

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE SITIO DEL SUELO DEL
EDIFICIO 350

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO
DE INGENIERO CIVIL

LEONARDO GALLO RIVERA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
ABRIL 2017

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE SITIO DEL SUELO DEL
EDIFICIO 350

ESTUDIANTE:
LEONARDO GALLO RIVERA

CODIRECTORES:
ALEJANDRO CRUZ ESCOBAR
PETER THOMSON

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
ABRIL 2017

NOTA DE ACEPTACIÓN:

El presente trabajo de grado fue aprobado por el director del Programa Académico, los jurados y los directores de investigación.

MANOLO GALVÁN CEBALLOS,
Director de Programa Académico de
Pregrado en Ingeniería Civil.

ALEJANDRO CRUZ ESCOBAR,
Codirector de Investigación.

PETER THOMSON,
Codirector de Investigación

JOHANNIO MARULANDA CASAS,
Jurado

JUAN SALVADOR MANTILLA LÓPEZ,
Jurado

Ciudad y Fecha

Resumen

Procesos tales como la consolidación o licuación producidos por sismos y/o construcciones de gran escala pueden provocar variaciones en las propiedades físicas y geomorfológicas de los depósitos de suelo a través del tiempo, afectando su respuesta dinámica y la de las estructuras sobre él. Por esto, se implementó un sistema de instrumentación en el suelo del edificio 350 de la Universidad del Valle (Cali - Colombia), utilizando sismómetros tipo triaxial de superficie y profundidad. Este sistema fue validado a través de ensayos controlados en laboratorio, para luego ser instalado y realizar mediciones dinámicas de vibraciones ambientales durante diez horas. A través de los métodos de estimación de efectos de sitio *Standard Spectral Ratio* – SSR y *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* – HVSR, se logró identificar la frecuencia fundamental del suelo del edificio 350, comprendida entre 0.92 Hz y 1.80 Hz (según cada método), valores consistentes con la frecuencia fundamental esperada para esta zona según la microzonificación sísmica de la ciudad. De igual manera, se identifica el factor de amplificación asociado a cada frecuencia fundamental siendo diferente para cada método de análisis.

Agradecimientos

A mis hermanos Sebastián y David, por motivarme a ser un buen ejemplo a seguir.

A mis padres, por inculcarme el gusto al aprendizaje y encaminarme a estudiar ingeniería.

A mis maestros, tutores y jefes, por guiarme en mi formación investigativa y profesional.

Y a todos mis compañeros del Grupo de Investigación G – 7.

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo brindado por el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle y con ayuda del proyecto de investigación “Evaluación de Métodos Convencionales para la Determinación y Mitigación del Potencial de Licuación de Suelos”, C.I. 2903 en la convocatoria interna 710 – 2015.

Contenido

Numero	Pagina
Resumen.....	iv
Agradecimientos	v
Contenido.....	vi
Listado de Tablas	viii
Listado de Figuras.....	ix
Capítulo 1. Problema de Estudio	1
1.1. Descripción	1
1.2. Formulación	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Justificación	4
Capítulo 2. Marco Conceptual	7
2.1. Uso de Registros Sísmicos para Estimación de los Efectos de Sitio	7
2.2. Uso de Vibraciones Ambientales para Estimación de los Efectos de Sitio ...	11
2.3. Algoritmo de Detección de Sismos STA/LTA	14
Capítulo 3. Antecedentes y Estado del Arte	18
3.1. Sistemas de Instrumentación.....	18
3.2. Métodos de Estimación de Efectos de Sitio.....	22
Capítulo 4. Marco Metodológico	25
4.1. Zona de Estudio y Perforación.....	26
4.2. Soporte Físico	29
4.3. Software de Adquisición.....	31
4.4. Pruebas de Validación y Verificación.....	32

4.5.	Montaje Experimental.....	33
4.6.	Procesamiento de Información.....	34
Capítulo 5.	Software SISMOS.....	35
5.1.	Descripción del Funcionamiento	35
5.2.	Interfaz Gráfica y Parámetros Iniciales.....	39
Capítulo 6.	Validación y Verificación del Sistema.....	41
6.1.	Prueba de Adquisición y Remuestreo en Tiempo Real.....	41
6.2.	Ensayo de Calibración y Verificación STA/LTA en Tiempo Real	43
6.3.	Verificación del Funcionamiento del Sistema en Laboratorio.....	47
6.4.	Análisis de Tolerancia del Sistema ante Eventos Sísmicos	50
Capítulo 7.	Montaje Experimental y Análisis de Resultados	52
7.1.	Pre-procesamiento de Registros.....	53
7.2.	Procesamiento de Datos y Resultados	58
7.3.	Análisis de Resultados	73
Capítulo 8.	Conclusiones	76
Bibliografía	80
ANEXOS	85

Listado de Tablas

Numero	Pagina
Tabla 1. Sismos señal de entrada para calibración STA/LTA en tiempo real.	43
Tabla 2. Parámetros propuestos por Trnkoczy (1999; 2002) vs. Parámetros calibrados...	44
Tabla 3. Iniciación y finalización según STA/LTA y duración significativa.	46
Tabla 4. Resultados de la comparación entre sismómetros.	50
Tabla 5. Sismos empleados para los métodos HVSR y SSR.	58
Tabla 6. Resumen de frecuencias fundamentales y factor de amplificación identificados con HVSR aplicado a vibraciones ambientales. Los datos subrayados corresponden a datos no representativos.	59
Tabla 7. Resumen de frecuencias fundamentales y factor de amplificación identificados con SSR aplicado a vibraciones ambientales.	63
Tabla 8. Resumen de frecuencias fundamentales y factores de amplificación identificados con HVSR aplicado a registros sísmicos.	67
Tabla 9. Resumen de frecuencias fundamentales y factores de amplificación identificados con SSR aplicado a registros sísmicos.	71
Tabla 10. Resumen de resultados obtenidos con SSR y HVSR aplicados a registros sísmicos y vibraciones ambientales.	75

Listado de Figuras

Numero	Pagina
Figura 1. Aplicación de STA/LTA. (a) Sismo de Pizarro, 2004. (b) Iniciación del evento sísmico. (c) Finalización del evento sísmico.....	15
Figura 2. Mapa conceptual de la metodología empleada para la implementación del sistema de instrumentación del Edificio 350, Universidad del Valle.	25
Figura 3. Campus Universitario Meléndez de la Universidad del Valle, ubicación de perforación de estudio y estación RAC02..	27
Figura 4. Perforación de estudio, Campus Universitario Meléndez.	28
Figura 5. Equipos utilizados para el sistema de instrumentación.	30
Figura 6. Unidad de ensayos móvil instalada en la perforación de estudio.	31
Figura 7. Diagrama de flujo del objeto Listener – Segundo Plano.	37
Figura 8. Diagrama de flujo de información de SISMOS.	38
Figura 9. Software SISMOS (Sistema de Monitoreo Sísmico).	40
Figura 10. De arriba hacia abajo: Señal original simulada; Señal original remuestreada; Señal adquirida por el algoritmo.	42
Figura 11. Señal de entrada para calibración STA/LTA en tiempo real.....	44
Figura 12. Parámetros propuestos por Trnkoczy (1999; 2002) vs. parámetros calibrados.	45
Figura 13. Sismo El Cairo (2004): Inicio y Finalización por duración significativa y STA/LTA.	47
Figura 14. Configuraciones empleadas para verificación de funcionamiento del sistema.....	48

Figura 15. Umbral de tolerancia y velocidad maxima de cada sismo analizado.	51
Figura 16. Registros en Tiempo 12:00 M.d. – 1:00 p.m. y 12:00 M.n. – 1:00 a.m.	54
Figura 17. Espectros de densidad de potencia promedio con vibraciones ambientales, 12:00 M.d. – 5:00 p.m. La hora sobre cada grafica corresponde a la hora inicial del registro.....	55
Figura 18. Espectros de densidad de potencia promedio con vibraciones ambientales, 8:00 p.m. – 1:00 a.m. La hora sobre cada grafica corresponde a la hora inicial del registro	56
Figura 19. Funciones de transferencia promedio, HVSR con vibraciones ambientales, 12:00 M.d. – 5:00 p.m. . La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.	60
Figura 20. Funciones de transferencia promedio, HVSR con vibraciones ambientales, 8:00 p.m. – 1:00 a.m. La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.	61
Figura 21. Funciones de transferencia promedio, SSR con vibraciones ambientales, 12:00 M.d. – 5:00 p.m. La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.	64
Figura 22. Funciones de transferencia promedio, SSR con vibraciones ambientales, 8:00 p.m. – 1:00 a.m. La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.	65
Figura 23. Funciones de transferencia con método HVSR. Sismo Sorata, 2004.....	68
Figura 24. Funciones de transferencia con método HVSR. Sismo Toro, 2005.....	68
Figura 25. Funciones de transferencia con método HVSR. Sismo Calima, 2006.	69
Figura 26. Funciones de transferencia, SSR con registro sísmico (Sorata, 2004).	71
Figura 27. Funciones de transferencia, SSR con registro sísmico (Toro, 2005).	72
Figura 28. Funciones de transferencia, SSR con registro sísmico (Calima, 2006).....	72

Capítulo 1.

Problema de Estudio

1.1. Descripción

Durante la ocurrencia de un evento sísmico la señal medida sobre un depósito de suelo presenta diferencias en duración, amplitud y/o contenido frecuencial respecto a la señal medida en roca, debido al cambio que sufren las ondas sísmicas al atravesar los distintos estratos suelo (Bard, 1999; Lermo & Chavéz-García, 1993). Estos cambios se conocen como efectos de sitio y están intrínsecamente asociados al tipo de sismo, topografía, geomorfología y propiedades mecánicas del depósito de suelo donde es medida la onda sísmica (Kramer, 1996; Towhata, 2008).

Para el estudio de los efectos de sitio debe tenerse en cuenta la no linealidad de los suelos, cuyas propiedades presentan modificaciones a través del tiempo que pueden generar cambios en la respuesta sísmica (Sierra & Botero, 2014) debido a la exposición a distintos tipos de solicitaciones, ya sean estáticas como la consolidación de las arcillas causada por las estructuras que soportan, o dinámicas como la densificación de las arenas a causa de los sismos.

Los efectos de sitio y sus cambios a través del tiempo, pueden ser descritos por las propiedades dinámicas presentes en la función de transferencia del suelo (Chávez-García & Montalva, 2014) para distintos periodos. Convencionalmente los efectos de sitio se estiman con el método *Standard Spectral Ratio – SSR* (Borcherdt, 1970), el cual realiza el cociente espectral (para un mismo sismo) entre el registro medido en superficie y el registro medido en roca, lo que exige tener al menos dos sensores cercanos y de medición simultánea. Adicionalmente, existe el método *Horizontal to Vertical Spectral Ratio – HVSR* (Langston, 1979; Lermo & Chávez-García, 1994), el cual propone la realización del cociente espectral entre las componentes horizontales y vertical del registro sísmico medido en superficie, reduciendo la cantidad de equipos de registro a un único sensor triaxial. Estos dos métodos requieren la ocurrencia de un evento sísmico para poder estimar los efectos de sitio por lo que diversos autores han estudiado su aplicabilidad usando registros de vibraciones ambientales (Cocco, et al., 2001; Kudo, 1995; Margheriti, et al., 2000; Nakamura, 1989; 2000; Satoh, et al., 1995; Steidl, et al., 1996), determinando que para ciertas condiciones del ensayo es posible identificar la frecuencia fundamental del suelo a pesar de presentar gran incertidumbre en su factor de amplificación.

Por lo anterior, los sistemas de instrumentación utilizados para la estimación de los efectos de sitio requieren de un funcionamiento continuo, además de la posibilidad de diferenciar entre vibraciones ambientales y eventos sísmicos evitando así el almacenamiento de información excesiva (Chávez-García & Montalva, 2014; Trnkoczy, 1999; Trnkoczy, et al., 2012). Por esto, se han desarrollado algoritmos computacionales que permiten identificar la iniciación y finalización de los eventos sísmicos y así poder almacenar solo la información relevante.

El Grupo de Investigación en Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) implementó un sistema de monitoreo estructural permanente en el edificio 350 de la Universidad del Valle utilizado para estudiar su comportamiento dinámico (Jiménez-Roa, et al., 2016). No obstante, este sistema de monitoreo está limitado únicamente al estudio de la superestructura, prescindiendo de información relevante sobre las posibles modificaciones que sufren las ondas sísmicas antes de ingresar a la edificación.

Por lo anterior y dada la incidencia que tiene la respuesta sísmica de un suelo en el comportamiento estructural de una edificación, implementar un sistema de instrumentación del suelo en conjunto con el sistema de monitoreo estructural del edificio 350 de la Universidad del Valle podría ser de gran utilidad para investigaciones relacionadas con la ingeniería sísmica, tales como estudiar la interacción suelo - estructura y suministrar información para construir y ajustar diferentes modelos analíticos tanto de respuesta del suelo como de respuesta estructural, entre otros. Así mismo, monitorear de manera continua las vibraciones del depósito de suelo del edificio 350 de la Universidad del Valle en superficie y en profundidad, permitiría analizar mediante diferentes métodos los cambios en los efectos de sitio debido a la variación de las propiedades mecánicas del suelo a través del tiempo.

Surge el interrogante de conocer la eficacia de un sistema que permita estudiar los efectos de sitio del suelo subyacente al edificio 350 de la Universidad del Valle e identificar si existe una variación considerable en estos a través del tiempo.

1.2. Formulación

¿Cuál es la eficacia de un sistema que permita el estudio de los efectos de sitio a través del tiempo de los depósitos de suelo del edificio 350 de la Universidad del Valle?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Implementar un sistema que permita el estudio de los efectos de sitio a través del tiempo de los depósitos de suelo del edificio 350 de la Universidad del Valle.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una herramienta computacional que permita registrar, procesar y almacenar vibraciones en tiempo real mediante un sismómetro en superficie y un sismómetro en profundidad.
- Implementar un algoritmo que permita detectar eventos sísmicos en tiempo real.
- Validar el sistema de instrumentación y el algoritmo de detección de sismos con ensayos controlados en laboratorio.
- Analizar la variación en el tiempo de los efectos de sitio en el suelo del edificio 350 a partir de métodos que utilizan vibraciones ambientales.

1.4. Justificación

Este estudio toma relevancia puesto que, históricamente, las mayores catástrofes relacionadas con eventos sísmicos están asociadas a los efectos de sitio, ya sea por las grandes deformaciones producidas en el depósito de suelo o por la resonancia producida al coincidir la frecuencia propia de una estructura con la frecuencia fundamental del estrato de suelo que la soporta (Kramer, 1996; Towhata, 2008). Ejemplo de esto fue el sismo

ocurrido en México en 1985, que afectó principalmente a Ciudad de México debido al comportamiento dinámico del depósito de arcillas sobre el que yace la ciudad, que amplificó considerablemente las ondas sísmicas, generando grandes deformaciones (Mendoza & Auvinet, 1988), y el sismo ocurrido en Colombia en 1999, que afectó principalmente la ciudad de Armenia, donde predominó el colapso de edificaciones de dos y tres pisos cuyas frecuencias fundamentales coincidieron con el contenido frecuencial del sismo (Sanchez-Silva, et al., 2000).

Para el estudio del comportamiento dinámico del suelo, en Santiago de Cali (Colombia) se cuenta con una red de acelerógrafos que cumple con las especificaciones técnicas necesarias para que su estudio de microzonificación sísmica fuese aprobado como decreto (INGEOMINAS & DAGMA, 2005). A pesar de esto, esta red no cuenta con sensores de vibraciones a profundidad, tal vez por su alto costo de montaje, mantenimiento y supervisión, por lo que se deben utilizar para los estudios de efectos de sitio mediante el método *SSR* registros en afloramientos rocosos, los cuales pueden generar resultados poco representativos por efectos erosivos (Sato, et al., 1995; Steidl, et al., 1996; Margheriti, et al., 2000). Adicionalmente, aunque los sensores de esta red son apropiados para el registro de eventos sísmicos, resultan inadecuados para el registro de vibraciones ambientales (dada su calibración de baja ganancia), limitando el número de métodos para estimar y estudiar los efectos de sitio en la ciudad (Bard & SESAME-Team, 2005).

De igual manera, aunque la microzonificación sísmica de Santiago de Cali aporta parámetros para el diseño estructural, se ignora el hecho de que estos pueden ser variantes en el tiempo debido al comportamiento no lineal del suelo. Contar con un sistema de instrumentación con sensores en superficie y en profundidad se hace relevante para la ciudad, ya que permitiría obtener datos con los que se evalúan y ajustan estos parámetros en función de las modificaciones que podría presentar el comportamiento del suelo a través del tiempo.

Implementar un sistema de instrumentación con sensores en superficie y en profundidad en Santiago de Cali, toma mayor importancia si se usa para estudiar el comportamiento dinámico del suelo que soporta una estructura de uso público, como lo es el campus universitario Meléndez de la Universidad del Valle, complejo educativo de aproximadamente 1 km², con 13.640 estudiantes matriculados y 642 docentes (Universidad del Valle, 2015); ubicado en una zona de alta amenaza sísmica según el Reglamento Colombiano Sismoresistente NSR-10 (2010) y que al momento de su construcción no contaba con estudios que contemplaran los efectos de sitio de la zona.

Dentro del campus universitario Meléndez, el edificio 350 de la Escuela Ingeniería Civil y Geomática cuenta con un sistema de monitoreo estructural instalado y administrado por el Grupo de Investigación en Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7), el cual se compone por seis acelerómetros de movimiento fuerte que miden continuamente las vibraciones en la cubierta y en la base (Jiménez-Roa, et al., 2016), instalar un sistema de instrumentación en este punto para el monitoreo de vibraciones del suelo en superficie y en profundidad permitiría estudiar el depósito de suelos del campus universitario, complementar el sistema con el que cuenta el edificio 350, estudiar la influencia del suelo en la respuesta sísmica de la estructura y aportar al estado del arte del estudio de los efectos de sitio a través del tiempo.

Capítulo 2.

Marco Conceptual

2.1. Uso de Registros Sísmicos para Estimación de los Efectos de Sitio

Los efectos de sitio convencionalmente son evaluados empleando registros sísmicos, puesto que estos contienen información de las modificaciones de las ondas al atravesar los distintos estratos de suelo de la zona de estudio (Chávez-García & Montalva, 2014). Los métodos más empleados para la estimación de los efectos de sitio a partir de registros sísmicos son *Standard Spectral Ratio* – SSR y *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* – HVSR.

2.1.1. *Standard Spectral Ratio* – SSR

El método propuesto por Borchardt (1970) parte de la hipótesis que un registro sísmico $u(t)$ está compuesto por: los efectos asociados a la fuente $s(t)$; los efectos asociados al trayecto entre la corteza y el sitio de interés $p(t)$; y los efectos asociados al depósito de suelo que se encuentra bajo la estación de registro $h(t)$. Al asumir una linealidad entre

estos factores, el término $u(t)$ se puede expresar como la convolución entre estos (Ecuación 1a.), o como un producto punto a punto en el dominio frecuencial (Ecuación 1b.).

$$u(t) = s(t) * p(t) * h(t) \quad \text{Ecuación 1a.}$$

$$u(f) = s(f) p(f) h(f) \quad \text{Ecuación 1b.}$$

Según Borchardt (1970), si se tienen dos sensores iguales y cercanos (sensor 1 - sensor 2), que registran un mismo evento sísmico ($u_1(t)$ y $u_2(t)$), ambos registros presentarán iguales efectos asociados a la fuente ($s_1(f) = s_2(f)$) y asociados al efecto del trayecto ($p_1(f) = p_2(f)$). De acuerdo con esto, realizar un cociente espectral entre ambos registros, es igual a realizar un cociente entre los efectos asociados al depósito de suelo que se encuentra bajo cada sensor. Bajo esta premisa, si el sensor 1 se encuentra en superficie y el sensor 2 en basamento rocoso, se puede asumir que los efectos asociados al depósito bajo el sensor 2 son iguales a la unidad ($h_1(f) = 1$); en consecuencia, realizar un cociente entre ambos registros en el dominio frecuencial es equivalente a determinar los efectos asociados al depósito de suelo que se encuentra bajo el sensor de superficie, es decir, los efectos de sitio del depósito de suelo sobre el cual se encuentra el sensor de superficie (Ecuación 2.).

$$\frac{u_2(f)}{u_1(f)} = \frac{s_2(f) p_2(f) h_2(f)}{s_1(f) p_1(f) h_1(f)} = \frac{h_2(f)}{h_1(f)} = \frac{h_2(f)}{1} \rightarrow \frac{u_2(f)}{u_1(f)} = h_2(f) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Aplicar este método de forma correcta implica contar en un mismo punto con un sensor en superficie y otro de referencia justo debajo de este, condición que no siempre se cumple debido a los requerimientos logísticos y el alto costo que implica la instalación del sensor de referencia en lugares de difícil acceso y/o donde el lecho rocoso se encuentra a gran profundidad. Para suplir estos inconvenientes, se ha optado en la práctica cotidiana por utilizar sensores de referencia instalados sobre afloramientos rocosos, aspecto que diversos autores sugieren evitar, debido a los posibles efectos de sitio que puede presentar el

afloramiento rocoso asociados a sus fracturas por erosión (Satoh, et al., 1995; Steidl, et al., 1996; Margheriti, et al., 2000).

De igual manera, Borchardt (1994) estudió la incidencia de la profundidad del depósito de suelo en el modelamiento de la respuesta sísmica, concluyendo que 30 metros era suficiente para obtener una buena aproximación de la amplificación dinámica para todos los tipos de suelo, puesto que las variaciones a mayores profundidades en las velocidades de ondas S (V_s) era baja para todos los casos. Esta hipótesis fue ratificada por otros investigadores como Mueller (Mueller, et al., 1995) y fue adoptada por distintas normativas alrededor del mundo (Building Seismic Safety Council, B.S.S.C, 2003; Comité Europeo de Normalización, 1998; International Code Council, 2000; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

2.1.2. *Horizontal to Vertical Spectral Ratio – HVSR*

El HVSR es una derivación del método *Receiver Function* (1979), propuesta por Lermo y Chávez-García (1993), y tiene como hipótesis que el desplazamiento en las componentes ortonormales, vertical $D_V(t)$, radial $D_R(t)$, y transversal $D_T(t)$ registrado en superficie está dado por la convolución de: la función de la onda sísmica en la fuente incidente $S(t)$, la respuesta impulsional del sensor $I(t)$, y la respuesta impulsional de la estructura sedimentaria bajo la estación $E_i(t)$ en la componente que se desea analizar, tal como se muestra en las Ecuaciones 3a., 3b. y 3c..

$$D_V(t) = I(t) * S(t) * E_V(t) \quad \text{Ecuación 3a.}$$

$$D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t) \quad \text{Ecuación 3b.}$$

$$D_T(t) = I(t) * S(t) * E_T(t) \quad \text{Ecuación 3c.}$$

La componente vertical de la respuesta impulsional $E_V(t)$, se compone principalmente por impulsos directos seguidos de ondas menores, por lo que las modificaciones producidas por el depósito de suelo en la componente vertical son aproximadamente igual a un impulso unitario $\delta(t)$, haciendo que los desplazamientos en dicha componente se expresen como la convolución entre la función de la onda sísmica $S(t)$ y la respuesta impulsional del sensor $I(t)$, como se muestra en la Ecuación 4a (Langston, 1979). Gracias a esto, los desplazamientos en las componentes radial y transversal se pueden expresar en función del desplazamiento vertical (Ecuación 4b. y 4c.).

$$E_V(t) \approx \delta(t) \therefore D_V(t) \cong I(t) * S(t) * \delta(t) \quad \text{Ecuación 4a.}$$

$$D_R(t) = D_V(t) * E_R(t) \quad \text{Ecuación 4b.}$$

$$D_T(t) = D_V(t) * E_T(t) \quad \text{Ecuación 4c.}$$

Haciendo uso de la transformada de Fourier, la convolución puede ser expresada como la multiplicación punto a punto de las funciones en el dominio frecuencial (Ecuación 5a. y Ecuación 5b.), y la respuesta impulsional de la estructura sedimentaria en el dominio de frecuencias puede ser vista como el cociente espectral del desplazamiento radial y transversal y el desplazamiento vertical (Ecuación 6a. y Ecuación 6b.).

$$D_T(f) \cong D_V(f) E_T(f) \quad \text{Ecuación 5a.}$$

$$D_R(f) \cong D_V(f) E_R(f) \quad \text{Ecuación 5b.}$$

$$E_R(f) \cong D_R(f)/D_V(f) \quad \text{Ecuación 6a.}$$

$$E_T(f) \cong D_T(f)/D_V(f) \quad \text{Ecuación 6b.}$$

Para obtener la *Receiver Function*, se aplica la transformada de Fourier inversa a la respuesta impulsional de la estructura sedimentaria para regresar al dominio temporal. Sin

embargo, Lermo y Chávez-García (1993) encontraron que esta respuesta impulsional en el dominio frecuencial (Ecuación 6a. y Ecuación 6b.) corresponde a una buena aproximación de la función de transferencia del suelo. Este método solo permite caracterizar el suelo a gran escala y es útil para bajas frecuencias dada la inestabilidad de las convoluciones con que está formulado (Chávez-García & Montalva, 2014).

2.2. Uso de Vibraciones Ambientales para Estimación de los Efectos de Sitio

Puesto que es imposible predecir la ocurrencia de un evento sísmico, diversos autores realizaron estudios que pretendían determinar la frecuencia fundamental del suelo y su factor de amplificación a partir de registros de vibraciones ambientales.

Las vibraciones ambientales se componen de microsismos y microtrepidaciones, siendo los microsismos las vibraciones naturales y regulares del subsuelo las cuales son inducidas por condiciones naturales, compuestas principalmente por ondas Rayleigh, y cuyo periodo de vibración es mayor a 2 segundos; y las microtrepidaciones, las vibraciones producidas por la actividad humana (maquinarias, tráfico, explosiones), compuestas principalmente por ondas S y Rayleigh, cuyo periodo de vibración es menor a 1 segundo (Nogoshi & Igarashi, 1971; Moreno & Alfaro, 2000).

Para usar vibraciones ambientales en la estimación de los efectos de sitio, se supone que estas son producto de una distribución espacial uniforme de perturbaciones generadas por fuentes aleatorias no relacionadas, cuya orientación es referenciada a partir de un sistema cardinal (Norte - Sur, Este - Oeste y Vertical). De igual manera, en la práctica se acostumbra para obtener datos más confiables combinar información en el dominio de frecuencias de las componentes horizontales utilizando medias estadísticas, siempre y

cuando exista una homogeneidad de los estratos en sentido horizontal que permita que la energía espectral en todo este plano sea igual para un mismo receptor (Lunedei & Albarello, 2010; Albarello & Lunedei, 2013).

2.2.1. SSR con Vibraciones Ambientales

En las décadas de los setenta y ochenta, diversos autores estudiaron la posibilidad de aplicar el método SSR utilizando registros de vibraciones ambientales (Field, et al., 1990; Kagami, et al., 1982; Kagami, et al., 1986; Ohta, et al., 1978). Los resultados obtenidos fueron poco representativos, dado a que uno de los requisitos para aplicar este método es la igualdad de los efectos asociados a la fuente y al trayecto de la onda para ambos sensores, condición que no se cumple con las vibraciones ambientales al ser generadas por fuentes aleatorias no relacionadas (Chávez-García & Montalva, 2014; Lunedei & Albarello, 2010). Sin embargo, Kudo (1995) tras realizar varios ensayos en distintas condiciones, determinó que los resultados arrojados utilizando vibraciones ambientales para suelos con periodos fundamentales largos ($T > 1s$) eran confiables, y aunque sus resultados para suelos con periodos fundamentales cortos ($T < 1s$) fueron también satisfactorios, Bard (1999) recomienda en este caso analizar los resultados con suma precaución y garantizar al momento de hacer el registro que las fuentes de ruido y sus ubicaciones sean estables.

2.2.2. HVSR con Vibraciones Ambientales

Nakamura (1989; 2000) propuso el uso de la técnica HVSR con vibraciones ambientales. Diversos autores han cuestionado fuertemente este método, pero se ha difundido rápidamente debido a su facilidad de implementación, su bajo costo monetario, su simplicidad para el procesamiento de información y la consistencia de sus resultados (Chávez-García & Montalva, 2014). Distintos investigadores y el propio Nakamura han realizado una gran cantidad de ensayos experimentales para validar este método,

obteniendo resultados confiables principalmente en la estimación de la frecuencia fundamental del suelo. Para la aplicación de este método se deben realizar una serie de suposiciones:

- Una función de transferencia del suelo $St(f)$ está dada por el cociente espectral de los movimientos horizontales en superficie $Sh_s(f)$ con los del basamento rocoso $Sh_b(f)$.
- El cociente espectral del movimiento vertical ($Es(f) = Sv_s(f)/Sv_b$) tiene en cuenta los efectos de las ondas Rayleigh.
- Las microtrepidaciones presentes en el suelo contienen ondas Rayleigh, pero sus efectos aparecen en ambas componentes horizontal y vertical por igual.
- El cociente espectral entre la componente horizontal y la vertical de microtrepidaciones en el basamento rocoso es aproximadamente igual a la unidad ($Sh_b(f)/Sv_b(f) \approx 1$).

Nakamura realiza el cociente entre la función de transferencia del suelo y el cociente espectral del movimiento vertical, obteniendo la función $Stt(f)$, la cual se supone como una función de transferencia modificada que no considera los efectos de las ondas Rayleigh (Ecuación 7.).

$$\frac{St(f)}{Es(f)} = \frac{\left(\frac{Sh_s(f)}{Sh_b(f)}\right)}{\left(\frac{Sv_s(f)}{Sv_b(f)}\right)} \cong \frac{Sh_s}{Sv_s} = Stt(f) \quad \text{Ecuación 7.}$$

Kudo (1995) discute los fundamentos teóricos de este método, argumentando que las microtrepidaciones no pueden ser expresadas como la convolución de las ondas en profundidad con las ondas superficiales, sino que generalmente son vistas como la suma de estas, provocando que $St(f)/Es(f)$ no genere una compensación de las ondas Rayleigh. Adicionalmente Kudo (1995) argumenta que $Sh_b(f)/Sv_b(f) \approx 1$ solo es válido si la

eclipticidad de las ondas Rayleigh predominantes en las microtrepidaciones es casi unitaria, lo cual presenta inconsistencias con sus propiedades.

2.3. Algoritmo de Detección de Sismos STA/LTA

En la espera de un evento sísmico para la estimación de los efectos de sitio, la cantidad de información innecesaria almacenada y procesada por un sistema de instrumentación puede llegar a ser inmanejable. Por esto, se han desarrollado algoritmos encargados de detectar eventos sísmicos y, mediante sistemas de gatillos y des-gatillos, iniciar y detener automáticamente el procesamiento y almacenamiento de las señales. Uno de los algoritmos más empleados para la detección de eventos sísmicos es el *Short Term Average / Long Term Average* (STA/LTA).

El algoritmo STA/LTA propuesto por Allen (1978; 1982), se basa en la comparación entre dos promedios de valores absolutos de una señal analizada (Figura 1a.); uno de estos promedios corresponde a valores de amplitudes de la señal para una ventana corta de tiempo (STA) y el otro corresponde a valores de amplitudes para una ventana de tiempo más larga (LTA). Cuando el cociente entre el valor promedio de estas dos ventanas excede un umbral previamente establecido (tolerancia para inicio del evento), se declara la existencia de un evento (Figura 1b.); y cuando este cociente es inferior a otro límite de umbral previamente establecido (tolerancia para finalizar el evento), se declara la finalización del evento (Figura 1c.). Adicionalmente, este algoritmo tiene como requerimiento un valor de duración mínima de evento, el cual le permite diferenciar movimientos telúricos de movimientos producidos por la intervención humana.

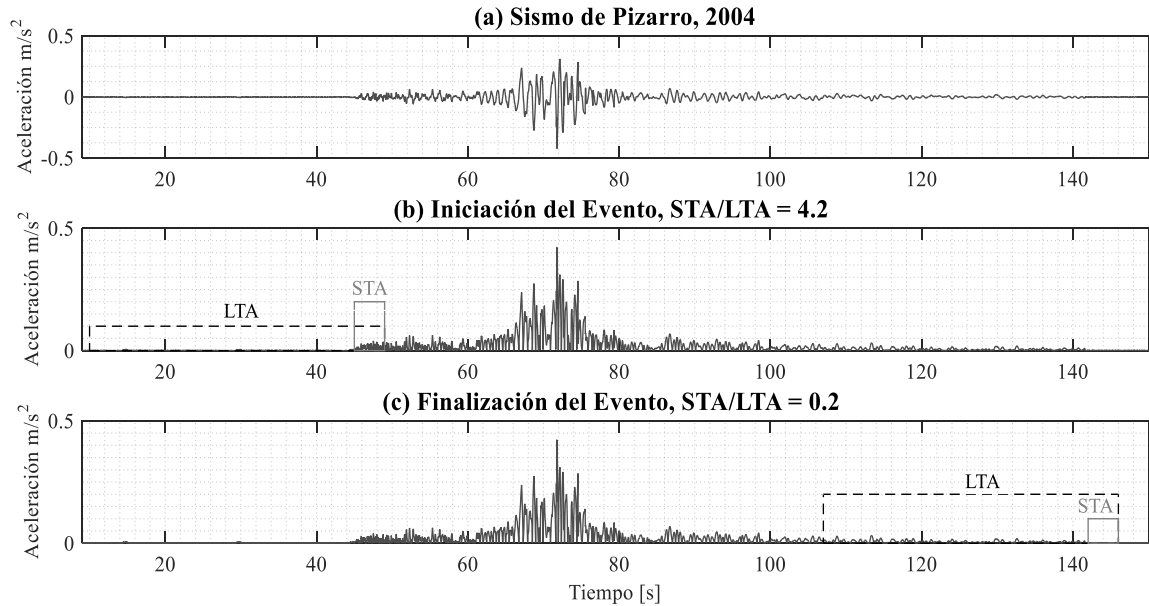


Figura 1. Aplicación de STA/LTA. (a) Sismo de Pizarro, 2004. (b) Inicialización del evento sísmico. (c) Finalización del evento sísmico.

La efectividad del algoritmo de detección dependerá de la correcta calibración de sus parámetros, por esto se requiere una metodología clara para su implementación. Para esto, Trnkoczy (1999; 2002) realiza una serie de recomendaciones:

La ventana STA tiene como objetivo obtener el promedio “instantáneo” de un registro sísmico, por lo que su longitud debe ser menor a la duración del evento de menor duración esperado, y cuanto mayor sea su longitud, menos sensible será el algoritmo a la detección de sismos locales. Debe tenerse presente que si el tamaño de la ventana STA es demasiado corto no se obtendrá un promedio “instantáneo” representativo de la señal y el algoritmo se volverá más sensible a los impulsos antrópicos. Para eventos regionales, el tamaño de la ventana STA es usualmente de 1 a 2 segundos, mientras que para sismos locales dicho valor se encuentra entre 0.3 y 0.5 segundos.

La ventana LTA tiene como objetivo obtener el valor promedio del ruido presente en un registro sísmico o en las vibraciones ambientales, por lo que su longitud debe ser mayor a los periodos irregulares del ruido. Al acortar la longitud de la ventana LTA se permite ajustar de manera lenta y ascendente la amplitud de los eventos sísmicos esperados. Es decir, si la ventana LTA tiene una corta duración, los eventos sísmicos requerirán una mayor amplitud para activar el gatillo STA/LTA, lo cual puede ser ventajoso al momento de ajustar el algoritmo para evitar que, por ejemplo, el paso vehicular sea detectado como un evento sísmico. Comúnmente, se usa un valor inicial de 60 segundos para el tamaño de la ventana LTA, sin embargo, este valor debe ser modificado luego de tener una caracterización del comportamiento de los registros obtenidos en el lugar donde se implementa el algoritmo.

La tolerancia para inicio del evento también conocido como el umbral de gatillo STA/LTA, este parámetro determina qué eventos se registrarán y cuáles no. Si el valor de tolerancia es muy alto, es posible que no se registren la mayoría de eventos sísmicos, sin embargo, si este valor es muy bajo, es posible que se registren muchos falsos eventos. La calibración de este parámetro depende del ruido presente en el lugar de instalación del sensor y de la sensibilidad que se requiera para detección de determinados sismos. Un ruido estadísticamente estacionario (que presenta menores fluctuaciones) permite un menor valor de tolerancia de inicio, proporcionando un mejor ajuste. Comúnmente, se usa un valor de 4 como tolerancia para la inicialización del evento en sitios de sismicidad moderada, sin embargo, en caso de presentar un bajo nivel de ruido en la estación, este valor puede ser mucho menor.

La tolerancia para finalización del evento también conocido como umbral de des-gatillo, indica la terminación de la grabación del evento sísmico. El valor de tolerancia de finalización debe ser siempre menor al valor de tolerancia de iniciación, teniendo presente que si el valor de tolerancia es muy bajo puede generarse un almacenamiento de registro

de gran longitud o incluso sin fin, y si este es muy alto, el algoritmo puede que no capture la totalidad de un evento. Un valor inicial típico para para zonas de baja sismicidad es de 0.5 ó 0.3, pero este puede ser menor para estudios donde se requiera una mayor precisión en el instante de finalización del evento.

La duración mínima del evento depende principalmente del tipo de evento que se desea registrar y de cuánto debe ser su duración para que sea catalogado como un evento sísmico. Debe considerarse que una duración mínima muy larga puede interferir con el registro de sismos regionales de corta duración, mientras que una duración mínima muy corta puede no llegar a diferenciar entre un evento sísmico y una vibración producida por una carga antrópica como, por ejemplo, el paso de peatones o vehículos cerca a la estación sismológica.

Capítulo 3.

Antecedentes y Estado del Arte

3.1. Sistemas de Instrumentación

Los sistemas de instrumentación y monitoreo del suelo han sido una gran herramienta para la sismología e ingeniería sísmica, siendo México uno de los países latinoamericanos que se destaca por su trayectoria en estos campos. El sismo ocurrido en dicho país el 19 de septiembre de 1985 en las costas del estado de Michoacán, destruyó gran parte de la capital y una gran cantidad de ciudades aledañas al epicentro, motivo por el cual se crearon y modernizaron distintos centros de investigación científica en todo el país, como lo son el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), el Centro Nacional de Prevención de Desastres de la Secretaría de Gobernación (CENAPRED), la Red Inter-universitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS), el Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada (CICESE), la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), la Fundación ICA, entre otros. De igual manera, se instalaron y controlaron más de 200 estaciones sismológicas en campo libre y algunas de sensores en profundidad por todo el Valle de México (Lagos, 2014).

De igual manera, en Colombia, el sismo del 25 de enero de 1999 que destruyó gran parte de la ciudad de Armenia, motivó a algunas ciudades a realizar estudios de microzonificación sísmica que conllevan a la implementación de sistemas de instrumentación sísmicos. Ejemplo de este es Santiago de Cali, que entre 2003 y 2005 realizó un convenio con INGEOMINAS y el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) del cual surgió el Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (INGEOMINAS & DAGMA, 2005), el cual, para ser aprobado como reglamento, requirió tener en funcionamiento y óptimas condiciones la red sismológica de la ciudad.

En 2004, la Corporación OSSO diseñó un sistema digital portátil con el propósito de registrar, almacenar, procesar y transmitir señales sísmicas por telemetría. El lenguaje de programación del software ofrece una independencia tecnológica para los usuarios, permitiendo que estos lo puedan modificar o reconfigurar según sus necesidades, además de proponer una alternativa económica de sistemas de instrumentación sísmicos para países en vía desarrollo (Riascos, et al., 2004).

También en 2004, Celso Reyes en conjunto con la Universidad de Alaska Fairbanks Instituto Geofísico (UAFGI) desarrollaron el *toolbox* GISMO para el software de Matlab®, el cual tenía como principal objetivo de contribuir con códigos abiertos a investigaciones geofísicas y sismológicas. En el año 2007, el *toolbox* GISMO se cataloga como un proyecto “*bleeding edge*”, es decir, cualquier usuario podía contribuir en la programación del *toolbox* a través de un servidor donde se almacenaban los códigos principales. El proyecto GISMO no emitió un *toolbox* oficial estable (West & Thompson, 2007; 2015), sin embargo, los códigos abiertos presentan información de gran ayuda para la programación del procesamiento de señales y en el algoritmo de detección de sismos. El código “*sta_lta*” firmado por “Dane Ketner, Alaska Volcano Observatory” sirvió como algoritmo base para la programación del algoritmo STA/LTA en tiempo real.

En 2015, fueron instalados en el edificio Hernando Arellano Ángel de la Universidad Javeriana de Bogotá (Colombia) un total de 6 acelerómetros triaxiales de marca Guralp siendo este uno de los sistemas de monitoreo sísmico más robustos del país. Este sistema cuenta con cuatro acelerómetros que fueron instalados dentro del edificio en distintas plantas, un acelerómetro que fue instalado en una perforación de 30 metros de profundidad y otro que fue instalado en superficie al lado de la perforación (Ruiz, 2015). Este sistema proporcionaría información relevante sobre el posible efecto de sitio de la zona, además de permitir realizar estudios de interacción suelo - estructura.

3.1.1. Instalación de Sensores en Profundidad

Contar con registros sísmicos de referencia, que no presenten modificaciones por los efectos asociados al depósito de suelo, es de gran utilidad en la ingeniería sísmica. Los registros medidos en roca son una alternativa, por la homogeneidad y continuidad en sentido horizontal del material (Steidl, et al., 1996). Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, emplear registros medidos en afloramientos rocosos es una opción que diversos autores prefieren evitar por los efectos de la erosión (Satoh, et al., 1995; Steidl, et al., 1996; Margheriti, et al., 2000), por esto, desde hace más de 40 años se han implementado sismómetros de profundidad, que algunos casos pueden ser instalados sobre la roca madre (Trnkoczy, et al., 2012) o en profundidades mayores a 30 metros, por las bajas modificaciones en la velocidad de propagación de las ondas S (Borcherdt, 1994; Mueller, et al., 1995).

La utilidad de los registros suministrados por un sismómetro en profundidad, dependerá en gran medida de su correcta instalación. La orientación arbitraria de las componentes horizontales del sensor en profundidad evita conocer la dirección de llegada de las ondas sísmicas, determinar la dirección principal de oscilación del suelo, comparar registros sísmicos con otras estaciones, entre otras aplicaciones (Trnkoczy, et al., 2012). De igual

manera, el deficiente confinamiento lateral entre la perforación y el sismómetro en profundidad, suele provocar un ruido excesivo en los registros, además de no garantizar que el equipo se encuentre en contacto con las paredes de la perforación (Holcomb, et al., 1998). Por esto, diversos autores han propuesto técnicas que facilitan el montaje experimental y el procesamiento de la información obtenida con sismómetros en profundidad.

Para evitar los inconvenientes generados por la rotación del equipo en su descenso, en las décadas de los 80 y 90 se propuso el uso de giroscopios instalados sobre los sensores en profundidad para determinar su orientación. Sin embargo, esta práctica presentaba una serie de dificultades por la fragilidad de sus piezas y las condiciones poco controladas de los montajes experimentales, lo que generaba costos adicionales en la instalación y mantenimiento de los equipos (Trnkoczy, et al., 2012). Por este motivo Yamazaki, Lu y Katayama (1992) estudiaron la forma de corregir la orientación arbitraria del sensor en un post-procesamiento de registros. Para ello proponen el uso de dos métodos para medir el ángulo de error existente entre las componentes horizontales de un sensor de profundidad respecto a uno de superficie. Ambos métodos consisten en rotar los registros de las componentes horizontales del sensor en profundidad mientras son comparados con los registros del sensor en superficie, y así establecer una matriz de rotación con la que se modifican los registros de profundidad. El primer método compara ambos registros a través de la suma de la máxima correlación cruzada, mientras que el segundo método compara los registros a través de la suma de las máximas funciones de coherencia. Ambos métodos proporcionan resultados consistentes con el error medido experimentalmente, lo que permite realizar la corrección de las componentes horizontales a través de un post-procesamiento. En caso de emplear registros de vibraciones ambientales para la estimación de los efectos de sitio, es posible combinar las componentes horizontales empleando distintos tipos de media (aritmética, cuadrática, geométrica, entre otros) omitiendo la dirección de los sensores, puesto que se supone que las vibraciones ambientales son

producto de fuentes aleatorias no relacionadas y se distribuyen uniformemente sobre el plano horizontal (Albarello & Lunedei, 2013; Lunedei & Albarello, 2010).

De igual manera, para evitar el ruido excesivo provocado por el mal confinamiento lateral del sensor en la perforación y mejorar el contacto entre estos, diversos materiales y montajes sumamente complejos fueron evaluados. Holcomb, Sandoval y Hutt (1998) realizaron un estudio de la arena estándar (Arena Estándar conforme ASTM C 778-06) como material de confinamiento entre un sensor a profundidad y una perforación. Para este estudio se emplearon un total de 26 perforaciones, con las cuales se concluyó que las perforaciones con arena estándar presentaban una reducción considerable del ruido provocado por las corrientes de viento que entran en la perforación y provocan la oscilación del sensor. Adicionalmente, concluyen que no existe un cambio en las propiedades dinámicas identificadas usando arena.

Debido a estos estudios, distintas empresas proveedoras de sismómetros de profundidad recomiendan la corrección de las componentes horizontales en un post – procesamiento y el uso de arena estándar como material de confinamiento (Diehl, et al., 2003; Lennartz Electronic, GmbH, 2016a).

3.2. Métodos de Estimación de Efectos de Sitio

Desde que Nakamura (1989; 2000) propuso el uso de un único sensor en superficie para estimar los efectos de sitio con vibraciones ambientales, se han realizado diversas investigaciones que comparan los resultados obtenidos a través de distintos métodos.

Margheriti (Margheriti, et al., 2000) y Cocco (Cocco, et al., 2001) estudiaron los efectos de sitio del Valle de Po (Norte de Italia) a través de distintos métodos experimentales, para esto usaron un sismómetro ubicado a 136 metros de profundidad en el valle y un

sismómetro de superficie sobre este. Para la corrección de orientación del sismómetro en profundidad, se empleó el método de post-procesamiento de máxima correlación entre componentes horizontales propuesto por Yamazaki y otros (1992). Y se confinó el sensor con la perforación empleando arena estándar como lo recomienda Holcomb y otros (1998). En este estudio se identifica la frecuencia fundamental del suelo a través de los métodos SSR y HVSR para eventos sísmicos y vibraciones ambientales, evidenciando que el factor de amplificación varía dependiendo del método empleado y la hora del día en que se realizan los registros.

Horike y otros (2001) concluyeron que HVSR con registros de vibraciones ambientales permitía obtener la frecuencia fundamental del suelo, sin embargo, presentaba grandes diferencias entre las amplitudes de la función de transferencia obtenida con vibración ambiental y las obtenidas a partir de registros sísmicos. Esto evidenció que la amplificación obtenida con vibraciones ambientales no representa adecuadamente los efectos sitio. Adicionalmente, concluyeron que el método de SSR con vibraciones ambientales para algunas zonas de estudio presentaba datos confiables de la posible amplificación dinámica y frecuencia fundamental del suelo. Sin embargo, estos resultados siempre debían ser comparados con la SSR realizada con registros sísmicos.

En 2004, la Dirección General de Investigación de la Comisión Europea presentó el proyecto de investigación SESAME liderado por Bard y el equipo SESAME (2005), el cual buscaba normalizar el uso del método HVRS con vibraciones ambientales para reducir la incertidumbre de sus resultados. Adicionalmente, introducen parámetros empleados para comparar las funciones de transferencia obtenidas a través distintos métodos, estos parámetros son: frecuencia fundamental, ancho de banda y factor de amplificación. Las recomendaciones presentadas en dicho documento se presentan en el Anexo 1.

Haghshenas y otros (2008) presentan un artículo que recopila la información del proyecto de investigación SESAME, donde realizaron la evaluación del método HVSR para

vibraciones ambientales en más de 200 sitios diferentes dispersos por el mundo. Los datos fueron comparados con el método SSR y/o HVSR para eventos sísmicos. Obteniendo que el método de HVSR para vibraciones ambientales proporcionó información confiable para un total de 108 sitios en frecuencia fundamental, factor de amplificación y ancho de banda. A partir de la recopilación de datos, concluyeron que el factor de amplificación del método de Nakamura se puede considerar como una estimación de límite inferior de la amplificación obtenida con SSR empleando registros sísmicos, y que la diferencia en el factor de amplificación tiene correlación directa con la geomorfología del suelo y, por ende, grandes diferencias entre HVSR con vibración ambiental y SSR con registros sísmicos pueden ayudar a detectar la existencia de efectos locales bidimensionales o tridimensionales.

Chávez-García y Montalva (2014) realizan una recopilación bibliográfica de la evolución en los métodos de estimación de los efectos de sitio a través del tiempo. Para esto se basan en el fundamento teórico de los métodos SSR y HVRS con registros sísmicos y vibraciones ambientales, además de distintos métodos numéricos, para luego emplearlos en registros de vibraciones del suelo de Valle Parkway, donde concluyen que todos los métodos permiten identificar con cierta facilidad la frecuencia fundamental del suelo, sin embargo, el factor de amplificación presenta una gran incertidumbre entre métodos.

Capítulo 4.

Marco Metodológico

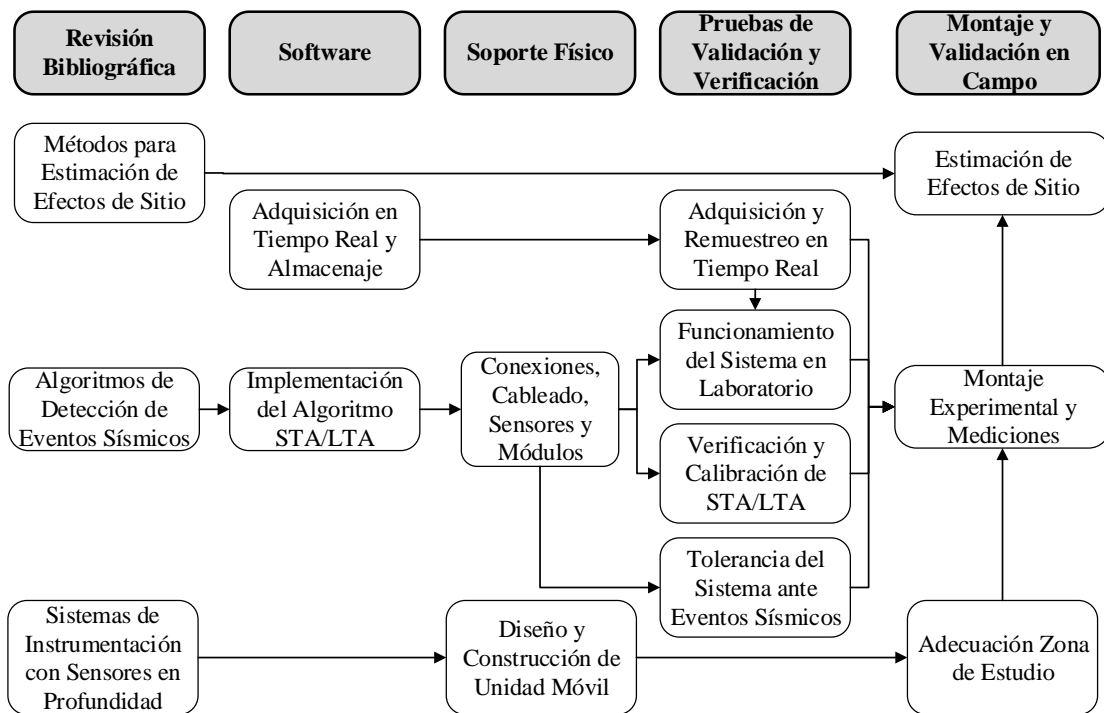


Figura 2. Mapa conceptual de la metodología empleada para la implementación del sistema de instrumentación del Edificio 350, Universidad del Valle.

Para la implementación del sistema de instrumentación del suelo del edificio 350 fue necesario desarrollar una metodología de trabajo que contemplara diversas fases que hicieran posible su ejecución. La Figura 2 presenta un mapa conceptual de la metodología empleada, donde se dividió en cinco fases relacionadas entre sí.

La fase de revisión bibliográfica, tuvo como objetivo la recopilación de estudios previos, información pertinente y fundamento teórico para la realización de este proyecto. De igual manera, la fase de software contempla la creación del algoritmo de adquisición, almacenamiento, remuestreo en tiempo real y detección de eventos sísmicos. También se presenta la fase de soporte físico, la cual tiene como objetivo modificar y revisar los equipos necesarios para la creación del sistema de instrumentación. Todas estas fases deben ser validadas a partir de ensayos controlados en laboratorio, por lo que se requiere de una fase de validación y verificación que contemple todos los aspectos del software y el soporte físico. Finalmente, se tiene la fase de montaje y validación en campo, la cual proporciona los resultados definitivos de este trabajo, las condiciones necesarias para que este pueda ser repetido en futuros ensayos y la validación del sistema de instrumentación como insumo para la estimación de los efectos de sitio empleando vibraciones ambientales.

4.1. Zona de Estudio y Perforación

Santiago de Cali, una de las ciudades más importantes del suroccidente de Colombia, se encuentra entre las cordilleras Central y Oriental, en la depresión interandina de los ríos Cauca y Patía, cuyo basamento se encuentra formado por rocas ígneas de edad Cretácea y rocas sedimentarias Terciarias, sobre las cuales se emplazaron los depósitos aluviales del río Cauca y de sus principales afluentes, generando un gran relleno aluvial. La ciudad se ubica en una región catalogada por el Reglamento Colombiano Sismoresistente NSR-10 (2010) de alta amenaza sísmica, gracias a la alta actividad generada a nivel regional por la

interacción de las placas tectónicas Suramericana, Nazca y del Caribe, y a nivel local, según el estudio Neotectónico hecho en la microzonificación sísmica de la ciudad, por 23 fallas que influyen en la respuesta sísmica, siendo la falla Cali - Patía la más incidente al atravesar todo el perímetro urbano (INGEOMINAS & DAGMA, 2005).

El campus universitario Meléndez de la Universidad del Valle, se encuentra en el sur de la ciudad entre los ríos Meléndez y Lili, dos de los principales afluentes del río Cauca. Según los datos geotécnicos obtenidos de la microzonificación sísmica de la ciudad y de los estudios realizados por el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle, el depósito aluvial en la zona de estudio se caracteriza por una capa superficial de materiales limosos de consistencia dura, que alcanza los 18 m de espesor, que subyace estratos de arenas y gravas con intercalaciones de materiales finos de consistencia dura. Los periodos fundamentales de la zona se encuentran entre 0.8 y 1.3 segundos, y su basamento rocoso se estima que se encuentra a 600 m de profundidad (INGEOMINAS & DAGMA, 2005; Peralta, 2015).

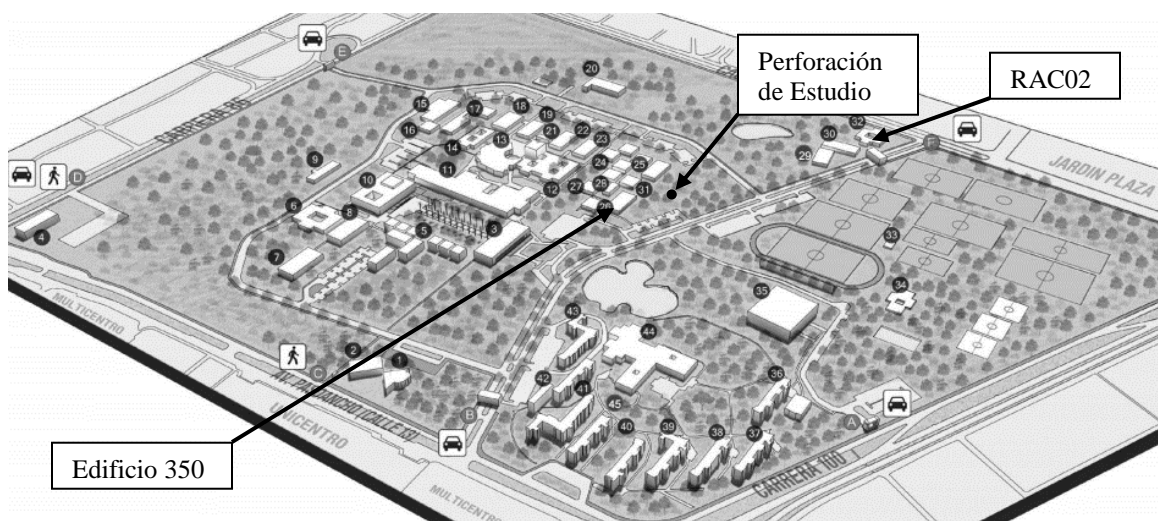


Figura 3. Campus Universitario Meléndez de la Universidad del Valle, ubicación de perforación de estudio y estación RAC02.

Fuente: Mapa suministrado por el Área de Planeación Física de la Universidad del Valle.

El sistema de instrumentación empleado para este estudio se instaló en una perforación a 70 m del edificio 350 de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática del campus universitario Meléndez, en una zona verde alejada de otras edificaciones (Figura 3). Para comparar los datos obtenidos, se utilizaron los registros de la estación RAC02 de la red de acelerógrafos de la ciudad, ubicada en el edificio del Servicio Geológico Colombiano, a 200 m de la perforación, y los registros de las estaciones RAC04 y RAC07, que se encuentran instaladas sobre los afloramientos rocosos del occidente de la ciudad, a una distancia de 6.3 km y 10.6 km de la estación RAC02, respectivamente.

Para la instalación del sismómetro en profundidad se realizó una perforación mecánica de 30 m, la cual posteriormente fue encamisada con un tubo de PVC. En la parte superior de la perforación se construyó una caja de concreto reforzado de 1.0x1.0x0.6 m, con un espesor en sus paredes de 0.20 m, protegida por una tapa de acero y un filtro en grava alrededor de esta que evita las filtraciones de agua (Figura 4). Adicionalmente, la caja de concreto cuenta con tomacorriente de 12 V alimentado por la red eléctrica interna de la universidad, que permite el uso de los equipos durante largos periodos de registro.



Figura 4. Perforación de estudio, Campus Universitario Meléndez.

4.2. Soporte Físico

4.2.1. Componentes del Sistema de Instrumentación

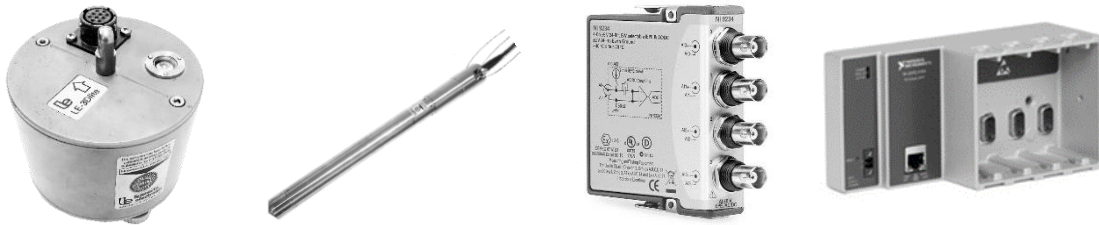
El sistema de instrumentación cuenta con un sismómetro triaxial superficial Lennartz LE-3Dlite (Figura 5a) y con un sismómetro triaxial tipo *borehole* de profundidad Lennartz LE-3D/BH (Figura 5b). Ambos sensores tienen rango de voltaje de salida de ± 5 V, rango dinámico mayor que 132 dB (a 1 Hz) y un factor de transducción de 400 V/m/s (Lennartz Electronic, GmbH, 2016b). El sismómetro tipo *borehole* cuenta con un corrector de inclinación en su componente vertical que corrige errores hasta de $\pm 5^\circ$. Cada sismómetro se encuentra conectado a un módulo de adquisición National Instruments modelo NI-9234 (Figura 5c), que tienen cuatro entradas análogas, resolución de 24 bits, rango dinámico mayor que 102 dB, filtro *anti-aliasing* y voltaje máximo de medición de ± 5 V.

El filtro *anti-aliasing* usa una combinación análogo-digital, que tiene como frecuencia de corte el 45 % de la frecuencia de adquisición, que puede ser modificada por el usuario a partir de la Ecuación 8. (National Instruments, Corp, 2008), en la que f_s es la frecuencia de adquisición del equipo, f_M es la base interna de frecuencia maestra del equipo (13.1072 MHz) y n es un número natural entre 1 y 31. Se decide utilizar un n igual a 25 ($f_s = 2048$ Hz) para obtener la menor frecuencia de valor entero que se puede emplear en los módulos. La respectiva frecuencia de corte del filtro *anti-aliasing* es de 921.6 Hz.

$$f_s = \frac{f_M \div 256}{n} \quad \text{Ecuación 8.}$$

A su vez, ambos módulos NI-9234 se conectan a un chasis National Instruments modelo NI cDAQ-9174 (Figura 5d), que permite adquirir información de manera continua y simultánea de ambos sensores, y transmitirla a través de un cable Ethernet a un ordenador

portátil que adquiere y almacena los registros por medio de los *toolbox Signal Processing* y *Data Acquisition* del paquete matemático MATLAB®.



(a). Sismómetro
LE-3Dlite

(b). Sismómetro
LE-3D/BH

(c). Módulo
NI-9234

(d). Chasis
cDAQ-9174

Figura 5. Equipos utilizados para el sistema de instrumentación.

4.2.2. Unidad de Ensayos Móvil

Para los ensayos en la zona de estudio, se diseñó y construyó una unidad de ensayos móvil (Figura 6), la cual protege los componentes del sistema de instrumentación y permite realizar un correcto aplome del sismómetro en profundidad. En el Anexo 2 se presentan los esquemas del diseño original de la unidad de ensayos móvil. Esta unidad, cumple con los requerimientos mínimos para el correcto manejo y durabilidad de los equipos y las conexiones, y cuenta con: (1) un carrete de 15 cm de radio para el correcto almacenamiento del cable de datos del sismómetro en profundidad (Lennartz Electronic, GmbH, 2016a), (2) un brazo telescópico con una polea en su extremo para realizar el aplome del sensor, además de permitir trabajar a una distancia prudente de la perforación, (3) una manivela manual con relación de piñones 1:2 para descender y ascender fácilmente el equipo, (4) una masa neta mayor a 65 kg que evita el volcamiento de la unidad móvil, (5) un juego de llantas todo terreno que facilita el movimiento de la unidad en el área de estudio y (6) una zona de trabajo a 1.1 m de altura, para ubicar los componentes de adquisición del sistema de instrumentación y emplear un computador portátil con mayor facilidad.



Figura 6. Unidad de ensayos móvil instalada en la perforación de estudio.

4.3. Software de Adquisición

Dado que el sistema de adquisición empleado para este proyecto cuenta con una frecuencia de muestreo de 2048 datos por segundo, el procesamiento de información y almacenamiento de datos consumiría una cantidad excesiva de recursos computacionales, principalmente en tiempo de operación del procesador y espacio en memoria RAM. Por este motivo, se desarrolló el software de adquisición SISMOS (Sistema de Monitoreo Sísmico), el cual inicia la adquisición simultánea de los módulos, remuestrea la información adquirida en tiempo real, almacena esta información en un formato digital que ocupa poco espacio en memoria de disco duro, visualiza la información tiempo real, elimina los datos de la memoria RAM después de ser almacenados en el disco duro, y emplea el algoritmo de detección de sismos STA/LTA en tiempo real para una de las componentes de cualquiera de los dos sensores.

El software SISMOS fue programado orientado a objetos en Matlab®, empleando los *toolbox Signal Processing* y *Data Acquisition*, y está diseñado para funcionar con cualquier par de módulos de adquisición National Instruments Serie C para NI – CompatDAQ.

4.4. Pruebas de Validación y Verificación

Con el objetivo de comprobar el funcionamiento e integridad del sistema en un entorno controlado, se realizaron distintas pruebas y verificaciones cuyos objetivos fueron:

- Garantizar la adquisición, remuestreo y almacenamiento en tiempo real de los datos leídos por el sistema.
- Calibrar el algoritmo STA/LTA en tiempo real y verificar su buen funcionamiento en la detección de eventos sísmicos.
- Garantizar el funcionamiento en conjunto de los elementos del soporte físico y el software SISMOS.
- Identificar qué tipo de eventos sísmicos podrían saturar el sistema.

En el Capítulo 6 se explica con detalle cada prueba y ensayo realizado.

4.4.1. Simulador Sísmico y Actuador Dinámico

Para la realización de algunas de las pruebas de validación y verificación se empleó el simulador sísmico de la Universidad del Valle, el cual es una mesa vibratoria uniaxial que produce excitaciones dinámicas en la base a modelos estructurales de hasta una tonelada.

El simulador sísmico reposa sobre una masa de reacción de 47 toneladas que minimiza los efectos de transmisión de vibraciones al Edificio 350 de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, donde se encuentra construida. La unidad de potencia hidráulica del simulador

opera a 2000 psi y tiene un caudal máximo de 32 gpm enviado a un actuador con LVDT interno y servo-válvulas duales de 15 gpm cada una. La plataforma de aluminio del simulador tiene 1.50 metros de longitud y 1.10 metros de ancho, opera entre 0 y 50 Hertz y puede desplazarse hasta 7.62 cm (3 plg) a cada lado.

De igual manera, se empleó un actuador dinámico APS 400 ELECTRO-SEIS, el cual permitió inducir de manera indirecta vibraciones a las componentes verticales de los sismómetros. Este actuador es capaz de generar 445 N de fuerza y operar en un rango de frecuencias comprendido entre 0.1Hz y 100Hz.

4.5. Montaje Experimental

Una vez validado el sistema de instrumentación, se realiza la instalación de los equipos en la zona de estudio, lo cual incluye el descenso del sismómetro de profundidad y la instalación del sismómetro en superficie. Antes de realizar el descenso del sismómetro de profundidad se extiende una cama de arena silíceas en el fondo de la perforación y, una vez hecho el descenso y aplomado del sensor con ayuda de la unidad de ensayos móvil, se deja caer arena desde la superficie para garantizar el confinamiento lateral entre el equipo y la perforación, siguiendo las recomendaciones del fabricante del sensor (Lennartz Electronic, GmbH, 2016a; Holcomb, et al., 1998). Posteriormente, se instaló y niveló el sensor superficial a 5 cm de la perforación y se acondicionó la zona de trabajo para iniciar la adquisición de las mediciones dinámicas.

El 7 de febrero de 2017 se midieron vibraciones ambientales en la perforación de estudio del edificio 350 del campus universitario Meléndez de la Universidad del Valle, empleando el sistema de instrumentación y realizando la adquisición con un computador Lenovo ThinkPad W530 en el que se operó el software SISMOS. Se realizaron cuarenta mediciones

de quince minutos cada una, a una tasa de remuestreo de 256 datos por segundo, obteniendo un total de 600 minutos de registro y más de nueve millones de datos por cada canal del sistema.

Se realizó un reconocimiento visual de la zona cercana a la perforación de estudio, detectando posibles fuentes de ruido y reportando observaciones generales realizadas en el transcurso de las mediciones. Para este reconocimiento visual se elaboró un formato de campo el cual se adjunta en el Anexo 3.

4.6. Procesamiento de Información

Una vez finalizada la toma de mediciones dinámicas, la información es analizada en periodos de análisis de una hora, a los cuales se les aplica los métodos de estimación de efectos de sitio HVSR y SSR para vibraciones ambientales. Luego, para cada periodo de análisis se identifica la frecuencia fundamental, el factor de amplificación y el ancho de banda.

Los parámetros de frecuencia fundamental y ancho de banda de frecuencias predominantes, son comparados con la frecuencia fundamental y el umbral de frecuencias esperadas para esta zona que reporta la microzonificación sísmica de la ciudad. Adicionalmente, se analizan tres registros sísmicos adquiridos en la estación RAC02, empleando los métodos HVSR y SSR, para corroborar la información y comparar el factor de amplificación del suelo.

Capítulo 5.

Software SISMOS

5.1. Descripción del Funcionamiento

Dado que el sistema de adquisición empleado para este proyecto cuenta con una frecuencia de muestreo de 2048 datos por segundo, el procesamiento de información y almacenamiento de datos consumiría una cantidad excesiva de recursos computacionales, principalmente en tiempo de operación del procesador y espacio en memoria RAM. Por este motivo, se desarrolló el software de adquisición SISMOS (Sistema de Monitoreo Sísmico).

El software SISMOS reconoce los módulos de adquisición de National Instruments que se encuentran conectados al computador, después crea el objeto Listener (Figura 7), el cual realiza en segundo plano las tareas de, remuestreo de datos, grabación de información en paquetes de archivo tipo *.bin* en el disco duro, creación de nuevos paquetes de archivo, aplicación del algoritmo STA/LTA, reducción de datos almacenados en la RAM y visualización de la información adquirida en tiempo real.

El algoritmo de detección de sismos STA/LTA fue programado usando como base los códigos del *toolbox* GISMO de la UAFGI. Para el software SISMOS, era necesario que los eventos sísmicos fueran identificados en tiempo real y el algoritmo del *toolbox* GISMO solo funcionaba para señales de duración finita (un vector de datos invariable en el tiempo). Por esto, se agregaron dos condiciones booleanas en el funcionamiento de los algoritmos STA/LTA (Figura 7), para que este lograra diferenciar entre la finalización de un evento sísmico y los últimos datos adquiridos por el sistema, evitando eliminar datos de la memoria RAM mientras el algoritmo estaba detectando un evento.

El código crea la interfaz gráfica donde el usuario puede modificar los parámetros iniciales de visualización, almacenamiento y del algoritmo STA/LTA en tiempo real, y enlaza la interfaz a la rutina de adquisición. Una vez se presiona el botón de inicio, crea por defecto el primer paquete de datos con la hora local del computador y la frecuencia de muestreo empleada. Inmediatamente, declara el funcionamiento del objeto Listener en segundo plano, que actuará repetidamente hasta completar la cantidad de datos definida para el ensayo o hasta que el usuario decida detener la adquisición. En caso de finalizar la adquisición con un paquete de registro sin terminar, este será guardado hasta la última muestra individual capturada. La Figura 8 presenta el diagrama general del flujo de información del software SISMOS.

Por defecto, las señales de los sismómetros son adquiridas a una frecuencia de muestreo de 2048 datos por segundo en muestras individuales de un segundo (Valores no editables por el usuario). Por esto, las muestras individuales se remuestran a una frecuencia de 256, 128, 56 o 32 datos por segundo (frecuencia definida por el usuario) y son almacenadas en un paquete de datos extensión *.bin*, con el nombre de la frecuencia de remuestreo, la fecha y hora de inicio de la adquisición (fffHz_AAAA-MM-DD_hh-mm-ss). El remuestreo de la señal utiliza la función *resample* de Matlab®, con un traslapo entre muestras de 10 datos para garantizar la convergencia de la señal en los límites de estas.

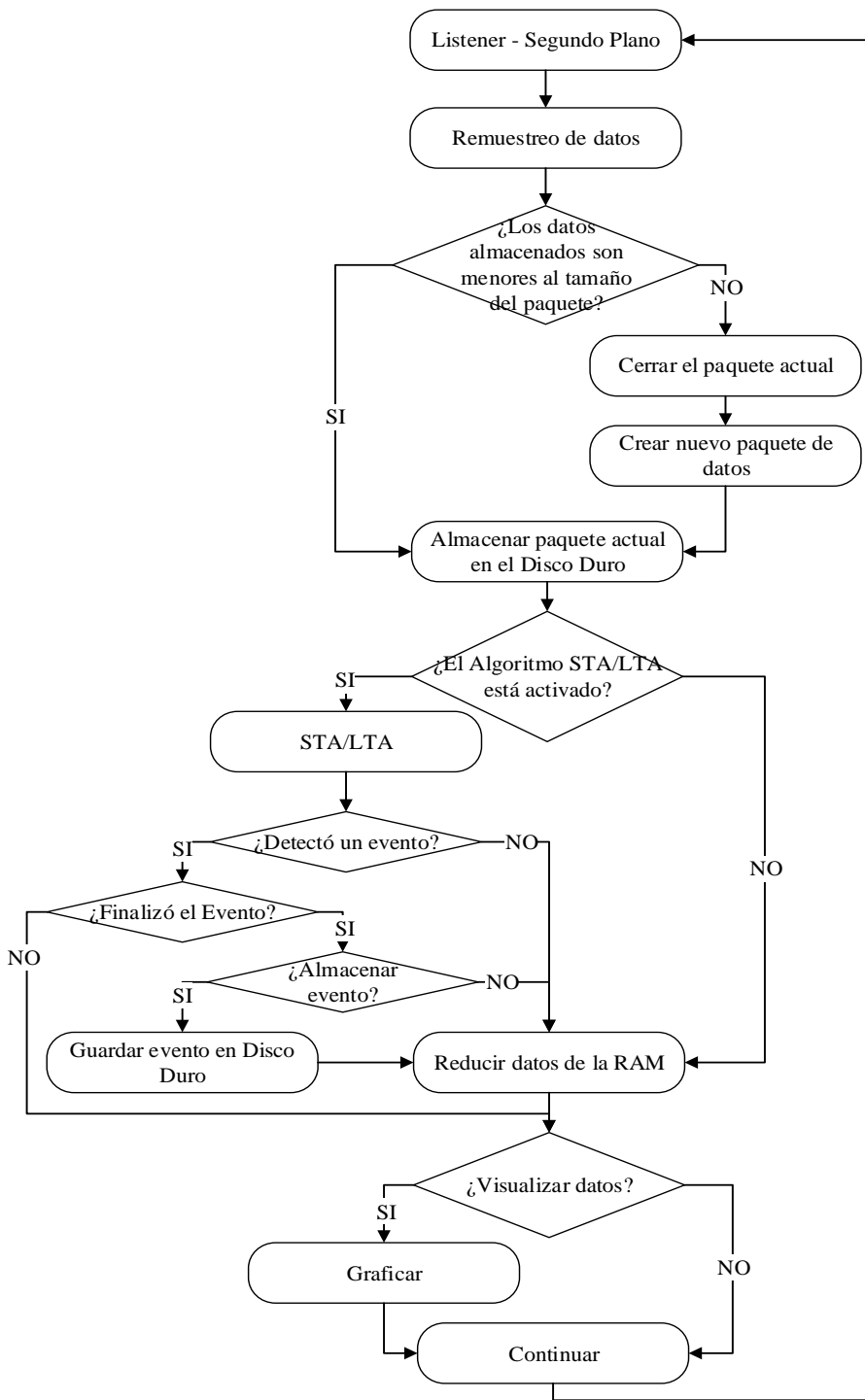


Figura 7. Diagrama de flujo del objeto Listener – Segundo Plano.

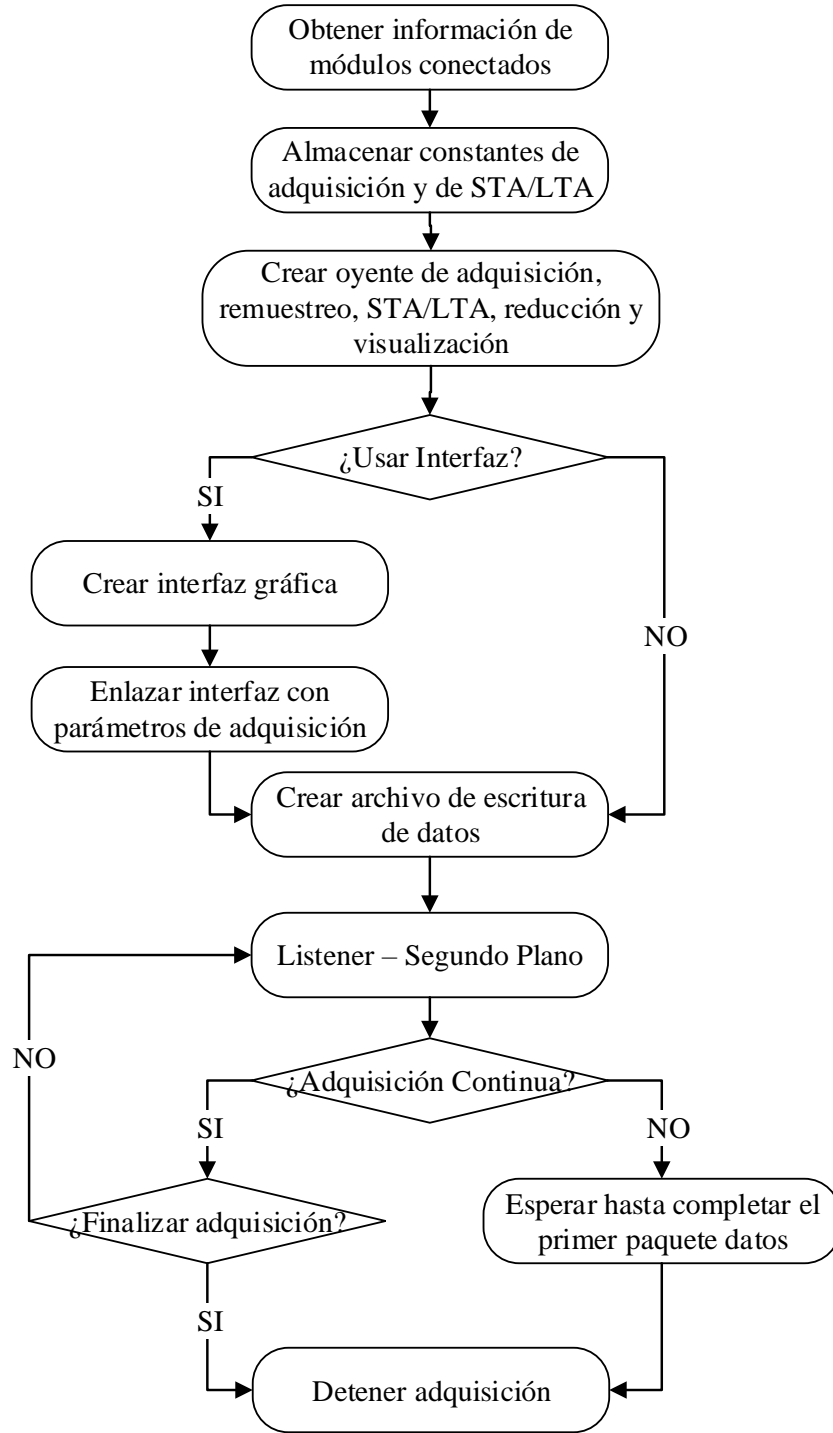


Figura 8. Diagrama de flujo de información de SISMOS.

5.2. Interfaz Gráfica y Parámetros Iniciales

La interfaz del software SISMOS (Figura 9), está compuesta por cinco paneles principales:

(a) Iniciación, se dónde asignan parámetros iniciales de la toma de mediciones, como frecuencia de adquisición, duración de cada paquete de datos, tamaño de la ventana donde se visualiza la información adquirida en tiempo real y, si la adquisición es continua, crea un nuevo paquete de registro inmediatamente después de finalizar el anterior, o si no, crea un único paquete de registro con la duración seleccionada.

(b) Detección, donde se asignan las condiciones iniciales del algoritmo STA/LTA (Capítulo 2.3), se escoge el canal al cual se desea aplicar el algoritmo y si, al identificar el evento, se decide almacenarlo como un archivo independiente.

(c) Adquirir, donde se da inicio y finalización a la adquisición, y adicionalmente el usuario puede convertir los archivos *.bin* almacenados en el disco duro en archivos *.txt* o *.mat*.

(d) Módulo 1 y Módulo 2, donde se visualiza en tiempo real la señal adquirida en cada uno de los seis canales para los que está programado el software, y se observa la iniciación y finalización de un evento sísmico en caso de estar activado el algoritmo STA/LTA.

(e) Progreso del Ensayo, donde se visualiza el avance porcentual del ensayo, la dirección donde se almacenan los datos y el nombre del archivo donde se encuentran los datos.

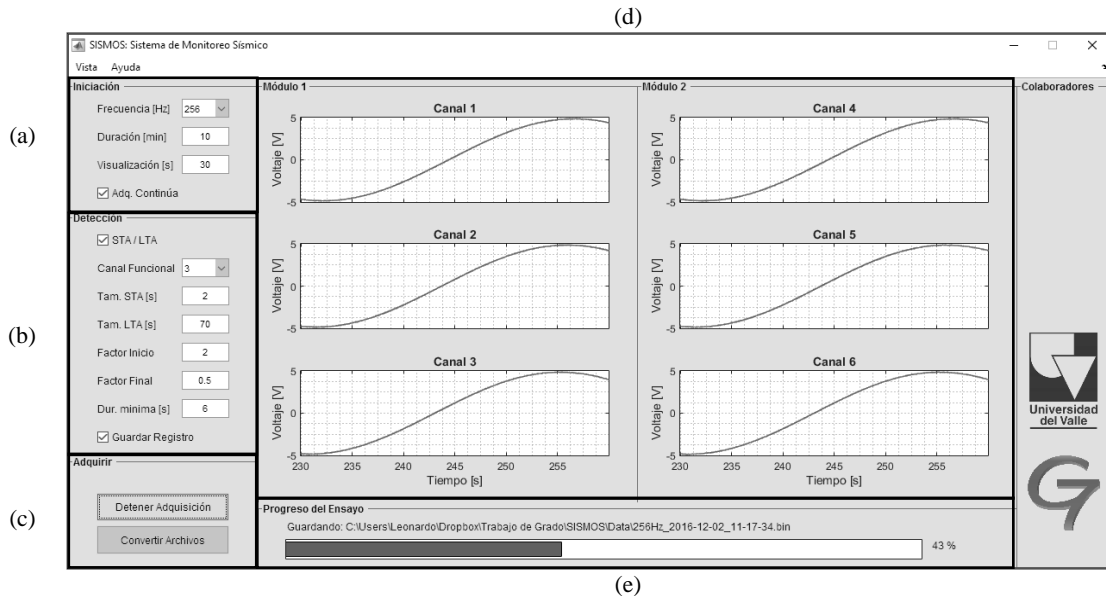


Figura 9. Software SISMOS (Sistema de Monitoreo Sísmico).

La pestaña Vista permite modificar características de la interfaz gráfica, como el color de los paneles, color de letra, tamaño de letra, tipo de fuente, entre otros. La pestaña Ayuda presenta un documento *.pdf* donde se explica el funcionamiento de la interfaz gráfica.

Debe mencionarse que, una vez inicia la adquisición, los parámetros del sistema no podrán ser modificadas por el usuario hasta que esta finalice. Los parámetros iniciales necesarios para el funcionamiento del software, la convención empleada para la programación, unidad en que se ingresa dicho parámetro, el valor por defecto y la calidad de editable o no por el usuario, se presentan en el Anexo 4.

Capítulo 6.

Validación y Verificación del Sistema

6.1. Prueba de Adquisición y Remuestreo en Tiempo Real

Con el objetivo de garantizar la adquisición, remuestreo y almacenamiento en tiempo real de los datos leídos por el sistema, se simuló una señal sinusoidal con el software NIMAX 16.0, empleando un módulo virtual NI-9234. Esta señal tiene ± 5.0 V de amplitud, periodo de 300 segundos y desfase de 4.19 segundos respecto a la señal del canal siguiente (Figura 10). La señal fue simulada a una tasa de muestreo de 2048 Hz y comparada con la señal adquirida por el software SISMOS a una frecuencia de 256 Hz.

Para la comparación de las señales se empleó el parámetro FIT en tiempo y frecuencia, tal como se muestra en la Ecuación 9a. y 9b., donde Y_{ref} es la señal de referencia, \bar{Y}_{ref} es el promedio de la señal de referencia, Y_{adq} es la señal adquirida referenciada, P_{ref} es la amplitud de potencia de la señal de referencia, \bar{P}_{ref} es el promedio de la amplitud de potencia de la señal de referencia, P_{adq} es la amplitud de potencia de la señal adquirida referenciada y los símbolos $\| \cdot \|$ representan la norma del vector.

$$FIT_{tiempo} = \left(1 - \frac{\|Y_{ref} - Y_{adq}\|}{\|Y_{ref} - \bar{Y}_{ref}\|} \right) * 100 [\%] \quad \text{Ecuación 9a.}$$

$$FIT_{frecuencia} = \left(1 - \frac{\|P_{ref} - P_{adq}\|}{\|P_{ref} - \bar{P}_{ref}\|} \right) * 100 [\%] \quad \text{Ecuación 9b.}$$

El parámetro FIT cuantifica la similitud entre una señal de referencia (señal simulada) y una señal adquirida referenciada (señal adquirida por SISMOS); cuanto más cercano sea el valor a 100, mayor similitud tendrán las señales. Los resultados del FIT fueron del 100% para todos los canales, tanto en tiempo como en frecuencia, lo que permite suponer que el remuestreo en tiempo real no altera la señal entre muestras. Adicionalmente, se verificó en el ensayo el correcto almacenamiento de los registros simulados en el disco duro y la eliminación de la información excedente de la memoria RAM del computador.

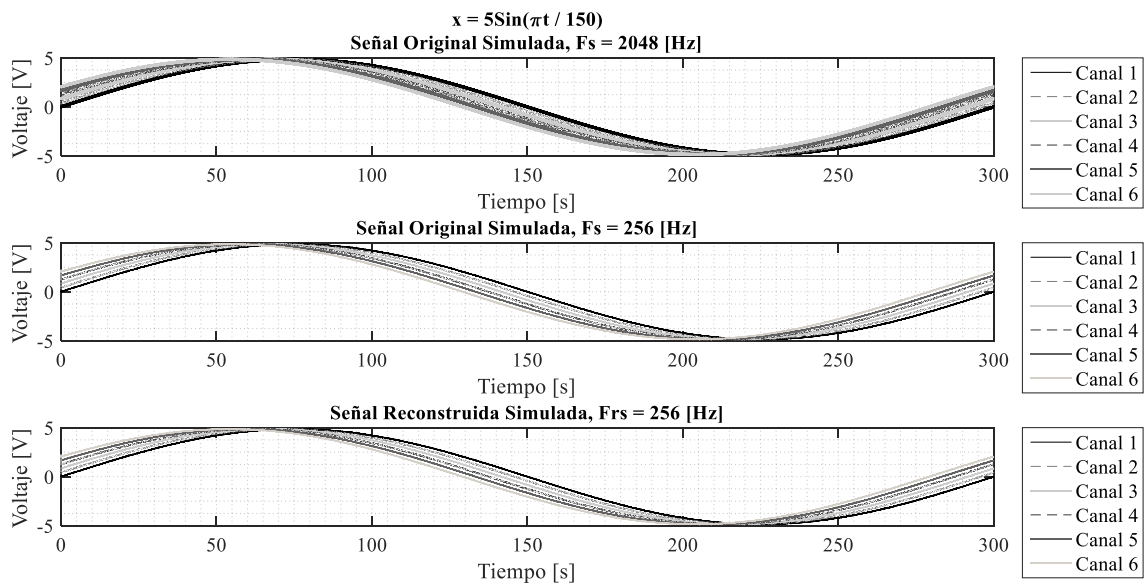


Figura 10. De arriba hacia abajo: Señal original simulada; Señal original remuestreada; Señal adquirida por el algoritmo.

6.2. Ensayo de Calibración y Verificación STA/LTA en Tiempo Real

6.2.1. Calibración de Parámetros del Algoritmo STA/LTA

Con el objetivo de calibrar el algoritmo STA/LTA en tiempo real, se creó una señal de entrada (Figura 11) que consta de: dos impulsos, que representan actividad antrópica, y dos sismos registrados en la estación RAC02 del Servicio Geológico Colombiano (a 200 m de la zona de estudio), los cuales fueron afectados por un factor de reducción de 0.9 (Tabla 1) para evitar que el sistema fuera saturado por la velocidad máxima de los eventos. Esta estación de referencia (RAC02), cuenta con un acelerómetro triaxial marca Kinematics modelo ETNA, de rango dinámico mayor a 186 dB, ganancia variable entre 0.25 y 4.00 g, resolución de 18 bits y frecuencia de adquisición de 200 datos por segundo.

Tabla 1. Sismos señal de entrada para calibración STA/LTA en tiempo real.

No.	Ubicación	Dirección	Fecha [dd/mm/aaaa]	Velocidad máxima [mm/s]	Mw	Profundidad [km]	Distancia epicentral [km]
1	Guaitarilla, Nariño	E-W	9/02/2013	11,551	7,0	162,8	275,683
2	Ecuador	E-W	16/04/2016	2,670	7,8	30,0	504,350

Se instaló el sistema de adquisición, y el sismómetro LE-3Dlite sobre el simulador sísmico de la Universidad del Valle (Anexo 5), se reprodujo la señal de entrada y se registró mediante el software SISMOS, el cual aplica el módulo STA/LTA con los parámetros mostrados en la Tabla 2, propuestos por Trnkoczy (1999; 2002). El ensayo mostró para estos parámetros la detección parcial del primer sismo (Guaitarilla - 2013) y detecciones fraccionadas del segundo sismo (Ecuador - 2016), tal como se observa en la Figura 12a.

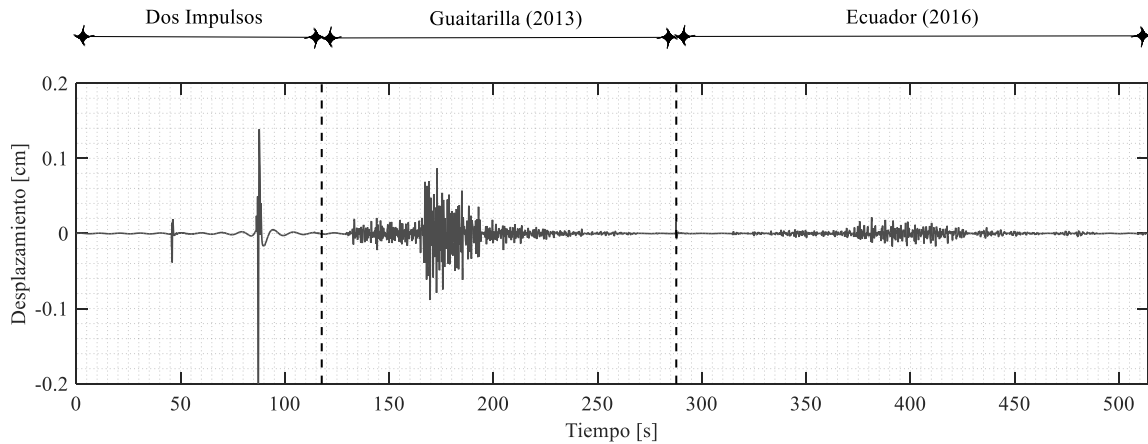


Figura 11. Señal de entrada para calibración STA/LTA en tiempo real.

Luego, para calibrar los parámetros se simuló e iteró en el software Matlab® el paso de la señal registrada con el sismómetro LE-3Dlite por el algoritmo STA/LTA, modificando los parámetros del algoritmo hasta obtener detecciones no fraccionadas de los sismos empleados (Tabla 2 y Figura 12b). Cabe señalar que los parámetros calibrados solo aplican para las condiciones de la zona de estudio especificada y deben ser ajustados una vez se adquieran registros sísmicos con el sistema de instrumentación.

Tabla 2. Parámetros propuestos por Trnkoczy (1999; 2002) vs. Parámetros calibrados.

Variables	Parámetros Trnkoczy	Parámetros Calibrados
Tamaño de ventana STA [s]	1	2
Tamaño de ventana LTA [s]	8	70
Duración mínima para detectar evento [s]	4	6
Tolerancia inicio del evento	2	2
Tolerancia fin del evento	1	0.5

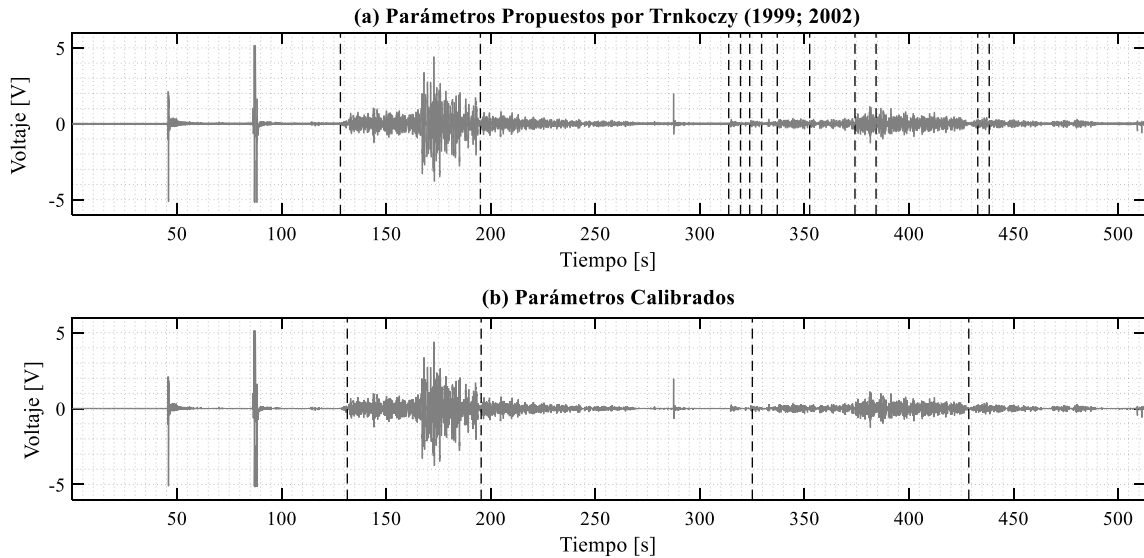


Figura 12. Parámetros propuestos por Trnkoczy (1999; 2002) vs. parámetros calibrados.

6.2.2. Evaluación Algoritmo STA/LTA Calibrado para el Registro de Eventos Sísmicos

Una vez calibrados los parámetros del algoritmo STA/LTA, se evalúan 16 eventos sísmicos registrados por la estación RAC02 (Anexo 7) mediante simulaciones en el software Matlab®. Para ello, las señales fueron convertidas a velocidad empleando el algoritmo de integración numérica en el dominio de frecuencias desarrollado por el profesor Thomson de la Universidad del Valle, y así recrear de mejor manera los registros del sistema de instrumentación.

Los registros sísmicos empleados para esta evaluación se obtuvieron de la página virtual de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia y como criterio de selección se utilizaron registros que tuvieran magnitudes de momento superiores a 4.0 Mw, además de una distancia epicentral respecto a la estación RAC02 menor a 550 km.

El criterio de evaluación fue la duración significativa (Trifunac & Brady, 1975), la cual se define como el lapso de tiempo necesario para que la intensidad de Arias (Arias, 1970) alcance valores entre 5% y 95% de esta. La intensidad de Arias (I_A) se define como una medida simple de la cantidad de daño que puede provocar un sismo y se calcula como la integral entre el inicio del registro t_o y el final de este t_n , del cuadrado de la aceleración medida en un evento sísmico $a^2(\tau)$, tal como se muestra en la Ecuación 10.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{t_o}^{t_n} a^2(\tau) d\tau \quad \text{Ecuación 10.}$$

Se verificó que los tiempos de inicio y finalización dados por el algoritmo STA/LTA calibrado abarcara los tiempos de inicio y finalización según la duración significativa de los sismos. Los resultados obtenidos y enseñados en la Tabla 3, muestran que el algoritmo STA/LTA calibrado para la zona de estudio registra la totalidad de los eventos sísmicos (e.g. Figura 13).

Tabla 3. Iniciación y finalización según STA/LTA y duración significativa.

No	Ubicación	Fecha (dd/mm/aaaa)	Algoritmo STA/LTA		Duración Significativa	
			Inicio [s]	Fin [s]	Inicio [s]	Fin [s]
1	Córdoba, Quindío	25/01/1999	245.2	328.8	264.8	307.1
2	Andalucía, Valle	15/01/2004	236.0	293.0	255.5	283.3
3	Sorata, Cauca	18/08/2004	241.0	342.5	284.0	307.6
4	Bajo Baudó, Chocó	15/11/2004	247.3	301.0	258.8	289.6
5	Toro, Valle	8/03/2005	242.9	297.0	261.6	279.0
6	Buga, Valle	7/10/2011	477.0	576.9	501.6	580.0
7	Sipi, Chocó	1/03/2012	488.3	604.6	523.6	556.2
8	Trujillo, Valle	2/01/2013	248.1	317.8	267.8	292.7
9	Guaitarilla, Nariño	9/02/2013	261.3	354.8	276.0	343.5
10	Bahía Solano, Chocó	13/08/2013	246.1	419.9	277.9	416.1
11	Dagua, Valle	27/08/2013	244.7	319.7	265.8	284.8
12	Cairo, Valle	31/10/2014	248.2	350.7	261.2	340.2
13	Argelia, Valle	21/02/2015	247.8	337.0	277.1	319.9
14	Tumaco, Nariño	30/05/2015	248.1	404.4	302.1	389.0
15	Calima, Valle	5/09/2015	247.9	315.5	271.3	296.7
16	Ecuador	16/04/2016	281.2	421.4	319.8	419.0

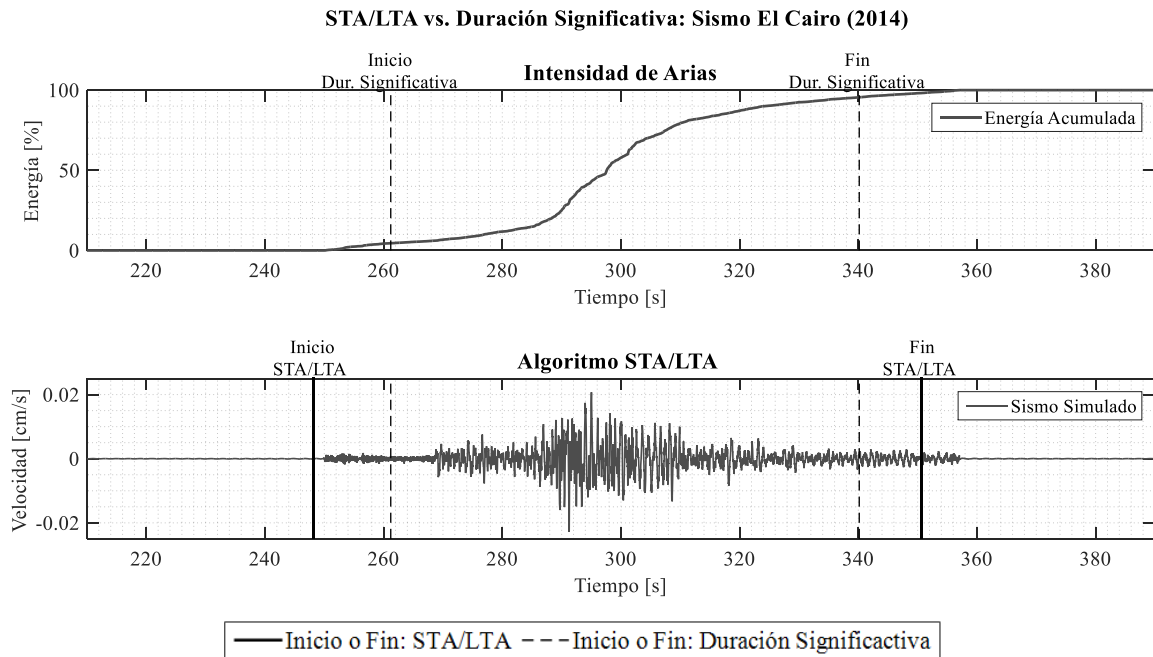


Figura 13. Sismo El Cairo (2004): Inicio y Finalización por duración significativa y STA/LTA.

6.3. Verificación del Funcionamiento del Sistema en Laboratorio

Con el objetivo de garantizar el funcionamiento en conjunto de los elementos del soporte físico (sismómetro superficial LE-3Dlite, sismómetro borehole LE-3D/BH, módulos de adquisición NI-9234, Chasis cDAQ-9174, computador Lenovo ThinkPad W530, cables y conexiones) y el software SISMOS, se realizaron un total de tres montajes experimentales, en los cuales: (a) se instalaron los dos sismómetros con la componente Norte - Sur en el sentido principal del simulador sísmico (Figura 14a) y se sometieron a dos barridos de frecuencias semi-logarítmicos entre 0.5 – 7 Hz y 5 – 15 Hz; (b) se instalaron los dos sismómetros con la componente Este - Oeste en el sentido principal del simulador sísmico

(Figura 14b) y se sometieron a dos barridos de frecuencias semi-logarítmicos entre 0.5 – 7 Hz y 5 – 15 Hz; y (c) se instalaron los dos sismómetros con la componente Vertical perpendicular a una superficie rígida en el patio del edificio 350 (Figura 14c) y, empleando el actuador dinámico cerca a estos, se indujo indirectamente y de manera vertical un barrido de frecuencias entre 5 – 10 Hz.

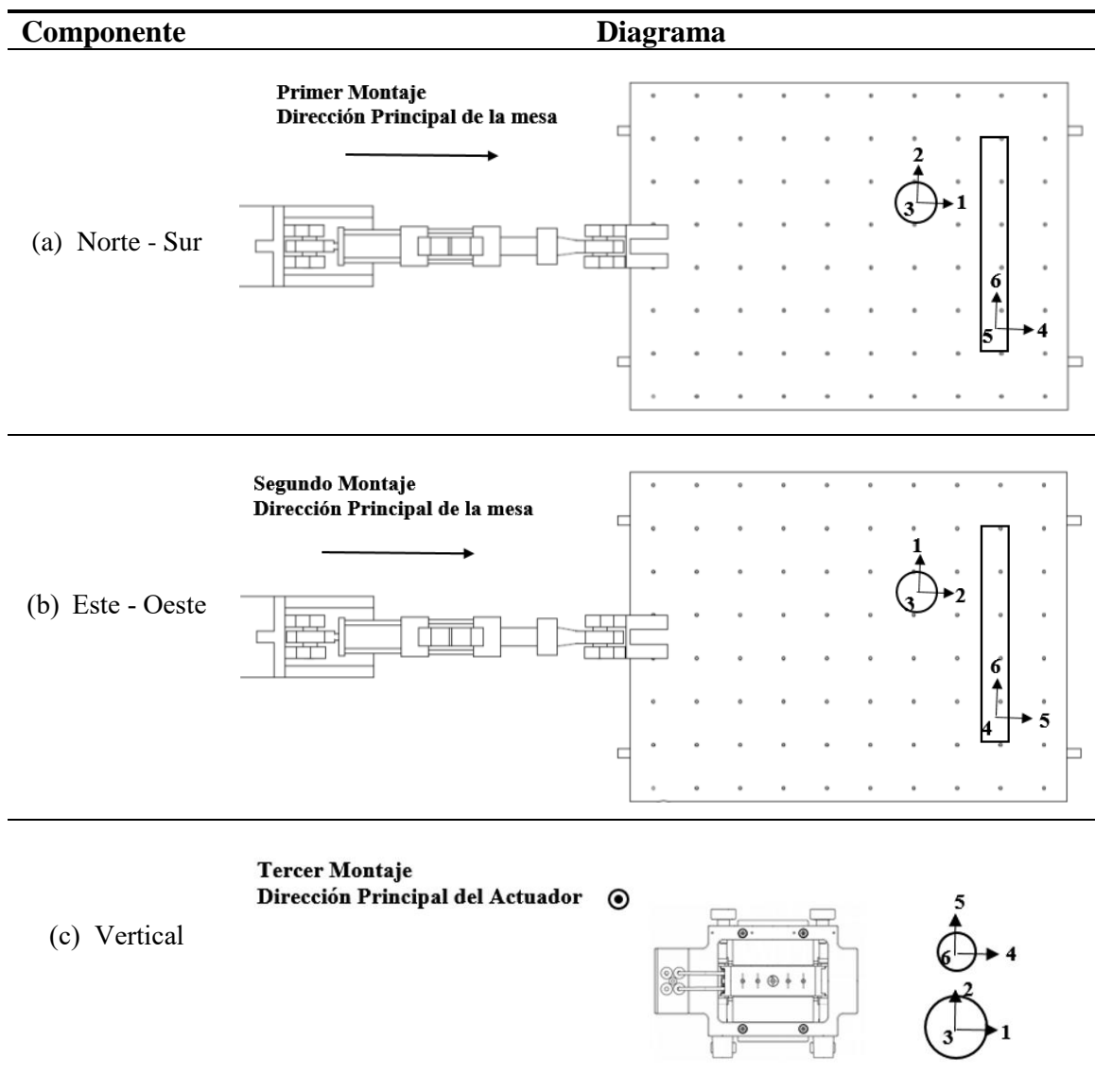


Figura 14. Configuraciones empleadas para verificación de funcionamiento del sistema.

Las señales adquiridas con ambos sensores fueron comparadas en tiempo y frecuencia, sin realizar corrección de fase, buscando identificar posibles inconsistencias en amplitudes o tiempos de adquisición. Para la comparación de las señales se empleó el parámetro FIT en tiempo y frecuencia (Ecuación 9a y 9b), la función de coherencia promedio, y las funciones de transferencia en amplitud y fase promedio.

La función de coherencia toma valores entre 0 y 1, e indica la correspondencia de dos señales en frecuencia. La función de coherencia promedio es el promedio de todos los valores de amplitud de la función de coherencia acotados entre la frecuencia inicial y final del barrido de frecuencias, tal como se muestra en la Ecuación 11., donde C es la amplitud de la función de coherencia, $f_{inicial}$ es la frecuencia inicial del barrido y f_{final} es la frecuencia final del barrido.

$$coh.prom = \frac{\sum_{n=f_{inicial}}^{N=f_{final}} C(f)}{N - n} \quad \text{Ecuación 11.}$$

La magnitud de la función de transferencia identifica la similitud existente entre dos señales en amplitudes de frecuencias y, su ángulo de fase indica si ambas señales se encuentran sincronizadas. El valor promedio de la función de transferencia será cercano a 1 cuando ambas señales presenten amplitudes similares y el valor promedio de la fase será cercano a 0 cuando ambas señales se encuentren en fase. Los promedios de función de transferencia y fase se calcularon de forma análoga a la coherencia promedio.

Los resultados obtenidos muestran una correspondencia satisfactoria de las señales adquiridas por los sismómetros mediante el software SISMOS, y evidencian la correcta adquisición simultánea de ambos sensores para todos sus canales. Las gráficas de resultados se encuentran en el Anexo 6 y se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la comparación entre sismómetros.

Componente Sismómetros	Equipo Ensayo	Barrido [Hz]	FIT_{tiempo}	FIT_{frecuencia}	Coh._{prom} [Amplitud]	Transf._{prom} [Amplitud]	Fase._{prom} [deg.º]
Norte - Sur	Simulador	0.5 – 7	0.99	0.99	1.00	1.00	0.28
	sísmico	5 – 15	0.99	1.00	1.00	1.00	0.32
Este - Oeste	Simulador	0.5 – 7	0.97	0.98	1.00	1.01	0.68
	Sísmico	5 – 15	0.99	0.98	1.00	1.01	0.26
Vertical	Actuador	5 – 10	0.98	0.96	1.00	0.99	0.80

6.4. Análisis de Tolerancia del Sistema ante Eventos Sísmicos

Con el objetivo de identificar qué tipo de eventos sísmicos podrían saturar el sistema, a partir de 16 registros de aceleraciones obtenidos de la estación sismológica RAC02 del Servicio Geológico Colombiano (Anexo 7), se realizó un análisis de señales para obtener información representativa de las velocidades máximas superficiales esperadas en la zona de estudio.

Los registros de aceleración se remuestrearon a una tasa de 100 datos por segundo y se realizó corrección de línea base. Los registros fueron convertidos a velocidad empleando el algoritmo de integración numérica en el dominio de frecuencias desarrollado por el profesor Thomson de la Universidad del Valle. Luego, se comparó la velocidad máxima de la componente de mayor amplitud con la velocidad de saturación de los sismómetros Lennartz, la cual corresponde a 1.25 cm/s. Debe mencionarse que este umbral de saturación corresponde no puede ser modificado puesto que este depende del voltaje máximo que puede emitir los sismómetros, así como el que puede leer los módulos de adquisición.

La Figura 15 muestra que los sismos de Córdoba (1999), Bajo Baudó (2004) y Guaitarilla (2013) fueron los únicos eventos que excedieron el umbral de saturación del sistema de instrumentación, por lo cual, estos serían capturados solo de manera parcial, perdiendo

información relevante. Dos de los registros que saturaron el sistema fueron sismos superficiales con magnitudes superiores a 6.0 Mw, y el otro fue un sismo intermedio de magnitud 7.0 Mw, características poco usuales para sismos frecuentes en la región. Los sismos inferiores a 6.0 Mw están por debajo del umbral, lo cual permitiría que estos fueran medidos sin inconvenientes por el sistema.

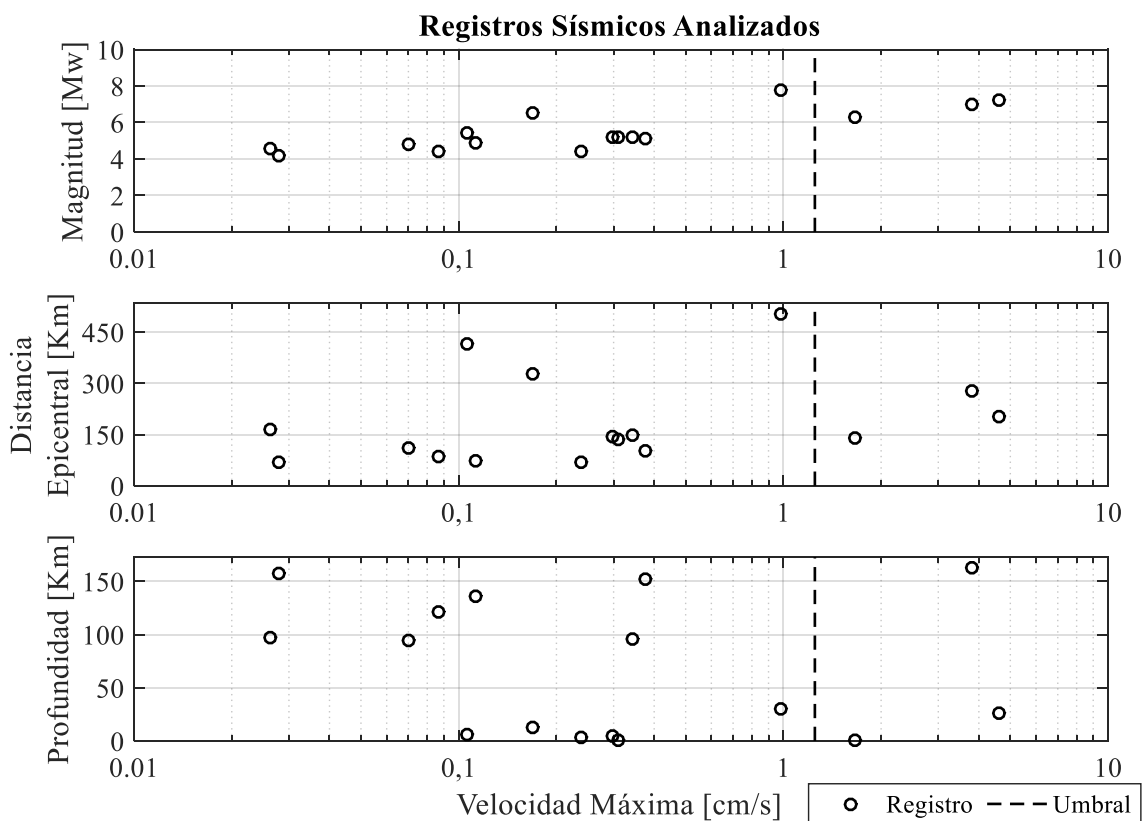


Figura 15. Umbral de tolerancia y velocidad maxima de cada sismo analizado.

Capítulo 7.

Montaje Experimental y Análisis de Resultados

El 7 de febrero del 2017 se realizó un montaje experimental en la perforación de estudio del edificio 350 de la Universidad del Valle, con el objetivo de: validar el funcionamiento del sistema de instrumentación en campo; obtener registros de vibraciones durante un periodo¹; y determinar la frecuencia fundamental del suelo y su factor de amplificación según, el tipo de vibraciones obtenidas.

Antes de realizar el descenso en la perforación del sismómetro de profundidad se extendió una cama de arena silíceca en el fondo, y una vez hecho el descenso y aplomado del sensor, se dejó caer arena desde la superficie para garantizar el confinamiento lateral entre el equipo y la perforación. Posteriormente, se instaló y niveló el sismómetro superficial a 10 cm de la perforación de estudio. Se realizaron mediciones de velocidades desde las 12:00

¹ El SESAME recomienda registros hasta de una hora máximo para estimar efectos de sitio (Bard & SESAME-Team, 2005). Se tomaron registros para validar el desempeño del sistema de instrumentación a través del tiempo por 10 horas.

M.d. hasta la 1:00 a.m., tomando un receso entre las 5:00 p.m. y las 8:00 p.m. En el transcurso del ensayo se llevó una bitácora de campo donde se registraron eventualidades que pudieron interferir en la toma de mediciones, además de un breve reconocimiento visual, basado en las recomendaciones hechas por Bard y el Equipo Sesame (2005). Durante este periodo no hubo ocurrencia de eventos sísmicos, por lo que todos los registros tomados corresponden a vibraciones ambientales.

7.1. Pre-procesamiento de Registros

Finalizada la toma de registros, la información fue analizada en periodos de análisis de una hora, a los cuales se les aplicó procesamiento digital de señales y los métodos de estimación de efectos de sitio HVSR y SSR para vibraciones ambientales, obteniendo así la frecuencia fundamental del suelo, su factor de amplificación y el ancho de banda de frecuencias predominantes.

Los periodos de análisis comprendidos entre 12:00 M.d. y 5:00 p.m. corresponden a un tránsito normal vehicular y peatonal de estudiantes y funcionarios de la universidad, con una cantidad y frecuencia de flujo aleatorio. Los periodos de análisis entre 8:00 p.m. y 10:00 p.m., corresponden al momento en el cual los estudiantes se encuentran evacuando el campus universitario al haber finalizado su jornada académica, con un volumen y frecuencia de tránsito peatonal y vehicular que va disminuyendo gradualmente con el paso de las horas. Los periodos de análisis entre 10:00 p.m. y la 1:00 a.m. corresponden al momento en el cual solo se encuentra presente el personal de vigilancia en el campus universitario.

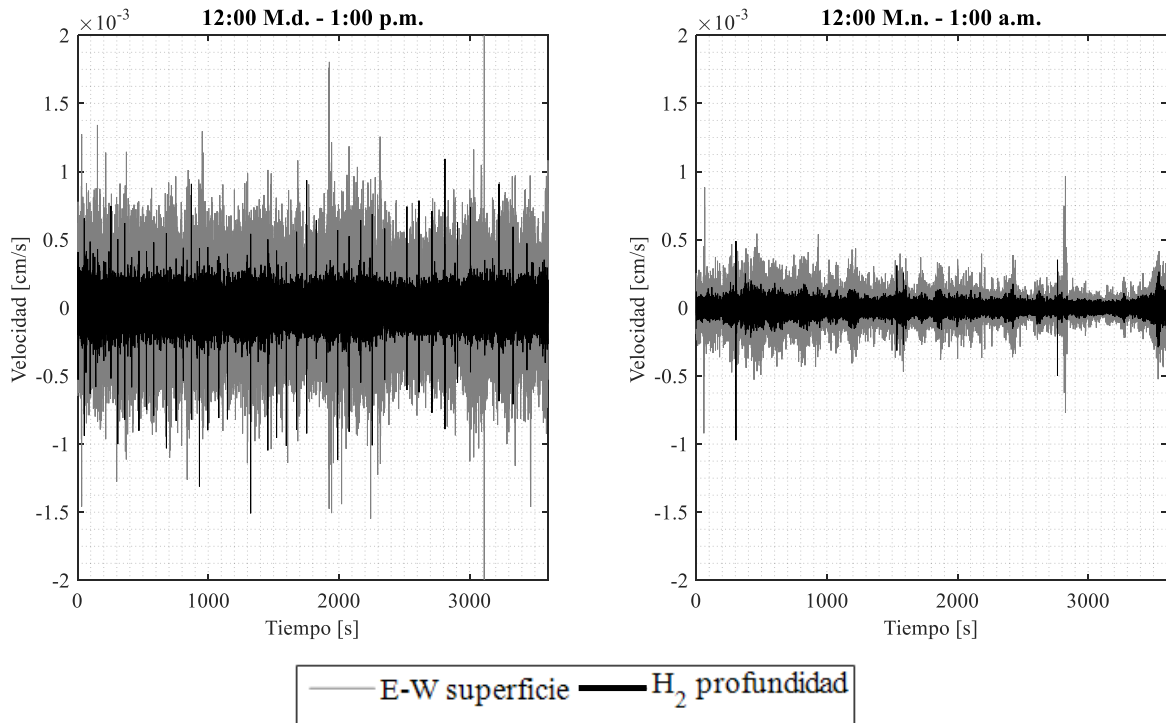


Figura 16. Registros en Tiempo 12:00 M.d. – 1:00 p.m. y 12:00 M.n. – 1:00 a.m.

La Figura 16 muestra los registros temporales 12:00 M.d. – 1:00 p.m. y 12:00 M.n. – 1:00 a.m., donde se evidencia una reducción significativa del nivel de vibraciones presente en los registros de la madrugada tanto en el sensor de superficie como en el de profundidad, consistente con la baja cantidad de personal dentro del campus. De igual manera, la Figura 17 y la Figura 18 muestran los espectros de densidad de potencia obtenidos para todos periodos de análisis, donde se evidencia una mayor energía para las frecuencias superiores a 1 Hz en el sensor superficial, y un mayor contenido de energía para frecuencias inferiores a 1 Hz para el sensor de profundidad, para todos los casos, con excepción del primer y último registro comprendidos entre las 12:00 M.d. y la 1:00 p.m., y 12:00 M.n. y 1:00 a.m., esto se atribuye al personal de operación del sistema de instrumentación que en estos horarios se encontraba realizando las actividades de adecuación del lugar y almacenamiento de herramientas.

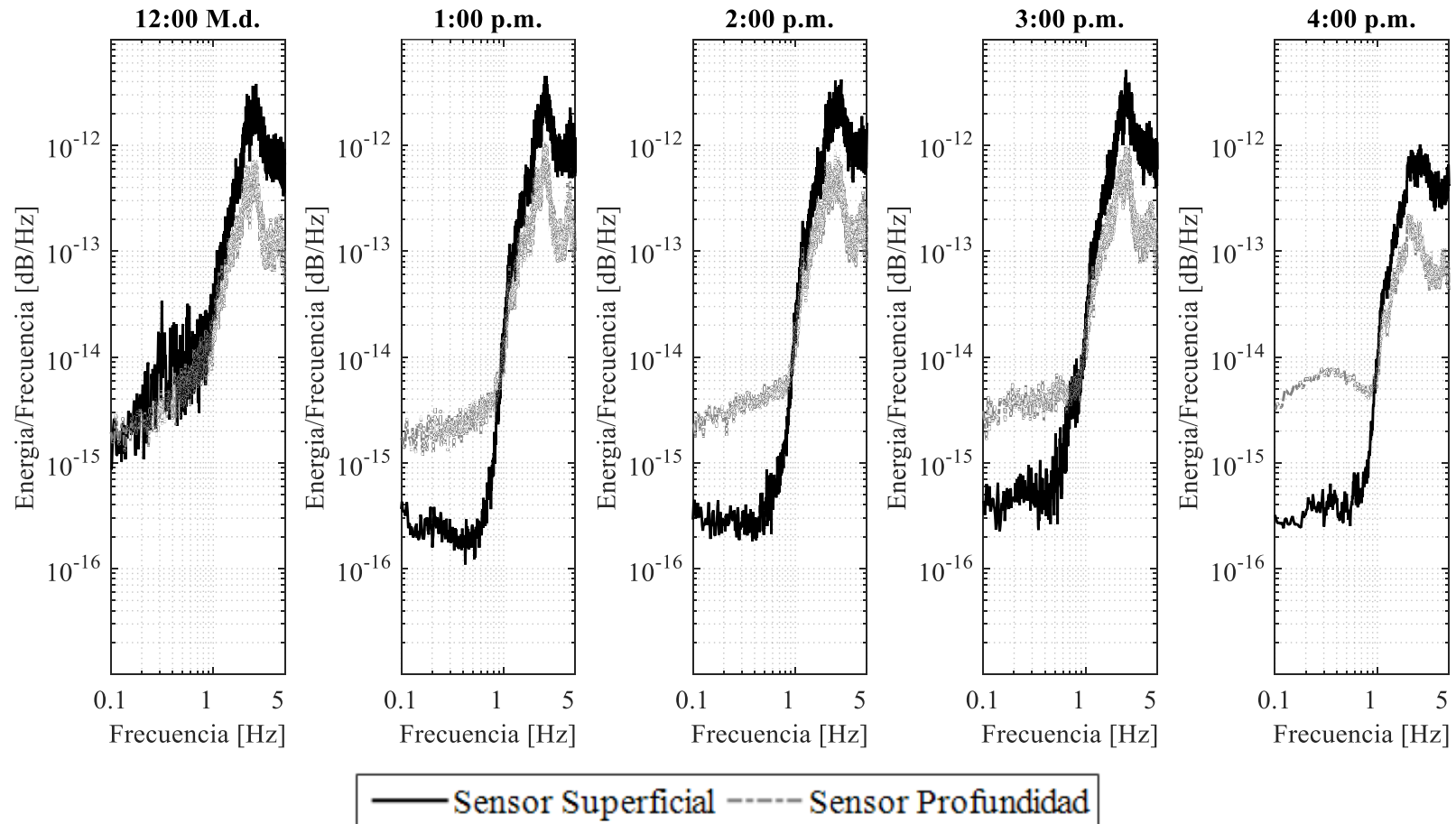


Figura 17. Espectros de densidad de potencia promedio con vibraciones ambientales, 12:00 M.d. – 5:00 p.m. La hora sobre cada grafica corresponde a la hora inicial del registro.

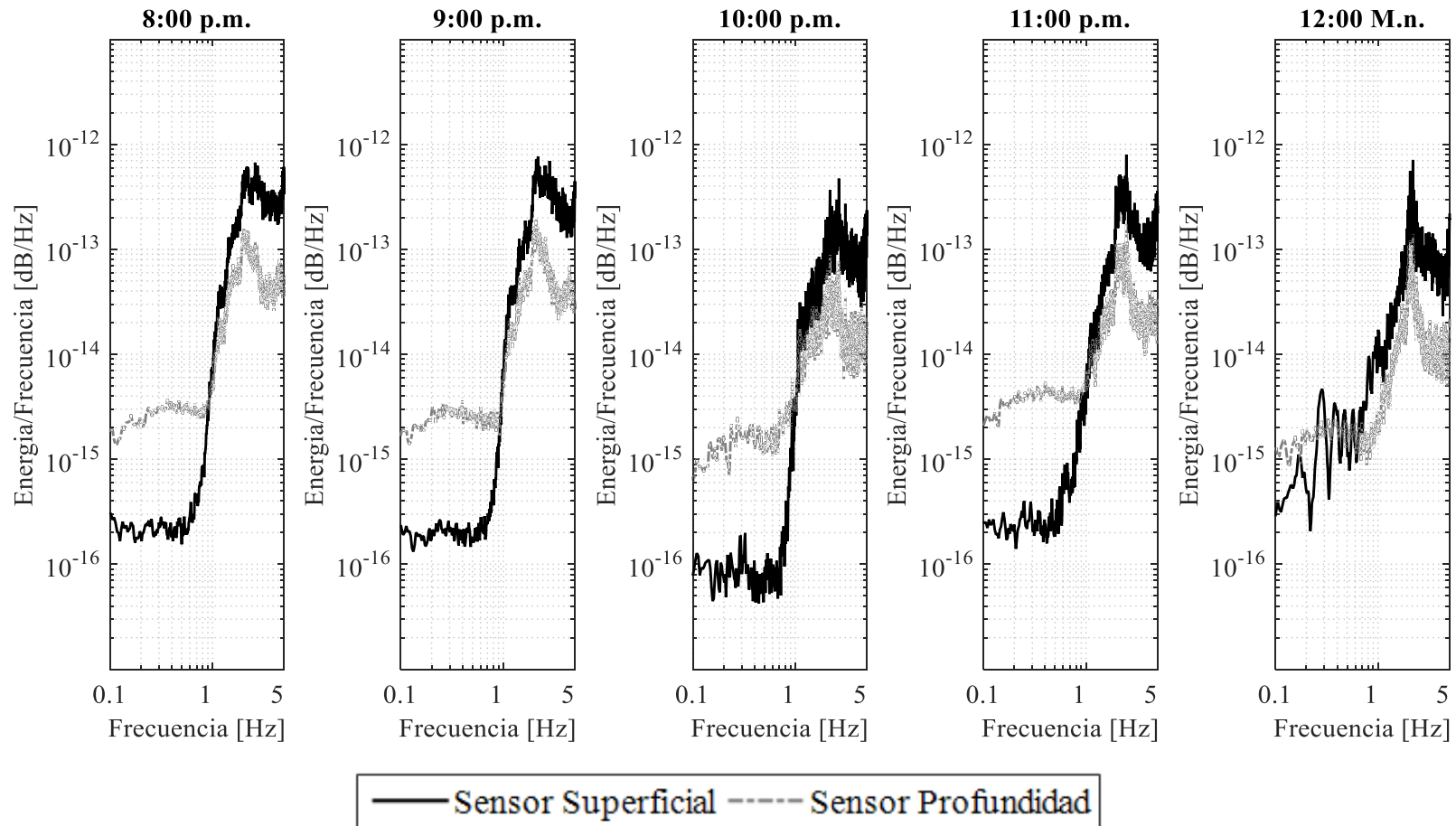


Figura 18. Espectros de densidad de potencia promedio con vibraciones ambientales, 8:00 p.m. – 1:00 a.m. La hora sobre cada grafica corresponde a la hora inicial del registro

A cada paquete de registro se le realiza corrección de línea base, se aplica un filtro tipo *lowpass* a 20 Hz, y posteriormente se divide en 8 ventanas traslapadas en 50%. Para la aplicación de los métodos de estimación de los efectos de sitio, en cada ventana se realiza la combinación de las componentes horizontales empleando la media cuadrática y siguiendo las recomendaciones de Bard (1999; 2005) y Albarello y Lunedei (2013). La Ecuación 12. presenta la media cuadrática, donde H_1 es la componente horizontal en el sentido ortogonal 1 (dominio frecuencial) y H_2 es la componente horizontal en el sentido ortogonal 2 (dominio frecuencial).

$$H = \sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2}{2}} \tag{Ecuación 12.}$$

Debido a la no ocurrencia de eventos sísmicos durante la toma de registros, para comparar las funciones de transferencia obtenidas con vibraciones ambientales, fue necesario obtener funciones de transferencia mediante los métodos HVSR y SSR empleando registros sísmicos adquiridos en la estación de superficie RAC02 (a 200 m de la zona de estudio), y en las estaciones sobre afloramientos rocosos RAC04 - corregimiento La Reforma (a 6.3 km de RAC02) y RAC07 - Ecoparque Bataclán (a 10.6 km de RAC02). Todas estas estaciones cuentan con el mismo equipo Kinometrics, cuyas características fueron descritas en la sección 6.2.1. Para ello se emplearon los registros sísmicos de la Tabla 5, los cuales fueron remuestreados a una tasa de 100 datos por segundo y luego analizados para cada una de sus componentes horizontales.

Como criterio de selección para los eventos sísmicos se tomó como condición que hubieran sido registrados tanto por la estación RAC02 como por alguna de las estaciones sobre afloramientos rocosos RAC04 o RAC07, y que a la fecha de registro las estaciones contaran con sistemas de instrumentación de características similares.

Tabla 5. Sismos empleados para los métodos HVSR y SSR.

Ubicación	Fecha	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Sensor en Superficie	Sensor de Referencia
Sorata, Cauca	18/08/2004	5.2	1.0	RAC02	RAC07
Toro, Valle	08/03/2005	5.2	5.0	RAC02	RAC04
Calima, Valle	30/04/2006	4.4	59.5	RAC02	RAC04

7.2. Procesamiento de Datos y Resultados

7.2.1. HVSR con Vibraciones Ambientales

Para la aplicación del método HVSR, para cada ventana se realiza el cociente entre las componentes horizontales combinadas del sensor en superficie y su componente vertical en superficie. Luego, se construye una función de transferencia promedio para periodos de análisis de una hora. Finalmente, para las funciones de transferencia promedio obtenidas, se construyen las envolventes superior, inferior y envolvente promedio, utilizando la interpolación de los máximos y mínimos locales para separaciones de 8 muestras. La Figura 19 y la Figura 20 presentan un resumen de las funciones de transferencia obtenidas.

Los resultados muestran, para todos los registros de vibraciones ambientales, frecuencias fundamentales entre 1.13 Hz y 1.60 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.62 \text{ s} - 0.88 \text{ s}$), con un factor de amplificación de la envolvente promedio entre 7.11 y 12.00. Adicionalmente, se muestra para los periodos entre 2:00 p.m. – 5:00 p.m. y 8:00 p.m. – 10:00 p.m. una baja variación en el factor de amplificación. Estos resultados son cercanos a las frecuencias fundamentales reportadas en el Mapa de Isoperiodos por Microtrepidaciones (MZSC-RS1) de la Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (INGEOMINAS & DAGMA, 2005), cuyos resultados arrojaron frecuencias fundamentales entre 0.77 Hz y 1.25 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.80 \text{ s} - 1.30 \text{ s}$). La Tabla 6 resume la frecuencia fundamental identificada, los valores de banda entre los que se encuentra y el factor de amplificación para cada periodo de análisis.

Tabla 6. Resumen de frecuencias fundamentales y factor de amplificación identificados con HVSR aplicado a vibraciones ambientales. Los datos subrayados corresponden a datos no representativos.

Periodo de Análisis	Banda de Frecuencia Predominantes [Hz]	Frecuencia Fundamental [Hz]	Factor de Amplificación
12:00 M.d. – 1:00 p.m.	0.70 – 2.30	1.37	9.82
1:00 p.m. – 2:00 p.m.	0.77 – 2.42	<u>1.13</u>	10.21
2:00 p.m. – 3:00 p.m.	0.73 – 1.81	1.38	7.43
3:00 p.m. – 4:00 p.m.	0.85 – 1.80	1.33	7.86
4:00 p.m. – 5:00 p.m.	0.82 – 2.08	1.40	7.81
8:00 p.m. – 9:00 p.m.	0.60 – 2.38	1.35	7.11
9:00 p.m. – 10:00 p.m.	0.82 – 1.82	<u>1.57</u>	7.15
10:00 p.m. – 11:00 p.m.	0.87 – 2.22	1.48	12.00
11:00 p.m. – 12:00 p.m.	1.06 – 1.90	<u>1.60</u>	10.04
12:00 M.n. – 1:00 a.m.	1.06 – 2.18	<u>1.57</u>	9.17

Debido a la dispersión de datos, para el análisis de resultados se tomará como datos representativos aquellas frecuencias fundamentales que se encuentran entre la media aritmética más o menos una desviación estándar. Aplicando esto, los resultados obtenidos muestran que las frecuencias fundamentales se encuentran entre 1.33 Hz y 1.48 Hz, con un valor promedio de 1.38 Hz; y los factores de amplificación entre 7.11 y 12.00 con un valor promedio de 8.67 (Anexo 8).

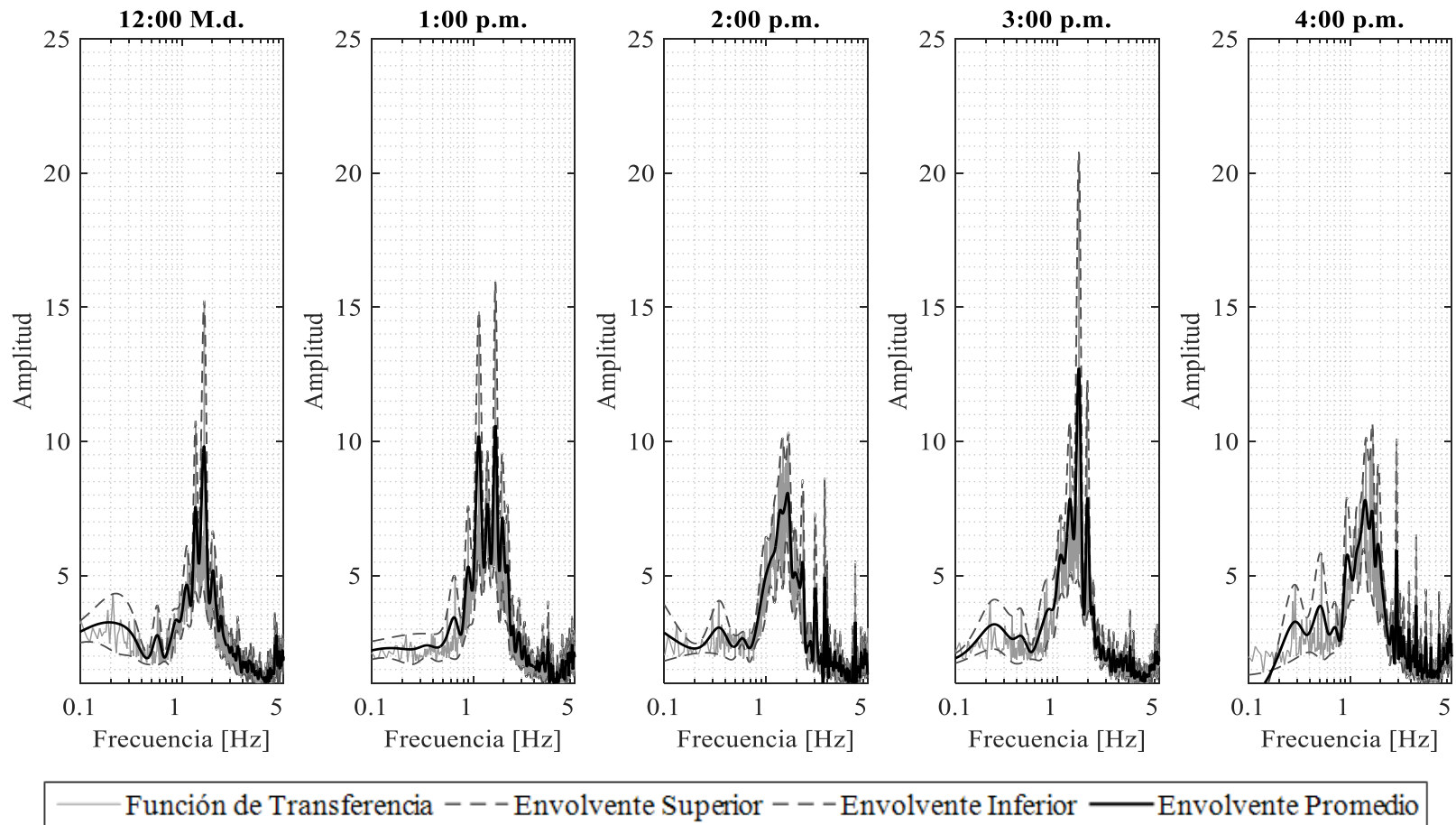


Figura 19. Funciones de transferencia promedio, HVSR con vibraciones ambientales, 12:00 M.d. – 5:00 p.m. . La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.

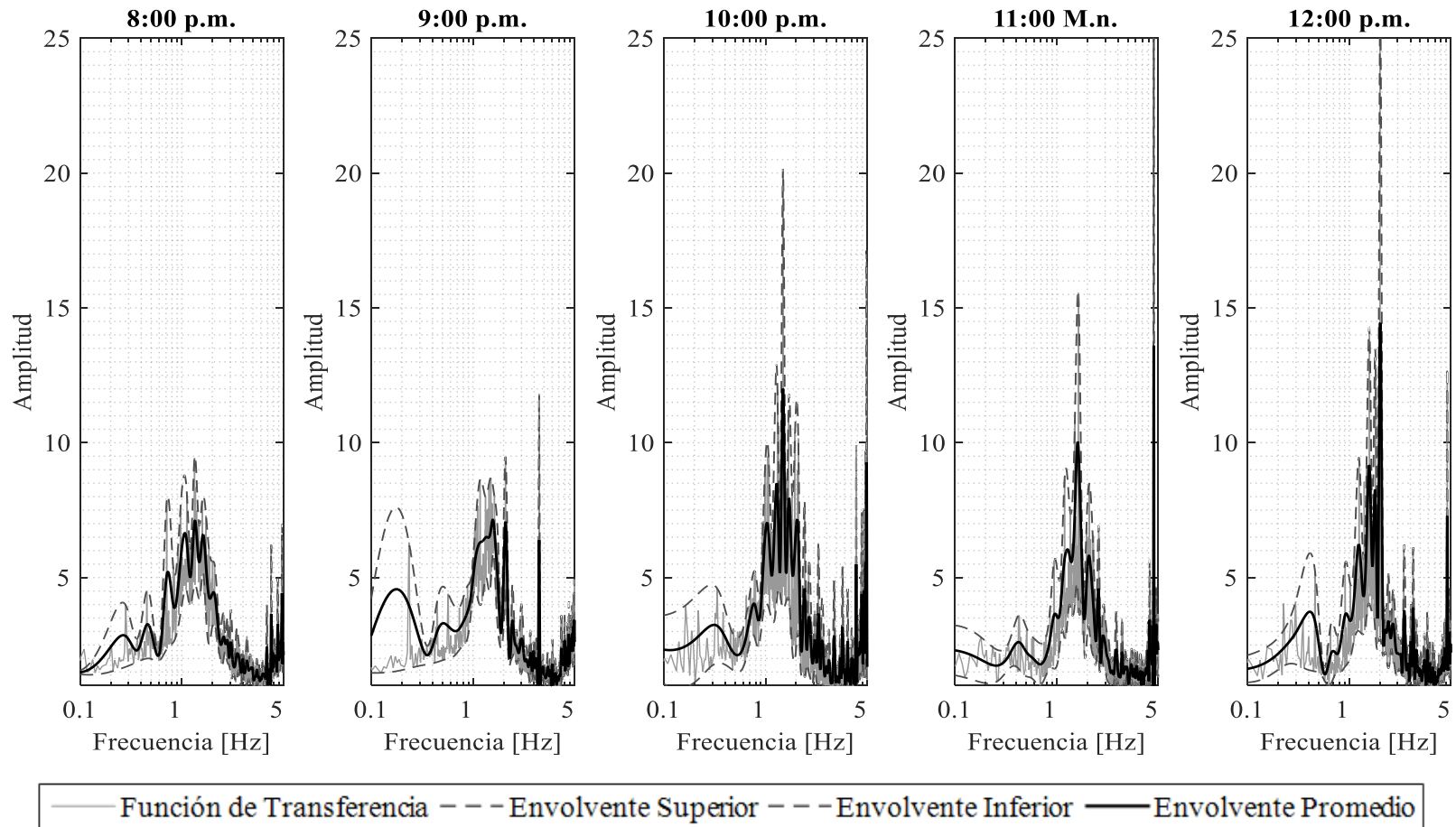


Figura 20. Funciones de transferencia promedio, HVSr con vibraciones ambientales, 8:00 p.m. – 1:00 a.m. La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.

7.2.2. SSR con Vibraciones Ambientales

Para la aplicación del método SSR, para cada ventana se realiza el cociente entre las componentes horizontales combinadas del sensor en superficie y su correspondiente del sensor en profundidad, obteniendo una función transferencia. Luego, se construye una función de transferencia promedio para periodos de análisis de una hora. Finalmente, para las funciones de transferencia promedio obtenidas, se construyen las envolventes superior, inferior y envolvente promedio, utilizando la interpolación de los máximos y mínimos locales para separaciones de 8 muestras. La Figura 21 y la Figura 22 presentan las funciones de transferencia obtenidas.

Los resultados muestran, para todos los periodos de análisis, una amplificación considerable para frecuencias superiores a 1 Hz ($T < 1$ s), lo cual dificulta la detección de la frecuencia fundamental del suelo, aspecto consistente con lo reportado en la literatura (Bard, 1999; Bard & SESAME-Team, 2005; Kudo, 1995). Sin embargo, tomando como referencia el Mapa de Isoperiodos por Microtrepidaciones (MZSC-RS1) de la Microzonificación Sísmica de Santiago Cali (INGEOMINAS & DAGMA, 2005), el cual reporta una frecuencia fundamental del suelo entre 0.77 Hz y 1.25 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.80$ s - 1.30 s), y los resultados obtenidos usando el método de HVSR para vibraciones ambientales (Tabla 6), se observa en la mayoría de funciones de transferencia pequeños picos locales en la banda de frecuencias entre 0.85 Hz y 1.47 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.68$ s - 1.18 s), con factor de amplificación de la envolvente promedio de 1.64. La Tabla 7 resume la frecuencia fundamental identificada, los valores de banda entre los que se encuentra y el factor de amplificación para cada periodo de análisis.

Tabla 7. Resumen de frecuencias fundamentales y factor de amplificación identificados con SSR aplicado a vibraciones ambientales.

Periodo de Análisis	Banda de Frecuencias Predominantes [Hz]	Frecuencia Fundamental [Hz]	Factor de Amplificación
12:00 M.d. – 1:00 p.m.	-	-	-
1:00 p.m. – 2:00 p.m.	-	-	-
2:00 p.m. – 3:00 p.m.	-	-	-
3:00 p.m. – 4:00 p.m.	1.17 - 1.35	1.23	1.58
4:00 p.m. – 5:00 p.m.	1.17 – 1.47	1.30	1.65
8:00 p.m. – 9:00 p.m.	1.14 – 1.36	1.28	1.54
9:00 p.m. – 10:00 p.m.	1.15 – 1.34	1.22	1.58
10:00 p.m. – 11:00 p.m.	1.12 – 1.29	1.20	1.52
11:00 p.m. – 12:00 p.m.	0.85 – 1.19	1.06	1.64
12:00 M.n. – 1:00 a.m.	1.10 – 1.38	1.26	1.97

Los resultados obtenidos no muestran dispersión de los datos (todas las frecuencias fundamentales se encuentran entre la media aritmética más o menos una desviación estándar), por lo que se considera que las frecuencias fundamentales se encuentran entre 0.85 Hz y 1.47 Hz, con un valor promedio de 1.22 Hz; y los factores de amplificación entre 1.52 y 1.97, con un valor promedio de 1.64 (Anexo 9).

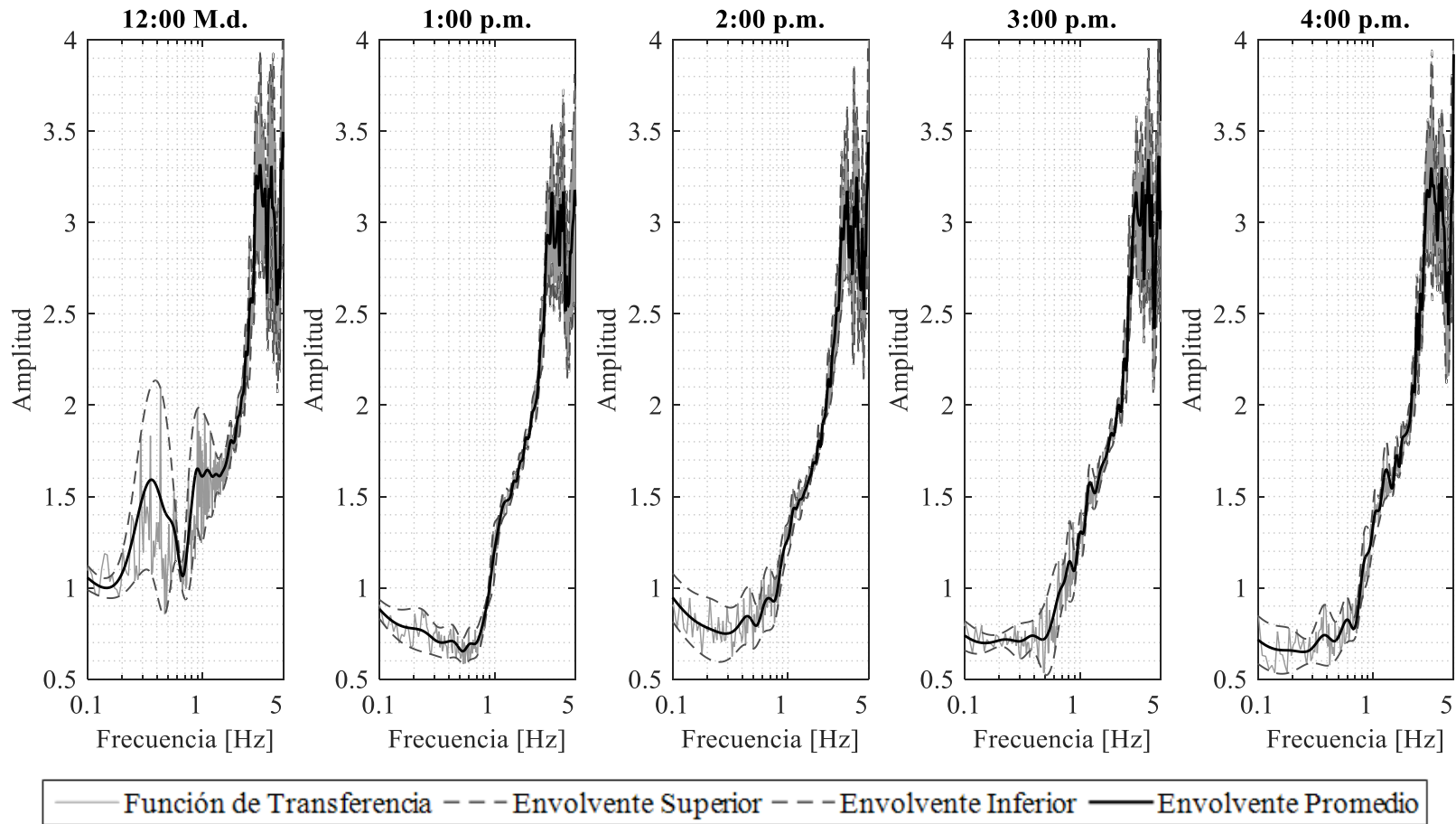


Figura 21. Funciones de transferencia promedio, SSR con vibraciones ambientales, 12:00 M.d. – 5:00 p.m. La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.

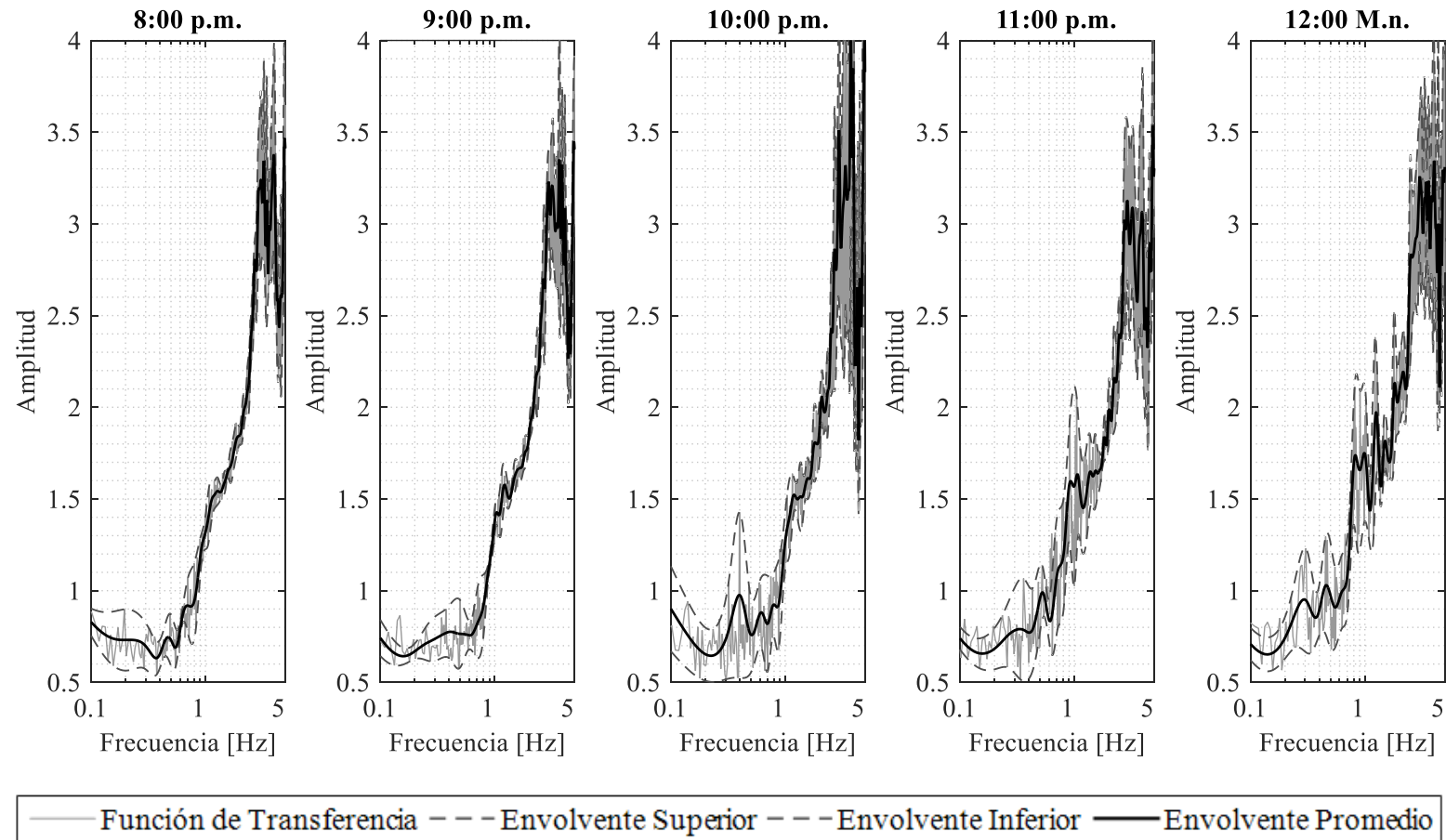


Figura 22. Funciones de transferencia promedio, SSR con vibraciones ambientales, 8:00 p.m. – 1:00 a.m. La hora sobre cada figura corresponde a la hora inicial del registro.

7.2.3. HVSR con Registros Sísmicos

Utilizando los registros de las estaciones expuestas en la sección 7.1, para la aplicación del método HVSR con registros sísmicos, se realiza el cociente entre la componente horizontal del registro sísmico en superficie con la correspondiente componente vertical. Luego, se construye una función de transferencia promedio para periodos de análisis de una hora. Finalmente, para las funciones de transferencia promedio obtenidas, se construyen las envolventes superior, inferior y envolvente promedio, utilizando la interpolación de los máximos y mínimos locales para separaciones de 8 muestras.

En este estudio se obtuvo la función de transferencia para cada componente horizontal (E-W y N-S), y luego para su combinación mediante la media cuadrática (Ecuación 12.), con el objetivo de identificar su incidencia en la frecuencia fundamental y el factor de amplificación. La Figura 23, la Figura 24 y la Figura 25 presentan las funciones de transferencia obtenidas para cada evento sísmico, en cada una de sus componentes horizontales, y al realizar la media cuadrática.

Los resultados de los eventos sísmicos muestran, para la componente Norte - Sur, frecuencias fundamentales entre 0.83 Hz y 1.15 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.87 \text{ s} - 1.20 \text{ s}$), y factor de amplificación entre 9.35 y 82.49; para la componente Este - Oeste, frecuencias fundamentales entre 0.70 Hz y 1.11 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.90 \text{ s} - 1.43 \text{ s}$), y factor de amplificación entre 9.06 y 56.61; y para la combinación de componentes, frecuencias fundamentales entre 0.73 Hz y 1.15 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.87 \text{ s} - 1.37 \text{ s}$), y factor de amplificación entre 20.24 y 72.74. Se observa gran dispersión del factor de amplificación identificado en cada componente y para cada registro. La función de transferencia obtenida con la media cuadrática de las componentes horizontales presenta una buena convergencia hacia a la frecuencia fundamental identificada pero la amplitud presenta variaciones considerables respecto a las

obtenidas con las componentes analizadas de manera individual. Estos resultados se encuentran entre los reportados en el Mapa de Isoperiodos por Microtrepidaciones (MZSC-RS1) de la Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (INGEOMINAS & DAGMA, 2005), cuyos resultados arrojaron frecuencias fundamentales entre 0.77 Hz y 1.25 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.80 \text{ s} - 1.30 \text{ s}$). La Tabla 8 resume la frecuencia fundamental identificada, los valores de banda entre los que se encuentra y el factor de amplificación para cada evento sísmico para cada componente y empleando la combinación de componentes mediante su media cuadrática.

Tabla 8. Resumen de frecuencias fundamentales y factores de amplificación identificados con HVSR aplicado a registros sísmicos.

Sismo	Componente	Banda de Frecuencias Predominantes	Frecuencia Fundamental	Factor de Amplificación
		[Hz]	[Hz]	
Sorata, 2004	Norte - Sur	0.63 – 1.10	0.88	82.49
	Este - Oeste	0.59 – 1.07	0.88	56.61
	Media Cuadrática	0.63 – 1.10	0.88	72.74
Toro, 2005	Norte - Sur	0.76 – 1.27	1.15	30.38
	Este - Oeste	0.41 – 1.20	1.11	9.06
	Media Cuadrática	0.73 – 1.27	1.15	31.77
Calima, 2006	Norte - Sur	0.64 – 1.49	0.83	9.35
	Este - Oeste	0.62 – 1.54	0.70	24.12
	Media Cuadrática	0.62 – 1.53	0.73	20.24

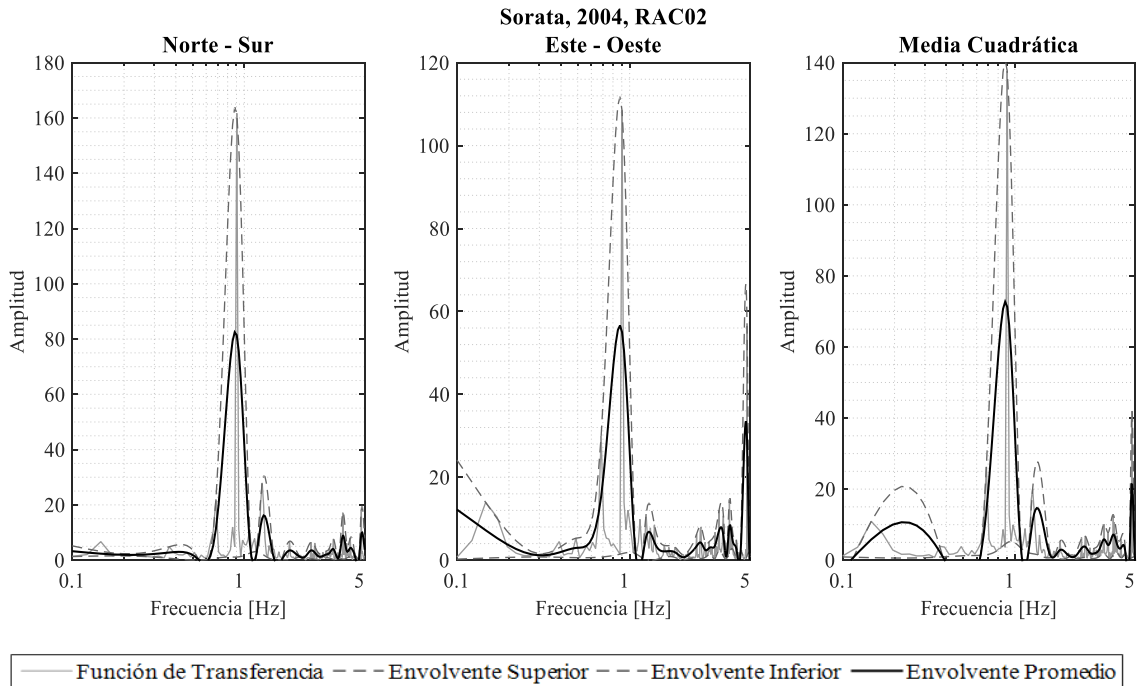


Figura 23. Funciones de transferencia con método HVSR. Sismo Sorata, 2004.

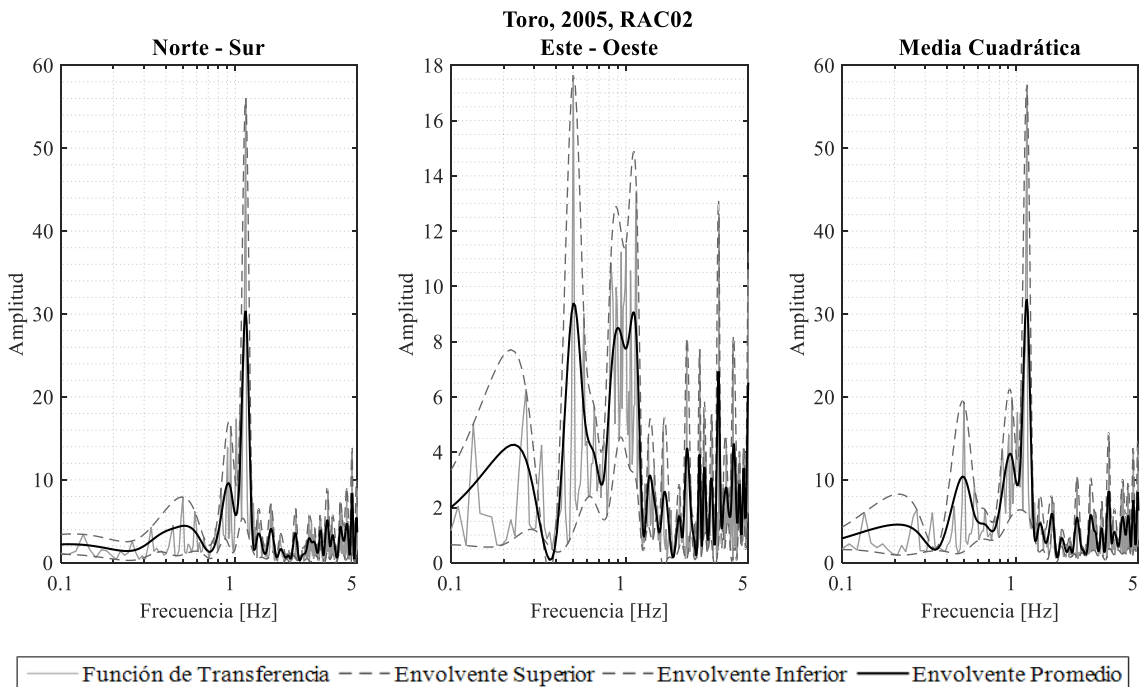


Figura 24. Funciones de transferencia con método HVSR. Sismo Toro, 2005.

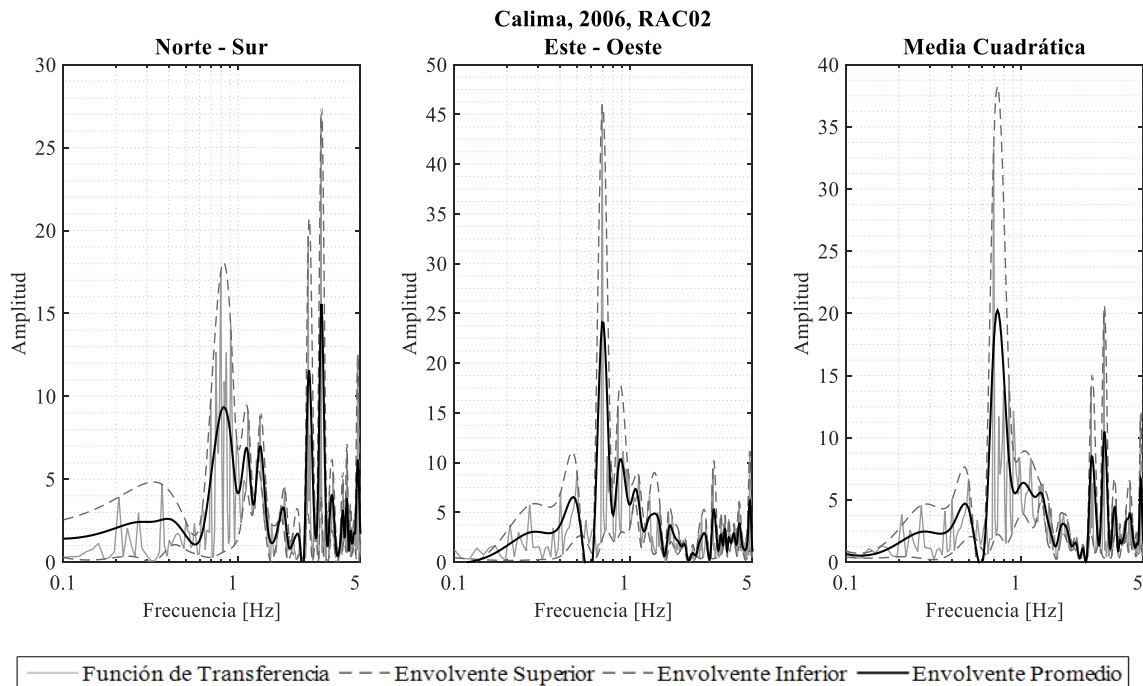


Figura 25. Funciones de transferencia con método HVSR. Sismo Calima, 2006.

7.2.4. SSR con Registros Sísmicos

Utilizando los registros de las estaciones expuestas en la sección 7.1, para la aplicación del método SSR se realiza el cociente espectral de las componentes horizontales de los todos los eventos sísmicos medidos en superficie con sus respectivas componentes horizontales medidas con el sensor sobre el afloramiento rocoso. Luego, se construye una función de transferencia promedio para periodos de análisis de una hora. Finalmente, para las funciones de transferencia promedio obtenidas, se construyen las envolventes superior, inferior y envoltente promedio, utilizando la interpolación de los máximos y mínimos locales para separaciones de 8 muestras.

En este estudio se obtuvo la función de transferencia para cada componente horizontal (E-W y N-S), y luego para su combinación mediante la media cuadrática (Ecuación 12.), con

el objetivo de identificar su incidencia en la frecuencia fundamental y el factor de amplificación. La Figura 26, la Figura 27 y la Figura 28 presentan las funciones de transferencia obtenidas para cada evento sísmico, en cada una de sus componentes horizontales y al realizar la media cuadrática.

Los resultados de los eventos sísmicos muestran, para la componente Norte - Sur, frecuencias fundamentales entre 1.01 Hz y 1.22 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.82 \text{ s} - 0.99 \text{ s}$), y factor de amplificación entre 39.46 y 68.98; para la componente Este - Oeste, frecuencias fundamentales entre 1.01 Hz y 1.27 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.79 \text{ s} - 0.99 \text{ s}$), y factor de amplificación entre 15.94 y 34.92; y para la combinación de componentes, frecuencias fundamentales entre 1.09 Hz y 1.27 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.79 \text{ s} - 0.92 \text{ s}$), y factor de amplificación entre 12.52 y 17.96. Se observa gran dispersión del factor de amplificación identificado en cada componente y para cada registro. La función de transferencia obtenida con la media cuadrática de las componentes horizontales presenta una buena convergencia a la frecuencia fundamental identificada pero la amplitud se reduce de manera considerable respecto a las obtenidas con las componentes analizadas de manera individual. Estos resultados se encuentran entre los reportados en el Mapa de Isoperiodos por Microtrepidaciones (MZSC-RS1) de la Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (INGEOMINAS & DAGMA, 2005), cuyos resultados arrojaron frecuencias fundamentales entre 0.77 Hz y 1.25 Hz ($T_{\text{pico}} = 0.80 \text{ s} - 1.30 \text{ s}$). La Tabla 9 resume la frecuencia fundamental identificada, los valores de banda entre los que se encuentra y el factor de amplificación para cada evento sísmico para cada componente y empleando la combinación de componentes mediante su media cuadrática.

Tabla 9. Resumen de frecuencias fundamentales y factores de amplificación identificados con SSR aplicado a registros sísmicos.

Sismo	Componente	Banda de Frecuencia Predominantes	Frecuencia Fundamental	Factor de Amplificación
		[Hz]	[Hz]	
Sorata, 2004	Norte - Sur	0.76 – 1.71	1.22	19.10
	Este - Oeste	0.78 – 1.68	1.27	15.94
	Media Cuadrática	0.85 – 1.71	1.22	13.38
Toro, 2005	Norte - Sur	0.93 – 1.28	1.01	68.98
	Este - Oeste	0.85 – 1.50	1.01	34.92
	Media Cuadrática	0.91 – 1.50	1.11	12.52
Calima, 2006	Norte - Sur	0.88 – 1.28	1.14	39.46
	Este - Oeste	0.88 – 1.56	1.06	24.51
	Media Cuadrática	0.89 – 1.56	1.09	17.96

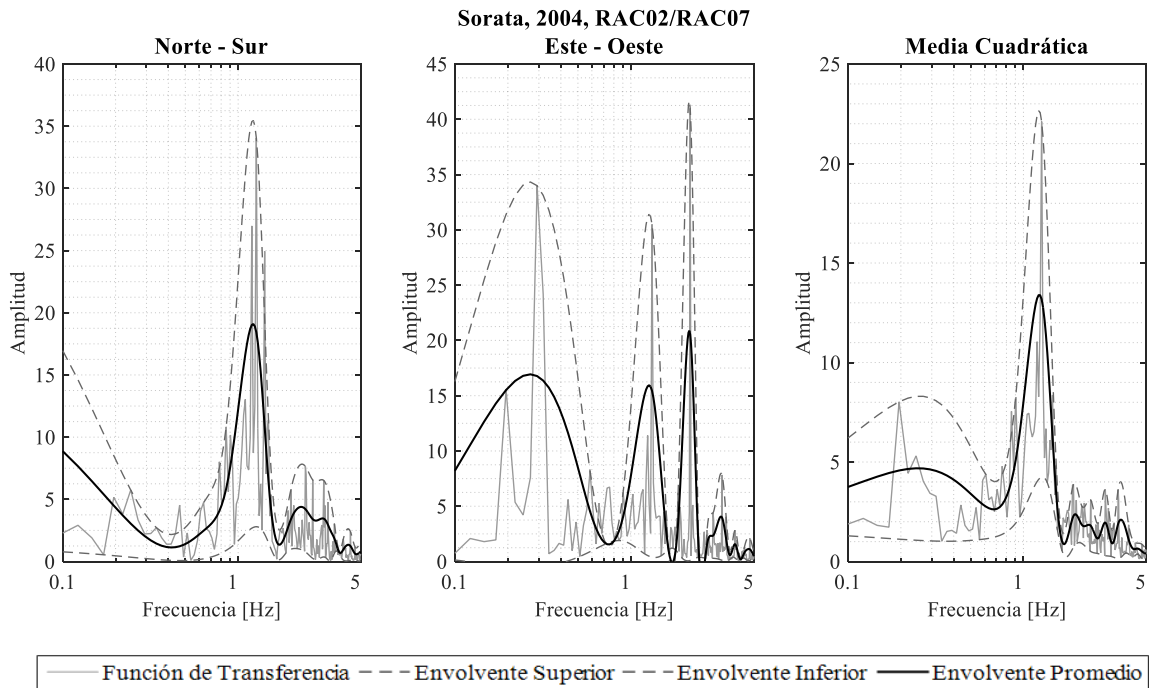


Figura 26. Funciones de transferencia, SSR con registro sísmico (Sorata, 2004).

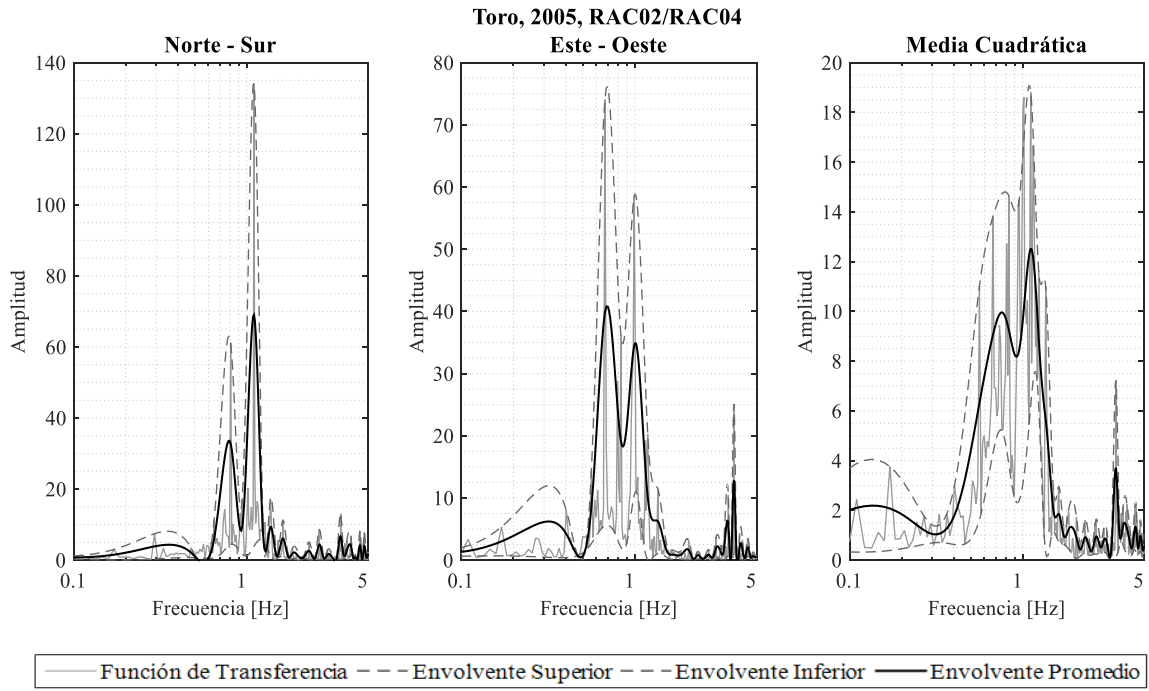


Figura 27. Funciones de transferencia, SSR con registro sísmico (Toro, 2005).

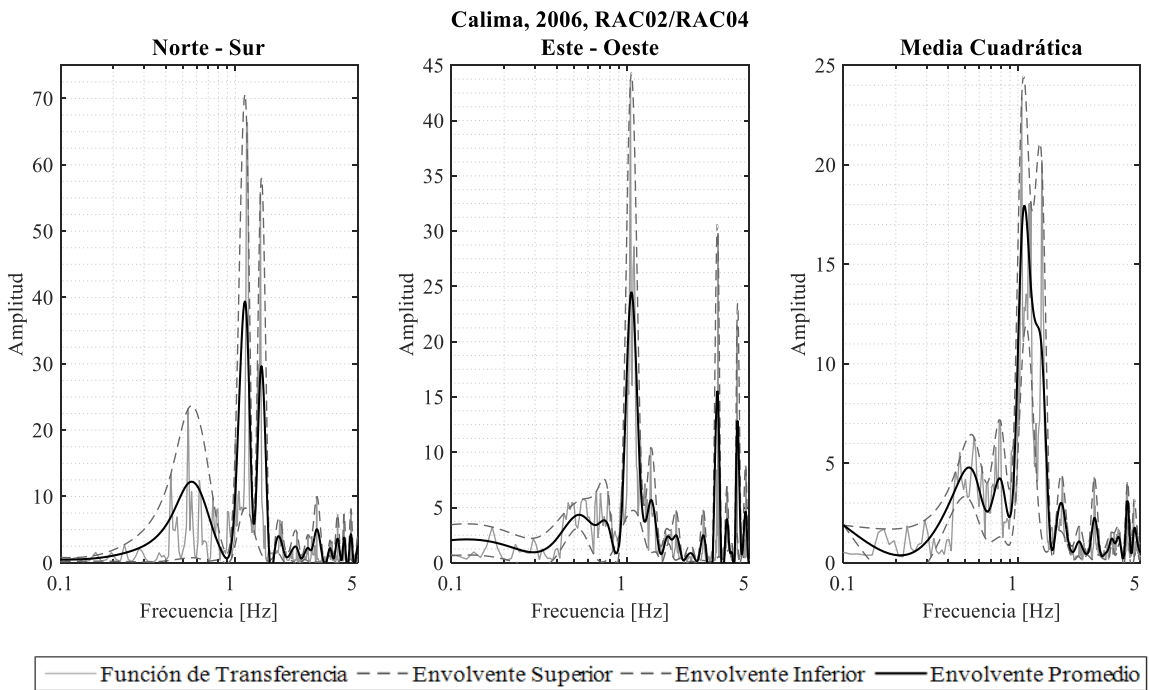


Figura 28. Funciones de transferencia, SSR con registro sísmico (Calima, 2006).

7.3. Análisis de Resultados

Para la mayoría de periodos de análisis de las mediciones de vibraciones ambientales; se identificó en los espectros de densidad de potencia (Figura 17 y Figura 18) un mayor contenido de energía por frecuencia en las vibraciones registradas con el sensor en profundidad para frecuencias menores a 1 Hz, en comparación con el sensor de superficie. De igual manera, se identificó un mayor contenido de energía por frecuencia en las vibraciones registradas con el sensor de superficie para frecuencias superiores a 1 Hz en comparación con el sensor de profundidad. Si se considera el criterio expuesto por Moreno y Alfaro (2000), explicado en la sección 2.2, esto indica que en profundidad hay mayor incidencia en los registros de las vibraciones que corresponden a microsismos (menores a 1 Hz) que de las vibraciones correspondientes a microtrepidaciones (mayores a 1 Hz), mientras que en superficie es lo contrario.

En el análisis de vibraciones ambientales empleando el método HVSR, los registros comprendidos entre las 12:00 M.d. y 09:00 p.m. presentan la menor cantidad de datos no representativos (fuera de la desviación estándar); esto debido a que en este periodo hay mayor tránsito vehicular y peatonal cerca al punto de muestreo. Se logra identificar la frecuencia fundamental del suelo del edificio 350 en 1.38 Hz, valor cercano al ancho de banda reportado para esta zona por la microzonificación sísmica de la ciudad (INGEOMINAS & DAGMA, 2005). El factor de amplificación promedio identificado es de 8.67 con una desviación estándar de ± 1.88 .

En el análisis de vibraciones ambientales empleando el método SSR, los registros muestran un contenido frecuencial que cambia dependiendo del periodo de análisis, esto se atribuye a la variación en el tránsito vehicular y peatonal cerca al punto de muestreo. En todos los periodos analizados, se muestran en las funciones de transferencia grandes amplitudes para frecuencias superiores a 1 Hz, típicas de la actividad humana (Moreno & Alfaro, 2000), las

cuales dificultan identificar adecuadamente la frecuencia fundamental del depósito de suelo del edificio 350. Sin embargo, tomando como referencia estudios previos de la zona, se observan pequeños picos locales, los cuales corresponden a una frecuencia fundamental de 1.22 Hz, valor que se encuentra entre el ancho de banda reportado para esta zona por la microzonificación sísmica de la ciudad (INGEOMINAS & DAGMA, 2005). El factor de amplificación promedio identificado es de 1.64 con una desviación estándar de ± 0.15 .

En el análisis de los eventos sísmicos empleando el método HVSR, se muestra gran incertidumbre en el factor de amplificación identificado para cada evento sísmico y entre sus componentes horizontales, con una desviación estándar de 26.91; lo anterior se puede atribuir a los supuestos que se aplican para este método, como que el registro de la componente vertical no presenta efectos de sitio. Las frecuencias fundamentales halladas se encuentran dentro del ancho de banda reportado por la microzonificación sísmica de la ciudad (INGEOMINAS & DAGMA, 2005).

En el análisis de los eventos sísmicos empleando el método SSR, se muestra gran incertidumbre en el factor de amplificación identificado para cada evento sísmico y entre sus componentes horizontales, con una desviación estándar de 18.19; lo anterior se puede atribuir al uso de estaciones de referencia sobre afloramientos rocosos para este estudio. Se evidencia que el factor amplificación identificado en la componente Norte - Sur siempre fue mayor al identificado en la componente Este - Oeste, lo que supondría una preferencia del suelo a oscilar en este sentido. Las frecuencias fundamentales halladas se encuentran dentro del ancho de banda reportado por la microzonificación sísmica de la ciudad (INGEOMINAS & DAGMA, 2005).

Los factores de amplificación identificados empleando registros sísmicos son inconsistentes entre eventos y direcciones de análisis; Chávez-García y Montalva (2014) indican que estas diferencias son comunes y que convencionalmente se solucionan

haciendo el promedio de los factores de amplificación obtenidos para cada componente y entre los distintos registros.

La Tabla 10 resume la frecuencia fundamental promedio y el factor de amplificación promedio identificado para cada método. Para todos los resultados, las frecuencias fundamentales promedio identificadas presentan una baja desviación estándar y son similares entre sí. Sin embargo, los factores de amplificación identificados presentan grandes desviaciones estándar para los registros sísmicos y sus valores son inconsistentes entre métodos. Las diferencias entre los factores de amplificación identificados por distintos métodos han sido reportadas repetidamente por distintos autores (Chávez-García & Montalva, 2014; Haghshenas, et al., 2008; Cocco, et al., 2001; Margheriti, et al., 2000; Horike, et al., 2001), los cuales evidencian que la identificación de parámetro requiere más estudios dado que no ha sido posible reducir su incertidumbre.

Tabla 10. Resumen de resultados obtenidos con SSR y HVSR aplicados a registros sísmicos y vibraciones ambientales.

Método	Banda de Frecuencia		Frecuencia Fundamental		Factor de Amplificación	
	Límites de Banda [Hz]	Rango [Hz]	Promedio [Hz]	Desv. Estándar [Hz]	Promedio	Desv. Estándar
SSR Vibraciones Ambientales	0.85 – 1.47	0.62	1.22	0.08	1.64	0.15
HVSR Vibraciones Ambientales	0.60 – 2.38	1.78	1.38	0.05	8.67	1.88
SSR Registros Sísmicos	0.76 – 1.71	0.95	1.13	0.09	27.42	18.19
HVSR Registros Sísmicos	0.41 – 1.54	1.13	0.92	0.17	37.42	26.91
Reportado por MZSC para RAC02	0.77 – 1.25	0.48	1.00	-	-	-

Capítulo 8.

Conclusiones

Para la realización de este proyecto se desarrolló y validó el software SISMOS, el cual mostró, para todos los ensayos, registros consistentes con las mediciones esperadas, una facilidad de manejo para el usuario y una gran estabilidad de operación para ensayos prolongados. Dado el posible uso investigativo del software en futuros proyectos de la Universidad del Valle, se decide dejar sus códigos abiertos, para que estos puedan ser modificados y mejorados por un operador con conocimientos básicos en programación orientada a objetos. Adicionalmente, la versatilidad del software para funcionar con cualquier módulo National Instruments serie C, permite que este pueda ser empleado para más de 30 dispositivos diferentes.

De igual manera, se logró adaptar distintos equipos existentes en la Universidad del Valle, permitiendo que estos fueran incorporados en un sistema de instrumentación, el cual puede contribuir al conocimiento de la respuesta dinámica del suelo del edificio 350. Aunque los módulos de adquisición National Instruments no eran los dispositivos más idóneos para realizar mediciones de vibraciones durante largos periodos (dada su alta frecuencia de muestreo), se logró, a través de programación, adaptar estos equipos para las necesidades del proyecto. Adicionalmente, se diseñó y construyó la unidad de ensayos móvil, la cual permite el correcto descenso del sensor de profundidad, da un buen manejo del área de

trabajo, facilita la instalación de sensores de profundidad para distintas perforaciones, garantiza la durabilidad del cable de descenso del equipo y proporciona las condiciones necesarias para que este ensayo pueda ser repetido en futuras investigaciones.

Todo el sistema de instrumentación fue validado y verificado con ensayos controlados en laboratorio y un montaje experimental en campo, tal como se describe a continuación:

- La prueba de adquisición y remuestreo en tiempo real validó los algoritmos de funcionamiento del software SISMOS, mostrando una concordancia del 100% en tiempo y frecuencia entre las señales remuestreadas al finalizar la adquisición y las señales que son remuestreadas mientras son adquiridas.
- El ensayo de calibración y verificación de STA/LTA en tiempo real validó el algoritmo de detección programado para el software SISMOS, mostrando resultados satisfactorios de iniciación y finalización de registros sísmicos, al ser comparados con los resultados obtenidos para la duración significativa.
- La verificación de funcionamiento del sistema en laboratorio validó la adquisición simultánea de ambos sensores en cada una de sus componentes y determinó que ambos sensores se encuentran calibrados entre sí, con FIT en tiempo y frecuencia superiores al 98% y 96%, respectivamente; con coherencias promedio de 1.00 para todos los ensayos; con amplitudes de funciones de transferencia promedio entre 0.99 y 1.01; y fase promedio entre 0.26° y 0.80° .
- El análisis de tolerancia del sistema ante eventos sísmicos determinó que, para 16 eventos sísmicos superficiales, intermedios y profundos, con magnitudes superiores a 4.2 Mw y con distancias epicentrales mayores a 66 km, solo 3 serían medidos parcialmente en superficie por el sistema de instrumentación, dado que saturarían momentáneamente el sismómetro; los eventos que saturaron el sistema de

instrumentación presentan magnitudes superiores 6.0 Mw y son intermedios o superficiales, características poco usuales para sismos frecuentes en la región.

- El montaje experimental en campo mostró que este sistema puede funcionar de manera continua, siempre y cuando se cuente con un buen equipo de almacenamiento.
- Los registros obtenidos en campo permitieron calcular el cambio del contenido de frecuencias en el transcurso del día y validaron el funcionamiento del sistema de instrumentación para la estimación de los efectos de sitio a partir de vibraciones ambientales.

Los métodos empleados para la estimación de efectos de sitio con vibraciones ambientales presentaron frecuencias fundamentales y anchos de banda similares a las reportadas por la microzonificación sísmica de la ciudad (INGEOMINAS & DAGMA, 2005), lo que da validez al uso de vibraciones ambientales para la identificación de la frecuencia fundamental del suelo del edificio 350, confirmando la eficacia del sistema de instrumentación implementado. Dado que no existe información reportada por la microzonificación sísmica de la ciudad sobre el factor de amplificación de la zona, y los resultados obtenidos a partir de registros sísmicos presentan grandes desviaciones estándar, sigue existiendo gran incertidumbre sobre los factores de amplificación obtenidos con vibraciones ambientales.

Según los resultados expuestos y aunque el uso de vibraciones ambientales con los métodos HVSR y SSR son ampliamente discutidos, se recomienda el uso de vibraciones ambientales con el método HVSR cuando no sea posible reducir la incidencia las vibraciones antrópicas de la zona de estudio y no se cuente con registros sísmicos de referencia en roca; y se recomienda el uso de vibraciones ambientales con el método SSR cuando la frecuencia fundamental esperada del depósito de suelo a estudiar sea inferior a 1 Hz y exista baja

incidencia de las vibraciones antrópicas. De igual manera, aunque el uso de registros sísmicos con los métodos HVSR y SSR es convencionalmente aceptado, se recomienda el uso de registros sísmicos empleando el método HVSR cuando solo se cuente con registros sísmicos de un sensor triaxial sobre el depósito de suelo y se requiera únicamente un estimativo de la frecuencia fundamental; y se recomienda el uso de registros sísmicos empleando el método SSR únicamente cuando se cuente con registros de referencia en roca y cercanos a la zona de estudio.

Se concluye a partir de los resultados expuestos en la sección 7.2.3 y sección 7.2.4 que, la combinación de componentes horizontales empleando la media cuadrática para registros sísmicos permite identificar con mayor facilidad una frecuencia fundamental consistente con la reportada por el Estudio de Microzonificación sísmica de Santiago de Cali (INGEOMINAS & DAGMA, 2005). Sin embargo, también se evidencia una reducción significativa en el factor de amplificación y un incremento en el ancho de banda del pico.

Surgen nuevos interrogantes relacionados con el factor de amplificación reportado por los registros sísmicos, dado que estos son los convencionalmente aceptados y, por ende, sus resultados deberían ser más precisos entre sí.

Bibliografía

Albareello, D. & Lunedei, E., 2013. Combining horizontal ambient vibration components for H/V spectral ratio estimates. *Geophysical Journal International*, 194(2), pp. 936-951.

Allen, R., 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(5), pp. 1521-1532.

Allen, R., 1982. Automatic phase pickers: their present use and future prospects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(6B), pp. S225-S242.

Arias, A., 1970. Measure of Earthquake Intensity. *Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge. Univ. of Chile, Santiago de Chile*.

ASTM, 2006. *C 778 - 06, Standard specification for standard sand*, International : ASTM.

Bard, P. -. Y., 1999. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. *The effects of surface geology on seismic motion*, Volumen 3, pp. 1251-1279.

Bard, P. -. Y. & SESAME-Team, 2005. *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and interpretations*, Unión Europea: SESAME European research project.

Borcherdt, R. D., 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), pp. 29-61.

Borcherdt, R. D., 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, 10(4), pp. 617-653.

Building Seismic Safety Council, B.S.S.C, 2003. *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. Report FEMA-450 (Provisions), Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington: Report FEMA-450 (Provisions), Federal Emergency Management Agency (FEMA).

Chávez-García, F. J. & Montalva, G. A., 2014. Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*, Issue 16, pp. 6-30.

Cocco, M. y otros, 2001. Broadband waveforms and site effects at a borehole seismometer in the Po alluvial basin (Italy). *Annals of Geophysics*, 44(1).

Comité Europeo de Normalización, 1998. *Eurocódigo 8: Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1-1: Reglas generales. Acciones sísmicas y requisitos generales de las estructuras*. Unión Europea: ENV 1998-1-1, Edición de la Asociación Española de Normalización y Certificación.

Diehl, J. G., Steller, R. A. & Nigbor, R. L., 2003. *Borehole Accelerometer Installation*, Préverenges, Suiza: Kinometrics, Inc.

Field, E., Hough, S. E. & Jacob, K., 1990. Using microtremors to assess potential earthquake site response: a case study in Flushing Meadows, New York City. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(6A), pp. 1456-1480.

Haghshenas, E., Bard, P.-Y., Theodulidis, N. & Team, S. W., 2008. Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bull Earthquake Eng*, p. 75–108.

Holcomb, L. G., Sandoval, L. & Hutt, B., 1998. *Experimental investigations regarding the use of sand as an inhibitor of air convection in deep seismic boreholes*, Estados Unidos: Geological Survey.

Horike, M., Zhao, B. & Kawase, H., 2001. Comparison of site response characteristics inferred from microtremors and earthquake shear waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(6), pp. 1526-1536.

INGEOMINAS & DAGMA, 2005. *Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali*, Bogotá: República de Colombia.

International Code Council, 2000. *International Building Code*. Estados Unidos: International Code Council.

Jiménez-Roa, L., Marulanda-Casa, J. & Cruz-Escobar, A., 2016. *Real-time structural monitoring of Building 350 at Del Valle University*. Santiago de Cali: Structural Control and Health Monitoring.

Kagami, H., Duke, C. M., Liang, G. C. & Ohta, Y., 1982. Observation of 1-to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. Part II. Evaluation of site effect upon seismic wave amplification due to extremely deep soil deposits. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(3), pp. 987-998.

Kagami, H. y otros, 1986. Observation of 1-to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. Part III. A two-dimensional study of site effects in the San Fernando Valley. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(6), pp. 1801-1812.

Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. First ed. New Jersey: Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.

Kudo, K., 1995. *Practical estimates of site response--state-of-art report*. Nice, Francia, 5th Conf. on Seismic Zonation.

Lagos, S. I., 2014. *La Instrumentación Sísmica en México, Trabajo de Grado para optar al título de Maestro en Ingeniería Civil*, Mexico D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Langston, C. A., 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B9), pp. 4749-4762.

Lennartz Electronic, GmbH, 2016a. *LE-3D/BHs Borehole Seismometer Installation Guide*, Tübingen: Lennartz Electronic, GmbH.

Lennartz Electronic, GmbH, 2016b. *LE-xD Seismometer Family*, Tübingen: Lennartz Electronic, GmbH.

Lermo, J. & Chávez-García, F. J., 1993. Effect Evaluation Using Spectral Ratios With Only One Station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 83, pp. 1574 - 1594.

Lermo, J. & Chávez-García, F. J., 1994. Are microtremors useful in site response evaluation?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), pp. 1350-1364.

Lunedei, E. & Albarello, D., 2010. Theoretical HVSR curves from full wavefield modelling of ambient vibrations in a weakly dissipative layered Earth. *Geophysical Journal International*, 181(2), pp. 1093-1108.

Margheriti, L. y otros, 2000. Analysis of borehole broadband recordings: Test site in the Po basin, northern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), pp. 1454-1463.

Mendoza, M. & Auvinet, G., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985- Behavior of building foundations in Mexico City. *Earthquake Spectra*, 4(4), pp. 835-853.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá: AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Moreno, L. & Alfaro, A., 2000. *De los Microsismos a los Microtemblores Investigación en el Instituto Geofísico*. Bogotá, Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia.

Mueller, R. y otros, 1995. Near real-time monitoring of seismic events and status of portable digital recorders using satellite telemetry. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(2), pp. 640-645.

Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).

Nakamura, Y., 2000. *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface and its applications*. Auckland, Nueva Zelanda, Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering.

National Instruments, Corp, 2008. *NI9234*, Hungría: National Instruments Corp.

Nogoshi, M. & Igarashi, T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). *Jour. Seism. Soc. Japan*, Volumen 24, pp. 26-40.

Ohta, Y., Kagami, H., Goto, N. & Kudo, K., 1978. Observation of 1-to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. Part I: Comparison with long-period accelerations at the Tokachi-oki earthquake of 1968. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(3), pp. 767-779.

Peralta, J. S., 2015. *Evaluación de la Respuesta Sísmica en el Estrato de Suelo del Edificio 350 de la Universidad del Valle, Trabajo de Grado para optar al título de Maestro en Ingeniería Civil*, Santiago de Cali: Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.

Riascos, P. y otros, 2004. Ossodas, a portable digital system for seismological signal acquisition. *Earth Sciences Research Journal*, 8(1), pp. 52 - 55.

Ruiz, D. M., 2015. Referente Nacional en Sistema de Instrumentación Sísmica. *Hoy en la Javeriana*, 54(1313), pp. 8 - 9.

Sanchez-Silva, M., Yamin, L. E. & Caicedo, B., 2000. Lessons of the 25 January 1999 earthquake in Central Colombia. *Earthquake Spectra*, 16(2), pp. 493-510.

Satoh, T., Kawase, H. & Sato, T., 1995. Evaluation of local site effects and their removal from borehole records observed in the Sendai region, Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), pp. 1770-1789.

Sierra, L. & Botero, E., 2014. *Influencia de la interacción suelo-estructura aplicado a un tramo subterráneo de la línea 12 del metro de la ciudad de México considerando el fenómeno de hundimiento regional*. Mexico, XXVII Reunión Nacional de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica.

Steidl, J. H., Tumarkin, A. G. & Archuleta, R. J., 1996. What is a reference site?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), pp. 1733-1748.

Towhata, I., 2008. *Geotechnical earthquake engineering*. Japón: Springer Science & Business Media.

Trifunac, M. & Brady, A. G., 1975. A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), pp. 581-626.

Trnkoczy, A., 1999. *Topic Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm*, Deutsch: Kinometrics.

Trnkoczy, A., 2002. *Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm*, Deutsch: IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice.

Trnkoczy, A. y otros, 2012. *Site selection, preparation and installation of seismic stations*. Alemania: New Manual of Seismological Observatory Practice.

Universidad del Valle, 2015. *Anuario Estadístico 2015*, Santiago de Cali: Oficina de Planeación y Desarrollo Institucional.

West, M. & Thompson, G., 2007; 2015. *Historical development*. [En línea] Available at: [Github.com/geoscience-community-codes/GISMO](https://github.com/geoscience-community-codes/GISMO) [Último acceso: 25 Noviembre 2016].

Yamazaki, F., Lu, L. & Katayama, T., 1992. Orientation error estimation of buried seismographs in array observation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21(8), pp. 679-694.

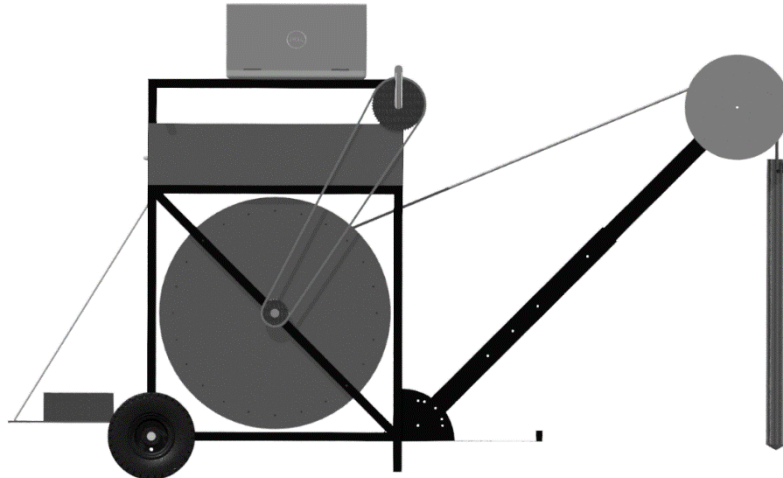
ANEXOS

Anexo 1. Recomendaciones del Sesame (español).

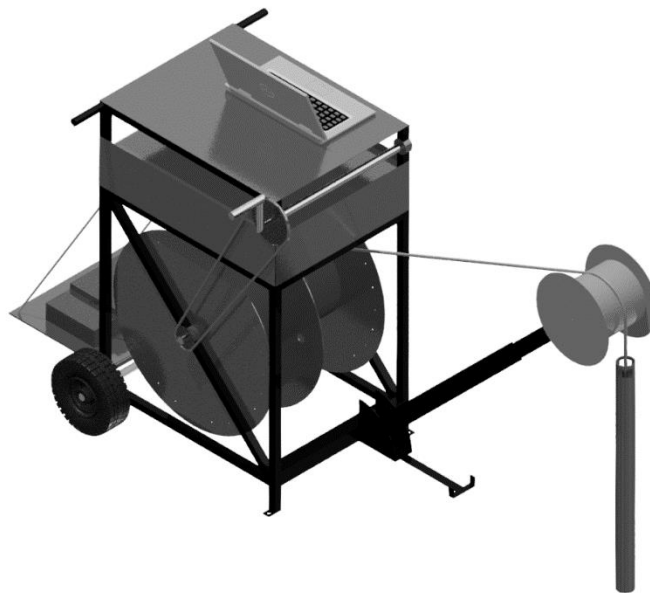
Traducido de Bard y Equipo Sesame (2005)

Tipo de Parámetro	Recomendaciones	
	Mínima frecuencia esperada [Hz]	Duración mínima recomendada [min]
(a) Duración mínima del ensayo	0.2	30
	0.5	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
(b) Densidad espacial de sensores.	<ul style="list-style-type: none"> • Microzonificación: Realizar una cuadrícula de puntos con un espaciado de 500 m, en caso de requerir una mayor precisión se puede reducir esta separación. • Sitio de Interés: No realizar las mediciones en el sitio de interés de un único punto, use al menos 3 puntos diferentes y cercanos entre sí. 	
(c) Parámetros de grabación	<ul style="list-style-type: none"> • Nivele el sensor según las recomendaciones del fabricante. • Fijar la ganancia del sensor en la máxima posible sin saturar el registro. 	
(d) Acoplamiento suelo-sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Fijar el sensor directamente sobre el suelo siempre que sea posible. • Evitar colocar el sensor en terrenos blandos (barro, suelos arados, césped alto, etc.) o suelo saturado por la lluvia. 	
(e) Acoplamiento suelo-sensor de manera artificial.	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar placas de materiales blandos tales como goma, espuma o cartón. • En pendientes pronunciadas donde no se permite la nivelación del sensor, se recomienda realizar la instalación del sensor sobre una pila de arena. 	
(f) Estructuras cercanas	<ul style="list-style-type: none"> • Evite grabar cerca de estructuras tales como árboles o edificaciones en caso de presentar velocidades mayores a 5 m/s. • Evite realizar mediciones sobre estructuras subterráneas. 	
(g) Condiciones climáticas	<ul style="list-style-type: none"> • Viento: Proteja el sensor del viento en caso de presentar velocidades superiores a 5 m/s. • Lluvia: Evite realizar mediciones bajo lluvia intensa, cuando se presentan lloviznas no existe un cambio considerable en las mediciones. • Temperatura: Tenga presente la temperatura de funcionamiento del sensor y el sistema de adquisición. • Indicar en la bitácora la realización de mediciones bajo una condición climática. 	
(h) Perturbaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes constantes: Evite realizar mediciones cerca de maquinarias de construcción, maquinarias industriales, generadores eléctricos, etc. • En caso de presentar tránsito aumentar el tiempo de duración del ensayo, para luego desprejar la vibración transitoria. 	

Anexo 2. Esquemas Unidad de Ensayos Móvil



Vista lateral, brazo telescópico, juego de piñones, contrapeso y llantas todo terreno



Vista alzada, módulo de trabajo, compartimientos de almacenamiento y tambor bipartido

Anexo 3. Formato de Vibraciones Ambientales

	ADQUISICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES	<table border="1" style="font-size: 8px;"> <tr><th>D</th><th>M</th><th>A</th></tr> <tr><td>7</td><td>2</td><td>2017</td></tr> </table>	D	M	A	7	2	2017
	D	M	A					
7	2	2017						
<i>Datos Generales</i>								

Responsables del Ensayo	Código
Leonardo Gallo, Mauricio Herrera, Angelica Aguas, Daniel Rosero, Johan Arana, Sebastian Arango	PIL004
Técnica del Ensayo	
SSR <input checked="" type="checkbox"/> Nakamura H/V <input type="checkbox"/> F-K <input type="checkbox"/> SPAC <input type="checkbox"/> 2sSPAC <input type="checkbox"/> SASW <input type="checkbox"/>	
Nombre del Proyecto	
Implementación de un Sistema para la Evaluación del Efecto de Sitio del Suelo del Edificio 350	
Ubicación (Dirección, Barrio, Referencias, etc.)	
Campus Universitario Melendez, Universidad del Valle, Afueras del Edificio 350	

Georreferenciación Punto de Muestreo		Datos de Perforación	
Coordenada	N 3° 22' 25,99" E 76° 31' 7435"	Profundidad Total [m]:	30
Altitud [msnm]:	956	Diámetro de Perf. [cm]:	6,35
Temperatura [°C]:	30	Nivel Freático [m]:	5
Tipo de GPS:	Garmin	Tipo de Encamisado:	PVC

Descripción del Entorno										
Estado	Condiciones de Superficie				Condiciones de Tránsito					
	Seco	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	Tierra	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Tipo	Nivel	No	Baja	Media	Alta
	Húmedo	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Asfalto	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Veh. Livianos			X		
	Grava	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Concreto	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	Veh. Pesados		X			
	Roca	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Césped	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Peatones				X	
	Arena	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Otro		Otro					
Fuentes de Ruido					Densidad					
	Bombas	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Fábrica	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Tipo <th>Nivel</th> <th>No</th> <th>Baja</th> <th>Media</th> <th>Alta</th>	Nivel	No	Baja	Media	Alta
	Maquinaria	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Masa Agua	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No	Edificios			X		
	Viento	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	Otro		Árboles					X

Datos Técnicos							
No.	Cód. Sensor	Ref. Sensor	Tipo Sensor	Frec. Muestreo	C. Hor. 1	C. Hor. 2	C. Vert.
1	Super	LE-3Dlite	Superficial	256	1	2	3
2	Prof	LE-3D/BH	Profundidad	256	4	5	6
3							
4							
5							
6							
7							

Observaciones
Se realiza un receso entre las 17:00 y 20:00 horas. Mantenimiento y creación de respaldo de información. - Entre 12:00 y 17:00 horas, flujo normal de peatones - Entre 20:00 y 23:00 horas, reducción gradual de flujo de peatones - Entre 23:00 y 1:00 horas, la universidad se encuentra desocupada

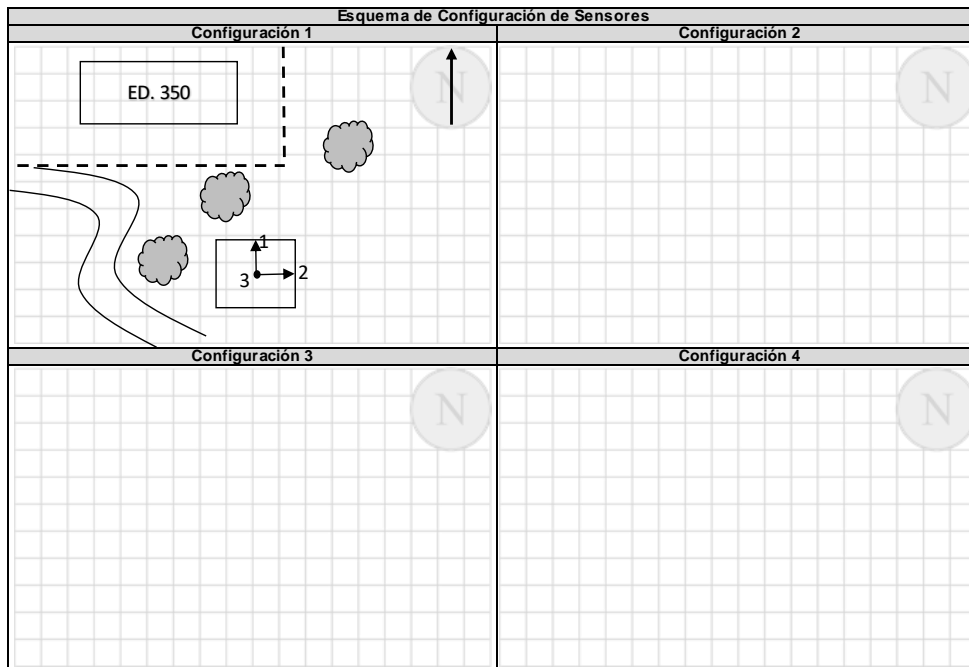


ADQUISICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES

Registros

Código

PIL004

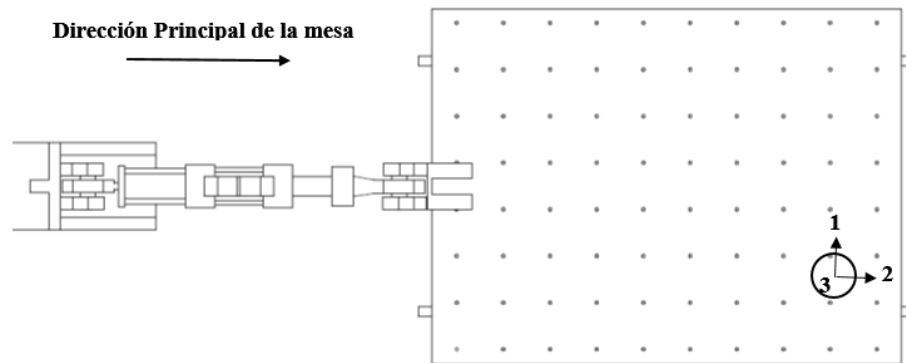


Mediciones				
Config.	No. Registro	Hora Inicio	Hora Fin	Observaciones
1	1	12:03:11	12:18:11	Paso de Peatones y bicicletas
	2	12:18:11	12:33:11	Paso de Peatones y bicicletas
	3	12:33:11	12:48:11	Paso de Peatones y bicicletas
	4	12:48:11	13:03:11	Paso de Peatones y bicicletas
	5	13:03:11	13:18:11	Paso de Peatones y bicicletas
	6	13:18:11	13:33:11	Paso de Peatones y bicicletas
	7	13:33:11	13:48:11	Paso de Peatones y bicicletas
	8	13:48:11	14:03:11	Paso de Peatones y bicicletas
	9	14:03:11	14:18:11	Paso de Peatones y bicicletas
	10	14:18:11	14:33:11	Paso de Peatones y bicicletas
	11	14:33:11	14:48:11	Paso de Peatones y bicicletas
	12	14:48:11	15:03:11	Paso de Peatones y bicicletas
	13	15:03:11	15:18:11	Paso de Peatones y bicicletas
	14	15:18:11	15:33:11	Paso de Peatones y bicicletas
	15	15:33:11	15:48:11	Paso de Peatones y bicicletas

Anexo 4. Variables de Adquisición Software SISMOS

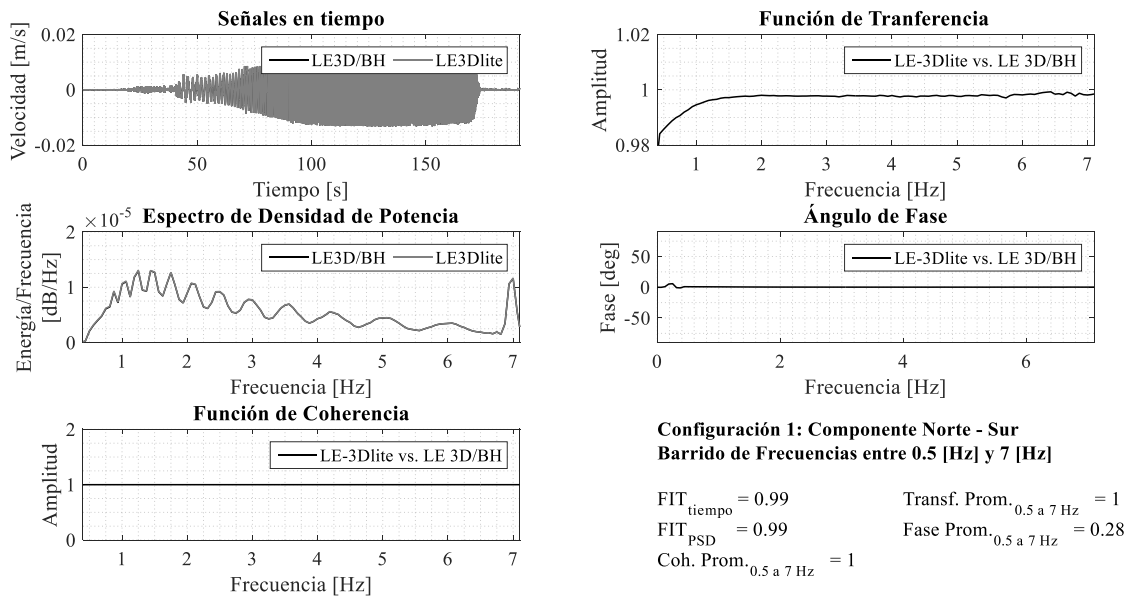
Parámetros iniciales de funcionamiento del Software SISMOS				
Parámetros iniciales	Convención	Unidad	Valor por Defecto	Editable / No Editable
Frecuencia de muestreo	T.FS	Hertz	2048	No Editable
Factor de reducción de la frecuencia de muestreo	T.DC	adimensional	8	Editable
Cantidad de datos por paquete	T.Duration	Minutos	10	Editable
Gatillo de adquisición continua	T.IsContinuous	Lógico	True	Editable
Gatillo de visualización de datos	T.Plotting	Lógico	True	No Editable
Tiempo de visualización de datos en tiempo real	T.PlottingTime	Segundos	30	Editable
Gatillo de activación de algoritmos STA/LTA	T.StaLta	Lógico	False	Editable
Guardado automático de Eventos detectados	T.SaveSL	Lógico	False	Editable
Tamaño de ventana STA	T.ISTA	Segundos	2	Editable
Tamaño de ventana LTA	T.ILTA	Segundos	70	Editable
Canal en que se aplicará el Algoritmo STA/LTA	T.channelSL	adimensional	3	Editable
Tolerancia para inicio del evento	T.th_on	adimensional	2	Editable
Tolerancia para finalización del evento	T.th_off	adimensional	0.5	Editable
Duración mínima para decretar evento	T.min_dur	Segundos	6	Editable
Numero de datos acumulados desde inicio de adquisición	T.TotalPoints	puntos	[]	No Editable
Puntos acumulados en un archivo	T.Points	puntos	0	No Editable
Ruta de almacenamiento	T.Storage	Texto	''	No Editable
Cola de datos sin remuestrear	T.residual	puntos	[]	No Editable
Numero de Eventos Detectados	T.ntring	adimensional	0	No Editable
Sumatoria de ventana STA	T.sta_sum	adimensional	[]	No Editable
Sumatoria de ventana LTA	T.lta_sum	adimensional	[]	No Editable
Vector con eventos detectados	T.trig_array	puntos	[]	No Editable
Datos Registrados sin remuestrear	T.Data	Voltios	[]	No Editable

Anexo 5. Diagrama de Montaje para Segundo Ensayo en Laboratorio.

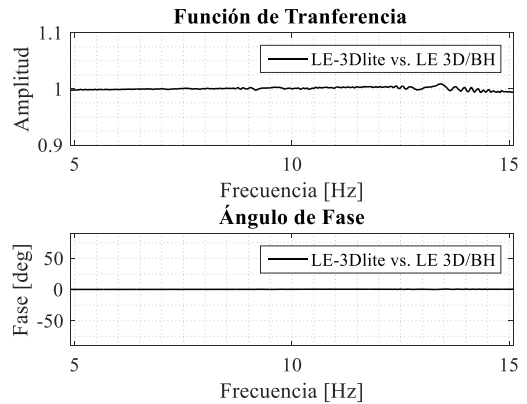
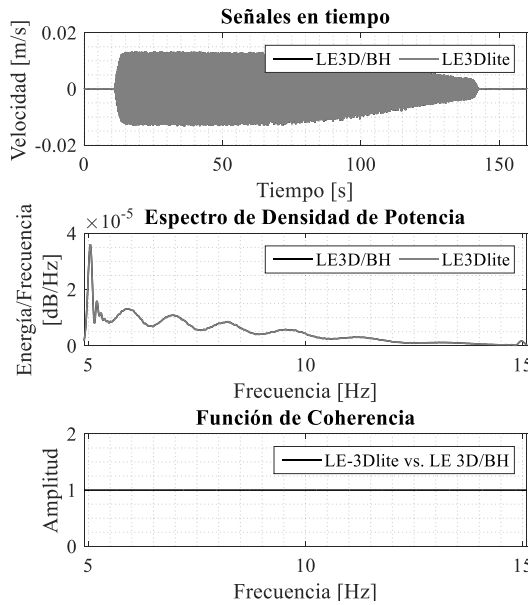


Anexo 6. Figuras de Resultados de Tercer Ensayo

- Componente Norte – Sur: Barrido entre 0.5 Hz – 7 Hz



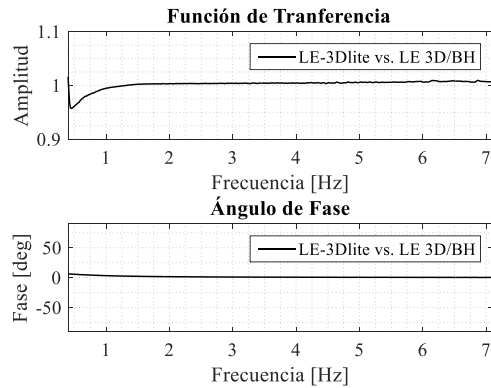
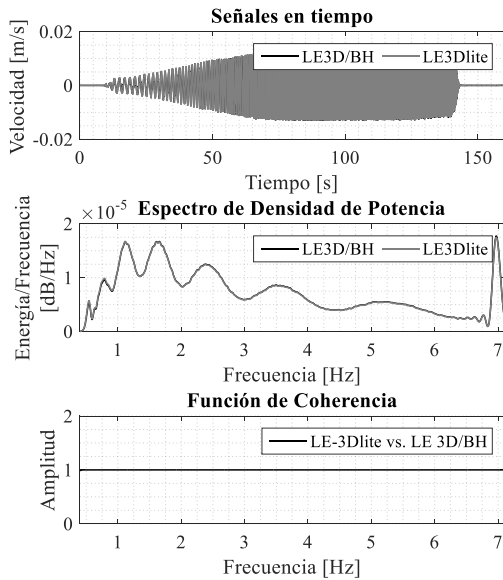
- Componente Norte – Sur: Barrido entre 5 Hz – 15Hz



**Configuración 1: Componente Norte - Sur
 Barrido de Frecuencias entre 5 [Hz] y 15 [Hz]**

$FIT_{\text{tiempo}} = 0.99$ $\text{Transf. Prom.}_{5 \text{ a } 15 \text{ Hz}} = 1$
 $FIT_{\text{PSD}} = 1$ $\text{Fase Prom.}_{5 \text{ a } 15 \text{ Hz}} = 0.32$
 $\text{Coh. Prom.}_{5 \text{ a } 15 \text{ Hz}} = 1$

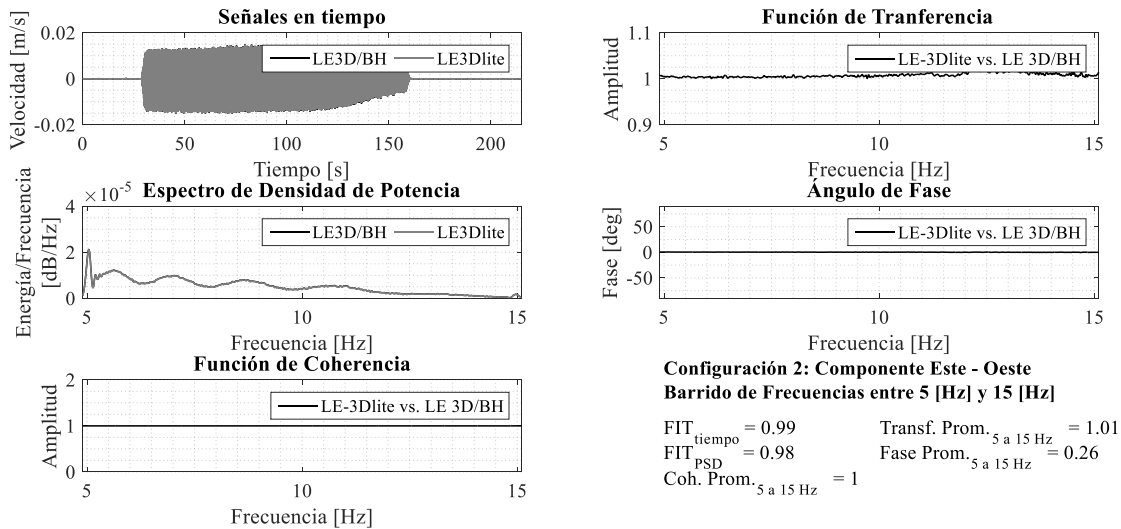
- Componente Este – Oeste: Barrido entre 0.5 Hz – 7 Hz



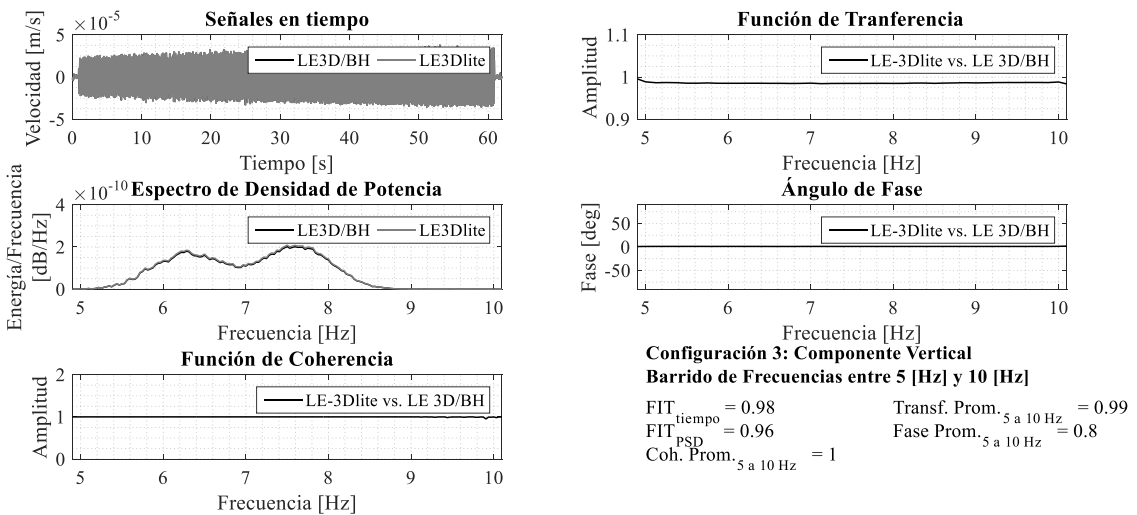
**Configuración 2: Componente Este - Oeste
 Barrido de Frecuencias entre 0.5 [Hz] y 7 [Hz]**

$FIT_{\text{tiempo}} = 0.97$ $\text{Transf. Prom.}_{0.5 \text{ a } 7 \text{ Hz}} = 1.01$
 $FIT_{\text{PSD}} = 0.98$ $\text{Fase Prom.}_{0.5 \text{ a } 7 \text{ Hz}} = 0.68$
 $\text{Coh. Prom.}_{0.5 \text{ a } 7 \text{ Hz}} = 1$

- Componente Este – Oeste: Barrido entre 5 Hz – 15 Hz



- Componente Vertical: Barrido entre 5 Hz – 10 Hz

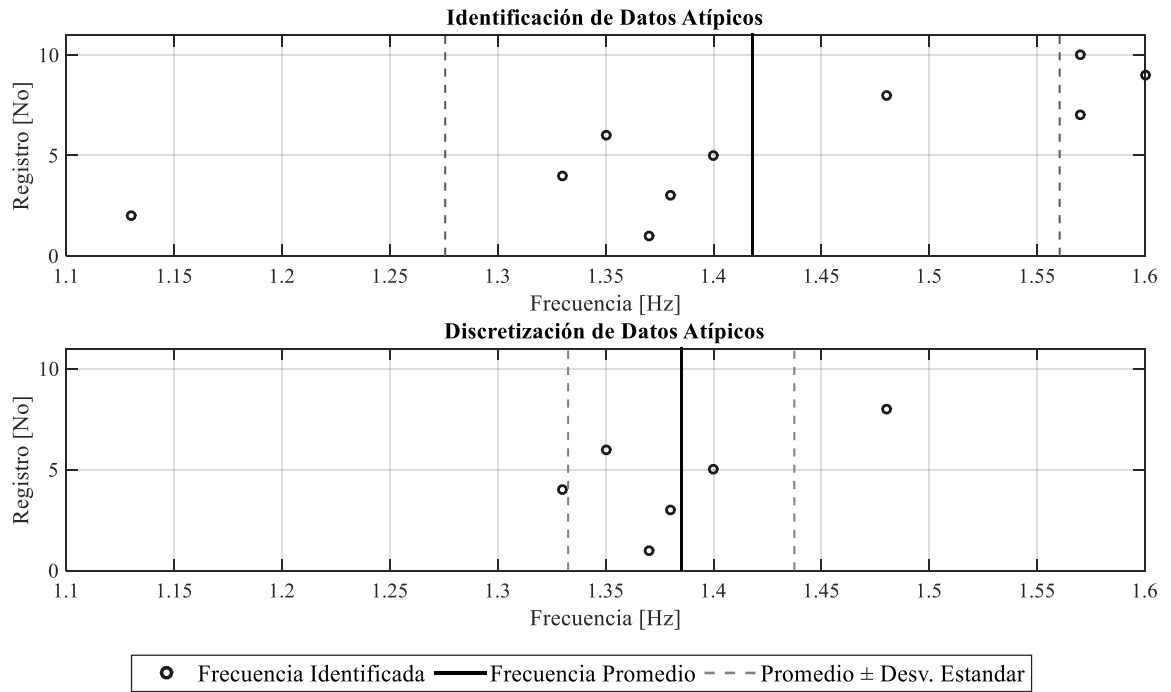


Anexo 7. Eventos Sísmicos Analizados, tomados del Servicio Geológico Colombiano

No	Ubicación	Fecha (dd/mm/aaaa)	Mw	Profundidad [km]	Distancia Epicentral [km]	Velocidad Pico		
						N - S [cm/s]	E -W [cm/s]	Vertical [cm/s]
1	Córdoba, Quindío	25/01/1999	6.3	0.0	138.800	1.664	0.740	1.584
2	Andalucía, Valle	15/01/2004	5.1	152.0	101.481	0.283	0.053	0.377
3	Sorata, Cauca	18/08/2004	5.2	1.0	137.270	0.309	0.168	0.079
4	Bajo Baudó, Chocó	15/11/2004	7.2	26.2	203.914	4.626	4.016	1.149
5	Toro, Valle	8/03/2005	5.2	5.0	142.050	0.299	0.191	0.171
6	Buga, Valle	7/10/2011	4.2	157.5	68.430	0.028	0.024	0.015
7	Sipi, Chocó	1/03/2012	4.8	93.8	110.988	0.070	0.068	0.048
8	Trujillo, Valle	2/01/2013	4.4	121.7	86.960	0.086	0.055	0.071
9	Guaitarilla, Nariño	9/02/2013	7	162.8	275.683	2.492	1.155	3.804
10	Bahía Solano, Chocó	13/08/2013	6.5	12.3	326.483	0.123	0.067	0.169
11	Dagua, Valle	27/08/2013	4.4	4.0	67.716	0.206	0.146	0.238
12	Cairo, Valle	31/10/2014	4.6	97.1	163.020	0.023	0.014	0.026
13	Argelia, Valle	21/02/2015	5.2	95.5	149.440	0.329	0.172	0.342
14	Tumaco, Nariño	30/05/2015	5.4	5.9	413.500	0.056	0.029	0.106
15	Calima, Valle	5/09/2015	4.9	135.7	71.100	0.113	0.085	0.089
16	Ecuador	16/04/2016	7.8	30.0	504.350	0.986	0.267	0.844

Anexo 8. Dispersión de Datos HVSR para Vibraciones

Ambientales



Anexo 9. Dispersión de Datos SSR para Vibraciones

Ambientales.

