4	160	2	4	190			
			4	6	150	4	6	200	4	6	250			
			6	8	170	6	8	240	6	8	310			
			8	∞	190	8	∞	280	8	∞	370			
Perfil Vs 6			Perfil Vs 7			Perfil Vs 8			Perfil Vs 9			Perfil Vs 10		
Estrato		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)
Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)	
0	2	210	0	2	220	0	∞	300	0	2	310	0	∞	400
2	4	230	2	4	260				2	4	330			
4	6	250	4	6	300				4	6	350			
6	8	270	6	8	340				6	8	370			
8	∞	290	8	∞	380				8	∞	390			

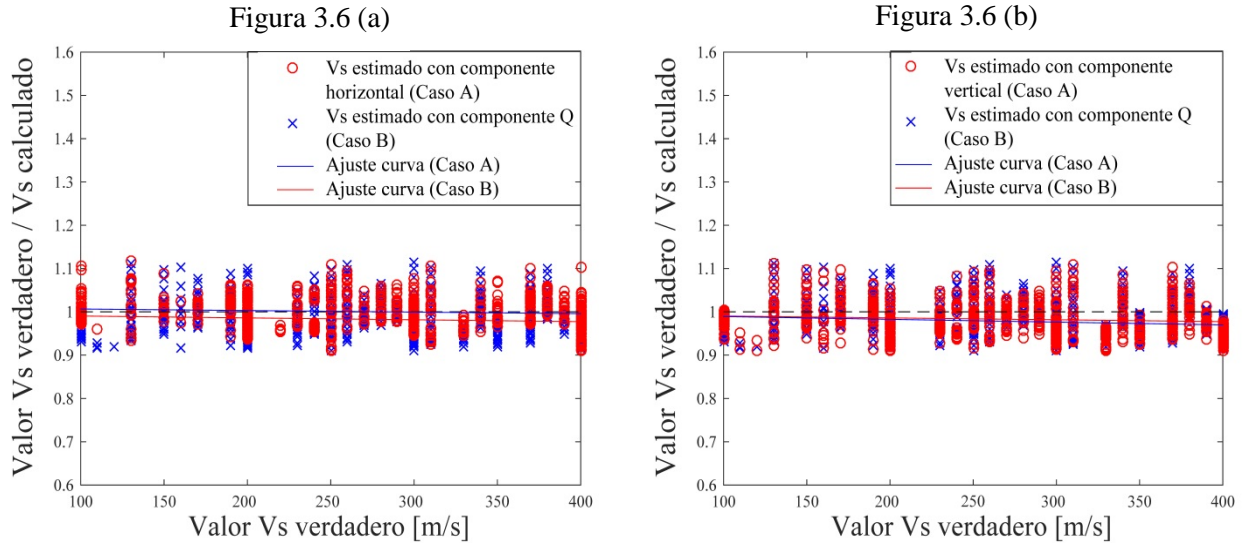


Figura 3.6 Razón entre el valor entre el Vs modelado y estimado. Perfiles Tabla 3.1. (a) Comparación entre Vs estimado con las componentes horizontales y Q. (b) Comparación entre Vs estimado con las componentes verticales y Q

Un segundo punto a destacar es que la energía de la onda S tiene un máximo en la parte central del frente de ondas y disminuye hacia las zonas superior e inferior, Figura 3.1. Esto último hace que, si la fuente se ubica cada vez más profunda, los geófonos cercanos a la perforación, detectan cada vez con menor amplitud el arribo del frente de ondas S (Figura 3.7) y cuya señal puede ser influenciada más por ruido (*e.g.* ruido de motor de la perforadora) que por las ondas S. Para evitar este efecto, se hace necesario el uso de varios receptores dispuestos en superficie con el fin que los más cercanos detecten las ondas de ensayos SPT superficiales y los más lejanos, ensayos SPT más profundos. Esto genera que el perfil Vs sea inferido de una superposición de perfiles obtenidos con los distintos geófonos. Mientras más geófonos se usen, mayor será la redundancia en la estimación del perfil puesto que varios geófonos aportarán información en un cierto rango de profundidades.

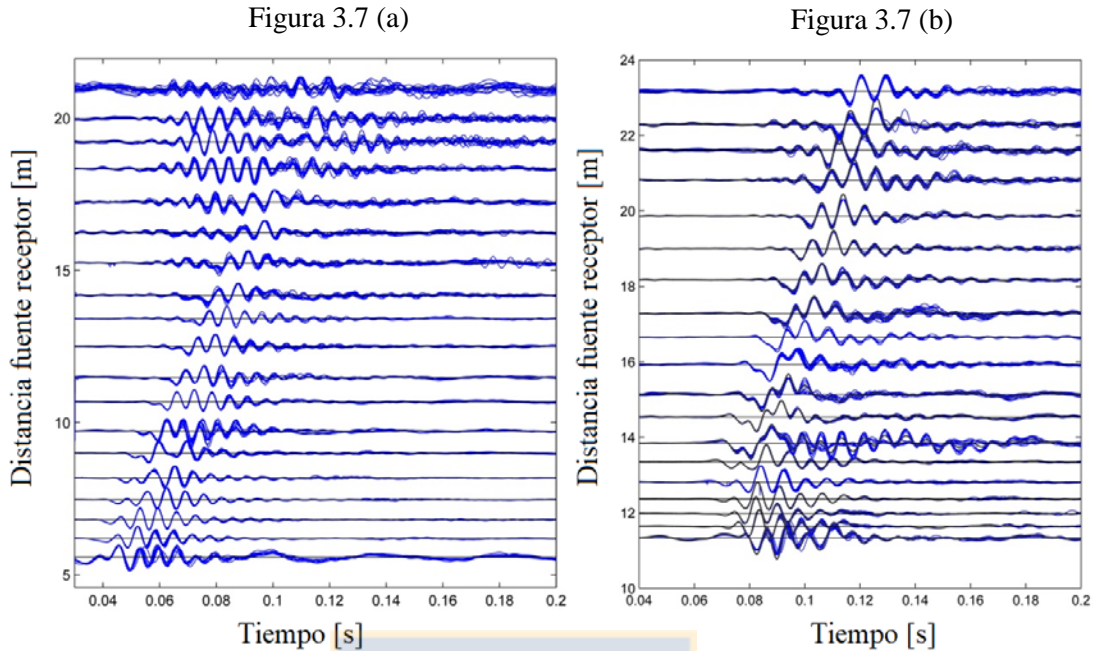


Figura 3.7 Registros de geófonos en superficie en el ensayo SPT-sísmico (sondaje de 20 metros). (a) Registro geófono horizontal a 5.11 metros del sondaje. (b) Registro geófono horizontal a 11.11 metros del sondaje

3.2 Conclusiones

La simulación numérica del fenómeno estudiado es muy importante para establecer características en la propagación de ondas durante el ensayo SPT-sísmico. Estas características son fundamentales a la hora de establecer la configuración óptima del ensayo SPT-sísmico, así como en el apropiado procesamiento de los datos. Por ejemplo, el hecho de que el frente de ondas tenga una menor energía en la parte superior de este, repercute notablemente en la calidad de las señales captadas por geófonos cercanos al eje del sondaje a medida que la fuente se ubica más profundamente. Para sobrellevar este efecto es necesario disponer geófonos a una mayor distancia del eje del sondaje a diferencia del usualmente empleado ensayo *Downhole*. Por otro lado, la influencia de la refracción en la ruta de la onda se ve acentuada en este ensayo y su efecto en los métodos de reducción de las señales fue estudiado.

CAPÍTULO 4 DETERMINACIÓN DEL PERFIL Vs

4.1 Introducción

Los registros medidos al realizar el ensayo SPT-sísmico no son más que la manifestación del paso de ondas S al llegar a la superficie. Por lo tanto, para obtener el modelo de Vs del sitio, se requiere usar algún método de reducción o de interpretación de las señales obtenidas.

Para obtener el perfil Vs de un sitio se deben identificar los tiempos de arribo del frente de ondas S a los receptores superficiales y en función de las distancias de viaje, estimar la velocidad con la que se propagan.

4.2 Tiempos de viaje

Los métodos de reducción requieren conocer el tiempo de viaje de las ondas S y para ello se necesita saber el tiempo de inicio y el tiempo de llegada de la onda.

El tiempo de inicio de la propagación es fácilmente identificable con el dispositivo *trigger* implementado. El tiempo dado por el *trigger* se asocia al impacto en superficie del martillo en el ensayo SPT por lo que el tiempo de inicio en el suelo debe tener un cierto tiempo de desfase. Este tiempo de desfase se infiere fácilmente considerando la velocidad de propagación de ondas P y la longitud de la barra.

El tiempo de llegada de las ondas es difícil de obtener por la interferencia en la señal del ruido de la máquina, ruido ambiente, reflexiones de ondas P que llegan posteriormente, entre otras señales desconocidas, Figura 4.1. Para sobrellevar este problema Bang y Kim (2007) proponen usar el método que se muestra en la Figura 4.3 usando los desfases de la máxima manifestación de la onda (puntos *peaks*) y la velocidad del primer estrato. El tiempo de viaje de la onda generada en el segundo ensayo SPT sería la suma del tiempo de viaje en el primer estrato más el tiempo de desfase

entre las señales del primer y segundo ensayo SPT. Esto se repite para los siguientes ensayos SPT y el tiempo de viaje de la onda generada en la cota j -ésima se determina según la ecuación (4.1)

$$t_j = \frac{\sqrt{(h_1^2 + x_r^2)}}{V_{s1}} + \sum_{i=1}^{j-1} \Delta t_i, \tag{4.1}$$

en donde h_1 es el espesor del estrato inicial, x_r es la distancia del geófono al sondaje, V_{s1} es la velocidad del primer estrato y Δt_i los desfases de los ensayos SPT sucesivos.

Esto último tiene como supuesto que la forma de la señal del impacto principal (Figura 4.1) sea similar en ambas señales usadas para el cálculo del desfase, lo cual, a juicio del autor de este trabajo, se cumple al hacer la inspección de los registros obtenidos de las mediciones en terreno.

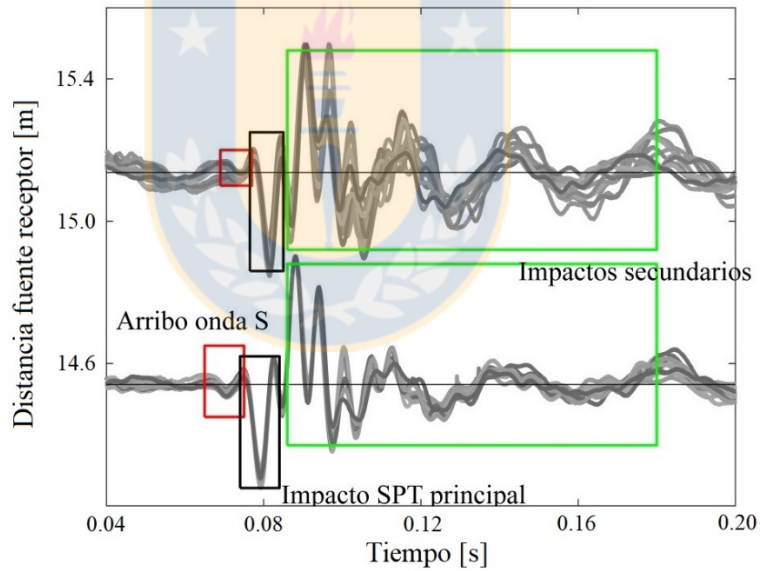


Figura 4.1 Señales verticales generadas por ensayos SPT a 9.4 y 10.3 metros de profundidad, captadas por un receptor a 11.1 metros del sondaje

Incluso cuando las señales de ensayos SPT adyacentes en un mismo geófono no muestren similitud o continuidad de la tendencia del punto característico, es posible usar otro punto característico que siga la tendencia de los ensayos SPT adyacentes (Figura 4.2, en azul). En este caso los desfases

calculados con los tiempos característicos en azul, solo podrán ser usados cuando se les incorpore la información del perfil Vs hasta la profundidad del punto característico azul más superficial. El perfil incorporado puede provenir preferentemente del promedio de los perfiles calculados con los puntos característicos 1 y 2 (Figura 4.2, rojo y verde) o inclusive con el promedio de los perfiles Vs calculados de otros receptores horizontales y/o verticales.

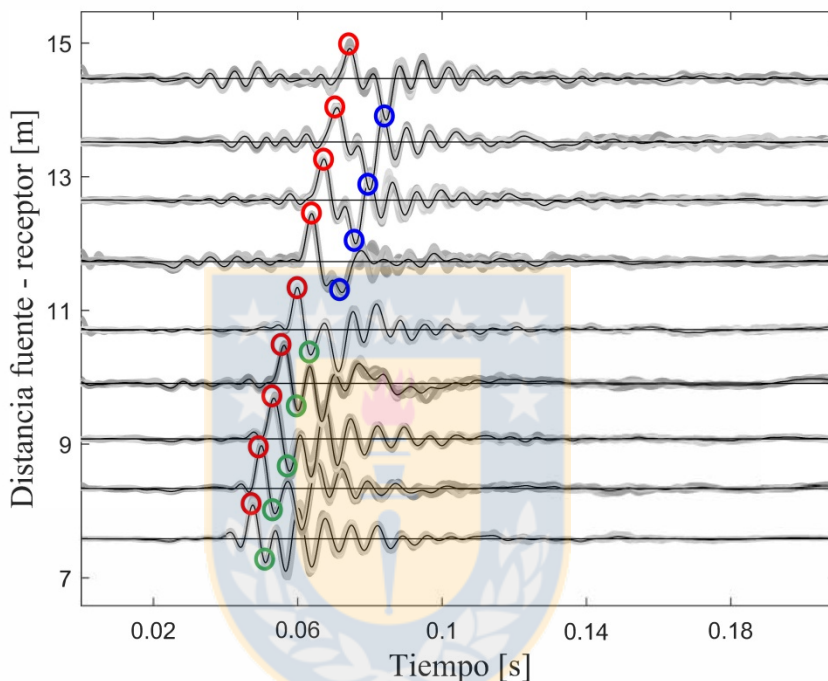


Figura 4.2 Señales de un geófono horizontal a 5.5 metros del sondaje, generadas por ensayos SPT entre 5.2 y 13.4 metros de profundidad (Sondaje 1 sitio 1). Gris: Todos los golpes. Negro: La media de las señales. Rojo: Punto característico 1. Verde: Punto característico 2. Azul: Punto característico 3

El método de reducción precisa de la correcta estimación de los desfases entre las señales. La calidad de la señal tal como se muestra en la Figura 4.1 es pobre para la correlación temporal de las señales completas –salvo que se seleccione la zona específica del golpe principal– debido a la influencia de las fuentes de ruido ya mencionadas además de la presencia de reflexiones del golpe principal y golpes secundarios que alteran la similitud de ambas señales. Es por esto último que en vez de correlacionar las señales es mejor realizar la inspección de la tendencia de la onda S – fácilmente identificable en el conjunto de registros medidos por el geófono– y seleccionar los

puntos característicos de los registros (puntos máximos, mínimos o ceros) que siguen la tendencia principal (Figura 4.4).

4.3 Primer estrato

La velocidad de ondas de corte del primer estrato se obtiene mediante el primer ensayo SPT e interpretando las señales obtenidas de los distintos geófonos. En los primeros estratos, la componente vertical es la que lleva la mayor parte del movimiento de la onda de corte por lo que es la mejor elección para la estimación del Vs inicial. La velocidad del primer estrato sería el cociente entre el desfase de distancia y de tiempo de viaje. El desfase de tiempo nuevamente resulta ser el tiempo entre puntos característicos de ambas señales. El promedio de las velocidades calculadas con las distintas combinaciones de pares de geófonos resulta en una confiable estimación de la velocidad del primer estrato, siempre que estos valores sean suficientemente homogéneos. De no ser así, se recomienda el uso de los tiempos característicos de los sensores más cercano al sondaje por el efecto de la zona del frente de ondas, sección 6.4.

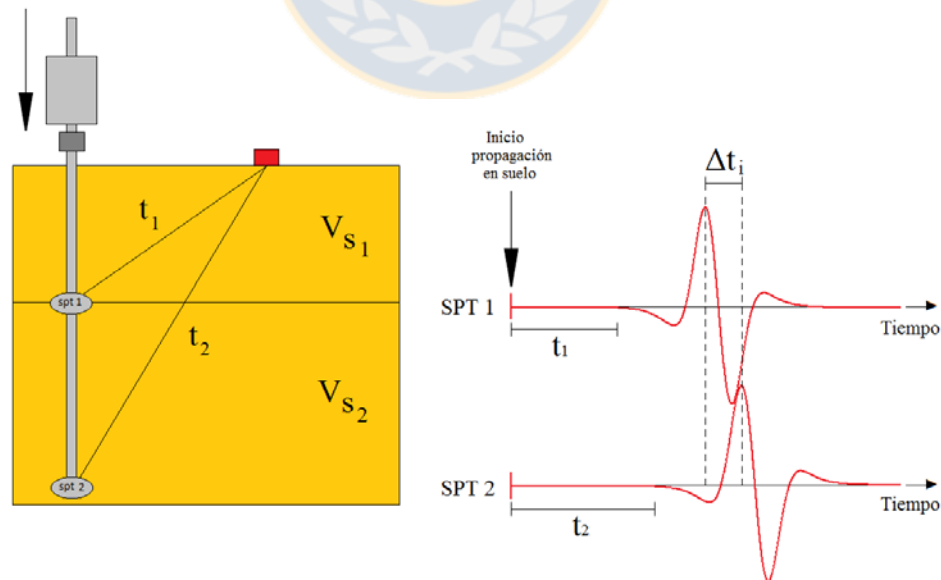


Figura 4.3 Tiempo de viaje onda. El tiempo de viaje de la onda en el ensayo SPT 2 es la suma del tiempo t_1 más el desfase de tiempo Δt_i

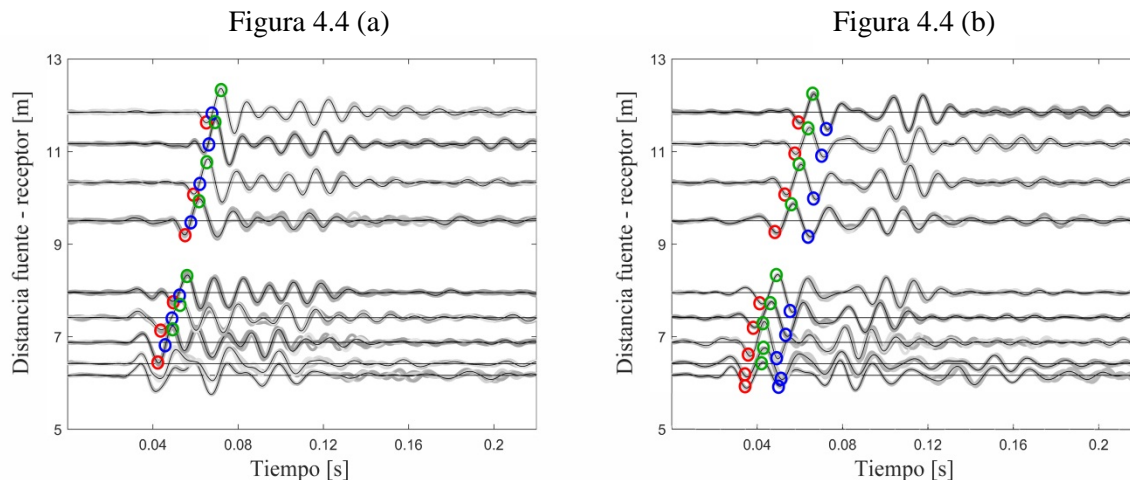


Figura 4.4 Señales horizontales (a) y verticales (b) de ensayos SPT-Uphole. Geófono a 6 metros del sondaje (sitio 4). Gris: Señales. Negro: Media. Rojo: Punto característico 1. Azul: Punto característico 2. Verde: Punto característico 3

4.4 Rotación de registros

En relación a la componente de los registros usados para la identificación del tiempo de arribo Bang y Kim (2007), en base a modelaciones numéricas, recomiendan el uso de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las señales horizontal y vertical de los geófonos biaxiales. Esto último, como un intento de combinar ambas componentes las cuales, debido a la forma de propagarse la onda, influyen de distinta manera según la ubicación de la fuente y receptor (Figura 3.2, (a)). Según dicha publicación, el primer *peak* de esta señal artificial coincide con el primer *peak* de la onda S y combinar de tal manera ambas señales evita considerar el incierto ángulo de llegada. En base a las simulaciones, sin embargo, la componente con la que se establecen los tiempos característicos –o tiempo *peak*– no es relevante en los resultados siempre que se usen consistentemente la componente horizontal, vertical o componente Q.

El enfoque que recomienda Bang y Kim (2007) de hecho –a juicio del autor– dificulta la identificación de los puntos característicos en esta señal creada artificialmente. Al combinar de esta manera la señal se pierde la distinción de la parte negativa y positiva y, por lo tanto, se pierde la capacidad de identificar la tendencia de la forma funcional del pulso. En su lugar, se propone la

inspección visual de las señales horizontal o vertical de los geófonos y usarlas de forma independiente para estimar los perfiles Vs (esto para todos los geófonos) e inclinarse por la media o por los perfiles que muestren mayor consistencia unos con otros. El uso de ambas componentes en lugar de la señal combinada aporta más información y redundancia a la hora de establecer la tendencia de la onda S, Figura 4.4.

En las simulaciones numéricas la señal adoptada en los análisis fue la componente tangencial (componente Q) a la propagación esférica del frente de ondas (Figura 3.3). La adopción de esta componente de las señales simuladas es un mero artificio para lograr captar más fácilmente la mayor manifestación del frente de ondas de corte en todo el rango de profundidades. Este efecto se presenta principalmente a bajas profundidades en donde se acentúa más el hecho de que en los primeros ensayos SPT el geófono vertical es el que capta mejor el movimiento de la onda S y a medida que la fuente se ubica más profundamente, el geófono horizontal comienza a tomar más importancia. Esto último en las señales reales sería de utilidad siempre que ambos geófonos (horizontal y vertical) posean igual respuesta de fase y amplitud, aspecto no necesariamente logrado por geófonos convencionales debido a diferencias en la respuesta de fase o amplitud de los dispositivos transductores y/o diferente respuesta del acople suelo – sensor.

Una vez identificado los desfases y por lo tanto los tiempos de viaje de las ondas S, se procede a interpretar estos tiempos dentro de la estratigrafía de velocidades para lo cual se requiere un método de reducción.

4.5 Método de reducción

El proceso de reducción es el proceso transformar los tiempos de viajes en el modelo de velocidades de ondas de corte estudiado. Históricamente se han usado 4 métodos de reducción (Kim *et al.* 2004); el método del intervalo, el método directo y el método del intervalo modificado el cual además puede incorporar el efecto de la ley de *Snell* en el análisis.

4.5.1 Método del intervalo

El método del intervalo consiste en el cálculo de la velocidad de cada estrato usando las diferencias de distancia y desfases de tiempo en el viaje de la onda desde distintas fuentes en el caso del ensayo SPT-*Uphole* –o receptores en el caso del ensayo *Downhole* (Figura 4.5)– y usar el cociente entre ambas magnitudes (ASTM 2008). Es el método adoptado por la norma ASTM en el ensayo *Downhole* y de acuerdo a las simulaciones realizadas en este estudio, es capaz de estimar confiablemente el perfil Vs sólo si el receptor en el caso del ensayo SPT-sísmico –o la fuente en el ensayo *Downhole*– se ubica lo más cerca posible de la perforación (Figura 4.7). Como en el ensayo SPT-sísmico ubicar el receptor cercano al eje del sondaje dificulta la identificación del frente de ondas, este método de reducción no se considera apropiado y así lo muestran las simulaciones realizadas (Figura 6.1 y Figura 6.2).

4.5.2 Método del directo

El método directo, en esencia similar al método del intervalo, consiste en la estimación de la pendiente del gráfico tiempos *versus* distancias de viaje (Kramer 1996). La velocidad de cada estrato puede ser obtenida de la pendiente de la recta que se ajusta a los puntos que muestran alguna tendencia, Figura 4.6. El modelo de suelo se construye agrupando arbitrariamente los puntos con pendientes similares por lo que puede diferir según quien realice estimación. Al ser una extensión del método del intervalo modificado, posee la misma falencia en la sobreestimación del perfil Vs para profundidades bajas a intermedias.

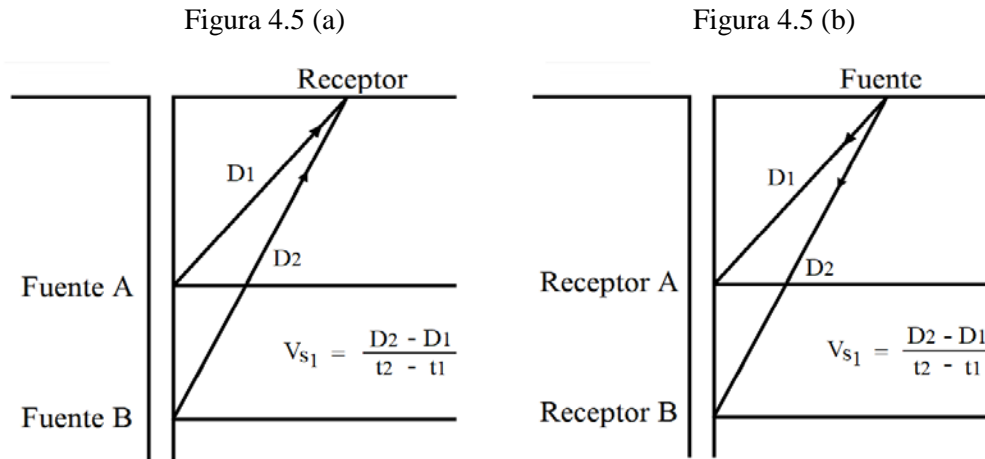


Figura 4.5 Método del intervalo. (a) Configuración ensayo SPT-Uphole. (b) Configuración ensayo Downhole

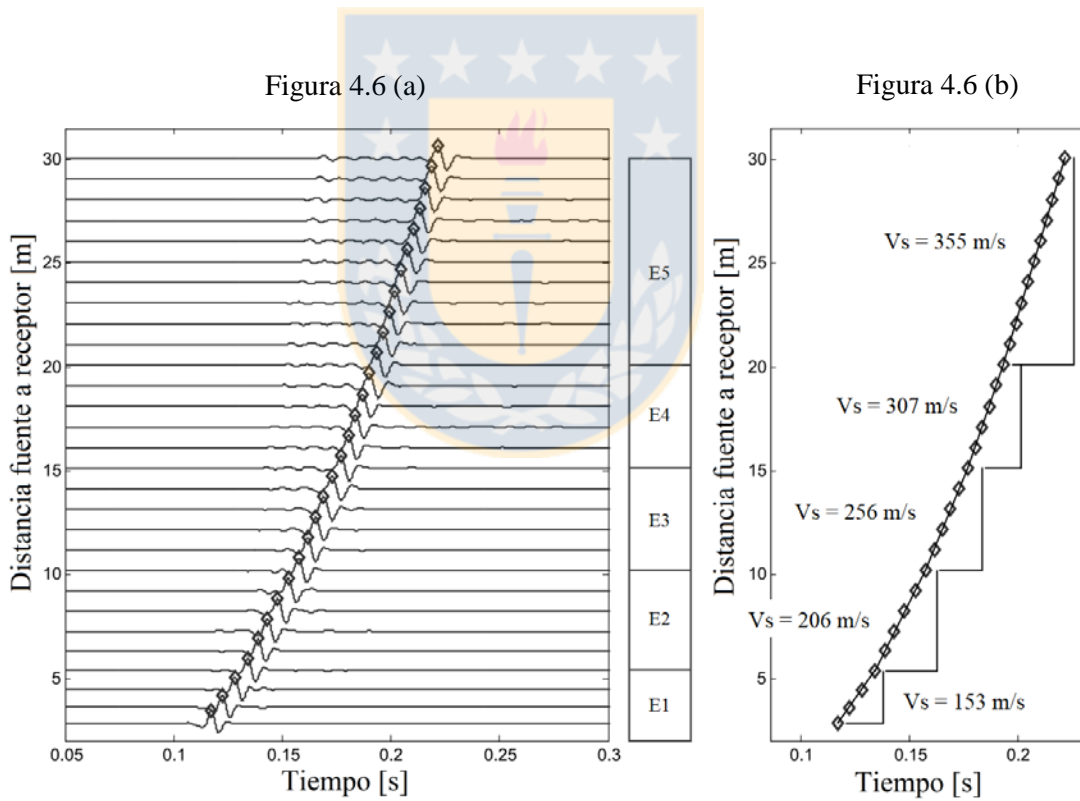


Figura 4.6 Método directo. (a) Señales de la simulación ensayo SPT-Uphole en perfil Vs B y receptor a 2 metros. (b) Ajuste de la curva a los puntos característicos

4.5.3 Método del intervalo modificado

El método de intervalo modificado, consiste en el cálculo de la velocidad usando la distancia y tiempo de viaje de la onda en cada estrato, ecuación (4.2) y Figura 4.8. Este método requiere conocer la velocidad de ondas S en los estratos superiores por lo que el proceso de inversión comienza estimando la velocidad del o los estratos iniciales y avanzando estrato por estrato –suelo entre ensayos SPT– hasta los estratos más profundos. Los tiempos t_j se calculan según la ecuación (4.1) y requiere conocer la velocidad y espesor del primer estrato –o primeros estratos–.

En el caso que los registros de un geófono muestren la tendencia de la onda S (puntos característicos) a partir del k -ésimo ensayo SPT (bajo el j -ésimo estrato), se requerirá de la información del perfil V_s y espesor de los k estratos superiores para estimar el valor del tiempo de viaje $t_{j=k}$ y poder continuar con los estratos más profundos

$$V_{s_j} = \frac{L}{T} = \frac{\frac{h_j}{\cos \alpha}}{t_j - \sum_{i=1}^{j-1} \frac{h_i}{V_{s_i}}}. \quad (4.2)$$

En la ecuación (4.2), L y T son la distancia y tiempo respectivamente que recorre la onda en el j -ésimo estrato, h_j es el espesor del j -ésimo estrato, V_{s_j} es la velocidad de ondas S del j -ésimo estrato y α es el ángulo con respecto a la vertical de la recta que une la posición de la fuente y el receptor.

Figura 4.7 (a)

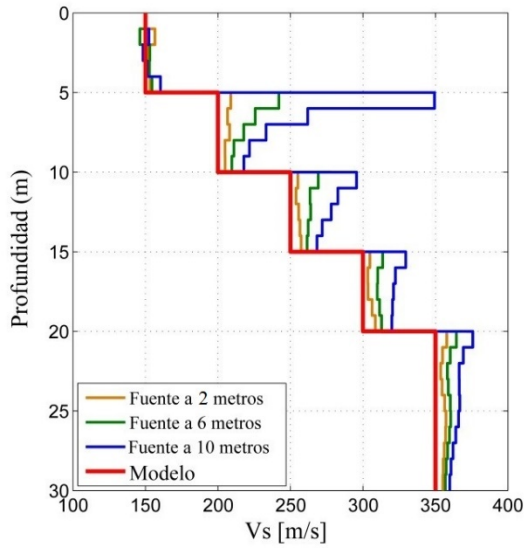


Figura 4.7 (b)

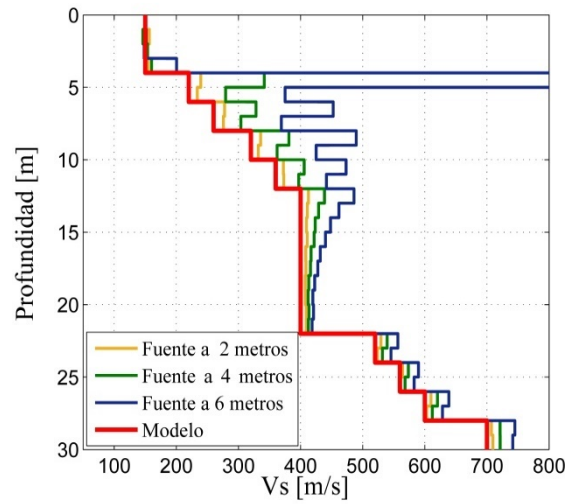


Figura 4.7 (c)

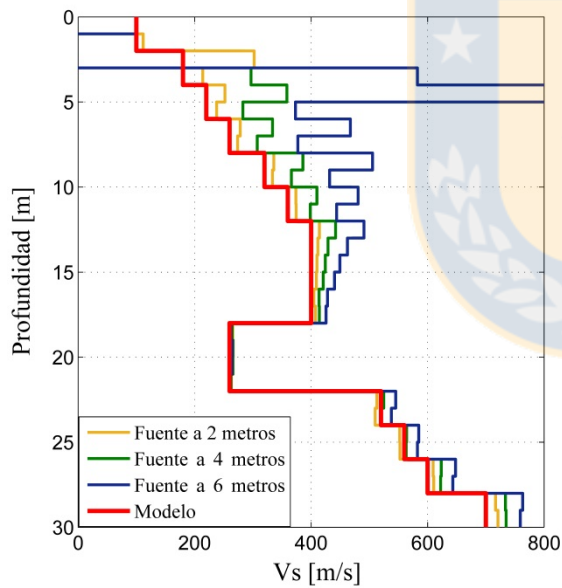


Figura 4.7 (d)

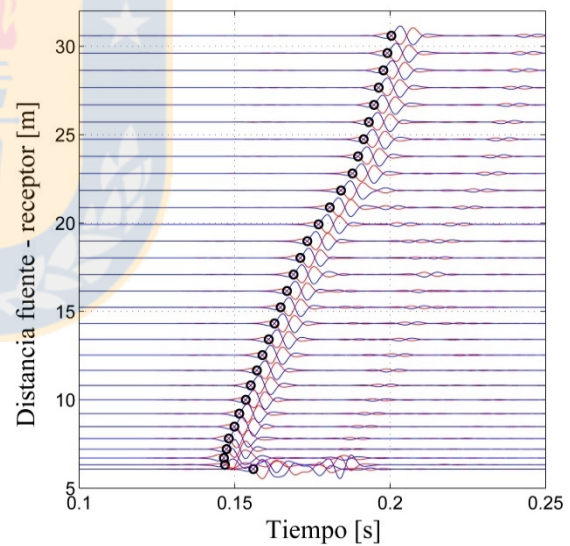


Figura 4.7 Reducción de las señales obtenidas de la simulación numérica del ensayo *Downhole* en los perfiles Vs: B (a), C (b) y D (c). Efecto de la posición de la fuente en el ensayo *Downhole* (método de determinación de tiempo *crossover* (Robertson *et al.* 1986) y método de reducción del intervalo (ASTM 2008)). (d) Señales ensayo *Downhole* virtual

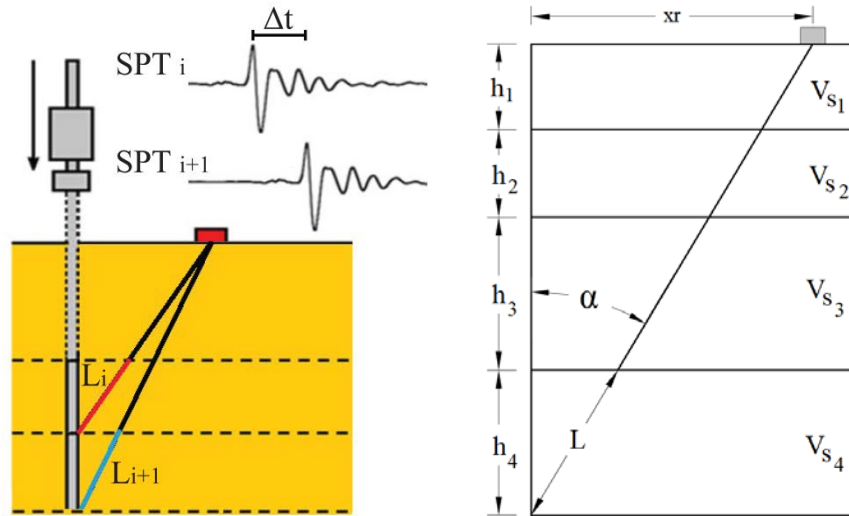


Figura 4.8 Nomenclatura usada en el método del intervalo modificado

Con este método es posible además incorporar el efecto de la refracción de la onda a medida que se propaga desde la fuente al receptor. Para esto basta modificar el término del numerador y el segundo término del denominador de la ecuación (4.2). En este caso α deja de ser constante y pasa a depender de los contrastes de impedancia de los estratos sucesivos y, por lo tanto, pasa a ser parte del vector de incógnitas del sistema de ecuaciones no lineal a resolver.

Sobre la ley de Snell

El cálculo de la velocidad de ondas de corte de un sitio precisa de la correcta estimación de la distancia y el tiempo de viaje de una onda. El cálculo del tiempo de viaje puede ser inferido directamente de la inspección de las señales obtenidas en terreno, cuya buena estimación depende de la eficacia del sistema de *trigger* implementado y de que tan bien el sistema sensor/digitalizador replique el movimiento del suelo ante el paso de las ondas. La ruta de la onda y la distancia en cambio, suele suponerse que sigue las leyes de la óptica. La onda, al encontrarse con un cambio de rigidez, cambia su ángulo de incidencia.

Para el caso del ensayo SPT-sísmico el supuesto de las leyes de la óptica no se cumple siempre. El golpe del ensayo SPT genera ondas que se propagan con longitudes de onda comparables o incluso

mayores que los estratos de suelos que se pretenden caracterizar con el ensayo (distancias entre ensayos SPT).

Según Gupta (1971): “*La teoría de rayo basada en la ley de Snell es estrictamente válida cuando la variación de las constantes físicas del medio es pequeña dentro de una longitud de onda*”. Al inspeccionar los registros de los geófonos superficiales obtenidos de la campaña de mediciones realizada se tiene que las frecuencias predominantes del ensayo SPT están entre los 70 y 140 Hz. Esto sumado al hecho que las velocidades de propagación de ondas de corte en suelos oscilan normalmente entre los 100 a 400 metros por segundo, resulta que las ondas en el ensayo SPT varían entre los 1.4 a 5 metros, las cuales son mayores a las distancias entre ensayos SPT durante un sondaje que son normalmente entre 1 y 1.5 metros. Kim *et al.* 2004 recomiendan considerar la refracción de la ruta de la onda en el método de reducción del perfil Vs en ensayos *Downhole*. En tal análisis se usan tiempos de viaje de ondas teóricas, los cuales tienen validez solo si la longitud de onda es muy pequeña en comparación con los estratos y no considera que las ondas viajan excitando, eventualmente, varios estratos al mismo tiempo.

El frente de ondas de corte al propagarse en un medio que se rigidiza en profundidad adquiere una forma de propagación más cercana a un elipsoide que a una esfera. Si bien esto hace cambiar la ruta de la onda, parece cuestionable que el frente de ondas recorra la ruta de la onda que calcula el método de reducción del intervalo modificado con ley de *Snell* por las razones esgrimidas en el párrafo anterior. La ruta estimada con el método del intervalo modificado con ley de *Snell*, con abruptos cambios de ruta entre estratos, parecieran ser ficticia y no corresponder al comportamiento global del frente de onda.

En el ensayo *Downhole* el efecto de los abruptos cambios de velocidad es aún más despreciable (Figura 4.9) que en el ensayo SPT-Uphole. Esto es debido a que en el ensayo *Downhole* se suele ubicar la fuente cercana al eje del sondaje (1 a 3 metros) por lo que la ruta de la onda no difiere demasiado de la ruta que resulta al considerar la ley de *Snell*.

Figura 4.9 (a)

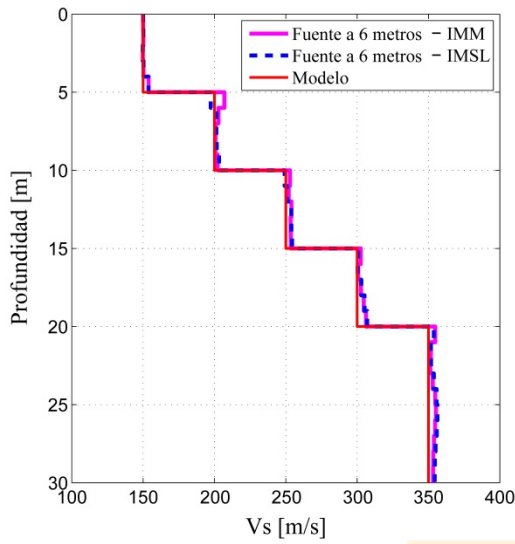


Figura 4.9 (b)

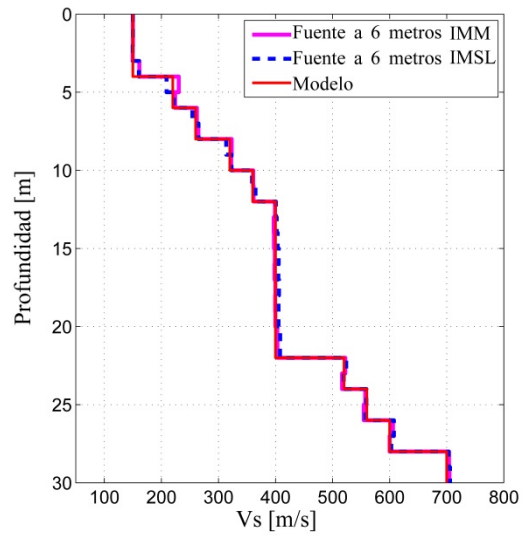


Figura 4.9 (c)

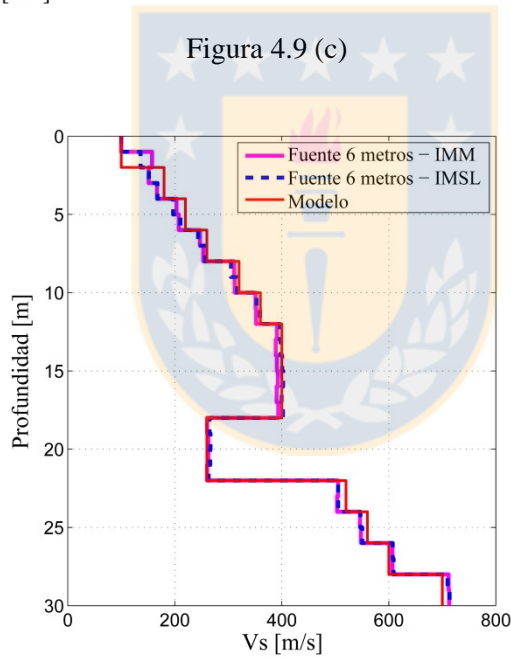


Figura 4.9 Reducción de las señales obtenidas de la simulación numérica del ensayo *Downhole* (método de determinación de tiempo *crossover* (Robertson *et al.* 1986) y método de reducción del intervalo modificado (Kim *et al.* 2004)). Efecto del uso del método intervalo modificado con la inclusión de la ley de *Snell*. Perfiles B (a), C (b) y D (c)

4.6 Procesamiento de las señales

Las señales de los registros fueron filtradas con un filtro consistente en la supresión de los términos complejos en la transformada de *Fourier*. El filtro usado fue un filtro pasabanda con frecuencias de corte entre 10 a 300 Hz. En algunos ensayos, sin embargo, fue necesario aumentar la frecuencia de corte menor para eliminar bajas frecuencias no deseadas. Es necesario el uso de este u otros tipos de filtros que no alteren la información de fase de la señal, ya que el método usa precisamente esta información para inferir las velocidades del suelo.

El uso del desfase en los registros medidos por el mismo geófono elimina las posibles diferencias que pudiese haber en la respuesta de fase de los distintos sensores. Por esta misma razón, la combinación de la señal horizontal y vertical de cada geófono para extraer la componente Q, es posible solo si se está seguro que ambos sensores responden de la misma manera ante el movimiento del suelo.

4.7 Conclusiones

La determinación del perfil Vs requiere conocer el tiempo de viaje del frente de ondas desde la fuente hasta los receptores. El tiempo de inicio del frente de ondas fue inferido en este trabajo según lo propuesto por Bang y Kim (2007) y su eficacia, fue corroborada de una manera *pseudo*-empírica con la simulación numérica del ensayo. Con respecto al tiempo de llegada, sin embargo, se propuso una metodología diferente a la propuesta por Bang y Kim (2007), la cual fue considerada poco práctica según los datos reales obtenidos en terreno. Esta metodología fue validada con la simulación numérica y permite una evaluación más redundante del perfil Vs.

CAPÍTULO 5 EQUIPAMIENTO Y CONFIGURACIÓN ENSAYO

5.1 Introducción

Con el fin de evaluar las señales generadas durante el ensayo SPT y establecer así la factibilidad de su uso en la estimación del perfil Vs, se diseñó e implementó un sistema de adquisición en base a geófonos biaxiales que cumpla con los requerimientos del ensayo.

5.2 Detalle del sistema de medición

El sistema de medición estuvo compuesto de instrumentos convencionales. Se instalaron en la superficie adyacente de los sondajes un *set* de 5 geófonos biaxiales del tipo bobina móvil y con una frecuencia fundamental de 10 Hz. Se dispusieron los geófonos a distancias que variaron entre 2.5 a 12 metros de la perforación. La sensibilidad de los geófonos fue de 20.9 Volts/m/s.

Se implementó un sistema de *trigger* consistente en unas láminas de cobre eléctricamente cargadas por una pila 6LR61 de 9 volts, adosadas a la cabeza de golpe del ensayo SPT y al sistema digitalizador (Figura 5.1). El cambio de voltaje debido al cierre del circuito eléctrico, generado por el impacto del martillo del ensayo SPT, fue exitosamente detectado por el sistema de adquisición. La instalación, tanto de los geófonos como del sistema de *trigger*, fue fácil y no afectó las faenas de sondaje. Se recomienda, sin embargo, evaluar el desarrollo de un *trigger* del tipo sonoro para evitar toda dependencia o interacción entre el trabajo de sondaje y la medición sísmica. El digitalizador usado tiene un rango de medida de $\pm 0.1V$ capaces de ser divididos en 2^{16} partes (resolución 16 bits). Para algunos ensayos SPT superficiales, se debió ampliar el rango de lectura para evitar la saturación de la señal y la errónea determinación del tiempo en que se produce el *peak* de la señal. Se utilizó un digitalizador con tasa de muestreo 20 kS/s por canal como recomienda Butcher *et al.* (2005).

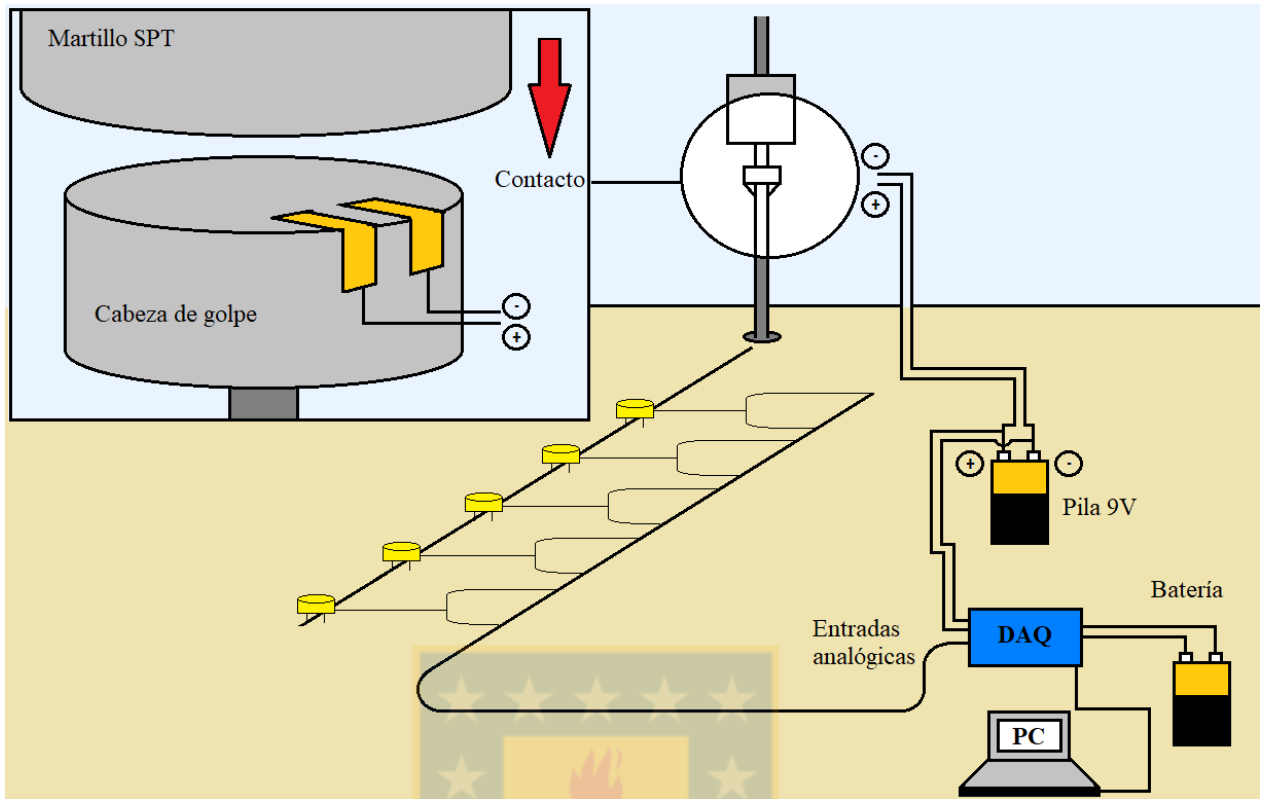


Figura 5.1 Configuración sistema de adquisición implementado

5.3 Conclusión

Si bien los trabajos pioneros de este ensayo datan desde hace más de 40 años (Ohta 1978), su aplicación, y por lo tanto la instrumentación requerida, no se ha masificado comercialmente. Los sismómetros multicanales usados en las mediciones superficiales hoy en día carecen de las características necesarias para la realización de este ensayo, como lo son una tasa de muestreo elevada y un sistema de *trigger* preciso. Es por esto, que fue necesario elaborar el sistema de medición descrito en este capítulo cuyo desempeño fue exitoso a la luz de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 6 ANÁLISIS BASADOS EN SEÑALES SINTÉTICAS

6.1 Modelación numérica

Para comprender el fenómeno de la propagación de ondas debido al golpe del ensayo SPT, se decidió modelar este con la ayuda del método *direct stiffness method* (Kausel y Roesset 1981). Este método calcula la respuesta ante la propagación de ondas en un medio elástico y horizontalmente estratificado, mediante una formulación de las ecuaciones de equilibrio dinámico en el dominio frecuencia - número de onda (f/k). Esta técnica permite –entre otras aplicaciones– obtener el desplazamiento en un punto dado de un medio elástico estratificado, ante la excitación provocada por una carga puntual y transiente como la que genera el golpe de martillo del ensayo SPT.

Las modelaciones fueron hechas con el objetivo de definir y/o corroborar la metodología del procesamiento e inversión de las señales obtenidas en terreno. Se realizaron dos conjuntos de simulaciones. En la primera se simuló ensayos SPT-*Uphole* superficiales (hasta 10 metros) en diversos perfiles (Tabla 3.1). En la segunda en cambio se simuló ensayos SPT-*Uphole* y perfiles más profundos y de estratificación más compleja (Tabla 6.1).

6.1.1 Modelo de la carga

La carga usada en la modelación del golpe SPT consistió en un pulso de *Ricker*, ecuación (6.1), aplicado con distintos periodos predominantes para estudiar la propagación de ondas con distintas longitudes de ondas

$$P_z(t) = \left[2 \left(\frac{\pi(t-t_s)}{t_d} \right)^2 - 1 \right] \exp \left[- \left(\frac{\pi(t-t_s)}{t_d} \right)^2 \right]. \quad (6.1)$$

En la ecuación (6.1), t_s parámetro tiempo de desfase –se usó 0.1 segundos en este trabajo– y t_d el periodo predominante del pulso. Este pulso tiene la ventaja de poder fácilmente definir la frecuencia principal del pulso, característica muy favorable en el análisis realizado.

Se simuló el ensayo SPT con golpes originados desde la profundidad de 1 hasta 30 metros de profundidad con espaciamiento de 1 metro. Se registró la velocidad de partícula en puntos de la superficie adyacente a la perforación entre 2 y 14 metros del sondaje “virtual”.

Hay que dejar en claro que el registro captado por los geófonos en el ensayo SPT es bastante más complejo que un pulso de *Ricker*. La señal captada en un ensayo SPT real contiene la información del frente de ondas generado por el golpe principal (y sus subsiguientes reflexiones) además de posibles segundos o terceros golpes debido al rebote de la masa en el ensayo (Schnaid 2009). Las modelaciones realizadas, sin embargo, indican que el método de reducción sería igual de válido si la forma funcional del pulso se puede considerar similar en ensayos SPT adyacentes, lo cual, en base a los registros observados de las mediciones en terreno, se cumple.

6.1.2 Modelo del suelo

Se usaron cuatro modelos de estratigrafía en donde cada estrato es un material visco-elástico y homogéneo con velocidad de propagación de ondas de corte de acuerdo a la Tabla 3.1 y Tabla 6.1, y con una velocidad de ondas P dada por un módulo de *Poisson* igual a 0.25. La razón de amortiguamiento material histerético usado fue del 2% para las ondas P y S.

Tabla 6.1 Perfiles Vs modelos de suelo (simulación 2)

Perfil Vs A			Perfil Vs B			Perfil Vs C			Perfil Vs D		
Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)	Estrato i		Vs (m/s)
Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)		Inicio (m)	Fin (m)	
0	-	150	0	5	150	0	4	150	0	2	100
			5	10	200	4	6	220	2	4	180
			10	15	250	6	8	260	4	6	220
			15	20	300	8	10	320	6	8	260
			20	-	350	10	12	360	8	10	320
						12	22	400	10	12	360
						22	24	520	12	18	400
						24	26	560	18	22	260
						26	28	600	22	24	520
						28	-	700	24	26	560
									26	28	600
									28	-	700

6.2 Resultados simulación

En la Figura 6.1 se presenta el resultado típico de las simulaciones. Se muestra el registro en el tiempo de la velocidad que experimenta una partícula situada en la superficie a 2 y 10 metros del “eje del sondaje” debido al golpe ubicado a distintas profundidades.

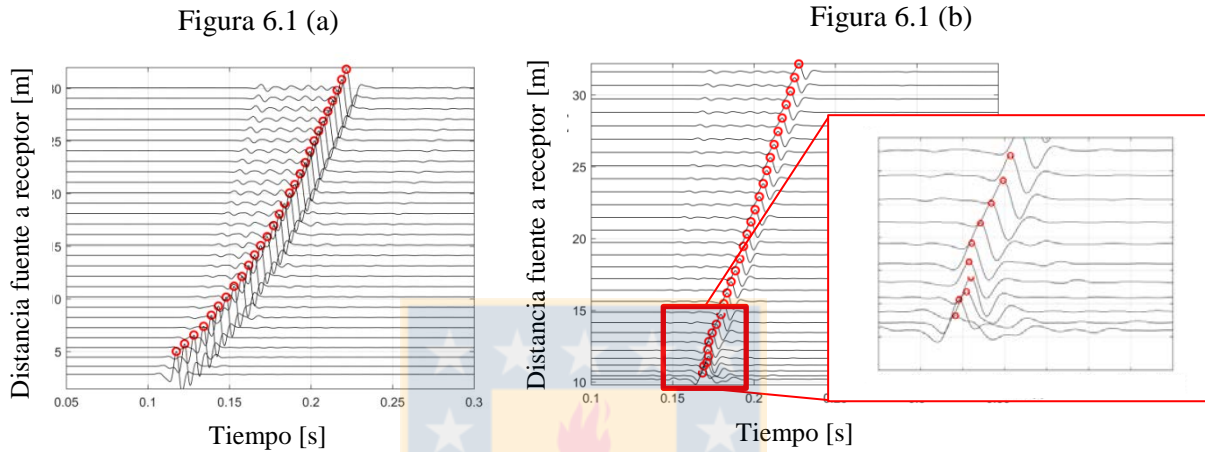


Figura 6.1 Señales (componente Q) obtenidas de la simulación numérica del ensayo *SPT-Uphole*, modelo Vs perfil B y pulso de *Ricker* de 100 Hz. (a) Receptor a 2 metros del eje del sondaje. (b) Receptor a 10 metros del eje del sondaje

En las señales se ubica en un círculo rojo el tiempo característico de la señal –pudo haber sido el mínimo de la señal de hecho ya que el pulso tiene una forma funcional constante–. Con dichos tiempos característicos se calculan los desfases que son el dato de entrada de los métodos del intervalo, intervalo modificado e intervalo modificado con inclusión de la ley de Snell. En el caso del método directo los mismos tiempos característicos sirven para ajustar la recta para el cálculo de la velocidad en cada estrato.

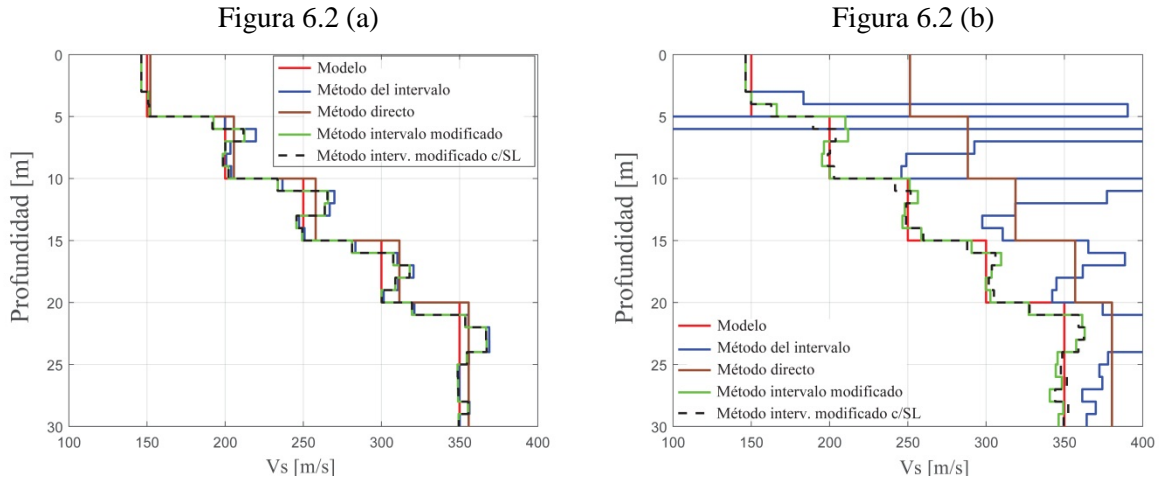


Figura 6.2 Perfiles Vs obtenidos de la simulación numérica y reducción del ensayo *SPT-Uphole*, modelo Vs perfil B y pulso de *Ricker* de 100 Hz. (a) Receptor a 2 metros del eje del sondaje. (b)

Receptor a 10 metros del eje del sondaje

6.3 Método de reducción

En cuanto al método de reducción más apropiado, el método intervalo modificado con y sin la ley de *Snell* resultaron ser los más cercanos a los perfiles modelados. El método del intervalo arrojó resultados similares al intervalo modificado para los casos en que el receptor estaba cercano al eje del sondaje (relativo a la profundidad de la fuente), es decir, cuando la ruta del frente de ondas de corte se aproximaba verticalmente al receptor. Se puede postular entonces que ambos métodos tienden a ser equivalentes a medida que la fuente se ubica a mayor profundidad y esto se presenta además en el ensayo *Downhole* (Figura 4.7).

El método directo o de la pendiente, al ser una extensión del método del intervalo, presenta la misma falencia que éste si la posición del receptor en el ensayo SPT-sísmico (o de la fuente en el ensayo *Downhole*) se aleja del sondaje.

Con respecto al uso de la ley de *Snell* se establece que pese a ser más sofisticado en su formulación, la inclusión de este efecto (al menos en los perfiles y frecuencias estudiadas), resultó en una apreciable mejora en la estimación del perfil Vs solo en aquellos perfiles con mayor gradiente de

velocidades (perfiles 3 y 4, Tabla 3.1) y en perfiles estimados con receptores a más de 8 metros del sondaje. Aun así, ambos métodos se presentan como los más exactos.

6.4 Efecto de receptores lejanos

Analizando los registros de las simulaciones numéricas de modelos de estratigrafía conocida (Perfiles 1 a 10, Tabla 3.1), se han identificado 3 fenómenos que generan errores en la inversión del perfil Vs. Estos fenómenos se producen en particular cuando el ensayo SPT se efectúa a profundidades bajas.

1. Efecto de la onda de *Rayleigh*.
2. Efecto de la zona del frente de ondas.
3. Efecto onda P reflejada de onda SV incidente y cambio de polaridad onda S (componente horizontal de los registros).

Para establecer en qué casos de posición fuente/receptor estos efectos inciden nocivamente en los resultados del perfil Vs, se realizaron comparaciones de las velocidades de ondas S modeladas e invertidas (método intervalo modificado con ley de *Snell*). En los casos que los valores de Vs estimados diferían por más de un 10% del valor modelado se consideraba que las señales se veían influidas por alguno de estos fenómenos.

6.4.1 Efecto de la onda de *Rayleigh*

En el primer caso, Figura 6.3, se puede ver que cuando el ensayo SPT se realiza a baja profundidad, el efecto de la onda que viaja por la superficie (onda de *Rayleigh*) predomina en el registro al superponerse al arribo de la onda S. Esta irrupción provoca el efecto nocivo de sobreestimar –con la metodología propuesta– la velocidad de ondas S en los primeros estratos. En las señales de ensayos SPT superficiales, la manifestación de la onda *Rayleigh* se produce casi al mismo tiempo con el ensayo SPT inferior ya que el punto de generación de la onda es el mismo. Los tiempos de

desfases son pequeños y el método estima por lo tanto velocidades mayores a las reales. Este efecto se aprecia en la Figura 6.3. Se muestra cómo, a medida que la carga transiente se ubica más superficialmente, predomina la onda superficial y se pierde la tendencia de la onda S.

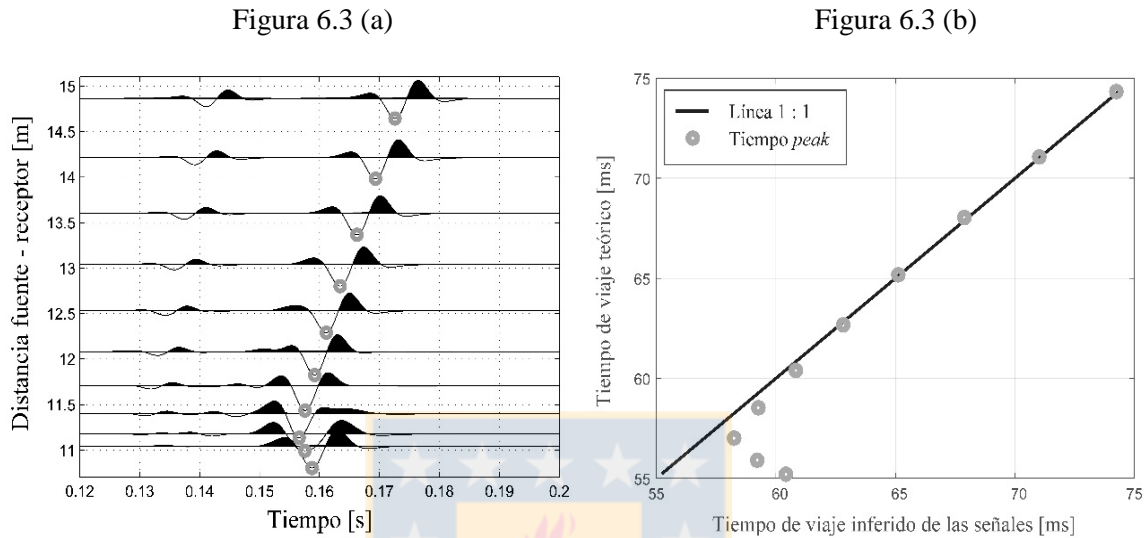


Figura 6.3 Efecto onda *Rayleigh*. (a) Registros componente vertical geófono virtual a 11 metros del sondaje. Modelo semiespacio velocidad de onda de corte de 300 [m/s]. Profundidades de la fuente de 1 a 10 metros. (b) Comparación de los tiempos de viajes simulados y teóricos. Cuando la fuente se ubica más superficialmente predomina en el registro la onda de *Rayleigh*

Mediante la simulación numérica del ensayo SPT-*Uphole*, se estableció que este fenómeno es dependiente de la longitud de onda involucrada. Para un pulso de *Ricker* con frecuencia central de 100 Hz y propagándose en medios homogéneos de distinta velocidad (y por lo tanto distinta longitud de onda), se pudo establecer una relación semiempírica, ecuación (6.2), para la profundidad mínima del ensayo SPT cuya señal puede ser usada confiablemente y evitar el efecto de la onda de *Rayleigh*

$$z \geq 0.6\lambda + 1.5, \tag{6.2}$$

en la cual z es la profundidad del ensayo SPT que genera señales útiles y libres del efecto de la onda de *Rayleigh* y λ es la longitud de ondas de corte definida como el valor de V_s dividido por la

frecuencia del pulso de *Ricker* (100 Hz en el caso de las simulaciones). El valor de λ varió de 1 a 4 metros en los análisis realizados.

6.4.2 Efecto zona del frente de ondas

Para una cierta profundidad de la fuente, un receptor superficial cercano al eje de la perforación capta el movimiento que genera la zona superior del frente de ondas, Figura 3.2 (b). Por el contrario, un receptor lejano al eje del sondaje captará el movimiento generado por una zona cercana al centro del frente de ondas.

Como la propagación del frente de ondas es un fenómeno que debe cumplir con compatibilidad de desplazamientos y tensiones, la velocidad con la que se propaga una zona del frente de ondas debe acoplarse a la velocidad de una zona adyacente de este. Esto hace que, en un medio con velocidad monótonamente creciente, la zona horizontalmente más alejada del frente de ondas viaja a una velocidad compatible con las velocidades de la zona inferior del frente de ondas en contacto con los suelos más rígidos.

Un ejemplo particular de esto último se genera cuando la fuente se ubica en la interfaz de dos estratos. En este caso la onda, en lugar de viajar solo por el estrato superior, –como lo supone el método de reducción– se propaga viajando con una velocidad asociada más al estrato inferior en la zona central del frente de ondas. Esto hace aparentar mayor velocidad que la real si el receptor capta la llegada del frente de ondas en la zona horizontalmente más alejada del frente de ondas. Este caso –según las simulaciones, Figura 6.5– se presenta principalmente en modelos con bruscos cambios de velocidades y en señales de receptores alejados del eje del sondaje.

Para establecer en qué casos este efecto interfiere en la correcta estimación del perfil V_s , se han hecho las simulaciones del ensayo SPT-sísmico en los modelos de la Tabla 3.1 y se ha obtenido la siguiente expresión (ajuste a datos de la Figura 6.4) para la profundidad de ensayos SPT cuya señal es útil para la inversión del perfil V_s

$$z \geq 0.44x_r + 2.06. \tag{6.3}$$

En la cual z es la profundidad del ensayo SPT que genera señales útiles y libres del efecto zona del frente de ondas y x_r la distancia horizontal entre el eje del sondaje y el receptor. Esta expresión es válida para una frecuencia central del pulso de 100 Hz propagándose en un perfil V_s entre 110 y 370 m/s (perfil V_s 4). La restricción en el uso de los ensayos SPT muy superficiales dada por la ecuación (6.3) debe considerarse como el caso más restrictivo (perfil con el mayor gradiente de velocidades analizado, perfil V_s 4) y pudiese ser demasiado conservador en perfiles más homogéneos que no sufren este efecto.

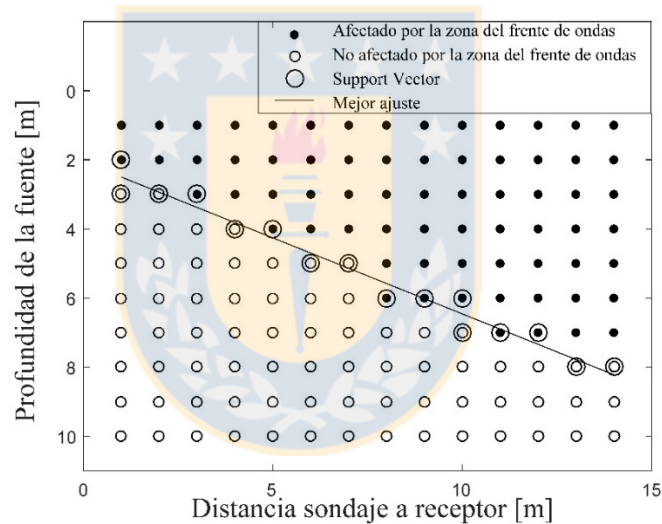


Figura 6.4 Efecto de la zona del frente de onda. Señales de receptores a una gran distancia del pozo en comparación con la profundidad de la fuente, son afectadas por la mayor velocidad de los estratos inferiores. Esto provoca una sobreestimación del valor de V_s en algún estrato en más del 10% del valor modelado

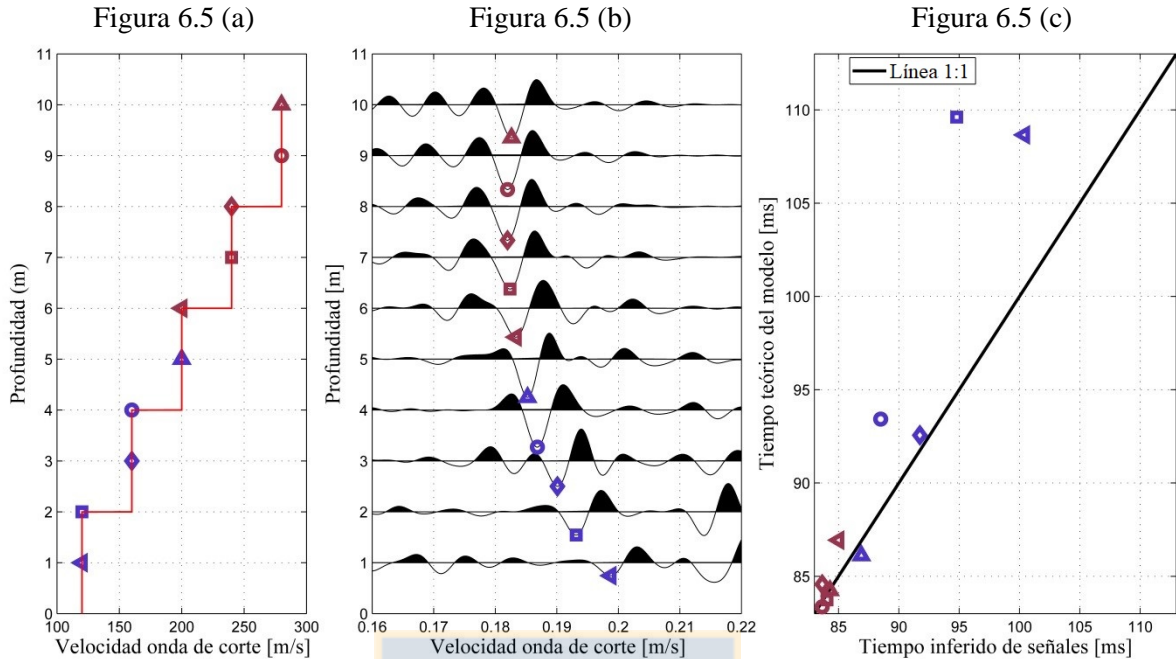


Figura 6.5 Efecto zona del frente de onda. (a) Perfil Vs 3. (b) Registros componente vertical geófono virtual a 10 metros del sondaje. (c) Comparación de los tiempos de viajes simulados y teóricos

6.4.3 Efecto onda P reflejada de onda SV incidente

En el tercer caso la errónea estimación de V_s se produce porque el frente de ondas de corte tiene poca energía relativa a otro tipo de onda en la componente horizontal de las señales superficiales. Para el caso de una carga vertical, súbita e interior, la componente horizontal del movimiento en superficie de la onda S, tiene una muy baja energía en la zona más distante horizontalmente del frente de ondas, Figura 6.6. Esto hace que predomine en las señales de los receptores lejanos la onda P reflejada de la onda S, Figura 6.6 y Figura 6.7

Para el caso de un medio homogéneo con un módulo de *Poisson* igual a 0.25 (como en todas las simulaciones), la onda P reflejada de la onda S se manifiesta en la superficie a una distancia mayor a $Z/\sqrt{2}$, siendo Z la profundidad de la fuente (Pekeris y Lipson 1957). En un gráfico de las señales *versus* la distancia fuente-receptor, Figura 6.7, se puede apreciar como en las señales generadas por

fuentes más superficiales irrumpe esta onda que llega después de la onda P, pero antes que la onda S. Se puede apreciar además que en un receptor ubicado a una distancia de x_r del eje del sondaje, las señales horizontales generadas por fuentes sobre la profundidad de $\sqrt{2}x_r$ muestran un cambio en la polaridad con respecto a las señales de fuentes bajo una profundidad de $\sqrt{2}x_r$, Figura 6.7. Esto hace que en la identificación de los puntos característicos de la señal haya que tener cuidado de no mezclar puntos con polaridad invertida en el cálculo de los desfases.

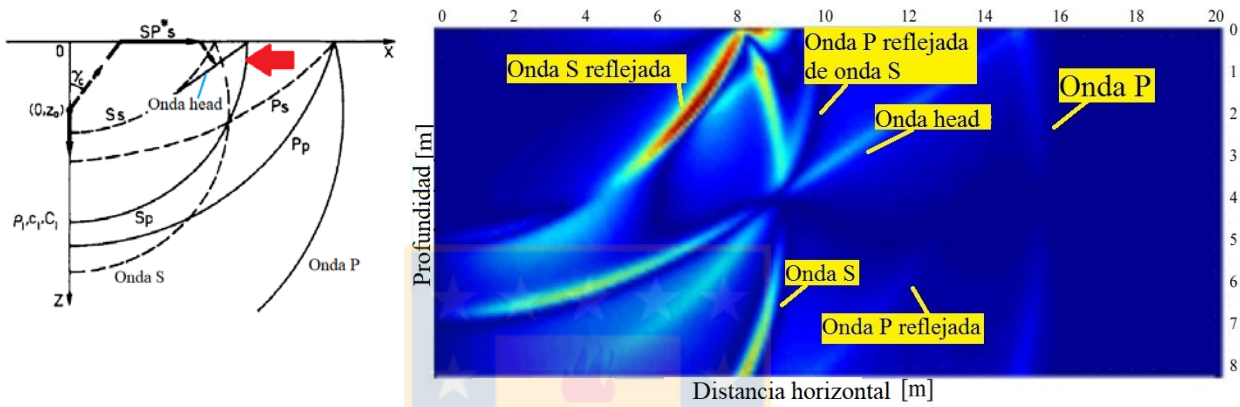


Figura 6.6 Tipo de ondas generadas por una fuente interior vertical. Las únicas ondas que se manifiestan en superficie son la onda P, S y la onda P reflejada de la onda S incidente

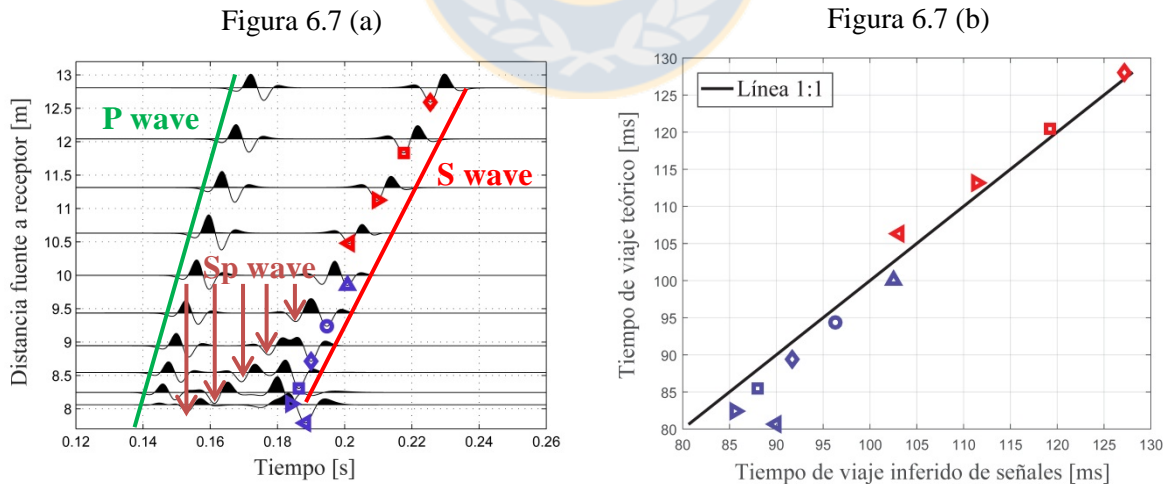


Figura 6.7 Efecto onda P reflejada de onda S. (a) Registros componente horizontal geófono virtual a 8 metros de la perforación. Modelo de velocidades de ondas de corte semiespacio de 100 m/s. Profundidades de la fuente de 1 a 10 metros. (b) Comparación de los tiempos de viajes simulados y teóricos

Cabe mencionar que en los casos 1 y 3 el error surge porque una onda, distinta a la onda S, irrumpe temporalmente en el momento que debe llegar la onda S al receptor y, por lo tanto, la manifestación del pulso principal se ve alterada en el registro captado por el sensor. La onda S se generó y está presente en el frente de ondas, solo que no se puede diferenciar. Esto último podría solucionarse con un análisis del tipo “*full waveform inversion*”, *approach* que está fuera del alcance de este estudio que considera solo el punto de máxima manifestación de la onda S y no la forma completa de la señal generada.

En el caso 2 en cambio, la onda se generó y viaja en la interfaz de dos estratos con una velocidad diferente –representativa del estrato inferior para ser precisos– de la que supone el modelo adoptado en el proceso de inversión.

6.5 Conclusiones

Con la modelación numérica efectuada se pudo evaluar los distintos métodos de reducción disponibles en la literatura. En la modelación numérica del ensayo el perfil V_s es conocido, por lo que se puede evaluar la capacidad predictiva de los métodos de reducción. Se estableció que el método del intervalo modificado fue el que mejor predecía el perfil V_s modelado, y que la inclusión de la ley de *Snell* no mejoraba significativamente esta estimación pese al mayor costo analítico de su implementación. Se identificaron, además, 3 aspectos que influyen en la determinación exacta del perfil V_s y la estrategia a adoptar para evitarlos.

CAPÍTULO 7 METODOLOGÍA ENSAYO

Según las simulaciones realizadas en el modelo simplificado del ensayo SPT-*Uphole* se concluye que el mejor método de inversión es el del intervalo modificado. El uso del efecto de la ley de *Snell* al menos en las longitudes de onda identificadas y las posiciones de los receptores estudiadas, no aporta una mejora considerable en la estimación (salvo casos extremos) pese al costo analítico adicional que requiere su implementación –se debe solucionar para cada estrato un sistema de ecuaciones no lineales–.

En resumen, el procedimiento para abordar la reducción de los datos del ensayo SPT-*Uphole* se puede traducir en el siguiente procedimiento:

1. Medición de las ondas generadas en el ensayo SPT con sensores dispuestos en la superficie. En este trabajo se ubicaron exitosamente 5 geófonos biaxiales entre 2.5 y 12 metros de distancia del sondaje y se capturaron ensayos SPT-*Uphole* a profundidades de 1 a 20 metros.
2. Cálculo del valor de V_s en los primeros metros usando las señales generadas por el primer ensayo SPT y captadas por los sensores receptores. El método del intervalo es suficiente dado que se espera homogeneidad en el primer estrato. Este valor puede ser el promedio de las distintas combinaciones de pares de receptores.
3. Con el valor de V_s inicial y el contenido de frecuencia del pulso observado, se tiene una idea de la longitud de onda con la que se propaga el frente de onda de corte. Usando la ecuación (6.3) se puede determinar la profundidad a partir de la cual las señales no se ven afectadas por el efecto de la onda *Rayleigh*.
4. Determinación del *set* de puntos característicos en un determinado geófono (horizontal o vertical) que muestren la tendencia de la onda S. La onda S usualmente es la que más claramente se manifiesta en los registros. Estos puntos característicos se obtienen del promedio de las numerosas señales generadas con los golpes del ensayo SPT. En este trabajo

se ocuparon las señales de los últimos 15 centímetros de cada ensayo SPT para que el punto de generación de la onda fuera similar.

5. Cálculo de los desfases de tiempos de la onda viajando por el suelo. Para esto es necesario considerar el tiempo extra que recorre la onda en la barra en ensayos SPT sucesivos.
6. Cálculo del perfil de ondas de corte con los desfases de los puntos característicos y el valor de la velocidad inicial. Estos puntos característicos pueden no ser identificados de forma evidente desde el primer ensayo SPT lo cual es un problema en el método del intervalo modificado. El perfil V_s en los estratos iniciales es un dato de entrada que requiere el método de reducción. En tal caso, la forma recomendada de abordar el procesamiento es calcular los perfiles V_s que sí cuenten con la información de los estratos iniciales, luego promediar todos los valores de V_s estrato por estrato y finalmente, con el perfil resultante y los restantes puntos característicos, continuar el procesamiento con los estratos más profundos.

7.1 Sobre las variaciones erráticas del perfil V_s

Las variaciones erráticas del valor de V_s que se presentan en la interpretación de los perfiles han sido tratadas regularmente como consecuencia de la variabilidad en las mediciones de los tiempos de arribo del frente de ondas (Bang *et al.* 2014). Se han propuesto algunas técnicas para sobrellevar este efecto, como agrupar convenientemente los tiempos de arribo de la onda y de esta manera suavizar el perfil obtenido (Gibbs *et al.* 2000, Bang *et al.* 2014). Sin embargo, se ha evidenciado que estas variaciones ficticias que manifiesta el perfil de velocidad de ondas de corte estimado, se producen aún en las simulaciones numéricas realizadas y se generan –a juicio del autor– por la naturaleza física del fenómeno de propagación de ondas. Por un lado, la longitud de onda involucrada es en general mayor o al menos comparable con la distancia con la cual se calcula el valor de V_s , valor L en la ecuación (4.2). Por otro lado, la interacción del frente de ondas con zonas adyacentes del perfil introduce una componente de error. Esto resulta en que la onda no viaja únicamente por un medio de una cierta rigidez como lo supone el método de reducción. Este efecto se ve acentuado a medida que la longitud de onda aumenta (Figura 7.1).

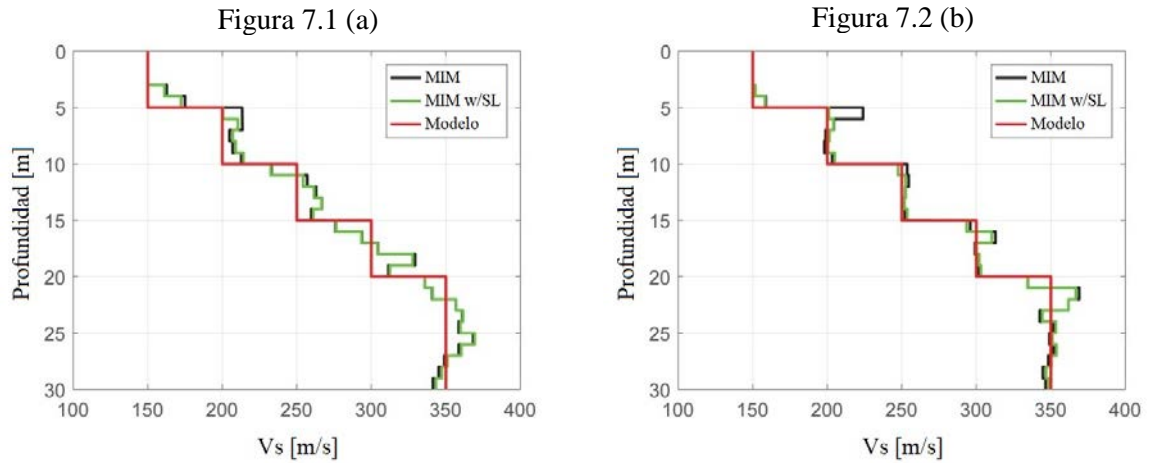
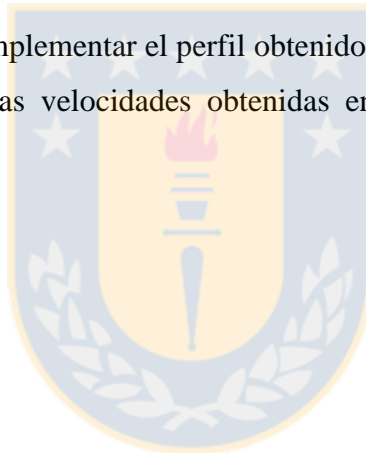


Figura 7.1 Efecto de la longitud de onda en la resolución del perfil Vs invertido. (a) Pulso de *Ricker* de 50Hz. (b) Pulso de *Ricker* de 150Hz. Perfil Vs B (Tabla 6.1)

Se recomienda por lo tanto complementar el perfil obtenido con la información del sondaje con el fin de agrupar y promediar las velocidades obtenidas en unidades que correspondan con la estratigrafía del sondaje.



CAPÍTULO 8 RESULTADOS MEDICIONES

8.1 Introducción

En esta sección se presentan los resultados del procesamiento de las señales obtenidas de la campaña de mediciones en terreno. La campaña consistió en la medición de las señales generadas en los ensayos SPT de 6 sondajes en 4 sitios. Las profundidades máximas de perforación por sondaje van desde 10 a 20 metros.

8.2 Casos de estudio

8.2.1 Sitio en Laraquete

Sitio compuesto en la totalidad de los metros explorados por una arena de grano fino, limosa, de origen aluvial, estructura homogénea y compacidad media a alta. Nivel freático a 1.5 metros de profundidad. Según el sistema USCS clasifica como SP-SM y SM. En este sitio se realizaron 2 sondajes de 20 metros.

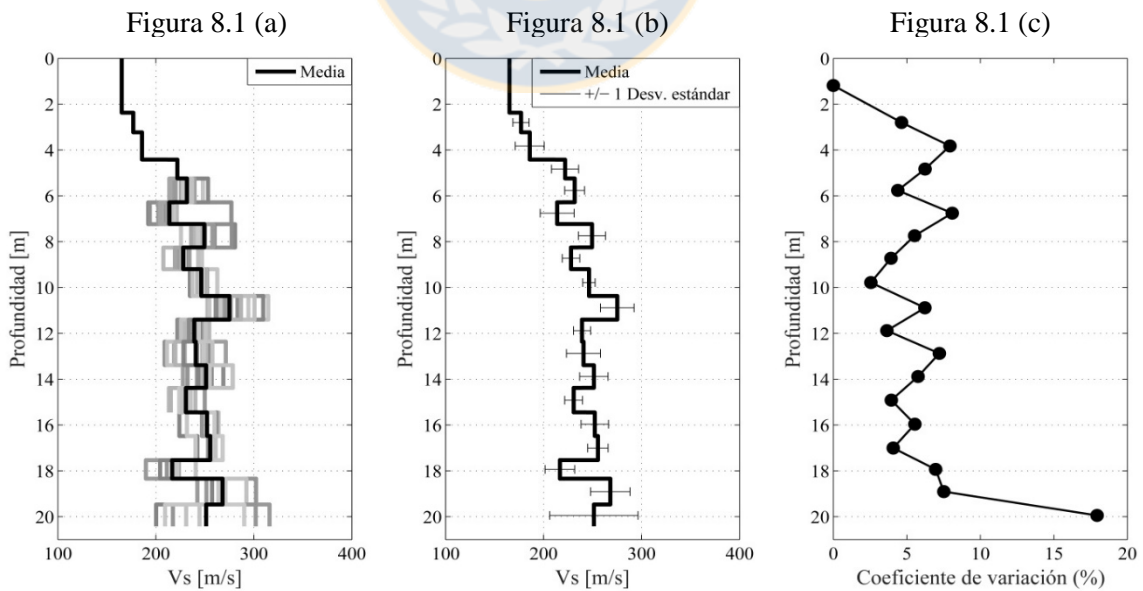


Figura 8.1 Sitio en Laraquete, Sondaje 1. (a) Perfiles Vs estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de Vs

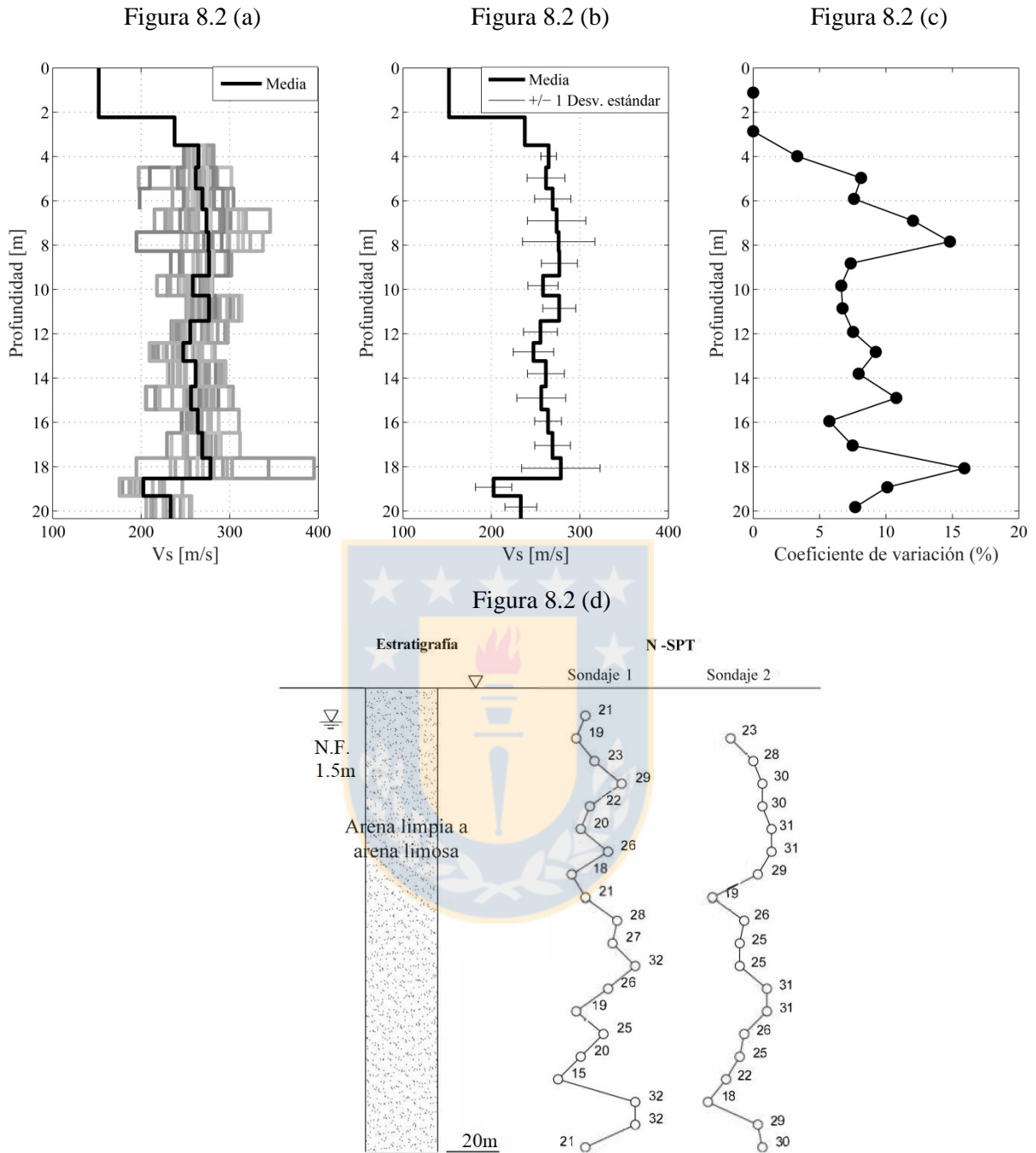


Figura 8.2 Sitio en Laraquete, Sondaje 2. (a) Perfiles Vs estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de Vs. (d) Estratigrafía sondajes 1 y 2 en sitio Laraquete

8.2.2 Sitio en Cosmito

Suelo compuesto en la zona superficial por una arena limosa de compacidad baja; seguido de una arcilla de consistencia baja evolucionando a alta; limos con incrustaciones de arcilla de alta compacidad y finalmente una arenisca de 80 [Kg/cm²] de resistencia a la compresión no confinada.

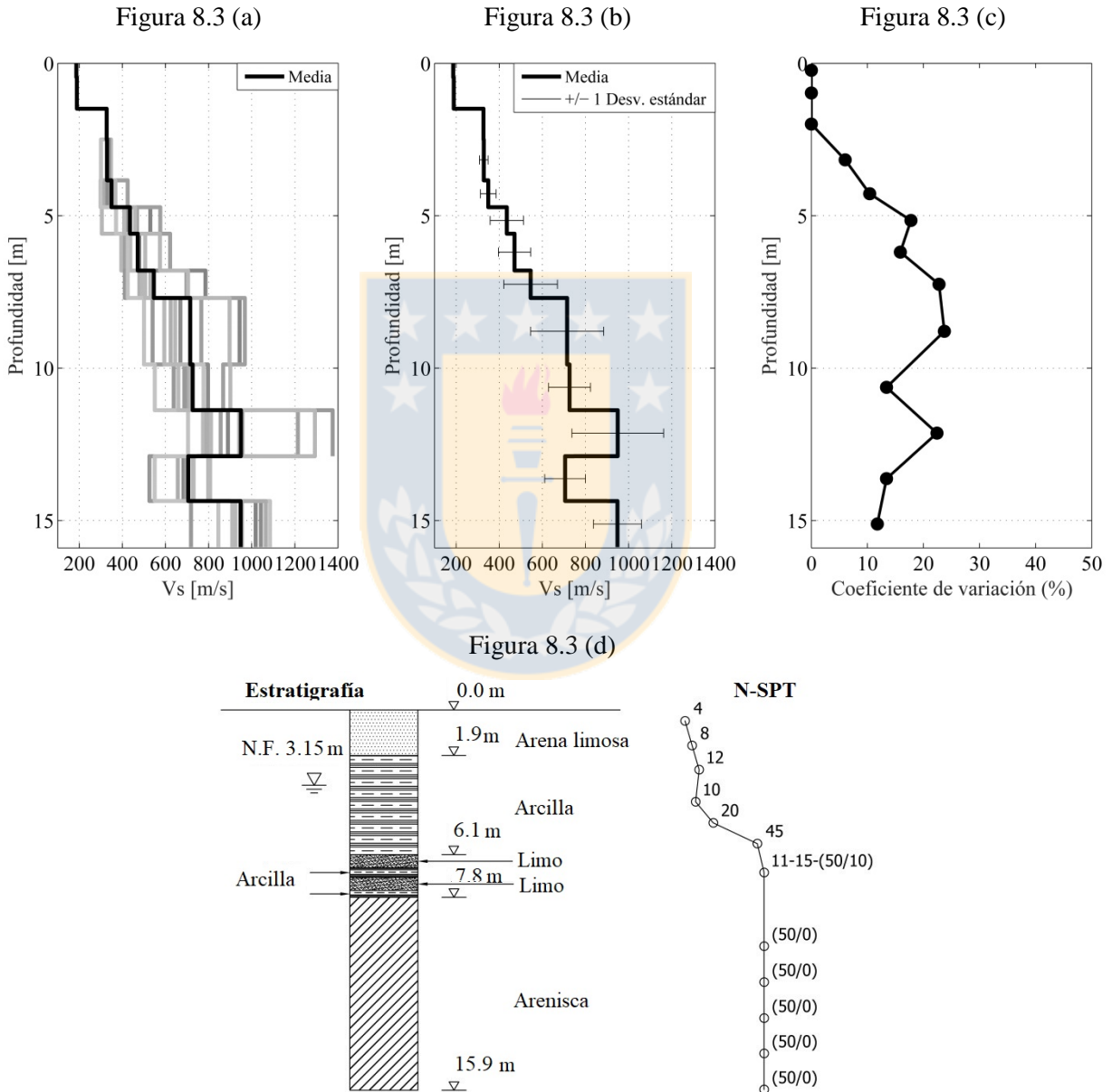


Figura 8.3 Sitio en Cosmito. (a) Perfiles V_s estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de V_s . (d) Estratigrafía

8.2.3 Sitio en Curanilahue

En este sitio se realizaron 2 sondajes el primero de 23 y el segundo de 10 metros de profundidad. La estratigrafía consistió en dos unidades: la primera, gravas con arenas, tamaño máximo visible 3 1/2", con una distribución aproximada de tamaños: 60% grava y 40% arena, plasticidad nula, partículas redondeadas, compacidad medianamente densa, cementación nula, origen fluvial-coluvial; la segunda una arena mal graduada, con una distribución aproximada de tamaños: 80% arenas y 20% finos, plasticidad nula, compacidad medianamente densa, cementación nula, origen aluvial.



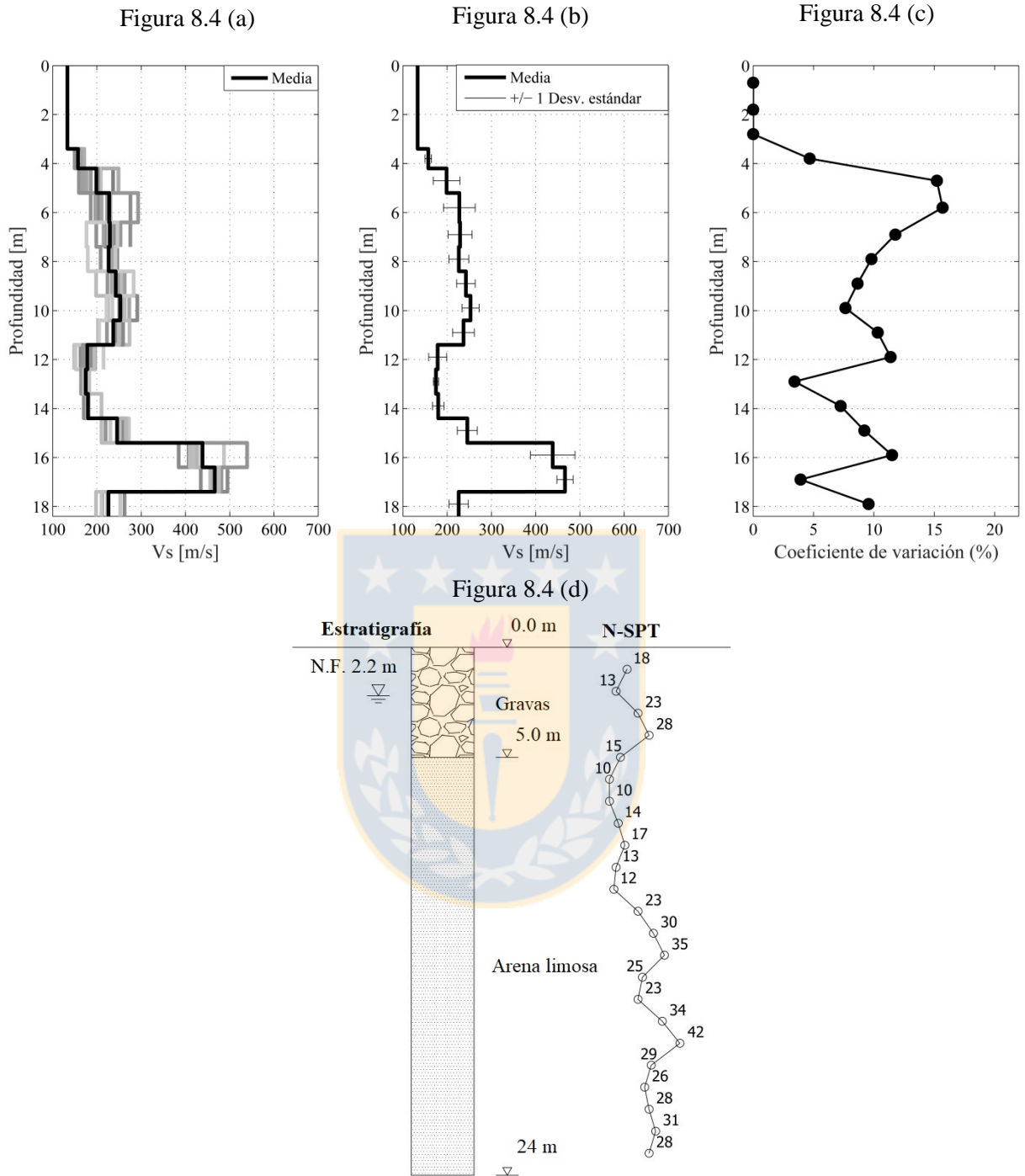


Figura 8.4 Sitio en Curanilahue, Sondaje 1. (a) Perfiles V_s estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de V_s . (d) Estratigrafía

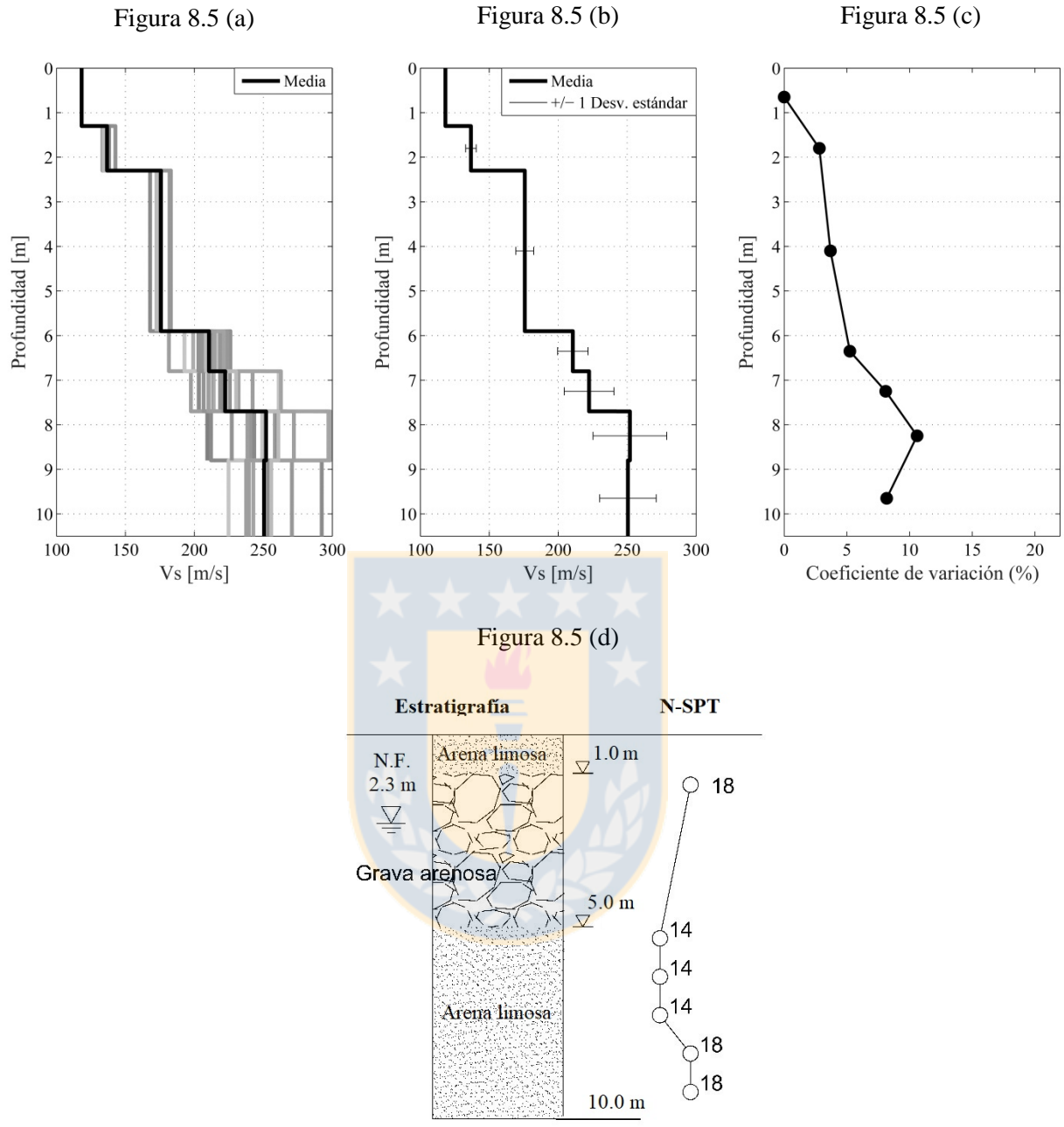


Figura 8.5 Sitio en Curanilahue, Sondaje 2. (a) Perfiles Vs estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de Vs. (d) Información de estratigrafía

8.2.4 Sitio en San Pedro de la Paz

El sitio en San Pedro de la Paz tiene 2 unidades consistente la primera en una arena limpia a algo limosa de grano fino a medio, humedad media a alta. Suelo de cementación nula y compactidad baja en superficie y que aumenta en profundidad. Contiene aproximadamente entre 1 a 7% de fino y carece de gravas. De acuerdo con el sistema USCS, clasifica como SP a SP-SM. La segunda unidad consiste en una arena limpia a limosa de grano fino a medio, humedad alta. Suelo de cementación nula y compactidad media a alta. Contiene aproximadamente entre 2 a 29% de fino y carece de gravas. De acuerdo con el sistema USCS, clasifica como SP, SW, SP-SM, SW-SM a SM.

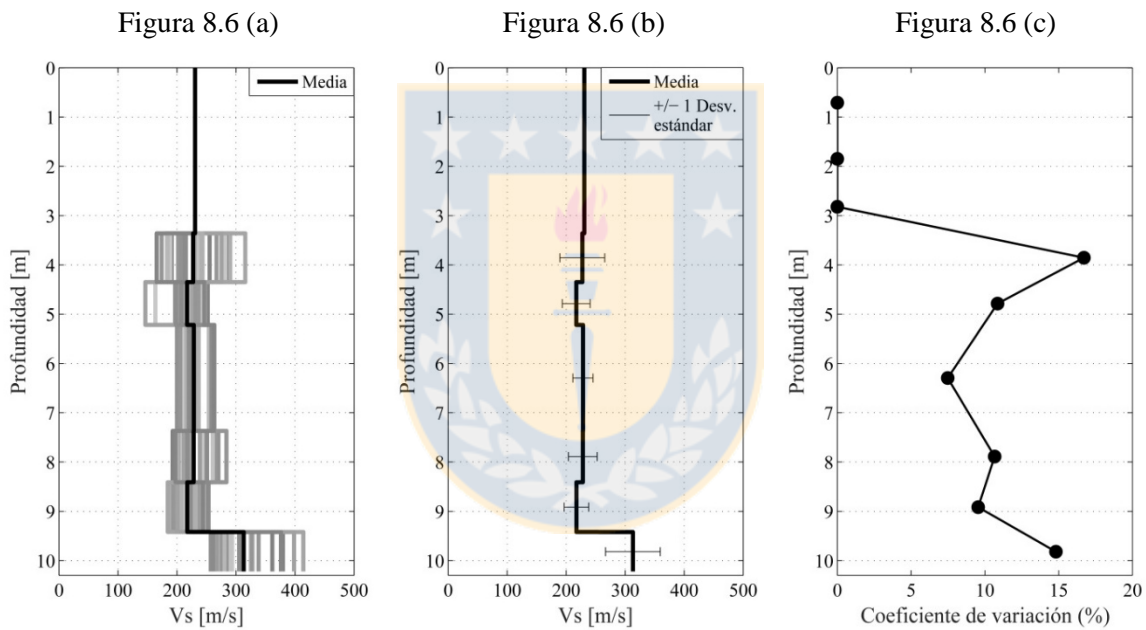


Figura 8.6 (d)

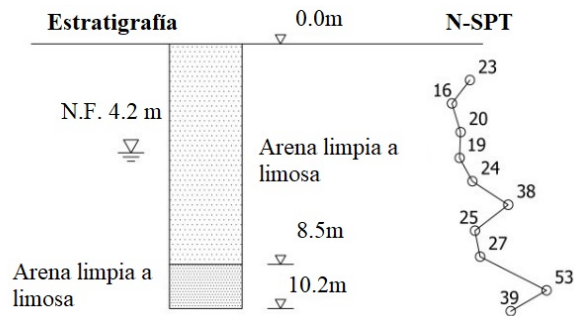


Figura 8.6 Sitio en San Pedro. (a) Perfiles Vs estimados. (b) Media y desviación estándar. (c) Coeficiente de variación valor de Vs. (d) Estratigrafía

8.3 Conclusiones y resultados

Dada la gran cantidad de perfiles Vs capaces de obtenerse con este ensayo, fue posible evaluar la media y desviación estándar muestral del conjunto de estimaciones por estrato (distancia entre ensayos SPT usualmente entre 1 y 1.5 metros). Se evaluó la variabilidad en la estimación del perfil Vs con la cuantificación del coeficiente de variación o la razón porcentual entre la desviación estándar muestral y la media de las estimaciones. Se obtuvo información de Vs de los 10 sensores dispuestos (5 horizontales y 5 verticales) y de los distintos puntos característicos en las señales que mostraron la tendencia de la onda S. De los 6 sondajes realizados se obtuvo un coeficiente de variación máximo en algún estrato del perfil entre 16 a 24 % y con una media entre 7 y 16%.

Se cuantificó también la variabilidad en la estimación de los tiempos característicos de las señales. Esta variabilidad puede deberse a imprecisiones en el sistema de *trigger* implementado, variación en la profundidad de generación de la onda o la alteración de la señal debido a el ruido ambiente o actividad antrópica cercana al sondaje. Estos tiempos característicos son la materia prima con la que se realiza la inversión o interpretación de las señales para obtener el perfil Vs. Es además la medición directa que se extrae de las señales y es la primera de las varias fuentes de incertidumbre asociadas al método de medición. De los 6 sondajes analizados se obtuvieron valores del coeficiente de variación promedio de entre 0.22 a 0.61% y con valores máximos que oscilan entre 0.8 y 3 %.

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES

Se valida el ensayo SPT-sísmico como un método más de medición directa del perfil Vs. Se evaluó la capacidad predictiva de los distintos métodos de reducción mediante la modelación y simulación del fenómeno. Se establece que el método del intervalo modificado con la inclusión de la ley de *Snell* el método que arroja resultados más cercanos a los modelados. Se concluye además que la física de una propagación de ondas de longitud similar al espesor de los estratos introduce un cierto nivel de error que se puede minimizar agrupando zonas del perfil y promediando los valores de Vs. Fueron identificados las fuentes de error en la interpretación de ensayos SPT superficiales y la estrategia a adoptar para evitar su efecto.

El método tiene la ventaja de ser altamente redundante en cuanto a la información recopilada en terreno. Por un lado, el gran número de golpes en cada ensayo SPT y por otro la posibilidad de disponer tantos geófonos como se quiera en superficie, hace de este ensayo confiable por la cantidad y variedad de los datos obtenidos. Se realizaron seis mediciones en cuatro sitios, compuestos principalmente por arenas, gravas y uno en particular con presencia de suelo fino con suelo cementado y los resultados arrojaron valores de Vs concordantes con el tipo de suelo y número de golpes además de valores de Vs consistentes a los calculados en el mismo ensayo, pero asociados a los restantes sensores. El ensayo SPT generó ondas con suficiente energía para ser captadas confiablemente en superficie hasta al menos 20 metros de profundidad en los ensayos realizados. Se evaluó la variabilidad intra-método aparente del ensayo SPT-*Uphole* y se obtuvo valores del coeficiente de variación en la estimación de Vs de un 7 y 16%.

Las futuras líneas de investigación recomendadas son:

- Utilizar el ensayo para estimar el amortiguamiento material del suelo
- Usar el ensayo para detectar heterogeneidades del subsuelo en base a tomografías
- Usar la forma funcional de la señal generada en el ensayo para estudiar el tipo de suelo muestreado con el ensayo SPT
- Cuantificar la energía del ensayo SPT en base a la amplitud de las señales captadas en superficie

REFERENCIAS

Akin, M.K., Kramer, S.L. y T. Topal (2016) Dynamic soil characterization and site response estimation for Erbaa, Tokat (Turkey) **Natural Hazards. 82(3).** 1833-1868

Akin, M.K., Kramer, S.L. y T. Topal (2011) Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey) **Engineering Geology. 119(1-2).** 1-17.

Andrus, R.D. y K.H. Stokoe (2000) Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 126(11).** 1015-1025.

Asten, M. y D. Boore (2005) Comparison of Shear-velocity Profiles of Unconsolidated Sediments Near the Coyote Borehole (CCOC) Measured with Fourteen Invasive and Non-invasive Methods Editorial. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 10(2).** 85-85.

ASTM (2008) **Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing.** ASTM International. West Conshohocken, PA.

Bang, E.-S., Cho S.-J. y D.-S. Kim (2014) Mean refracted ray path method for reliable downhole seismic data interpretations. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 65.** 214-223.

Bang, E.-S. y D.-S. Kim (2007) Evaluation of shear wave velocity profile using SPT based uphole method **Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 27(8).** 741-758.

Butcher, A.P., Campanella, R.G., Kaynia, A.M. y K.R. Massarsch (2005) Seismic cone downhole procedure to measure shear wave velocity - a guideline **ISSMGE TC10, Proceedings of the International Symposium on Geophysical Testing in Geotechnical Engineering.** Osaka. Japan. Mayo.

Chang, I. y G.-C. Cho (2010) A New Alternative for Estimation of Geotechnical Engineering Parameters in Reclaimed Clays by Using Shear Wave Velocity. **Geotechnical Testing Journal**. **33(3)**. 171-182.

Foti, S., Comina, C., Boiero, D. y L.V. Socco (2009) Non-uniqueness in surface-wave inversion and consequences on seismic site response analyses. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. **29(6)**. 982-993.

Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P.Y., Cornou, C., Cox, B.R., Dechamp, A., Ohrnberger, M., Perron, V., Sicilia, D., Teague, D. y C. Vergnault (2016) InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part II: Inter-comparison between surface-wave and borehole methods. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. **82(1)**. 241-254.

Gibbs, J.F., Tinsley, J.C., Boore, D.M. y W.B. Joyner (2000) **Borehole velocity measurements and geological conditions at thirteen sites in the Los Angeles, California region**. U.S. Dept. of the Interior. U.S. Geological Survey.

Gupta, I.N. (1971) A comparison of short-wave and long-wave velocities in layered media. **Pure and Applied Geophysics**. **98(1)**. 40-48.

Kausel, E. y J.M. Roësset (1981) Stiffness matrices for layered soils. **Bulletin of the Seismological Society of America**. **71(6)**. 1743-1761.

Kim, D., Bang, E. y W. Kim (2004) Evaluation of Various Downhole Data Reduction Methods for Obtaining Reliable Vs Profiles. **Geotechnical Testing Journal**. **27(6)**. 585-597.

Kim, S. y J.P. Stewart (2003) Kinematic soil-structure interaction from strong motion recordings. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. **129(4)**. 323-335.

Klein, K. y J.C. Santamarina (2005) Soft sediments: Wave-based characterization. **International Journal of Geomechanics (ASCE)**. **5(2)**. 147-157.

Kramer, S. L. (1996) **Geotechnical Earthquake Engineering**. Prentice Hall. Upper Saddle River.

Luke, B., Calderòn-Maciàs, C., Stone, R.C. y M. Huynh (2003) Non-uniqueness in inversion of seismic surface-wave data. **Proceedings on the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**. Tulsa. Oklahoma. Junio.

Oh, T-M., Bang, E-S., Cho, G.C. y E.S. Park (2017) Estimation of Undrained Shear Strength for Saturated Clay Using Shear Wave Velocity **Marine Georesources & Geotechnology**. **35(2)**. 236-244.

Ohta, Y. y N. Goto (1978) Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes. **Earthquake engineering and structural dynamics**. **6(2)**. 167-187.

Ohta, Y., Goto, N., Kagami, H. y K. Shiono (1978) Shear Wave Velocity Measurement During a Standard Penetration Test. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**. **6(1)**. 43-50.

Pedrini, R.A.A. y H.L. Giacheti (2013) The seismic SPT to determine the maximum shear modulus. **Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4 - Proceedings of the 4th International Conference on Site Characterization 4**. Pernambuco. Brasil. Septiembre.

Pekeris, Ch. L. y H. Lipson (1957) Motion of the Surface of a Uniform Elastic Half-Space Produced by a Buried Pulse. **The Journal of the Acoustical Society of America**. **29(11)**. 1233.

Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. y A. Rice (1986) Seismic CPT to Measure In Situ Shear Wave Velocity. **Journal of Geotechnical Engineering**. **112(8)**. 791-803.

Schnaid, F. (2009). **In Situ Testing in Geomechanics**. Taylor & Francis. New York.

Stokoe, K.H., Joh, S-H. y R.D. Woods (2004) Some Contributions of In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems. **International Conference on Site Characterization (ISC-2)**. Porto. Portugal. Septiembre.

Zhang, S.X. y L.S. Chan (2003) Possible effects of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion. **Journal of Applied Geophysics**. **53(1)**. 17-29.

