



Gestión del Riesgo

Manizales - Colombia

Contrato interadministrativo No. 179/2012

“Aunar esfuerzos para mejorar la gestión del riesgo mediante el conocimiento y el desarrollo de sistemas de información en el municipio de Manizales”

**Armonización de la microzonificación sísmica con las normas NSR-10
Respuesta dinámica de los suelos de Manizales**

Gabriel Andrés Bernal Granados

**MANIZALES
Mayo 2014**

AUNAR ESFUERZOS PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL RIESGO MEDIANTE EL CONOCIMIENTO Y EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN EN EL MUNICIPIO DE MANIZALES, CONTRATO INTERADMINISTRATIVO NO. 179/2012

Tarea: “Armonización de la microzonificación sísmica e implicaciones económicas y de seguros”

Actividad: Actualización de la amenaza y microzonificación sísmica de la ciudad

**ARMONIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA CON LAS NORMAS NSR-10
RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS DE MANIZALES**

INFORME FINAL

Director: Omar Darío Cardona Arboleda

Coordinación: María del Pilar Pérez

Dora Catalina Suárez Olave

Supervisión: Samuel Darío Prieto

Contratista:

Gabriel Andrés Bernal Granados

**INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES**

**MANIZALES
MAYO 2014**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
Presentación.....	8
Antecedentes	9
Alcance y objetivos.....	11
Anexo digital.....	12
2. MODELO GEOTÉCNICO DE MANIZALES.....	13
Geología de Manizales	13
Información geotécnica.....	15
Geometría de las formaciones geológicas	39
Condiciones de borde.....	42
Modelo geotécnico	43
3. RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS BLANDOS	50
Estratigrafías sintéticas	50
Incertidumbre en la respuesta del suelo.....	55
Acelerogramas para el cálculo de las funciones de transferencia	55
Respuesta dinámica del suelo	60
Resultados	63
4. SELECCIÓN DE SEÑALES COMPATIBLES CON LA AMENAZA	70
Amenaza sísmica a nivel del terreno firme	70
Señales características compatibles con la amenaza.....	71
5. CONCLUSIONES.....	86
6. REFERENCIAS.....	88

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MANIZALES Y ESPECTROS DE DISEÑO. UNIANDES, 2002.....	11
FIGURA 2. MAPA GEOLÓGICO DE MANIZALES.....	14
FIGURA 3. UBICACIÓN DE LOS SONDEOS REALIZADOS EN EL ESTUDIO DE 2002, UNIANDES.....	17
FIGURA 4. UBICACIÓN DE LOS SONDEOS SOBRE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES.....	18
FIGURA 5. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO INGEOMINAS.....	19
FIGURA 6. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO PARQUE CALDAS.....	20
FIGURA 7. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO PARQUE CALDAS.....	21
FIGURA 8. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO FACULTAD DE ARQUITECTURA.....	22
FIGURA 9. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO FACULTAD DE ARQUITECTURA.....	23
FIGURA 10. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO CONFAMILIARES.....	24
FIGURA 11. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO CONFAMILIARES.....	25
FIGURA 12. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO ESCUELA ATANASIO GIRARDOT.....	26
FIGURA 13. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO ESCUELA ATANASIO GIRARDOT.....	27
FIGURA 14. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO COLEGIO BOSQUES DEL NORTE.....	28
FIGURA 15. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO COLEGIO BOSQUES DEL NORTE.....	29
FIGURA 16. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO COLDEPORTES.....	30
FIGURA 17. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO COLDEPORTES.....	31
FIGURA 18. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO COLEGIO SANTA INÉS.....	32
FIGURA 19. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO COLEGIO SANTA INÉS.....	33
FIGURA 20. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO SUBESTACIÓN MARMATO CHEC.....	34
FIGURA 21. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO CATEDRAL.....	35
FIGURA 22. CONTINUACIÓN DEL PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO CATEDRAL.....	36
FIGURA 23. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO ESTADIO PALOGRANDE.....	37
FIGURA 24. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO ANTIGUA ALCALDÍA.....	38
FIGURA 25. PERFIL ESQUEMÁTICO DE LA GEOLOGÍA DE MANIZALES. (TOMADO DE NARANJO Y RÍOS, 1989; LOS ESPESORES NO ESTÁN A ESCALA).....	39
FIGURA 26. PROFUNDIDAD DEL DEPÓSITO BLANDO (M).....	40
FIGURA 27. TOPOGRAFÍA DEL BASAMENTO ROCOSO (M.S.N.M).....	41
FIGURA 28. ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DE LA TOPOGRAFÍA DEL CONTACTO DE ROCA. VALORES EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.....	42
FIGURA 29. ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DE LA TOPOGRAFÍA DE LA SUPERFICIE. VALORES EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.....	43
FIGURA 30. VARIACIÓN EN PROFUNDIDAD DE LA HUMEDAD.....	45
FIGURA 31. VARIACIÓN EN PROFUNDIDAD DEL LÍMITE LÍQUIDO.....	45
FIGURA 32. VARIACIÓN EN PROFUNDIDAD DEL LÍMITE PLÁSTICO.....	46
FIGURA 33. VARIACIÓN EN PROFUNDIDAD DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD.....	46
FIGURA 34. VARIACIÓN EN PROFUNDIDAD DEL ÍNDICE DE LIQUIDEZ.....	46
FIGURA 35. VARIACIÓN EN PROFUNDIDAD DEL PESO ESPECÍFICO.....	46
FIGURA 36. VARIACIÓN EN PROFUNDIDAD DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTANTE.....	47
FIGURA 37. CURVAS DE DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ PARA DIFERENTES VALORES DE IL.....	48
FIGURA 38. CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO PARA DIFERENTES VALORES DE IL.....	48
FIGURA 39. CURVA DE DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ PARA SUELOS GRANULARES.....	49

FIGURA 40. CURVA DE AMORTIGUAMIENTO PARA SUELOS GRANULARES.	49
FIGURA 41. MALLA DE CÁLCULO.	51
FIGURA 42. SEÑALES DE FUENTE ACTIVA.	57
FIGURA 43. SEÑALES DE FUENTE ACTIVA.	58
FIGURA 44. SEÑALES DE FUENTE SUBDUCCIÓN.	59
FIGURA 45. SEÑALES DE FUENTE SUBDUCCIÓN.	60
FIGURA 46. CURVAS DEL MODELO LINEAL EQUIVALENTE.	62
FIGURA 47. PERIODOS FUNDAMENTALES DE VIBRACIÓN.	64
FIGURA 48. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL PROMEDIO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL LOGARITMO DE LA FUNCIÓN DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA.	65
FIGURA 49. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 457. FUENTE ACTIVA.	66
FIGURA 50. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 457. FUENTE SUBDUCCIÓN.	66
FIGURA 51. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 916. FUENTE ACTIVA.	67
FIGURA 52. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 916. FUENTE SUBDUCCIÓN.	67
FIGURA 53. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 989. FUENTE ACTIVA.	68
FIGURA 54. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 989. FUENTE SUBDUCCIÓN.	68
FIGURA 55. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 1311. FUENTE ACTIVA.	69
FIGURA 56. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL SITIO 1311. FUENTE SUBDUCCIÓN.	69
FIGURA 57. ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME A NIVEL DE ROCA FIRME PARA MANIZALES. (TOMADO DE SALGADO 2014, COMUNICACIÓN PERSONAL)	70
FIGURA 58. DESAGREGACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA PARA MANIZALES. (TOMADO DE SALGADO 2014, COMUNICACIÓN PERSONAL)	71
FIGURA 59. ACELEROGRAMA 1 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	74
FIGURA 60. ACELEROGRAMA 2 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	74
FIGURA 61. ACELEROGRAMA 3 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	75
FIGURA 62. ACELEROGRAMA 4 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	75
FIGURA 63. ACELEROGRAMA 5 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	76
FIGURA 64. ACELEROGRAMA 6 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	76
FIGURA 65. ACELEROGRAMA 7 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	77
FIGURA 66. ACELEROGRAMA 8 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	77
FIGURA 67. ACELEROGRAMA 9 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	78
FIGURA 68. ACELEROGRAMA 10 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	78
FIGURA 69. ACELEROGRAMA 11 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	79
FIGURA 70. ACELEROGRAMA 12 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	79
FIGURA 71. ACELEROGRAMA 13 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	80
FIGURA 72. ACELEROGRAMA 14 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	80
FIGURA 73. ACELEROGRAMA 15 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	81
FIGURA 74. ACELEROGRAMA 16 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	81
FIGURA 75. ACELEROGRAMA 17 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	82
FIGURA 76. ACELEROGRAMA 18 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	82
FIGURA 77. ACELEROGRAMA 19 DEL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	83
FIGURA 78. ACELEROGRAMA 1 DEL SEGUNDO RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	83
FIGURA 79. ACELEROGRAMA 2 DEL SEGUNDO RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	84
FIGURA 80. ACELEROGRAMA 3 DEL SEGUNDO RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	84
FIGURA 81. ACELEROGRAMA 4 DEL SEGUNDO RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	85

FIGURA 82. ACELEROGRAMA 5 DEL SEGUNDO RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA. 85



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. LISTADO DE SONDEOS DISPONIBLES OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MANIZALES (UNIANDÉS 2002)	16
TABLA 2. ESTRATIGRAFÍA SINTÉTICA GENERADA EN EL SITIO DE CÁLCULO 457 (COORDENADAS: -75.5161, 5.0662)	52
TABLA 3. ESTRATIGRAFÍA SINTÉTICA GENERADA EN EL SITIO DE CÁLCULO 916 (COORDENADAS: -75.4849, 5.073)	53
TABLA 4. ESTRATIGRAFÍA SINTÉTICA GENERADA EN EL SITIO DE CÁLCULO 1311 (COORDENADAS: -75.4563, 5.0322)	53
TABLA 5. ESTRATIGRAFÍA SINTÉTICA GENERADA EN EL SITIO DE CÁLCULO 989 (COORDENADAS: -75.4797, 5.0509)	54
TABLA 6. SEÑALES DE FUENTE ACTIVA SELECCIONADAS	56
TABLA 7. SEÑALES DE FUENTE SUBDUCCIÓN SELECCIONADAS	56
TABLA 8. SEÑALES SELECCIONADAS PARA EL PRIMER RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	73
TABLA 9. SEÑALES SELECCIONADAS PARA EL SEGUNDO RANGO DE MAGNITUD-DISTANCIA.	73

1. INTRODUCCIÓN

Presentación

La respuesta dinámica de los depósitos blandos de suelo modifica significativamente en amplitud y contenido frecuencial las señales sísmicas registradas a nivel de roca firme. Esta modificación está asociada al cambio de impedancias entre la roca firme y los estratos de suelo generalmente más blandos y menos competentes. La propagación vertical de las ondas de cortante por la estratigrafía local y el comportamiento típicamente no lineal de los estratos de suelo inducen estas modificaciones en el movimiento fuerte que alcanza la cimentación de las construcciones.

Si bien la respuesta dinámica de depósitos de suelo blando ha sido objeto de estudio desde hace más de 70 años, la investigación relacionada tomó fuerza con la ocurrencia del sismo de Michoacán, en México en 1985. En este terremoto se evidenció la importancia de los suelos blandos en la amplificación de las señales sísmicas incidentes en roca firme. Adicionalmente al sismo de México de 1985, varios terremotos han demostrado la importancia de los efectos de sitio en la demanda sísmica final sobre las edificaciones y componentes de infraestructura. Se resaltan los sismo de Kalamata, Grecia 1986; Armenia, URSS 1988; Loma Prieta, USA 1989; Filipinas 1990; Armenia, Colombia 1999; Chi-Chi, Taiwán 1999.

De acuerdo con el numeral A.2.9 de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10), las capitales de Departamento y las ciudades de más de 100 000 habitantes localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, con el fin de tener en cuenta el efecto que sobre las construcciones tenga la propagación de la onda sísmica a través de los estratos de suelo subyacentes, podrán armonizar las reglamentaciones municipales de ordenamiento del uso de la tierra, con un estudio de microzonificación sísmica.

Es por esto que dentro del marco del proyecto de extensión denominado “Aunar esfuerzos para mejorar la gestión del riesgo mediante el conocimiento y el desarrollo de sistemas de información en el municipio de Manizales” (contrato interadministrativo no. 179/2012), suscrito entre CORPOCALDAS y la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales se incorporó la armonización de la microzonificación sísmica de Manizales como un componente fundamental de la gestión del riesgo en la ciudad.

Para tal fin, se contrató por parte de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, la ODS 270 de 2013 cuyo objeto es realizar el cálculo en la respuesta dinámica del suelo para Manizales en el desarrollo de la tarea técnica “Armonización de la microzonificación

sísmica con las normas NSR-10 e implicaciones económicas y de seguros”. Este informe presenta el resumen de los trabajos realizados por parte del consultor.

Antecedentes

La ocurrencia del sismo de Popayán en 1983 derivó en la necesidad de conocer las características y condiciones particulares en las que se generan los terremotos en Colombia, así como la vulnerabilidad propia de las ciudades colombianas y los niveles de riesgo a los que se encuentra expuesta la población. Un primer paso en este sentido se dio con la publicación del Código Colombiano de Construcciones Sismo-resistentes, Decreto 1400 de 1984, el cual se basó en el estudio AIS 100 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). En 1984 se publica también el Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia, desarrollado de igual manera por la AIS.

En 1997 la AIS publica el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, el cual es un estudio de carácter científico orientado a la determinación de las características sísmicas de las principales fuentes generadoras de terremotos del país. Se identificaron y caracterizaron un total de 32 fuentes, entre fuentes tipo subducción y corticales. Como producto adicional de este estudio se desarrolló el mapa general de amenaza sísmica y el mapa de aceleraciones máximas probables a nivel de terreno firme para Colombia. Con este importante insumo, se conforma en 1998 la primera actualización de la normativa sismo-resistente nacional, bajo el nombre de Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente NSR-98, Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998.

En 2010 se desarrolla por parte de la AIS la actualización del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS 2010; Salgado et.al. 2010), en el cual fue definido un modelo actualizado de amenaza sísmica a nivel nacional, lo cual incluye la revisión y actualización de la geometría de las fuentes sismogénicas, nuevos parámetros de sismicidad que incluyen la ocurrencia de sismos importantes hasta el 2010, y funciones de atenuación específicas para el territorio colombiano. Los modelos de atenuación empleados fueron: una versión modificada del publicado por Campbell en 1997, y el propuesto por Gallego y Ordaz en 1999.

La primera actualización de la NSR se llevó a cabo en 2010 por parte de la AIS. La norma NSR-10 incluye los resultados del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, desarrollado por la AIS en 2010, el cual fue desarrollado con un modelo actualizado de amenaza sísmica a nivel nacional (Salgado et.al. 2010). Esta es la normativa vigente en la actualidad, y regula el diseño y construcción de edificaciones en todo el territorio nacional.

Según lo establecido en el numeral A.2.9 de la NSR-10, las ciudades capitales de Departamento y en general las ciudades con población superior a los 100.000 habitantes

localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta, deben complementar lo establecido en dicha normativa por medio de estudios particulares de microzonificación sísmica, que den cuenta de las amplificaciones en el movimiento fuerte del terreno como efecto de la respuesta dinámica de los depósitos blandos de suelo. Dentro de este marco, se han realizado en el país varios estudios de microzonificación sísmica de ciudades. El primero de ellos se realizó en la ciudad de Popayán en 1992 con financiación de la Comunidad Económica Europea, y la ejecución técnica de la Universidad de los Andes y el Ingeominas (actualmente Servicio Geológico Colombiano). Posteriormente se realizaron los estudios de microzonificación sísmica de Bogotá (primera versión), ejecutado por la Universidad de los Andes y el Ingeominas; y de Medellín, llevado a cabo por la Universidad EAFIT, Integral, Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Hacia abril de 1999 se realizaron también los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad de Pereira y los municipios de Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal bajo la dirección de la Universidad de los Andes.

Después de la ocurrencia del sismo del Eje Cafetero en enero de 1999, que ocasionó la destrucción de una parte importante de la ciudad de Armenia, se desarrolló el Estudio de Microzonificación Sísmica Indicativa de Armenia-Quindío, en el cual participaron la Universidad de los Andes, la AIS, la Universidad del Quindío e Ingeominas. Este estudio, financiado por la OFDA/AID de los Estados Unidos, fue realizado con el fin de definir los planes de ordenamiento y reconstrucción de la ciudad.

El 30 de enero de 2001, se firma en Bogotá el Decreto 074 de 2001, por medio del cual se complementa y modifica el Código de Construcción de Bogotá y se identifican los límites de la Microzonificación Sísmica y se adoptan los espectros de diseño. La firma de este decreto obliga al uso de los resultados del estudio de microzonificación sísmica en el diseño de edificaciones nuevas en la ciudad.

La Universidad de los Andes adelantó en el 2002 el Estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales, con la colaboración de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. En este estudio se realizó la investigación geotécnica del subsuelo de la ciudad, la evaluación de la respuesta dinámica, y la definición de espectros de diseño en 3 zonas, los cuales se presentan en la Figura 1. Las zonas corresponden a:

- Zona A: Depósitos de caída piroclástica (ceniza), de espesor variable.
- Zona B: Depósitos de relleno.
- Zona C: Formaciones rocosas, típicamente del periodo terciario, y asociadas a procesos como flujos de lodos y avenidas torrenciales. Corresponden a suelos de poco espesor.

El estudio realizado por la Universidad de los Andes en 2002, es un excelente referente y, a opinión de este consultor, uno de los estudios más avanzados para su época en términos de ingeniería sísmica y dinámica de suelos.

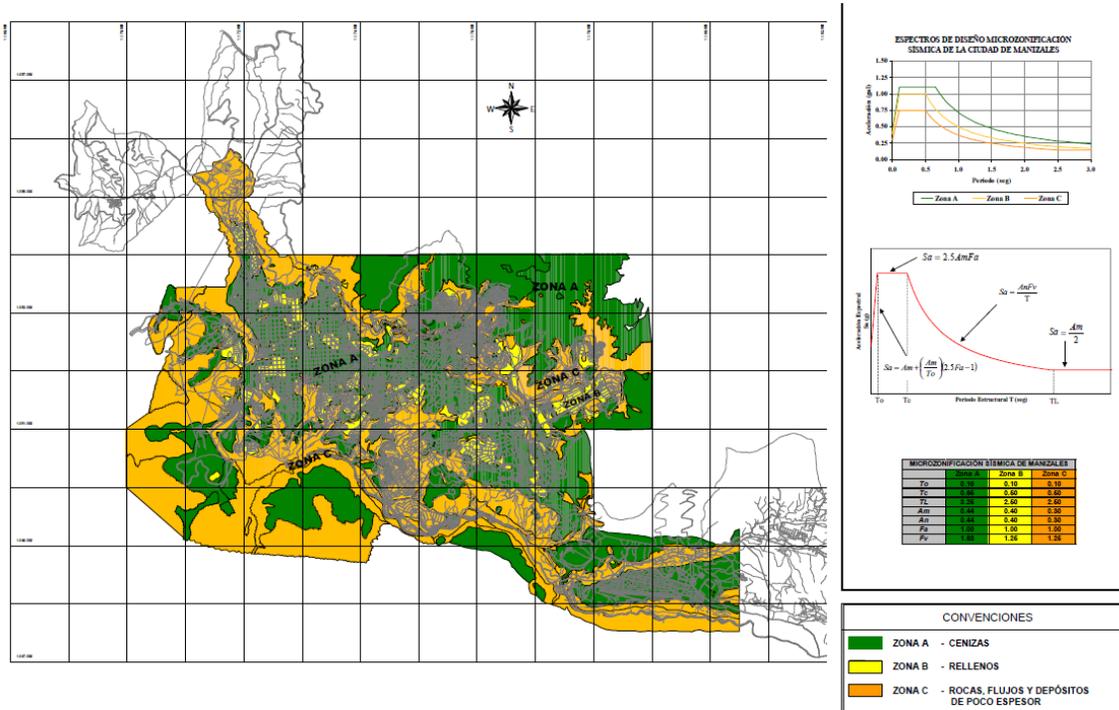


Figura 1. Microzonificación sísmica de Manizales y espectros de diseño. Uniandes, 2002.

Así mismo en el 2005, la Universidad de los Andes adelantó el estudio de Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tuluá y Buga en el Valle del Cauca, y en 2006 los Estudios de Amenaza, Respuesta Dinámica y Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Ibagué. Hacia mediados del año 2007, el Ingeominas finalizó la realización de la microzonificación sísmica de Cali. También en 2007 la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (DPAE) realizó el Estudio de Actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá, ejecutado de manera paralela por la Universidad de los Andes, la AIS y la Sociedad Colombiana de Geotecnia. Finalmente en 2012, la Universidad de los Andes ejecutó el proyecto de actualización y armonización de la microzonificación sísmica de Popayán.

Alcance y objetivos

No obstante la existencia de un estudio de microzonificación sísmica en Manizales, se aplica en este estudio una metodología novedosa para la evaluación de efectos de sitio en la ciudad, la cual está basada en la geometría de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos (Bernal et. al., 2013). Esta metodología permite calcular la respuesta dinámica del suelo en cualquier punto dentro de la ciudad, y consecuentemente realizar cálculos de amenaza sísmica a nivel de superficie y la armonización de dicha amenaza a la

normativa nacional. En el desarrollo del presente contrato, se generó el modelo geotécnico general de Manizales y se obtuvieron las funciones de transferencia del espectro de amplitudes de Fourier.

En resumen, los objetivos del presente trabajo son:

1. Construir un modelo geotécnico para la ciudad de Manizales, con fines de respuesta dinámica.
2. Evaluar la respuesta dinámica del suelo en múltiples ubicaciones dentro de la ciudad.
3. Calcular las funciones de transferencia del espectro de Fourier en múltiples ubicaciones dentro de la ciudad.
4. Definir una familia de acelerogramas compatibles con la amenaza en roca para fines de futuros estudios de respuesta sísmica local.

Este informe contiene la metodología aplicada y resultados obtenidos para el cumplimiento de los anteriores objetivos. Los cálculos acá presentados fueron realizados con los programas Seismic Microzonation Studio (SMS) (Bernal 2013) y Strong Motion Analyst (SMA) (Bernal, 2012).

Anexo digital

Todos los resultados de este estudio se entregan en un anexo a este informe, en formato digital. El anexo digital se compone de la siguiente información:

- Modelo geométrico de las formaciones geológicas de Manizales.
- Modelo geotécnico de Manizales.
- Acelerogramas para el cálculo de las funciones de transferencia.
- Resultados del análisis de la respuesta dinámica.
- Funciones de transferencia del espectro de amplitudes de Fourier en todos los sitios de cálculo.
- Acelerogramas característicos compatibles con la amenaza en Manizales.

Para la correcta visualización de estos resultados, se entregan por parte de este consultor licencias académicas de los siguientes programas (de propiedad del consultor):

- Seismic Microzonation Studio. Permite visualizar y modificar todo el modelo geológico, geotécnico y de respuesta sísmica de Manizales.
- Strong Motion Analyst. Permite procesar las señales sísmicas seleccionadas.
- FileCAT. Permite visualizar las funciones de transferencia del espectro de Fourier.

2. MODELO GEOTÉCNICO DE MANIZALES

La respuesta dinámica de los suelos genera grandes diferencias tanto en amplitud como en el contenido frecuencial de registros de movimiento fuerte en superficie, en comparación con las señales a nivel de roca firme. Los cambios en las señales sísmicas generados por la propagación de onda en los estratos de suelo inciden directamente en las sollicitaciones y el comportamiento de las edificaciones ante un terremoto. Por esta razón para generar diseños adecuados en el desarrollo de obras civiles en países con amenaza sísmica alta o intermedia (como es el caso de Colombia) es de vital importancia estimar los efectos de amplificación o deamplificación sísmica generados por los estratos de suelo que componen el perfil estratigráfico.

Para determinar la respuesta dinámica en una ubicación específica, se requiere conocer las características estratigráficas y propiedades geotécnicas de los suelos existentes. Estos factores son cruciales para la correcta determinación de los valores de amplificación asociados al comportamiento dinámico del suelo en condiciones de movimiento fuerte. La manera como cada uno de estos factores influyen la respuesta definitiva ha sido objeto de estudios teóricos y experimentales a nivel mundial en años recientes.

La información geotécnica existente para Manizales es el resultado de una serie de estudios que se han llevado a cabo en la ciudad desde hace más de una década. Se cuenta entonces con información geotécnica referente a exploraciones de suelos con fines de evaluación de respuesta dinámica local, información de profundidad de basamento rocoso, periodos dominantes de los depósitos de suelo y amenaza general a nivel de superficie, como resultado del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad.

Geología de Manizales

Las formaciones geológicas superficiales se presentan en la Figura 2. La mayoría de la extensión de la ciudad se encuentra sobre depósitos de caída piroclástica (ceniza), de espesor variable. Se destacan también el complejo Quebradagrande, la formación Manizales y la formación Casabianca.

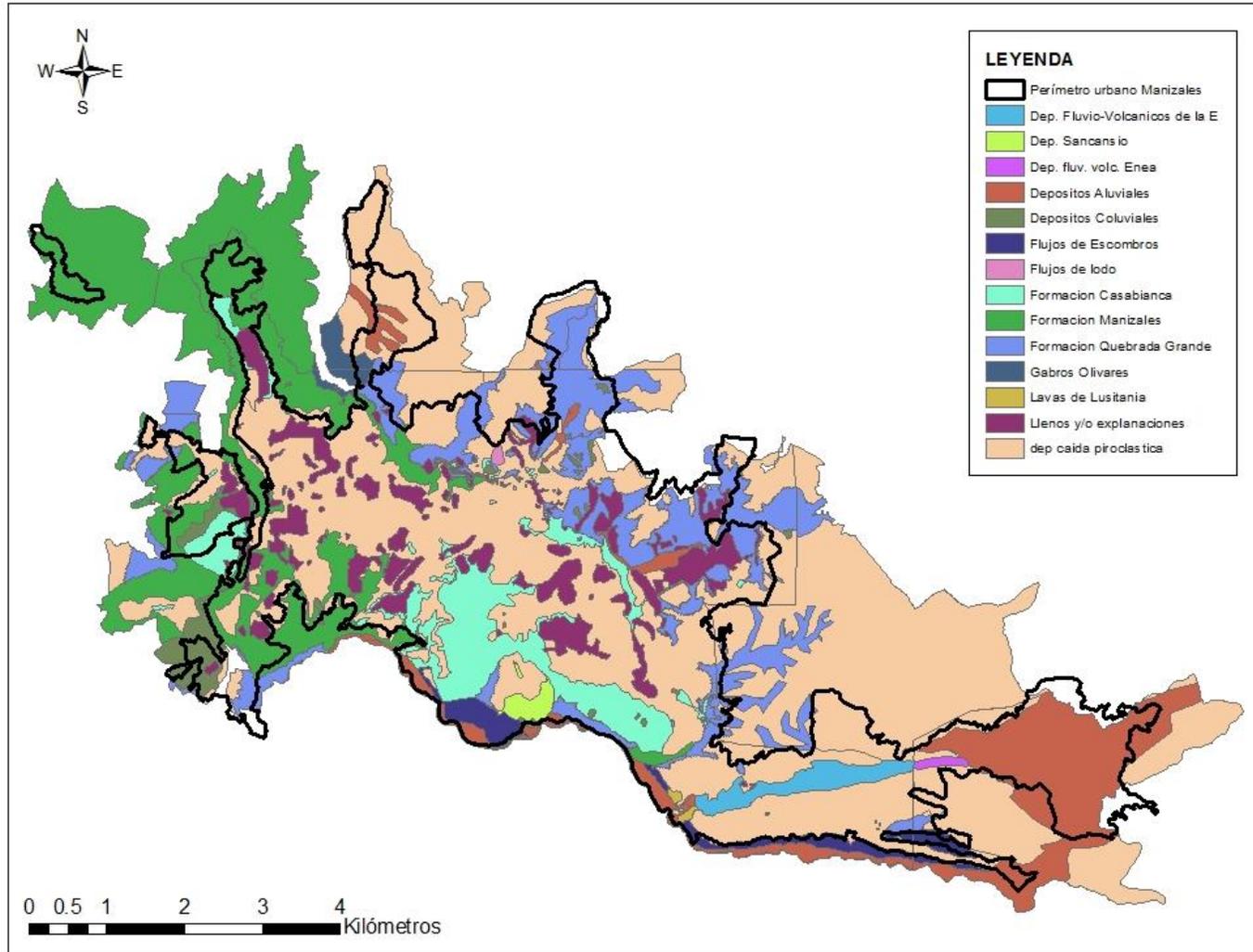


Figura 2. Mapa geológico de Manizales.

El Complejo Quebradagrande incluye rocas volcánicas y sedimentarias, principalmente areniscas líticas, brechas sedimentarias, conglomerados polimícticos con clastos volcánicos, cuarzo lechoso, fragmentos de anfibolitas, chert, lutitas, lentes de calizas y grauvacas (Duque, 2006). Presenta en general alto buzamiento con excepciones locales.

Según Naranjo y Ríos (1989), la Formación Manizales suprayace el basamento metasedimentario y es a la vez la unidad inferior del supraterrano volcanoclástico de Manizales. Está constituida por un conjunto de rocas sedimentarias vulcanogénicas con clastos del complejo volcánico Ruiz–Tolima. Los afloramientos de la Formación Manizales se dan al occidente de la ciudad, en donde la unidad presenta un escarpe de falla de más de treinta metros de altura asociado al sistema Romeral. La Formación Casabianca es en términos generales igual a la anterior. Subyace a los depósitos de caída piroclástica que constituyen el terreno superficial de Manizales. Espacialmente, reposa sobre la Formación Manizales y el Complejo Quebradagrande.

La mayoría de la superficie del área urbana de Manizales está constituida por dos unidades cuaternarias de caída piroclástica. La más antigua es una capa de tobas volcánicas afectadas por la última glaciación. La segunda unidad está caracterizada por tefras (cenizas) estratificadas no consolidados y de ambiente subaéreo. Las capas de los diferentes eventos son visibles y alternan entre ellas lapilli, arena volcánica y ceniza.

Información geotécnica

En el estudio de microzonificación sísmica de Manizales (Uniandes, 2002) se realizaron 23 perforaciones exploratorias que constituyen la mejor base de información geotécnica para la ciudad, en términos de evaluación de la respuesta dinámica de los suelos. La ubicación de los sondeos en la ciudad se muestra en la Figura 3. La Figura 4 presenta la ubicación de dichos sondeos sobre las formaciones geológicas superficiales de la ciudad. Es posible ver que la mayoría se encuentran ubicados sobre la formación de depósitos de caída piroclástica.

De cada sondeo se cuenta con la siguiente información en profundidad:

- Clasificación del suelo en el sistema USCS¹.
- Descripción del material del estrato.
- Humedad natural del suelo, límites de Atterberg (límite plástico y límite líquido) y propiedades índice derivadas de estos (índice de plasticidad e índice de liquidez).
- Peso específico.
- Perfil de velocidad de onda de cortante, medido mediante ensayo Down Hole.

¹ Unified Soil Classification System

La Tabla 1 presenta el nombre, ubicación y profundidad total explorada de los sondeos disponibles. De la Figura 5 a la Figura 24 se presentan de manera gráfica las propiedades geotécnicas medidas en campo para algunos sondeos seleccionados. Los sondeos presentados son aquellos que cuentan con información completa, los cuales son los identificados como: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 20, 21. Sin embargo, para la definición del modelo geotécnico se empleó toda la información disponible.

Tabla 1. Listado de sondeos disponibles obtenidos del Estudio de Microzonificación Sísmica de Manizales (Uniandes 2002)

Sondeo	Ubicación	Longitud	Latitud	Profundidad [m]
1	Clínica Seguros Sociales	-75.53	5.08	8.75
2	Ingeominas	-75.52	5.07	23.5
3	Parque Caldas	-75.51	5.07	40
4	Facultad de Arquitectura	-75.49	5.06	42
5	Confamiliares	-75.50	5.06	34
6	Escuela Atanasio Girardot	-75.49	5.05	34
7	Colegio Bosques del Norte	-75.49	5.08	31.5
8	Colegio San Pio X La Enea	-75.46	5.03	18
9	Instituto Integrado La Sultana	-75.47	5.06	21
10	Coldeportes	-75.50	5.07	42
11	Colegio Santa Inés	-75.48	5.05	50
12	Subestación Marmato CHEC	-75.51	5.06	16.5
13	Catedral	-75.52	5.07	40
13	Catedral	-75.52	5.07	40
14	Alejandro 1	-75.49	5.05	23.5
15	Alejandro 2	-75.49	5.05	9
16	Torrear	-75.49	5.05	10
17	La Gotera (UNAL)	-75.49	5.06	15
18	P. Fundadores	-75.51	5.07	17
20	Estadio Palogrande	-75.49	5.06	29.5
21	Antigua Alcaldía	-75.52	5.07	25
21	Antigua Alcaldía	-75.52	5.07	25
23	Villa Carmenza	-75.51	5.06	14.8

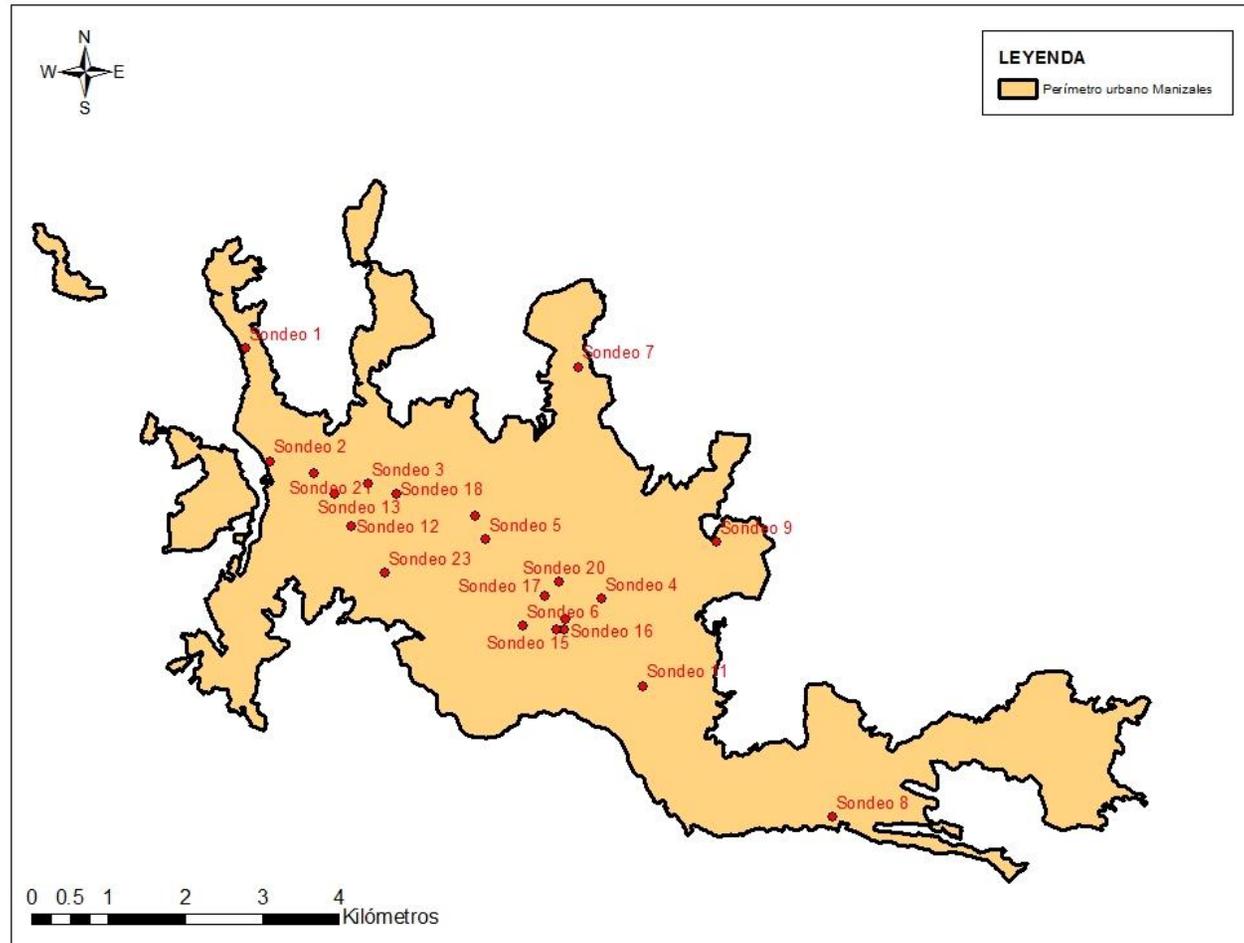


Figura 3. Ubicación de los sondeos realizados en el estudio de 2002, Uniandes.

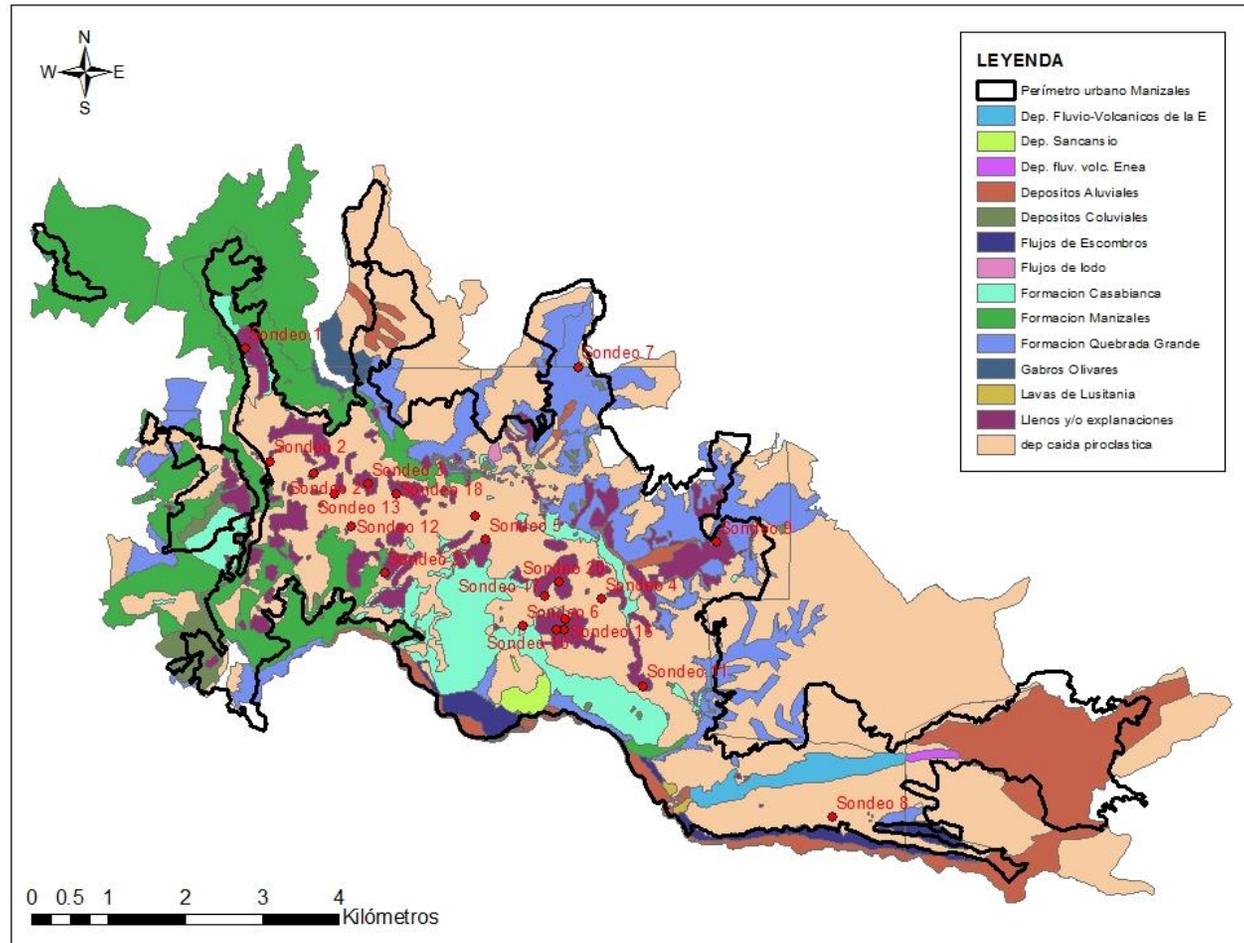


Figura 4. Ubicación de los sondeos sobre las formaciones geológicas superficiales.

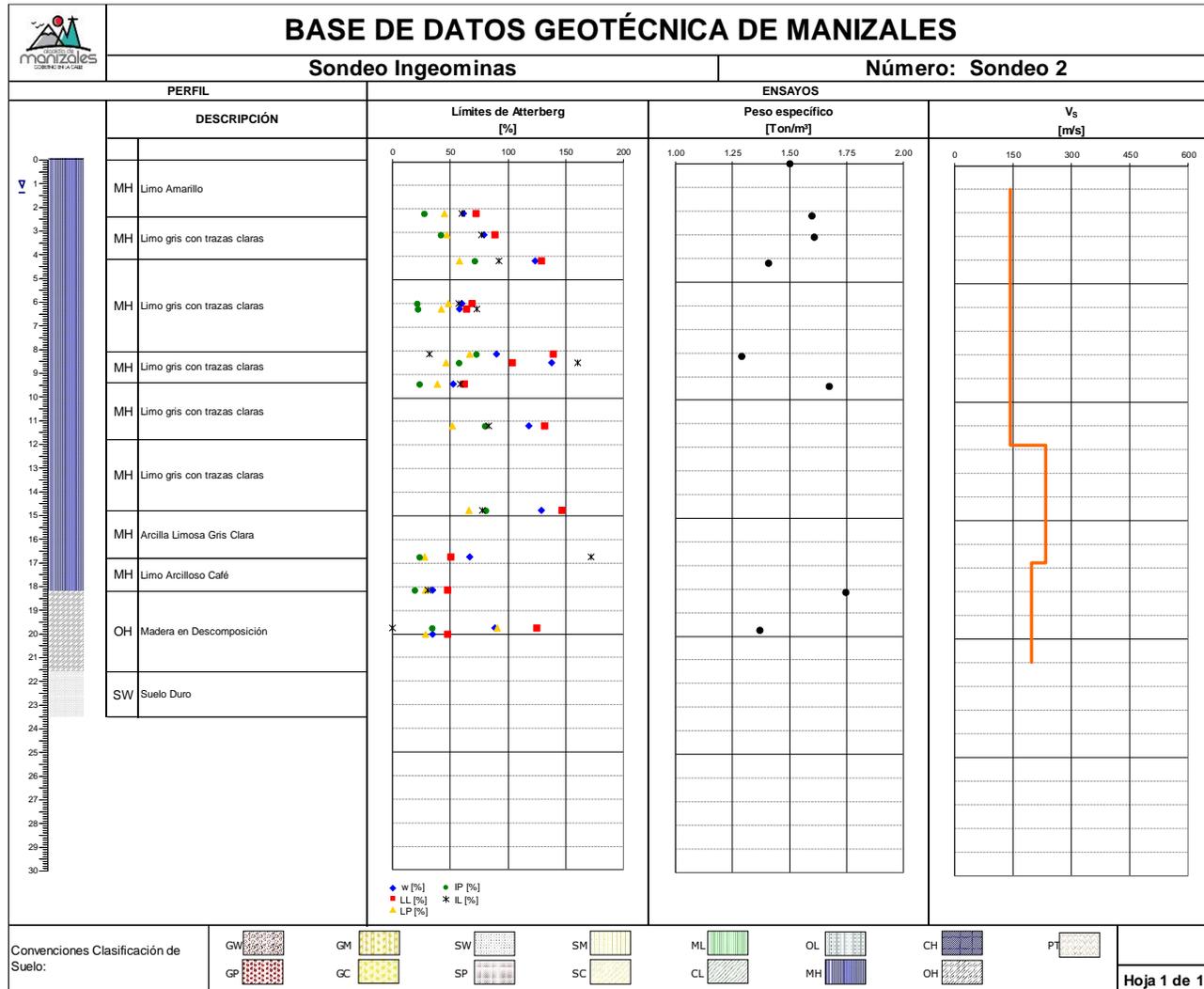


Figura 5. Perfil estratigráfico del sondeo Ingeominas.

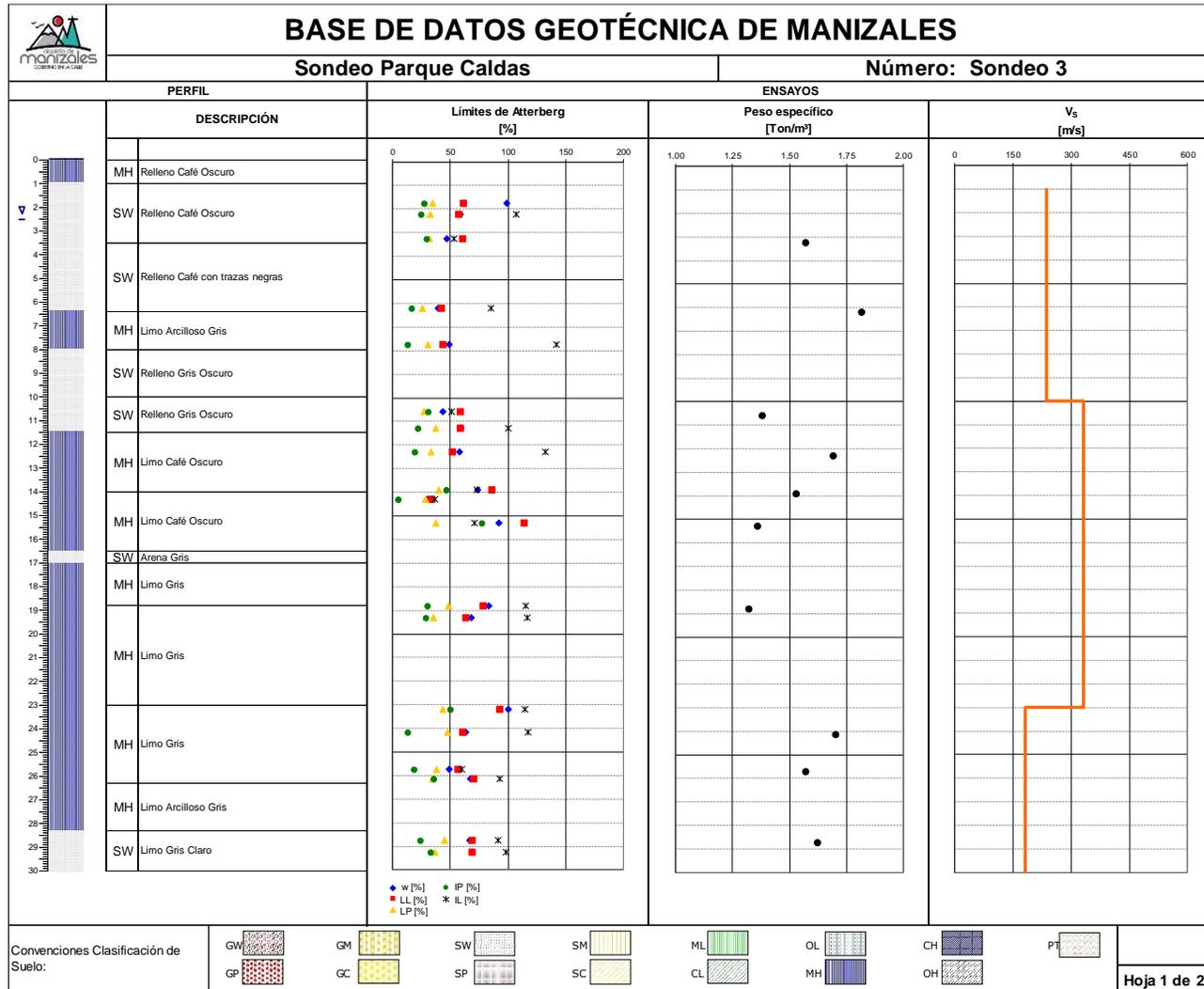


Figura 6. Perfil estratigráfico del sondeo Parque Caldas.

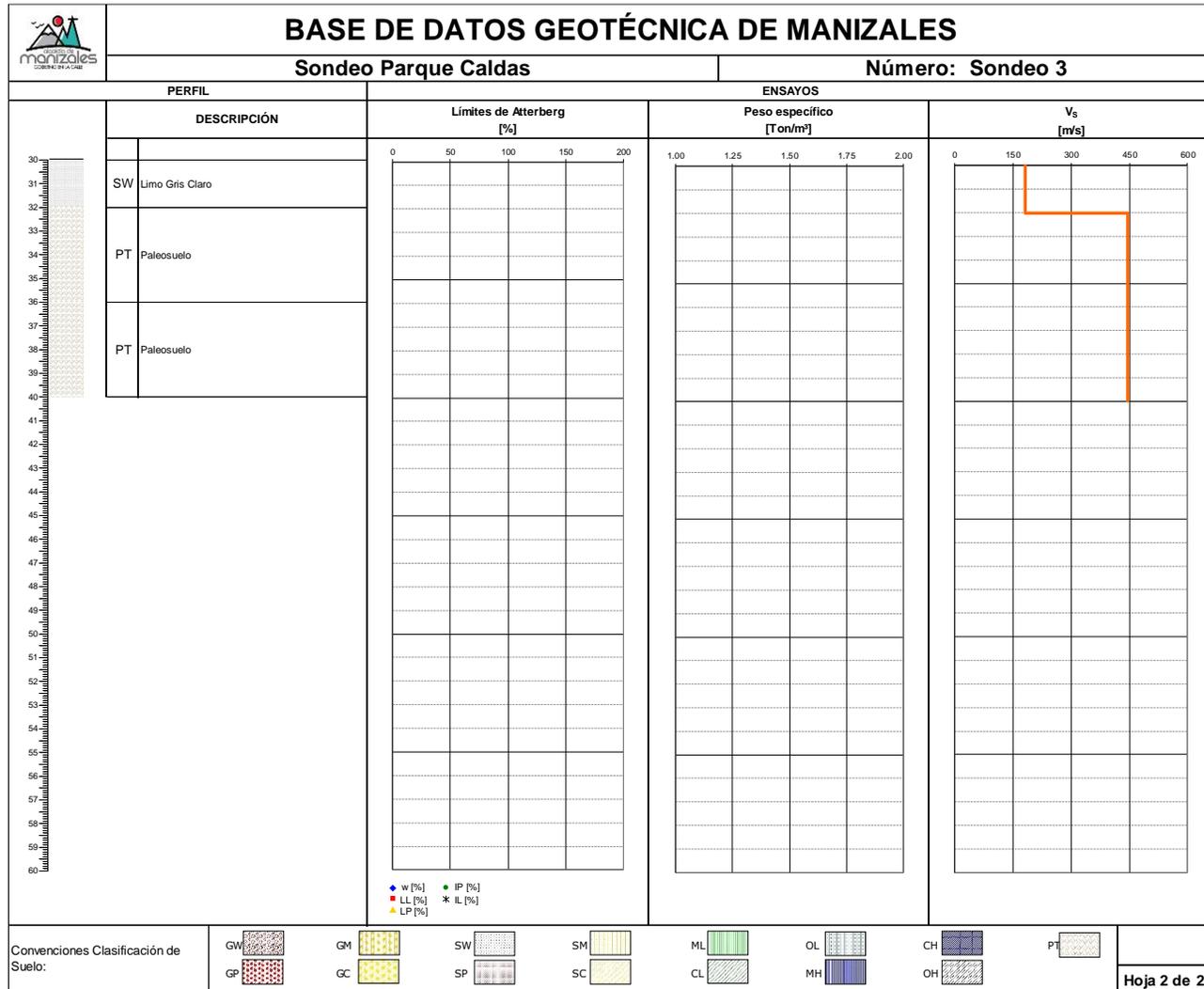


Figura 7. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Parque Caldas.

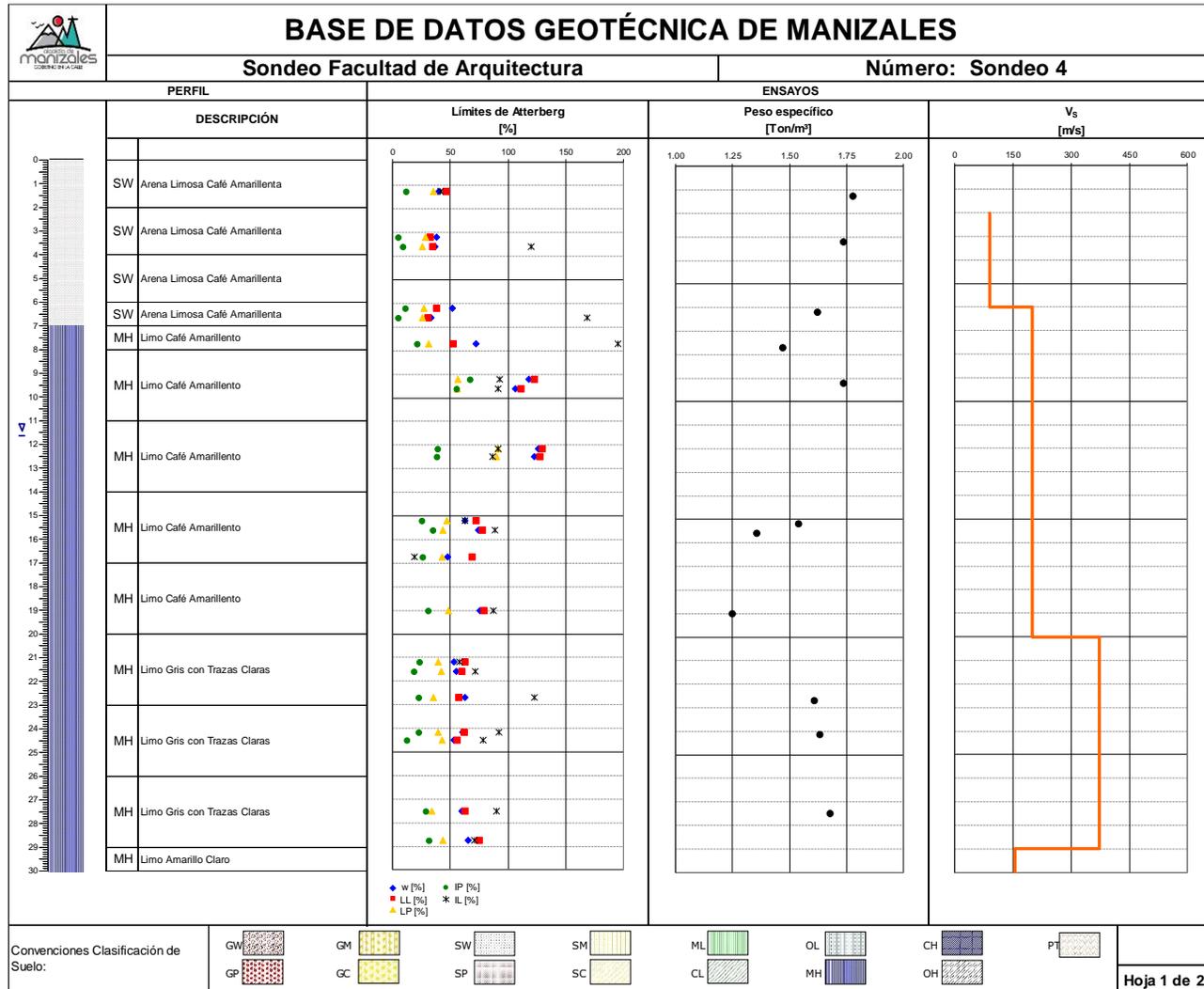


Figura 8. Perfil estratigráfico del sondeo Facultad de Arquitectura.

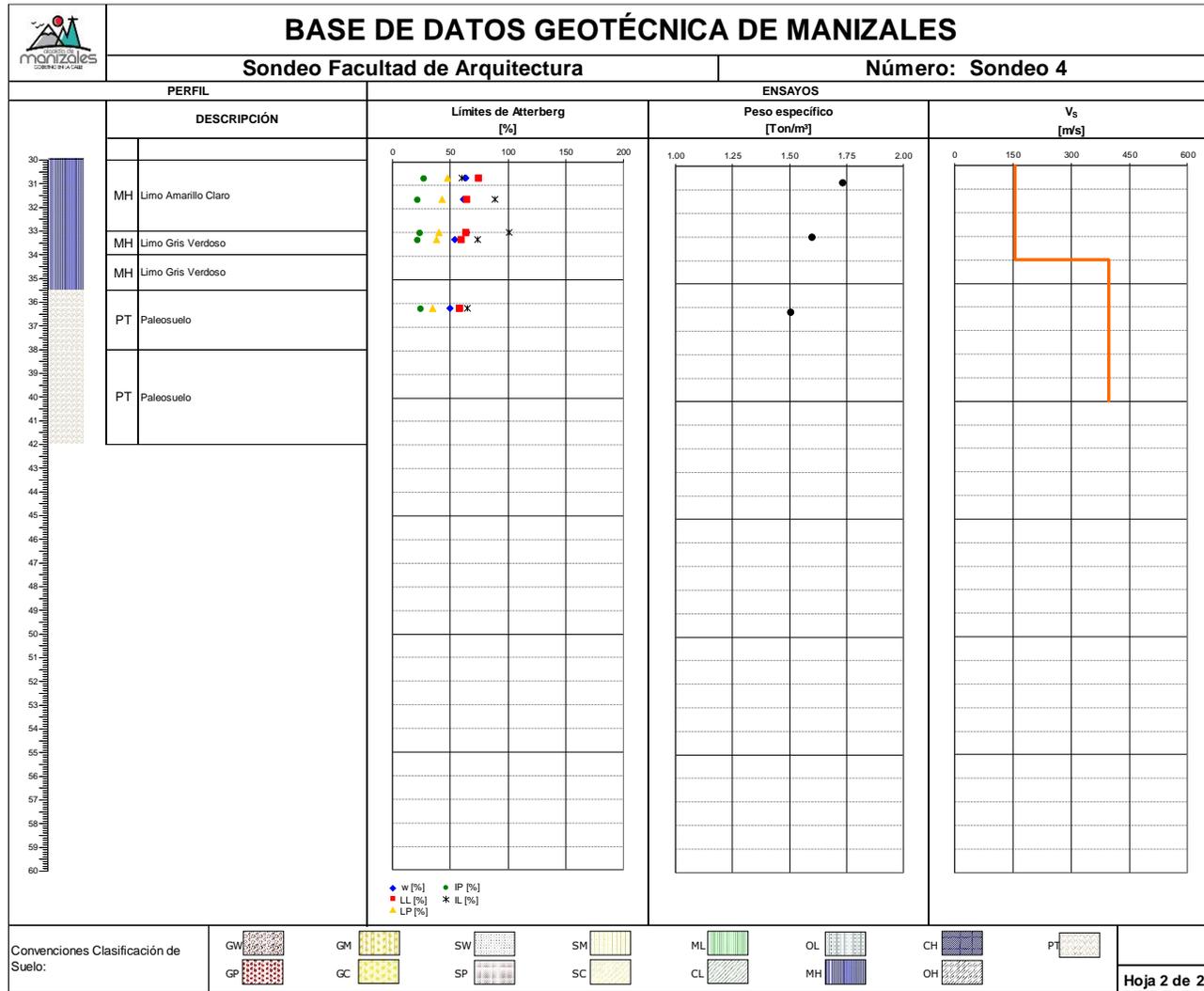


Figura 9. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Facultad de Arquitectura.

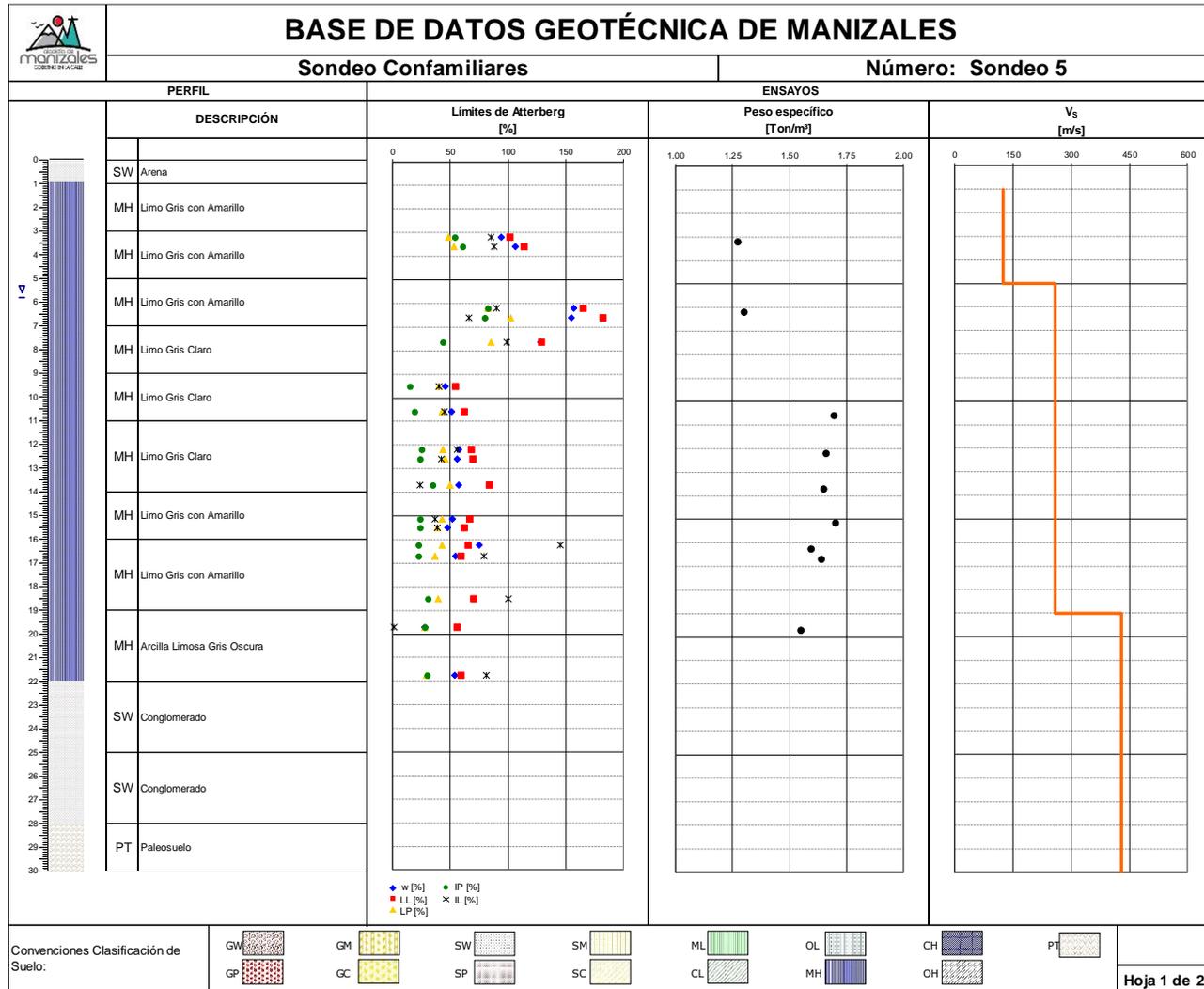


Figura 10. Perfil estratigráfico del sondeo Confamiliares.

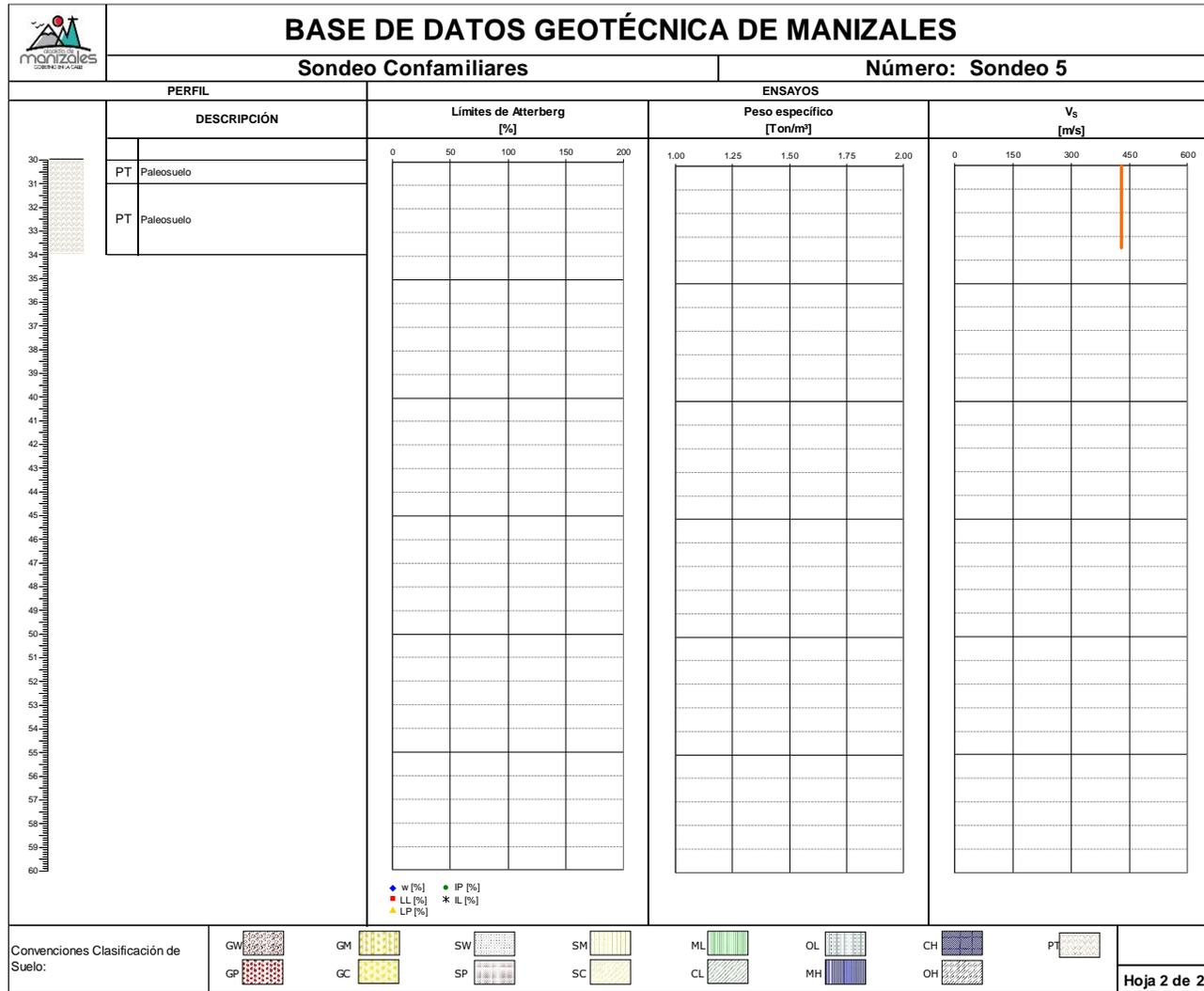


Figura 11. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Confamiliares.

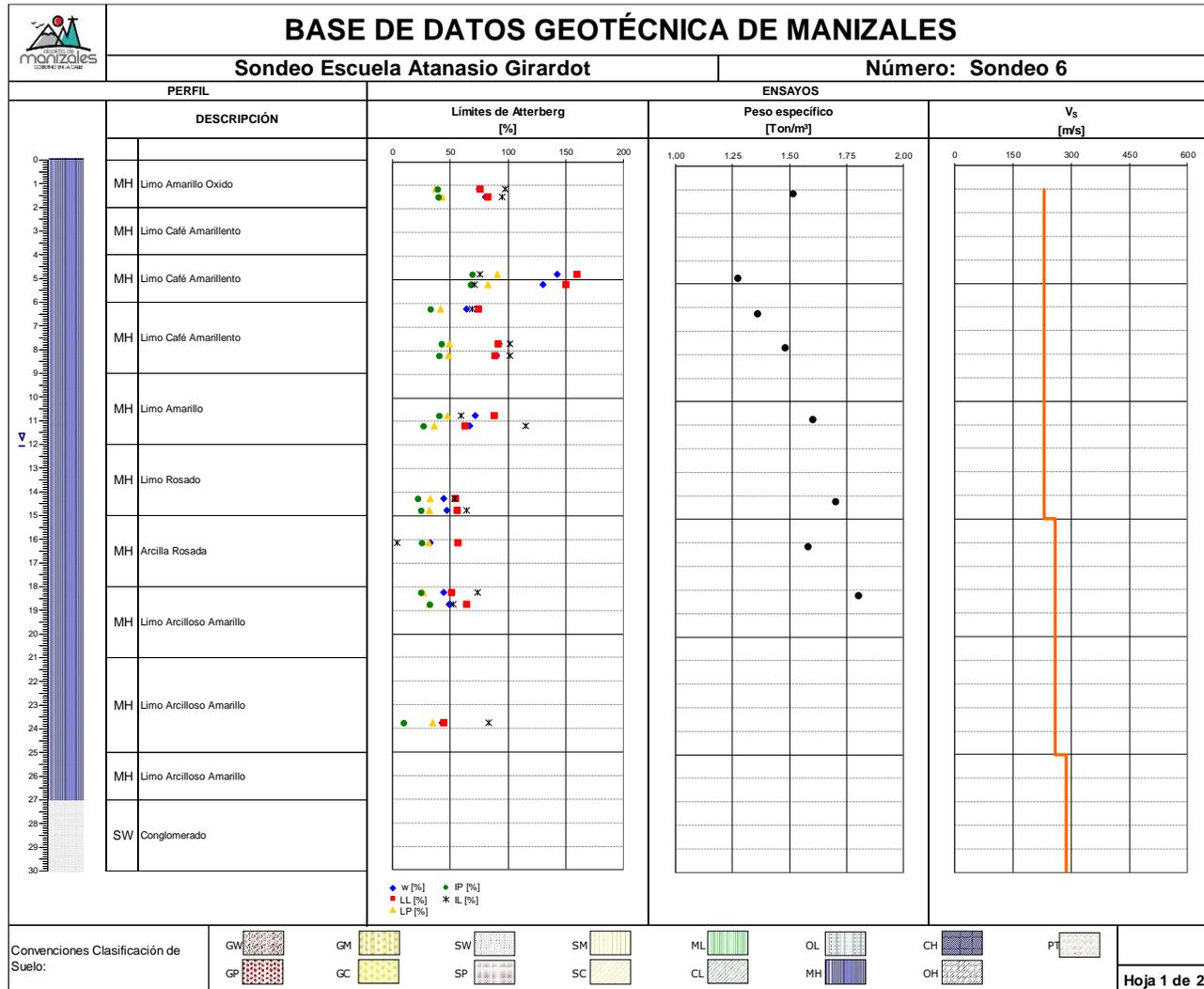


Figura 12. Perfil estratigráfico del sondeo Escuela Atanasio Girardot.

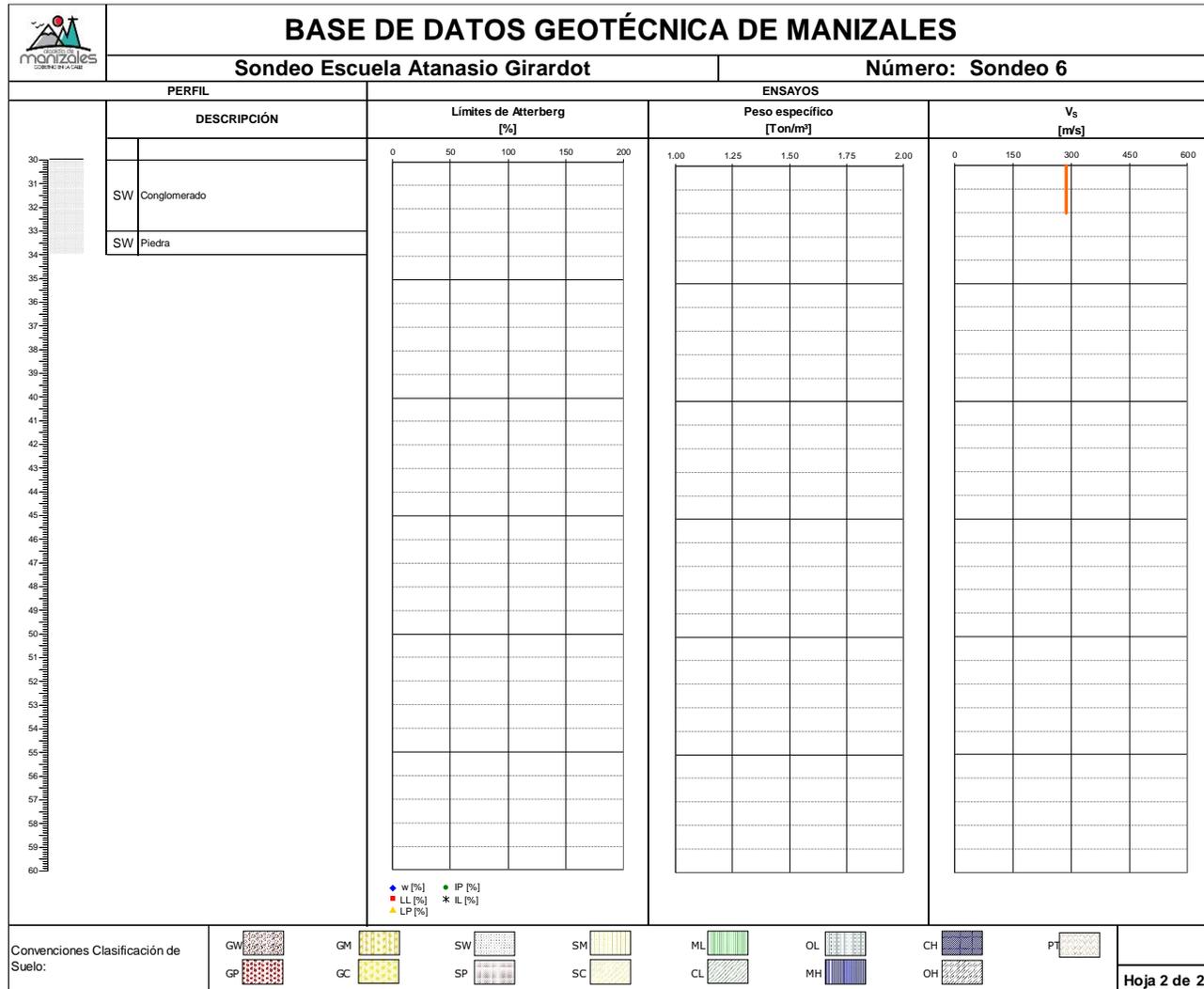


Figura 13. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Escuela Atanasio Girardot.

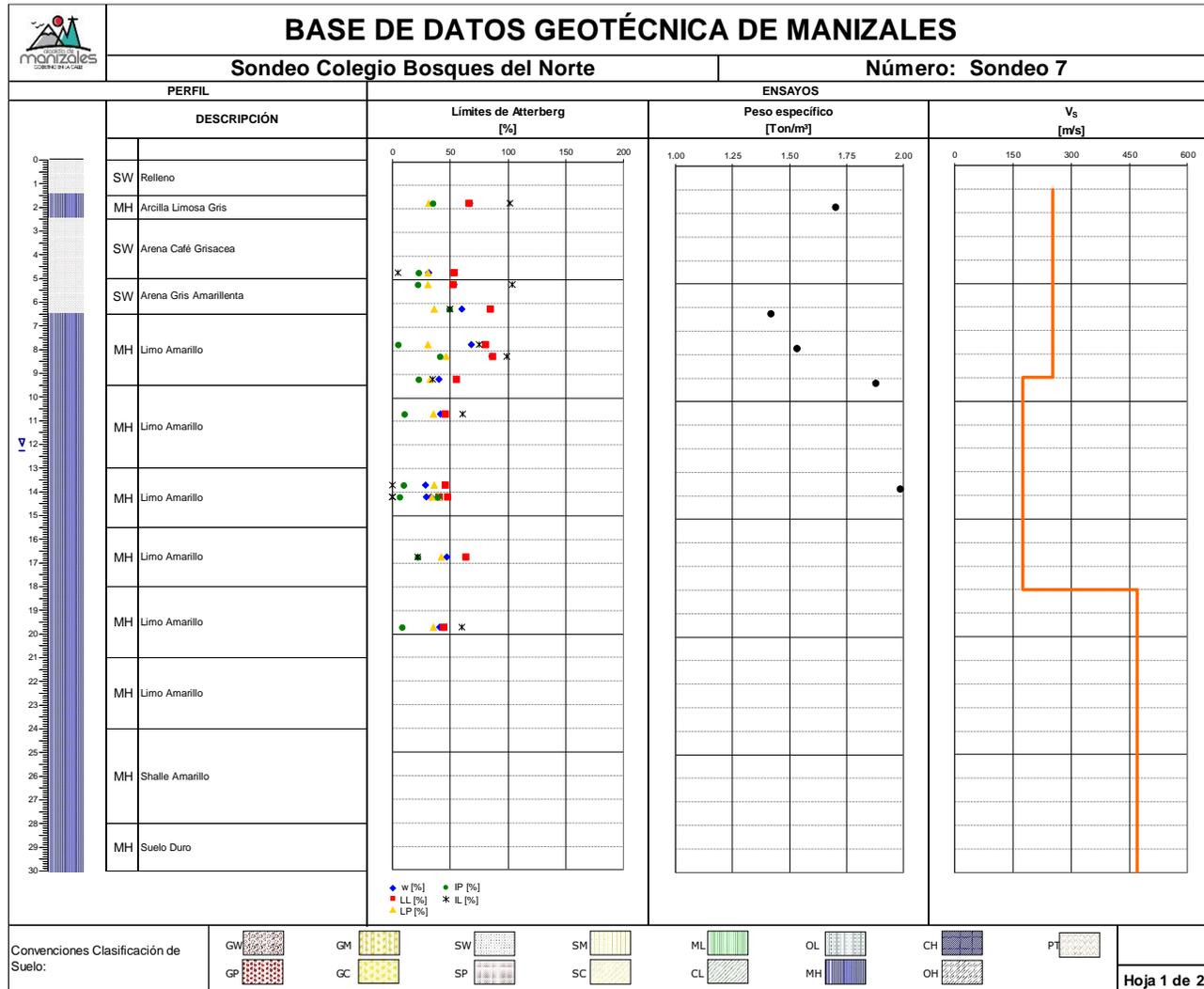


Figura 14. Perfil estratigráfico del sondeo Colegio Bosques del Norte.

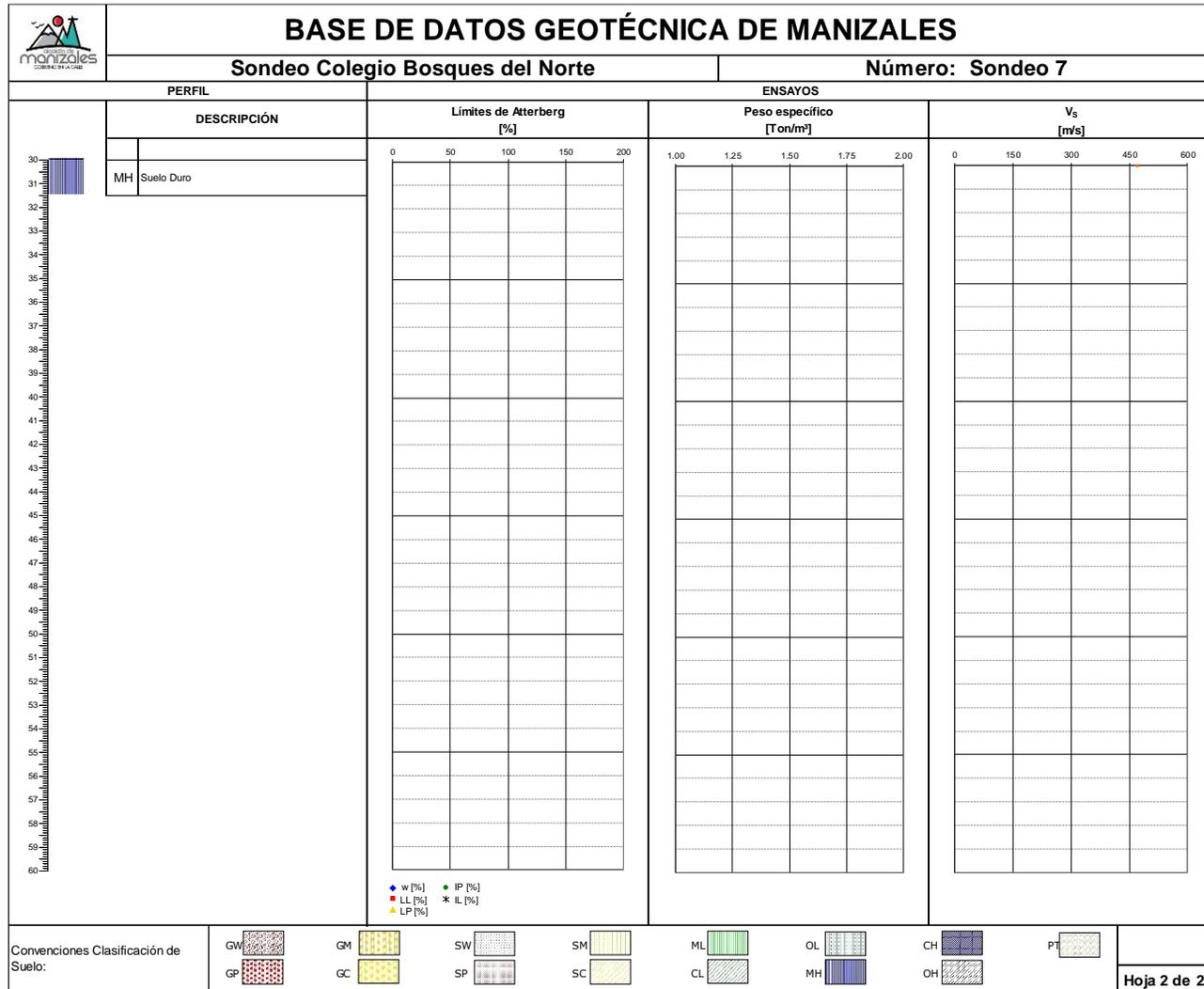


Figura 15. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Colegio Bosques del Norte.

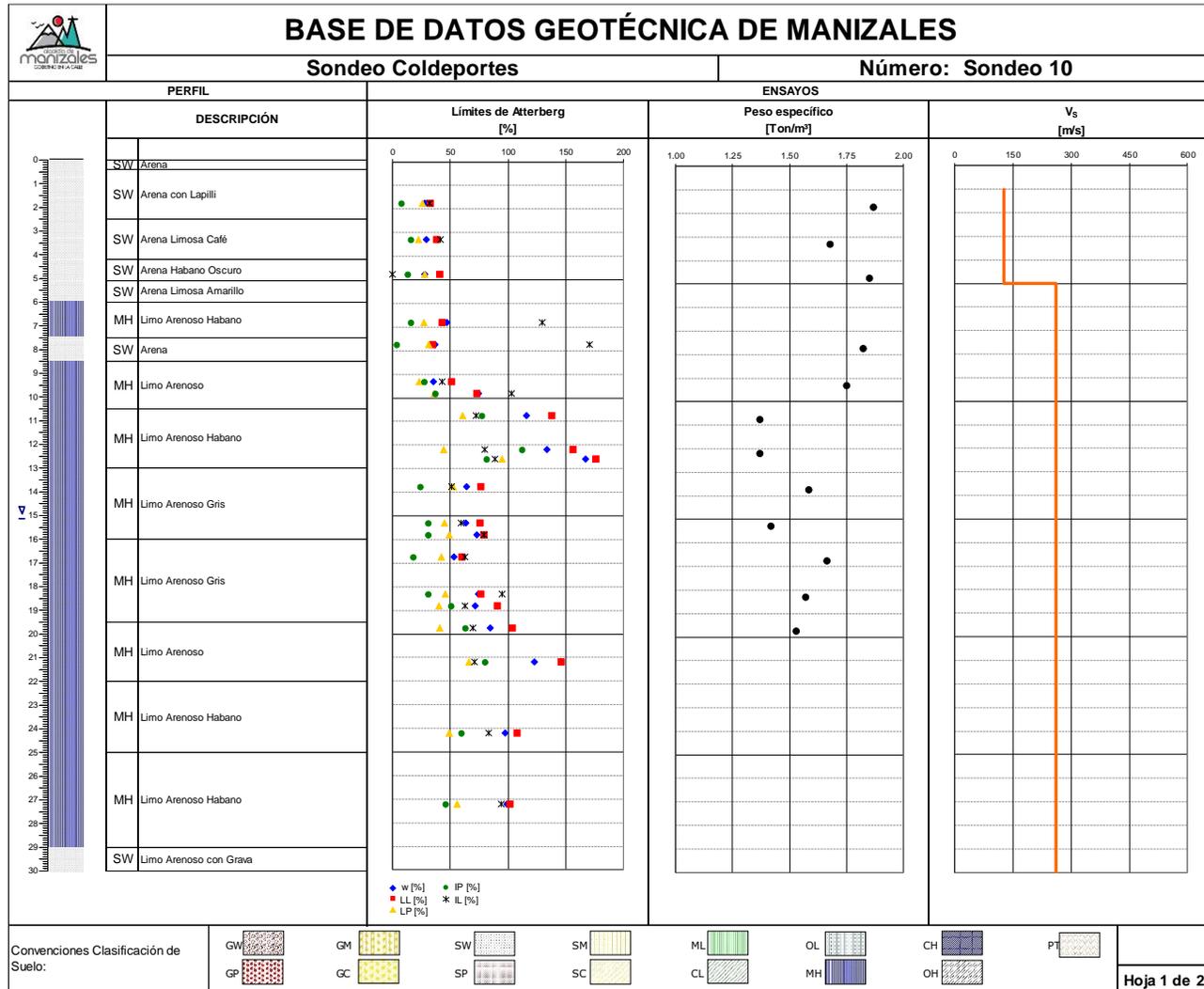


Figura 16. Perfil estratigráfico del sondeo Coldeportes.

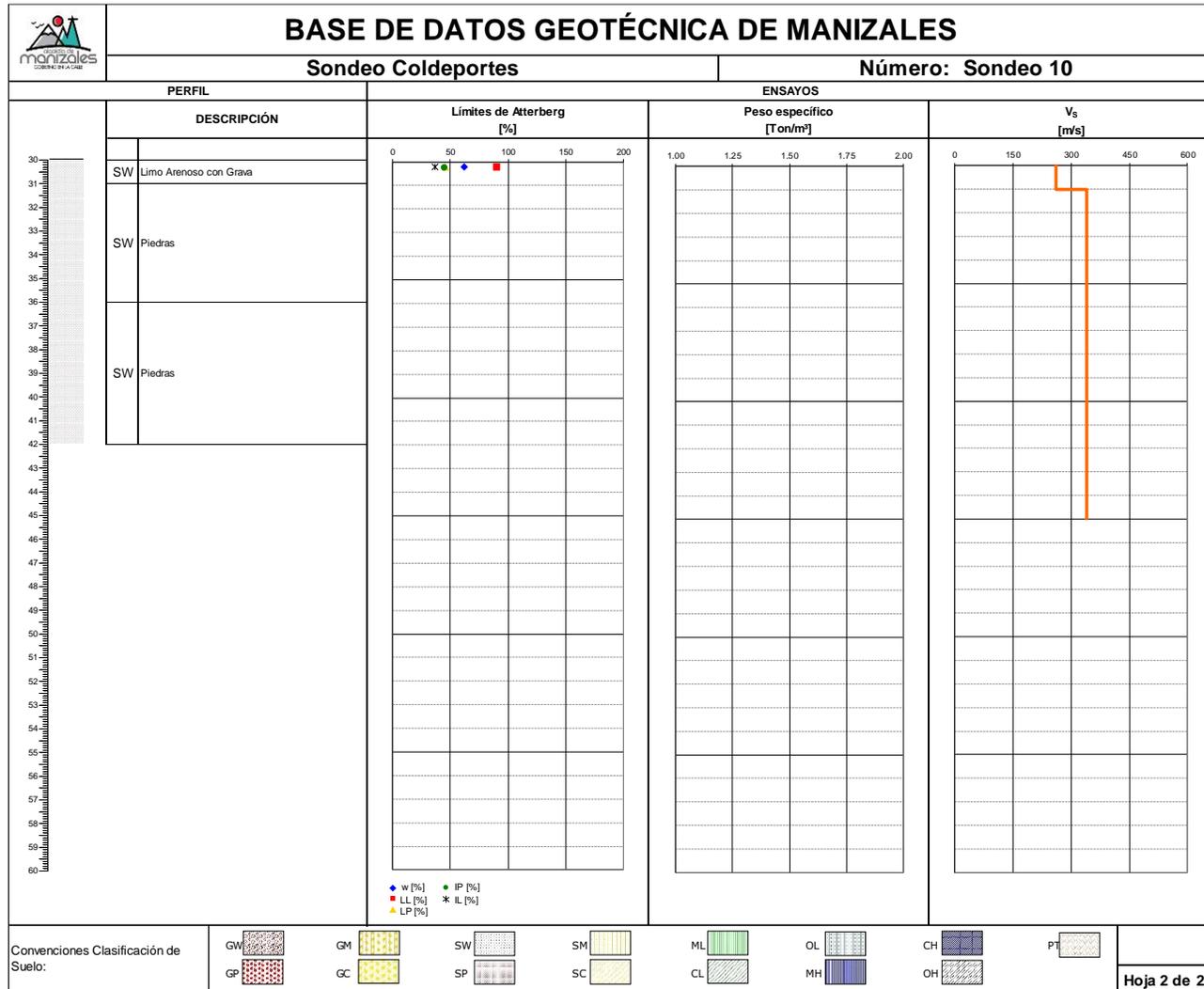


Figura 17. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Coldeportes.

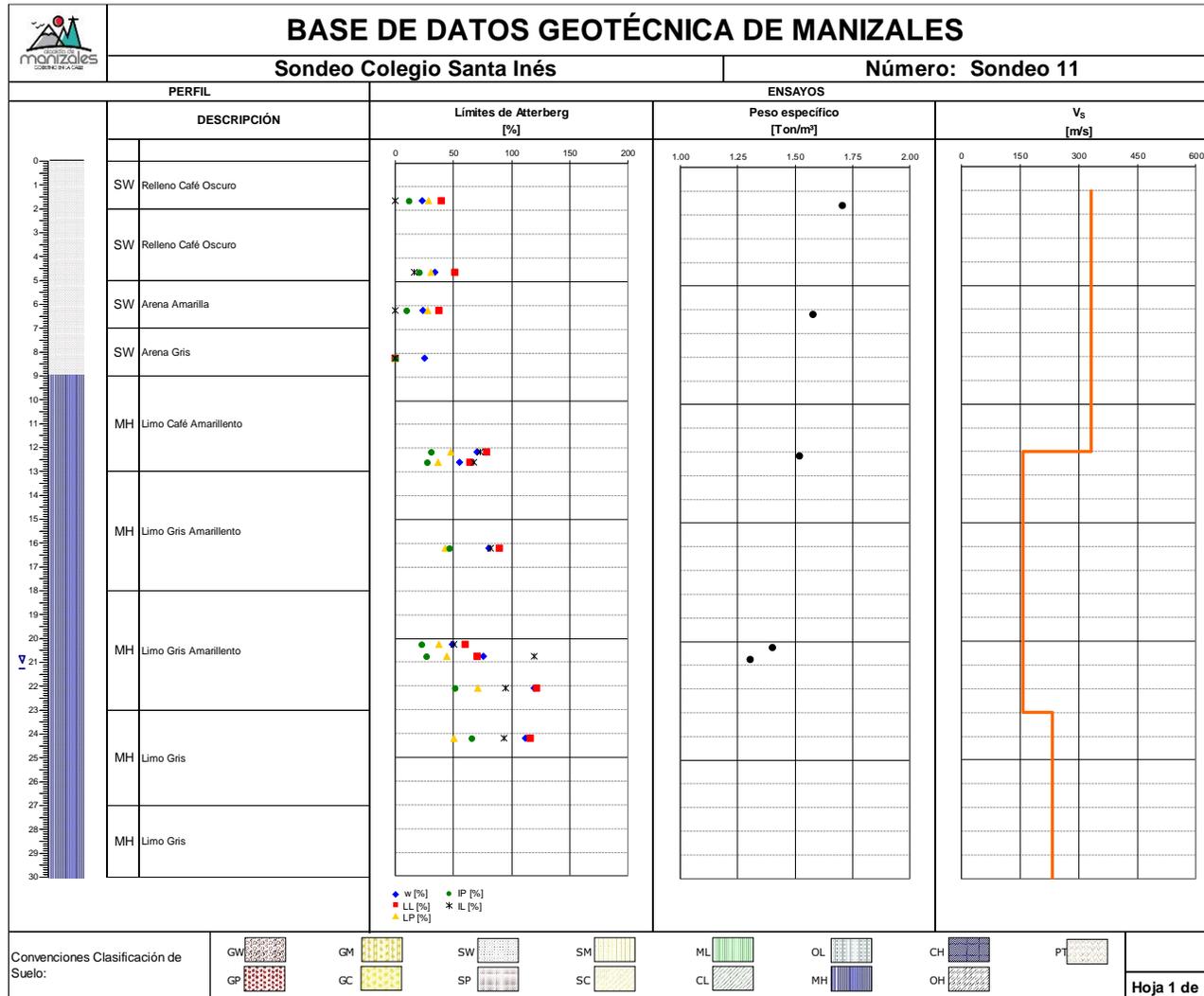


Figura 18. Perfil estratigráfico del sondeo Colegio Santa Inés.

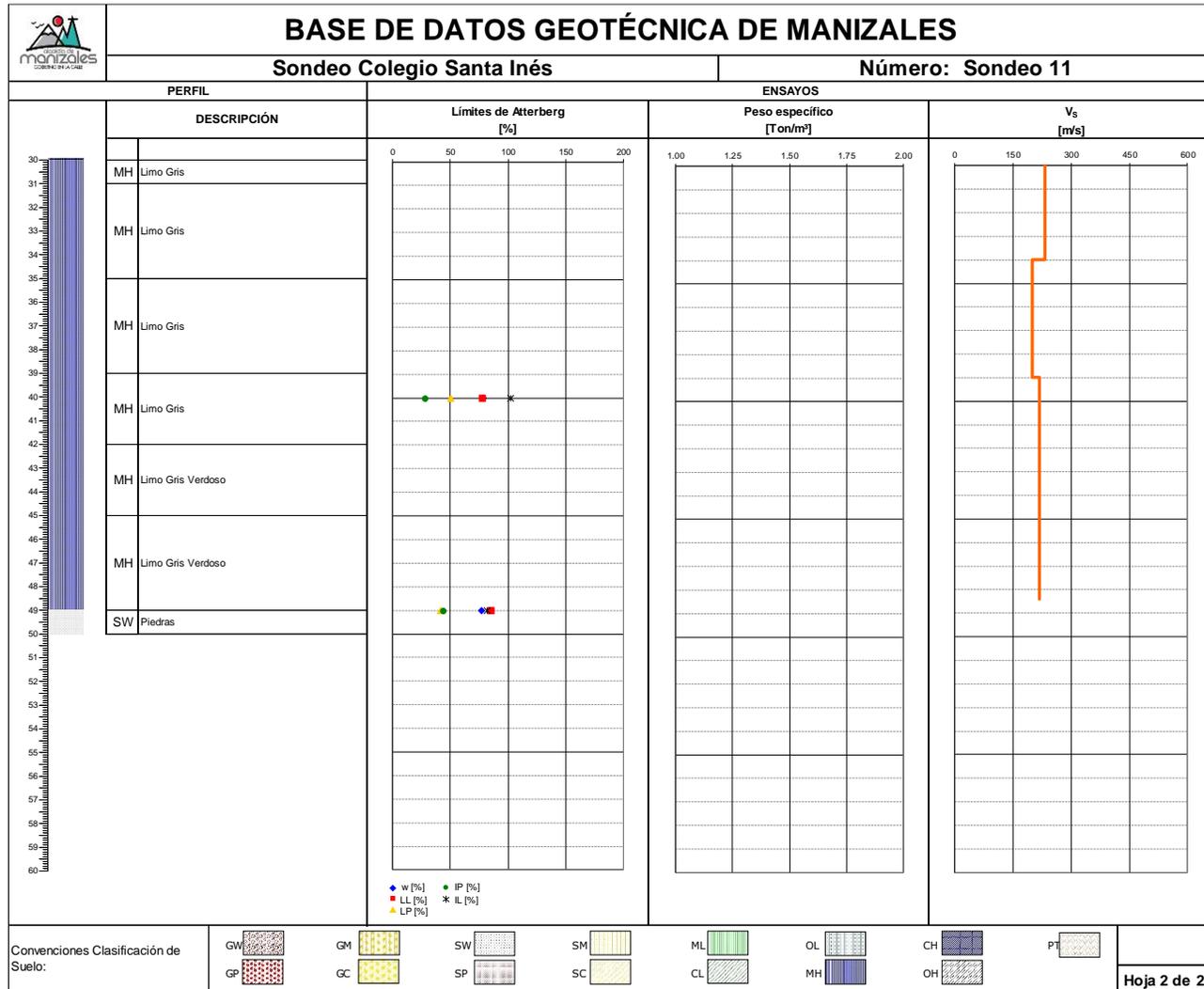


Figura 19. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Colegio Santa Inés.

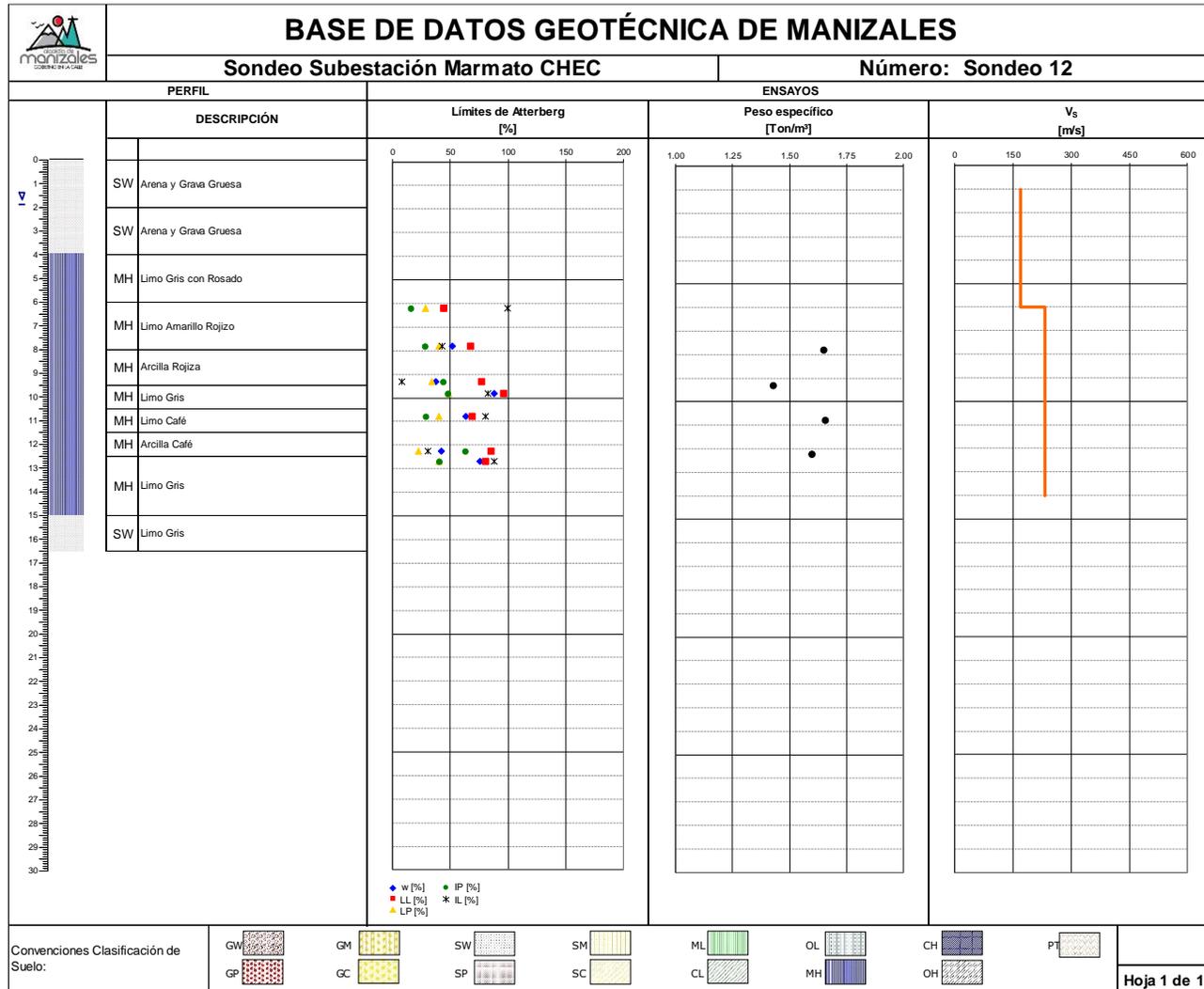


Figura 20. Perfil estratigráfico del sondeo Subestación Marmato CHEC.

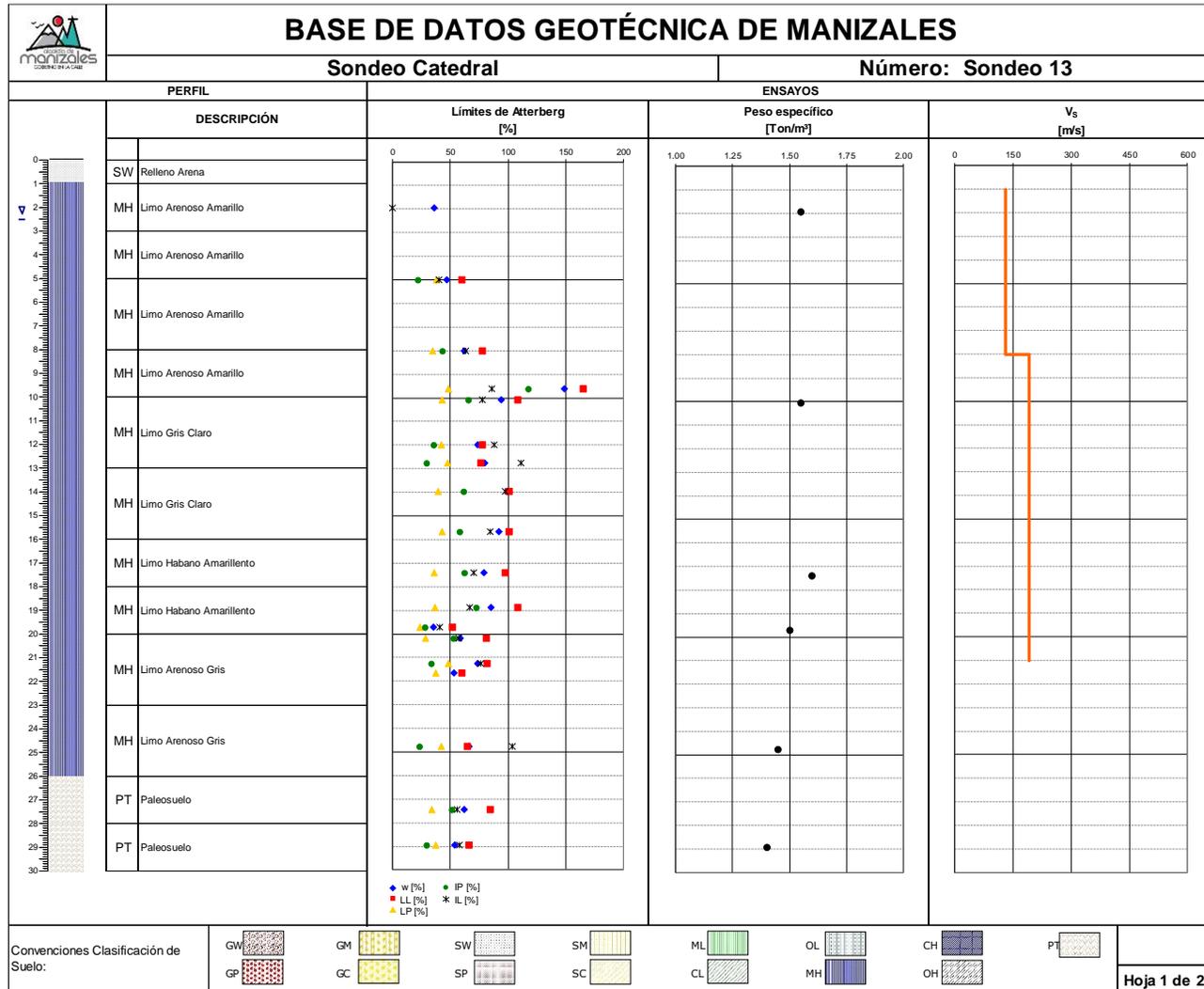


Figura 21. Perfil estratigráfico del sondeo Catedral.

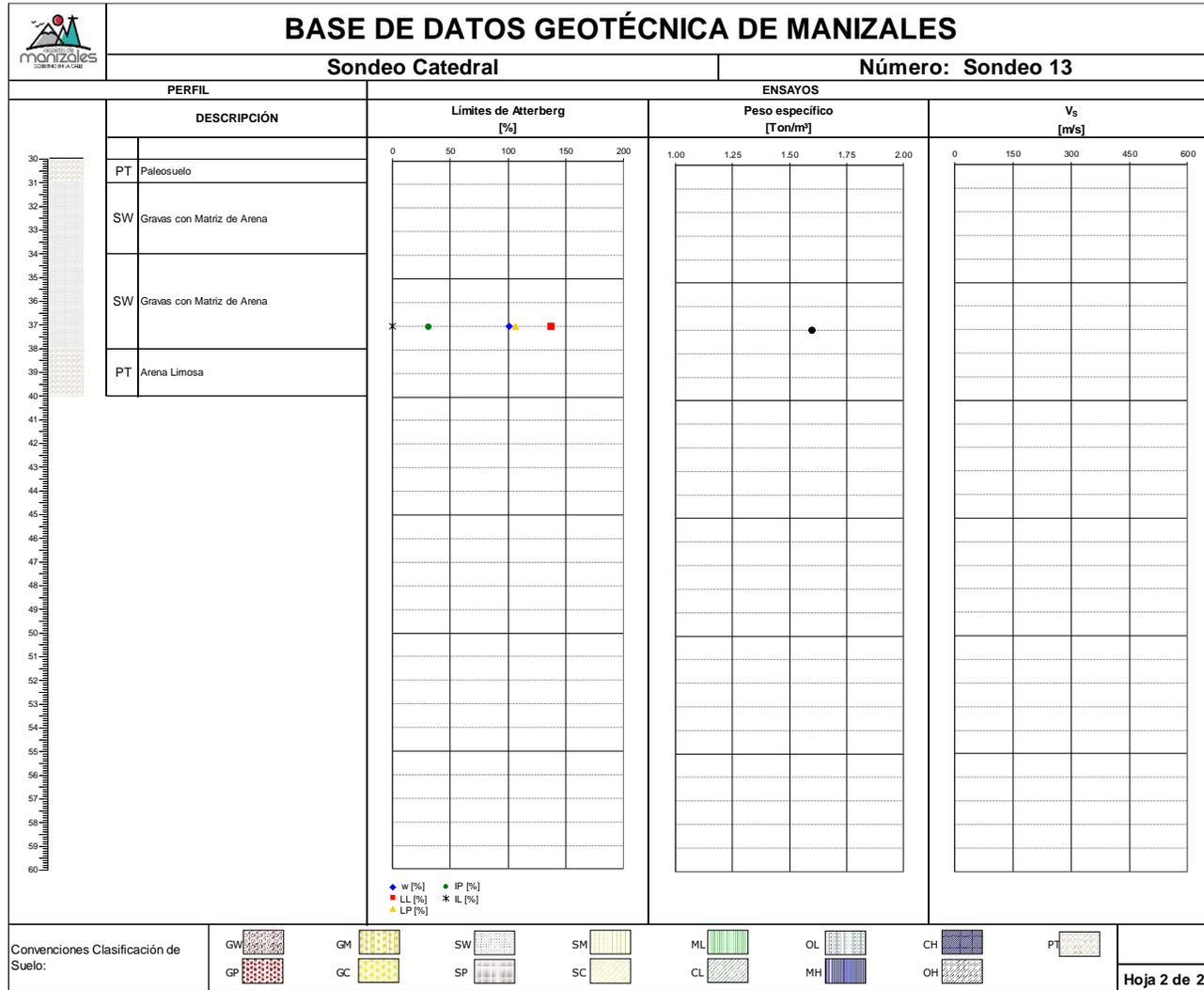


Figura 22. Continuación del perfil estratigráfico del sondeo Catedral.

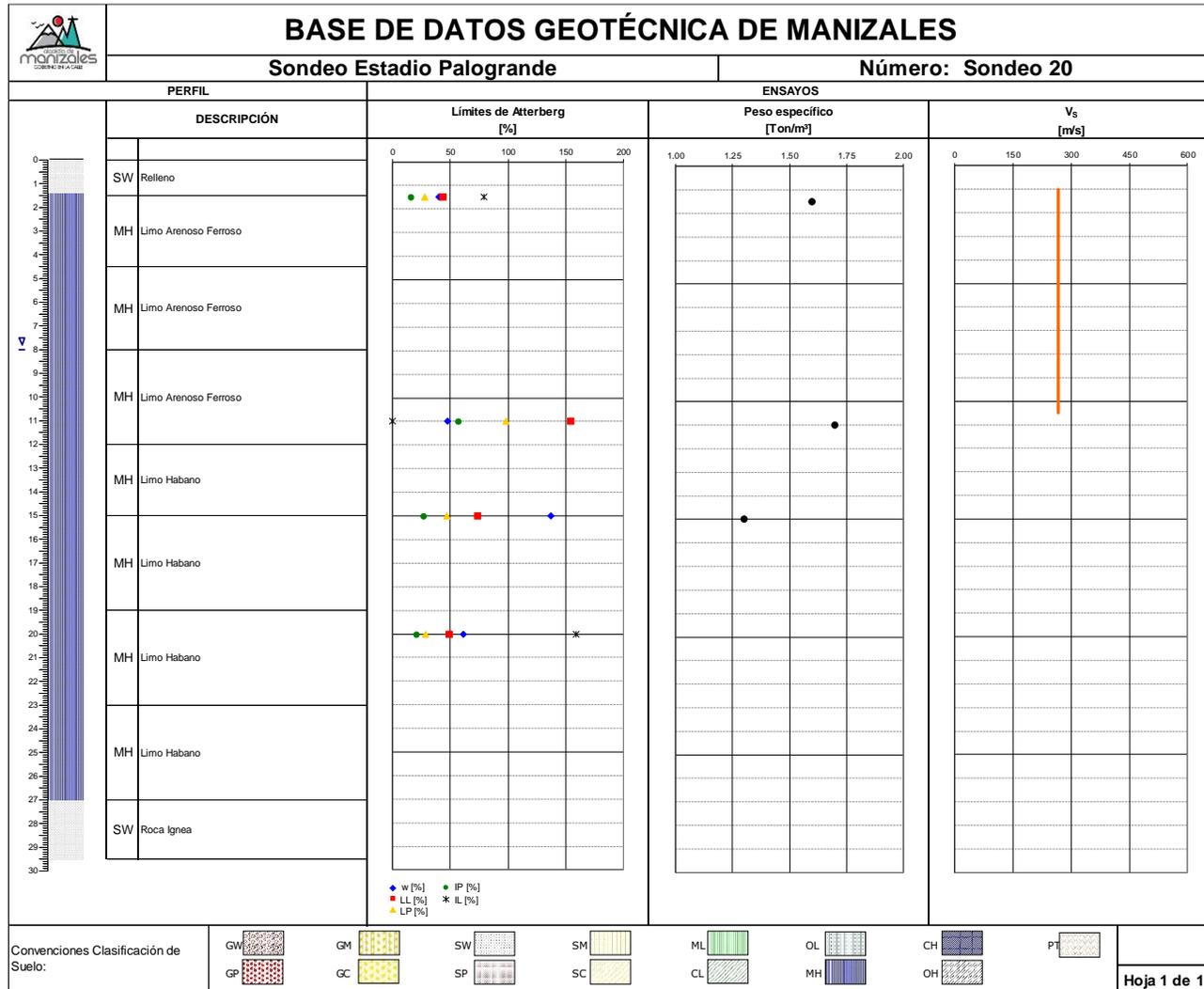


Figura 23. Perfil estratigráfico del sondeo Estadio Palogrande.

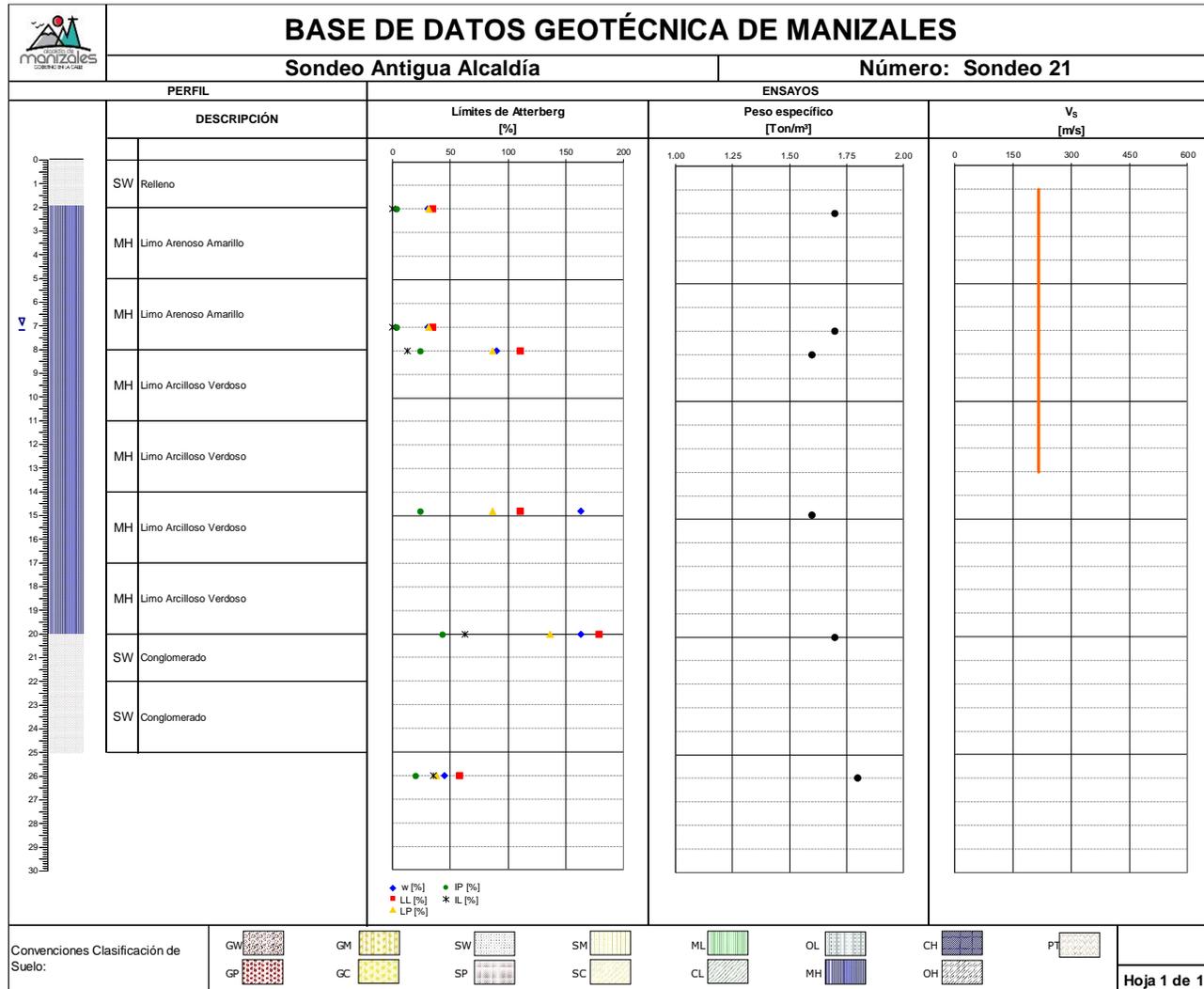


Figura 24. Perfil estratigráfico del sondeo Antigua Alcaldía

Geometría de las formaciones geológicas

La Figura 25 presenta un perfil idealizado de la geología de Manizales. En verde se observa el basamento cretácico, por encima del cual se encuentran la Formación Manizales (en amarillo) y la Formación Casabianca (en rojo), ambas del terciario y, por último, en gris se muestra la cobertura de cenizas volcánicas más reciente (cuaternario). La porción azul del esquema indica una unidad del basamento cristalino de la Cordillera Central, de edad Paleozoica. Las fallas muestran un buzamiento hacia el Este.

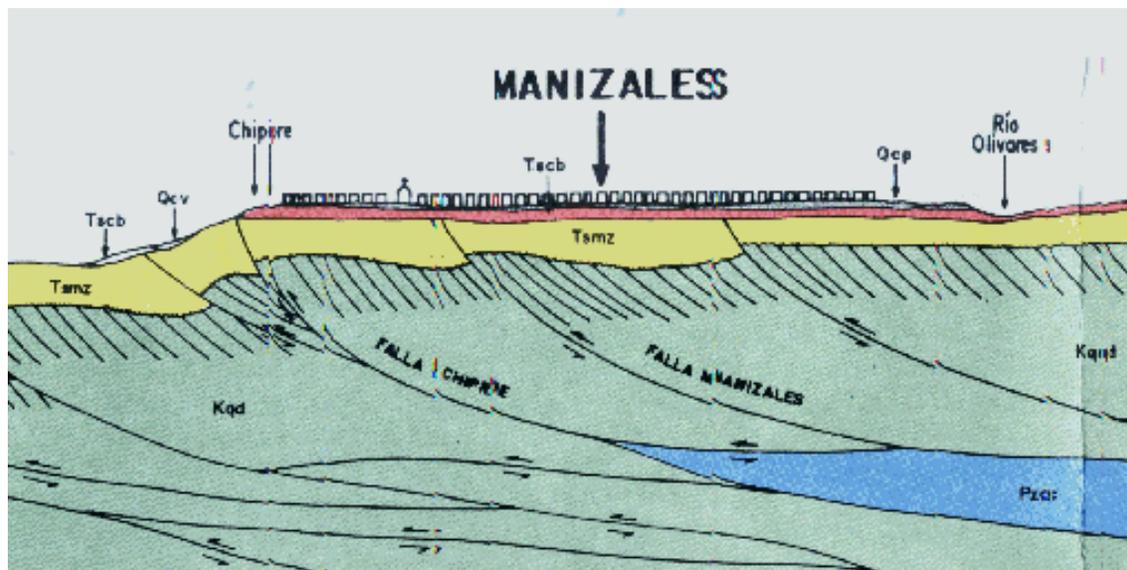


Figura 25. Perfil esquemático de la geología de Manizales. (Tomado de Naranjo y Ríos, 1989; los espesores no están a escala).

Dada la naturaleza de las Formaciones Manizales y Casabianca así como del Complejo Quebradagrande, se consideran estas como formaciones duras de basamento rocoso para fines de ingeniería. De esta manera, los suelos blandos de la ciudad de Manizales se asocian a los depósitos de caída piroclástica del cuaternario.

A partir de la información de los sondeos existentes, junto con sondeos adicionales obtenidos del estudio de microzonificación sísmica de Manizales (Uniandes, 2002), y estableciendo el límite a nivel de superficie del depósito de suelo blando como el contacto con las formaciones rocosas (Casabianca, Manizales), se definió una capa de espesor aproximado del depósito blando, la cual se presenta en la Figura 26. A partir de la definición de la profundidad del depósito blando, se calculó la topografía del límite inferior de los depósitos de suelo blando, o contacto rocoso (Figura 27).

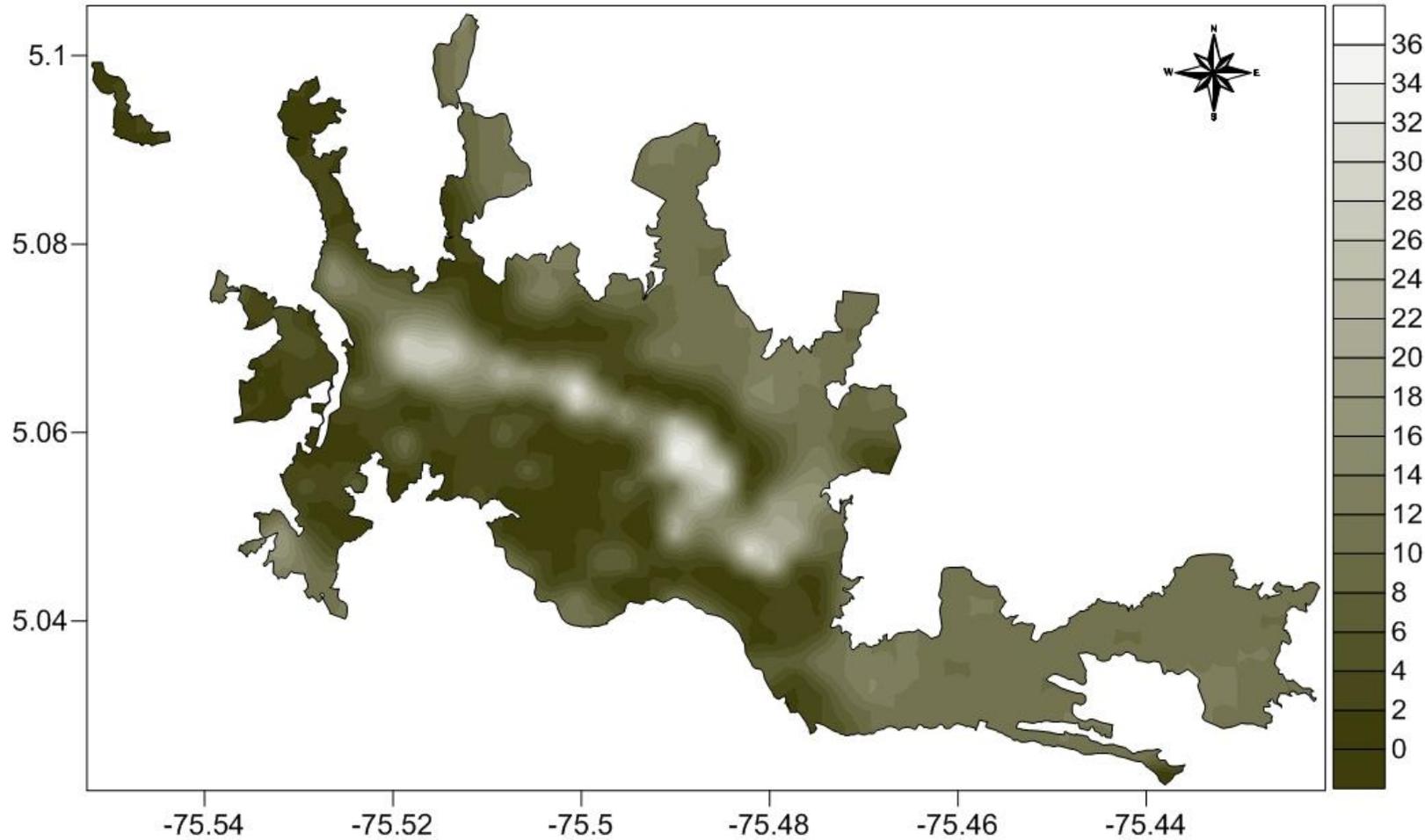


Figura 26. Profundidad del depósito blando (m).

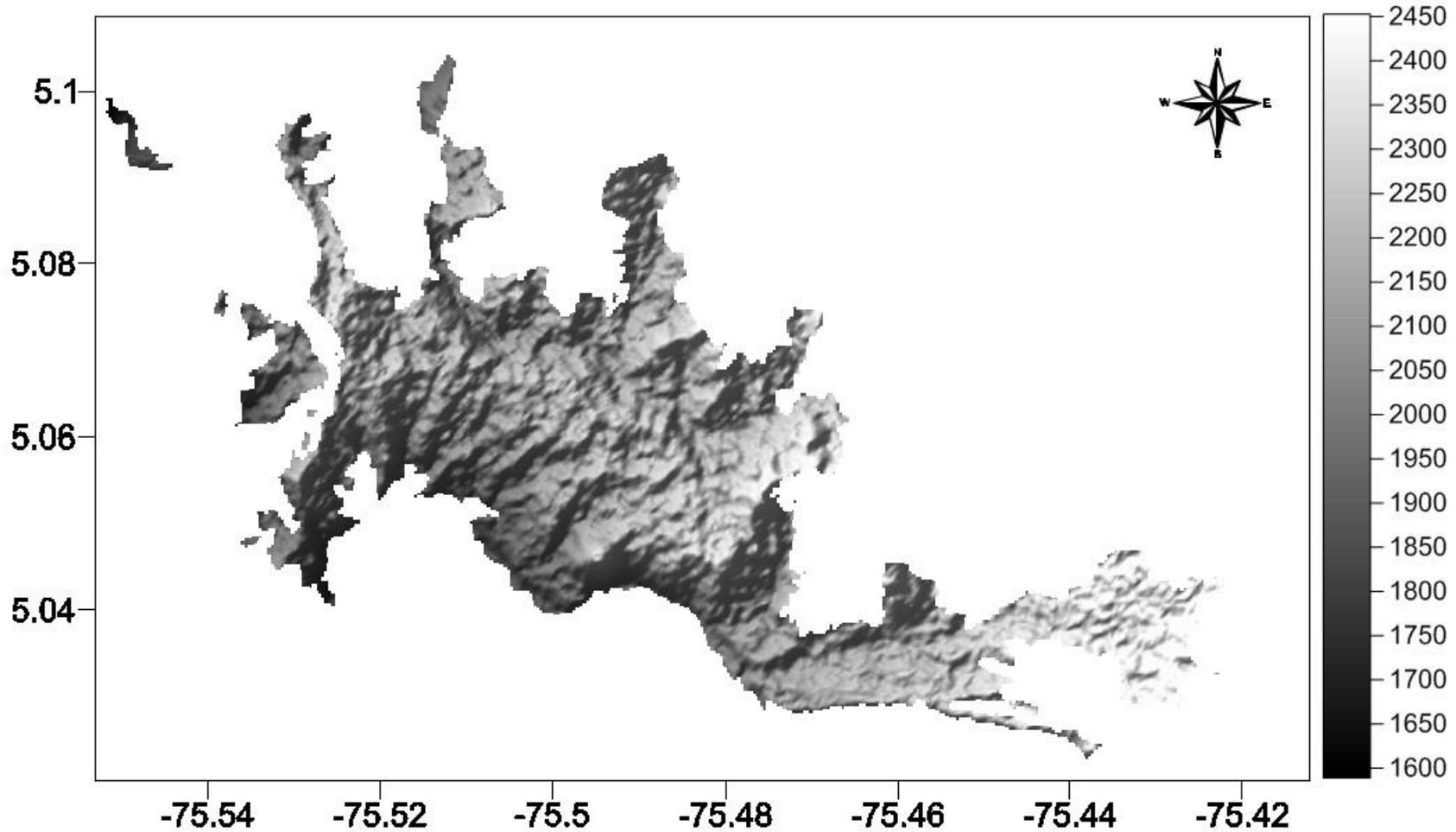


Figura 27. Topografía del basamento rocoso (m.s.n.m).

Condiciones de borde

Las condiciones de borde, como se entienden en este estudio, corresponden a dos características del modelo:

- El límite superficial de la geometría del depósito, es decir, la topografía superficial
- La localización en profundidad del nivel freático.

La topografía empleada en este estudio tiene una resolución espacial de 30 m y fue obtenida del proyecto ASTERDEM² de la NASA. Para el caso de la geometría de la tabla de agua, se estableció un valor promedio de 7 metros de profundidad para toda la ciudad. Esta suposición se adoptó por simplicidad dada la dificultad en la definición de la variación espacial de este parámetro.

La topografía y la base del depósito de suelo blando constituyen la geometría del problema, y permiten definir espesores de suelo blando en toda la ciudad. La Figura 28 y Figura 29 muestran un esquema tridimensional de las capas de topografía de contacto rocoso y topografía superficial, respectivamente.

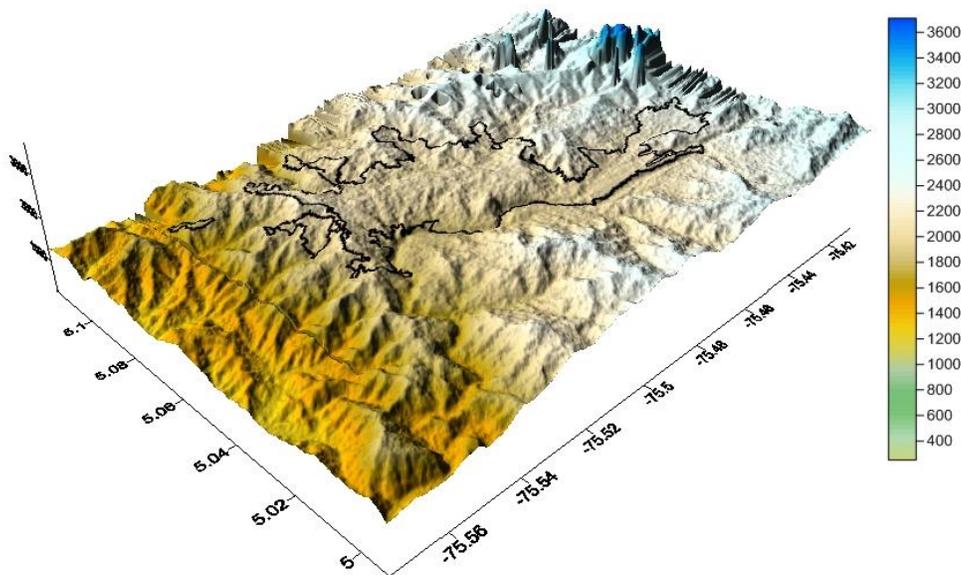


Figura 28. Esquema tridimensional de la topografía del contacto de roca. Valores en metros sobre el nivel del mar.

² ASTER Global Digital Elevation Map. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

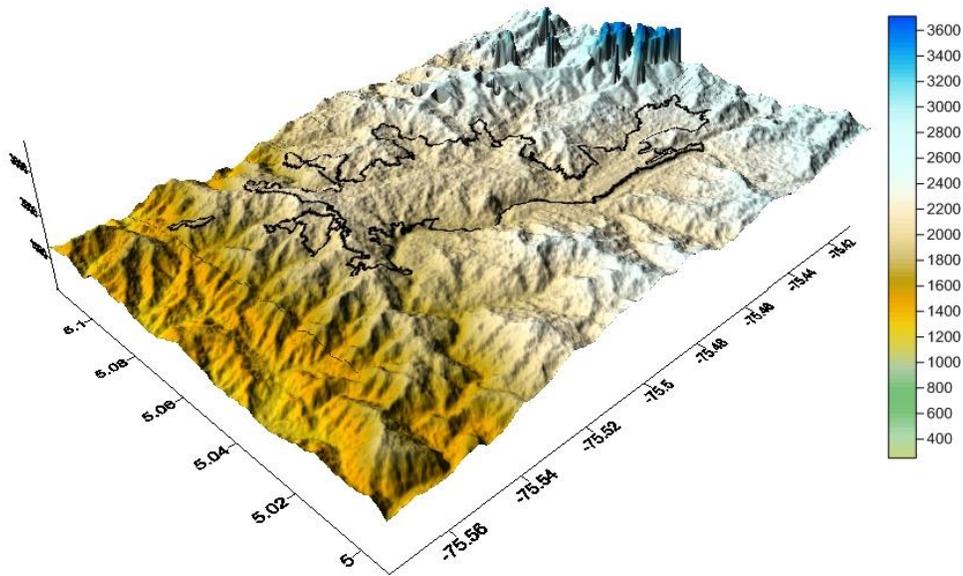


Figura 29. Esquema tridimensional de la topografía de la superficie. Valores en metros sobre el nivel del mar.

Modelo geotécnico

En este estudio se aplica una metodología moderna de evaluación de los efectos de sitio en grandes extensiones, la cual se basa en la generación de estratigrafías sintéticas sobre ubicaciones arbitrarias en la ciudad, las cuales no han sido exploradas anteriormente. Estas estratigrafías son la base para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos blandos. La correcta aplicación de esta metodología depende en gran medida de la correcta definición de las estratigrafías.

Las estratigrafías se construyen en función de la geometría de las formaciones geológicas y de los tipos de suelo definidos para cada una. Los tipos de suelo representan la variación en profundidad de los momentos estadísticos de todas las propiedades geotécnicas. Esto quiere decir que las propiedades geotécnicas se modelan como variables aleatorias. Las propiedades geotécnicas incluidas en el modelo son:

- Contenido de humedad
- Límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico)
- Propiedades índice (índice de plasticidad e índice de liquidez)
- Peso específico
- Velocidad de onda de cortante

Se definen entonces los siguientes parámetros, en función de la profundidad, para cada una de las propiedades listadas: *valor esperado*, *varianza*, *límite mínimo* y *límite máximo*. Con estos parámetros se define una distribución de probabilidad normal truncada para cada propiedad. Esto permite simular estratigrafías en cada sitio de cálculo. La simulación de estratigrafías se realiza bajo tres preceptos fundamentales que se asumen ciertos:

1. Las formaciones geológicas superficiales son las que dan origen a los depósitos de suelo blando.
2. Materiales con el mismo origen geológico tienden a tener propiedades similares, que presentan variaciones importantes en la profundidad.
3. Las propiedades geotécnicas que caracterizan los suelos tienen incertidumbre. Esta incertidumbre puede ser cuantificada mediante análisis estadísticos sobre los datos de los suelos asociados a la misma formación geológica.

Dado que, siguiendo esta metodología, la gran mayoría de los puntos de cálculo corresponden a sitios no explorados aún, la simulación de estratigrafías permite cuantificar la incertidumbre asociada a los valores asignados a las propiedades geotécnicas. Ahora bien, se sabe que las propiedades geotécnicas están correlacionadas en profundidad, dado que si bien el depósito de suelo blando se modela como un medio estratificado, realmente los suelos que pertenecen a la misma formación geológica no presentan estratos marcados, sino variaciones suaves en el valor de sus propiedades en profundidad. Con el fin de cuantificar el nivel de correlación en profundidad, se calcula una matriz de auto correlación C para cada propiedad geotécnica.

$$C = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \rho_{1,3} & \cdots & \rho_{1,n} \\ \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \rho_{2,3} & \cdots & \rho_{2,n} \\ \rho_{3,1} & \rho_{3,2} & \rho_{3,3} & \cdots & \rho_{3,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{n,1} & \rho_{n,2} & \rho_{n,3} & \cdots & \rho_{n,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1})$$

C es una matriz simétrica y definida positiva de $n \times n$, en donde n es el número total de intervalos en profundidad. Los elementos de la matriz son los coeficientes de correlación entre intervalos. El coeficiente de correlación entre los intervalos i y j ($\rho_{i,j}$) se determina como,

$$\rho_{i,j} = \frac{\text{Cov}(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \cdot \sigma_{X_j}} \quad (\text{Ec. 2})$$

en donde X es el parámetro geotécnico en consideración, $Cov(X_i, X_j)$ es la covarianza del parámetro entre los intervalos i y j , y σ_{x_i} y σ_{x_j} son las desviaciones estándar del parámetro en los intervalos i y j , respectivamente. La covarianza $Cov(X_i, X_j)$ se determina como,

$$Cov(X_i, X_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_{i_k} - \bar{X}_i) \cdot (X_{j_k} - \bar{X}_j) \quad (\text{Ec. 3})$$

en donde N es el número total de muestras (sondeos reales) que tienen datos en ambos intervalos i y j . De esta manera, una propiedad geotécnica X , queda definida por:

1. Su valor esperado, como función de la profundidad $\mu_X(z)$
2. Su varianza, como función de la profundidad $\sigma^2_X(z)$
3. Sus límites de truncamiento mínimo y máximo, como función de la profundidad $L1_X(z), L2_X(z)$
4. Su matriz de auto correlación C_X

Dado que se definió que los suelos blandos de Manizales están asociados principalmente al depósito de caída piroclática, se define un único tipo de suelo para la ciudad. Este tipo está descrito completamente por las características listadas anteriormente, las cuales se obtienen mediante un análisis estadístico sobre los datos disponibles en los sondeos existentes. La variación en profundidad de las propiedades geotécnicas que definen el suelo superficial de Manizales se presenta de la Figura 30 a la Figura 36.

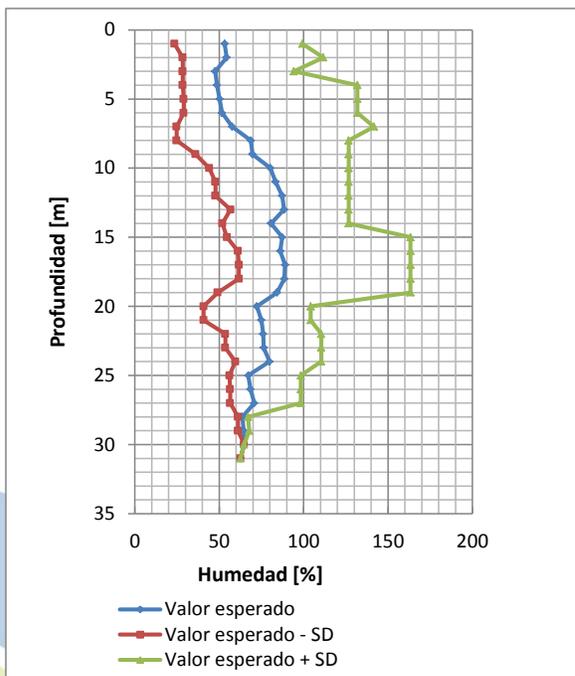


Figura 30. Variación en profundidad de la humedad.

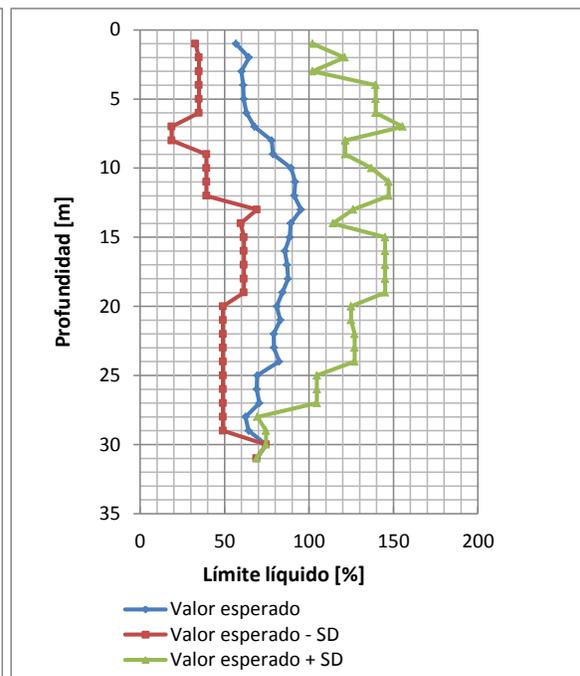


Figura 31. Variación en profundidad del límite líquido

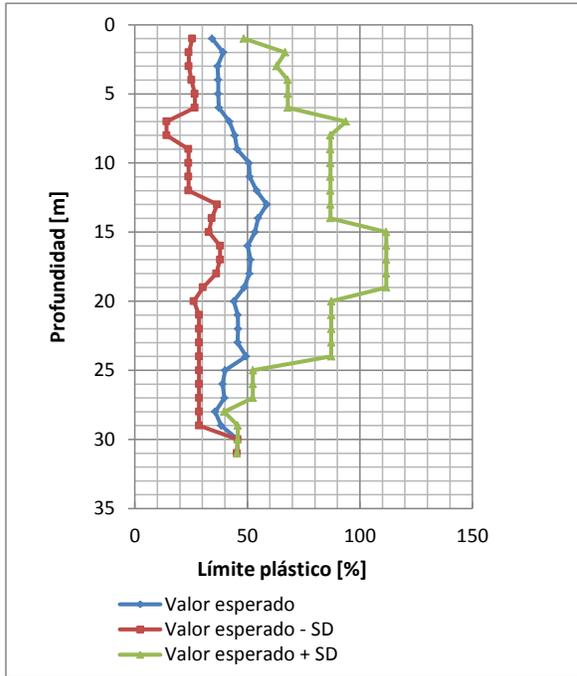


Figura 32. Variación en profundidad del límite plástico

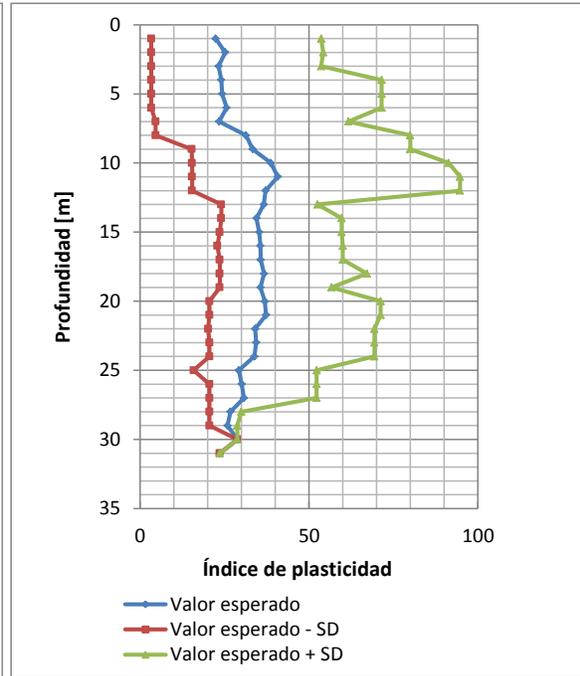


Figura 33. Variación en profundidad del índice de plasticidad

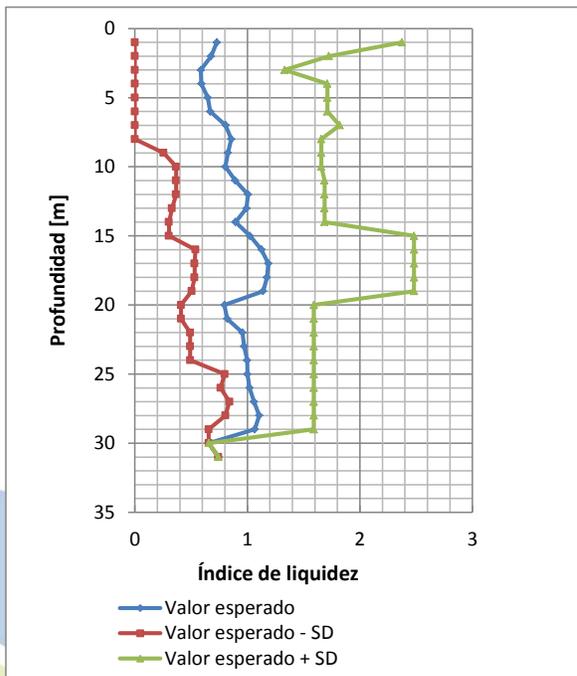


Figura 34. Variación en profundidad del índice de liquidez

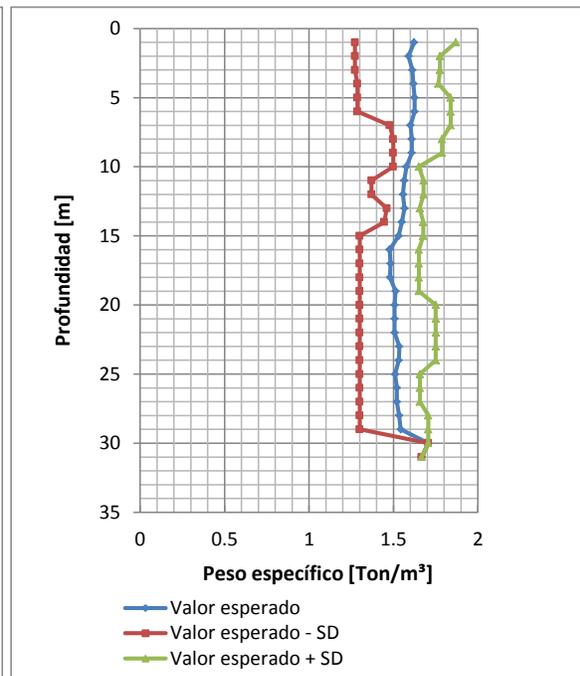


Figura 35. Variación en profundidad del peso específico

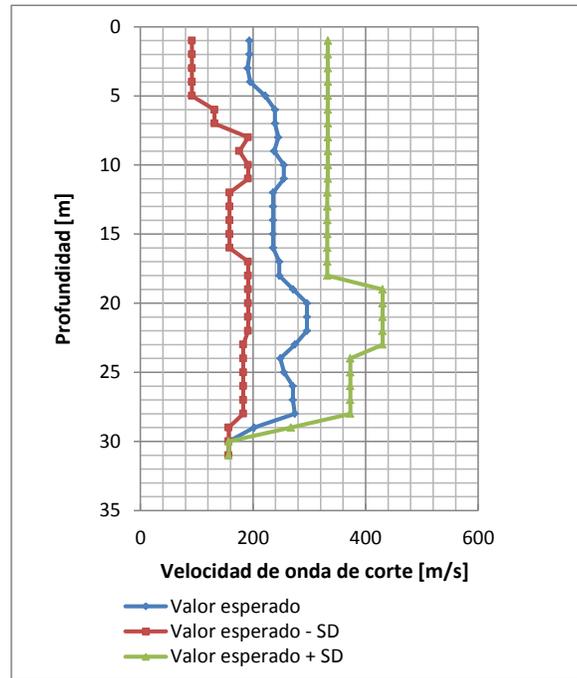


Figura 36. Variación en profundidad de la velocidad de onda de cortante

Las curvas de degradación del módulo de cortante y amortiguamiento para el suelo fueron obtenidas del estudio Uniandes, 2002, en el cual se definieron estas curvas como función del índice de liquidez, por ser esta una propiedad que correlaciona muy bien con las variaciones en amortiguamiento y módulo de corte para diferentes niveles de deformación cortante.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.0006 + 0.0002 \cdot IL} \right)^2 \right]} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\beta = (0.1528 + 0.0205 \cdot IL) \cdot \left(1 - \frac{G}{G_0} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde, G/G_0 es la relación de variación del módulo de cortante respecto al módulo máximo (G_0), β es el amortiguamiento, γ es la deformación cortante e IL es el índice de liquidez. La Figura 37 y Figura 38 muestran las curvas de degradación del módulo de cortante y amortiguamiento, respectivamente, para diferentes valores del índice de liquidez.

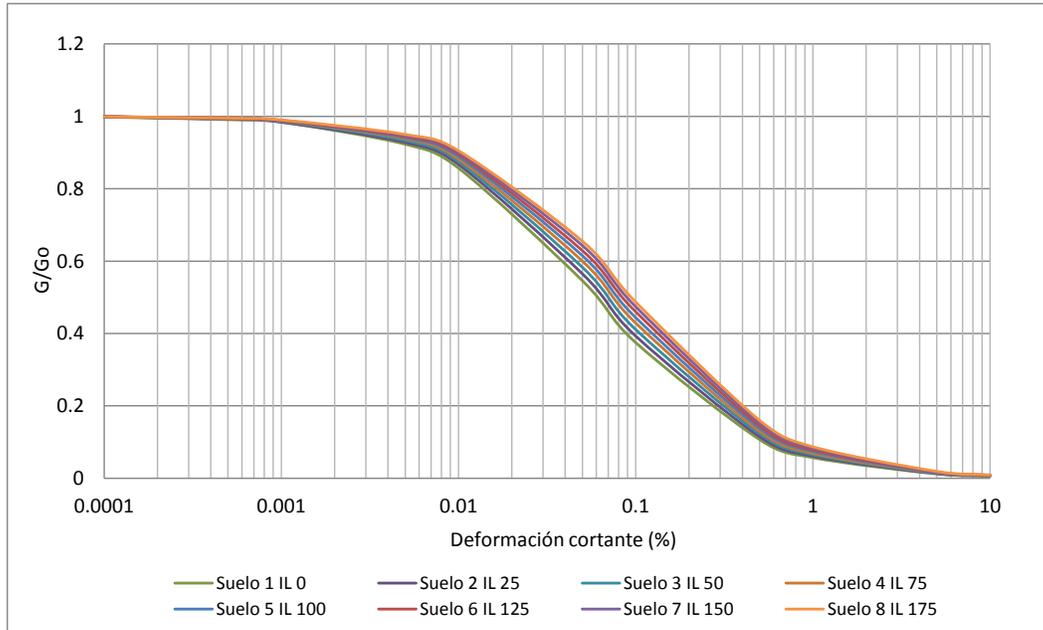


Figura 37. Curvas de degradación de rigidez para diferentes valores de IL.

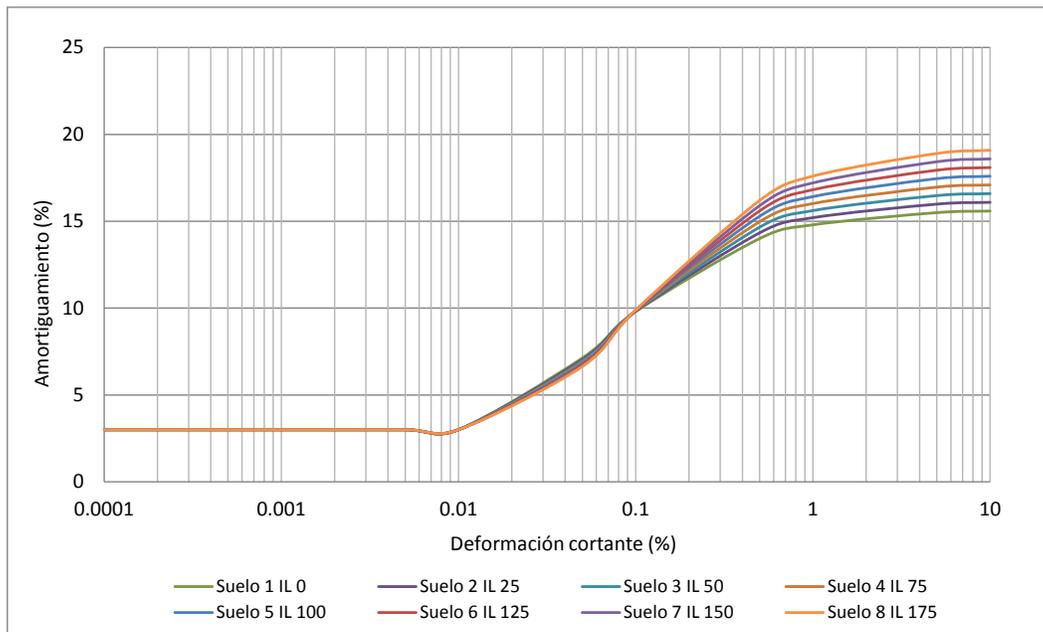


Figura 38. Curvas de amortiguamiento para diferentes valores de IL.

Como modelo de degradación de rigidez y amortiguamiento, se emplea el valor promedio de la relación propuesta por Seed e Idriss (1970) (ver Figura 39 y Figura 40).

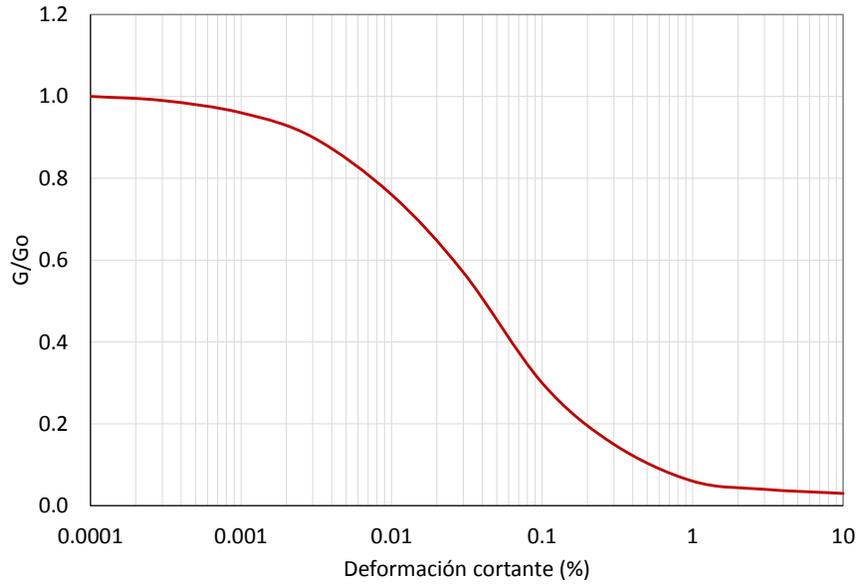


Figura 39. Curva de degradación de rigidez para suelos granulares.

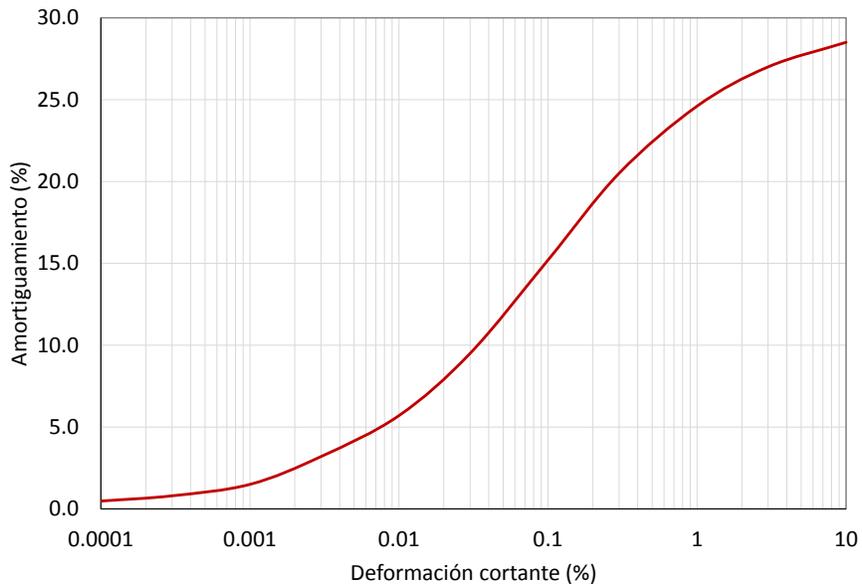


Figura 40. Curva de amortiguamiento para suelos granulares.

3. RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS BLANDOS

Estratigrafías sintéticas

Las estratigrafías sintéticas se construyen mediante la simulación de los valores de las propiedades geotécnicas en profundidad. Los pasos para construir una estratigrafía sintética son: 1) se determina la profundidad total de la estratigrafía según el modelo geológico; 2) esta profundidad se subdivide en capas de igual espesor h ; 3) para cada capa, se determinan las propiedades geotécnicas mediante la generación de un número aleatorio, siguiendo su distribución de probabilidad; 4) la secuencia de números aleatorios R que definen la variación en profundidad de una propiedad geotécnica en la estratigrafía simulada, es alterada por la matriz triangular U^3 que se define como,

$$U^T U = C \quad (\text{Ec. 6})$$

Se genera entonces una secuencia de números aleatorios correlacionados R_c , de la siguiente manera,

$$R_c = R U \quad (\text{Ec. 7})$$

Se definió la malla de cálculo que se presenta en la Figura 41, la cual tiene un total de 50x50 nodos, recortada por un polígono que contiene a la ciudad de Manizales, para un total de 1275 sitios de cálculo.

En cada nodo de la malla de cálculo se generó un conjunto de 5 estratigrafías sintéticas, con capas de suelo uniforme de 1 metro de espesor. Cada capa tiene propiedades asignadas de manera aleatoria en función de la distribución de probabilidad de los parámetros geotécnicos y su correlación en profundidad. Adicionalmente a las propiedades geotécnicas básicas, se definen el nivel de amortiguamiento inicial (igual a 3% en todos los casos) y el esfuerzo de confinamiento efectivo, el cual es una función del peso específico de los estratos y de la profundidad del nivel freático.

En la Tabla 2 a Tabla 5 se presentan a modo de ejemplo 4 estratigrafías sintéticas correspondientes a 4 puntos de cálculo en Manizales.

³ La matriz U se determina aplicando la descomposición de Cholesky a la matriz C .

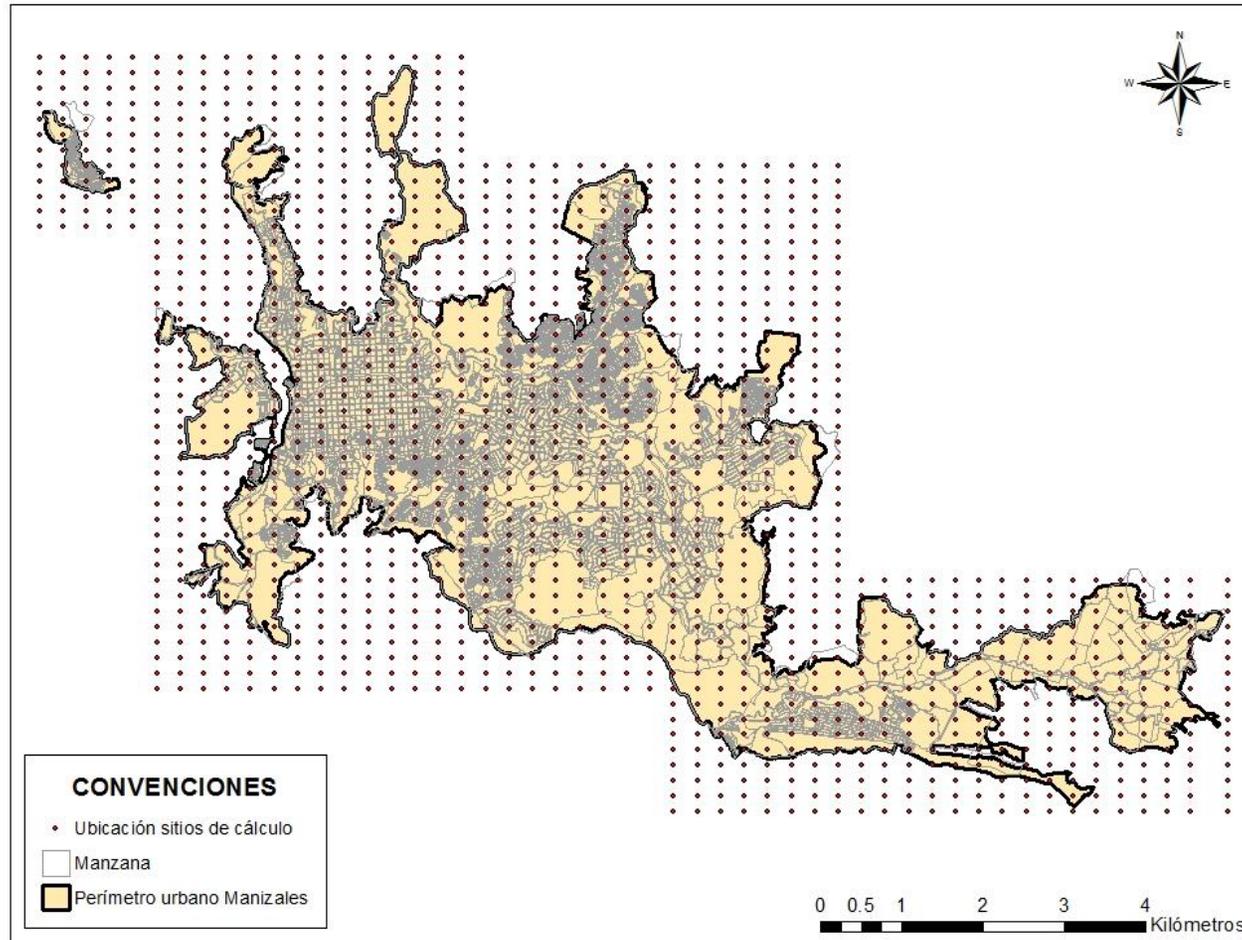


Figura 41. Malla de cálculo.

Tabla 2. Estratigrafía sintética generada en el sitio de cálculo 457 (Coordenadas: -75.5161, 5.0662)

ID	Profundidad [m]	Espesor [m]	γ [Ton/m ³]	Vs [m/s]	Go [Mpa]	β	w [%]	LL [%]	LP [%]	IP	IL	σ' [Ton/m ²]
1	0.5	1	1.622	193.73	6205.296	0.03	53.21	56.66	34.31	22.35	0.85	1.622
2	1.5	1	1.606	193.73	6142.81	0.03	53.76	60.53	36.78	23.75	0.72	3.228
3	2.5	1	1.601	192.03	6017.041	0.03	50.92	62.18	37.99	24.19	0.54	4.828
4	3.5	1	1.615	192.73	6114.548	0.03	48.07	60.5	36.88	23.62	0.47	6.443
5	4.5	1	1.621	208.45	7181.185	0.03	49.39	61.17	37.03	24.15	0.51	8.064
6	5.5	1	1.625	230.44	8795.359	0.03	50.89	62.11	37.17	24.94	0.55	9.689
7	6.5	1	1.613	239.09	9397.92	0.03	54.64	65.26	39.65	25.61	0.59	11.302
8	7.5	1	1.604	242.09	9584.948	0.03	63.2	72.76	43.17	29.59	0.68	12.407
9	8.5	1	1.608	241.24	9540.33	0.03	69.18	78.31	44.89	33.42	0.73	13.015
10	9.5	1	1.592	246.11	9831.892	0.03	74.95	84.03	48.05	35.98	0.75	13.607
11	10.5	1	1.57	254.84	10395.072	0.03	81.81	90.56	50.86	39.7	0.78	14.177
12	11.5	1	1.56	245.26	9565.652	0.03	85.31	91.5	52.57	38.93	0.84	14.737
13	12.5	1	1.56	235.68	8835.435	0.03	87.84	93.23	56.37	36.86	0.85	15.298
14	13.5	1	1.557	235.68	8817.741	0.03	84.56	92.19	56.68	35.52	0.79	15.855
15	14.5	1	1.54	235.68	8721.659	0.03	83.96	88.87	54.02	34.84	0.86	16.395
16	15.5	1	1.504	235.68	8516.402	0.03	86.67	87.14	51.72	35.42	0.99	16.9
17	16.5	1	1.48	241.22	8778.381	0.03	87.57	86.35	50.72	35.62	1.03	17.38
18	17.5	1	1.481	246.76	9192.222	0.03	88.79	87.28	51.1	36.18	1.04	17.861
19	18.5	1	1.496	259.02	10229.702	0.03	86.41	85.88	49.72	36.16	1.02	18.356
20	19.5	1	1.51	283.57	12373.798	0.03	78.25	82.52	46.26	36.26	0.88	18.866
21	20.5	1	1.507	295.86	13444.442	0.03	73.6	81.91	44.84	37.08	0.78	19.373

Tabla 3. Estratigrafía sintética generada en el sitio de cálculo 916 (Coordenadas: -75.4849, 5.073)

ID	Profundidad [m]	Espesor [m]	γ [Ton/m ³]	Vs [m/s]	Go [Mpa]	β	w [%]	LL [%]	LP [%]	IP	IL	σ' [Ton/m ²]
1	0.5	1	1.622	193.73	6205.296	0.03	53.21	56.66	34.31	22.35	0.85	1.622
2	1.5	1	1.606	193.73	6142.81	0.03	53.76	60.53	36.78	23.75	0.72	3.228
3	2.5	1	1.601	192.03	6017.041	0.03	50.92	62.18	37.99	24.19	0.54	4.828
4	3.5	1	1.615	192.73	6114.548	0.03	48.07	60.5	36.88	23.62	0.47	6.443
5	4.5	1	1.621	208.45	7181.185	0.03	49.39	61.17	37.03	24.15	0.51	8.064
6	5.5	1	1.625	230.44	8795.359	0.03	50.89	62.11	37.17	24.94	0.55	9.689
7	6.5	1	1.613	239.09	9397.92	0.03	54.64	65.26	39.65	25.61	0.59	11.302
8	7.5	1	1.604	242.09	9584.948	0.03	63.2	72.76	43.17	29.59	0.68	12.407
9	8.5	1	1.608	241.24	9540.33	0.03	69.18	78.31	44.89	33.42	0.73	13.015
10	9.5	1	1.592	246.11	9831.892	0.03	74.95	84.03	48.05	35.98	0.75	13.607

Tabla 4. Estratigrafía sintética generada en el sitio de cálculo 1311 (Coordenadas: -75.4563, 5.0322)

ID	Profundidad [m]	Espesor [m]	γ [Ton/m ³]	Vs [m/s]	Go [Mpa]	β	w [%]	LL [%]	LP [%]	IP	IL	σ' [Ton/m ²]
1	0.5	1	1.622	193.73	6205.296	0.03	53.21	56.66	34.31	22.35	0.85	1.622
2	1.5	1	1.606	193.73	6142.81	0.03	53.76	60.53	36.78	23.75	0.72	3.228
3	2.5	1	1.601	192.03	6017.041	0.03	50.92	62.18	37.99	24.19	0.54	4.828
4	3.5	1	1.615	192.73	6114.548	0.03	48.07	60.5	36.88	23.62	0.47	6.443
5	4.5	1	1.621	208.45	7181.185	0.03	49.39	61.17	37.03	24.15	0.51	8.064
6	5.5	1	1.625	230.44	8795.359	0.03	50.89	62.11	37.17	24.94	0.55	9.689
7	6.5	1	1.613	239.09	9397.92	0.03	54.64	65.26	39.65	25.61	0.59	11.802
8	7.5	1	1.604	242.09	9584.948	0.03	63.2	72.76	43.17	29.59	0.68	12.407
9	8.5	1	1.608	241.24	9540.33	0.03	69.18	78.31	44.89	33.42	0.73	13.015
10	9.5	1	1.592	246.11	9831.892	0.03	74.95	84.03	48.05	35.98	0.75	13.607

Tabla 5. Estratigrafía sintética generada en el sitio de cálculo 989 (Coordenadas: -75.4797, 5.0509)

ID	Profundidad [m]	Espesor [m]	γ [Ton/m ³]	Vs [m/s]	Go [Mpa]	β	w [%]	LL [%]	LP [%]	IP	IL	σ' [Ton/m ²]
1	0.5	1	1.622	193.73	6205.296	0.03	53.21	56.66	34.31	22.35	0.85	1.622
2	1.5	1	1.606	193.73	6142.81	0.03	53.76	60.53	36.78	23.75	0.72	3.228
3	2.5	1	1.601	192.03	6017.041	0.03	50.92	62.18	37.99	24.19	0.54	4.828
4	3.5	1	1.615	192.73	6114.548	0.03	48.07	60.5	36.88	23.62	0.47	6.443
5	4.5	1	1.621	208.45	7181.185	0.03	49.39	61.17	37.03	24.15	0.51	8.064
6	5.5	1	1.625	230.44	8795.359	0.03	50.89	62.11	37.17	24.94	0.55	9.689
7	6.5	1	1.613	239.09	9397.92	0.03	54.64	65.26	39.65	25.61	0.59	11.302
8	7.5	1	1.604	242.09	9584.948	0.03	63.2	72.76	43.17	29.59	0.68	12.407
9	8.5	1	1.608	241.24	9540.33	0.03	69.18	78.31	44.89	33.42	0.73	13.015
10	9.5	1	1.592	246.11	9831.892	0.03	74.95	84.03	48.05	35.98	0.75	13.607
11	10.5	1	1.57	254.84	10395.072	0.03	81.81	90.56	50.86	39.7	0.78	14.177
12	11.5	1	1.56	245.26	9565.652	0.03	85.31	91.5	52.57	38.93	0.84	14.737
13	12.5	1	1.56	235.68	8835.435	0.03	87.84	93.23	56.37	36.86	0.85	15.298
14	13.5	1	1.557	235.68	8817.741	0.03	84.56	92.19	56.68	35.52	0.79	15.855
15	14.5	1	1.54	235.68	8721.659	0.03	83.96	88.87	54.02	34.84	0.86	16.395
16	15.5	1	1.504	235.68	8516.402	0.03	86.67	87.14	51.72	35.42	0.99	16.9
17	16.5	1	1.48	241.22	8778.381	0.03	87.57	86.35	50.72	35.62	1.03	17.38
18	17.5	1	1.481	246.76	9192.222	0.03	88.79	87.28	51.1	36.18	1.04	17.861
19	18.5	1	1.496	259.02	10229.702	0.03	86.41	85.88	49.72	36.16	1.02	18.356

Incertidumbre en la respuesta del suelo

La generación de un conjunto de 5 estratigrafías sintéticas por sitio de cálculo, permite estimar el nivel de incertidumbre en la respuesta dinámica del suelo por efecto del desconocimiento del valor exacto de las propiedades geotécnicas.

La evaluación de la incertidumbre en la respuesta dinámica de suelos blandos es un tema que ha sido objeto de estudio desde hace varios años y que a la fecha no ha sido resuelto del todo. En este trabajo, se sigue el enfoque propuesto por Bazurro y Cornell (2004), aplicando la modificación propuesta por Stewart y Goulet (2006), en la cual, la desviación estándar del logaritmo de la aceleración espectral en superficie $Sa^s(f)$ (en donde f es el inverso del periodo de vibración estructural) se define como,

$$\sigma_{\ln Sa^s(f)} \approx \sqrt{\sigma_{\ln Sa(f)}^2 + b_1^2 \sigma_{\ln PGA}^2 + \sigma_{\ln AF(f)}^2 + 2b_1 \rho \sigma_{\ln PGA} \sigma_{\ln Sa(f)}} \quad (\text{Ec. 8})$$

en donde $\sigma_{\ln Sa(f)}$ es la desviación estándar de la aceleración espectral en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln PGA}$ es la desviación estándar de PGA en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln AF(f)}$ es la desviación estándar asociada a la incertidumbre en la respuesta dinámica del sitio, b_1 es la pendiente de la relación entre $\ln AF(f)$ y $\ln PGA$, y ρ es el coeficiente de correlación entre los términos de aceleración espectral y PGA en roca.

Acelerogramas para el cálculo de las funciones de transferencia

Las funciones de transferencia se calculan para diferentes niveles de intensidad de movimiento fuerte en la base del depósito. En el presente trabajo se seleccionaron los siguientes niveles de intensidad sísmica: 0.05 g, 0.10 g, 0.20 g, 0.40 g. Se seleccionaron señales sísmicas provenientes de entornos tectónicos similares al colombiano, diferenciando entre fuentes sísmicas de tipo Activa (cortical) y Subducción.

En la Tabla 6 y Tabla 7 se presentan las principales características de las señales sísmicas utilizadas, tales como: identificación, fecha del evento, magnitud sísmica del evento, distancia epicentral, duración del registro, aceleración máxima de la señal y aceleración máxima utilizada en el análisis. La Figura 42 a Figura 45 muestran las señales seleccionadas.

Tabla 6. Señales de fuente activa seleccionadas

Nombre	ID del Registro	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Amax Utilizada (g)
A01	Chalfant Valley	U.S.A	21/07/1986	6.2	50	39.81	0.051	0.05
A02	Georgia	U.S.S.R	15/06/1991	6.2	52	38.17	0.046	0.05
A03	Palm Springs	U.S.A	08/07/1986	6	63	24	0.053	0.05
A04	Anza	U.S.A	08/07/1986	6	26	24	0.113	0.1
A05	Armenia Bocatoma	Colombia	19/01/1999	6.2	42	31.92	0.084	0.1
A06	Imperial Valley	U.S.A.	15/10/1979	6.5	36	28.28	0.109	0.1
A07	Irpinia	Italia	23/11/1980	6.5	33	36.34	0.199	0.2
A08	WhittierNarrows	U.S.A	10/01/1987	6	10	29.96	0.199	0.2
A09	San Fernando	U.S.A	09/02/1971	6.6	27	29.66	0.212	0.2
A10	Coalinga	U.S.A.	22/07/1983	5.7	12	21.3	0.375	0.4
A11	Northridge	U.S.A.	17/01/1994	6.7	35	30.33	0.493	0.4
A12	Park Field	U.S.A.	28/06/1966	6.1	10	30.33	0.356	0.4

Tabla 7. Señales de fuente subducción seleccionadas

Nombre	ID del Registro	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Amax Utilizada (g)
S01	Nuxco	México	15/07/1996	6.5		83	0.049	0.05
S02	Ocotito	México	14/09/1995	7.2		61	0.059	0.05
S03	Zihuatejo	México	10/12/1994	6.6		34.05	0.053	0.05
S04	Paraíso	México	25/09/1984	6.5		36.67	0.102	0.1
S05	Red Smart	Taiwán	12/06/1985	6.5	45	27.15	0.142	0.1
S06	La Unión	México	10/12/1994	6.6		54.98	0.092	0.1
S07	Caleta	México	09/08/2000	6.7		42.21	0.194	0.2
S08	Ocotito	México	25/04/1989	6.5		53.16	0.195	0.2
S09	Copala	México	24/10/1993	6.2		58.94	0.292	0.4
S10	Las Vigas	México	25/04/1989	6.5		34.43	0.345	0.4

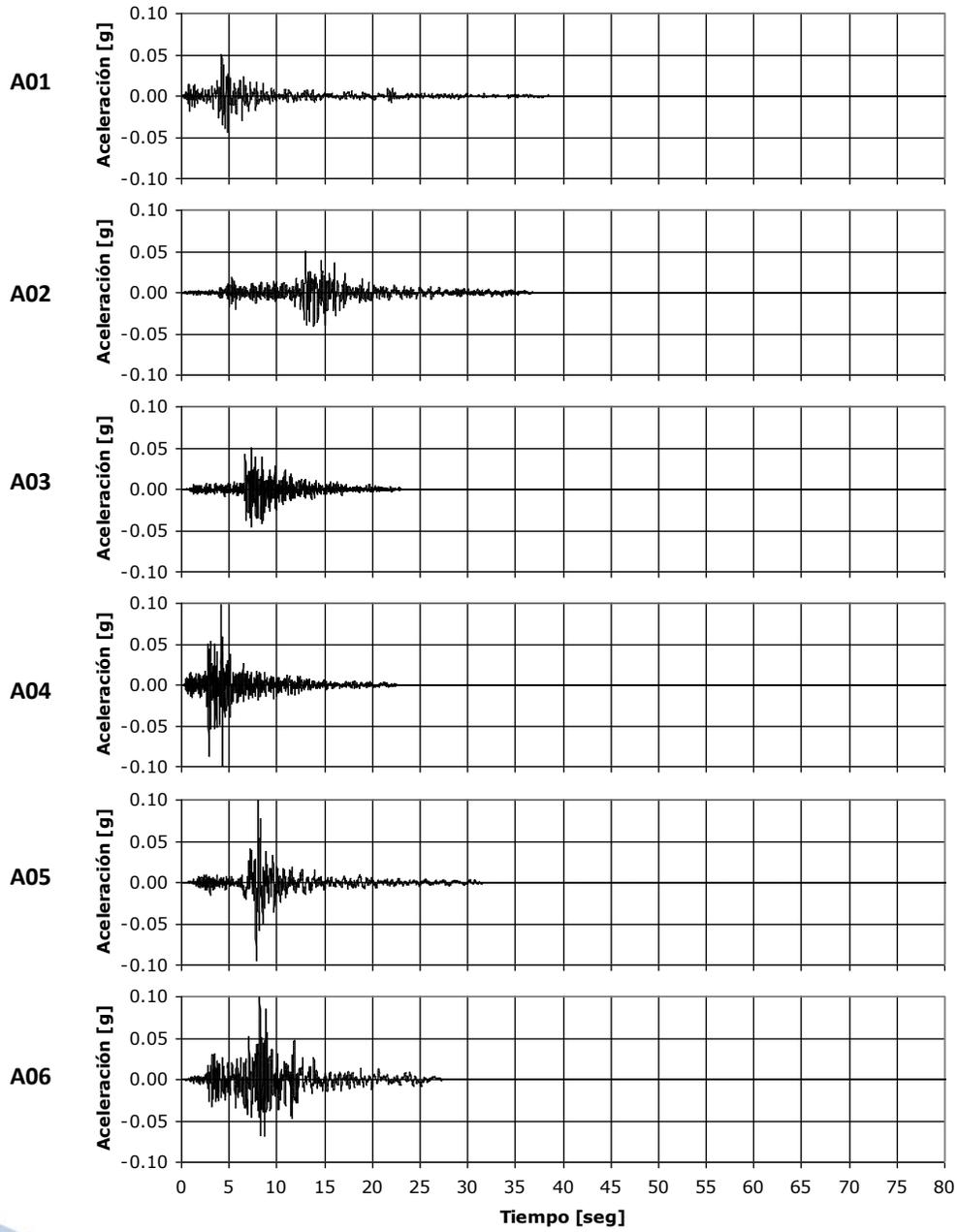


Figura 42. Señales de fuente activa.

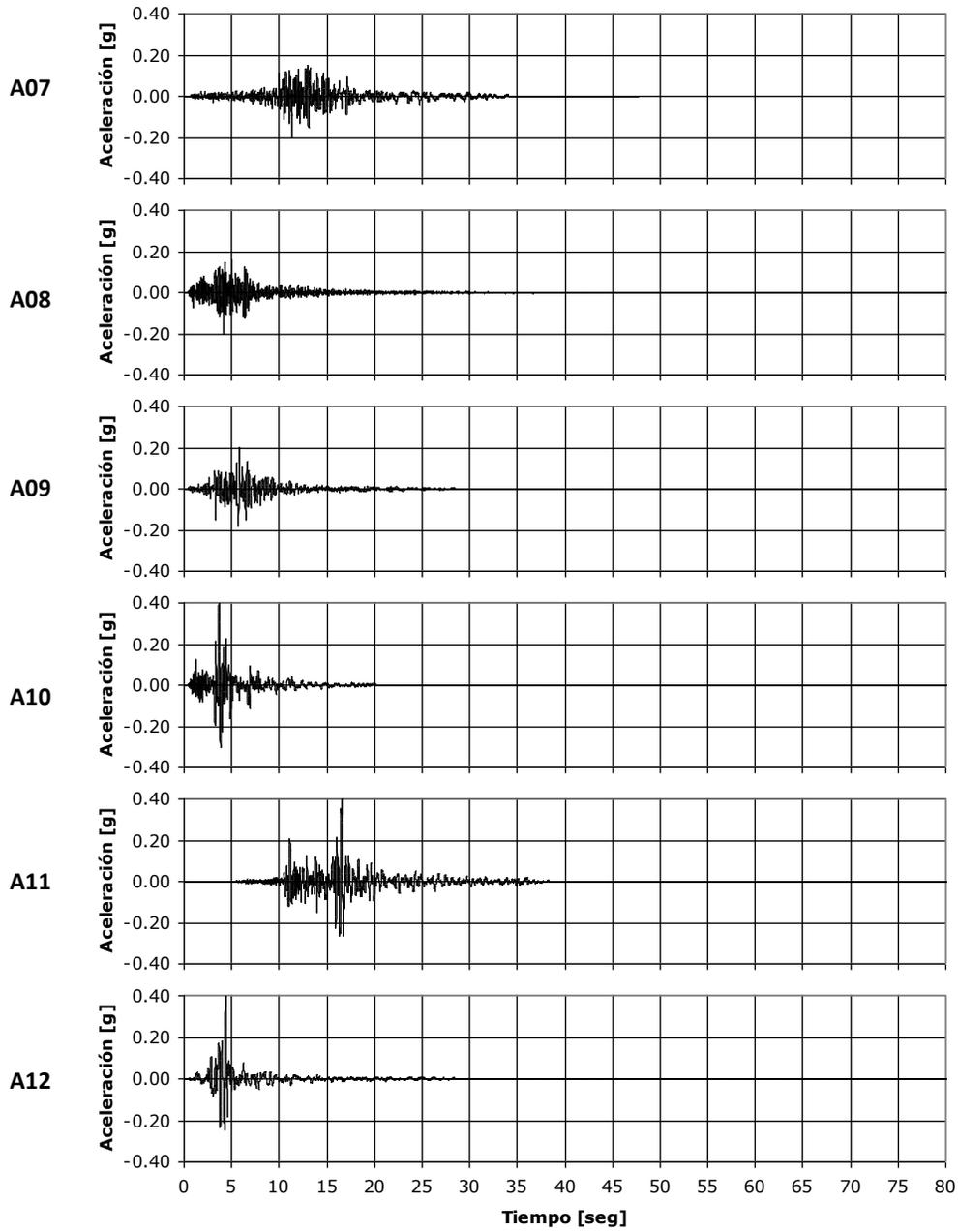


Figura 43. Señales de fuente activa.

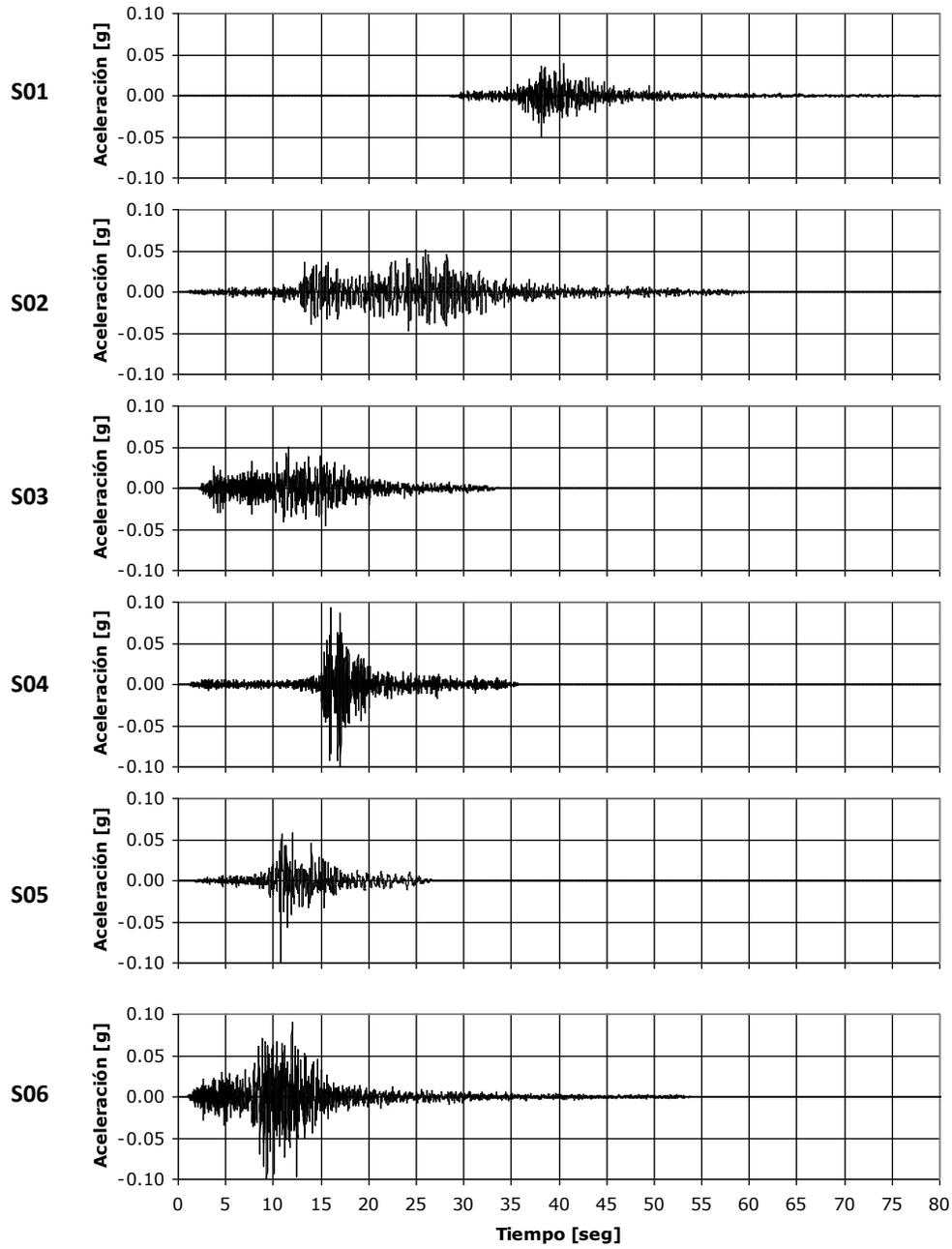


Figura 44. Señales de fuente subducción.

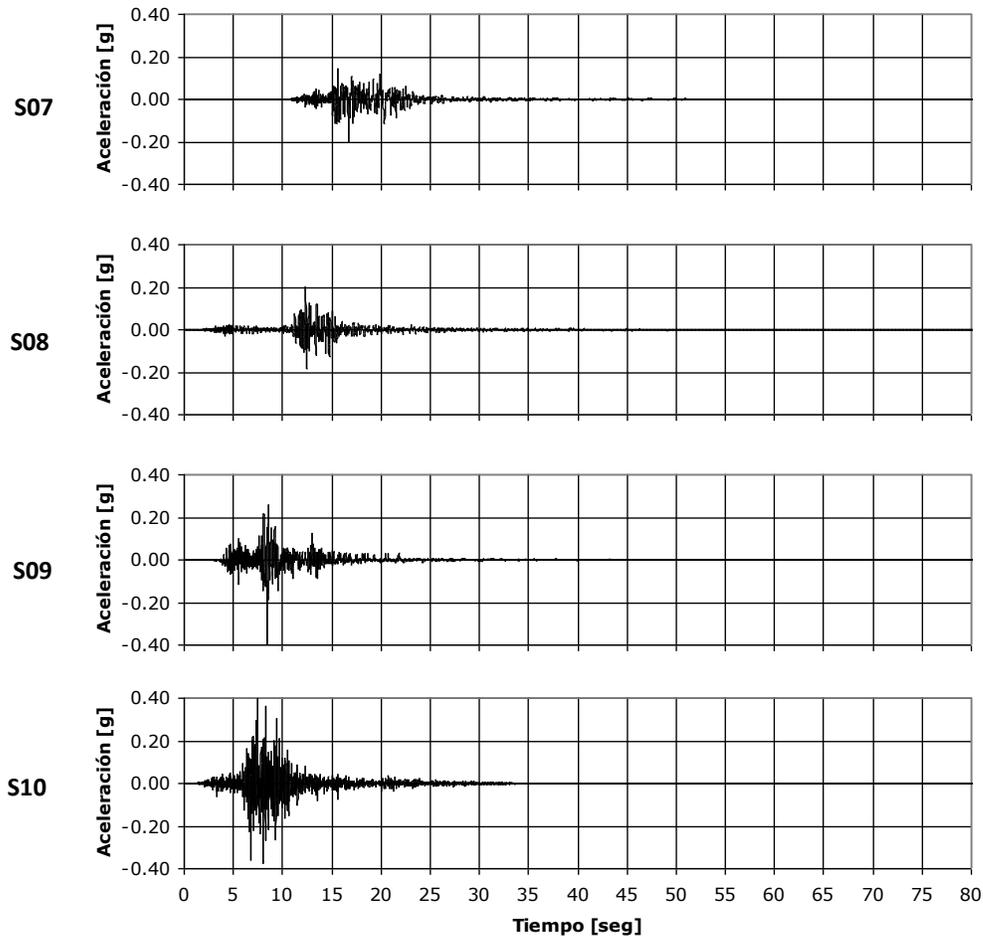


Figura 45. Señales de fuente subducción.

Respuesta dinámica del suelo

Los movimientos del terreno a nivel de superficie, sobre un depósito de suelo horizontal y uniforme, pueden ser atribuidos principalmente a la propagación vertical de las ondas de cortante desde la formación rocosa. En esos casos el depósito de suelo puede ser considerado como una viga unidimensional de cortante, debido a que los movimientos en el terreno inducidos por la excitación sísmica en la base son únicamente resultado de la deformación de cortante del suelo.

Las metodologías de análisis de la propagación unidimensional de ondas de cortante pueden agruparse en dos categorías principales: análisis en el dominio de la frecuencia y

análisis en el dominio del tiempo. En ambos casos el modelo constitutivo del suelo está definido por medio de funciones de variación de la rigidez a cortante y el amortiguamiento histerético del suelo, respecto a la deformación cortante inducida por el movimiento. Por razones de simplicidad, en el desarrollo de este trabajo se empleará un modelo de análisis en el dominio de la frecuencia.

Los análisis de respuesta en el dominio de la frecuencia son los más empleados a nivel mundial, debido a su simplicidad, flexibilidad y bajos requerimientos computacionales. Existen diferentes enfoques para el cálculo de la respuesta dinámica en el dominio de la frecuencia, aunque todos ellos están centrados en la solución de la ecuación de onda en medios estratificados para ondas de cortante y superficiales.

Uno de los métodos más ampliamente usado es el de la matriz propagadora, desarrollado originalmente por Thompson (1950), y corregido por Haskell (1953). Ha sido empleado no sólo en evaluación de respuesta dinámica, sino en sismología en general, por estar enfocado al análisis de ondas superficiales (Rayleigh y Love) en medios estratificados. Este método (conocido en sismología como el método de Thompson-Haskell) es un caso especial del método de matriz propagadora introducido por Gilbert y Backus (1966). Conceptualmente el método de la matriz propagadora es muy simple. El medio verticalmente heterogéneo se reemplaza por una serie de capas de materiales homogéneos, con características mecánicas conocidas. El movimiento se propaga verticalmente mediante la combinación de las propiedades de todos los estratos en la matriz propagadora. Dado que se trata de operaciones matriciales simples, el método es computacionalmente muy eficiente. Sin embargo, considera que los estratos del medio se comportan de manera elástica lineal, lo cual para la respuesta sísmica de depósitos de suelo no es aplicable sino en el caso en que el movimiento tenga una intensidad muy baja a nivel de la base del estrato, es decir, provee únicamente la respuesta elástica del depósito. Dado que en general el objetivo del análisis de amenaza y riesgo es considerar posibles terremotos catastróficos, la respuesta no lineal del suelo ante intensidades importantes a nivel del basamento rocoso es esencial para estimar adecuadamente el movimiento fuerte esperado en la cimentación de las estructuras. Por esta razón el método de la matriz propagadora no puede emplearse por sí solo. Detalles del método de la matriz propagadora pueden consultarse en Aki y Richards (2002).

El método más empleado en la actualidad es el modelo de respuesta lineal equivalente propuesto por Idriss y Seed (1968) y Seed e Idriss (1970). En este método se calcula la respuesta lineal del estrato de suelo usando el método de la matriz propagadora y, por medio de un proceso iterativo, se ajustan las propiedades (rigidez a cortante y amortiguamiento) en función de modelos constitutivos de comportamiento no lineal del suelo.

El modelo lineal equivalente consiste en una modificación del modelo de Kelvin-Voigt para tener en cuenta algunos tipos de no linealidades. La no linealidad y el comportamiento de esfuerzo deformación de los suelos es modelado como el de un material con rigidez degradante descrita por la curva de Ramberg y Osgood (1943) (ver Figura 46). El módulo de corte equivalente, G , es tomado como el módulo secante G_{SEC} , que depende de la amplitud de deformación cortante γ . Como se muestra en la Figura 46, G_{SEC} para un ciclo histerético simétrico controlado por deformación es:

$$G_{SEC} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (\text{Ec. 9})$$

En donde τ_c y γ_c son el esfuerzo y la deformación cortante respectivamente. El amortiguamiento con respecto al crítico en el modelo lineal equivalente β , se calcula para obtener la misma pérdida de energía en un ciclo de carga a la que se presenta en un ciclo de histéresis del suelo.

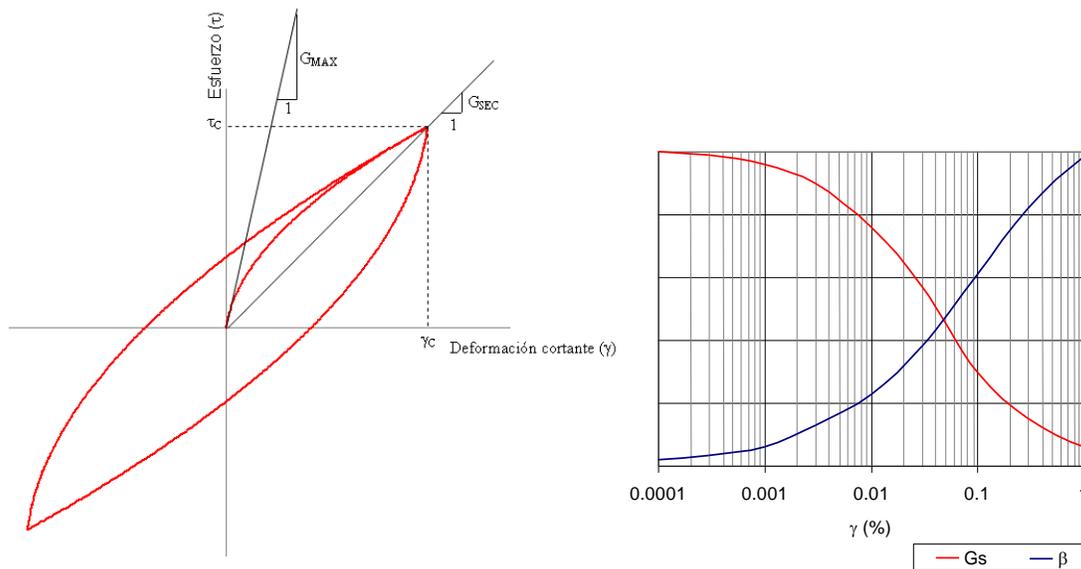


Figura 46. Curvas del modelo lineal equivalente.

Las hipótesis generales en las que se basa el modelo lineal equivalente son las siguientes:

1. Los estratos de suelo se extienden uniformemente y hasta el infinito en dirección horizontal y la capa inferior es el semiespacio infinito.

2. La respuesta principal del depósito de suelo es la producida por la propagación vertical de ondas de cortante (SH) provenientes de la formación de roca subyacente.
3. Las propiedades no lineales del suelo se modelan a través de sistemas viscoelásticos lineales equivalentes. Cada estrato que se modela es homogéneo e isotrópico y se caracteriza por su densidad de masa, espesor, módulo de corte y factor de amortiguamiento y por las características de degradación de estas últimas propiedades con la deformación por cortante.

Mediante el procedimiento descrito, se propagan verticalmente las ondas SH inducidas por el movimiento fuerte (acelerogramas) por una columna de material estratificado para la cual se conocen todas sus características dinámicas. El resultado es la obtención de los acelerogramas a nivel de superficie del terreno, junto con la función de transferencia no lineal de la columna de suelo. De esta manera se obtienen la respuesta sísmica en cada una de las estratigrafías sintéticas definidas en el modelo. Las principales razones para el uso de esta formulación tipo de modelos son:

- Este tipo de modelos han demostrado una gran capacidad para reproducir el comportamiento registrado en depósitos de suelos con características similares a las que se presentan en la ciudad de Manizales.
- Estos modelos han sido utilizados a nivel mundial para estudios similares al que acá se presenta.
- Para generar modelos bidimensionales o tridimensionales del depósito de suelo es necesario contar con información de mayor nivel de detalle que la disponible.

Resultados

A partir del análisis de la respuesta dinámica se obtienen parámetros importantes que caracterizan la respuesta de los suelos de Manizales. La Figura 47 presenta el mapa de periodos fundamentales de vibración calculados, y la Figura 48 presenta el mapa de distribución espacial del valor promedio de la desviación estándar del logaritmo de la función de amplificación del espectro de respuesta ($\sigma_{\ln AF(f)}$).

Finalmente, de la Figura 49 a la Figura 56 se presentan las funciones de transferencia del espectro de amplitudes de Fourier, para fuente activa y de subducción, para los mismos 4 sitios presentados anteriormente.

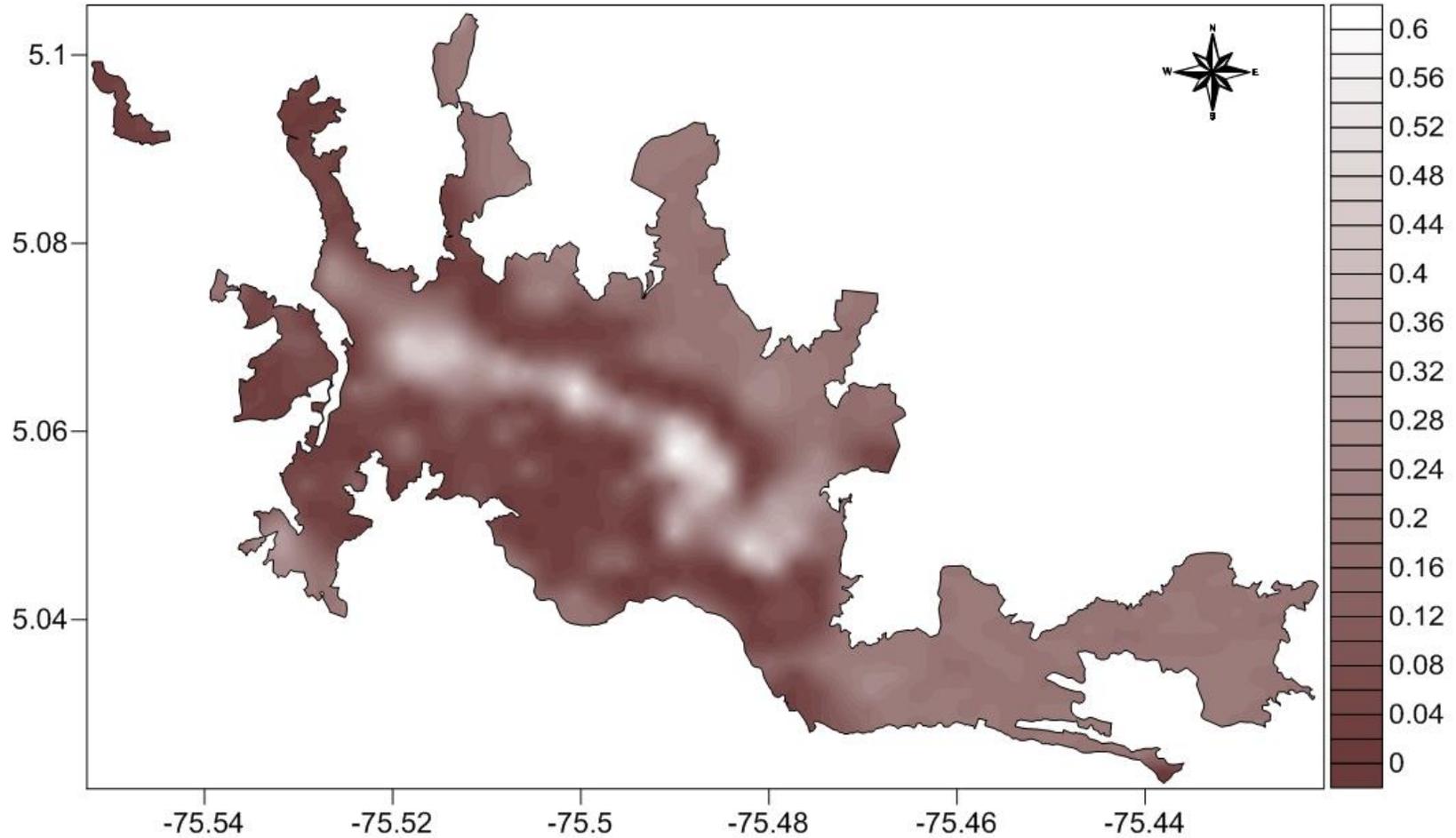


Figura 47. Periodos fundamentales de vibración.

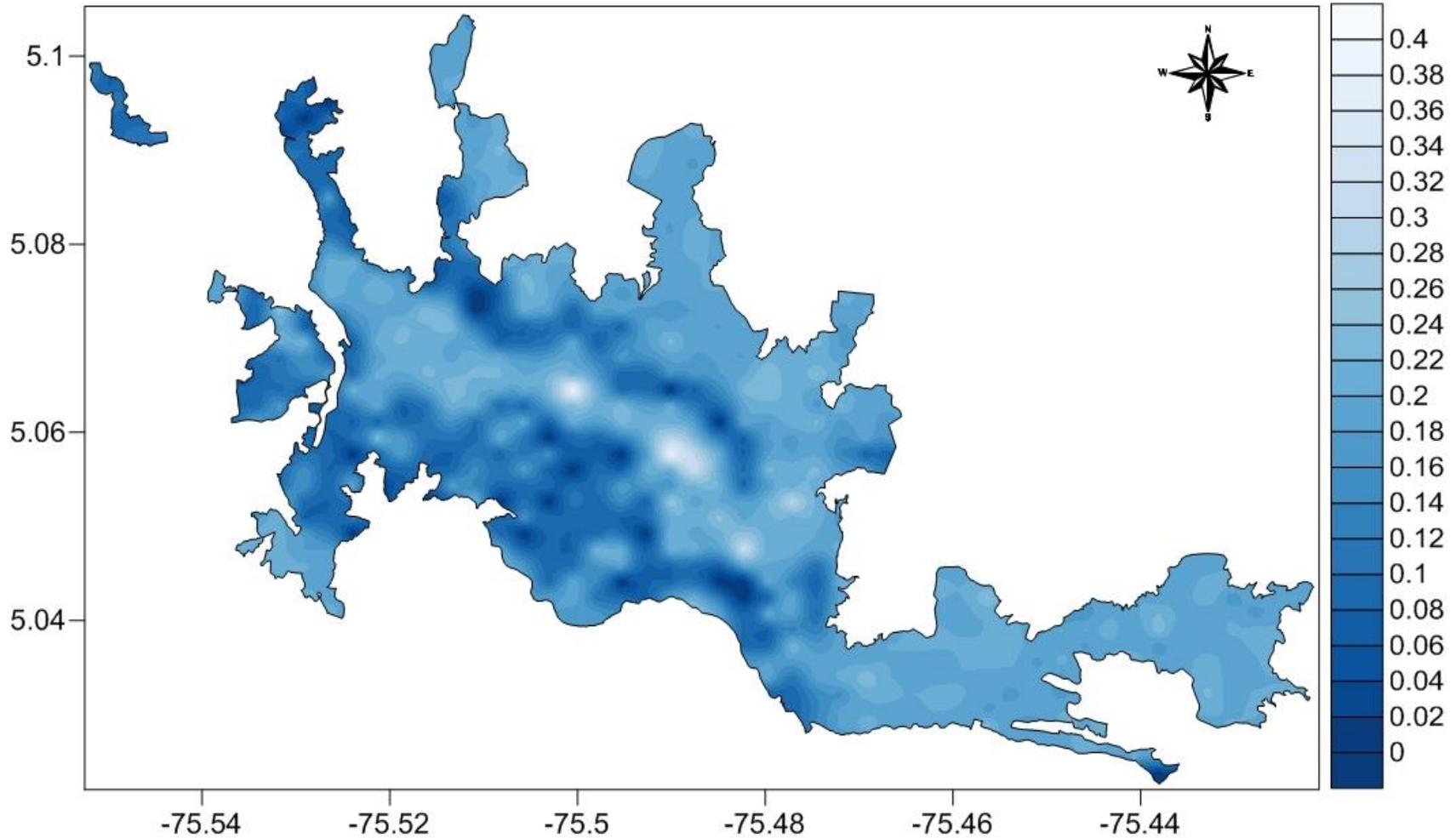


Figura 48. Distribución espacial del promedio de la desviación estándar del logaritmo de la función de amplificación del espectro de respuesta.

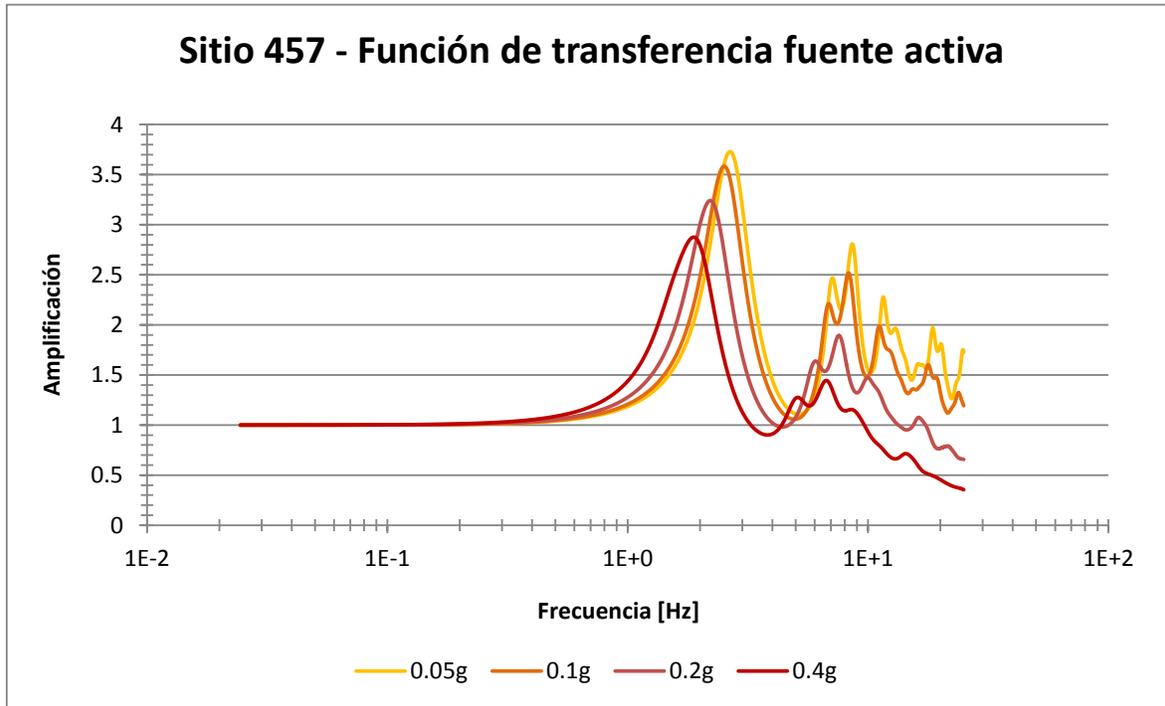


Figura 49. Funciones de transferencia para el sitio 457. Fuente Activa.

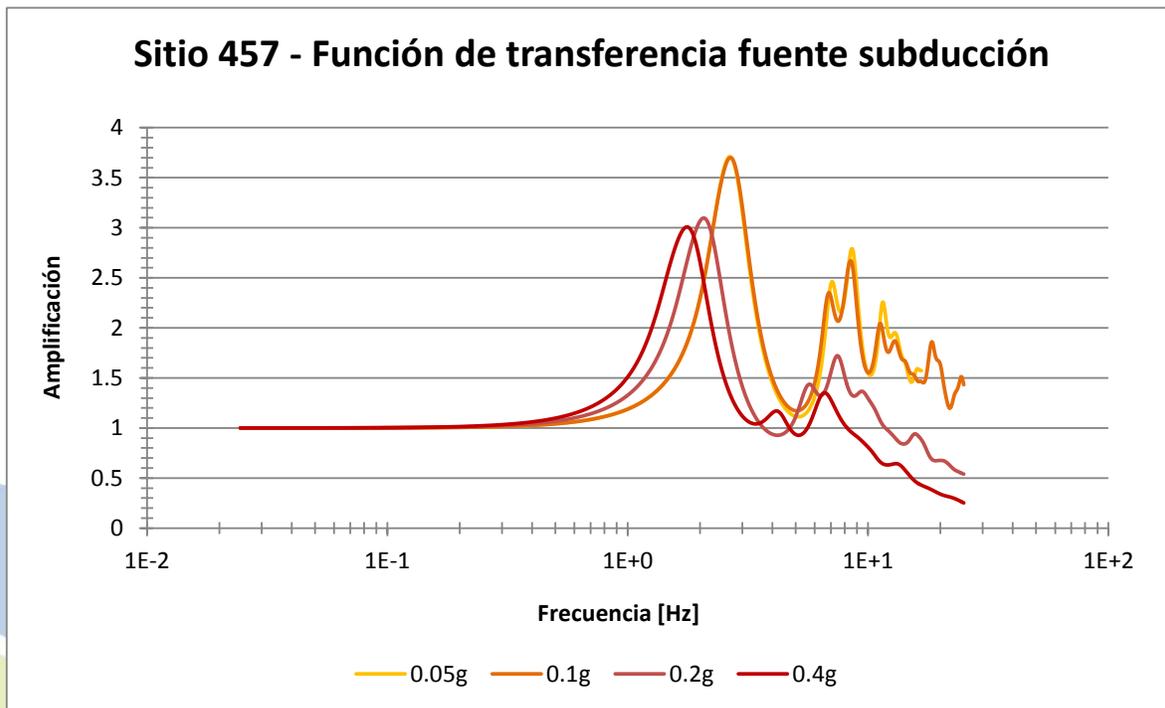


Figura 50. Funciones de transferencia para el sitio 457. Fuente Subducción.

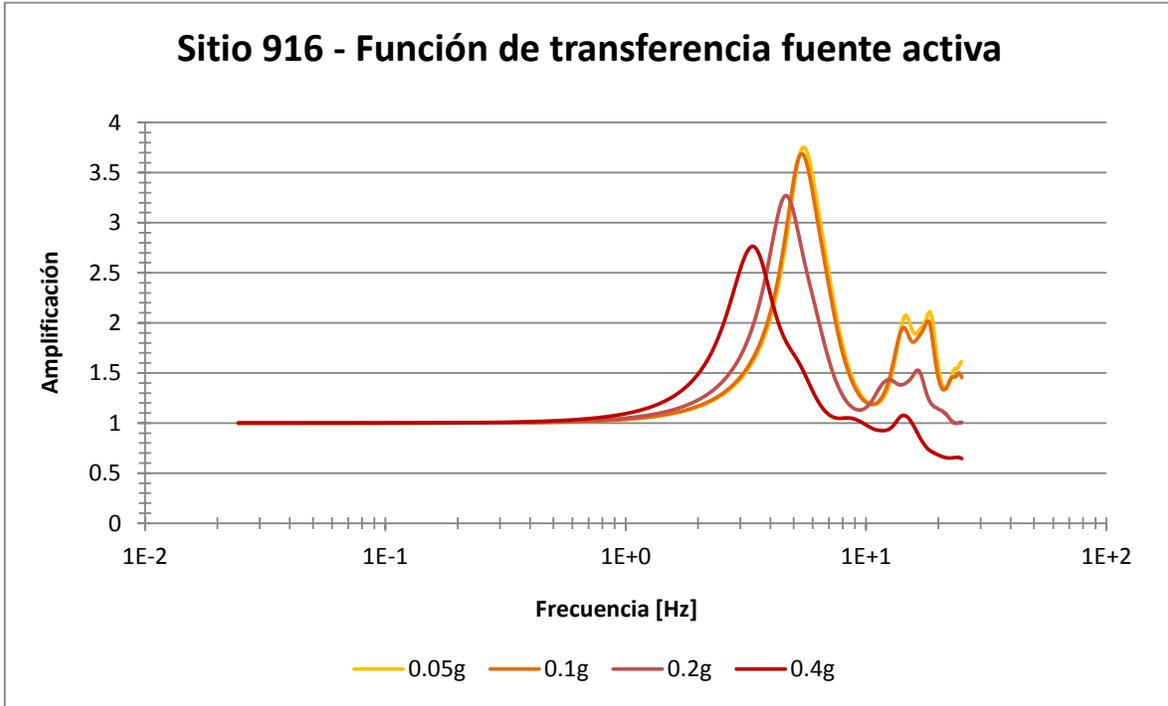


Figura 51. Funciones de transferencia para el sitio 916. Fuente Activa.

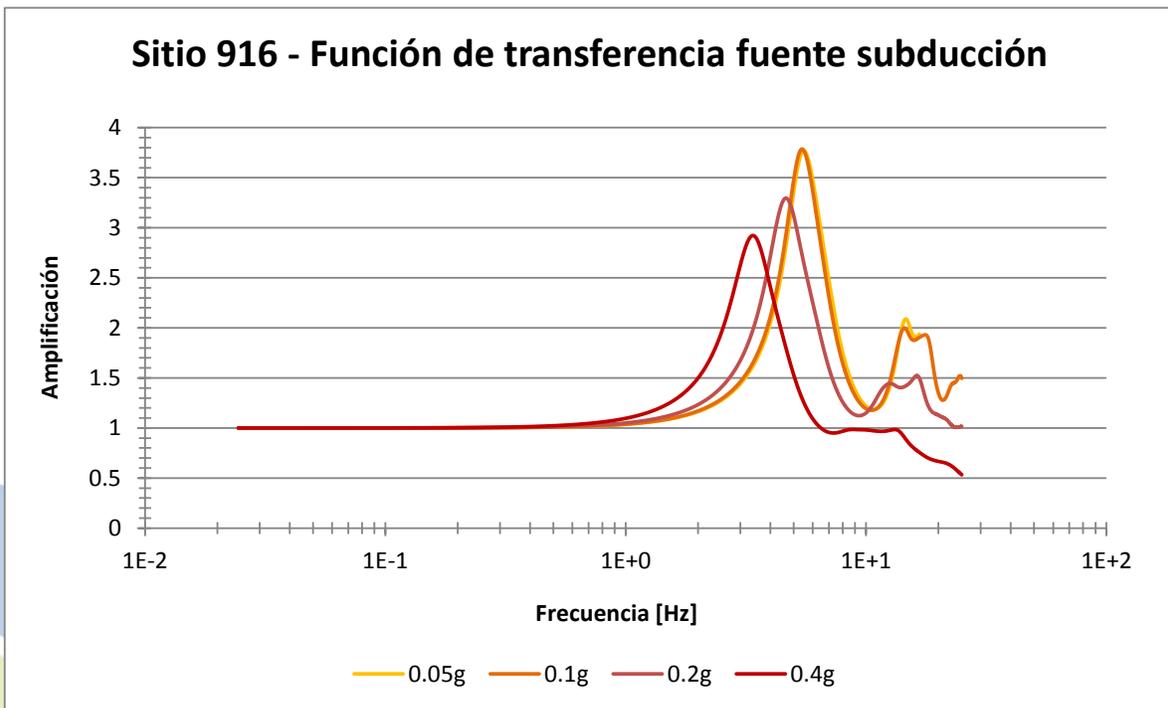


Figura 52. Funciones de transferencia para el sitio 916. Fuente Subducción.

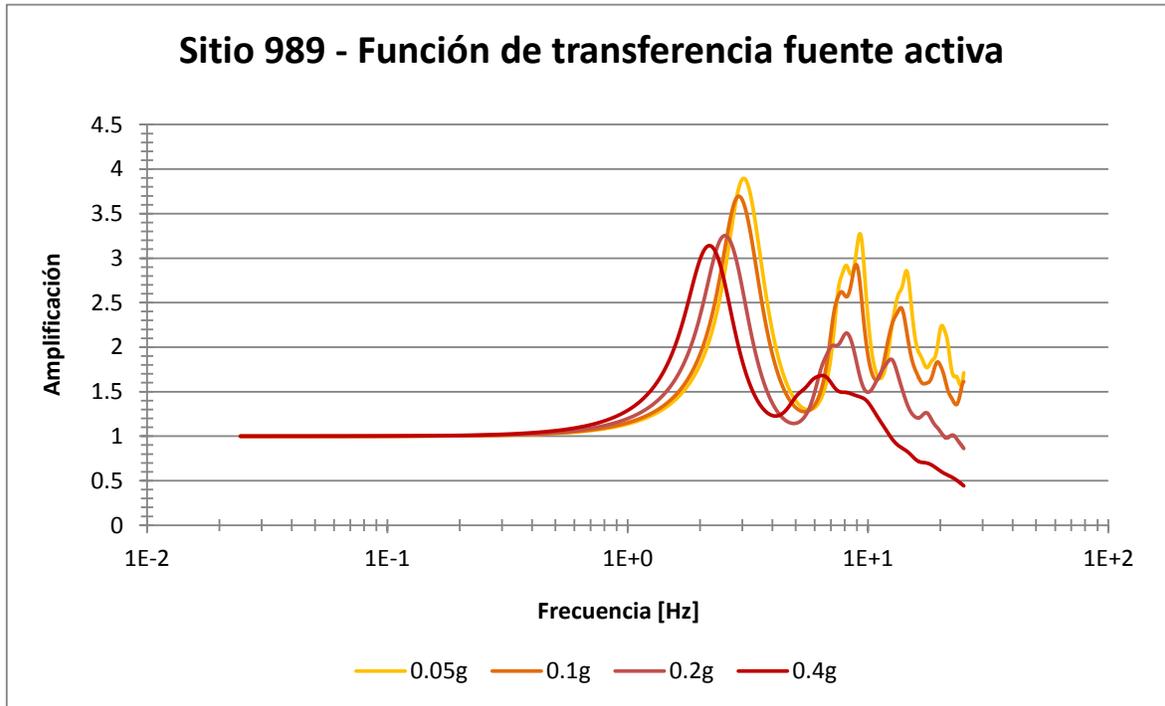


Figura 53. Funciones de transferencia para el sitio 989. Fuente Activa.

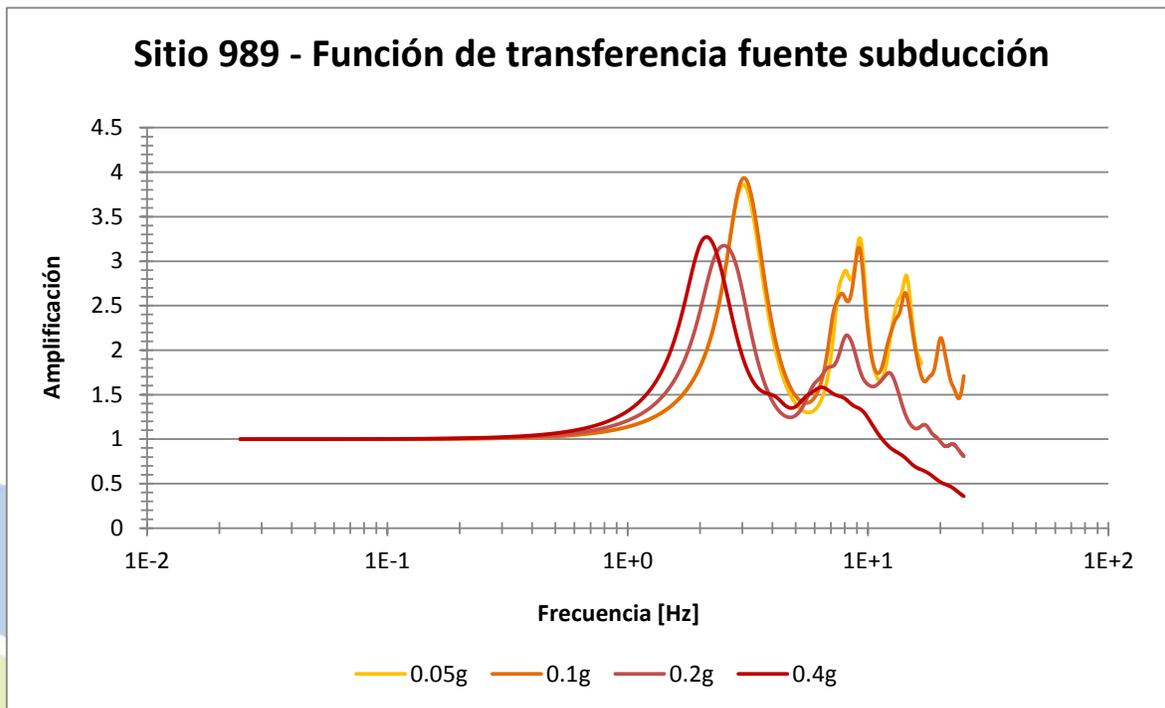


Figura 54. Funciones de transferencia para el sitio 989. Fuente Subducción.

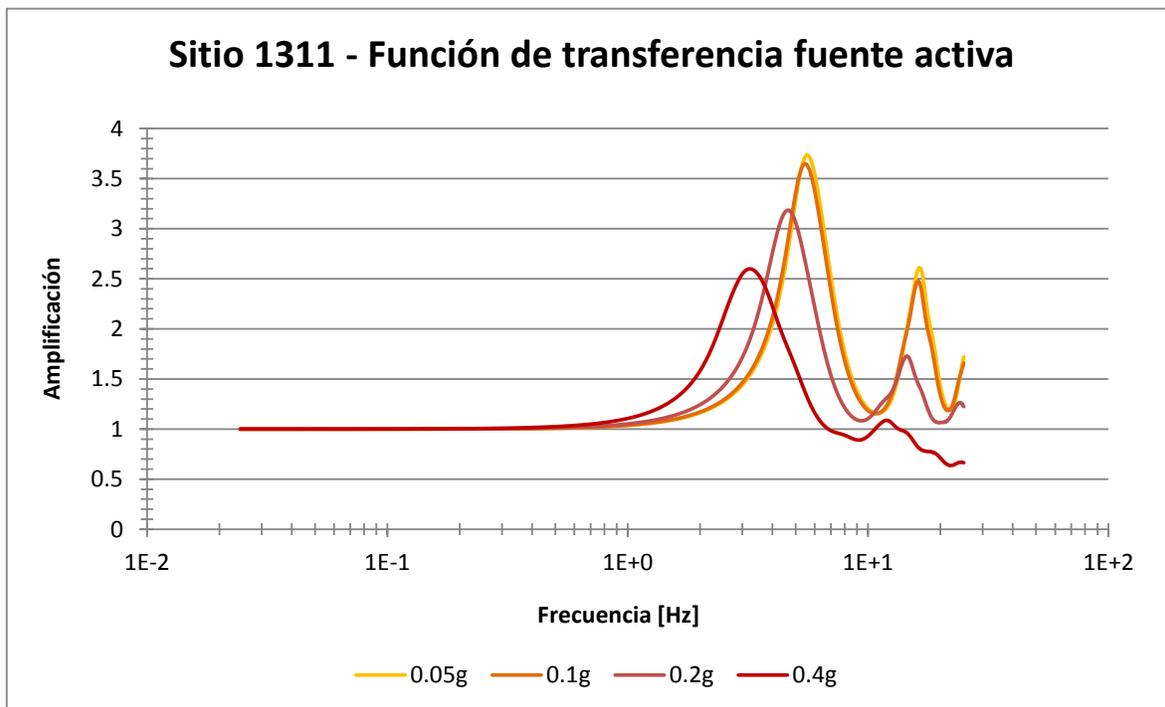


Figura 55. Funciones de transferencia para el sitio 1311. Fuente Activa.

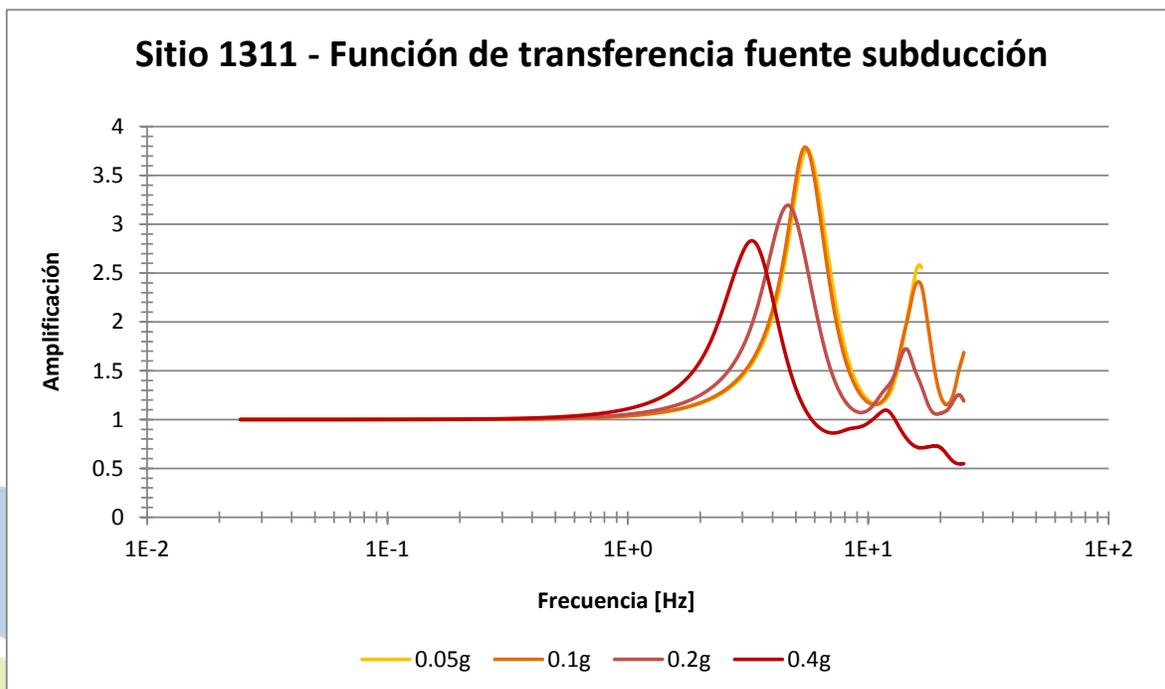


Figura 56. Funciones de transferencia para el sitio 1311. Fuente Subducción.

4. SELECCIÓN DE SEÑALES COMPATIBLES CON LA AMENAZA

Si bien en este trabajo se ha cubierto en su totalidad el área urbana de Manizales con el fin de determinar las funciones de transferencia del espectro de Fourier en toda la extensión de la ciudad, es importante seleccionar señales características, compatibles con el nivel de amenaza en roca firme, que sean útiles para la ejecución de estudios particulares de sitio, los cuales permiten establecer condiciones de amplificación sísmica en ubicaciones específicas en las cuales se realicen estudios geotécnicos detallados, con fines de verificación de los espectros de diseño y también para la obtención de coeficientes sísmicos de diseño de construcciones diferentes a edificaciones.

Amenaza sísmica a nivel del terreno firme

Los resultados (preliminares) de la evaluación de la amenaza sísmica a nivel de roca firme para Manizales, los cuales hacen parte de una ODS diferente a cargo del Ingeniero Mario Salgado, fueron incorporados en esta evaluación. El modelo de fuentes sísmicas es el definido en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS 2010; Salgado et. al. 2010) y el modelo de atenuación es el desarrollado por Bernal et. al (2012).

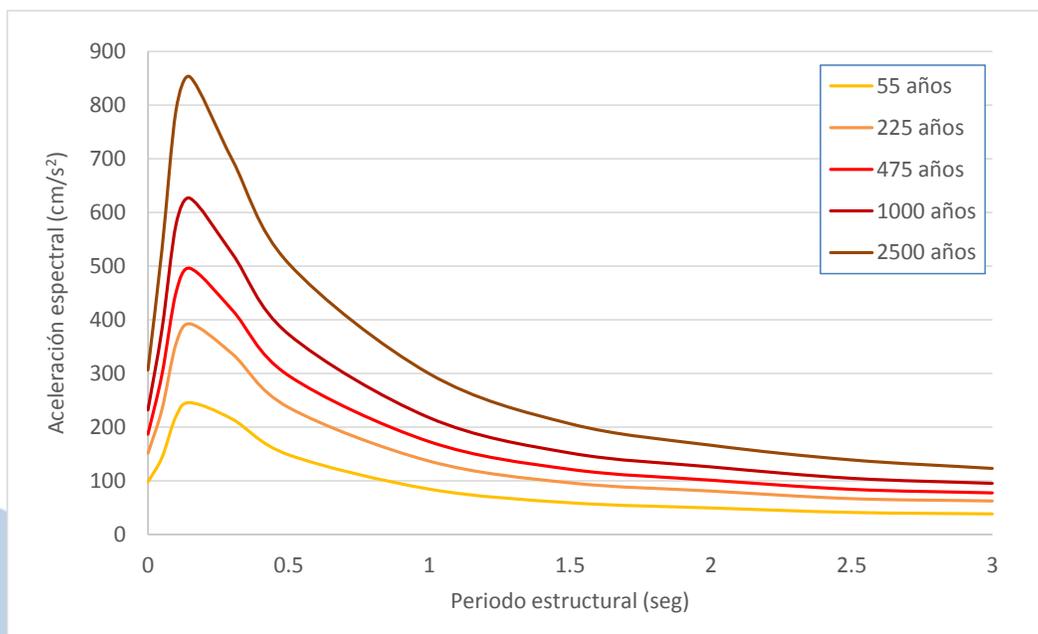


Figura 57. Espectros de amenaza uniforme a nivel de roca firme para Manizales. (Tomado de Salgado 2014, comunicación personal)

Dentro de la evaluación de la amenaza sísmica, es práctica común determinar la desagregación de la misma, la cual consiste en determinar los rangos de magnitud y distancia que más contribuyen a las intensidades de movimiento fuerte calculadas. La Figura 58 muestra el diagrama de desagregación de la amenaza sísmica de Manizales, como se muestra en el programa de cálculo CRISIS 2014 (Ordaz, 2014).

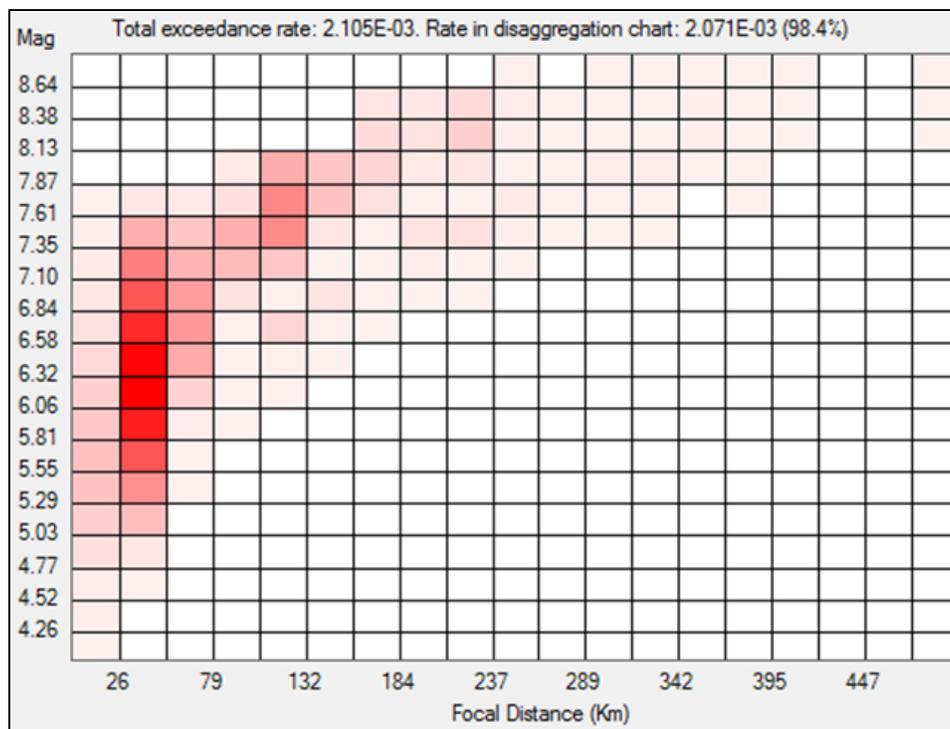


Figura 58. Desagregación de la amenaza sísmica para Manizales. (Tomado de Salgado 2014, comunicación personal)

Como puede observarse en la Figura 58, la amenaza de la ciudad de Manizales está fuertemente influenciada por dos regiones del diagrama (celdas de color rojo intenso). La primera región corresponde a terremotos de magnitud M_w entre 6 y 7 y distancia hipocentral entre 25 y 50 Km. La segunda corresponde a terremotos de magnitud M_w entre 7.3 y 7.8 y distancia hipocentral entre 100 y 130 Km. Con estos rangos definidos se procede a la selección de las señales características.

Señales características compatibles con la amenaza

La Tabla 8 muestra las señales seleccionadas para el primer rango de magnitud y distancia hipocentral, y la Tabla 9 muestra las señales seleccionadas para el segundo rango. Para el primer rango se seleccionaron 19 acelerogramas, mientras que para el segundo se seleccionaron 5. Esta diferencia está asociada exclusivamente a la cantidad de información disponible en cada caso.

En ambos casos se recurrió a las bases de datos internacionales de movimiento fuerte COSMOS⁴ y PEER⁵. Particularmente los registros seleccionados de la base de datos del PEER son los mismos empleados en el proyecto NGA (Next Generation Attenuation), y por lo tanto aparecen marcados como 'NGA' en las tablas siguientes.

Se incluye la siguiente información para todas las señales seleccionadas: nombre del evento sísmico, fecha y hora, país, nombre de la estación acelerográfica, fuente de los datos, tipo de suelo bajo la estación, ubicación geográfica del epicentro, ubicación geográfica de la estación, distancia hipocentral, profundidad del foco, mecanismo focal, magnitud de momento (M_w), aceleración máxima (PGA), velocidad máxima (PGV), desplazamiento máximo (PGD) y duración del acelerograma. Nótese que todos los registros fueron obtenidos de estaciones ubicadas sobre roca o sobre suelos de tipo A o B según la clasificación NEHRP (suelos con velocidades de onda de cortante mayores a 800 m/s).

De la Figura 59 a la Figura 77 se presentan los acelerogramas seleccionados para el primer rango de magnitud-distancia. De la Figura 78 a la Figura 82 se presentan los seleccionados para el segundo rango.

⁴ Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems. www.cosmos-eg.org

⁵ Pacific Earthquake Engineering Research Center. <http://peer.berkeley.edu/>

Tabla 8. Señales seleccionadas para el primer rango de magnitud-distancia.

Nombre	Fecha	Hora	País	Estación	Fuente	Tipo de suelo	Longitud epicentro	Latitud epicentro	Longitud estación	Latitud estación	Dist. Hipoc.[Km]	Prof. [Km]	Mecanismo	Mw	PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	Dur. [seg]
Northridge-01	17/01/1994	12:31:00 (UT)	USA	Pacoima Dam (upper left)	NGA	A	-118.55	34.21	-118.40	34.33	26.85	17.5	Reverse	6.69	1285.2	105.5	23.5	39.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31:00 (UT)	USA	Pacoima Dam (dow nstr)	NGA	A	-118.55	34.21	-118.40	34.33	26.85	17.5	Reverse	6.69	434.1	31.5	4.5	19.98
San Fernando	09/02/1971	14:0:00 (UT)	USA	Lake Hughes #4	NGA	B	-118.41	34.44	-118.48	34.65	27.46	13	Reverse	6.61	152.7	8.6	1.9	36.88
Kobe, Japan	16/01/1995	20:46:00 (UT)	Japan	Kobe University	NGA	B	135.01	34.59	135.24	34.73	31.08	17.9	Strike - Slip	6.9	310.5	34.9	7.4	31.99
Irpinia, Italy-02	23/11/1980	19:35:00 (UT)	Italy	Auletta	NGA	B	15.33	40.85	15.56	40.56	37.81	7	Normal	6.2	23	8.1	10.2	110.23
San Fernando	09/02/1971	14:0:00 (UT)	USA	Pasadena - Old Seismo Lab	NGA	B	-118.41	34.44	-118.17	34.15	41.27	13	Reverse	6.61	202.1	11	2.5	29.99
Irpinia, Italy-02	23/11/1980	19:35:00 (UT)	Italy	Sturmo	NGA	B	15.33	40.85	15.12	41.02	27.5	7	Normal	6.2	77.2	18.9	13	126.07
Northridge-01	17/01/1994	12:31:00 (UT)	USA	LA - Wonderland Ave	NGA	B	-118.55	34.21	-118.38	34.11	25.82	17.5	Reverse	6.69	172.1	12	2.8	29.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31:00 (UT)	USA	Vasquez Rocks Park	NGA	B	-118.55	34.21	-118.33	34.49	41.9	17.5	Reverse	6.69	139.1	11.3	2.9	39.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31:00 (UT)	USA	LA - Griffith Park Observatory	NGA	B	-118.55	34.21	-118.30	34.12	30.86	17.5	Reverse	6.69	163.6	13.8	2.4	46.93
Loma Prieta	18/10/1989	0:5:00 (UT)	USA	Gilroy Array #1	NGA	B	-121.88	37.04	-121.57	36.97	33.55	17.48	Reverse-Oblique	6.93	473.2	34.5	8.1	39.94
Irpinia, Italy-01	23/11/1980	19:34:00 (UT)	Italy	Auletta	NGA	B	15.34	40.81	15.56	40.56	34.44	9.5	Normal	6.9	62.4	21.5	44.8	118.23
Irpinia, Italy-01	23/11/1980	19:34:00 (UT)	Italy	Sturmo	NGA	B	15.34	40.81	15.12	41.02	31.8	9.5	Normal	6.9	357.8	220.2	565.9	163.91
Northridge-01	17/01/1994	12:31:00 (UT)	USA	Burbank - Howard Rd.	NGA	B	-118.55	34.21	-118.30	34.20	29.05	17.5	Reverse	6.69	163.3	8.6	1.8	29.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31:00 (UT)	USA	Mt Wilson - CIT Seis Sta	NGA	B	-118.55	34.21	-118.06	34.22	49	17.5	Reverse	6.69	134.4	5.8	0.5	39.98
Irpinia, Italy-01	23/11/1980	19:34:00 (UT)	Italy	Bisaccia	NGA	B	15.34	40.81	15.38	41.01	25.13	9.5	Normal	6.9	83.1	43.9	35.4	131.91
Morgan Hill	24/04/1984	21:15:00 (UT)	USA	Gilroy Array #1	NGA	B	-121.70	37.31	-121.57	36.97	39.55	8.5	Strike - Slip	6.19	98.3	11.7	16.8	119.9
Chamoli	28/03/1999	19:05:11 (UTC)	India	Joshimath	COSMOS	Rock	79.40	30.51	79.57	30.55	26	15	Unknown	6.6	696	37.2	20.1	25.04
Northridge	17/01/1994	12:31:03.9 (UTC)	USA	Lake Hughes #9	COSMOS	Rock	-118.55	34.21	-118.56	34.61	29.4	17.5	Reverse	6.7	221.2	13.6	3.5	59.98

Tabla 9. Señales seleccionadas para el segundo rango de magnitud-distancia.

ID	Nombre	Fecha	Hora	País	Estación	Fuente	Tipo de suelo	Longitud epicentro	Latitud epicentro	Latitud estación	Longitud estación	Dist. Hipoc. [Km]	Prof. [Km]	Mecanismo	Mw	PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	Dur. [seg]
1741	Chi-Chi, Taiwan	20/09/1999	:00 (UT)	Taiwan	TCU085	NGA	B	120.80	23.86	24.68	121.36	107.16	6.76	Reverse-Oblique	7.62	53.7	6.5	7.4	79
1570	Chi-Chi, Taiwan	20/09/1999	:00 (UT)	Taiwan	ILA063	NGA	B	120.80	23.86	24.62	121.52	111.09	6.76	Reverse-Oblique	7.62	81.7	12.8	9	79
1810	Chi-Chi, Taiwan	20/09/1999	:00 (UT)	Taiwan	TTN042	NGA	B	120.80	23.86	23.00	121.28	105.69	6.76	Reverse-Oblique	7.62	58.9	6.9	9.5	125
	Landers	28/06/1992	11:57:34.1 (UTC)	USA	Rancho Cucamonga	COSMOS	Rock	-116.44	34.20	34.17	117.58	105.1	7	Strike-slip	7.3	65.6	9.6	7.7	165
	Landers	28/06/1992	11:57:34.1 (UTC)	USA	Wrightwood - Jackson flat	COSMOS	Rock	-116.44	34.20	34.38	116.43	121.1	7	Strike-slip	7.3	46.5	10.1	7.3	70

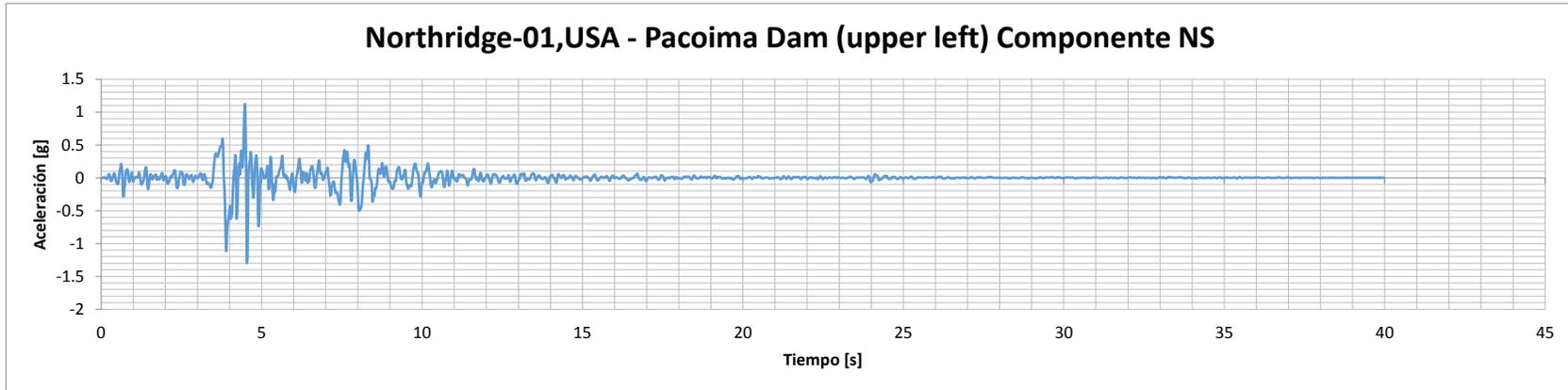


Figura 59. Acelerograma 1 del primer rango de magnitud-distancia.

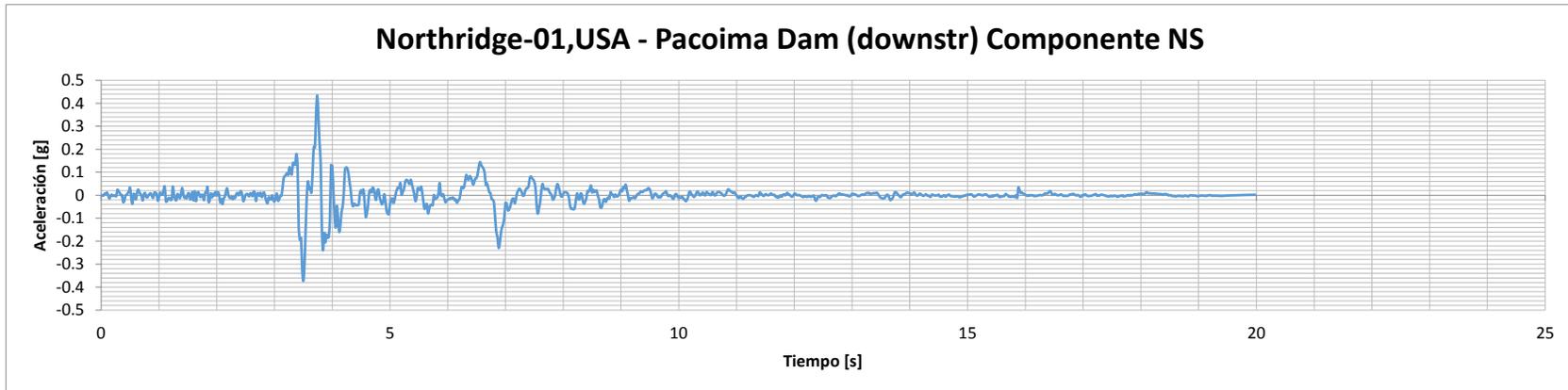


Figura 60. Acelerograma 2 del primer rango de magnitud-distancia.

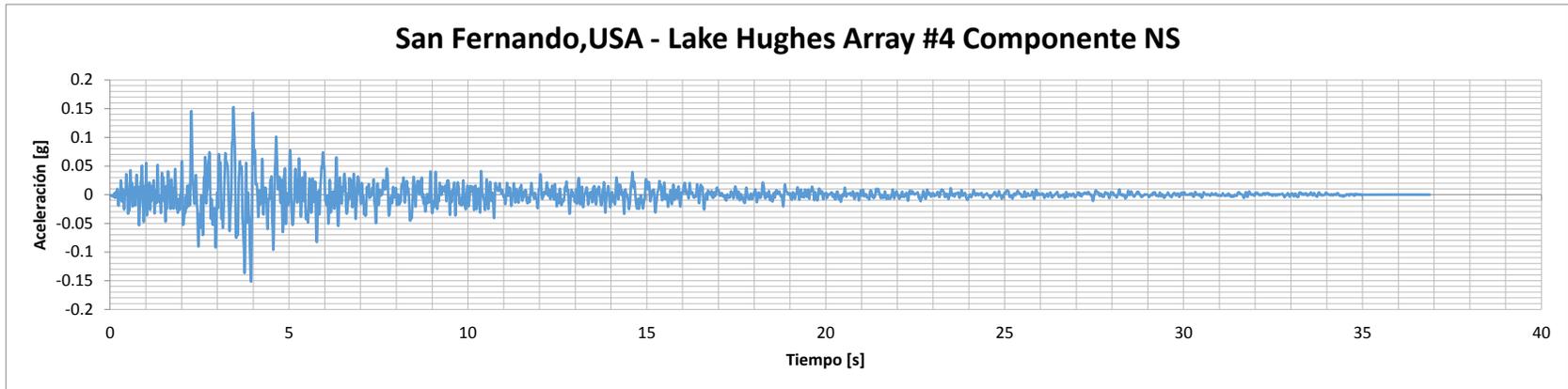


Figura 61. Acelerograma 3 del primer rango de magnitud-distancia.

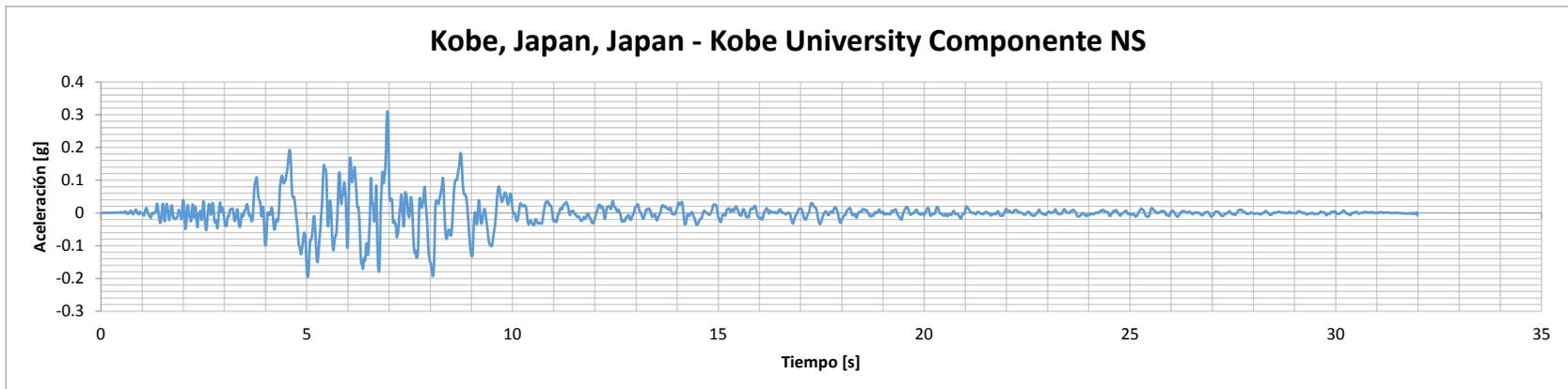


Figura 62. Acelerograma 4 del primer rango de magnitud-distancia.

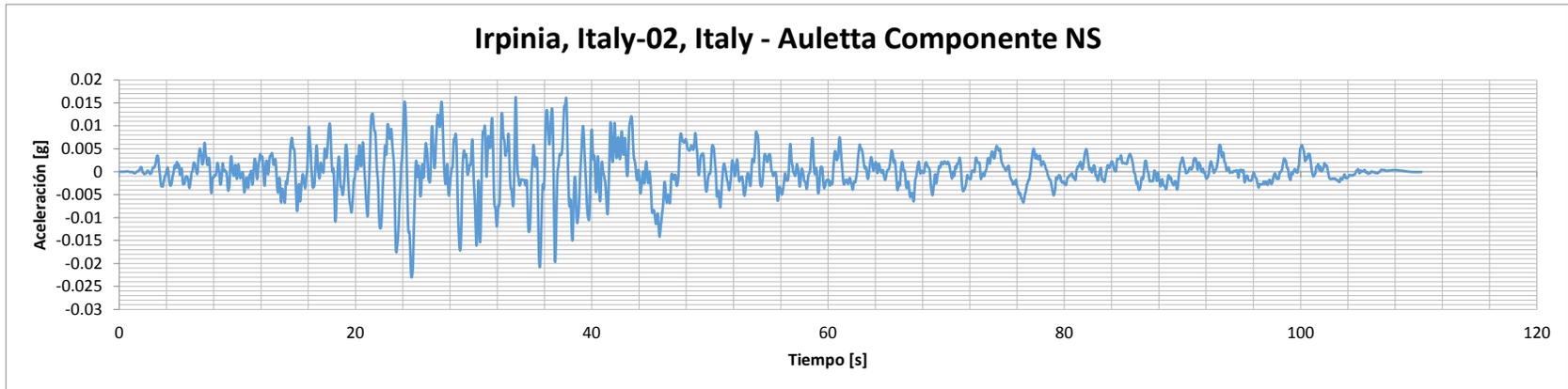


Figura 63. Acelerograma 5 del primer rango de magnitud-distancia.

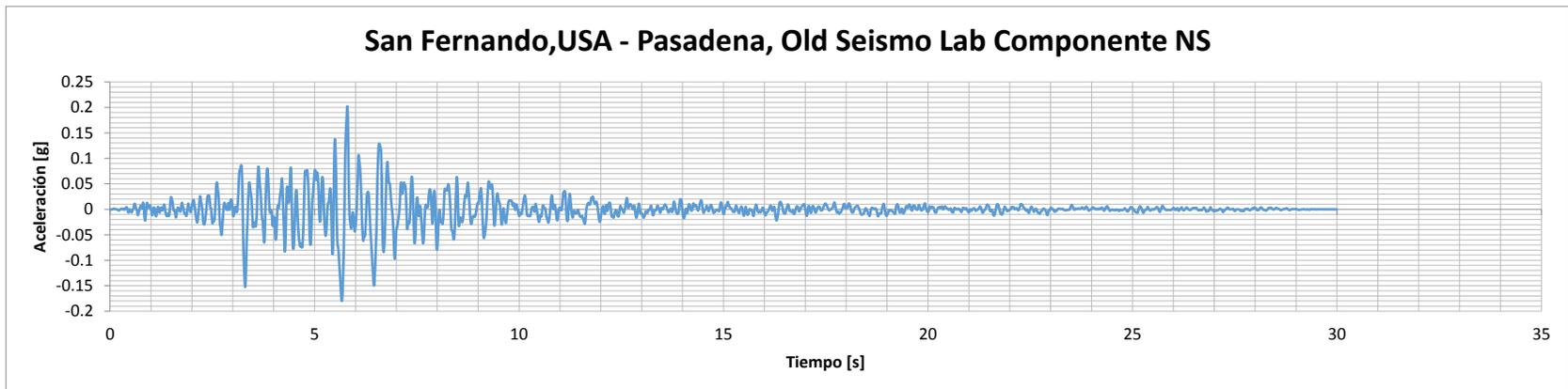


Figura 64. Acelerograma 6 del primer rango de magnitud-distancia.

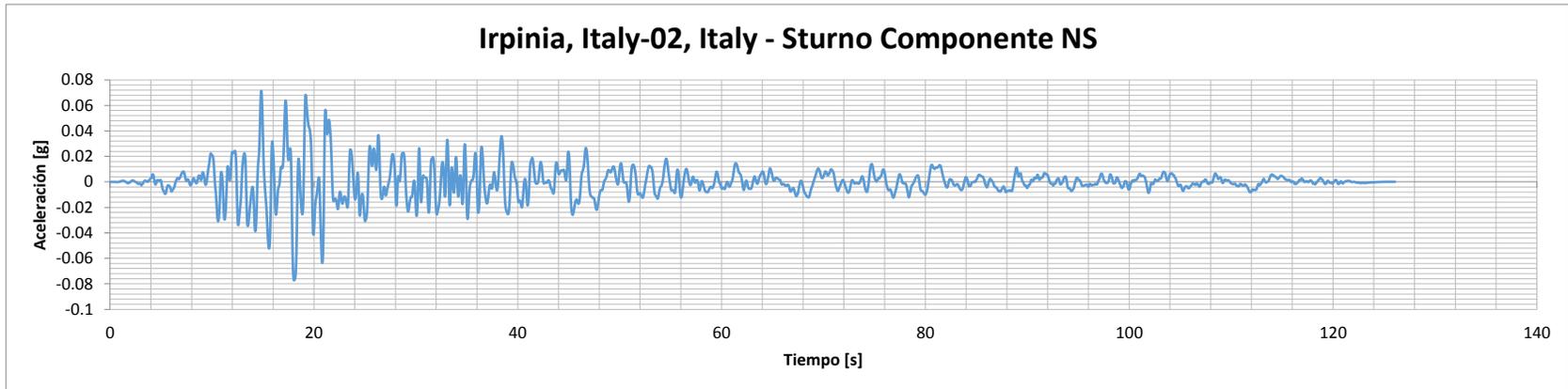


Figura 65. Acelerograma 7 del primer rango de magnitud-distancia.

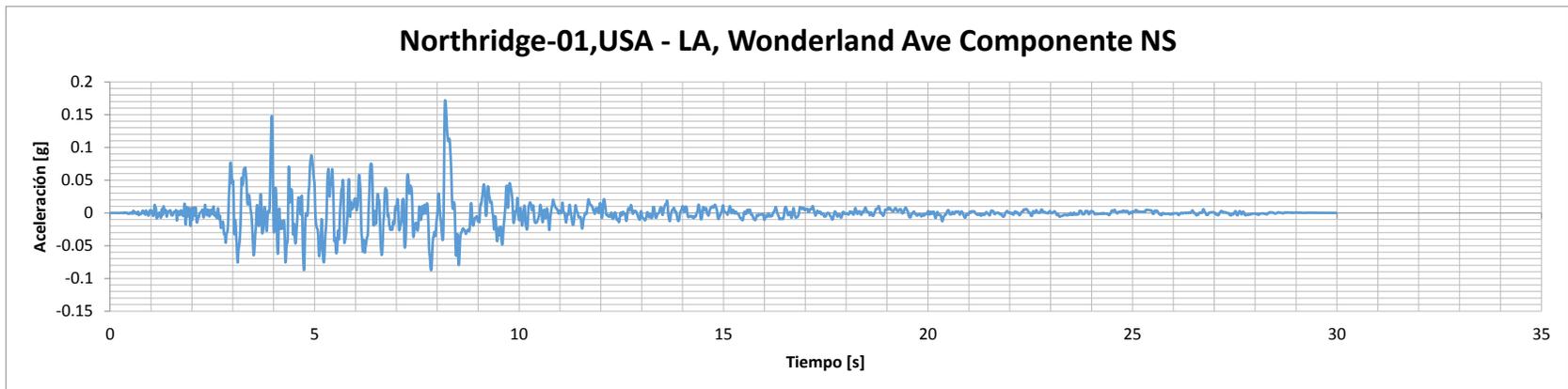


Figura 66. Acelerograma 8 del primer rango de magnitud-distancia.

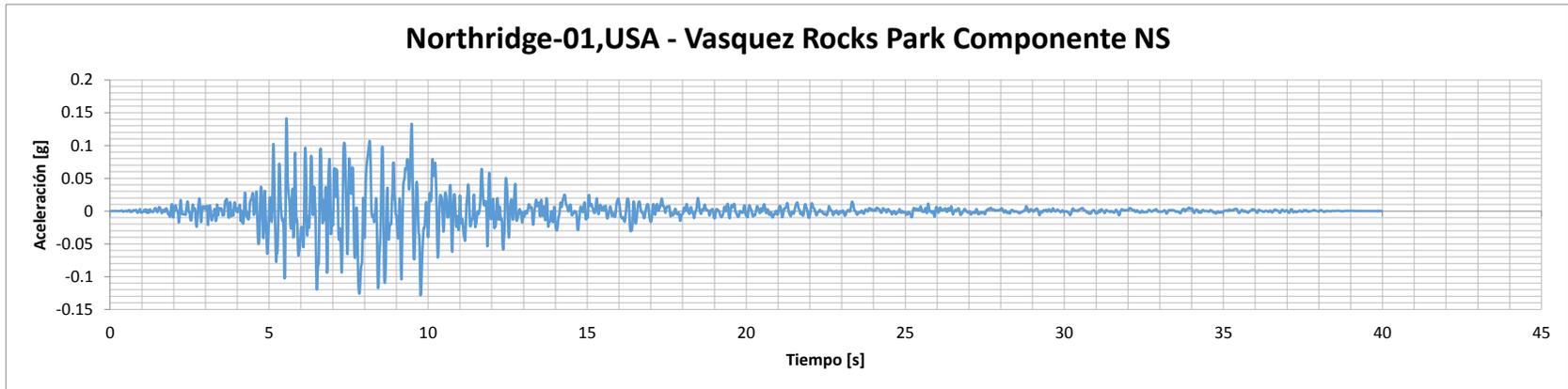


Figura 67. Acelerograma 9 del primer rango de magnitud-distancia.

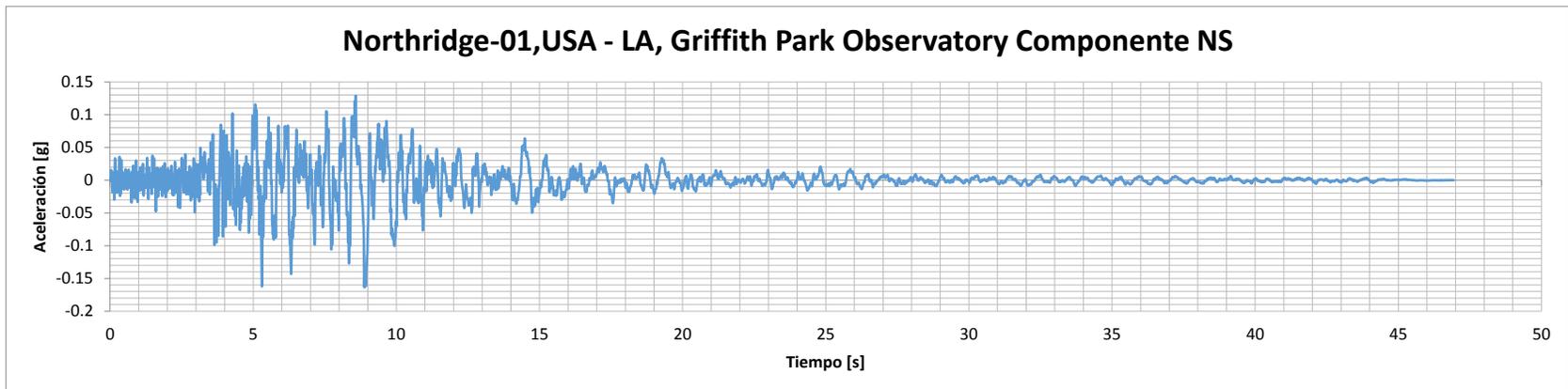


Figura 68. Acelerograma 10 del primer rango de magnitud-distancia.

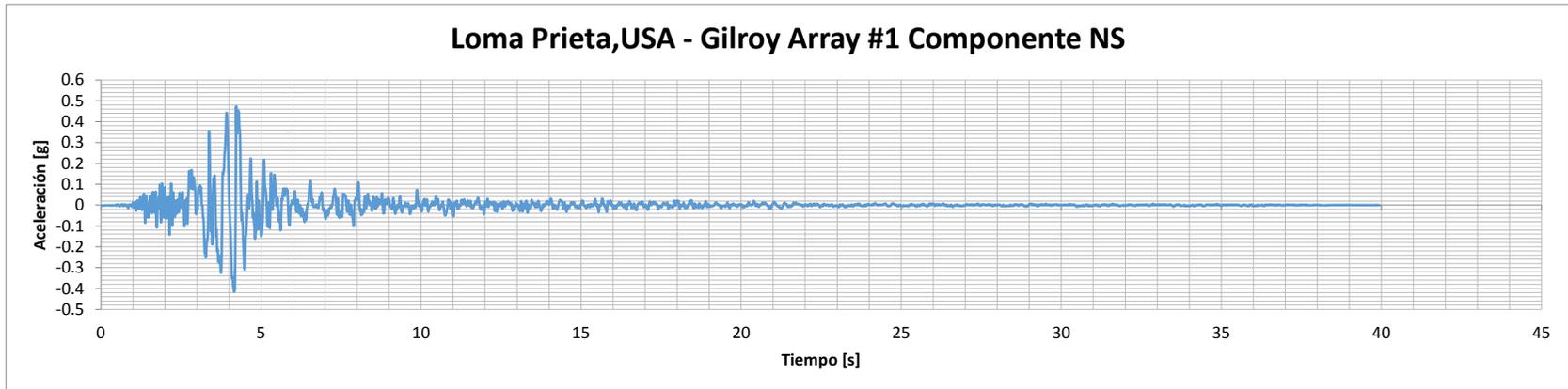


Figura 69. Acelerograma 11 del primer rango de magnitud-distancia.

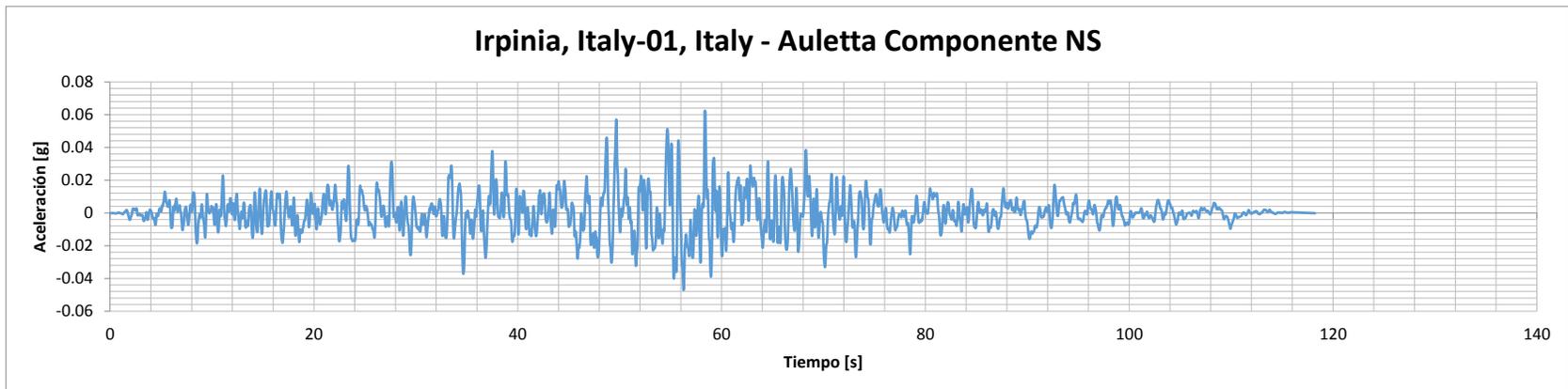


Figura 70. Acelerograma 12 del primer rango de magnitud-distancia.

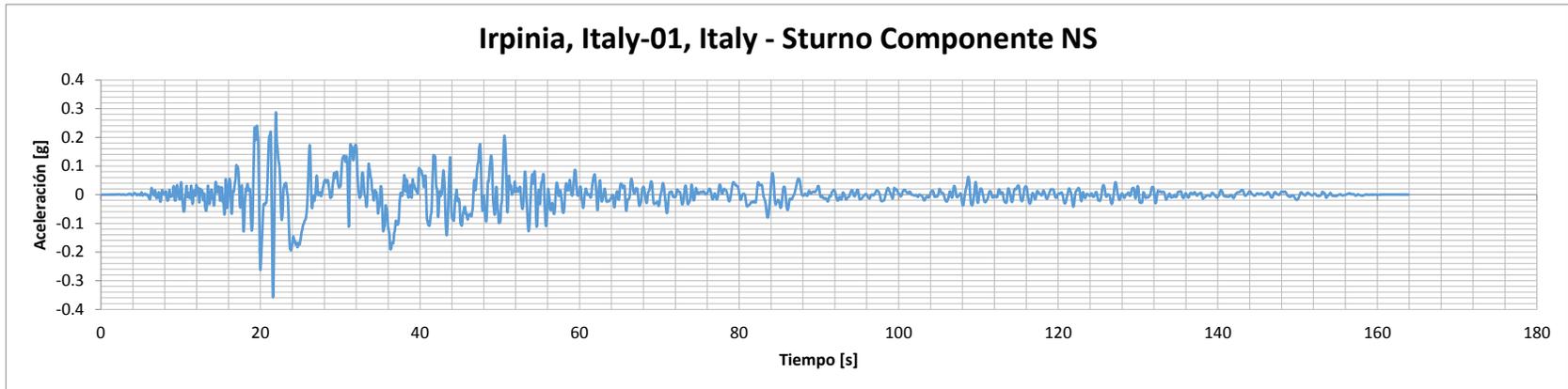


Figura 71. Acelerograma 13 del primer rango de magnitud-distancia.

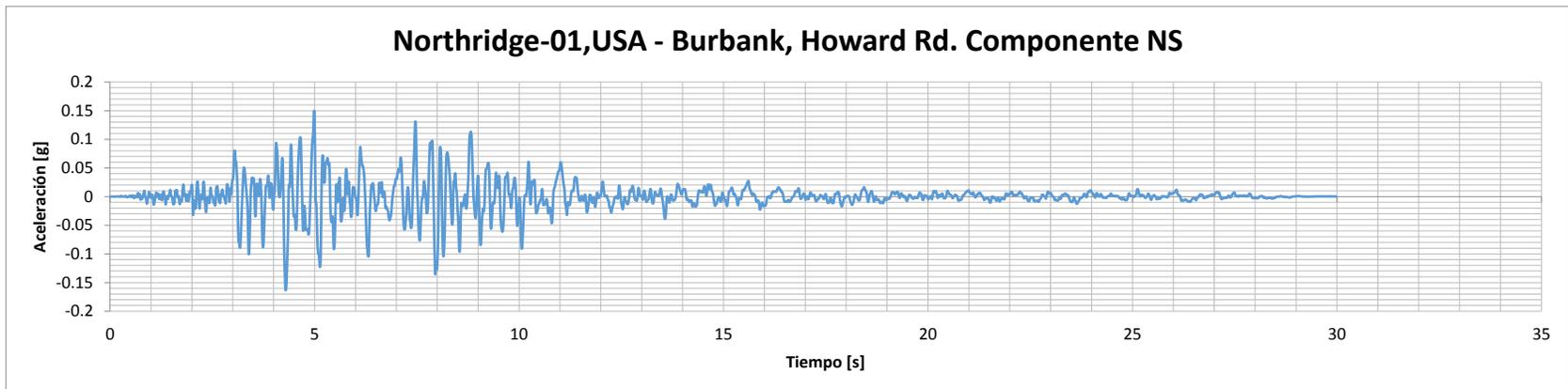


Figura 72. Acelerograma 14 del primer rango de magnitud-distancia.

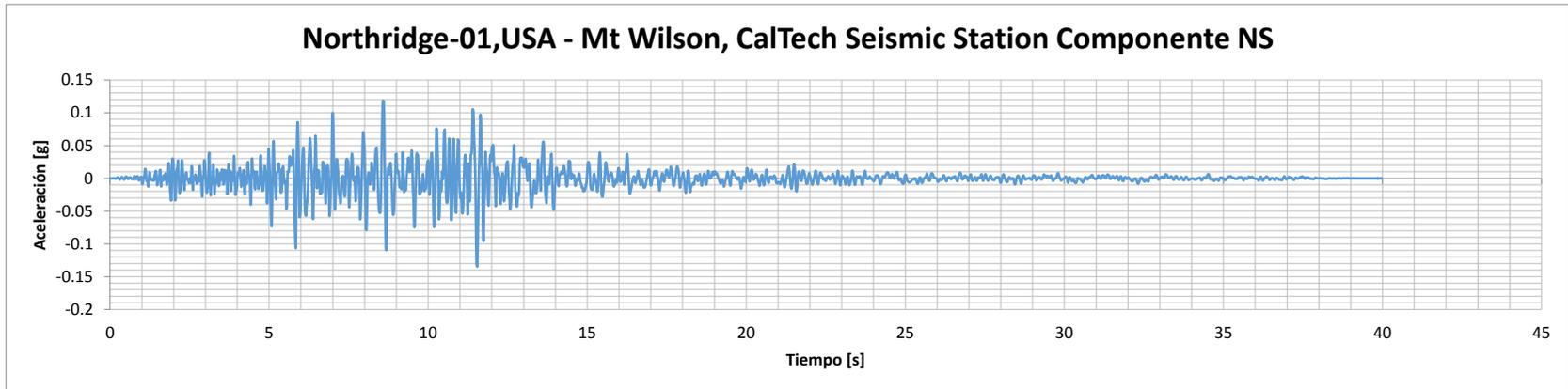


Figura 73. Acelerograma 15 del primer rango de magnitud-distancia.

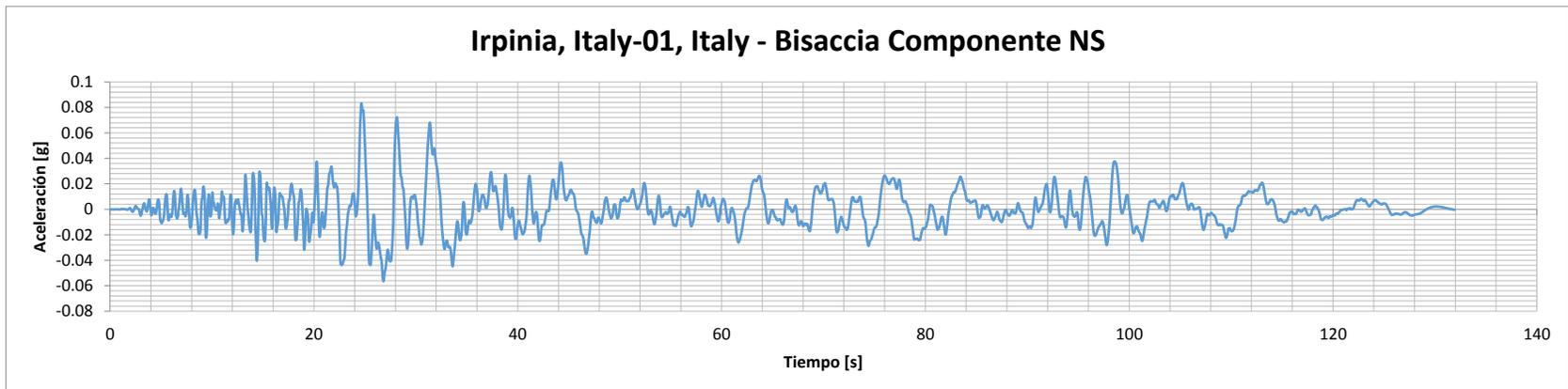


Figura 74. Acelerograma 16 del primer rango de magnitud-distancia.

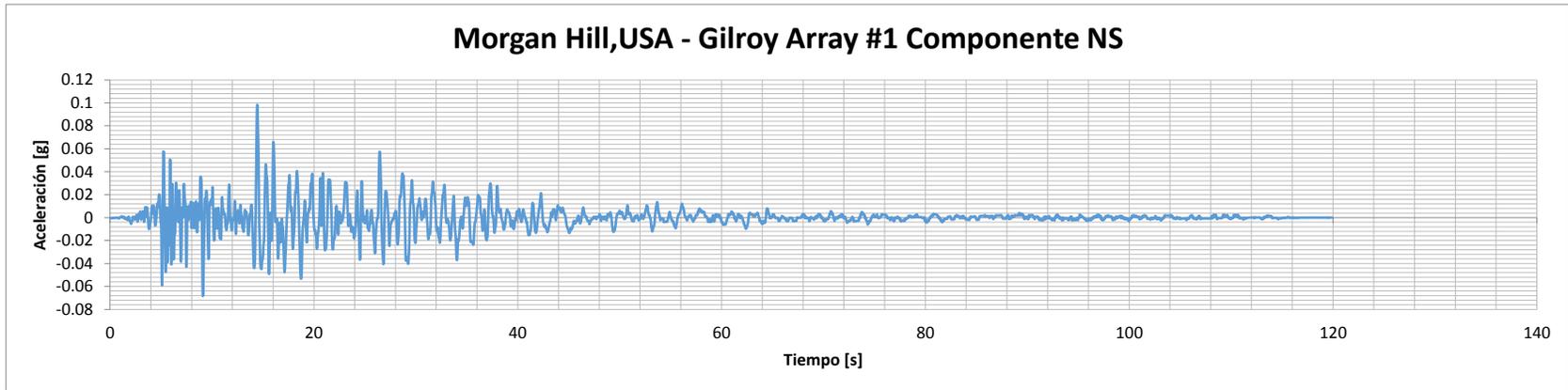


Figura 75. Acelerograma 17 del primer rango de magnitud-distancia.

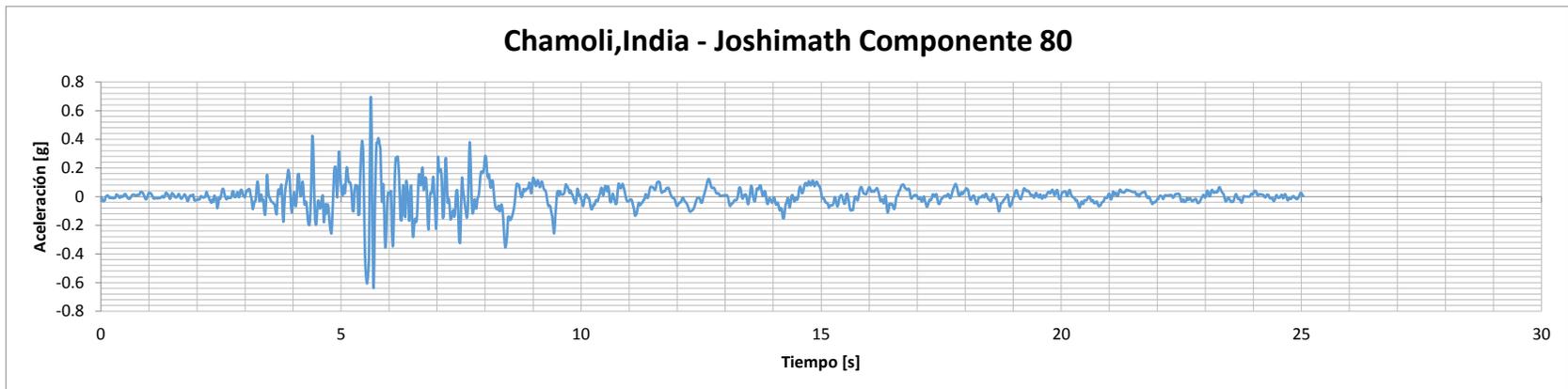


Figura 76. Acelerograma 18 del primer rango de magnitud-distancia.

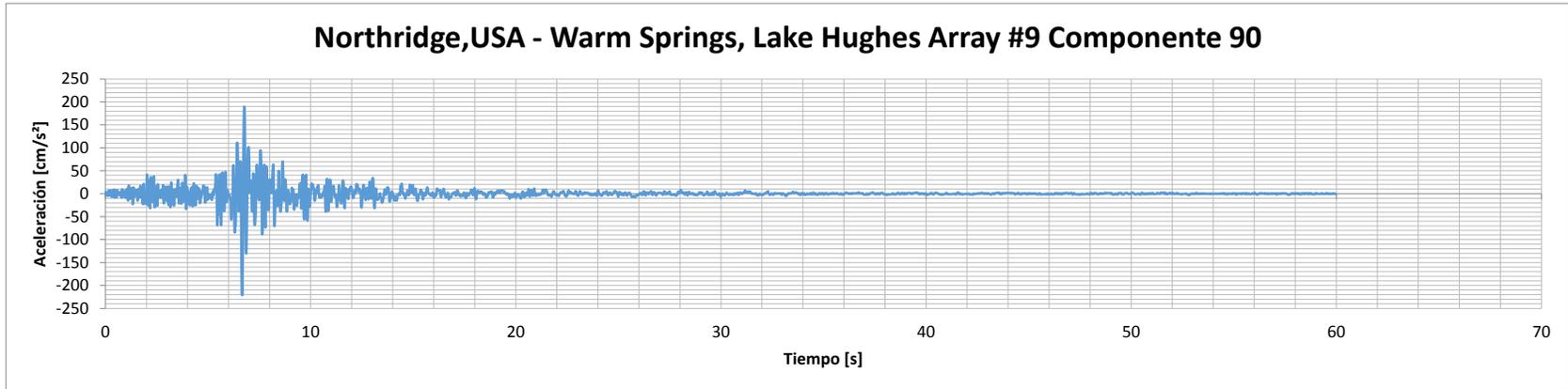


Figura 77. Acelerograma 19 del primer rango de magnitud-distancia.

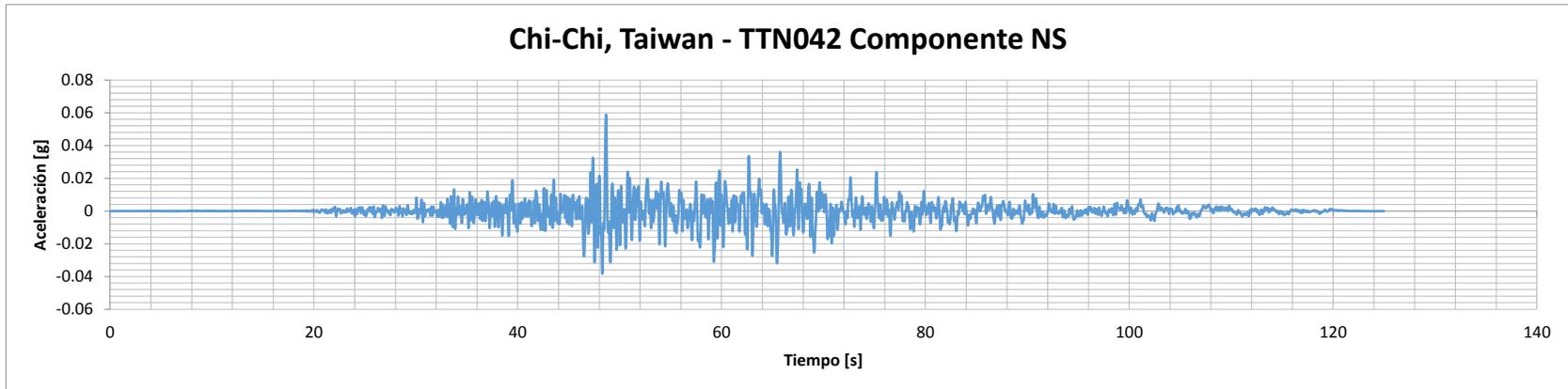


Figura 78. Acelerograma 1 del segundo rango de magnitud-distancia.

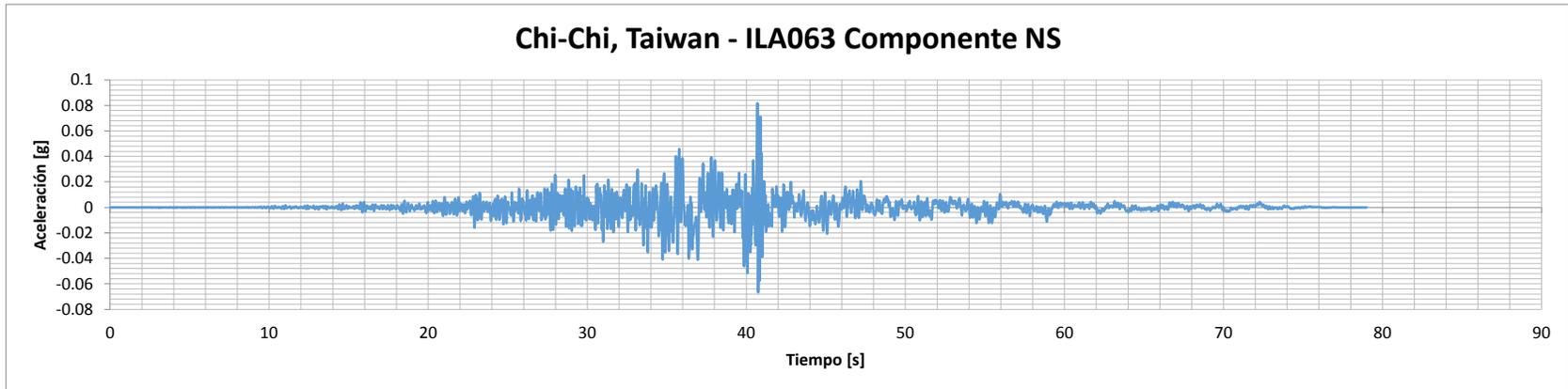


Figura 79. Acelerograma 2 del segundo rango de magnitud-distancia.

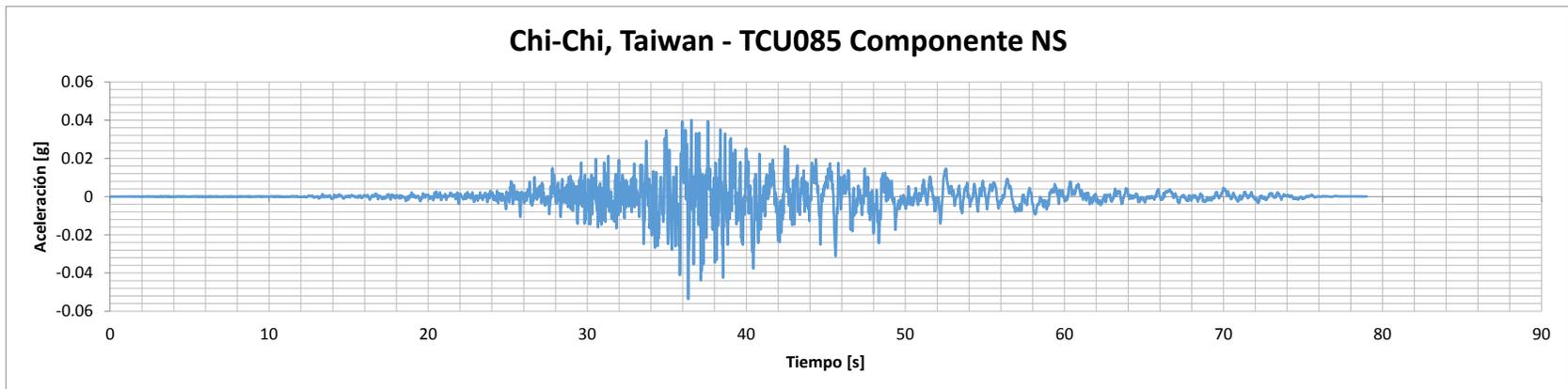


Figura 80. Acelerograma 3 del segundo rango de magnitud-distancia.

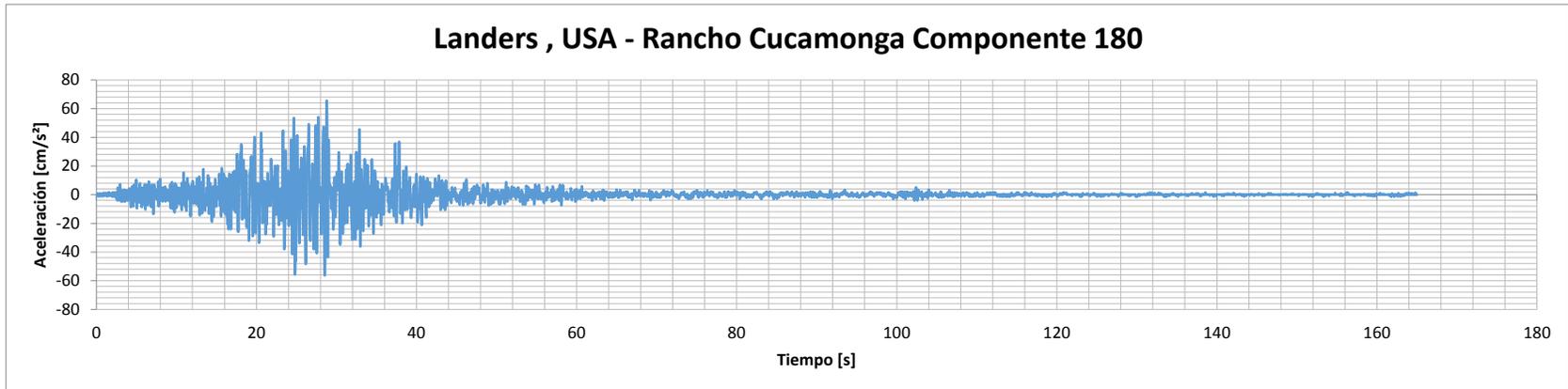


Figura 81. Acelerograma 4 del segundo rango de magnitud-distancia.

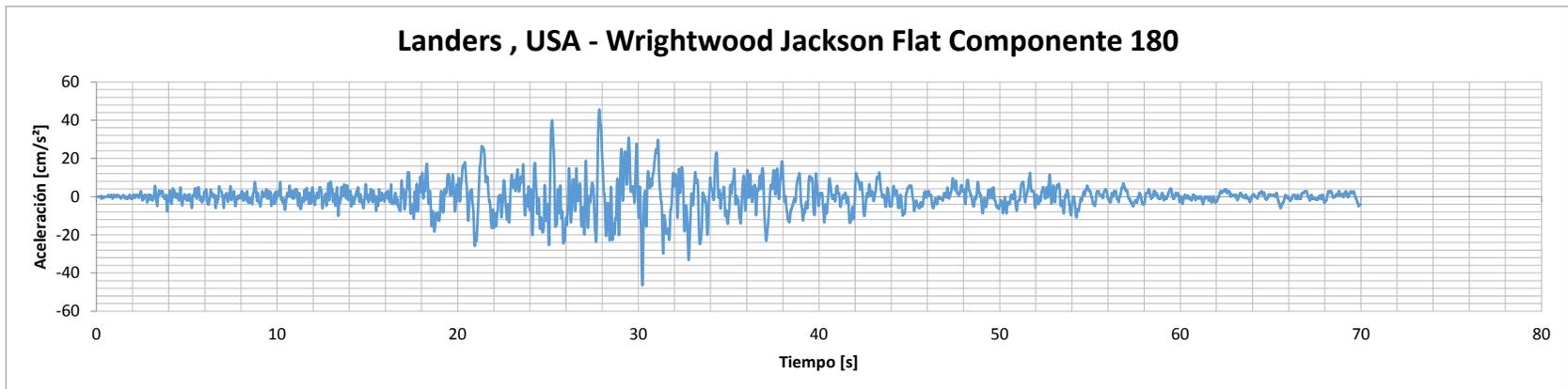


Figura 82. Acelerograma 5 del segundo rango de magnitud-distancia.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo constituye un primer paso en la definición de una microzonificación sísmica detallada para la ciudad de Manizales, siguiendo una metodología novedosa nunca antes aplicada para el análisis de la respuesta sísmica de depósitos de suelo blando.

Los resultados muestran un salto cualitativo en la definición de los movimientos sísmicos en superficie del terreno, con relación a las metodologías tradicionales para la microzonificación sísmica de ciudades. Las principales ventajas de la metodología aplicada son:

1. Está basada en la construcción de un modelo geotécnico tridimensional, el cual puede ser fácilmente mejorado y ajustado en la medida que se recopile más y mejor información geotécnica. Este modelo provee toda la información necesaria para el cálculo de la respuesta dinámica del suelo en cualquier ubicación dentro de la ciudad.
2. El desarrollo del modelo geotécnico involucra el conocimiento de la geología superficial de la ciudad, y en particular de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos. Adicionalmente permite establecer una relación directa entre dicha geología y las propiedades de los suelos blandos de la ciudad. Este modelo geotécnico es por lo tanto, un insumo importante para futuros trabajos de investigación en la ciudad.
3. Los resultados no se presentan por zonas sino de manera rasterizada, lo cual implica el cálculo de la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en un gran número de ubicaciones, de las cuales la gran mayoría no han sido exploradas aún. En particular, en este estudio se calcularon 1275 sitios dentro de Manizales y en sus alrededores. Esto implica un salto cualitativo desde la concepción tradicional de la microzonificación sísmica por zonas, a una concepción por puntos dentro de una malla de cálculo, y en general en cualquier ubicación seleccionada haciendo uso del modelo geotécnico desarrollado.
4. La incertidumbre asociada al desconocimiento de las características geotécnicas de los suelos está debidamente calculada en el análisis, de manera que puede ser incorporada en posteriores evaluaciones de la amenaza sísmica siguiendo la metodología probabilista. Esto implica un salto cualitativo en lo que se refiere a considerar, en la evaluación de los movimientos sísmicos de diseño, todas las fuentes de incertidumbre de manera integral. En enfoques anteriores al acá propuesto, la respuesta dinámica de los suelos era considerada como determinista y no aportaba ningún nivel de incertidumbre al resultado final de amenaza.

Dentro del marco de aplicación de la metodología presentada, se derivan las siguientes actividades a desarrollar:

1. *Cálculo de funciones de atenuación.* Para cada sitio en la malla de cálculo se calcula una función de atenuación que involucra las características de respuesta del sitio, mediante una metodología basada en la formulación teórica del el espectro de amplitudes de Fourier radiado por una fuente sísmica. Este espectro de Fourier es alterado por las funciones de transferencia de los suelos (presentadas en este informe), para obtener movimiento fuerte en superficie del terreno. Este último espectro es modificado por las funciones de transferencia de osciladores de un grado de libertad, de manera que, empleando teoría de vibraciones aleatorias, es posible obtener los momentos de probabilidad del movimiento fuerte en superficie del terreno, para varios periodos fundamentales de vibración, en cada nodo de la malla.
2. *Cálculo de la amenaza sísmica en cada sitio.* Se calcula un espectro de amenaza uniforme en cada nodo de la malla, haciendo uso de las funciones de atenuación particulares, de manera que se obtiene la intensidad de movimiento fuerte asociada a 475 años de periodo de retorno (o para cualquier otro periodo de retorno), para cada uno de los periodos fundamentales de vibración de las estructuras.
3. *Armonización de los espectros.* A partir de los espectros de amenaza uniforme, se definen espectros de diseño compatibles con la NSR-10, y se obtienen los valores de los parámetros asociados al suelo, F_a y F_v , para cada nodo de la malla de cálculo. Esto deriva en una representación espacial de los parámetros que controlan la forma final de los espectros de diseño de edificaciones nuevas.

De esta manera se obtienen los movimientos sísmicos de diseño de edificaciones nuevas en toda la extensión de la ciudad, lo cual es el objetivo último de la microzonificación sísmica. El trabajo presentado, junto con los trabajos futuros constituyen un punto de partida en la investigación de nuevas maneras de abordar el problema de los efectos de sitio en Manizales, al abarcar todas las características relevantes en la problemática, desde la evaluación de la amenaza sísmica en roca, pasando por la geometría de las formaciones geológicas, las características de los suelos, las señales sísmicas y la respuesta de los depósitos blandos, hasta la evaluación de la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno y su armonización con la normativa aplicable.

6. REFERENCIAS

Aki, K., Richards, P.G. (2002). Quantitative Seismology, Second Ed. University Science Books, Sausalito, CA.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). 2010. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Comité AIS-300

Bazzurro, P. y Cornell, A. (2004). Ground-Motion Amplification in Nonlinear Soil Sites with Uncertain Properties. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 6, pp. 2090–2109, Diciembre de 2004.

Bernal G., Cardona O.D., Barbat A.H., Salgado M. (2013). Enfoque integral para la evaluación de efectos de sitio en ciudades y su aplicación en Bogotá. Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Bucaramanga, 2013.

Bernal G., Ordaz M.G., Salgado M.A., Yamín L.E., Cardona O.D.(2012) “Calibration of a source spectrum model and construction of spectral strong motion attenuation relationships from accelerogram records”, Proceedings of the 15 WCEE. Lisbon, 2012.

Bernal, G. (2012). “Strong Motion Analyst”. Programa para el procesamiento de información sísmológica.

Bernal, G. (2013). “Seismic Microzonation Studio”. Programa para la modelación tridimensional de entornos geológicos con fines de evaluación de respuesta sísmica de suelos.

Campbell K (1997). Empirical Near - Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Pseudo - Absolute Acceleration Response Spectra, Seismological Research Letters, Vol 68, No.1 pp. 154 - 179.

Duque, G. (2006). Estudio de cinco conducciones subterráneas para el trasvase de aguas residuales, entre varias subcuencas del Olivares y el Río Chinchiná, en el sector urbano de Manizales-Villamaría y otras microcuencas vecinas. INGENIERÍA DE SANEAMIENTO AMBIENTAL – INGESAM, 2006.

Gallego, M., y Ordaz, M. (1999) Construcción de leyes de atenuación para Colombia a partir de espectros fuente y teoría de vibraciones aleatorias. Revista internacional de ingeniería de estructuras. Vol. 4, 1, pp 45-60.

Gilbert, F. y Backus, G. (1966). Propagator Matrices in Elastic Wave and Vibration Problems. *Geophysics*, 31, pp. 326-332

Haskell, N. A. (1953). The Dispersion of Surface Waves in Multilayered Media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, pp. 17-34

Idriss, M. I. y Seed, H. B. (1968). Seismic Response of Horizontal Soil Layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol 94, N° SM4, Julio 1968.

Naranjo, J. L., y Ríos, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. Universidad de Caldas, Manizales, 1989.

NSR-10. Normas Colombianas de diseño y Construcción Sismo-resistente. Ministerio de Vivienda. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010.

Ordaz, M., Martinelli, F., Agular, A., Arboleda, J., Meletti, C., D'Amico, V. 2014. "CRISIS 2014". Program for computing seismic hazard. UNAM, 2014.

Ramberg, W. y Osgood, W. T. (1943). Description of stress-strain curves by three parameters, Technical Note 902, NACA, 1943

Salgado M., Bernal G., Yamín L., Cardona O. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Rev. de Ing.* 32: 28-37. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

Seed, H. B. e Idriss, M. I. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report N° UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Diciembre de 1970.

Stewart, J. P., y Goulet, C. A. (2006). Comment on "Nonlinear Soil-Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis" by Paolo Bazzurro and C. Allin Cornell. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 2, pp. 745-747, Abril de 2006.

Thompson, W. T. (1950). Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid. *Journal of Applied Physics*, 21, pp. 89-93

Universidad de los Andes. (2002). "Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales". Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles – CIMOC. Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos – CEDERI. 2002.