

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
UNAN-MANAGUA

Facultad de Ciencias e Ingenierías

Departamento de Construcción

Ingeniería Civil



---

Análisis lineal equivalente de la respuesta sísmica de sitio en los recintos:  
Rubén Darío-Managua, FAREM-Chontales y FAREM-Carazo, de la UNAN-  
Managua.

---

Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniero Civil.

Autores:

Br. Olivares Hernández Luis Alberto.  
Br. Quintana Mendoza Osman Vladimir.

Tutor:

Dr. Edwin Antonio Obando.

Managua, Mayo 2014.

## **DEDICATORIA.**

### **Luis Olivares:**

Dedico este trabajo, primeramente, a mi padre celestial, que me ha dado la sabiduría, inteligencia y discernimiento para no perder de vista el brillo de la luz de su camino; y me ha dado la fuerza, fortaleza y paciencia para cumplir mis metas y objetivos, librándome de todo mal y de todo peligro.

A mi Madre, Cruz María Hernández Madriz, quién me ha dado todo su amor, cariño, comprensión y confianza; me ha motivado y aconsejado con palabras llenas de buenos deseos; y es un verdadero ejemplo de paciencia, tolerancia y respeto.

A mi Padre, Luis Alberto Olivares Téllez, quién me ha motivado siempre a tener confianza en mí, y luchar por lo que quiero; y es Él, mi ejemplo a seguir en todos los ámbitos de la vida.

A mis hermanos, Luis Miguel, Franco Bernardo y Jonathan David, por estar siempre conmigo, por motivarme, por querer lo mejor para mí, por disfrutar conmigo mis éxitos y apoyarme en mis fracasos; y quiero que este trabajo sirva de ejemplo para demostrarles que ellos son capaces de lograr cosas aún más grandes.

A mi abuela, Bernarda Francisca Madriz Cervantes y mi tía María Auxiliadora Hernández Madriz, quienes me brindaron todo su apoyo y cariño a lo largo de mis estudios y para con la realización de este trabajo monográfico.

A mi novia, María Dolores Chávez Guevara, quien me ha brindado su apoyo y confianza desde que iniciamos nuestras carreras. Su dedicación y anhelos han sido factores de motivación para mí. Y le agradezco por demostrarme su amor a cada instante y compartir muchos momentos de felicidad.

## **DEDICATORIA.**

### **Osman Quintana:**

A Dios, por estar siempre conmigo, por darme tantas cosas buenas, por ayudarme y guiarme siempre en este proyecto y, más aun, en mi vida entera.

A mis Padres, especialmente a mi madre, Karla, por su amor ilimitado, por su apoyo incondicional en todo momento, por impulsarme siempre a lograr mis metas y acompañarme en el camino hacia ellas, en fin, por ser quien soy y por darme lo que tengo.

A mis tías, Heyling, Noelia, Elieth, por su gran cariño hacia mí, por estar siempre pendientes, por apoyarme.

A la familia, a mi abuela Elvira y mi abuelo Noel, por preocuparse siempre por mí, por sus consejos y por todo su cariño.

A mis hermanos, por ayudarme en todo lo posible y brindarme su amistad sincera.

## **AGRADECIMIENTO.**

### **Luis y Osman.**

Agradecemos primeramente a Dios, por habernos permitido concluir nuestra carrera, acompañarnos siempre y por iluminarnos y guiarnos en la realización de este trabajo.

A nuestro tutor, Dr. Edwin Obando, quien nos instó a trabajar en esta rama científica tan rica e interesante, y de gran relevancia en la ingeniería civil; por habernos guiado en cada paso que dimos, compartiéndonos sus conocimientos.

Al Msc. Horacio Alejandro Ulloa, por habernos apoyado con la recopilación de información de campo, por atendernos en todo momento en que lo necesitamos, por la confianza y amistad que nos brindó.

Al Msc. Gerardo Mendoza, responsable educativo de becados internos de la facultad de ciencias e ingenierías, por habernos apoyado con todo lo que estuvo a su alcance durante nuestros cinco años de carrera y el tiempo que nos tomó realizar este trabajo monográfico.

A nuestros compañeros y amigos: Orlando Guido, Max Fariñas, Pedro Manzanares y Johnson Bravo, con quienes compartimos grandes experiencias, y nos brindaron su apoyo y amistad.

## **RESUMEN**

En la presente investigación se realizó la evaluación de la respuesta sísmica de sitio, a partir del procesamiento de registros SPT obtenidos por medio de la prueba de penetración estándar y la estimación de modelos Vs, en los diferentes sitios de estudio como son: los recintos de la UNAN-Managua: RURD, FAREM-Carazo y FAREM-Chontales. Se evaluó la similitud entre el modelo Vs del CIGEO obtenido a partir de correlaciones empíricas respecto a modelo existente obtenido con métodos geofísicos usado en estudio de respuesta sísmica de sitio.

Cabe mencionar que se Clasificaron los sitios de estudio según el RNC-07, FEMA 450 y USGS, en función del parámetro Vs 30, propiedad dinámica de suma importancia para la clasificación de suelos debido a que estos códigos internacionales lo exigen Con el fin de ampliar la profundidad de exploración, y en este caso conocer el tipo de suelo existente a una profundidad viable para la cimentación de las estructuras.

En este trabajo la respuesta sísmica de sitio, se llevó a cabo por medio del análisis lineal equivalente, desarrollado en el Software DEEPSOIL V5.0; De esta manera se obtuvieron los espectros elásticos de respuesta en los sitios de estudio. También, se generaron espectros de respuesta suavizados, para conocer las características de los sitio y se compararon con el espectro de diseño del Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07).

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| I. INTRODUCCION.....  | 1  |
| 1.1. Planteamiento del problema.....  | 2  |
| 1.2. Justificación.....   | 3  |
| 1.3. Limitaciones.....  | 3  |
| 1.4. Objetivos.....   | 5  |
| 1.4.1. Objetivo general.....  | 5  |
| 1.4.2. Objetivos específicos.....   | 5  |
| II. AREA DE ESTUDIO.....  | 6  |
| 2.1. Recinto Universitario Rubén Darío, UNAN-Managua (RURD).....              | 8  |
| 2.1.1. Descripción del sitio.....   | 8  |
| 2.1.2. Ubicación del Recinto Universitario Rubén Darío.....                   | 8  |
| 2.2. Facultad Regional Multidisciplinaria, Carazo (FAREM-Carazo).....         | 10 |
| 2.2.1. Descripción del sitio.....   | 10 |
| 2.2.2. Ubicación del FAREM-Carazo.....  | 10 |
| 2.3. Facultad Regional Multidisciplinaria, Chontales (FAREM-Chontales).....   | 11 |
| 2.3.1. Descripción del sitio.....   | 11 |
| 2.3.2. Ubicación del FAREM-Chontales.....                                     | 11 |
| III. CARACTERISTICAS DE LA REGION.....  | 12 |
| 3.1. Características geológicas.....  | 12 |
| 3.2. Características sismo-tectónicas.....                                    | 13 |
| 3.2.1. Zona Wadatti-Benioff.....  | 14 |
| 3.2.2. Sismicidad de focos someros continentales.....                         | 15 |
| 3.3. Características de los sitios de estudios.....                           | 15 |
| 3.3.1. Recinto Universitario Rubén Darío, Managua.....                        | 15 |
| 3.3.2. Facultad Regional Multidisciplinaria, Carazo (FAREM-Carazo).....       | 18 |
| 3.3.3. Facultad Regional Multidisciplinaria, Chontales (FAREM-Chontales)..... | 20 |
| IV. REVISION DE LITERATURA.....   | 22 |
| 4.1. Aspectos generales.....  | 22 |
| 4.1.2. Ondas sísmicas.....  | 23 |
| 4.1.3. Magnitud e intensidad.....   | 26 |
| 4.1.4. Amplificación de ondas sísmicas.....                                   | 28 |
| 4.1.5. Período y frecuencia natural del suelo.....                            | 30 |
| 4.2. Métodos geotécnicos para la caracterización de sitio.....                | 31 |
| 4.2.1. Prueba de penetración estándar.....                                    | 31 |
| 4.3. Criterios para la caracterización de sitio.....                          | 34 |
| 4.3.1. Velocidad de onda de corte.....  | 34 |
| 4.3.2. Clasificación de sitio.....  | 37 |
| 4.4. Evaluación de la respuesta sísmica de sitio.....                         | 42 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4.1. Efecto de sitio.....  | 42 |
| 4.4.2. Métodos para la evaluación de la respuesta sísmica de sitio.....                                  | 43 |
| 4.5. Espectros de respuesta.....   | 48 |
| 4.5.1. Tipos de espectros de respuesta.....  | 59 |
| 4.5.2. Métodos para estimar espectros de respuestas.....   | 50 |
| V. METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....   | 52 |
| 5.1. Descripción de datos utilizados.....  | 52 |
| 5.2. Estimación de modelos de velocidad de onda de corte.....  | 53 |
| 5.2.1. Estimación de velocidades de onda de corte.....   | 54 |
| 5.2.2. Modelos de velocidad de onda de corte.....  | 54 |
| 5.3. Evaluación de la respuesta sísmica de sitio.....  | 56 |
| 5.3.1. Análisis lineal equivalente.....  | 57 |
| 5.3.2. Espectros elásticos de respuesta.....   | 61 |
| VI. RESULTADOS.....  | 62 |
| 6.1. Modelos de velocidad de onda de corte.....  | 62 |
| 6.1.1. Recinto Universitario Rubén Darío, UNAN-Managua (RURD).....                                       | 62 |
| 6.1.2. Facultad Regional Multidisciplinaria, Carazo (FAREM-Carazo).....                                  | 70 |
| 6.1.3. Facultad Regional Multidisciplinaria, Chontales (FAREM-Chontales).....                            | 72 |
| 6.2. Clasificación de sitio.....   | 75 |
| 6.2.1. Recinto Universitario Rubén Darío, UNAN-Managua (RURD).....                                       | 75 |
| 6.2.2. Facultad Regional Multidisciplinaria, Carazo (FAREM-Carazo).....                                  | 75 |
| 6.2.3. Facultad Regional Multidisciplinaria, Chontales (FAREM-Chontales).....                            | 76 |
| 6.3. Respuesta sísmica de sitio.....   | 76 |
| 6.3.1. Espectros elásticos de respuestas.....  | 76 |
| 6.3.2. Espectros suavizados y comparación con el Reglamento Nacional de la<br>Construcción (RNC-07)..... | 79 |
| VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 81 |
| 7.1. Recomendaciones.....  | 82 |
| BIBLIOGRAFIA.....  | 84 |
| ANEXOS.....  | 88 |

## LISTA DE FIGURAS.

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.1.</b> Mapa de macro-localización de los sitios de estudio.....  | 7  |
| <b>Figura 2.2.</b> Mapa de micro-localización del área de estudio, RURD.....   | 9  |
| <b>Figura 2.3.</b> Mapa de micro-localización del área de estudio, FAREM-Carazo.....   | 10 |
| <b>Figura 2.4.</b> Mapa de micro-localización del área de estudio, FAREM-Chontales.....  | 11 |
| <b>Figura 3.1.</b> Provincias geológicas de Nicaragua (Moore, 2001).....   | 12 |
| <b>Figura 3.2.</b> Emplazamiento tectónico de Nicaragua (Strauch, 2000).....   | 14 |
| <b>Figura 3.3.</b> Situación tectónica del área de Managua, y grupos de volcanes que determinan la secuencia estratigráfica del grupo Managua (CIGEO, 2005)..... | 16 |
| <b>Figura 3.4.</b> Zonas del RURD en donde se han realizado estudios geotécnicos, utilizando el método de SPT.....   | 18 |
| <b>Figura 3.5.</b> Perforaciones realizadas para estudio geotécnico utilizando el método de SPT, en FAREM-CARAZO.....  | 19 |
| <b>Figura 3.6.</b> Perforaciones realizadas para estudio geotécnico, utilizando el método de SPT, en FAREM-CHONTALES.....  | 21 |
| <b>Figura 4.1.</b> Movimientos de placas y generación de sismos. Mecanismo de subducción (Bazán & Meli, 1985).....   | 22 |
| <b>Figura 4.2.</b> Modelo de propagación de ondas P ( <a href="http://www.funvisis.gob.ve">www.funvisis.gob.ve</a> ).....  | 24 |
| <b>Figura 4.3.</b> Modelo de propagación de ondas S ( <a href="http://www.funvisis.gob.ve">www.funvisis.gob.ve</a> ).....  | 24 |
| <b>Figura 4.4.</b> Modelo de propagación de ondas Rayleigh ( <a href="http://www.funvisis.gob.ve">www.funvisis.gob.ve</a> ).....                                 | 25 |
| <b>Figura 4.5.</b> Modelo de propagación de ondas Love (L) ( <a href="http://www.funvisis.gob.ve">www.funvisis.gob.ve</a> ).....                                 | 25 |
| <b>Figura 4.6.</b> Propagación de la onda sísmica en diferentes tipos de estratos de suelo. A) Suelos blandos, B) Roca. (Strauch, 2000).....                     | 30 |
| <b>Figura 4.7.</b> Ejecución del ensayo de penetración estándar (Decourt et al, 1988).....   | 32 |
| <b>Figura 4.8.</b> Caracterización de irregularidades topográficas simples a) Caso de cuña triangular, b) Cresta y valle (Rodríguez, 2009).....                  | 43 |
| <b>Figura 4.9</b> Métodos aplicados al estudio de efecto de sitio (Hernández, 2009).....   | 44 |
| <b>Figura 4.10.</b> Nomenclatura para un depósito de suelo en roca elástica (Kramer, 1996).....  | 44 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 4.11.</b> Iteración de aproximación a las curvas de módulo de corte y amortiguamiento en el análisis lineal equivalente (Kramer, 1996).....   | 48 |
| <b>Figura 4.12.</b> Espectro de Respuesta. Aceleraciones espectrales son las máximas amplitudes de aceleración del sistema de un grado de libertad en la respuesta al sismo de entrada. La respuesta del sistema es obtenida graficando la aceleración espectral en el eje de las ordenadas y los períodos de vibración en el eje de las abscisas (Kramer, 1996)..... | 49 |
| <b>Figura 5.1.</b> Perforación de SPT realizada en FAREM-Chontales (CIGEO, 2012).....   | 53 |
| <b>Figura 5.2.</b> Hoja de cálculo de velocidades de onda de corte en Microsoft Excel 2010.....   | 54 |
| <b>Figura 5.3.</b> Hoja de cálculo de Microsoft Excel 2010 y Modelos Vs encontrados.....  | 56 |
| <b>Figura 5.4.</b> Interface gráfico del software DEEPSOIL. Se introducen los parámetros del análisis.....  | 58 |
| <b>Figura 5.5.</b> Interface gráfica de DEEPSOIL. Se introducen las características de la estratigrafía del sitio.....  | 59 |
| <b>Figura 5.6.</b> Características y propiedades del basamento.....   | 59 |
| <b>Figura 5.7.</b> Selección de registro sísmico.....   | 60 |
| <b>Figura 5.8.</b> Determinación de curvas dinámicas de los suelos.....   | 61 |
| <b>Figura 6.1.</b> Modelo Vs de N campo y corregido, calculado hasta 10.35m, para RURD-CIGEO.....   | 63 |
| <b>Figura 6.2.</b> Proyección de Vs hasta estimar 750 m/s según cada una de las tres hipótesis planteadas en RURD-CIGEO.....  | 63 |
| <b>Figura 6.3.</b> Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el RURD-CIGEO.....   | 64 |
| <b>Figura 6.4.</b> Modelos de Vs superpuestos con el modelo de referencia de (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011), en RURD-CIGEO.....  | 65 |
| <b>Figura 6.5.</b> Espectros de respuesta del CIGEO para el registro sísmico del Terremoto de Managua de 1972, calculados con: <b>a)</b> modelos de velocidad estimados con las hipótesis planteadas y el modelo de referencia; <b>b)</b> Promedios de los espectros calculados con las hipótesis y el modelo de referencia.....                                      | 66 |
| <b>Figura 6.6.</b> Función de transferencia obtenida en el CIGEO, para el registro sísmico del Terremoto de Managua de 1972, utilizando los modelos de velocidad estimados con las hipótesis planteadas y el modelo de referencia de (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011).....   | 67 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 6.7.</b> Modelo Vs de N corregido, calculado hasta 4.95m, para RURD-Arlen Siu.....  | 68 |
| <b>Figura 6.8.</b> Proyección de Vs hasta 30m según cada una de las tres hipótesis planteadas en RURD-Arlen Siu.....  | 68 |
| <b>Figura 6.9.</b> Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el RURD-Arlen Siu.....   | 69 |
| <b>Figura 6.10.</b> Modelos de Vs superpuestos con el modelo de referencia de (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011), en RURD-Arlen Siu.....   | 70 |
| <b>Figura 6.11.</b> Modelo Vs de N campo y corregido, calculado hasta 9.0m, para FAREM-Carazo.....  | 70 |
| <b>Figura 6.12.</b> Proyección de Vs hasta 30m según cada una de las tres hipótesis planteadas en FAREM-Carazo.....   | 71 |
| <b>Figura 6.13.</b> Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el FAREM-Carazo.....  | 72 |
| <b>Figura 6.14.</b> Modelo Vs de N campo y corregido, calculado hasta 4.95m, para FAREM-Chontales.....  | 72 |
| <b>Figura 6.15.</b> Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el FAREM-Chontales.....   | 73 |
| <b>Figura 6.16.</b> Proyección de Vs hasta 30m según cada una de las tres hipótesis planteadas en FAREM-Chontales.....  | 74 |
| <b>Figura 6.17.</b> Espectros de respuesta en función de la aceleración espectral; (A) CIGEO, (B) Arlen Siu. ....   | 77 |
| <b>Figura 6.18.</b> Espectros de respuesta en función de la aceleración espectral, en FAREM-Carazo.....   | 78 |
| <b>Figura 6.19.</b> Espectros de respuesta en función de la aceleración espectral, en FAREM-Chontales.....  | 78 |
| <b>Figura 6.20.</b> Comparación de espectros suavizados de la respuesta de sitio con el Espectro de diseño del RNC-07; (A) RURD-CIGEO, (B) RURD-Arlen Siu, (C) FAREM-Carazo, (D) FAREM-Chontales..... | 79 |

## LISTA DE TABLAS.

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 3.1.</b> Identificación, profundidad y localización de cada sondeo tomadas con GPS manual (UTM, WGS 84) con aproximación +/- 20 m, en FAREM-Carazo (CIGEO, 2012)....               | 19 |
| <b>Tabla 3.2.</b> Identificación, profundidad y localización de cada sondeo tomadas con GPS manual (UTM, WGS 84) con aproximación +/- 20 m, en FAREM-Chontales (CIGEO, 2012).....           | 21 |
| <b>Tabla 4.1.</b> Corrección de $N_{campo}$ por confinamiento (VII Jornada geotécnica de la ingeniería colombiana) en: (Castrillo & Ulloa, 2005).....                                       | 33 |
| <b>Tabla 4.2.</b> Valores de $\eta_1$ según el tipo de martillo y procedimiento utilizado en la prueba (López, 2003), (Gallardo, 2005).....   | 34 |
| <b>Tabla 4.3.</b> Correlaciones empíricas N-Vs para distintos tipos de suelos (Stharam & Anbazhagan, 2013) y (Parrales & Picado, 2001).....   | 36 |
| <b>Tabla 4.4.</b> Clasificación de sitio según FEMA 450 (NEHRP, 2003).....  | 37 |
| <b>Tabla 4.5.</b> Clasificación del Terreno (EUROCODE 8).....   | 39 |
| <b>Tabla 4.6.</b> Clasificación del terreno (Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, 2002).....  | 40 |
| <b>Tabla 4.7.</b> Clasificación de sitio (NCh433) En: (Escorcía & Ochoa, 2013).....   | 40 |
| <b>Tabla 4.8.</b> Clasificación de sitio según USGS (Peer Berkeley Database).....   | 41 |
| <b>Tabla 4.9.</b> Clasificación de suelos (MTI, 2007).....  | 41 |
| <b>Tabla 5.1.</b> Correlaciones empíricas utilizadas en este estudio para el cálculo de Vs en función de $N_{golpe}$ del SPT. (Stharam & Anbazhagan, 2013) y (Parrales & Picado, 2001)..... | 53 |
| <b>Tabla 5.2.</b> Descripción de sismos utilizados en la evaluación de la respuesta sísmica de sitio (Hashash, 2011).....   | 57 |
| <b>Tabla 6.1.</b> Clasificación de sitio RURD-CIGEO, según el RNC-07, NEHRP y USGS.....   | 75 |
| <b>Tabla 6.2.</b> Clasificación del sitio RURD-Arlen Siu, según el RNC-07, NEHRP y USGS.....  | 76 |
| <b>Tabla 6.3</b> Clasificación de sitio FAREM-Carazo, según el RNC-07, NEHRP y USGS.....  | 76 |
| <b>Tabla 6.4.</b> Clasificación de sitio FAREM-Chontales, según el RNC-07, NEHRP y USGS.....  | 76 |

**Tabla 6.5.** Plateau y parámetros para los espectros suavizados del RNC-07 y los espectros suavizados de los sitios.....80

## **TABLA DE ANEXOS.**

|   |     |
|---|-----|
| <b>ANEXO A.</b> Sondeos de SPT realizados en los sitios de estudio.....   | 89  |
| <b>ANEXO B.</b> Corrección de número de golpes obtenidos en campo.....  | 124 |
| <b>ANEXO C.</b> Modelos de vs para cada sitio de estudio con cada SPT.....  | 128 |
| <b>ANEXO D.</b> Modelo velocidad de onda de corte estimado por (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011) en el sitio donde se construyó el edificio del CIGEO/UNAN-Managua..... | 134 |
| <b>ANEXO E.</b> Curvas de módulo de cortante y amortiguamiento.....   | 135 |
| <b>ANEXO F.</b> Perfil general obtenido de la caracterización de suelo realizada por (Sevilla, 2008).....   | 136 |
| <b>ANEXOS G.</b> Mapas de isoaceleraciones y coeficiente sísmico en las diferentes regiones de Nicaragua.....   | 138 |
| <b>ANEXO H.</b> Factor de amplificación para los diferentes tipos de suelo establecidos en el Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07).....                      | 139 |

## I. INTRODUCCION.

El estudio y entendimiento de la respuesta sísmica de sitio es un tema muy importante para la ingeniería civil, principalmente para el diseño sísmico estructural de edificios; ya que los fenómenos sísmicos pueden causar muchas pérdidas (humanas y económicas). Aquellos países que se encuentran expuestos a frecuente actividad sísmica se han visto obligados a reglamentar el diseño estructural de los edificios considerando los factores sísmicos de los sitios, en función de la respuesta del suelo.

Nicaragua es un país de constante actividad sísmica, que se ve afectado por dos fuentes generadoras de sismos, como lo es la zona de subducción y los sismos que se generan por fallas geológicas superficiales o someras. Prueba de esto es el terremoto de 1972, ocurrido en la ciudad de Managua, el cual produjo consecuencias desastrosas; el enjambre sísmico que azotó al país el mes de abril de este año 2014, en el cual se produjeron dos terremotos los días 10 y 11 de ese mes; estos dos fenómenos se generaron por fallas superficiales; el sismo ocurrido el 2 de marzo de este año 2014, en la zona del golfo de Fonseca, cuya intensidad afectó a todo el territorio nacional, siendo generado por el proceso de subducción. Por tal razón, es de suma importancia conocer las características propias del suelo y su comportamiento, tanto dinámico como estático, desde el punto de vista geotécnico y geológico, a través de parámetros tales como: velocidad de onda de corte, factor de amplificación de suelo, periodo natural de vibración, y todos aquellos factores que puedan condicionar la respuesta sísmica de sitio.

En Nicaragua, la caracterización de sitio se aborda en el Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07), el cual establece como parámetro de clasificación de suelos el  $V_s$  promedio hasta 10 m de profundidad, cuando en los reglamentos internacionales se establecen 30 m de profundidad, como mínimo. El parámetro  $V_s 30$  es muy confiable, de los más utilizados, y necesario. Determinar la velocidad de ondas de corte promedio hasta 30 m de profundidad permite conocer de manera confiable las características del suelo en determinado lugar para clasificarlos de una manera más precisa.

Con el fin de entender mejor el ambiente sísmico que afecta el país, se han realizado diversos estudios para conocer las características sísmicas, pero la gran mayoría se han realizado en Managua. (Parrales & Picado, 2001) Desarrollaron un estudio en la ciudad de Managua, en el cual calcularon espectros de respuesta en diferentes zonas de la ciudad; utilizando registros de SPT para caracterizar los sitios. El estudio realizado por (Hernández, 2009), consistió en reevaluar el efecto de sitio en Managua con fines de diseño sismorresistente; empleando curvas de razón espectral y espectros de respuesta a partir de modelos de velocidades de onda de corte. En Chontales, (INETER, 2004), realizó un estudio para evaluar la amenaza geológica, siendo este uno de los pocos estudios realizados en esta zona.

En el Recinto Universitario Rubén Darío, en Managua, (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011) realizaron un estudio empleando métodos geofísicos, en el cuál determinaron un modelo de velocidad de onda de corte, encontrando que el mayor contraste está a 50m de profundidad. Se han realizado varios estudios utilizando el método de SPT, pero no con el fin de caracterización sísmica de sitio; como el estudio realizado por (CIGEO, 2004), el cual se realizó para caracterización geotécnica del sitio donde se construyó el edificio para el residencial universitario Arlen Siu, y el de (Valle, 2006) en el sitio donde se construyó el edificio del CIGEO, donde determinó ciertas características geológicas del sitio. En el FAREM-Chontales, (CIGEO, 2012), realizó un estudio geotécnico y de dinámica de suelos, para fines constructivo. En este estudio se implementó el método de SPT, también el método MASW, con el que se determinaron modelos de velocidades de onda de corte, encontrando el mayor contraste a 9m de profundidad. En este estudio se determinó la vulnerabilidad sísmica en Juigalpa, encontrando fallas con movimiento de tipo lateral y/o normal.

Las condiciones geotectónicas, el entorno sísmico y las condiciones de los suelos de la ciudad de Managua, Carazo y Chontales, prestan las condiciones para llevar a cabo investigaciones relacionadas con la respuesta de sitio. El objetivo principal de este trabajo es evaluar la respuesta de sitio, por medio del análisis lineal equivalente, desarrollado en el Software DEEPSOIL V5.0; además, utilizando el método de SPT en la caracterización de sitio, empleando correlaciones Vs-N (SPT), para estimar modelos de velocidad de onda de corte. De esta manera poder obtener espectros de respuestas en los sitios de estudio, y así conocer la respuesta de sitio para un sismo determinado. También, este estudio pretende generar espectros de respuestas suavizados, para conocer las características del sitio y compararlas con el Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07).

Dentro de la estructura de este trabajo se presentan la ubicación y características de los sitios de estudio, la información encontrada en la literatura disponible acerca del tema, la metodología empleada para procesar los datos en estudio, los resultados encontrados, y las conclusiones a la que estos llevaron; también se incluye la bibliografía con la que se realizó este estudio, que sirvió como información base.

### **1.1. Planteamiento del problema.**

Toda Nicaragua, está constantemente amenazada por la ocurrencia de un eventual sismo, debido al ambiente sismo tectónico local y regional; lo que se ve evidenciado especialmente en la ciudad de Managua por los terremotos que la han afectado. Después de la experiencia vivida en Diciembre de 1972 ha quedado en evidencia la magnitud de las consecuencias que un eventual terremoto puede causar. La presencia del complejo sistema de fallas superficiales de la ciudad es sin duda la fuente sísmica más peligrosa.

Han sido pocos los estudios realizados para evaluar la respuesta sísmica de sitio, en diferentes regiones del país; aunque, en Managua se ha estudiado un poco más este fenómeno, no existe la suficiente la información para conocer las características sísmicas de

la ciudad. Podría decirse que la información sísmica que existe para las distintas regiones del país es bastante generalizada; por lo que, determinar la respuesta sísmica de sitio se torna poco preciso.

En algunos trabajos realizados en los sitios de estudio, como son los recintos de la UNAN-Managua: RURD, FAREM-Carazo y FAREM-Chontales, se han determinado ciertas características sísmicas, pero ha sido poco lo que se ha analizado en cuanto a la respuesta sísmica que experimentaría estos sitios con la ocurrencia de un sismo. Por lo antes mencionado el diseño sísmico estructural puede tomar ciertas características que lleven al sobre-diseño de las estructuras, o por el contrario, características que conlleven a diseñar estructuras incapaces de soportar cargas generadas por un sismo; por lo que, en ambos casos se el diseño se tornaría poco funcional y/o económicamente poco factible.

## **1.2. Justificación.**

La UNAN-Managua posee una población de 30000 estudiantes, aproximadamente; por lo que se ve en la necesidad de construir nuevos edificios para albergar a los estudiantes. Actualmente, en el Recinto Universitario Rubén Darío se encuentran en ejecución diversas obras con el fin de conseguir un desarrollo físico del recinto, todo esto es parte del Plan Maestro que ejecuta la Dirección de Diseño y Construcción (López & Tórrez, 2012). Este plan pretende zonificar todo el terreno del recinto para construir varios edificios con distintos fines; para los cuales se prevé que sean diseñados de 3 a 6 plantas. De igual manera en el FAREM-Carazo y FAREM Chontales, se pretende construir varios edificios para uso administrativo y para aulas de clase.

Debido a las características sismo tectónicas de Nicaragua, las edificaciones deben ser diseñadas para resistir las cargas generadas por un eventual sismo. Para poder lograr un diseño sismorresistente se deben conocer las características sísmicas del suelo, y así poder evaluar o determinar la respuesta que éste daría con la ocurrencia de un evento sísmico.

El espíritu y objetivo de este estudio es arrojar información que permita conocer las características sísmicas del lugar, como insumo para el diseño sismorresistente y futuros estudios sísmicos a realizarse en estos sitios; de manera que el diseño estructural de los edificios proyectados a construirse considere estas características, garantizando seguridad y funcionalidad.

## **1.3. Limitaciones.**

La realización del presente estudio se vio afectada por varias limitaciones que han sido determinantes en los resultados obtenidos.

El trabajo se desarrolló con registros de SPT tomados de estudios realizados por (CIGEO, 2004) y (CIGEO, 2012); hay que señalar que estos registros presentan información del suelo en profundidades someras. Se trabajó con estos datos, ya que el equipo para levantar la

información de campo no estuvo a nuestro alcance; pero los datos son válidos para los sitios de estudio, ya que conocemos el equipo que se utilizó y el procedimiento empleado, además conocemos las zonas en que se realizaron los estudios.

El RURD, posee un área bastante extensa, debido a esto se debe tener información de muchos puntos o zonas, es decir, realizar una microzonificación para poder determinar una respuesta sísmica más acertada. Sin embargo no se contó con la información suficiente, solamente se contó con dos estudios realizados en dos zonas considerablemente retiradas, en las que los suelos poseen características distintas, evidenciando la necesidad de la microzonificación.

La caracterización sísmica utilizando SPT para estimar velocidades de onda de corte, en Nicaragua, presenta grandes limitaciones, ya que no existen correlaciones empíricas que se hayan determinado para las características de los suelos de la región. Se tomaron correlaciones que se ajustaran a las características geológicas y geotécnicas de los sitios que, además, se han utilizado en estudios anteriores realizados en Managua.

El análisis lineal equivalente se llevó a cabo utilizando sismos registrados en basamento, ocurridos en otras regiones sísmicas; debido a que no se encontraron registros de sismos ocurridos en Nicaragua, más que el ocurrido en 1972 registrado en la Refinería Esso.



## **1.4. Objetivos.**

### **1.4.1. Objetivo general.**

Evaluar la respuesta sísmica de sitio mediante análisis lineal equivalente en los recintos: Rubén Darío-Managua, FAREM-Chontales y FAREM-Carazo, de la UNAN-Managua.

### **1.4.2. Objetivos específicos.**

- Estimar modelos de velocidad de onda de corte haciendo uso de correlaciones empíricas en función de  $N_{\text{Golpe}}$  (Campo y corregido) del ensayo de penetración estándar (SPT).
- Clasificar los sitios de estudio según el RNC-07, FEMA 450 y USGS, utilizando el parámetro  $V_s 30$ .
- Calcular espectros elásticos de respuesta en los sitios de estudio, utilizando registros sísmicos obtenidos en roca.
- Generar espectros suavizados que muestren las características generales de la respuesta del suelo en los sitios de estudio.
- Comparar los espectros suavizados obtenidos en cada sitio con el espectro de diseño del RNC-07.

## II. AREA DE ESTUDIO.

Nicaragua se encuentra ubicada en la zona Norte-occidental del globo terráqueo, entre las coordenadas geográficas: 10°45' y 15°05' latitud norte y 83°15' y 87°40' longitud oeste. Además, su territorio está comprendido entre las zonas P16 (Región del pacífico, Región central y parte de la Región del Atlántico) y P17 (Zona costera de la región del Atlántico) según el sistema de coordenadas UTM, WGS 84. Los sitios en estudios se encuentran ubicados en las localidades: Jinotepe, Carazo (UNAN, FAREM-Carazo); Juigalpa, Chontales (UNAN, FAREM-Chontales); y la ciudad de Managua (UNAN-RURD). Su ubicación se presenta en la figura 2.1.

Análisis lineal equivalente de la respuesta sísmica de sitio en los recintos: Rubén Darío-Managua, FAREM-Chontales y FAREM-Carazo, de la UNAN-Managua.

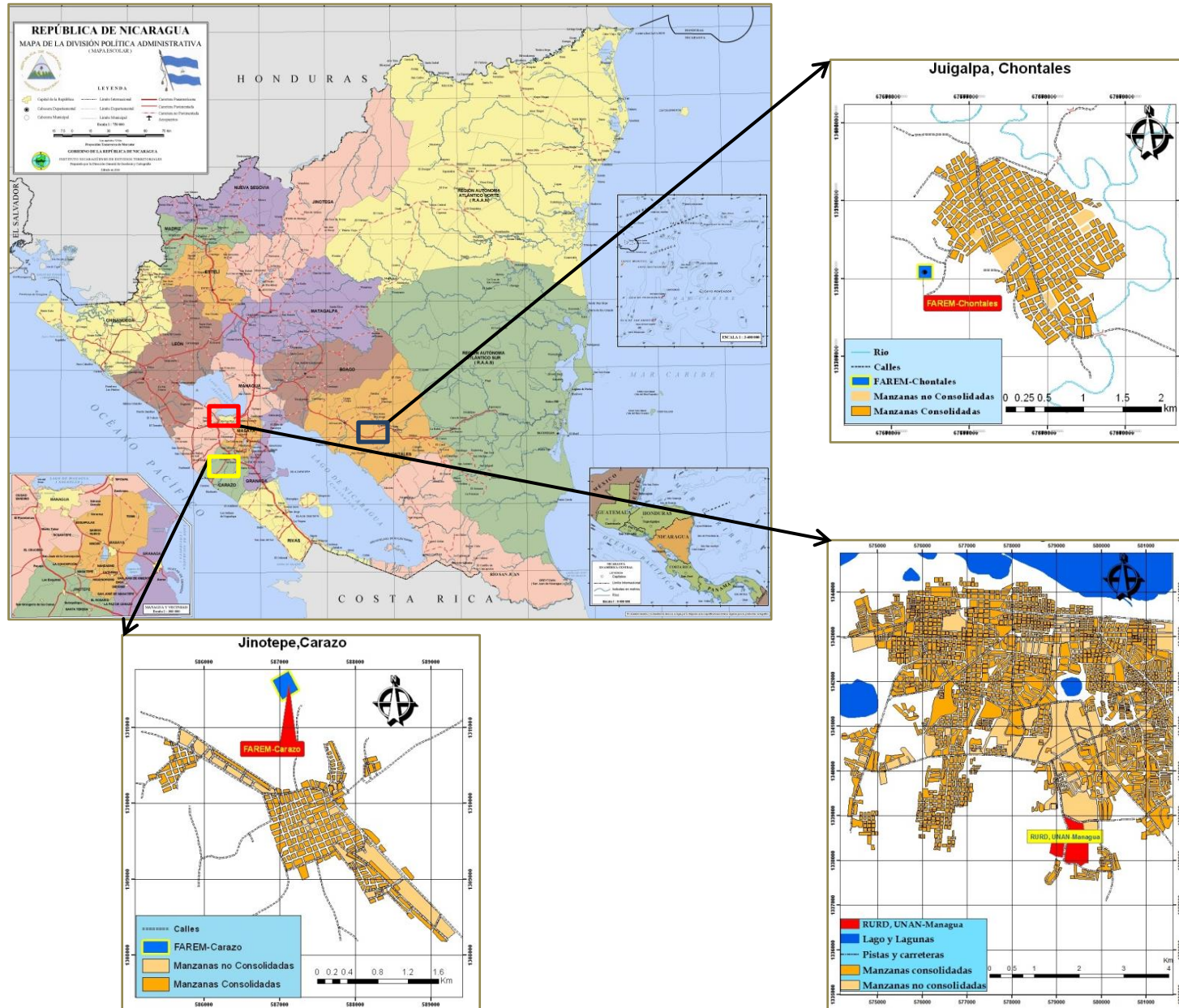


Figura 2.1. Mapa de macro-localización de los sitios de estudio.

## **2.1. Recinto Universitario Rubén Darío, UNAN-Managua (RURD)**

### **2.1.1. Descripción del sitio.**

El sitio de estudio está ubicado en la ciudad de Managua, la cual fue fundada el 28 de marzo de 1819; y constituida en 1852 como capital de la república de Nicaragua. Esta ciudad posee una extensión territorial de 289 km<sup>2</sup>, aproximadamente, de los cuales el 52% está ocupado por la población urbana.

La ciudad de Managua se encuentra ubicada en la zona del pacífico de Nicaragua, entre las coordenadas 12° 01' y 12° 13' de Latitud Norte, y los 84° 45' y 86° 23' de Longitud Oeste. El municipio limita al norte con el lago Xolotlan o el lago de Managua; al sur con el municipio de El Crucero, y los municipios de Ticuantepe y Nindiri; al este con el municipio de Tipitapa; al oeste con los municipios de Ciudad Sandino y Villa Carlos Fonseca.

Managua tiene una población aproximada de 1, 316,981, dividida de la siguiente manera: población rural 70,264 y población urbana 1, 276,71. Su clima es principalmente tropical de sabana, caracterizado por una prolongada estación seca y por temperaturas altas todo el año, que va desde 27°C. hasta 32°C. la precipitación anual promedio para Managua es de 1215 milímetros de agua.

En el año 1968, la UNAN-Managua comenzó a funcionar en donde hoy es el Recinto Universitario Rubén Darío. En este recinto se encuentran construidas infraestructura, como pabellones de clase de una y dos plantas, auditorios, laboratorios geotecnia y petrografía, laboratorios de radiación, laboratorios de microbiología, entre otros tipos de edificaciones.

Desde el año 2012 al año 2032, se pretenden ejecutar un plan de desarrollo en la infraestructura del RURD; que consiste en construir un edificio para la administración central en el área donde actualmente son los campos de fútbol, además de construir 36432m<sup>2</sup> para oficinas de docentes, reorganizar los comercios, construir edificios para aulas, entre otras construcciones importantes (López & Tórrez, 2012).



### 2.1.2. Ubicación del Recinto Universitario Rubén Darío.

El sitio de estudio comprende los predios del Recinto Universitario Rubén Darío de la UNAN-Managua, se encuentra ubicado al sur de la Ciudad de Managua, en la colonia Villa Fontana.

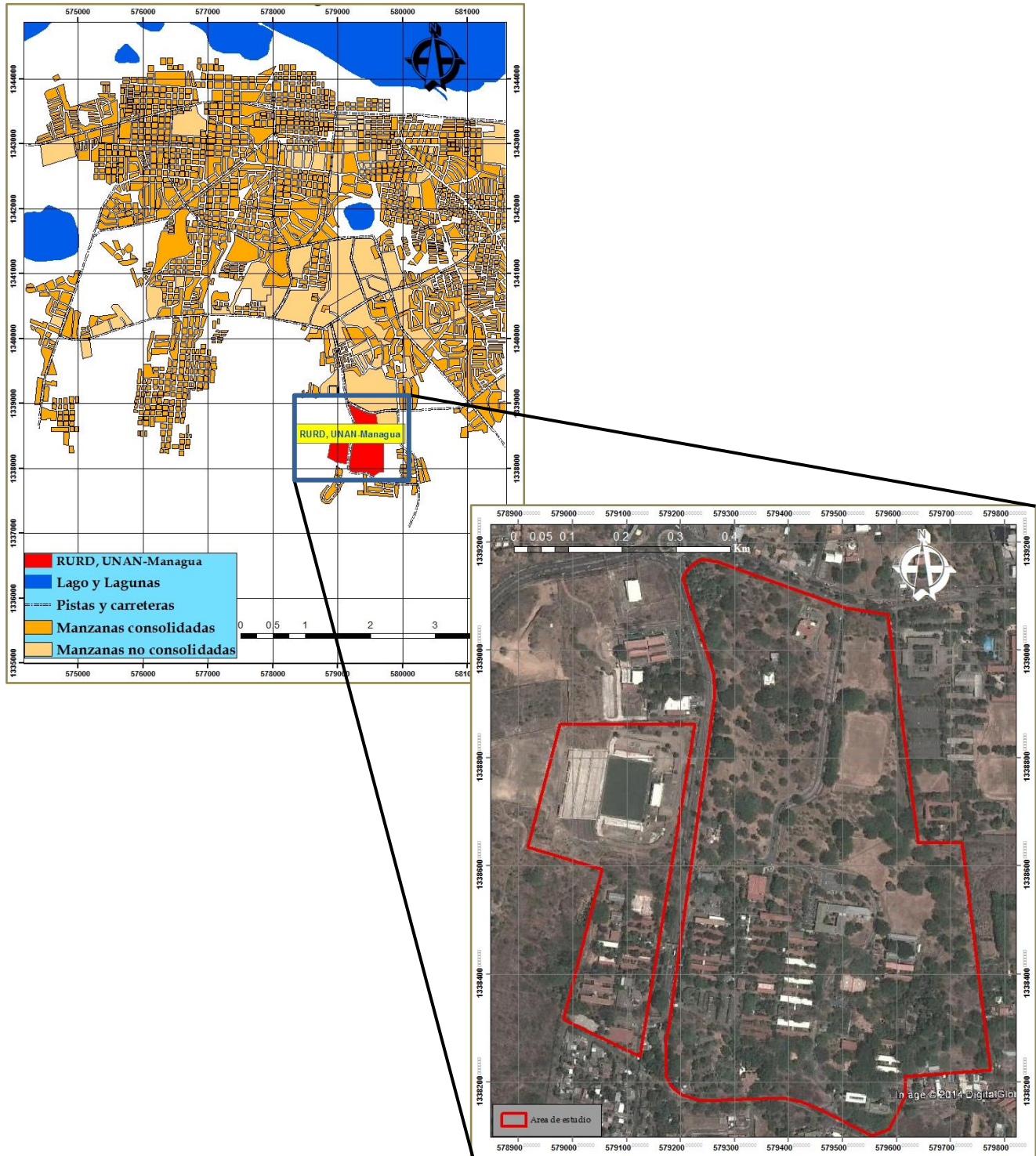


Figura 2.2. Mapa de micro-localización del área de estudio, RURD.

## 2.2. Facultad Regional Multidisciplinaria, Carazo (FAREM-Carazo).

### 2.2.1. Descripción del sitio.

El sitio en estudio se ubica en el municipio de Jinotepe. La ciudad de Jinotepe se encuentra ubicada en la región sur del país entre los 11° 30' y 11° 54' de Latitud Norte y 86° 10' a los 86° 27' de Longitud Oeste. El municipio de Jinotepe limita al norte con el municipio de San Marcos y Masatepe; al sur con el océano pacífico; al este con el municipio El Rosario, Santa Teresa y la Conquista; al oeste con los municipios de Diriamba y Dolores.

El departamento de Carazo posee una población de 175,073 habitantes con una densidad poblacional de 162 habitantes / km<sup>2</sup>. La población urbana representa el 61% y en el área rural es donde está la menor parte de la población (39%).

En el sitio de estudio se proyecta la construcción de un edificio administrativo, pabellones de aulas, que constarán de dos niveles, servicios sanitarios, canchas, biblioteca, acceso y estacionamientos (CIGEO, 2012). El área del sitio de estudio es de 17700m<sup>2</sup>, según la Dirección de Diseño y Construcción de la UNAN-Managua.

### 2.2.2. Ubicación del FAREM-Carazo.

El área explorada está ubicada en el municipio de Jinotepe, Carazo; y se llega por medio de la carretera pavimentada que va de Jinotepe a San Marcos. El sitio está localizado opuesto, aproximadamente 100m a Hertylandia.

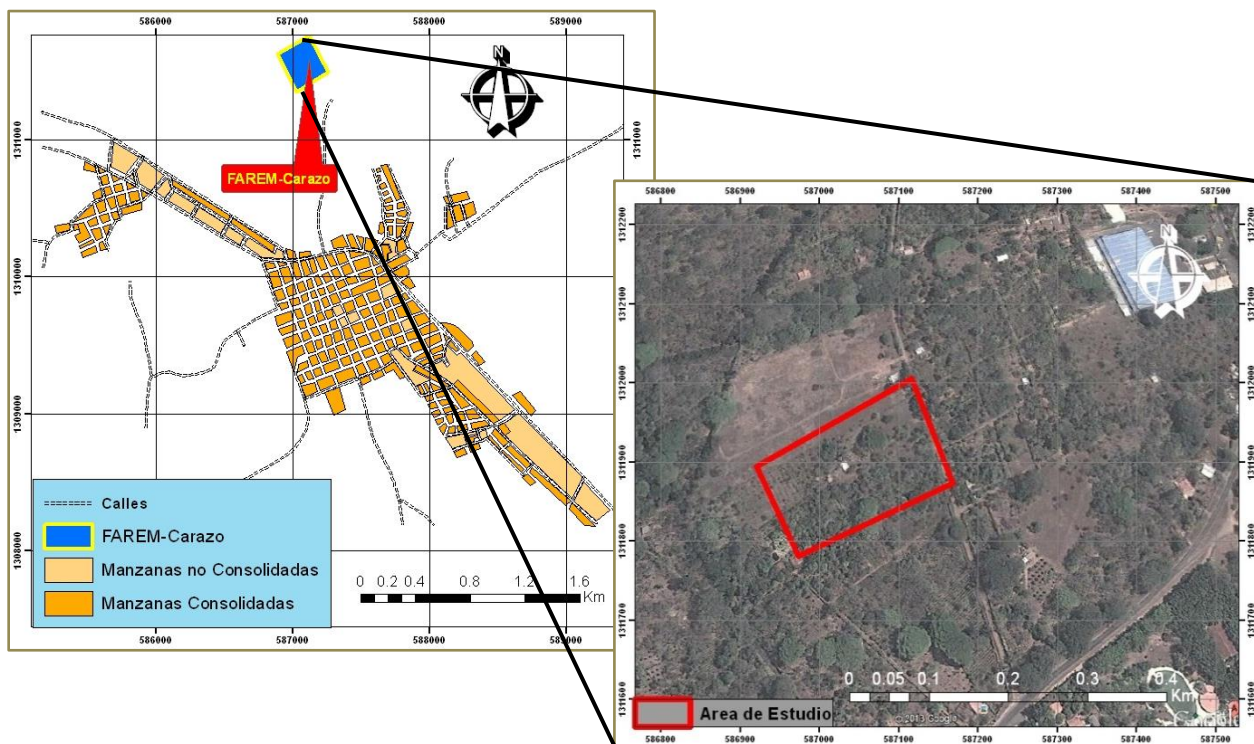


Figura 2.3. Mapa de micro-localización del área de estudio, FAREM-Carazo.



## 2.3. Facultad Regional Multidisciplinaria, Chontales (FAREM-Chontales).

### 2.3.1. Descripción del sitio.

El área de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Juigalpa. Esta ciudad se ubica a 139 kilómetros de Managua, en la parte central del territorio de Nicaragua, entre la costa nororiental del Gran Lago de Nicaragua, la Cordillera de Amerrisque y los valles que traza en su descenso hacia el lago. El municipio se encuentra ubicado en la región sur del país entre los 12° 06' latitud y 85° 22' longitud.

Juigalpa limita al norte con el municipio de San Francisco de Cuapa; al Sur con los municipios de Acoyapa y el Lago de Nicaragua; al Este con los municipios de La Libertad y San Pedro de Lóvago; al oeste con el municipio de Comalapa. La ciudad de Juigalpa tiene una población de 53,890.

El FAREM- Chontales tiene un área de 54300m<sup>2</sup>, según la Dirección de Diseño y Construcción de la UNAN-Managua. Dentro de los terrenos del FAREM se proyecta la construcción de edificio administrativo, pabellones, servicios sanitarios, canchas, laboratorio lácteo, acceso y estacionamiento (CIGEO, 2012).

### 2.3.2. Ubicación del FAREM-Chontales.

El FAREM-Chontales, se encuentra ubicado en la ciudad de Juigalpa, de la gasolinera Esso 800m al Oeste, sobre la carretera que va a Puerto Díaz.

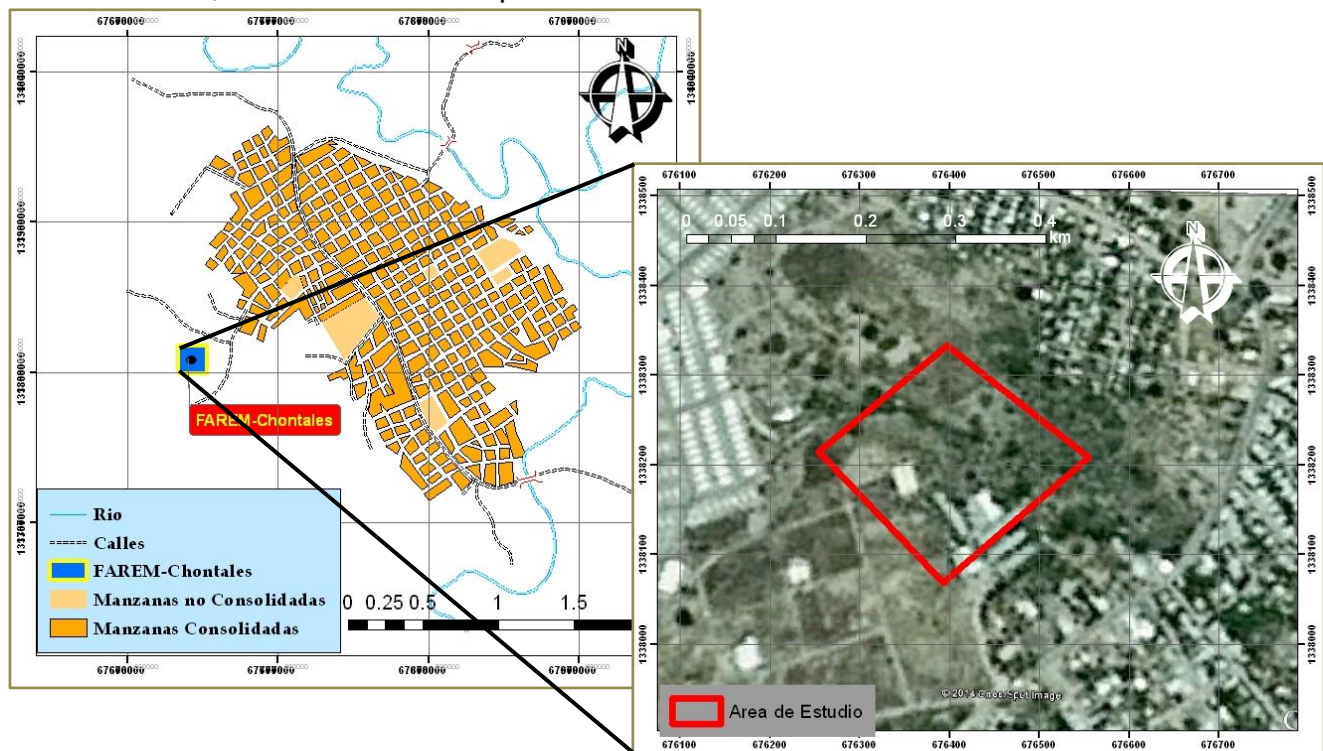


Figura 2.4. Mapa de micro-localización del área de estudio, FAREM-Chontales.





rocas volcánicas y sedimentarias (piroclastos, andesitas, lutitas) del Cretácico. Al centro: rocas volcánicas del Cuaternario, rocas sedimentarias (areniscas tabaceas, lutitas y calizas) del Neógeno. Al noroeste: rocas volcánicas que rodean los volcanes, sedimentos consolidados y recientes hacia las costas (guijarros, suelos arenosos y arcillas) del Cuaternario. También rocas volcánicas y sedimentarias (piroclastitas, ignimbritas y lavas) del Neógeno (INETER & BRG, 2004).

- **Depresión de Nicaragua:** es un valle de relieve suave de unos 40 a 60 Km de ancho, que se extiende desde el sureste, en la frontera con Costa Rica, hasta el noroeste con el Golfo de Fonseca. Exceptuando la cordillera volcánica, la elevación del terreno es de unos pocos metros, llegando a unos cien metros en la zona de Malpaisillo. Las zonas topográficamente más bajas están ocupadas por: el Golfo de Fonseca, el Lago Xolotlán y el Lago Cocibolca (Hernández, 2009).

Esta provincia geológica es una estructura de graben o fosa tectónica en la que se encuentra la Cordillera Volcánica del Pacífico, constituyendo ésta última el rasgo geomorfológico más importante del occidente de Nicaragua. Dicha cordillera está formada por volcanes del Cuaternario al Reciente, con orientación NO-SE, de aproximadamente 300 km de longitud. Se extiende desde el Volcán Cosigüina al noroeste, hasta el Volcán Maderas en la Isla de Ometepe, en el Lago Cocibolca, al sureste (Hernández, 2009).

- **Zona central** (Del noroeste al sureste): predominio de rocas volcánicas (lavas basálticas, andesíticas, dicíticas, aglomerados) y depósitos volcánicos indiferenciados, todo del Neógeno. En el noroeste de esta franja, en la frontera con Honduras aparecen rocas metamórficas y sedimentarias (exquistos, cuarcitas, mármoles areniscas y lutitas) del Paleozoico. Son de las tierras más antiguas del país (INETER & BRG, 2004).
- **Planicie costera del Atlántico:** sedimentos consolidados y recientes (guijarros, arenas, suelos arenosos y arcillas) del Cuaternario. Corresponde a terrenos bajos y ondulados, entrecortados por pantanos y lagunas, cubiertos por depósitos de grava y arena (INETER & BRG, 2004).

### 3.2. Características sismo-tectónicas.

Nicaragua está ubicada dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la tierra denominada Anillo Circumpacífico. Su emplazamiento tectónico es muy complejo, frente a la Costa Pacífica de Nicaragua convergen las placas Coco y Caribe. Esta actividad sísmica tiene su origen en dos zonas principales, denominadas: *Zona Wadatti-Benioff* y *Sisimicidad de focos someros continentales*.

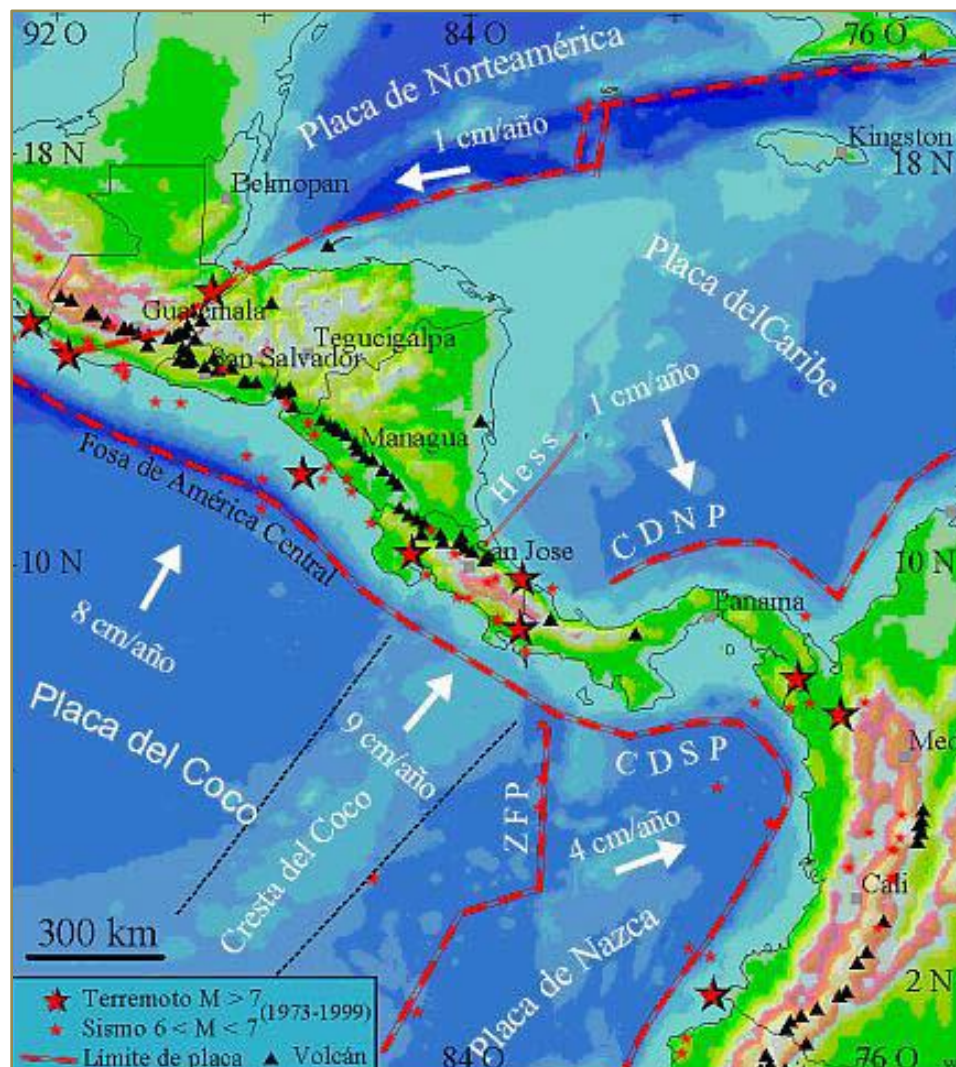


Figura 3.2. Emplazamiento tectónico de Nicaragua (Strauch, 2000).

### 3.2.1. Zona Wadatti-Benioff.

La zona de mayor actividad sísmica se concentra en la región donde entran en contacto la Placa de Cocos al iniciar la subducción de la misma bajo la placa Caribe. En el lugar donde se dobla la placa del Coco, se forma la zona de contacto y de fricción entre las dos placas, generando sismos y grandes terremotos con magnitudes de hasta 8 Richter (Strauch, 2000). La zona central de esta área de gran actividad sísmica, se ubica horizontalmente a unos 100 km desde el eje de la Fosa Mesoamericana, medidos en dirección hacia el continente. Dicha zona se encuentra a una profundidad de 35 Km.

A partir de la zona de contacto de las placas, la placa Cocos presenta un ángulo de buzamiento del orden de los  $60^{\circ}$  a  $65^{\circ}$  NE según (Moore, 2004), hasta una profundidad de 250 km aproximadamente, donde la misma se funde debido a las altas presiones y temperaturas, coincidiendo el ascenso del magma así producido con el eje de las cordilleras volcánicas de Nicaragua.

Según (Strauch, 2000), el ángulo en que desciende la placa Coco es de 80° en dirección NE bajo el margen pacífico de la placa caribe. Debajo de Managua, la placa subducida ya alcanza profundidades de más de 200 Km.

### **3.2.2. Sismicidad de focos someros continentales.**

Esta zona se caracteriza por generar sismos de magnitud moderada y profundidad somera, los cuales son capaces de generar vibraciones relativamente pequeñas (Moore, 2004). Estos sismos son los que han destruido la ciudad de Managua en los años 1931 y 1972.

Un primer modelo tectónico de la región de Managua considera que la zona de falla que pasa por la ciudad corresponde a una falla transformante (Moore, 2004), entre dos segmentos de la principal cadena de volcanes cuaternarios. Este mecanismo asume que la Depresión de Nicaragua es una zona de extensión cortical y que los centros volcánicos se alinean sobre estrechas dorsales a través de las cuales la región occidental del país está siendo desplazada alejándose de la región oriental nicaragüense. Como consecuencia, este modelo implica la generación periódica de sismos de gran magnitud en el área de Managua. No explica, sin embargo, la ocurrencia de sismos en toda el área del graben (Moore, 2004).

Por otro lado, el segundo modelo considera que la actividad sísmica se concentra cerca de la Depresión de Nicaragua debido a la existencia de una litosfera rígida, inusualmente delgada, por debajo de ésta. La delgadez de la litosfera resulta del alto flujo calórico del manto, el cual, es también responsable de la extensa actividad volcánica en el occidente del país (Moore, 2004). Los esfuerzos aplicados a la placa Caribe se concentran en esta zona delgada que une dos segmentos más gruesos de placa litosfera. Con este último modelo, el mecanismo focal del terremoto de Managua es consistente con los esfuerzos regionales en el área de la ciudad, siendo, ya sea, un esfuerzo compresional dirigido hacia el N-S o uno tensional dirigido aproximadamente al E-O (Moore, 2004).

### **3.3. Características de los sitio de estudio.**

#### **3.3.1. Recinto Universitario Rubén Darío, Managua.**

##### **3.3.1.1. Características geológicas.**

La ciudad de Managua se encuentra situada dentro del graben Managua. Este graben de aproximadamente 40 Km de ancho, se abre a lo largo de dos zonas distintas de fallamiento normal, denominados: Sistema Falla Mateare, al Oeste, y el Sistema Falla Las Nubes, al sur. Todas las fallas presentan un rumbo promedio de NE-SW por su longitud y desplazamiento.

En el área de Managua existen cinco fallas principales: Falla Estadio, Falla Los Bancos, Falla Tiscapa, Falla Escuela y Falla Centroamérica.





(CIGEO, 2004). En el sitio donde está construido el Laboratorio del CIGEO y el extremo suroeste del recinto, se han detectado evidencia de fallamiento en los estratos, con desplazamiento de 15 y 10 cm, respectivamente (CIGEO, 2001).

La estratigrafía del sitio se encuentra definida por la presencia de estratos guías como, toba El Retiro (Hrt) y escoria San Judas (Hsj) de edades del cuaternario. Los estratos se encuentran sin deformación por efecto de fallas activas, relativamente sin dobladuras y plegamientos (Valle, 2007).

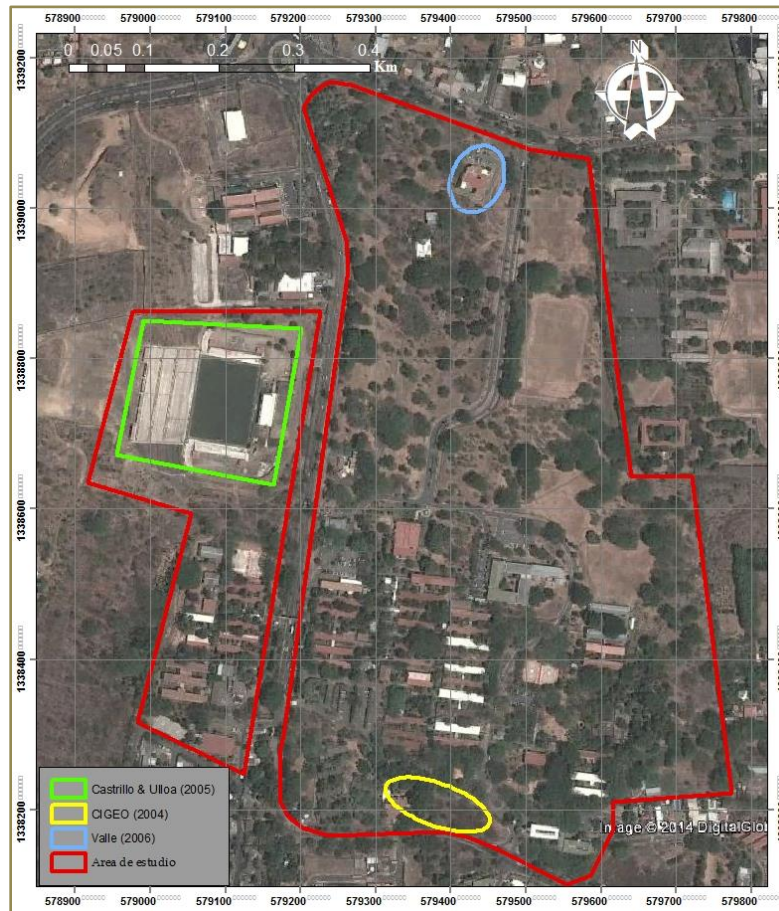
### **3.3.1.2. Características geotécnicas.**

Con el objetivo de evaluar el peligro sísmico del sitio donde se construyó el Centro de Investigaciones Geocientíficas, (Valle, 2006) realizó un estudio en el que se hicieron siete perforaciones utilizando el método de SPT (Ver Anexo A.1.); estas perforaciones alcanzaron profundidades de 10.25 m. Geotécnicamente se puede definir que la estructura del suelo en el área de estudio, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), está compuesta por arena-arcillosa, arena-limosa y arena gravosa.

En la zona del Residencial Universitario “Arlen Siu”, al este, (CIGEO, 2004) realizó un estudio con el propósito de caracterizar geotécnicamente el sub-suelo del sitio, para fines constructivos. Para lo anterior, utilizó el método de SPT, efectuándose ocho perforaciones, con una profundidad máxima de 5 m (Ver Anexo A.2). Se encontraron suelos areno-limoso y areno-arcilloso, predominando los areno limoso. La condición mecánica es bien variable, la compacidad varía de muy suelta, próxima a la superficie, a muy densa.

Para la construcción del estadio Nacional de Fútbol, ubicado en los predios del RURD, (Castrillo & Ulloa, 2005) realizaron un trabajo, con el objetivo de caracterizar según criterios geotécnicos el subsuelo del área de construcción. Esto se llevó a cabo utilizando el método de SPT, realizando seis perforaciones. El tipo de suelo predominante es arena-arcillosa (SC), con características no apropiadas para utilizarse con fines estructurales.

En la figura 3.4. se muestran las tres zonas en las que se realizaron los estudios antes mencionados.



**Figura 3.4.** Zonas del RURD en donde se han realizado estudios geotécnicos, utilizando el método de SPT.

### 3.3.2. Facultad Regional Multidisciplinaria, Carazo (FAREM-CARAZO).

#### 3.3.2.1. Características geológicas.

En el recinto del FAREM-CARAZO se realizó un estudio con el fin de definir las características geotécnicas del subsuelo, (CIGEO, 2012). En dicho estudio se obtuvo como resultado un suelo con estratigrafía uniforme; ésta se encuentra definida por materiales como toba meteorizada, toba compacta y lapilli color gris amarillento. Los materiales geológicos corresponden a suelos de textura arenosa, areno-limosas, areno-arcillosas con compacidad de suelta a media.

#### 3.3.2.2. Características geotécnicas.

En el estudio antes mencionado, de (CIGEO, 2012), se definieron los tipos de suelos predominantes en la zona. Para este estudio, se empleó el método de SPT, realizándose seis perforaciones, hasta 9 m de profundidad, (Ver Anexo A.3.); además de sondeos manuales para la extracción de muestras. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), en el sitio se encuentran suelos de tipo: areno-limoso (SM) y arenas arcillosas (SC). Además se encuentran estratos areno-limoso bien y mal graduados (SW-SM,



SP-SM). Este tipo de suelos son no plásticos o de baja plasticidad. Debe tenerse en cuenta que estos suelos son muy sensibles a las vibraciones; ya que estas aumentan su densificación, disminuyendo el volumen ocupado, lo que provoca asentamientos importantes.

En el área de estudio, no se detecta nivel freático, al menos, hasta 9 m profundidad. Por lo antes mencionado, los suelos de la zona presentan una baja susceptibilidad a que se produzca el fenómeno de licuefacción.

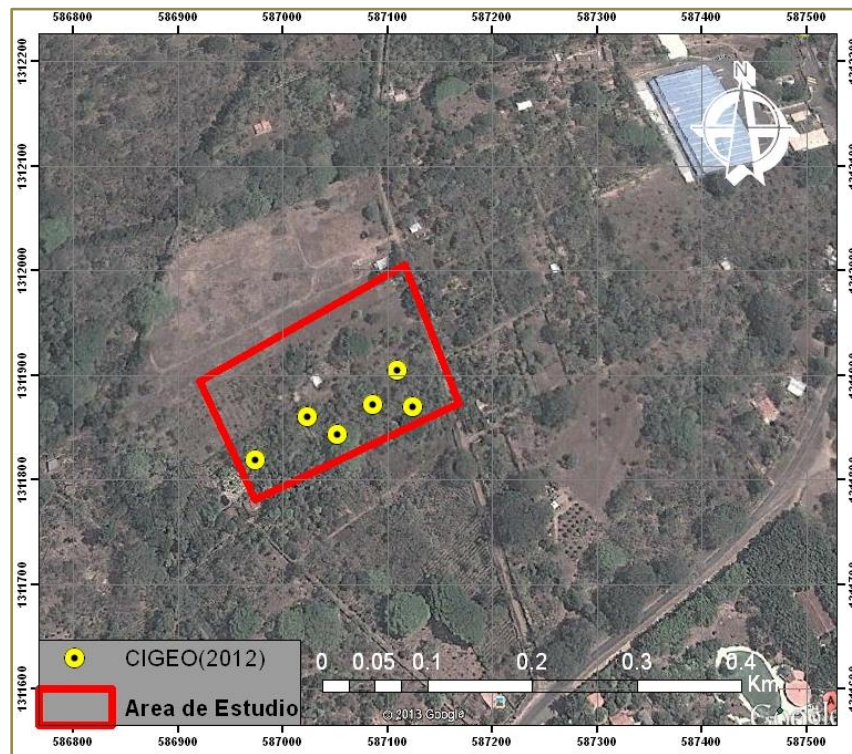


Figura 3.5. Perforaciones realizadas para estudio geotécnico utilizando el método de SPT, en FAREM-CARAZO.

Tabla 3.1. Identificación, profundidad y localización de cada sondeo tomadas con GPS manual (UTM, WGS 84) con aproximación +/- 20 m, en FAREM-Carazo (CIGEO, 2012).

| Sondeo                             | Localización |         |          | Profundidad (m) |
|------------------------------------|--------------|---------|----------|-----------------|
|                                    | X            | Y       | Z (msnm) |                 |
| P1                                 | 0587124      | 1311871 | 607      | 7.20            |
| P2                                 | 0587110      | 1311906 | 608      | 7.20            |
| P3                                 | 0587086      | 1311873 | 607      | 7.65            |
| P4                                 | 0587052      | 1311844 | 607      | 7.62            |
| P5                                 | 0587024      | 1311861 | 607      | 9.00            |
| P6                                 | 0586974      | 1311820 | 608      | 8.10            |
| <b>Profundidad total perforada</b> |              |         |          | <b>51.50</b>    |

### **3.3.3. Facultad Regional Multidisciplinaria, Chontales (FAREM-CHONTALES).**

#### **3.3.3.1. Características geológicas.**

La ciudad de Juigalpa se encuentra ubicada en los márgenes Oeste de los ríos Mayales y Carca, entre pequeñas lomas y cerros. Un sistema de falla geológica controla toda el área urbana y suburbana. Este sistema tiene una orientación Noroeste-Sureste; otra, prácticamente, Norte-Sureste; y, el tercer sistema, con orientación Noreste-Suroeste; este último, ejerce control geomorfológico sobre el río Mayales (INETER, 2004). Se considera que no son fallas recientes; por lo que no representan una mayor amenaza para el sitio.

La geología local muestra un basamento compacto compuesto por rocas andesíticas, fracturado con poca cubierta de suelo; que aflora en la zona central del área urbana. En el sector Noroeste de la ciudad se observa rocas con cierto grado de alteración y con poca cobertura vegetal (INETER, 2004).

En el FAREM-Chontales (CIGEO, 2012) realizó un estudio geotécnico y de amenaza sísmica, en el cual encontraron una estratigrafía que se puede denominar uniforme. Está compuesta por arcilla sonsocuite, arcilla de plasticidad media y sedimentos verduscos, esto hasta 2.5 m de profundidad.

#### **3.3.3.2. Características geotécnicas.**

En terrenos del FAREM-Chontales, (CIGEO, 2012), llevo a cabo un estudio con el objetivo de determinar características geotécnicas y la amenaza sísmica del sitio, con fines constructivos. Para dicho estudio, se empleó el método de SPT, realizándose diez perforaciones en distintos puntos del campus, a una profundidad máxima de 5 m (Ver Anexo A.4.). Como resultado se obtuvo que, la estratigrafía de los suelos del sitio es uniforme; ya que, en varios sondeos manuales realizados, se encontraron características muy similares. Puede establecerse que la estratigrafía superficial del área corresponde a arcillas altamente compresibles (CH).

Las características de los suelos de la zona presentan un grado de colapso alto, debido a la presencia del nivel freático. El nivel freático se encuentra entre 2 y 4 metros (CIGEO, 2012).





**Figura 3.6.** Perforaciones realizadas para estudio geotécnico, utilizando el método de SPT, en FAREM-CHONTALES.

**Tabla 3.2.** Identificación, profundidad y localización de cada sondeo tomadas con GPS manual (UTM, WGS 84) con aproximación +/- 20 m, en FAREM-Chontales (CIGEO, 2012).

| Identificación                     | Localización |         |          | Profundidad (m) |
|------------------------------------|--------------|---------|----------|-----------------|
|                                    | X            | Y       | Z (msnm) |                 |
| <b>SPT 1</b>                       | 0676375      | 1338160 | 99.5     | 2.25            |
| <b>SPT 2</b>                       | 0676375      | 1338188 | 99.5     | 3.15            |
| <b>SPT 3</b>                       | 0676325      | 1338214 | 99.5     | 4.05            |
| <b>SPT 4</b>                       | 0676372      | 1338233 | 100      | 3.15            |
| <b>SPT 5</b>                       | 0676428      | 1338262 | 100      | 4.73            |
| <b>SPT 6</b>                       | 0676443      | 1338218 | 100      | 4.50            |
| <b>SPT 7</b>                       | 0676510      | 1338222 | 99.5     | 3.15            |
| <b>SPT 8</b>                       | 0676561      | 1338142 | 99.5     | 4.50            |
| <b>SPT 9</b>                       | 0676477      | 1338156 | 99.5     | 2.25            |
| <b>SPT 10</b>                      | 0676429      | 1338144 | 99.5     | 2.55            |
| <b>Profundidad total perforada</b> |              |         |          | <b>34.28</b>    |

## IV. REVISION DE LITERATURA.

### 4.1. Aspectos generales.

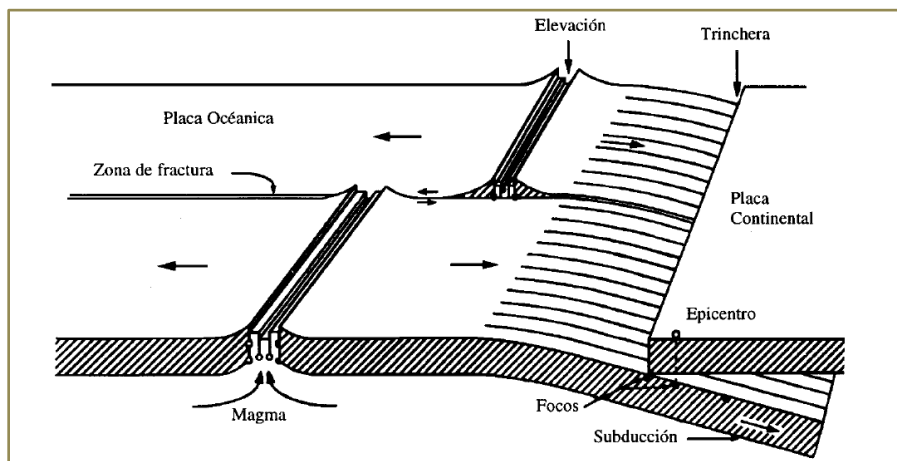
Los sismos son movimientos o vibraciones del terreno, causados por una súbita liberación de energía en la corteza terrestre (Bazán & Meli, 1985). Generalmente los sismos son generados en los límites entre las placas; también existen otras fuentes, tales como: caídas de techos de cavernas subterráneas y explosiones, ya sea en la superficie o subterránea.

Como se menciona anteriormente, una fuente generadora de sismos es la actividad tectónica. Además, la actividad tectónica produce los sismos de mayor intensidad y magnitud. Este tipo de sismos se originan debido al rompimiento de las rocas de la litósfera provocada por la gran cantidad de esfuerzos que las placas acumulan, debido a las fuerzas que se oponen al movimiento de éstas. Se ha observado a lo largo de los años que los sismos dependen de las dinámicas internas conocidas como dinámica de placas, por lo que (Rodas, 2011) define que, los sismos no son distribuidos aleatoriamente en el globo terráqueo, sino que principalmente en los bordes de las placas, que es el lugar donde se libera la energía con mayor facilidad, ocasionada por los esfuerzos acumulados durante años.

Estas vibraciones de la corteza terrestre son las que ponen en peligro las edificaciones que se plantan sobre determinado sitio que puede verse afectado por un sismo, al generarle cargas horizontales sobre su base debidas al movimiento.

De acuerdo a la zona de generación y profundidad, los sismos se pueden clasificar de la siguiente manera (Zúñiga, 2011):

- **Sismos de subducción someros:** Se generan en las fronteras de este tipo (Subducción) y que ocurren a profundidades que no exceden los 40 km.
- **Sismos de subducción profundos:** Ocurren debido a la interacción de subducción y en la zona de fricción (interplaca), pero a profundidades mayores a los 40 km.



**Figura 4.1.** Movimientos de placas y generación de sismos. Mecanismo de subducción (Bazán & Meli, 1985).

- **Sismos intraplaca de profundidad intermedia:** Sismos que se presentan en la placa subducida, pero no ocasionados por la fricción entre las placas, sino por fractura de la placa que ha penetrado. Sus profundidades son mayores a los 80 km y, en algunos lugares, menores de 500.
- **Sismos de zonas de acreción:** Se presentan en este tipo de fronteras (Divergentes o de acreción), por lo general con profundidades que no exceden los 20 km.
- **Sismos de fallas de transurrencia:** Se presentan en este tipo de frontera, cuyas profundidades no exceden los 30 km, por lo común.
- **Sismos corticales intracontinentales:** Se presentan en fallas no directamente relacionadas con los procesos de interacción entre las placas, sino al interior de una placa. Sus profundidades no exceden el grosor de la placa.

#### 4.1.1. Ondas sísmicas.

En un sismo la energía se libera mediante la propagación de diversos tipos de ondas que viajan desde la zona de ruptura hasta la corteza terrestre, haciendo que la corteza vibre (Bazán & Meli, 1985). Las ondas sísmicas son perturbaciones temporales de un campo, que generan movimiento en un medio. En los sismos, se propagan dos tipos de onda, las ondas corporales y las ondas superficiales.

Desde el punto de vista geofísico las ondas sísmicas pueden ser generadas artificialmente para estudiar los efectos de propagación en el medio perturbado. Esto se da en superficies en las cuales se pretende obtener una imagen del terreno en base a las propiedades de los materiales del suelo del lugar.

##### 4.1.1.1. Ondas corporales.

Según (Bazán & Meli, 1985) las ondas corporales son las que viajan a grandes distancias a través de rocas, en el interior de la tierra, y su amplitud se atenúa poco a poco conforme aumenta la distancia con respecto al foco. Estas se clasifican en ondas P (Ondas primarias), también llamadas primarias o de dilatación, y en ondas S (Ondas secundarias).

- **Ondas P.**

Las ondas P son longitudinales o de compresión. Estas ondas causan que el suelo se comprima y se dilate en la dirección de la propagación y son capaces de viajar a través de cualquier material. Estas ondas desarrollan velocidades típicas de 330m/s en el aire, 1,450 m/s en el agua y cerca de 5,000m/s en el granito (Rodas, 2011). También, hay que señalar que su velocidad es 1.73 veces mayor que la velocidad de las ondas S (Vilchez, 2009); por lo que, a medida que nos alejamos del epicentro crece la diferencia de tiempo de llegada de los dos tipos de trenes de ondas. Esta diferencia de tiempo se emplea para determinar la

distancia entre el epicentro y alguna estación sismológica donde se haya registrado el movimiento del terreno, por lo que sirve de base para la localización del epicentro.

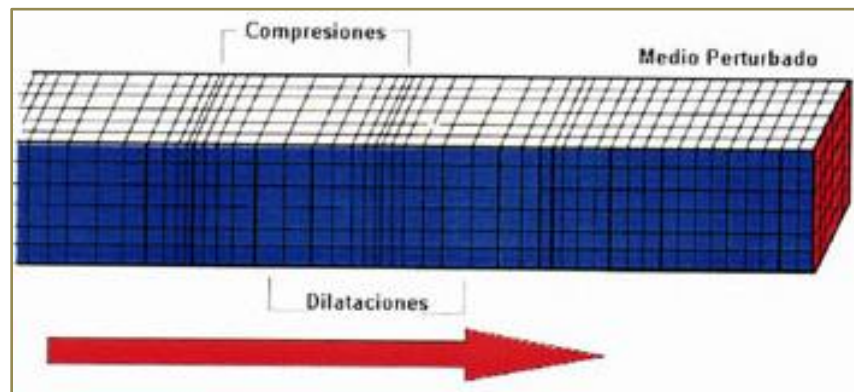


Figura 4.2. Modelo de propagación de ondas P ([www.funvisis.gob.ve](http://www.funvisis.gob.ve))

- **Ondas S.**

Las ondas S son de corte o transversales. Son aquellas cuyo desplazamiento es perpendicular a la dirección de propagación. Dependen del módulo de corte y de la densidad del medio. Este tipo de onda solamente puede viajar a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 58% la de una onda P para cualquier material sólido. Usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la P y se siente más fuerte que ésta. (Bazán & Meli, 1985) Afirman que estas ondas producen en el terreno un movimiento más intenso y de características más dañinas para las edificaciones que las ondas P. En la región próxima al epicentro del sismo, son capaces de generar la mayoría de los daños, ya que generan la deformación del terreno.

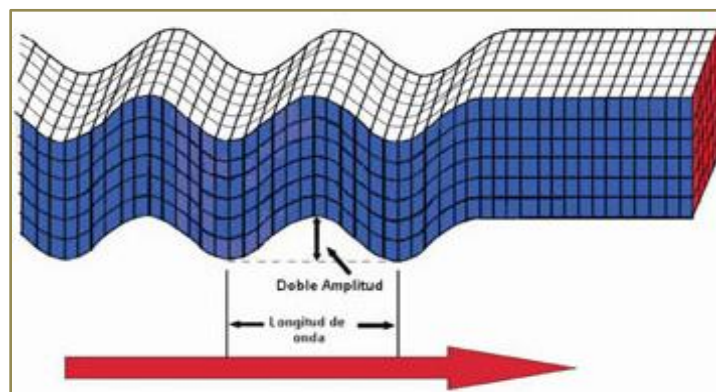


Figura 4.3. Modelo de propagación de ondas S ([www.funvisis.gob.ve](http://www.funvisis.gob.ve))

#### 4.1.1.2. Ondas superficiales.

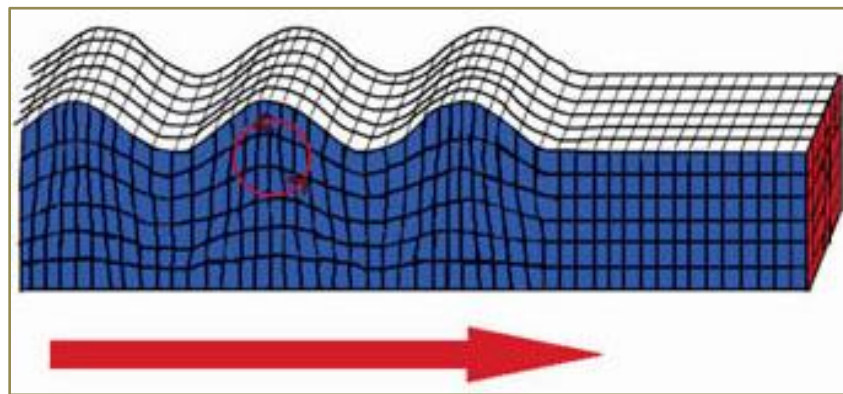
Las ondas superficiales son análogas a las ondas de agua y viajan sobre la superficie de la Tierra. Se desplazan a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Debido a su baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas corporales y



son, por ende, las ondas sísmicas más destructivas. Éstas se clasifican en dos tipos: las ondas Rayleigh (R) y las ondas Love (L).

- **Ondas Rayleigh (R).**

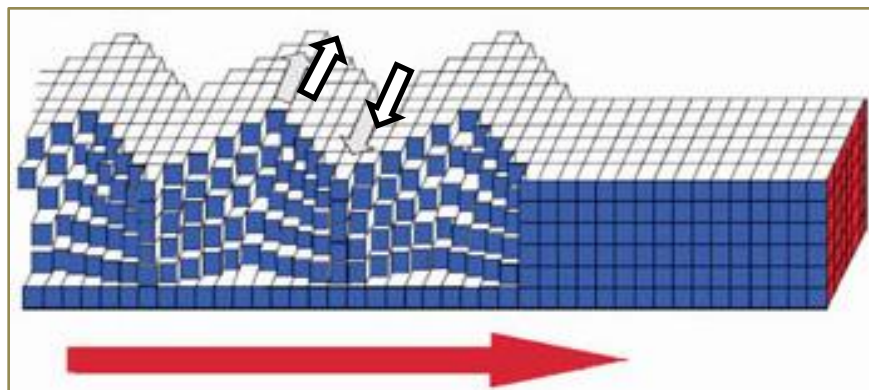
Son ondas superficiales que viajan como ondulaciones similares a aquellas encontradas en la superficie del agua (olas), dichas ondas producen un movimiento elíptico retrogrado del suelo. Su velocidad de propagación es aproximadamente un 70% de la velocidad de las ondas S (Vilchez, 2009). La amplitud de su movimiento disminuye exponencialmente con la profundidad. Estas ondas pueden ser generadas por fuentes activas, como terremotos, explosiones, golpes de martillo, o por fuentes pasivas tales como el movimiento de vehículos, efectos causados por viento, mareas, entre otras.



**Figura 4.4.** Modelo de propagación de ondas Rayleigh ([www.funvisis.gob.ve](http://www.funvisis.gob.ve))

- **Ondas Love (L).**

Son ondas superficiales, y se denominaron de esta manera por A.E.H. Love, quién creó un modelo matemático de las ondas en 1911. Las ondas Love se propagan con un movimiento de las partículas perpendicular a la dirección de propagación, y la amplitud de las mismas decrece rápidamente conforme aumenta la profundidad. Su velocidad es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh, representando un 90% de la velocidad de las ondas S (Vilchez, 2009).



**Figura 4.5.** Modelo de propagación de ondas Love (L) ([www.funvisis.gob.ve](http://www.funvisis.gob.ve))

## **4.1.2. Magnitud e intensidad de sismos.**

Existen dos maneras de medición de un sismo; una de ellas es la intensidad, que tiene sus parámetros de medición en función del efecto o daño que produce el sismo en las estructuras y en el medio ambiente; y la otra es la magnitud, que mide la cantidad de energía liberada por un sismo.

### **4.1.2.1. Intensidad.**

Un mismo sismo puede generar diversas intensidades en diferentes sitios. La intensidad de un sismo depende de las condiciones propias del sitio, tales como la organización urbana, el número de habitantes y su distribución espacial y las características estructurales de las edificaciones, así como también incluyen los efectos locales capaces de ser generados a causa de la geología del terreno (Vilchez, 2009). A manera de ejemplo, en un suelo blando, o un ambiente sedimentario, las intensidades pueden ser dos o tres veces más alta que la observada en una roca firme (Rodas, 2011). Así como se espera que la intensidad de un sismo disminuya a medida que el sitio está más distante del epicentro.

No exista una escala universal aceptada para determinar o medir la intensidad. Las escalas más precisas son las de tipo instrumental, que definen, por ejemplo, la intensidad en función de la aceleración máxima del terreno en el sitio de interés. La escala de intensidad más usada es la escala de Mercalli Modificada; representada por números romanos que van desde I hasta XII. La mayor debilidad de la escala de Mercalli es que toma en cuenta sólo marginalmente la calidad sismorresistente de los edificios que se encuentran en la zona afectada (Bazán & Meli, 1985).

### **4.1.2.2. Magnitud.**

La Magnitud es un valor único y es una medida cuantitativa del sismo relacionada con la energía sísmica liberada. Teóricamente, la magnitud no tiene límite superior, pero está limitada por la resistencia de las rocas en la corteza terrestre y la longitud de ruptura probable en la falla (Vilchez, 2009). Este parámetro no depende de la distancia a la que se encuentra el observador; se calcula determinando el logaritmo de la amplitud máxima de las ondas registradas en el sismógrafo, la escala es logarítmica, lo que significa que un temblor de magnitud 8.0, por ejemplo, produce un movimiento 10 veces más fuerte que el producido por uno de 7.0 (Rodas, 2011).

Actualmente existen una gran cantidad de escalas de magnitud, de las cuales, las más comunes o las más utilizadas son: la magnitud local, la magnitud de ondas superficiales, la magnitud de ondas internas y la magnitud de momento sísmico; estas dependen, principalmente, de las características del sismo y de la distancia de los instrumentos al epicentro. Es importante señalar estas escalas no son las únicas existentes.

- **Escala de magnitud local o escala de Richter.**

Es la primera escala de magnitud definida por Richter en 1935, fue desarrollada para terremotos superficiales y definidos para sismos locales en California. Depende de la diferencia de tiempo transcurrido entre la aparición de la onda P y onda S en el sismograma, así como la amplitud de estas ondas; por lo que esta escala solo funciona para sismos en los que los instrumentos se encuentran a una distancia menor a 600 Km con respecto al epicentro. También le denomina simplemente magnitud de Richter y su expresión matemática se muestra en la ecuación (4.1).

$$M_L = \log A - \log A_0 \quad (4.1)$$

Dónde:

$M_L$  = Magnitud local.

A = Amplitud máxima en milímetros, registrada por el sismógrafo de torsión Wood-Anderson (amplificación 2,800 y períodos de 0.85 segundos).

$A_0$  = 0.001 mm, amplitud de referencia, que corresponde a un terremoto como patrón de magnitud.

- **Magnitud de ondas superficiales.**

La magnitud de ondas superficiales se usa para calcular sismos a grandes distancias. Esta escala es utilizada para sismos que tienen focos superficiales y en el sismógrafo se encuentra a menos de 1000 Km del epicentro. Además el cálculo de estos sismos se realiza con las ondas superficiales de Rayleigh que tienen un período largo con frecuencias de 20 segundos (Rodas, 2011). Estos se definen de acuerdo a la ecuación (4.2).

$$M_s = \log \left( \frac{A}{T} \right) + 1,66 \log D + 3,3 S \quad (4.2)$$

Dónde:

$M_s$  = Magnitud de ondas superficiales

A= Amplitud vertical del terremoto, medida en micras ( $\mu\text{m}$ )

T = Período en segundos, con rangos de 18 a 22 segundos

D= Diámetro epicentral en grados geocéntricos (ángulo estación – Epicentro) rango entre 20° y 160°.

- **Magnitud de ondas internas.**

Las ondas internas se utilizan para calcular sismos a determinadas profundidades terrestres, ya que estos casi no generan ondas superficiales. Para este caso se utiliza la ecuación (4.3), definida por Gutenberg y Richter en 1956.

$$M_b = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Q(D, h) \quad (4.3)$$

Dónde:

$M_b$  =Magnitud de ondas internas.

A= Amplitud vertical del terremoto, medida en micras ( $\mu\text{m}$ )

T =Período en segundos, con rangos de 0.1 y 3.0 segundos

Q= Factor de atenuación, es una función de la distancia del epicentro ( $D \geq 5^\circ$ ) y la profundidad focal (h) en kilómetros.

- **Magnitud momento.**

Es una escala de magnitud que, a diferencia de las otras escalas, puede ser aplicada a temblores de cualquier tamaño. Para obtener esta magnitud se determina primeramente el momento sísmico del temblor, multiplicando el área de la ruptura y el desplazamiento neto de los bloques de la falla. El uso de estos parámetros hace que esta magnitud sea la más representativa del tamaño del temblor, en comparación a otras magnitudes que son calculadas solo con alguna fase sísmica en particular. Su expresión matemática se muestra en la ecuación (4.4).

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.70 \quad (4.4)$$

Dónde:

$M_w$  =Magnitud de momento sísmico.

$M_0$  =Momento sísmico.

Para el cálculo del momento sísmico se utiliza la ecuación (4.5).

$$M_0 = \mu * \Delta\mu * A \quad (4.5)$$

Dónde:

$\mu$ = coeficiente de rigidez o cizallamiento medio.

$\Delta\mu$ = Dislocación o separación media entre los planos involucrados en el rompimiento.

A =Área total del plano de rompimiento.

### 4.1.3. Amplificación de ondas sísmicas.

La amplificación sísmica consiste en una modificación de la señal sísmica, cuando viaja de la roca hacia el suelo. Esto causa variaciones en la amplitud y en el contenido de frecuencias de la señal en la superficie. Ese efecto tiende a causar una variación de la intensidad con un posible aumento en los daños a la infraestructura (Ramírez, Santana, & Chacón, 1996). Las amplitudes y formas de las ondas sísmicas dependen del mecanismo focal y de la cantidad de energía liberada, así como de la trayectoria y de las condiciones locales de sitio. Una vez emitidas por la fuente, las ondas sísmicas dependen fundamentalmente de las propiedades



de los medios en que se propagan y de las dimensiones de la falta de homogeneidad o irregularidades que encuentra en su trayecto (Grajales, 2003).

La amplificación es típicamente mayor para terremotos de magnitud pequeña en áreas a una cierta distancia epicentral donde sería esperable que las ondas sísmicas redujesen la amplitud debido a los efectos de atenuación en la propagación de la señal sísmica por el interior de la tierra.

Dos mecanismos contribuyen a los efectos de amplificación de la señal en el suelo: la amplificación geométrica y la amplificación dinámica (Rodríguez, 2009).

#### 4.1.3.1. Amplificación geométrica

Corresponde a los efectos de amplificación debidos al contraste de impedancias entre dos medios en contacto. Para sedimentos, el contraste de impedancias se expresa como:

$$I_c = \frac{\rho_r * V_r}{\rho_s * V_s} \text{ con } v_r > v_s \quad (4.6)$$

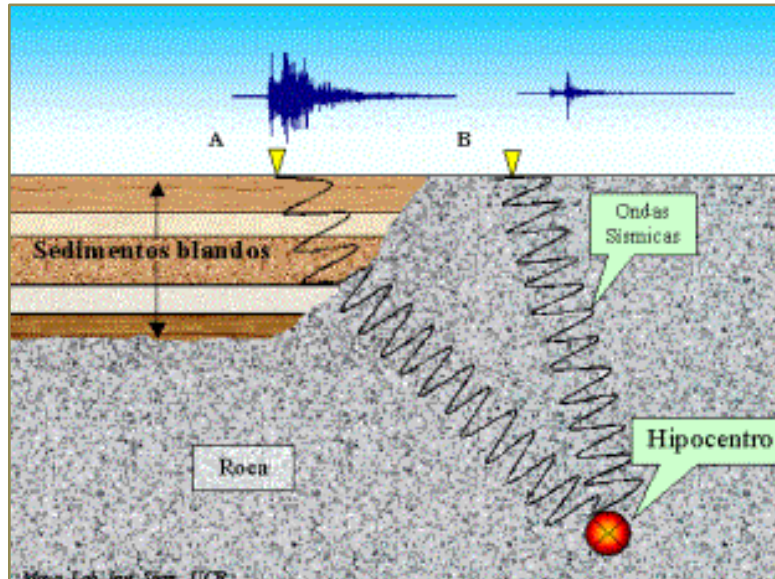
Dónde:

$I_c$  = Contraste de impedancia.

$V$  = Velocidad de onda, en el substrato rocoso (r) y en el nivel sedimentario (s).

$\rho$  = densidad, del substrato rocoso (r) y en el nivel sedimentario (s).

El contraste de impedancias es mayor en materiales más jóvenes y menos consolidados y esto provoca mayor nivel de amplificación de la señal sísmica. Los depósitos del suelo se comportan como filtros para la energía de alta frecuencia (o corto período) pero la amplificación de las bajas frecuencias puede causar daño potencial a estructuras que tienen frecuencias naturales bajas, como por ejemplo edificios altos y puentes.



**Figura 4.6.** Propagación de la onda sísmica en diferentes tipos de estratos de suelo. A) Suelos blandos, B) Roca. (Strauch, 2000).

#### 4.1.3.2. Amplificación dinámica.

También se conoce como efecto de resonancia. Este efecto considera la diferencia entre la frecuencia de las ondas sísmicas y la frecuencia del depósito sedimentario. Para esto se utiliza la siguiente expresión matemática, conocida como la ecuación del cuarto de onda.

$$f_n = \frac{v_s}{4H} \quad (4.7)$$

Dónde:

$f_n$  = Frecuencia natural del depósito sedimentario (Hertz).

$v_s$  = Velocidad de onda de corte (m/s).

$H$  = Espesor del sedimento (m).

Sí la frecuencia de la onda sísmica es aproximadamente igual a la frecuencia natural del depósito se produce amplificación, incrementándose la amplitud del movimiento del suelo significativamente.

Los fenómenos que contribuyen a la amplificación de la señal sísmica están relacionados directamente con la velocidad de las ondas de corte en el depósito. Las amplitudes del movimiento del suelo en materiales con baja velocidad de propagación de las ondas sísmicas son mayores, dado que la velocidad de la partícula y la velocidad de las ondas sísmicas son inversamente proporcionales.

#### 4.1.4. Período y frecuencia natural del suelo.

El período de modo fundamental, también llamado período característico o simplemente llamado período del suelo, se define como la relación entre el espesor del estrato

considerado del suelo y la velocidad de las ondas de corte del mismo (Mazuera & González, 2009). El período fundamental del suelo ( $T_s$ ), es uno de los indicadores más usados mundialmente para estimar los efectos locales de los suelos al ser sometidos a sollicitaciones sísmicas (Bermúdez, Franco, & Martínez, 2002).

#### 4.2. Métodos geotécnicos para caracterización de sitio.

Desde mucho tiempo antes del inicio formal de la mecánica de suelos en la década de 1920, había interés entre los constructores en determinar las características de los suelos (caracterización de suelos), para poder diagnosticar el comportamiento de éstos al construir sobre ellos, con ellos o dentro de ellos. A finales del siglo XVII se desarrolló en Alemania a la que se puede considerar como precursora de las pruebas de penetración, y consistía en hincar mediante impactos una varilla que terminaba en punta (Díaz, 2007).

Entre las pruebas geotécnicas podemos mencionar la prueba del cono dinámico, la cual se lleva a cabo utilizando un martinete con caída libre para hincar un cono de acero (Díaz, 2007). Además se puede mencionar la prueba de CPT (Cone penetration test), también llamada prueba del cono estático o cono holandés, que consiste en hincar a presión un cono de acero de 35.7mm de diámetro ( $10\text{cm}^2$  de sección transversal), cuya punta tiene un ángulo de  $60^\circ$  (Díaz, 2007).

##### 4.2.1. Prueba de penetración estándar (SPT)

El procedimiento, condiciones y parámetros para el ensayo de SPT, se encuentra en la norma (ASTM-D1586-08). El ensayo de penetración estándar (SPT) es uno de los más utilizados en ingeniería geotécnica. Esta prueba consiste en obtener muestras de suelo mediante la hincada de un muestreador al ser impactado con un martillo de 63.6 Kg, en caída libre, desde una altura de 76 cm. El objetivo de la prueba es conocer el número de golpes necesarios para introducir el muestreador 45 cm, en 3 intervalos de 15 cm, tomando el número de golpes para hincar los 30 cm finales, éste número de golpes se denomina " $N_{\text{golpe}}$ ".

Para la prueba de SPT el equipo utilizado es: Martillo de 63.5Kg, guía, barras de perforación, toma muestras partido estándar, polea, trípode, motor y malacate. Ver Figura 4.10.

El valor de " $N$ " es el número de golpe hincado en los últimos 30 cm de penetración. Los resultados del ensayo del SPT dependen en forma significativa del equipo utilizado y la experiencia del operador, obtener resultados confiables presenta cierta dificultad (Ludeña, 2007). (ASTM-D1586-08) Establece factores de corrección de número de golpes en función del nivel de la presión de confinamiento, relación de energía del martillo, longitud de la barra de perforación, toma-muestra y el diámetro de la perforación; además, en casos particulares, se toma en cuenta la corrección del número de golpe cuando hay presencia del nivel freático; obteniendo el denominado  $N_{\text{corregido}}$ .

$$N_{\text{corregido}} = N_{\text{campo}} * C_n * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4 \quad (4.8)$$

Dónde:

$N_{\text{corregido}}$  = Número de golpes corregido.

$N_{\text{campo}}$  = Número de golpes de campo.

$C_n$  = Presión de confinamiento.

$\eta_1$  = Relación de energía del martillo.

$\eta_2$  = Longitud de barra de perforación.

$\eta_3$  = Tomamuestra.

$\eta_4$  = Diámetro de perforación.

En caso de haber presencia de nivel freático la expresión es la siguiente:

$$N_{\text{corregido}} = 15 + 0.5(N_{\text{campo}} - 15) \quad (4.9)$$

Esta corrección solo se realiza cuando  $N_{\text{campo}}$  es mayor que 15.

La corrección del número de golpe está a criterio del diseñador. Generalmente, el N solamente se corrige por presión de confinamiento y por relación de energía, que son los factores más notorios y frecuentes que generan incertidumbre en el resultado del ensayo.

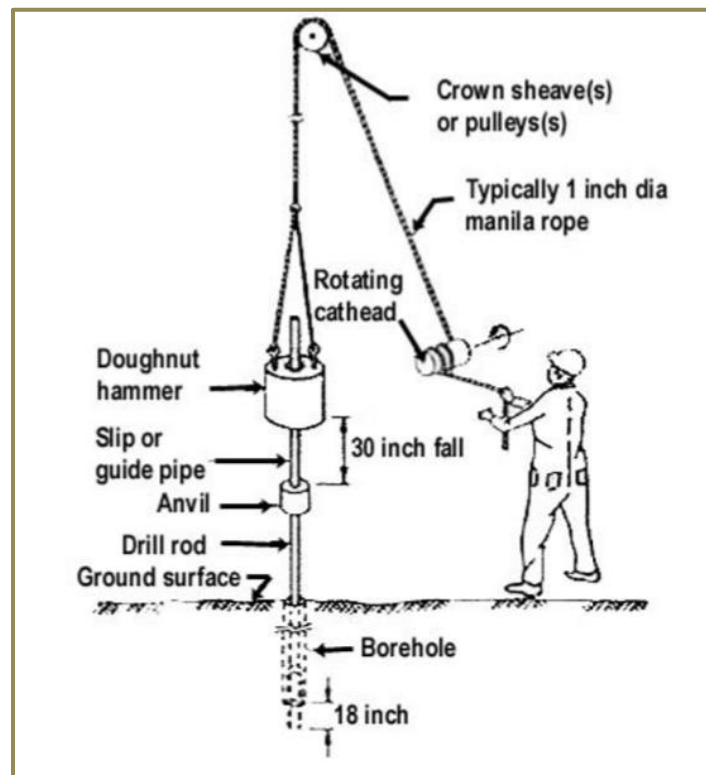


Figura 4.7. Ejecución del ensayo de penetración estándar (Decourt et al, 1988).

- **Corrección por confinamiento.**

La presión de confinamiento se evidencia en las diferencias de peso de las capas superyacentes al nivel del ensayo, en los suelos no cohesivos, tiene incidencia en el valor de

N, en el siguiente sentido: para dos suelos sin cohesión de la misma densidad, el de mayor presión de sobrecapa preenta el mayor valor de N. Por esa razón, se modifica el valor de N para incluir el efecto de la presión de sobrecapa (Castrillo & Ulloa, 2005).

Distintos investigadores, mediante diversos estudios, proponen expresiones matemáticas para corregir el número de golpes en función de la presión de confinamiento, como se muestra en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Corrección de  $N_{campo}$  por confinamiento (VII Jornada geotécnica de la ingeniería colombiana) en: (Castrillo & Ulloa, 2005).

| Autor (es)        | Fórmula  |
|-------------------|--|
| Peck              | $C_n = 0.77 \log \left( \frac{20}{P_a} \right)$  |
| Seed              | $C_n = 1 - 1.25 * \log(P_a)$   |
| Meyerhof & Ishira | $C_n = \frac{1.7}{0.7 + P_a}$  |
| Liao & Whitman    | $C_n = \left( \frac{1}{P_a} \right)^{0.5}$   |
| Skempton          | $C_n = \frac{2}{1 + P_a}$  |
| Seed & Idris      | $C_n = 1 - K \log(P_a)$<br>Sí $P_a < 1 \Rightarrow K = 1.41$<br>Sí $P_a \geq 1 \Rightarrow K = 0.92$ |
| Logaritmo         | $C_n = \log \left( \frac{10}{P_a} \right)$   |
| Schmertmann       | $C_n = \left( \frac{32.5}{10.2 + 20.3 P_a} \right)$  |

Se recomienda que  $C_n \leq 2$ ; para esta condición, la formulación de Skempton es la única que cumple con esta condición.

$$P_a = \frac{\gamma h}{P_{atm}} \tag{4.10}$$

Dónde:

$P_a$ = Presión por confinamiento.

$\gamma$ = Peso específico del suelo.

$h$ = Profundidad de análisis.

$P_{atm}$ = Presión atmosférica (1 Kg/cm<sup>2</sup>).

- **Corrección por energía.**

La energía que el martillo proporciona al tomamuestra es muy variable y sensible debido a los muchos factores que influyen al realizar esta operación. Al momento de liberar el martillo, éste posee una cierta energía, pero al momento en que éste golpea el tomamuestra la

energía inicial ha variado. Por esta razón debe corregirse el valor de N, en lo que influye o se considera en gran parte, al tipo de equipo utilizado (Villafañe, 1998).

**Tabla 4.2.** Valores de  $\eta_1$ , según el tipo de martillo y procedimiento utilizado en la prueba (López, 2003), (Gallardo, 2005).

| País     | Tipo de martillo | Procedimiento                           | $\eta_1$ |
|----------|------------------|---|----------|
| Japón    | Anular           | Caída libre                             | 1.30     |
|          | Anular           | Cuerda con polea especial tirado a mano | 1.12     |
| E.E.U.U. | Seguridad        | Cuerda con polea tirado a mano          | 1        |
|          | Anular           | Caída libre                             | 0.75     |
| Europa   | Anular           | Caída libre                             | 1        |
| Colombia | Anular           | Cuerda con polea tirado a mano          | 0.75     |

### 4.3. Criterios para caracterización de sitio.

El suelo de cada sitio tiene características propias, mismas que se determinan en función de las condiciones del modelo geológico del sitio. Tales características son: velocidad de onda de corte, clasificación dinámica y estática del subsuelo o clasificación de sitio, período fundamental del suelo y factor de amplificación. Estas características son empleadas para describir las condiciones mecánicas, hidráulicas e ingenieriles del suelo, permitiendo determinar el uso debido para un tipo de construcción, con la finalidad de disminuir el riesgo sísmico del sitio.

#### 4.3.1. Velocidad de onda de corte.

La velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) es uno de los parámetros más importantes para la clasificación de suelos y rocas, ya que describe confiablemente las características estáticas y dinámicas de los materiales (Alfaro, 2007). Es una de las principales provisiones sísmicas en la construcción, ya que las propiedades elásticas de los suelos en la superficie tienen un rol fundamental en la respuesta sísmica de sitio (Castillo & Zepeda, 2013).

Determinar la velocidad de propagación de onda de corte es muy importante, ya que este parámetro permite conocer o determinar otros diferentes aspectos geotécnicos, mismos que muchos autores resaltan, por ejemplo (Aponte, 2011), que menciona los siguientes:

- Módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G).
- Densidad de campo.
- Estimar estados de esfuerzos.

#### 4.3.1.1. Velocidad media de onda de corte en los primeros 30 metros ( $V_{s30}$ ).

El parámetro  $V_{s30}$  se define como la velocidad de propagación de onda de corte en los primeros treinta metros de profundidad del subsuelo; determinando las velocidades de cada uno de los estratos ubicados dentro de esta profundidad para, posteriormente, determinar la velocidad promedio. La ecuación (4.11) describe el  $V_{s30}$ :

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{s_i}}} \quad (4.11)$$

Dónde:

$$\sum_{i=1}^n d_i = 30m \quad (4.12)$$

$n$  = Número de estratos.

$V_{s_i}$  = Velocidad de onda de corte en el estrato  $i$  (m/s).

$d_i$  = Espesor del estrato  $i$  (m).

La velocidad de onda cortante en los primeros 30 m de los depósitos de suelo es un factor importante en los métodos modernos para determinar riesgo sísmico (Obando, 2006). En gran cantidad de reglamentos y normas se establece esta característica como parámetro para la clasificación de sitio. Así mismo es una de las principales provisiones sísmicas en la construcción ya que las propiedades elásticas de los suelos en la superficie tienen un rol fundamental en la respuesta sísmica de sitio (Castillo & Zepeda, 2013).

#### 4.3.1.2. Correlaciones empíricas $V_s$ -N del SPT.

Determinar velocidades de onda a través del uso de ensayos de SPT, es relativamente sencillo; por medio del uso de expresiones empíricas basadas en la cantidad de número de golpe por pie de penetración. Estas correlaciones depende de la información de una base de datos internacional; por lo que no pueden ser consideradas particularmente exactas en algunos casos, porque el SPT no es estandarizado completamente en todo los países y, por consiguiente, es importante que los usuarios del SPT y lo datos que proporciona tengan en cuenta los factores que controlan el ensayo (Ludeña, 2007).

En extensos estudios realizados en Japón se han propuesto correlaciones ente el N (SPT) con las propiedades del suelo  $V_s$  y  $G$ ;  $V_s$  esta m/s y N se considera para una eficiencia de energía del 67% de la energía teórica máxima (Ludeña, 2007).

La forma de analizar los datos para llegar a una correlación se basa en un procesamiento estadístico, por medio de regresión lineal (Alfaro, 2007).



- **Regresión simple.**

$$Vs = f(h) \quad (4.13.1)$$

$$Vs = f(N) \quad (4.13.2)$$

- **Regresión Múltiple.**

$$Vs = f(h, N) \quad (4.14)$$

En un estudio realizado por (Ohta & Goto, 1978), obtuvieron ecuaciones empíricas para determinar la velocidad de ondas de corte en suelos, en términos de cuatro parámetros; estos son los valores de N del SPT, la profundidad donde se realiza la medición, la época geológica y el tipo de suelo. Estas ecuaciones se obtuvieron de acuerdo a un grupo de datos recopilados en llanuras aluviales en Japón. Así mismo, desde aquellos años hasta esta época, se han venido desarrollando muchas correlaciones, en distintos sitios, tomando en cuenta las características del suelo.

**Tabla 4.3.** Correlaciones empíricas N-Vs para distintos tipos de suelos (Stharam & Anbazhagan, 2013) y (Parrales & Picado, 2001).

| Autores                     | Correlaciones empíricas (N-Vs) |                     |                        |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|
|                             | Todo tipo de suelos            | Arena               | Arcilla                |
| Kanai (1966)                | $19N^{0.6}$                    | ----                | ----                   |
| Ohba and Toriumi (1970)     | $84N^{0.31}$                   |                     | ----                   |
| Shibata (1970)              | ----                           | $32N^{0.5}$         | ----                   |
| Imai and Yoshimura (1970)   | $76N^{0.33}$                   | ----                | ----                   |
| Fujiwara (1972)             | $92.1N^{0.337}$                | ----                | ----                   |
| Ohta et al. (1972)          | ----                           | $87N^{0.36}$        | ----                   |
| Imai and Yoshimura (1975)   | $82N^{0.39}$                   | ----                | ----                   |
| Imai y Fumoto (1975)        | ----                           | $89.8N^{0.0.341}$   | ----                   |
| Imai (1977)                 | $92N^{0.329}$                  | ----                | ----                   |
| Ohta and Goto (1978)        | $91N^{0.337}$                  | $80.6N^{0.331}$     | $80.2N^{0.292}$        |
| JRA (1980)                  | ----                           | $80N^{0.33}$        | $100N^{0.33}$          |
| Seed and Idriss (1981)      | $61N^{0.5}$                    | ----                | ----                   |
| Imai                        | ----                           | $80.6N^{0.51}$      | ----                   |
| Sykora and Stokoe (1983)    | ----                           | $100.5N^{0.29}$     | ----                   |
| Jinan (1987)                | $116.1(N+0.3185)^{0.202}$      | ----                | ----                   |
| Lee (1990)                  | ----                           | $57.4N^{0.49}$      | $114.43N^{0.31}$       |
| Sisman (1995)               | $32.8N^{0.51}$                 | ----                | ----                   |
| Iyisan (1996)               | $51.5N^{0.516}$                | ----                | ----                   |
| Jafari et al. (1997)        | $22N^{0.85}$                   | ----                | ----                   |
| Pitilakis et al. (1999)     | ----                           | $145N_{60}^{0.178}$ | $132N_{60}^{0.271}$    |
| Kiku et al. (2001)          | $68.3N^{0.292}$                | ----                | ----                   |
| Jafari et al. (2002)        | ----                           | ----                | $27N^{0.73}$           |
| Hasancebi and Ulusay (2007) | $90N^{0.308}$                  | $90.82N^{0.319}$    | $97.89N^{0.269}$       |
| Hasancebi and Ulusay (2007) | $104.79N_{60}^{0.26}$          | $131N_{60}^{0.205}$ | $107.63N_{60}^{0.237}$ |



|                                    |                  |                   |                  |
|------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|
| <b>Uma Maheswari et al. (2010)</b> | $95.64N^{0.307}$ | $100.53N^{0.265}$ | $89.31N^{0.358}$ |
| <b>Anbahagan et al. (2012)</b>     | $68.96N^{0.51}$  | $60.17N^{0.56}$   | $106.63N^{0.39}$ |

#### 4.3.2. Clasificación de sitio.

Para la clasificación de sitio existen diversas normativas y reglamentos que establecen distintos parámetros para determinar el tipo de sitio, según características propias de la región; es por eso que, por lo general, cada país o región tiene una normativa propia para la clasificación de sitio. Entre estas normativas se pueden mencionar las siguientes: EUROCODE 8 (Parte 1), FEMA 450 (NEHRP), NCh433, NCES-02, además, El Reglamento Nacional de la Construcción de Nicaragua (RNC-07).

##### 4.3.2.1. FEMA 450.

Esta norma clasifica los suelos en función de: Parámetro  $V_{s30}$ ,  $N_{SPT}$  (Número de golpes del ensayo de penetración estándar) y  $C_u$  que se define como la resistencia al corte sin drenar.

*Tabla 4.4. Clasificación de sitio según FEMA 450 (NEHRP, 2003).*

| Tipo de sitio | Descripción                                    | $V_s$ (m/s)  | $\dot{N}$                 | $S_u$ (KPa)            |
|---------------|--|--|---------------------------|------------------------|
| <b>A</b>      | Roca fuerte                                    | $V_s > 1500$   | -                         | -                      |
| <b>B</b>      | Roca   | $1500 \geq V_s > 760$  | -                         | -                      |
| <b>C</b>      | Suelo muy denso y roca blanda                  | $760 \geq V_s > 360$   | $\dot{N} > 50$            | $S_u > 100$            |
| <b>D</b>      | Suelo rígido                                   | $360 \geq V_s \geq 180$  | $50 \geq \dot{N} \geq 15$ | $100 \geq S_u \geq 50$ |
| <b>E</b>      | Suelo blando                                   | $V_s < 180$  | $\dot{N} < 15$            | $S_u < 50$             |
|               |  | Se considera suelo blando cualquier capa de suelo arcillosa con más de 3 m de espesor que tenga las siguientes características:<br>1) Índice de plasticidad $PI > 20$ .<br>2) Contenido de humedad $w \geq 40\%$<br>3) Resistencia al corte sin drenar $S_u < 25$                                    |                           |                        |
| <b>F</b>      | Suelos que requieren una evaluación específica | 1) Suelos que podrían sufrir licuefacción durante un sismo fuerte.<br>2) Turbas y/o arcillas con una gran cantidad de material orgánico con más de 3m de espesor.<br>3) Arcillas de alta plasticidad con más de 8m y $PI > 75$ .<br>4) Arcillas blandas con un espesor mayor a 36m y $S_u < 50$ KPa. |                           |                        |

Los parámetros usados para definir la clasificación de sitio están establecidos para una profundidad mínima de 30 m. La definición de cada uno de estos parámetros se muestra a continuación, destacando que el símbolo  $i$  hace referencia a cualquier estrato entre 1 y  $n$ .

La velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) se determina según la ecuación (4.11), definida en la sección (4.3.1.1.).

El parámetro  $N$  del SPT, para clasificación de suelos, se calcula según la ecuación (4.15).

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (4.15)$$

Dónde:

$N_i$  = Resistencia a la penetración estándar, determinada según ASTM D 1586, directamente medida en el campo sin correcciones.

Para clasificar según la resistencia al corte sin drenar, se determinará la resistencia de cada estrato según ASTM D 2166; y la resistencia promedio en los primeros 30 m. Se define según la ecuación (4.16).

$$S_u = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{S_{u_i}}} \quad (4.16)$$

Dónde:

$S_{u_i}$  = Resistencia al corte sin drenar del estrato  $i$ .

Hay que señalar que el parámetro PI (Índice de plasticidad) se debe determinar según la norma ASTM D 4318; y el parámetro  $w$  (Porcentaje de humedad) se determina de acuerdo a la norma ASTM D 2216.

#### 4.3.2.2. EUROCODE 8.

El EUROCODE 8, en su parte 1, define tipos de terreno, los cuales se clasifican de acuerdo a las condiciones locales del terreno, que son tomadas como parámetros, las cuales son:  $V_{s30}$ ,  $N_{SPT}$  (Número de golpes del ensayo de penetración estándar) y  $C_u$  que se define como la resistencia al corte sin drenar. Además se establecen, para ciertos tipos de suelo, características como el índice de plasticidad, contenido de humedad de los suelos y cierta clasificación mecánica de los suelos.

**Tabla 4.5. Clasificación del Terreno (EUROCODE 8).**

| Tipo de terreno      | Descripción   | Parámetros     |                                    |               |
|----------------------|---|----------------|------------------------------------|---------------|
|                      |   | Vs30 (m/s)     | N <sub>SPT</sub><br>(Golpes/30 cm) | Cu (KPa)      |
| <b>A</b>             | Roca u otra formación geológica similar a roca, incluyendo como máximo 5 m de material más débil en superficie.   | Vs > 800       | -                                  | -             |
| <b>B</b>             | Depósitos de arena muy densa, gravas, o arcilla muy dura, de al menos, varias decenas de metros de espesor caracterizado por un incremento de las propiedades mecánicas en profundidad. | 800 ≥ Vs > 360 | N > 50                             | Cu > 250      |
| <b>C</b>             | Depósitos profundos arena densa o de densidad media, grava o arcilla dura con un espesor de unas decenas de metros hasta muchos centenares de metros.                                   | 360 ≥ Vs > 180 | 50 ≥ N > 15                        | 250 ≥ Cu > 70 |
| <b>D</b>             | Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo, con o sin algunas capas de débil cohesión, o de suelo de ligera a gran cohesión predominantemente                            | Vs < 180       | N < 15                             | Cu > 70       |
| <b>E</b>             | Un perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial con valores de Vs de tipo C o D, y con un espesor entre 5 y 20 m, encima de un material duro de Vs > 800 m/s.               | -              | -                                  | -             |
| <b>S<sub>1</sub></b> | Depósitos consistiendo o conteniendo una capa de 10 m de espesor como mínimo, con arcillas/limos blandos con un índice de plasticidad alto (IP > 40) y un alto contenido de agua.       | Vs < 100       | -                                  | 20 ≥ Cu > 10  |
| <b>S<sub>2</sub></b> | Depósitos de suelos licuefactables, arcillas sensibles, o cualquier otro perfil no incluido entre los tipos A a E o S <sub>1</sub> .  | -              | -                                  | -             |

#### 4.3.2.3. Norma NCES-02.

La norma NCES-02, es la Norma de Construcción Sismorresistente de España. Esta norma clasifica los suelos tomando como parámetro la velocidad de onda de corte, transversal o de cizalla, en los primeros 30m de profundidad a partir de la superficie.

**Tabla 4.6.** Clasificación del terreno (Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, 2002).

| Tipo de terreno | Descripción   | Parámetro Vs (m/s)   |
|-----------------|---|----------------------|
| I               | Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso.                                    | $V_s > 750$          |
| II              | Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros.                        | $750 \geq V_s > 400$ |
| III             | Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. | $400 \geq V_s > 200$ |
| IV              | Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando  | $V_s \leq 200$       |

#### 4.3.2.4. NCh433.

La norma oficial chilena clasifica los suelos en función de:  $V_{s30}$ ,  $N_{SPT}$  (Número de golpes del ensayo de penetración estándar) y  $C_u$  que se define como la resistencia al corte sin drenar.

**Tabla 4.7.** Clasificación de sitio (NCh433) En: (Escorcía & Ochoa, 2013).

| Tipo de suelo | Descripción   |
|---------------|---|
| I             | Roca: Material natural, con velocidad de propagación de ondas de corte in-situ igual o mayor que 900 m/s; o bien, resistencia a la compresión uniaxial de probetas intactas (sin fisuras) igual o mayor que 10 MPa y RQD igual o mayor que 50%.   |
| II            | <p>a) Suelo con <math>V_s</math>, igual o mayor que 400 m/s en los 10m superiores y creciente con la profundidad.</p> <p>b) Grava densa, con peso unitario seco igual o mayor que 20 KN/m<sup>3</sup>, o índice de densidad ID (DR) (densidad relativa) igual o mayor que 75%, o grado de compactación mayor que 95% del valor Próctor modificado.</p> <p>c) Arena densa, con ID (DR) mayor que 75% o índice de penetración estándar N mayor que 40 (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0.10 MPa), o grado de compactación superior al 95% del valor Próctor modificado.</p> <p>d) Suelo cohesivo duro, con resistencia al corte no drenado <math>S_u</math>, igual o mayor que 0.10 MPa (Resistencia a la compresión simple igual o mayor que 0.20MPa) en probetas sin fisuras.</p> <p>En todos los casos, las condiciones indicadas se deben cumplir independientemente de la posición del nivel friático y del espesor mínimo del estrato debe ser 20m. Sí el espesor sobre la roca es menor que 20m, el suelo se debe clasificar como Tipo I.</p> |

|            |   |
|------------|---|
| <b>III</b> | <p>a) Arena permanente no saturada, con ID (DR) entre 55 y 75%, N mayor que 20 (Sin normalizar a la presión efectiva de sobrecarga de 0.10 MPa).</p> <p>b) Grava o arena no saturada, con grado de compactación menor que el 95% del valor Próctor modificado.</p> <p>c) Suelo cohesivo con <math>S_u</math> comprendido entre 0.025 y 0.10 MPa (<math>q_u</math> entre 0.20 MPa) independiente del nivel freático.</p> <p>d) Arena saturada con N comprendido entre 20 y 40 (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0.10 MPa).</p> <p>Espesor mínimo del estrato: 10m. Sí el espesor del estrato sobre la roca o sobre suelo correspondiente al Tipo III es menor, el suelo se debe clasificar como Tipo II.</p> |
| <b>IV</b>  | <p>Suelo cohesivo saturado con <math>S_u</math> igual o menor que 0.025 MPa (<math>q_u</math> igual o menor que 0.05 MPa).</p> <p>Espesor mínimo del estrato: 10m. Sí el espesor del estrato sobre suelo correspondiente a algunos de los tipos I, II o III es menor que 10m, el suelo se debe clasificar como tipo IV.</p>   |

#### 4.3.2.5. Código USGS.

Este código clasifica los suelos en función del parámetro velocidad de onda de corte ( $V_s$  30).

**Tabla 4.8.** Clasificación de sitio según USGS (Peer Berkeley Database).

| Tipo de sitio | $V_s$ (m/s) |
|---------------|-------------|
| <b>A</b>      | >750        |
| <b>B</b>      | 360-750     |
| <b>C</b>      | 180-360     |
| <b>D</b>      | <180        |

#### 4.3.2.6. Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07).

El reglamento nacional de la construcción más reciente establece que se deben tomar en cuenta los efectos de amplificación sísmica, debido a las características del terreno. Estos se clasifican cuatro tipos, estableciéndose como único parámetro la velocidad de corte ( $V_s$ ).

**Tabla 4.9.** Clasificación de suelos (MTI, 2007).

| Tipo de sitio | Descripción                | $V_s$ (m/s)  |
|---------------|----------------------------|--|
| <b>I</b>      | Afloramiento Rocoso        | $V_s > 750$  |
| <b>II</b>     | Suelo firme                | $750 \geq V_s > 360$   |
| <b>III</b>    | Suelo moderadamente blando | $360 \geq V_s > 180$   |
| <b>IV</b>     | Suelo muy blando           | <p style="text-align: center;"><math>V_s &gt; 180</math></p> <p>Es necesario construir espectros de sitio específicos, siguiendo los requisitos establecidos en este reglamento.</p> |

Se establecen las siguientes observaciones:

- Los suelos propensos a licuarse no se incluyen en ninguno de los anteriores tipos de sitio.
- Siendo la  $V_s$  la velocidad promedio de ondas de corte calculada a una profundidad no menor de 10m.

#### **4.4. Evaluación de la respuesta sísmica de sitio.**

En la actualidad uno de los problemas más importantes y comunes en la ingeniería sísmica es la evaluación de la respuesta de sitio. Se utiliza para predecir los efectos de movimientos de superficie ante la propagación de ondas mediante espectro de respuesta de diseño, evaluando los esfuerzos dinámicos y deformaciones para la evaluación de riesgos de licuefacción y determinar las fuerzas sísmicas inducidas que pueden afectar la estabilidad de las estructuras (Kramer, 1996).

##### **4.4.1. Efecto de sitio.**

Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional (CENAPRED, 1999).

Según (Castro, 2011), efecto de sitio se refiere a la influencia de las propiedades y geometría local del suelo, la topografía superficial del terreno y las características del movimiento sísmico, en la amplitud de las ondas sísmicas y a su vez en todas las particularidades de un movimiento fuerte en superficie, como son la amplitud, el contenido frecuencia y su duración. Como el efecto de sitio se manifiesta en los estratos superficiales de la corteza terrestre, para cuantificarlo es necesario determinar la respuesta dinámica de la estratigrafía de suelo en el lugar de interés (Hernández, 2009). En la naturaleza, el subsuelo puede presentarse como un depósito de suelos con diferentes propiedades índice y mecánicas cuya base es una formación rocosa. La profundidad de la roca basal podría estar a varias decenas o centenas de metros bajo la superficie del terreno.

El efecto se puede clasificar en dos tipos, según (CENAPRED, 1999), y son: Amplificación del movimiento en cuerpos sedimentarios superficiales y amplificación relacionada con topografía superficial.

##### **4.4.1.1. Amplificación del movimiento en cuerpos sedimentarios superficiales.**

Este fenómeno tiene, actualmente, especial importancia para las estimaciones de riesgo sísmico, ya que un buen número de ciudades importantes en el mundo se ha desarrollado en planicies aluviales (CENAPRED, 1999). Algunas se encuentran dentro o muy cercanas a zonas de alta sismicidad, en otros casos a decenas o cientos de kilómetros de ellas. Sin embargo, las distancias grandes con respecto a la zona sismogénica no significan que los niveles de amplificación del movimiento del terreno tengan que ser reducidos ya que una de

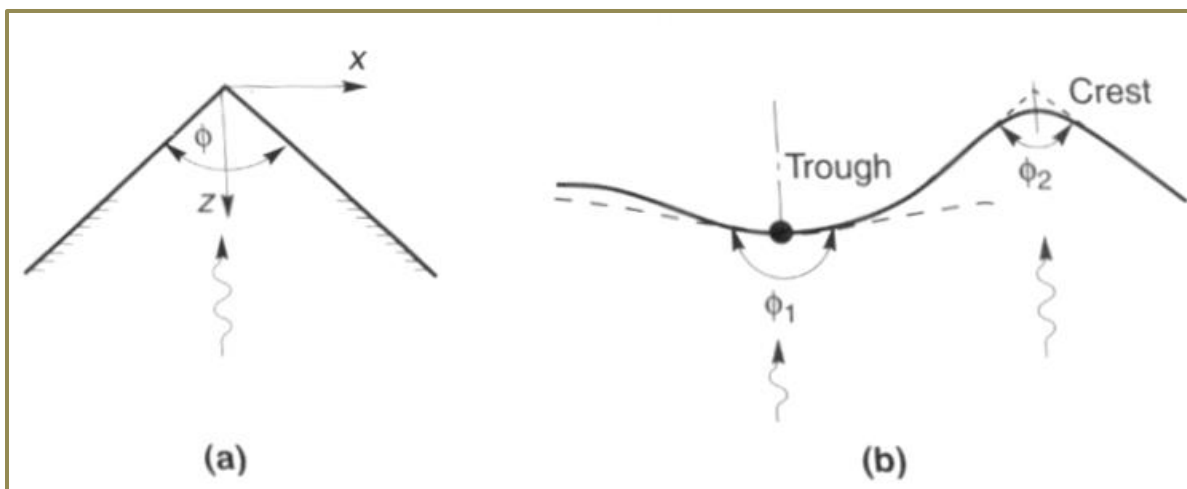


las causas principales del fenómeno de amplificación de las ondas es el alto contraste de impedancias acústicas que se tiene entre el cuerpo sedimentario superficial y el basamento rocoso.

#### 4.4.1.2. Amplificación relacionada con la topografía superficial.

Con base en el análisis de modelos teóricos y numéricos, se ha determinado que el movimiento sísmico puede estar sujeto a amplificación, principalmente en componentes horizontales, en los altos topográficos (áreas convexas) y a de amplificación en zonas intermontanas (áreas cóncavas), especialmente donde los espesores de suelo son muy reducidos.

Este fenómeno ha sido reportado al observarse daños muy acentuados en áreas construidas en partes altas de colinas con respecto a aquellas en la base. Uno de los casos más sobresalientes, estudiado instrumentalmente en los Alpes, mostró factores de amplificación de algunas decenas en frecuencias alrededor de 5 Hz.



**Figura 4.8.** Caracterización de irregularidades topográficas simples a) Caso de cuña triangular, b) Cresta y valle (Rodríguez, 2009).

#### 4.4.2. Métodos para la evaluación de la respuesta sísmica de sitio.

A partir de la información disponible, es posible ubicar puntos de interés en el lugar de estudio para registrar movimientos sísmicos del terreno, lo que se conoce como la determinación de las *microzonas*, o zonas con gran potencial sísmico (Hernández, 2009).

Se emplean diferentes métodos para evaluar el comportamiento dinámico de cada microzona, determinar las propiedades de los suelos y cuantificarlas. Algunos de estos métodos se presentan en la figura 4.12.



Figura 4.9 Métodos aplicados al estudio de efecto de sitio (Hernández, 2009).

#### 4.4.2.1. Función de transferencia.

Los problemas reales en la respuesta real de los suelos usualmente involucran depósitos de suelo, los cuales presentan características de rigidez y amortiguamiento con fronteras en las que las ondas de energía serán reflectadas y/o transmitidas. Dichas condiciones requieren del desarrollo de funciones de transferencia para suelos de multiestratos (Kramer, 1996).

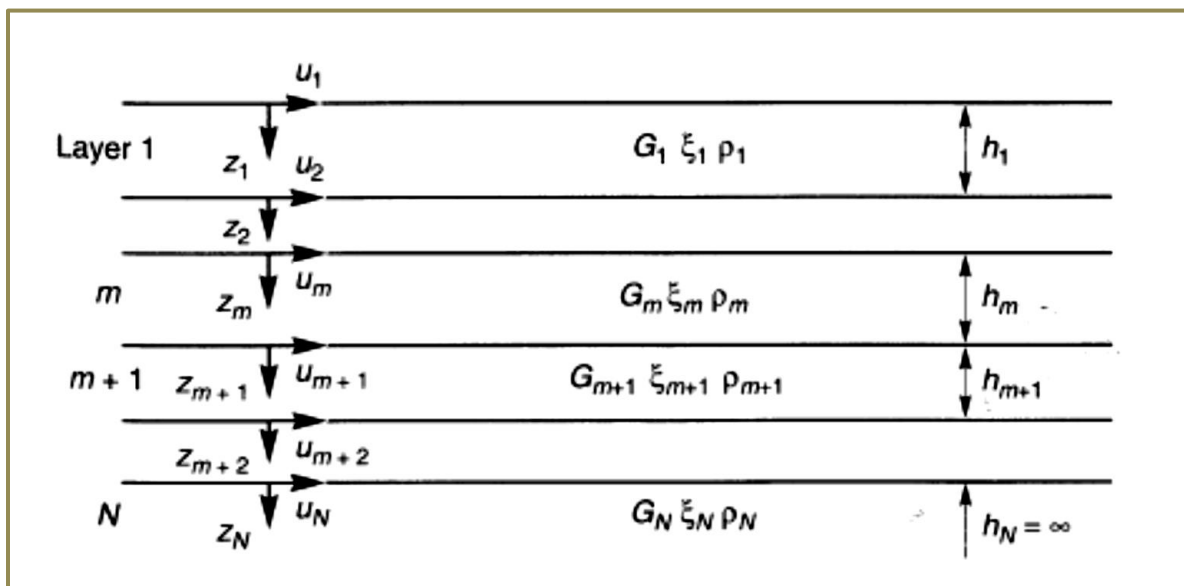


Figura 4.10. Nomenclatura para un depósito de suelo en roca elástica (Kramer, 1996)

Considerando un depósito de suelo basado en un número de estratos N, donde la última capa es considerada roca. Asumiendo que cada capa tiene un comportamiento como un sólido Kelvin-Voigt, la ecuación de onda dada por la ecuación 4.17.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{G}\boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\eta}\dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (4.17)$$

La solución de dicha ecuación está dada por:

$$\mathbf{u}(\mathbf{z}, t) = \mathbf{A}e^{i(\omega t + k^*z)} + \mathbf{B}e^{i(\omega t - k^*z)} \quad (4.18)$$

Donde A y B representan la amplitud de las ondas transmitidas en las direcciones  $-z$  (hacia arriba) y  $+z$  (Hacia abajo).

La ecuación de módulo de corte complejo está dada por:

$$\mathbf{G}^* = \mathbf{G}(1 + 2\xi) \quad (4.19)$$

Mientras que la ecuación para la calcular la velocidad de corte compleja puede ser expresada por:

$$V^*_s = \sqrt{\frac{\mathbf{G}^*}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mathbf{G}(1 + 2\xi)}{\rho}} \sim \sqrt{\frac{\mathbf{G}}{\rho}} (1 + 2\xi) = v_s (1 + 2\xi) \quad (4.20)$$

Por lo tanto para pequeñas deformaciones, el número complejo de onda puede reescribirse de la siguiente manera:

$$k^* = \frac{\omega}{V^*_s} = \frac{\omega}{v_s (1 + i\xi)} = \frac{\omega}{v_s} (1 + i\xi) = k(1 + i\xi) \quad (4.21)$$

Dadas las ecuaciones anteriores, el esfuerzo cortante está dado por el producto de un módulo de corte complejo ( $\mathbf{G}^*$ ) y deformaciones de corte, entonces:

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{z}, t) = \mathbf{G}^* \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{z}} = (\mathbf{G} + i\omega\boldsymbol{\eta}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{z}} = \mathbf{G}(1 + 2i\xi) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{z}} \quad (4.22)$$

Introduciendo un sistema de coordenadas local Z, para cada estrato, el desplazamiento en la parte superior e inferior es,

$$\mathbf{u}_m(\mathbf{z}_m = \mathbf{0}, t) = (\mathbf{A}_m + \mathbf{B}_m)e^{i\omega t} \quad (4.23)$$

$$\mathbf{u}_m(\mathbf{z}_m = h_m, t) = (\mathbf{A}_m e^{ik^* h_m} + \mathbf{B}_m e^{-ik^* h_m}) e^{i\omega t} \quad (4.24)$$

En cada capa los desplazamientos deben ser compatibles (el desplazamiento en la parte superior de una capa en particular debe ser igual al desplazamiento en la parte inferior de la capa superpuesta). Aplicando el requerimiento de compatibilidad de frontera entre la capa "m", y la capa "m+1", resulta

$$\mathbf{u}_m(\mathbf{z}_m = h_m, t) = \mathbf{u}_{m+1}(\mathbf{z}_{m+1} = \mathbf{0}, t) \quad (4.25)$$

Dicha ecuación resulta en,

$$A_{m+1} + B_{m+1} = A_m e^{ik^* m h_m} + B_m e^{ik^* m h_m} \quad (4.26)$$

El esfuerzo de corte en la parte superior e inferior de la capa “m”, es,

$$\tau_m(z_m = 0, t) = ik^* m G^* m (A_m - B_m) e^{i\omega t} \quad (4.27)$$

$$\tau_m(z_m = h_m, t) = ik^* m G^* m (A_m e^{ik^* m h_m} - B_m e^{ik^* m h_m}) e^{i\omega t} \quad (4.28)$$

Desde que el esfuerzo debe ser continuo en cada frontera de los estratos, se tiene que,

$$\tau_m(z_m = h_m, t) = \tau_{m+1}(z_{m+1} = 0, t) \quad (4.29)$$

Por lo tanto,

$$A_{m+1} + B_{m+1} = \frac{k^* m G^* m}{k^*_{m+1} G^*_{m+1}} (A_m e^{ik^* m h_m} - B_m e^{ik^* m h_m}) \quad (4.30)$$

Sumando las ecuaciones (4.26) y (4.30) y sustrayendo la ecuación (4.18) de la (4.19), resultan las siguientes fórmulas de recursión,

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha^* m) e^{ik^* m h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha^* m) e^{-ik^* m h_m} \quad (4.31)$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha^* m) e^{ik^* m h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha^* m) e^{-ik^* m h_m} \quad (4.32)$$

Donde es la relación de impedancia compleja entre los límites de las capas “m”, y “m+1”:

$$\begin{aligned} \alpha^* m &= \frac{k^* m G^* m}{k^*_{m+1} G^*_{m+1}} \\ &= \frac{\rho_m (V^* s)_m}{\rho_{m+1} (V^* s)_{m+1}} \end{aligned} \quad (4.33)$$

En la superficie, el esfuerzo cortante debe ser igual a cero, lo que requiere que  $A_1=B_1$ . Si las fórmulas de recursión (4.31) son aplicadas repetidamente para todas las capas desde 1 hasta m, las funciones relacionadas con la amplitud en el estrato con respecto al estrato 1, pueden expresarse por,

$$A_m = a_m(\omega) A_1 \quad (4.34)$$

$$B_m = b_m(\omega) B_1 \quad (4.35)$$

Por lo tanto la función de transferencia relacionada con la amplitud de desplazamiento desde el estrato hasta está dada por:

$$F_{ij}(\omega) = \frac{u_i}{u_j} \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \quad (4.36)$$

Ya que para un movimiento armónico  $|\ddot{u}| = w |\dot{u}| = w^2 |u|$ , la ecuación 4.36 también describe la amplificación de las aceleraciones y velocidades desde la capa  $i$  hasta la  $j$ . La ecuación 4.36 indica que el movimiento en cualquier estrato puede ser determinado a partir del movimiento en otra capa.

#### 4.4.2.2. Método lineal equivalente.

Diferentes técnicas para el análisis de respuesta sísmica de sitio han sido desarrolladas desde 1920. El método lineal equivalente fue propuesto por (Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972), es un método aproximado que estima la respuesta cíclica no lineal del suelo en dominio de la frecuencia.

El comportamiento no lineal de los suelos producto de las cargas cíclicas puede ser considerado por el método lineal utilizando módulos de corte y radio de amortiguamiento (Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972) y (Kramer, 1996). El método lineal equivalente requiere de módulo de corte ( $G$ ) y la relación de amortiguamiento; para obtener estos valores, son utilizadas las curvas de módulo de reducción de corte y amortiguamiento.

En el método lineal equivalente, el análisis lineal está desarrollado por las propiedades del suelo de amortiguamiento viscoso y módulo de corte, que se ajustan en un proceso iterativo para obtener un nivel efectivo de deformación de corte inducido por el suelo. En el proceso de análisis se toman valores estimados de módulo de corte y amortiguamiento para un sismo de entrada y se calcula la deformación efectiva de corte (equivalente a un 65% del pico de deformación) para un tipo de suelo con sus diferentes estratos (Hashash & Park, 2001).

Este método se desarrolla a través de proceso iterativo, que se describe a continuación (Kramer, 1996):

- 1) Se toman valores iniciales de módulo de corte ( $G$ ) y amortiguamiento ( $\xi$ ) para cada estrato usualmente correspondiente al mismo nivel de deformación.
- 2) Los valores estimados de ( $G$ ) y ( $\xi$ ) son usados para procesar la respuesta de sitio incluyendo como dato de entrada la historia en el tiempo de un sismo para cada estrato.
- 3) La deformación de corte efectiva en cada capa está determinada por la máxima deformación de corte procesada en el sismo de entrada, para el estrato  $j$ .

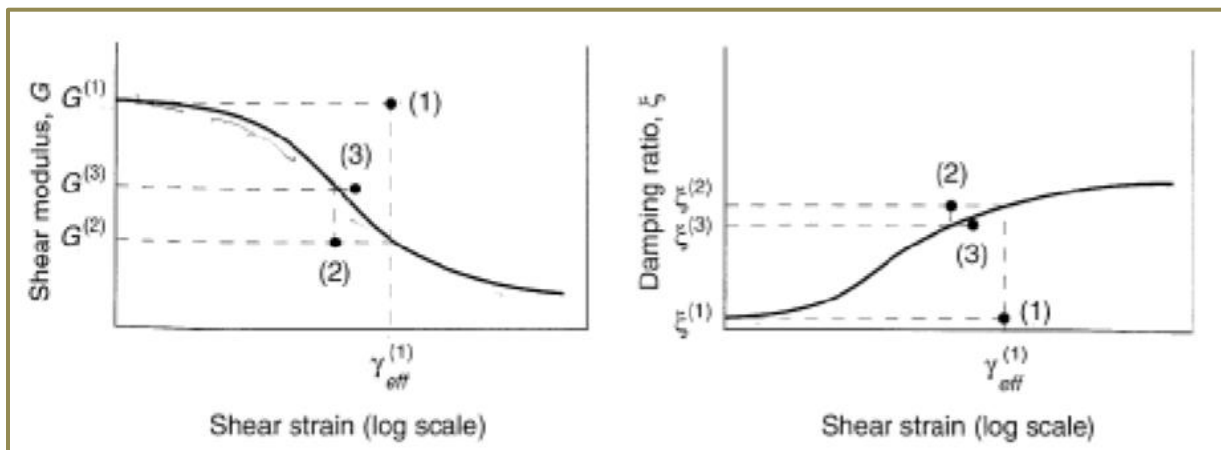
$$\gamma_{effj}^i = R_\gamma \gamma_{maxj}^i \quad (4.37)$$

Donde el super índice se refiere al número de iteraciones y  $R_\gamma$  es el radio de la deformación de corte efectiva y la máxima deformación.  $R_\gamma$  depende de la magnitud del sismo (Idriss & Sun, 1992) y puede estimarse de la siguiente expresión:



$$R_\gamma = \frac{M - 1}{10} \quad (4.38)$$

- 4) De la deformación efectiva de corte resultante, se obtienen nuevos valores,  $G^{i+1}$  y  $\xi^{i+1}$  que se utilizan para la siguiente iteración.
- 5) Los pasos 2 y 4 se repiten hasta que las diferencias de los valores de procesamiento de módulo de corte y radio de amortiguamiento en dos iteraciones sucesivas ya no cambien.



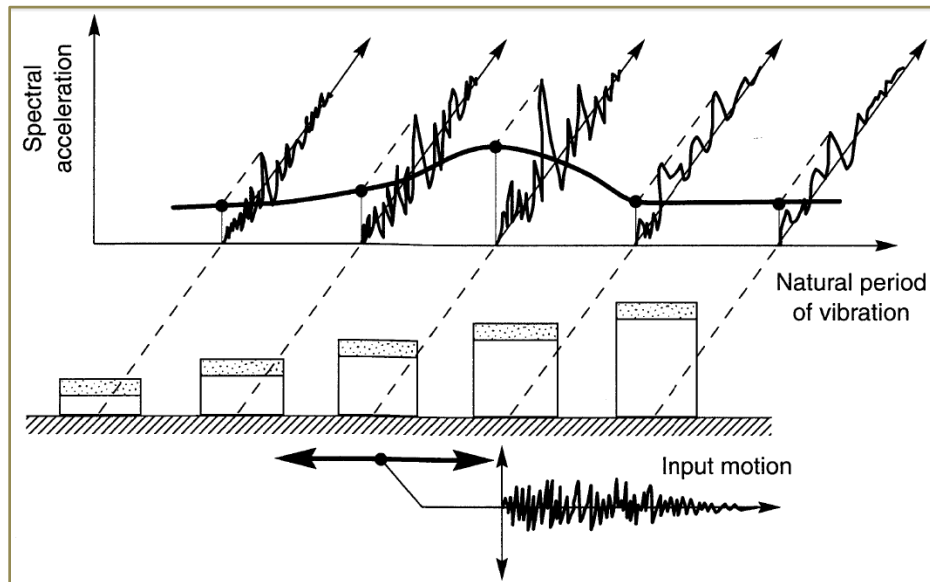
**Figura 4.11.** Iteración de aproximación a las curvas de módulo de corte y amortiguamiento en el análisis lineal equivalente (Kramer, 1996).

El método de lineal equivalente es de sencilla aplicación a través de diferentes programas de computación que se han desarrollado, como DEEPSOIL, EERA y, el más usado, SHAKE, que utiliza un enfoque de dominio de frecuencia para resolver el problema de respuesta suelo. En términos sencillos, el movimiento de entrada se representa como la suma de una serie de ondas senoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y ángulos de fase (Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972). Una solución relativamente simple para la respuesta del perfil del suelo a las ondas senoidales de diferentes frecuencias (en la forma de una función de transferencia) se utiliza para obtener la respuesta del depósito de suelo para cada una de las ondas sinusoidales de entrada. La respuesta global se obtiene mediante la suma de las respuestas individuales a cada una de las ondas sinusoidales de entrada.

#### 4.5. Espectros de respuesta.

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por M.A. Biot en el año 1932 y luego desarrollados por Housner, Newmark y muchos otros investigadores. Actualmente, el concepto de espectro de respuesta es una importante herramienta de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sismorresistente. Los espectros de respuesta describen la respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad para un movimiento específico del suelo en función de la frecuencia natural (período natural) y del radio de amortiguamiento del sistema (Kramer, 1996).

La respuesta debe de estar expresada en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento. Los máximos valores de cada uno de estos parámetros dependen de la frecuencia natural y el radio de amortiguamiento del sistema. Así mismo es de gran importancia en el diseño sísmo resistente de las estructuras y obtención de las fuerzas laterales en base a los requerimientos de los códigos (Kramer, 1996).



**Figura 4.12.** Espectro de Respuesta. Aceleraciones espectrales son las máximas amplitudes de aceleración del sistema de un grado de libertad en la respuesta al sismo de entrada. La respuesta del sistema es obtenida graficando la aceleración espectral en el eje de las ordenadas y los períodos de vibración en el eje de las abscisas (Kramer, 1996).

#### 4.5.1. Tipos de espectros de respuesta.

Los espectros son herramientas ampliamente usadas en análisis dinámicos, por ello existen varios tipos de espectros, dependiendo de los objetivos del análisis. Espectros de respuesta elástica, espectros de respuesta inelástica y espectros de diseño.

- **Espectros de respuesta elástica.**

Representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto (Crisafulli & Villafañe, 2002).

- **Espectros de respuesta inelástica.**

Son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar

deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que, por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico (Crisafulli & Villafañe, 2002).

- **Espectros de diseño.**

Las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistente se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos (Crisafulli & Villafañe, 2002).

Es muy importante que distingamos entre espectros de respuesta, que se obtienen para un terremoto dado, y espectros de diseño, los cuales se aplican al cálculo y verificación de estructuras y representan la sismicidad probable del lugar.

#### 4.5.2. Métodos para estimar Espectros de respuesta.

##### 4.5.2.1. Método de Diferencia central.

Este método está basado en una aproximación de diferencias finitas de la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo (velocidad y aceleración) (Choppra, 1995). Tomando intervalos de tiempo constante,  $\Delta t_i = \Delta t$ , las expresiones de diferencia central para velocidad y aceleración con respecto al tiempo  $i$  son:

$$\dot{u}_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad \ddot{u}_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (4.39)$$

La aplicación de este método requiere que se conozcan los valores de la masa ( $m$ ), la rigidez ( $k$ ) y ( $C$ ). Además se define  $\dot{u} = 0$  y  $\ddot{u} = 0$  como valores iniciales (Choppra, 1995).

- **Cálculos iniciales.**

- 1)  $\ddot{u}_0 = \frac{P_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m}$
- 2)  $\ddot{u}_0 = \frac{P_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m}$
- 3)  $u_{-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_0$
- 4)  $k^* = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t}$
- 5)  $a = \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t}$
- 6)  $b = k - \frac{2m}{(\Delta t)^2}$

- **Cálculo para cada intervalo de tiempo.**

- 1)  $p_i^* = p_i - au_{i-1} - bu_i$

- 2)  $u_{i+1} = \frac{p_i^*}{k^*}$

#### 4.5.2.2. Método de Newmark.

En 1959 N. M. Newmark desarrollo una familia de pasos iterativos, basados en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma) \Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \ddot{u}_{i+1} \quad (4.40)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta (\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1} \quad (4.41)$$

Los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  definen la variación de la aceleración en un intervalo de tiempo y determinan la estabilidad y las características de exactitud del método. La selección típica para  $\gamma$  es  $\frac{1}{2}$ , y  $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ , es satisfactoria para todos los puntos de vista, incluyendo la precisión (Chopra, 1995).

El método de Newmark posee dos casos especiales, que se denominan Aceleración lineal y aceleración promedio.

- (1) Aceleración promedio ( $\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$ )

- (2) Aceleración lineal ( $\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$ )

Este método tiene el siguiente esquema de procesamiento (Chopra, 1995):

- **Cálculos iniciales.**

- 1)  $\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m}$

- 2)  $\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m.$

- 3)  $a = \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c; \text{ and } b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c.$

- **Cálculos para cada intervalo de tiempo i.**

- 1)  $\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i.$

- 2)  $\Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}}.$

- 3)  $\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i.$

- 4)  $\Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i.$

- 5)  $u_{i+1} = u_i + \Delta u_i; \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i; \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i$

## V. METODOLOGIA Y PROCESAMIENTO DE DATOS.

En el presente capítulo se detalla el procedimiento realizado en el procesamiento de datos, herramientas utilizadas y se describen los datos utilizados.

Inicialmente se hace una descripción de los datos usados en el estudio; posteriormente se describe el procedimiento para la obtención de modelos de velocidades de onda, hasta una profundidad mínima de 30 m, a través del uso de correlaciones empíricas en función de  $N_{\text{golpe}}$  del ensayo de penetración estándar (SPT). A continuación se presenta el esquema de procesamiento para la evaluación de la respuesta de sitio y estimación de espectros elásticos de respuesta, utilizando el software DEEPSOIL V5.0; tomando en cuenta las características propias de cada sitio.

### 5.1. Descripción de datos utilizados.

Para la realización de este estudio se procesaron datos de 31 sondeos de SPT, los cuales se distribuyen de la siguiente manera:

- Se tomaron 7 sondeos en el sitio donde se ubica el edificio del CIGEO, del estudio realizado por (Valle, 2006), en el RURD, UNAN-Managua.
- En el residencial universitario Arlen Siu se tomaron 8 sondeos, del estudio realizado por (CIGEO, 2004), en el RURD, UNAN-Managua.
- 10 sondeos en el FAREM-Chontales tomados del estudio realizado por (CIGEO, 2012).
- 6 sondeos en el FAREM-Carazo tomados del estudio realizado por (CIGEO, 2012).

De los sondeos estudiados se tenía información del  $N_{\text{golpe}}$ , profundidad de perforación, clasificación geotécnica del tipo de suelo en los estratos encontrados; además del equipo con el cual se realizaron los sondeos (Figura 5.1.).

Hay que señalar que los valores de  $N_{\text{golpe}}$  que se tomaron para este estudio fueron proporcionados como  $N_{\text{campo}}$  y  $N_{\text{corregido}}$ . Los valores del  $N_{\text{golpe}}$  están corregidos por: confinamiento, utilizando la ecuación de Skempton (Tabla 4.1.); por energía, utilizando un factor de 0.75 tomando en cuenta que se pierde energía en el momento en que le operador tira del martillo, aunque se utilizó un equipo de seguridad con polea tirada a mano de E.E.U.U, para lo cual se establece una factor de corrección igual a 1 (Tabla 4.2); hay que señalar que en los datos de  $N_{\text{corregido}}$  obtenidos en el FAREM-Chontales, se corrigieron tomando en cuenta la presencia del nivel freático.





**Figura 5.1.** Perforación de SPT realizada en FAREM-Chontales (CIGEO, 2012).

## 5.2. Estimación de modelos de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ).

Para estimar modelos de  $V_s$  se emplearon correlaciones empíricas en función del  $N_{\text{golpe}}$  del ensayo de penetración estándar (SPT). Las correlaciones utilizadas para estimar  $V_s$  fueron seleccionadas de manera que coincidieran con las características granulométricas del suelo en los sitios de estudio.

**Tabla 5.1.** Correlaciones empíricas utilizadas en este estudio para estimar  $V_s$  en función de  $N_{\text{golpe}}$  del SPT. (Stharam & Anbazhagan, 2013) y (Parrales & Picado, 2001).

| <b>Autores</b>              | <b>Suelos cohesivos</b> | <b>Suelos no cohesivos</b> | <b>Todo tipo de suelos</b> |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Ohta y Goto (1978)          | -----                   | -----                      | $85.34N^{0.348}$           |
| Hasancebi y Ulusay (2007)   | $97.89N^{0.269}$        | $90.82N^{0.319}$           | -----                      |
| Uma Maheswari et al. (2010) | $89.31N^{0.358}$        | -----                      | -----                      |
| Anbazhagan et al. (2012)    | $106.63N^{0.39}$        | -----                      | -----                      |
| Lee (1990)                  | -----                   | $57.4N^{0.49}$             | -----                      |
| Imai y Fumoto (1975)        | -----                   | $89.8N^{0.0341}$           | -----                      |

Cabe señalar que la correlación de Imai y Fumoto (1975) es utilizada por (Parrales & Picado, 2001) en su estudio; ya que esta correlación corresponde a suelos granulares. La correlación de Ohta y Goto (1978) ha sido utilizada en algunos estudios realizados en la ciudad de Managua (Parrales & Picado, 2001), ésta puede ser aplicada, ya que es una correlación para todo tipo de suelo.

### 5.2.1. Estimación de velocidades de onda de corte.

El cálculo para estimar las velocidades de onda de corte se realizó para cada uno de los sondeos en los sitios de estudios, para valores de  $N_{golpe}$  de campo y corregido. Estos cálculos fueron desarrollados en Microsoft Excel 2010 (Figura 5.2.).

| 262 | SPT (Promedio) |            | CORRELACIONES |                      |                          |                    |                 |
|-----|----------------|------------|---------------|----------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|
|     | Profundidad    | N (Golpes) | Lee (1990)    | Imai y Fumoto (1975) | Hasncebi y Ulusay (2007) | Ohta y Goto (1978) | Vs Prom (Campo) |
| 263 | 0              | 5          | 124           | 153                  | 150                      | 147                | 144             |
| 264 | -0.45          | 5          | 124           | 153                  | 150                      | 147                | 144             |
| 265 | -0.45          | 4          | 119           | 149                  | 146                      | 143                | 139             |
| 266 | -0.9           | 4          | 119           | 149                  | 146                      | 143                | 139             |
| 267 | -0.9           | 5          | 126           | 155                  | 152                      | 149                | 146             |
| 268 | -1.35          | 5          | 126           | 155                  | 152                      | 149                | 146             |
| 269 | -1.35          | 9          | 167           | 189                  | 182                      | 182                | 180             |
| 270 | -1.8           | 9          | 167           | 189                  | 182                      | 182                | 180             |
| 271 | -1.8           | 9          | 170           | 191                  | 184                      | 185                | 183             |
| 272 | -2.25          | 9          | 170           | 191                  | 184                      | 185                | 183             |
| 273 | -2.25          | 9          | 172           | 193                  | 186                      | 186                | 184             |
| 274 | -2.7           | 9          | 172           | 193                  | 186                      | 186                | 184             |
| 275 | -2.7           | 11         | 189           | 206                  | 197                      | 199                | 198             |
| 276 | -3.15          | 11         | 189           | 206                  | 197                      | 199                | 198             |
| 277 | -3.15          | 13         | 200           | 214                  | 205                      | 207                | 207             |
| 278 | -3.6           | 13         | 200           | 214                  | 205                      | 207                | 207             |
| 279 |                |            |               |                      |                          |                    |                 |

Figura 5.2. Hoja de cálculo de velocidades de onda de corte en Microsoft Excel 2010.

Los cálculos se realizaron para cada  $N_{golpe}$  obtenido del SPT, es decir, para estratos de 0.45 m. Para obtener una velocidad de onda de cada estrato, se calculó el promedio de las velocidades estimadas con cada correlación.

### 5.2.2. Modelos de velocidad de onda de corte.

Para estimar un modelo de velocidad de onda de corte es necesario tener una información del suelo hasta una profundidad mínima de 30 m, según (NEHRP, 2003). En este estudio los datos disponibles brindan una información bastante limitada; ya que las perforaciones llegan hasta una profundidad máxima de 10 m en Managua y Jinotepe, y hasta, a penas, 5 m en Juigalpa.

Debido a la poca profundidad de exploración, fue necesario proponer hipótesis a partir de los datos disponibles; que permitieran estimar valores de  $V_s$  hasta una profundidad mínima de 30 m, para poder hacer una correcta clasificación de sitio y estimar espectros elásticos de respuestas más confiables. Estas hipótesis consisten en proyectar las velocidades de onda de corte obtenidas a través de correlaciones empíricas hasta 30 m de profundidad.

Las hipótesis planteadas se basan en las velocidades de corte estimadas con los datos existentes. Se propone que la velocidad aumentará en función de la profundidad, a razón de la pendiente con la que crecen las velocidades estimadas con el N del SPT hasta la profundidad a la cual se tiene información del suelo.

- **Pendiente Promedio.**

En esta hipótesis se plantea que la velocidad de onda aumentará en función de la profundidad, con una pendiente constante. La pendiente con la que aumentará la  $V_s$  se calcula determinando un promedio de las pendientes entre cada uno de los estratos de 0.45 m de espesor, con la siguiente expresión:

$$Pendiente = \frac{0.45}{(V_{s_{i+1}} - V_{s_i})} \quad (5.1.)$$

Donde:

$V_{s_i}$  = Velocidad de onda de corte del estrato  $i$ .

$V_{s_{i+1}}$  = Velocidad de onda de corte del estrato siguiente al estrato  $i$ .

- **Pendiente directa.**

En esta hipótesis, al igual que la anterior, plantea que la velocidad de onda aumentará en función de la profundidad, con una pendiente constante. A diferencia de la hipótesis anterior, se calcula una sola pendiente, con la velocidad estimada en el primer estrato y la velocidad estimada para el estrato más profundo del cual se tiene información; este cálculo se realizó con la siguiente expresión:

$$Pendiente = \frac{H}{(V_{s_n} - V_{s_1})} \quad (5.2.)$$

Donde:

$V_{s_1}$  = Velocidad de onda de corte del primer estrato o estrato superficial.

$V_{s_n}$  = Velocidad de onda de corte del estrato más profundo o último estrato perforado.

H = Profundidad total de perforación.

- **Proyección de  $V_s$ .**

En esta hipótesis se propone que la velocidad de onda estimada en el último estrato, a la mayor profundidad alcanzada en cada perforación de SPT, se mantiene constante hasta los 30 m de profundidad.

### 5.2.2.1. Modelos $V_s$ .

La estimación de modelos de  $V_s$  llega hasta los 30 m de profundidad. Este procesamiento se llevó a cabo a través del cálculo de promedios. Primeramente, en cada sitio, se calculó el promedio de  $N_{golpe}$  de todas las perforaciones, por estratos a igual profundidad. Posteriormente se estimaron las velocidades de onda de corte con las diferentes correlaciones; habiendo hecho esto, se calculó el promedio de las velocidades estimadas con las correlaciones, en cada estrato.

Habiendo estimado las velocidades de onda por cada sitio, se procedió a estimar velocidades hasta los 30 m de profundidad, aplicando las tres hipótesis antes mencionadas; esto para estratos de 0.45 m, debido a que el SPT proporciona la información del número de golpe para estrato de este espesor.

Para realizar un procesamiento más práctico y obtener un perfil de modelo Vs más apegado a la realidad, el modelo de Vs constará de 3 estratos para los que se estimarán las Vs calculando el promedio de velocidades cada 9.9 m de profundidad hasta los 30 m, en Jinotepe, Juigalpa y en RURD-Arlen Siu; ya que en el CIGEO se cuenta con un modelo de referencia y se proyectará Vs hasta estimar una velocidad mayor a 750 m/s.

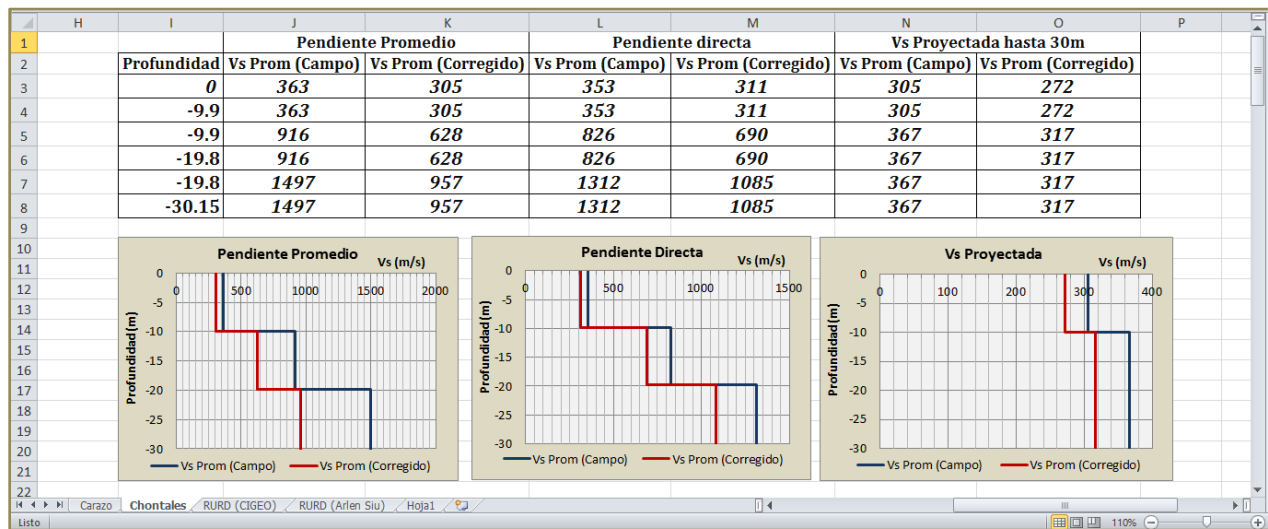


Figura 5.3. Hoja de cálculo de Microsoft Excel 2010 y Modelos Vs encontrados.

### 5.3. Evaluación de la respuesta sísmica de sitio.

Después de haber obtenido los modelos de velocidad de onda de corte en cada sitio, con cada hipótesis, se procedió a evaluar la respuesta sísmica de sitio con el software DEEPSOIL V5.0; este programa permite realizar análisis Lineal, No Lineal y Lineal Equivalente. Este estudio se realizó mediante el proceso de análisis lineal equivalente.

Para la evaluación de la respuesta sísmica se utilizaron registros de sismos contenidos en la base de datos del programa DEEPSOIL V5.0, además del sismo ocurrido Managua en 1972. Los registros sísmicos utilizados se describen en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Descripción de sismos utilizados en la evaluación de la respuesta sísmica de sitio (Hashash, 2011).

| <b>Nombre del sismo</b>        | <b>Fecha del sismo</b> | <b>Magnitud</b> | <b>Distancia al punto de Ruptura</b> | <b>Clasificación de sitio (USGS)</b> | <b>PGA (g)</b> |
|--------------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| <b><i>Mammoth Lake</i></b>     | 25/5/1980              | 6.3             | 15.5                                 | A                                    | 0.430          |
| <b><i>Nahanni</i></b>          | 23/12/1985             | 6.8             | 16.0                                 | A                                    | 0.148          |
| <b><i>Northridge</i></b>       | 17/1/1994              | 6.7             | 26.8                                 | A                                    | 0.217          |
| <b><i>Northridge 2</i></b>     | 17/10/1994             | 6.7             | 43.4                                 | A                                    | 0.098          |
| <b><i>Whittier Narrows</i></b> | 1/10/1987              | 6.0             | 21.2                                 | A                                    | 0.186          |

Como se muestra en la tabla 5.2., los registros utilizados fueron obtenidos en roca o suelos rígidos, esto para que el efecto de amplificación del suelo se viera disminuido y obtener resultados que permitieran ver la realidad de los suelos de los sitios estudiados.

El registro del Terremoto de Managua de 1972 es el que se registró en la estación de la Refinería ESSO, por tal razón, se debió deconvolucionar este registro para obtenerlo como registro de basamento. Este registro deconvolucionado es el mismo que utilizaron (Castillo & Zepeda, 2013), y el proceso de deconvolución se ve detallado en su documento.

### **5.3.1. Análisis lineal equivalente.**

Después de determinar los sismos a utilizar para la evaluación de la respuesta sísmica se procedió a trabajar en el software para realizar un análisis lineal equivalente, como se describe a continuación.

- 1) Como primer paso se debe definir el tipo de análisis que se desea realizar; por lo que se seleccionó el modo de análisis lineal equivalente en dominio de frecuencia. Además, se introdujeron el número de estratos que componen la estratigrafía del sitio, y se definió que las propiedades de los suelos estarían basadas en velocidad de onda de corte. También se definió el modelo de las curvas dinámicas del suelo, que el modelo de puntos discretos.

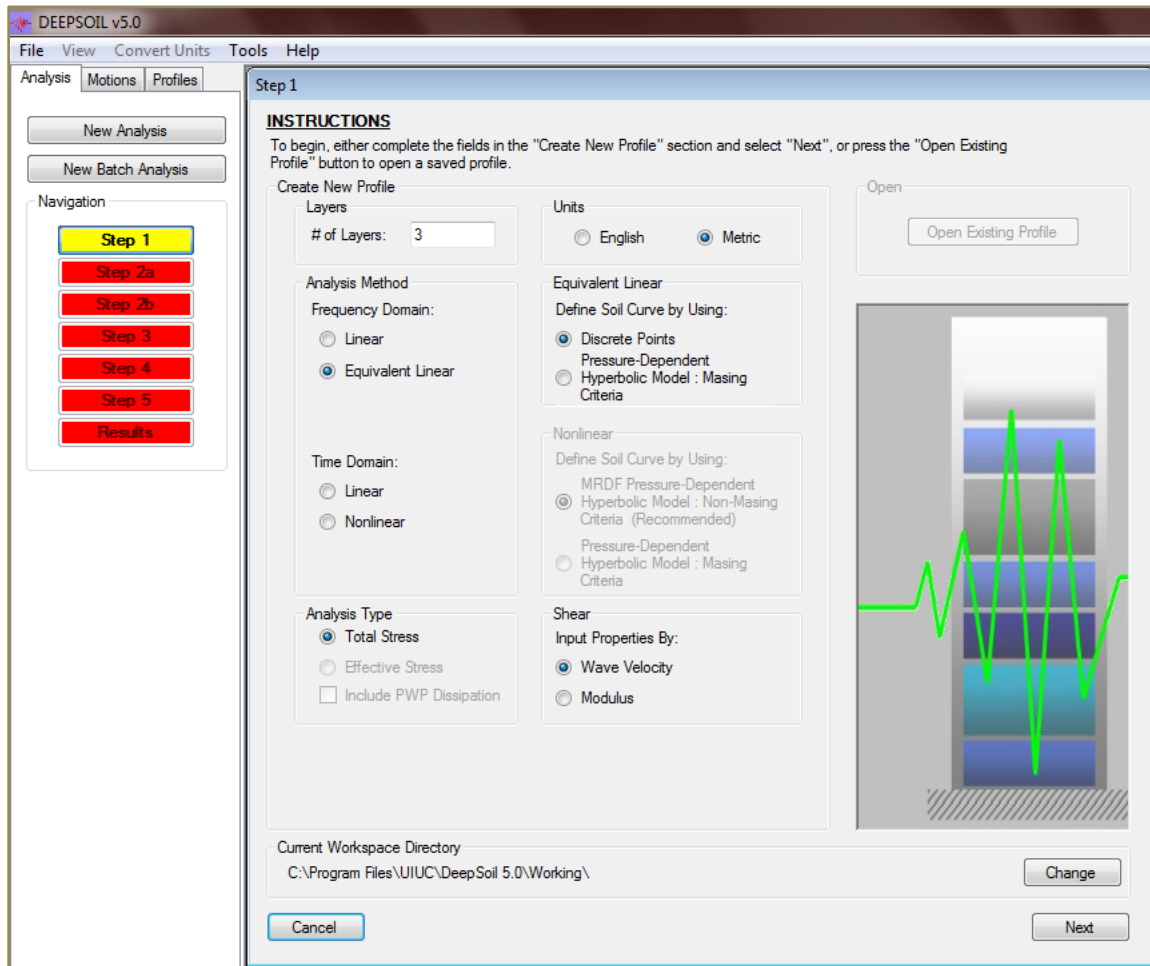


Figura 5.4. Interface gráfico del software DEEPSOIL. Se introducen los parámetros del análisis.

- 2) Como segundo pasó, se introdujeron las características geotécnicas de la estratigrafía de los suelos en estudio, tales como  $V_s$  de cada estrato, espesor y Peso volumétrico. Introducidas estas características, se determinaron las curvas dinámicas de los suelos, para obtener las características dinámicas del suelo (Modulo de reducción-deformación y amortiguamiento-deformación).



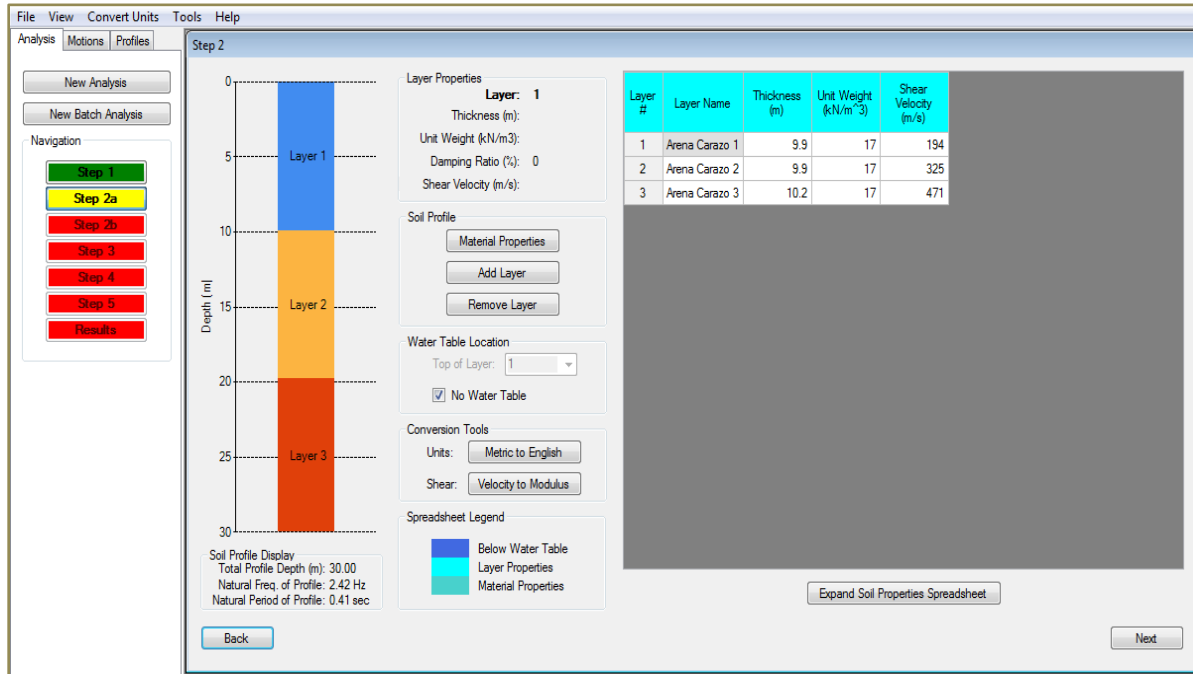


Figura 5.5. Interface gráfica de DEEPSOIL. Se introducen las características de la estratigrafía del sitio.

- 3) A continuación, se definieron las propiedades mecánicas y características del estrato rocoso. Se tomó el basamento como un semi-espacio elástico o semirrígido, con un 2% de amortiguamiento. La velocidad de onda de corte para el basamento se definió en 750 m/s (MTI, 2007), para FAREM-Carazo y RURD-CIGEO, a diferencia de FAREM-Chontales y RURD-Arlen Siu, donde se estimaron  $V_s$  mayores para el basamento.

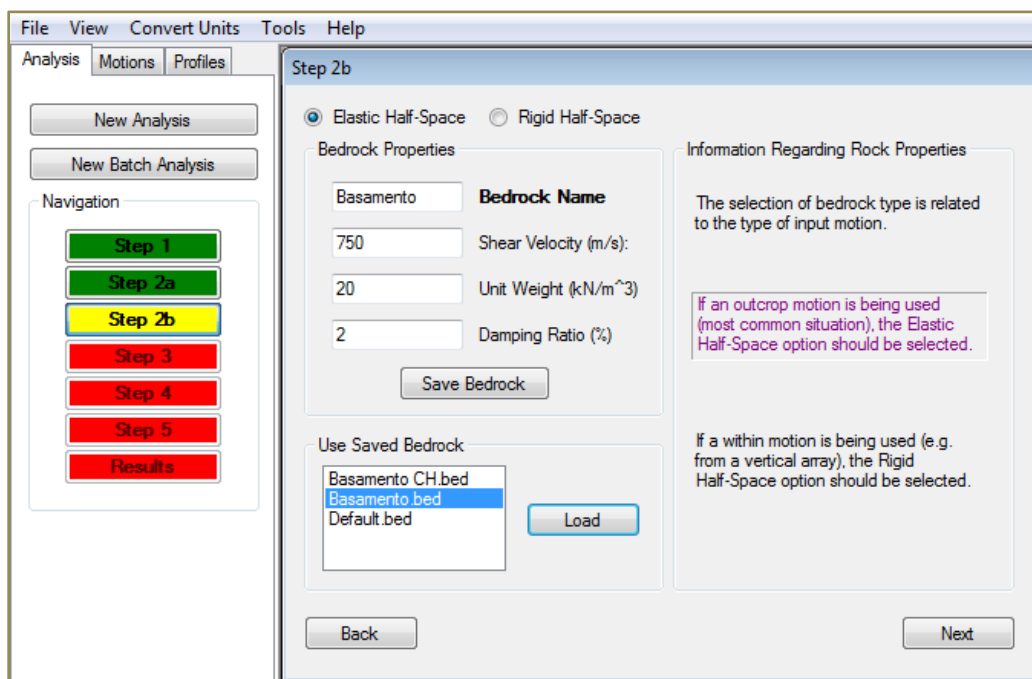


Figura 5.6. Características y propiedades del basamento.

- Finalmente se seleccionaron los registros sísmicos con los que se realizó el análisis (Tabla 5.2 y Terremoto de Managua 1972), y se corrió el programa para generar los espectros elásticos de respuesta, calculados con el método recomendado por el software, estableciéndose un 5% de amortiguamiento.

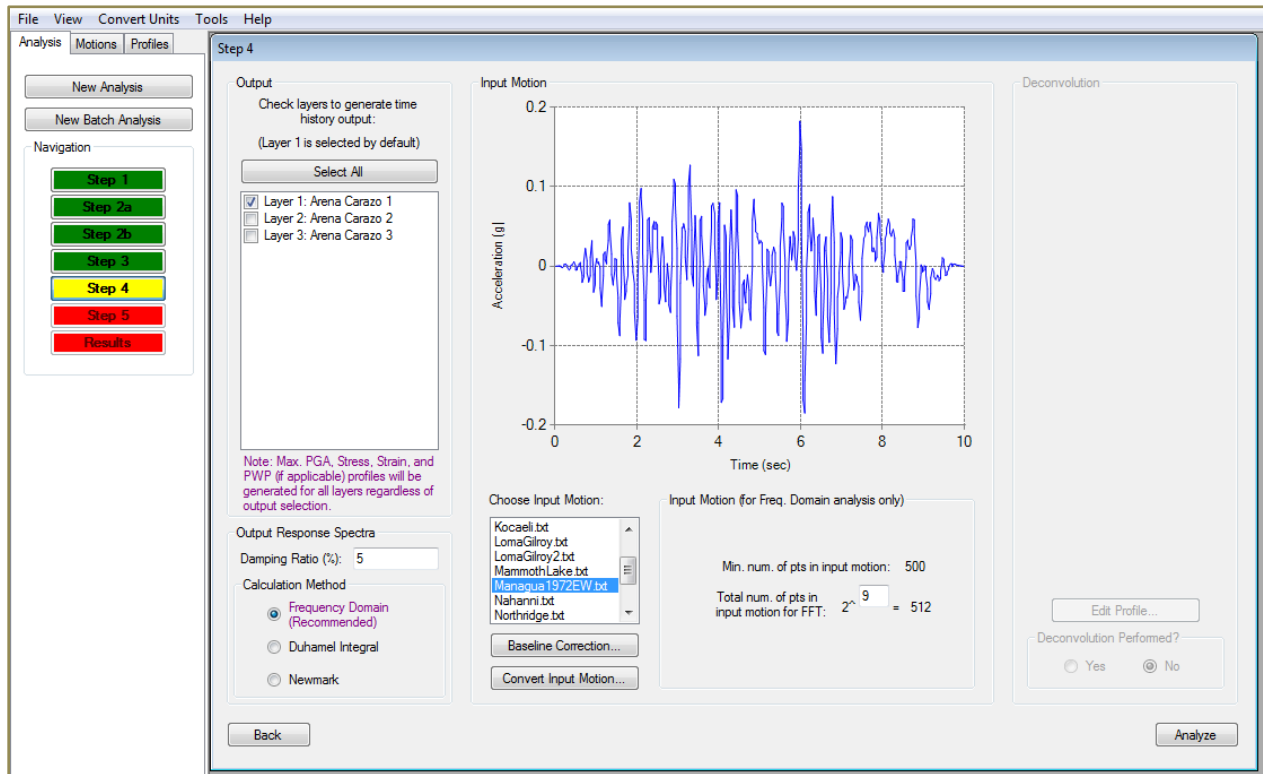


Figura 5.7. Selección de registro sísmico.

Para la determinación de las curvas dinámicas de los suelos se realizaron los siguientes pasos:

- En Managua y Carazo se escogió como curva de referencia la definida por (Seed & Idriss, 1991); ya que en estos sitios se presentan suelos granulares o no cohesivos. En Chontales la curva de referencia es la definida por (Vucetic & Dobry, 1991); ya que en este sitio se presentan suelos arcillosos con un índice de plasticidad de 41.5%.
- Posteriormente se determinaron las curvas de módulo de reducción y amortiguamiento incluyendo factores de reducción.
- Finalmente se ajustaron las curvas dinámicas del suelo de estudio con las teóricas, y se guardaron para cada tipo de suelo según sus características.

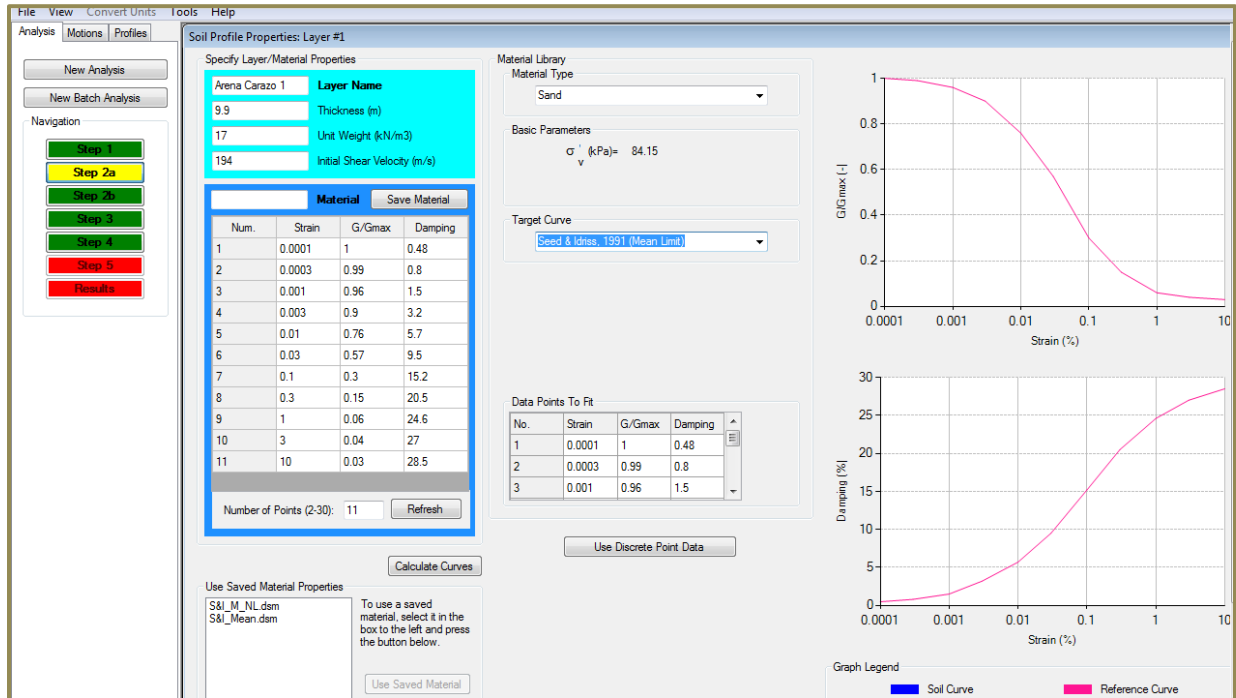


Figura 5.8. Determinación de curvas dinámicas de los suelos.

### 5.3.2. Espectros elásticos de respuesta.

Después de haberse realizado el análisis en DEEPSOIL y obtener las aceleraciones espectrales (PSA) en función del período, se exportaron los datos a Microsoft Excel; para obtener de manera gráfica los resultados.

Se agruparon los espectros obtenidos en cada sitio. Para cada sismo se calcularon tres espectros, según los modelos de Vs obtenido con cada una de las tres hipótesis; y se calculó un espectro promedio de los tres espectros obtenidos con las hipótesis.

En cada sitio se calculó un espectro suavizado envolvente, para los espectros obtenidos con el análisis de los distintos sismos; siguiendo el procedimiento y ecuaciones que establece el Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07).

## VI. RESULTADOS.

En base al procesamiento descrito en el capítulo anterior, se presentan los resultados obtenidos. Primeramente se describen los modelos de velocidades de onda estimados con correlaciones empíricas en función del  $N_{\text{golpe}}$  del SPT, tanto corregido como el obtenido en campo; estos modelos fueron estimados con las tres hipótesis planteadas en el Capítulo V. Posteriormente se describe la clasificación de los sitios según el RNC-07, NEHRP y USGS, utilizando el parámetro  $V_s 30$ . Después se presentan los espectros elásticos de respuestas obtenidos a través del Análisis Lineal Equivalente, en cada uno de los sitios. Además se presentan los espectros suavizados de cada sitio y la comparación de estos con el espectro de diseño del RNC-07.

### 6.1. Modelos de Velocidad de Onda de Corte.

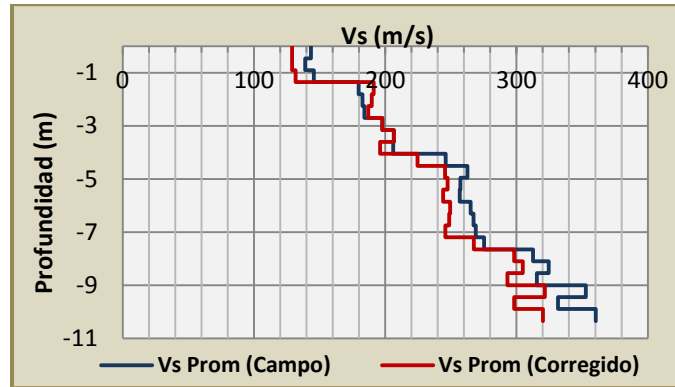
En cada uno de los sitios se propone un modelo de velocidad, con velocidades estimadas mediante correlaciones empíricas, en función del  $N_{\text{golpe}}$  del SPT, tanto corregido, como el obtenido en campo. Las velocidades fueron calculadas a la profundidad hasta la cual se tenía información del SPT, posteriormente fueron proyectadas hasta una profundidad mínima de 30 m.

#### 6.1.1. Recinto Universitario Rubén Darío (RURD).

Para estimar las velocidades de onda de corte en este sitio se utilizaron las correlaciones empíricas que se muestran en la tabla 5.1., para suelos no cohesivos y todo tipo de suelo.

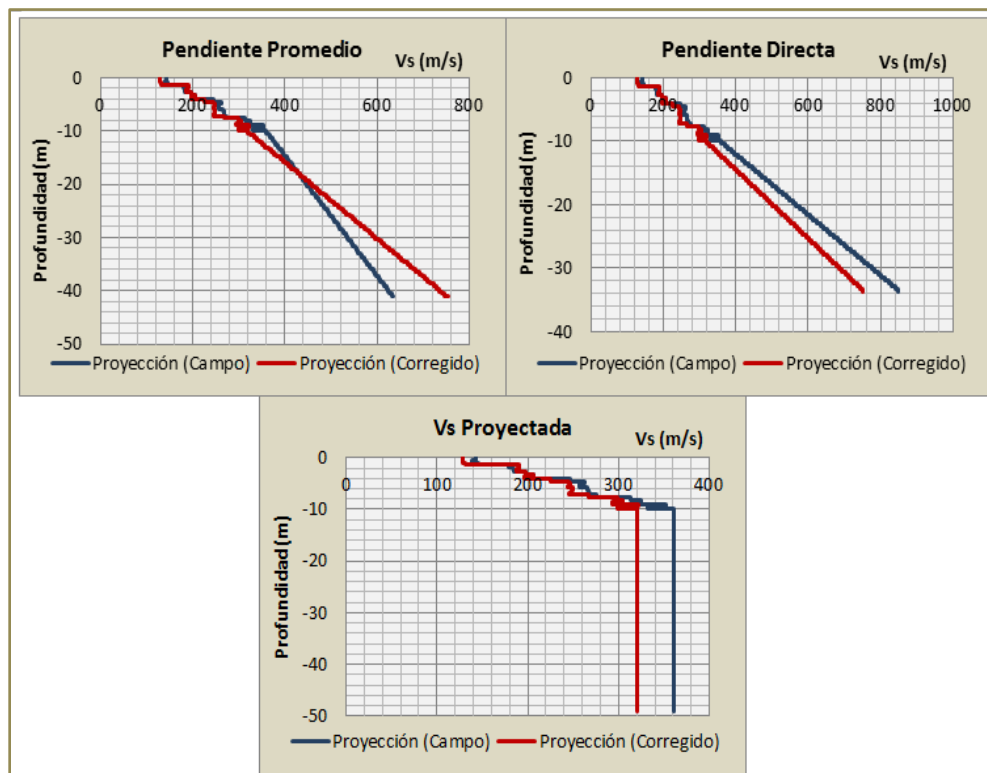
##### 6.1.1.1. CIGEO.

En este sitio se estimaron velocidades hasta 10.35 m; a esa profundidad, el modelo estimado resulta del promedio calculado de las velocidades de cada una de las correlaciones; obteniéndose una velocidad máxima de 360 m/s, para  $N_{\text{campo}}$ ; y 320 m/s, para  $V_s$  estimada con  $N_{\text{corregido}}$ .



**Figura 6.1.** Modelo Vs de N campo y corregido, calculado hasta 10.35m, para RURD-CIGEO.

Utilizando las tres hipótesis descritas en el capítulo anterior, se proyectaron las velocidades de onda de corte hasta estimar una velocidad de 750 m/s con  $N_{\text{corregido}}$  (Figura 6.2.); con pendiente promedio se proyectó hasta 42 m donde se encontró Vs de 750 m/s para  $N_{\text{corregido}}$ ; con pendiente directa el basamento se encontró a 34 m con  $N_{\text{corregido}}$ ; con Vs proyectada se llegó hasta 49 m con una velocidad de 360 m/s con  $N_{\text{campo}}$  y 320 m/s con  $N_{\text{corregido}}$ .



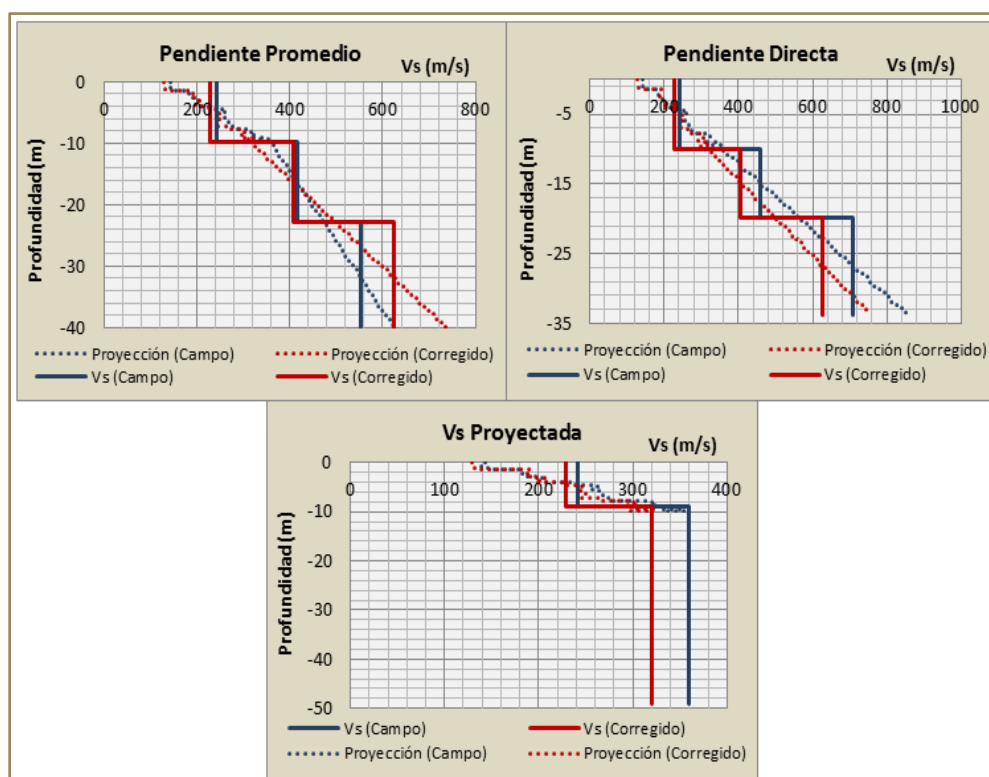
**Figura 6.2.** Proyección de Vs hasta estimar 750 m/s según cada una de las tres hipótesis planteadas en RURD-CIGEO.

Después de estimar las velocidades de onda de corte hasta encontrar una velocidad de 750 m/s se procedió a estimar el modelo de Vs.

El modelo estimado con pendiente promedio dio como resultado 241 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 229 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ) hasta 9.9 m, a 23 m 416 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 408 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ), en el tercer estrato, a 43 m Vs estimado es de 553 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 624 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ), en los estratos a mayores profundidades se estima que las velocidades sean mayores a 750 m/s. Con la proyección se obtiene un Vs promedio de 378 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 379 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un Vs promedio de 391 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 394 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ).

Para la segunda hipótesis, pendiente directa, el modelo estima el primer estrato a 9.9 m con Vs de 241 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 229 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ), el segundo estrato 459 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 407 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ) a 19.8 m, hasta 34 m Vs es 627 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 709 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ), se estima que a mayor profundidad las velocidades sean mayores a 750 m/s. Con la proyección se obtiene un Vs promedio de 392 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 361 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un Vs promedio de 411 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 376 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ).

Usando la hipótesis de Vs proyectada, se estimaron Vs hasta 49 m. En el primer estrato Vs es 241 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 229 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ) a 9.9 m de profundidad, hasta los 49 m se estima que la velocidad es 360 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 320 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); se estima que después de 49 m la velocidad es mayor a 750 m/s. Con la proyección se obtiene un Vs promedio de 321 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 291 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un Vs promedio de 327 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 296 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ).

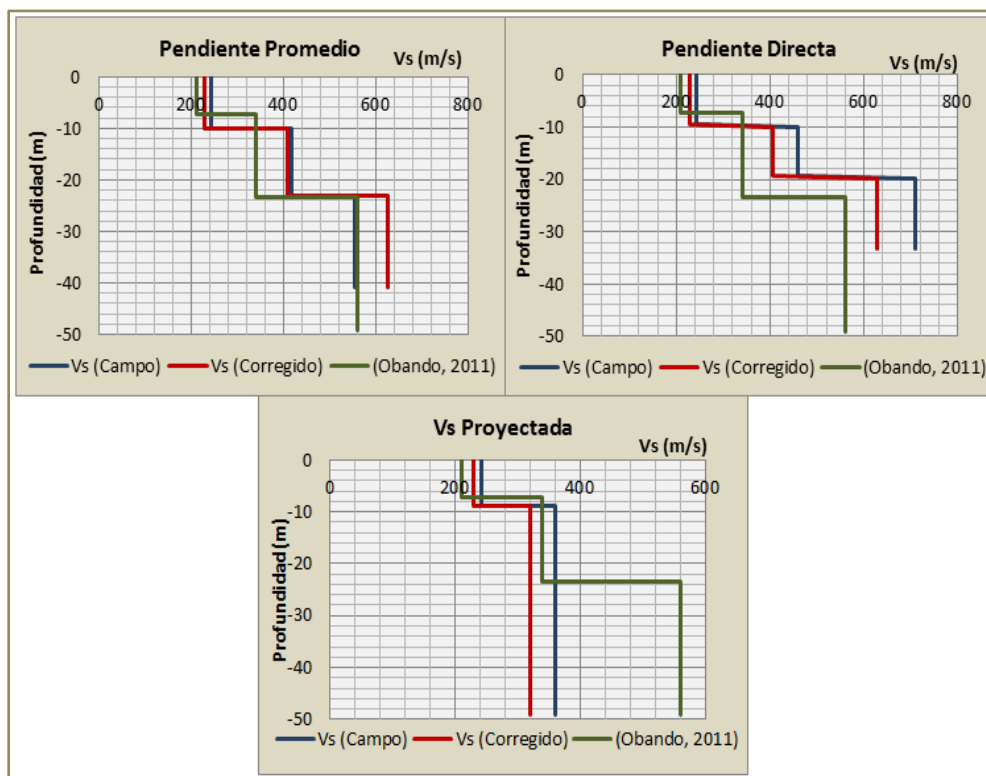


**Figura 6.3.** Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el RURD-CIGEO.

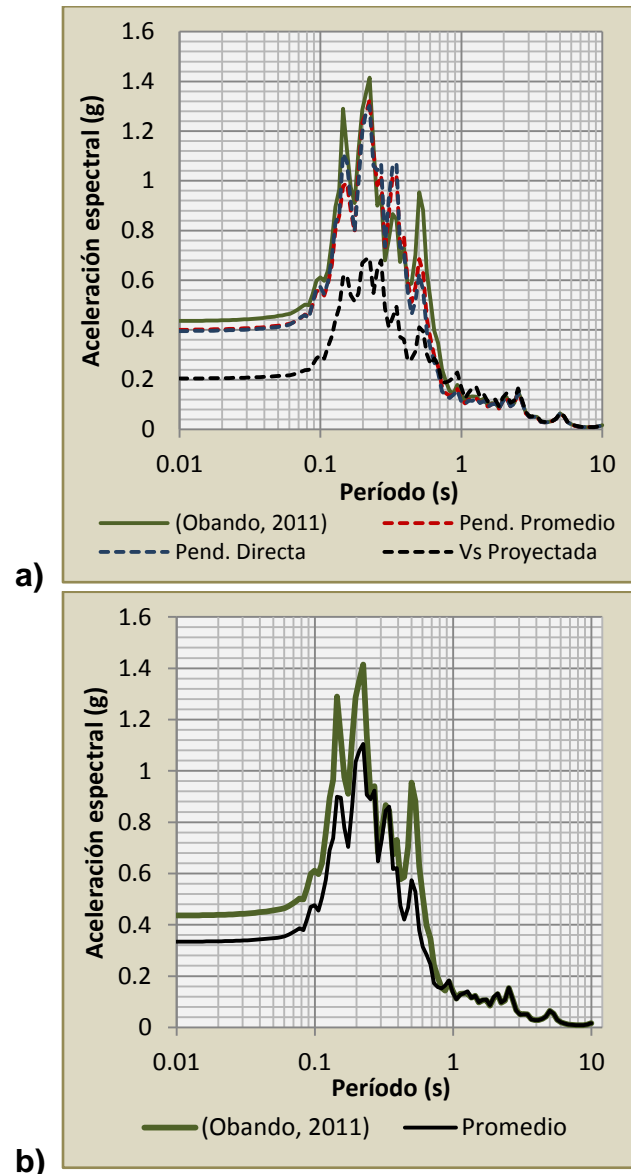


En el estudio realizado por (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011) se determinó un modelo de velocidades de onda de corte para el RURD, UNAN-Managua, utilizando métodos geofísicos, con registros tomados muy cerca del sitio donde fue construido el edificio el CIGEO. En este estudio se obtuvieron velocidades de 210 m/s a los 7 m de profundidad, 340 m/s a los 23 m, 560 m/s hasta los 49 m y más allá de los 49 m se encontró el basamento rocoso con velocidad de 980 m/s (Ver Anexo D.); con una velocidad promedio de 387 m/s.

Para verificar los resultados obtenidos en este estudio, haciendo uso de correlaciones en función del  $N_{golpe}$  del SPT, se superponen los resultados con el modelo estimado por (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011). Se pueden observar que los modelos presentan cierta variación entre sí; donde más se evidencia es con la profundidad a la que se estima la velocidad del basamento. Pendiente promedio lo estima a 42 m, pendiente directa a 34 m,  $V_s$  proyectada a 49 m, y el modelo de referencia a 49 m. En cuanto a la similitud de modelos, se puede observar que el más similar al modelo de referencia es el estimado con pendiente promedio; en lo que se refiere a la profundidad a la que estima la  $V_s$  de basamento y las velocidades estimadas en cada uno de los tres estratos.



**Figura 6.4.** Modelos de  $V_s$  superpuestos con el modelo de referencia de (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011) hasta estimar velocidades mayores a 750 m/s, en RURD-CIGEO.

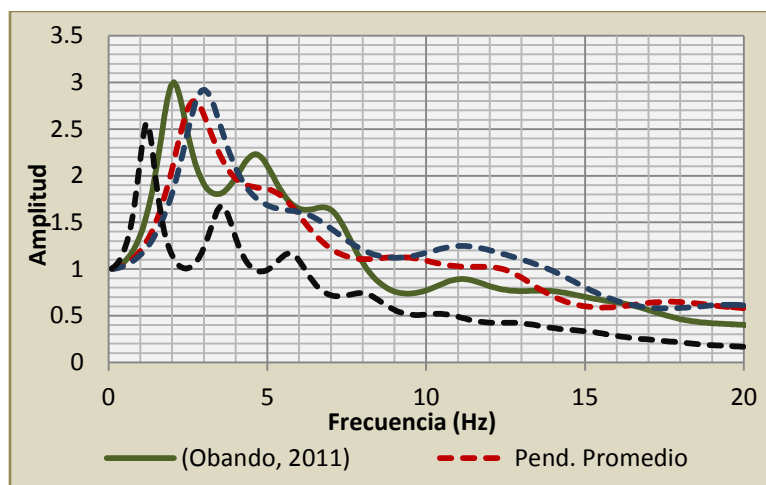


**Figura 6.5.** Espectros de respuesta del CIGEO para el registro sísmico del Terremoto de Managua de 1972, calculados con: **a)** modelos de velocidad estimados con las hipótesis planteadas y el modelo de referencia; **b)** Promedios de los espectros calculados con las hipótesis y el modelo de referencia.

Además de comparar los valores obtenidos en los modelos de velocidad estimados, se comparan los espectros que se obtienen al utilizar los modelos de velocidad estimados con las hipótesis y el espectro obtenido con el modelo de referencia, para este sitio en específico. Como se muestra en la figura 6.5. a), los espectros calculados tienen menores aceleraciones espectrales para los modelos que presentan los menores valores de  $V_s$  conforme aumenta la profundidad, y también con menores  $V_s$  en el basamento. Para el espectro del modelo de referencia se obtiene una aceleración espectral de 1.42 g, para Pendiente directa 1.28 g, para Pendiente promedio 1.34 g y para  $V_s$  proyectada 0.75 g. Lo que hay que resaltar es que las mayores aceleraciones espectrales se presentan en períodos cortos, que van de 14 s a 27 s; esto se evidencia en la figura 6.5. b), donde se muestra el espectro promedio de las

tres hipótesis, con 1.08 g, superpuesto con el espectro del modelo de referencia. Como se observa en los gráficos, los espectros estimados con pendiente directa y pendiente promedio, son muy similares al estimado con el modelo de referencia, por lo que se podría decir que los modelos estimados con las hipótesis proporcionan resultados que aproximan en gran manera las características de los suelos en los sitios estudiados.

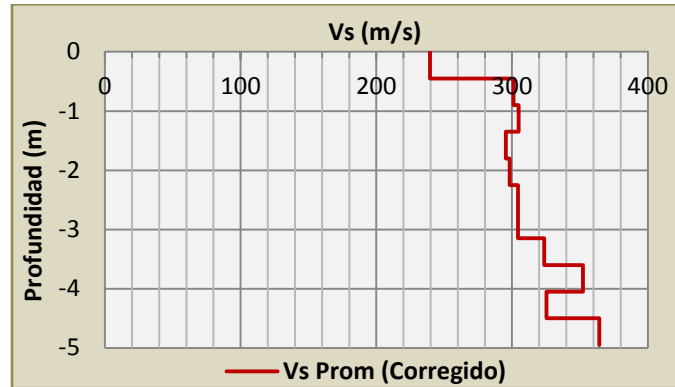
La función de transferencia muestra los valores de la amplitud en la superficie, en función de la frecuencia. Según la figura 6.5., la amplitud generada por el modelo de pendiente promedio es de 2.75, para pendiente directa 2.91 y Vs proyectada 2.56. Para el modelo de referencia la amplitud es de 3.00, que es mayor a la generada por las tres hipótesis, 9% mayor a pendiente promedio, 3% pendiente directa y 17% a Vs proyectada. En cuanto a la frecuencia, el modelo de referencia registra su mayor amplitud en 2.05 Hz, a diferencia de pendiente promedio que es a 2.83 Hz (0.78 Hz o 38% mayor que la referencia), pendiente directa 2.92 Hz (0.87 Hz o 42% mayor que la referencia) y Vs proyectada (0.88 Hz o 75% menor que la referencia).



**Figura 6.6.** Función de transferencia obtenida en el RURD-CIGEO, para el registro sísmico del Terremoto de Managua de 1972, utilizando los modelos de velocidad estimados con las hipótesis planteadas y el modelo de referencia de (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011).

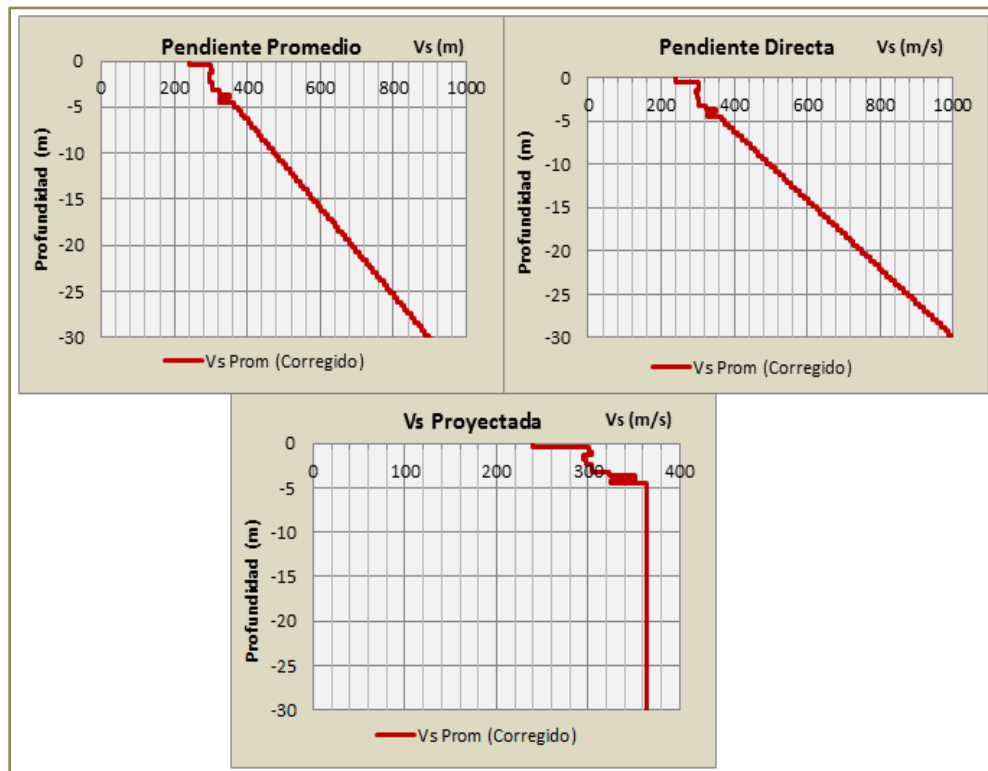
### 6.1.1.2. Residencia Universitaria Arlen Siu.

En las residencias Arlen Siu se estimaron velocidades hasta m. Hasta esa profundidad, el modelo estimado resulta del promedio calculado de las velocidades de cada una de las correlaciones; en este sitio las velocidades de onda se calcularon con  $N_{\text{corregido}}$ , solamente. La mayor velocidad que se encontró fue de 364 m/s a 4.95m de profundidad.



**Figura 6.7.** Modelo Vs de N corregido, calculado hasta 4.95m, para RURD-Arlen Siu.

Se estimaron las velocidades hasta 30 m de profundidad, pero solamente con  $N_{\text{campo}}$  (Figura 6.8.); a esa profundidad se encontraron valores de Vs de 906 m/s con pendiente promedio; 1011 m/s con pendiente directa; y 364 m/s Vs Proyectada.



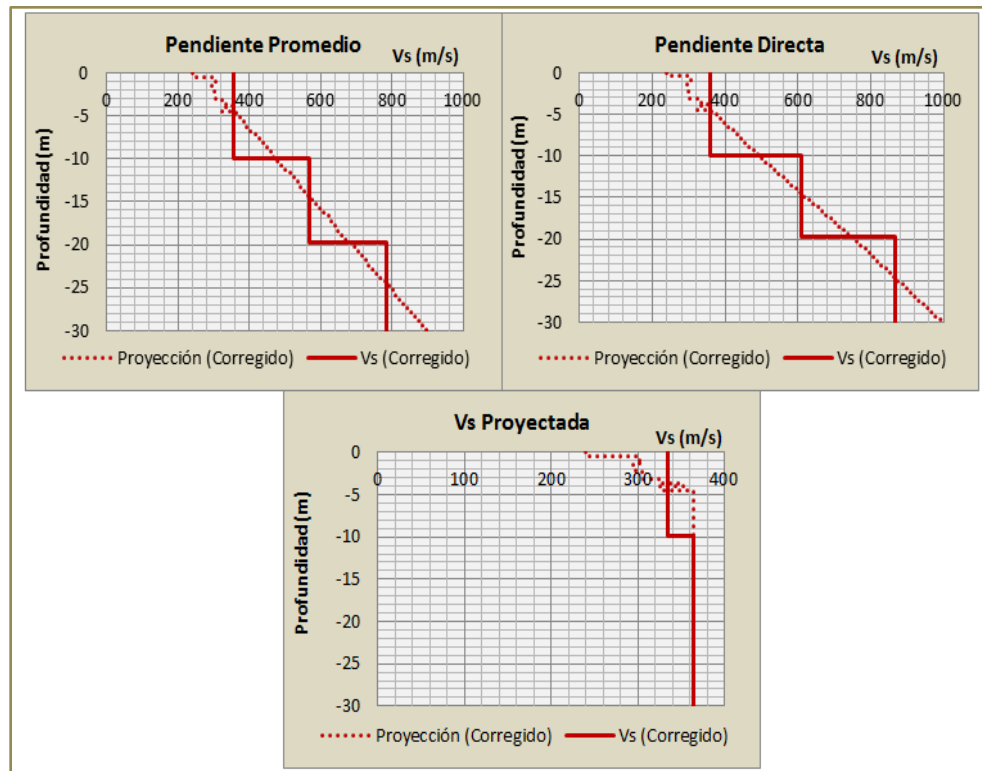
**Figura 6.8.** Proyección de Vs hasta 30m según cada una de las tres hipótesis planteadas en RURD-Arlen Siu.

Después de estimar las velocidades hasta 30 m de profundidad se procedió a estimar el modelo de Vs, éste contiene dos estratos, ya que, para pendiente promedio y pendiente directa se encuentran velocidades de basamento en el tercer estrato. Estos modelos contemplan que el primero llega hasta los 9.9 m, el segundo llega hasta los 19.8 m y el tercero llega hasta una profundidad de 30 m o más.

El modelo estimado con pendiente promedio, da como resultado, para N corregido, 356 m/s en el primer estrato, 569 m/s hasta 19.8 m, y a partir de ahí se encontró el basamento, con una velocidad de onda de corte de 785 m/s, y una velocidad promedio de 516 m/s para la proyección, como para el modelo.

Para la segunda hipótesis, pendiente directa, el modelo estimado arroja que, a 9.9 m la velocidad de onda de corte es 360 m/s, a 19.8 m Vs es igual a 608 m/s; y a partir de ahí el basamento rocoso con una Vs de 867 m/s. La velocidad promedio para la proyección es de 541 m/s, al igual que el modelo de Vs.

Usando la hipótesis de Vs proyectada, se obtuvo 335 m/s para el primer estrato, 364 m/s hasta 30m de profundidad. El promedio de Vs es de 355 m/s para la proyección y 354 m/s para el modelo.



**Figura 6.9.** Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el RURD-Arlen Siu.

Comparando los modelos obtenidos en el RURD-Arlen Siu con el modelo de (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011) se encuentra una variación considerable. Los modelos obtenidos con las hipótesis, pendiente directa y pendiente promedio, son considerablemente mayores al modelo de referencia. En cambio, el modelo de Vs proyectada, tampoco coincide, pero en el segundo y tercer estrato da valores menores que el modelo de referencia.

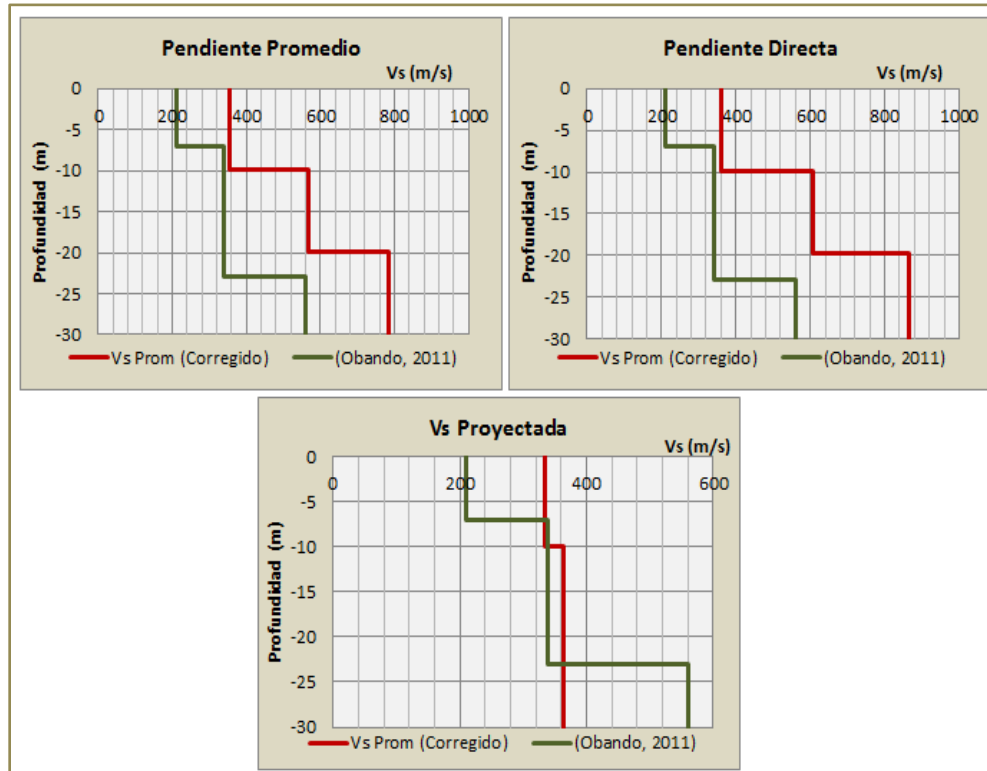


Figura 6.10. Modelos de Vs superpuestos con el modelo de referencia de (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011), en RURD-Arlen Siu.

### 6.1.2. Facultad Regional Multidisciplinaria, Carazo (FAREM-Carazo).

Según los datos disponibles para este sitio, se estimaron velocidades de onda de corte hasta 9.0m. Hasta esta profundidad, el modelo estimado resulta del promedio calculado de las velocidades de cada una de las correlaciones; obteniéndose una velocidad máxima de 295 m/s, para  $N_{campo}$ ; y, 240 m/s, para Vs calculada con  $N_{corregido}$ . Para el cálculo de estas velocidades se utilizaron las correlaciones mostradas en la Tabla 6.1.

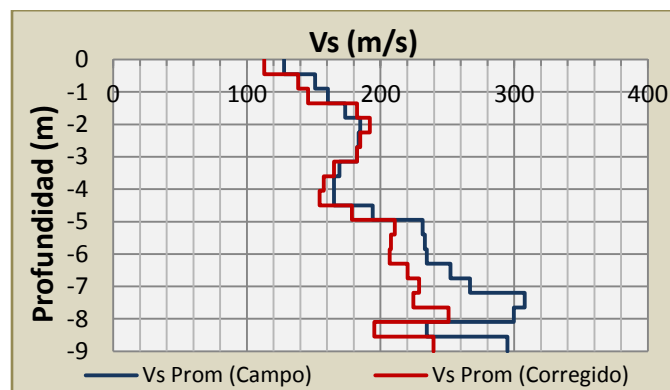
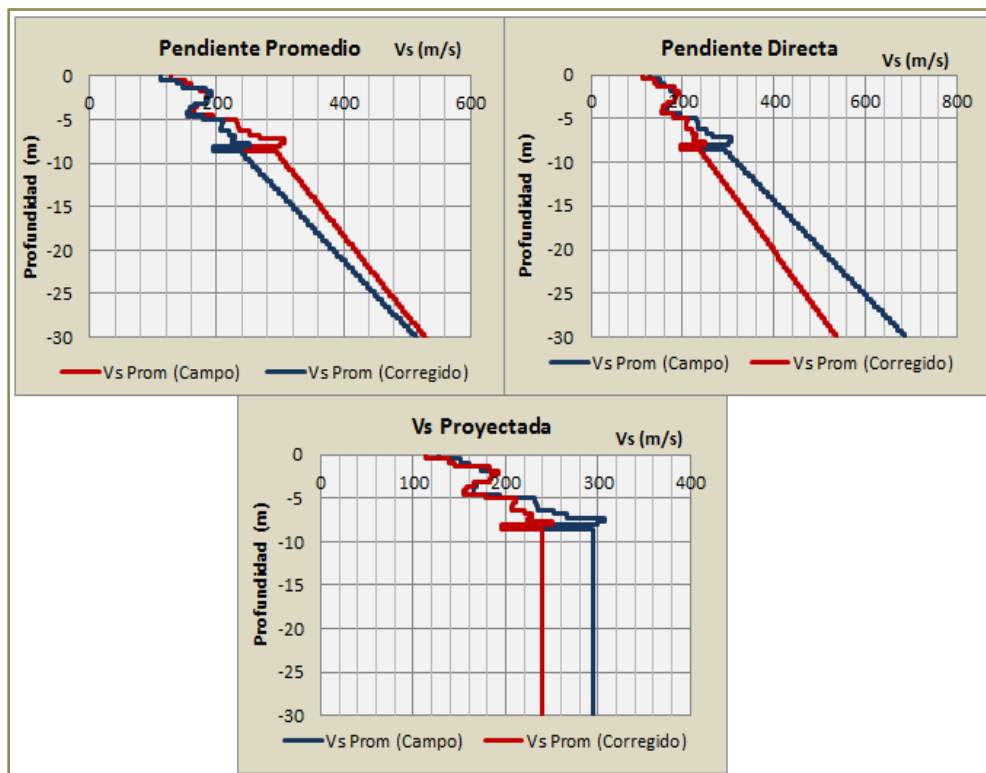


Figura 6.11. Modelo Vs de  $N_{campo}$  y corregido, calculado hasta 9.0m, para FAREM-Carazo.

En este sitio, al igual que el anterior, se estimaron las velocidades de onda de corte hasta 30 m de profundidad, con  $N_{campo}$  y  $N_{corregido}$  (Figura 6.12.); a esa profundidad se encontraron



valores de  $V_s$  de 532 m/s para  $N_{\text{campo}}$  y 518 m/s para  $N_{\text{corregido}}$  con pendiente promedio; 688 m/s para  $N_{\text{campo}}$  y 537 m/s para  $N_{\text{corregido}}$  con pendiente directa; y 295 m/s para  $N_{\text{campo}}$  y 240 m/s para  $N_{\text{corregido}}$  con  $V_s$  Proyectada.



**Figura 6.12.** Proyección de  $V_s$  hasta 30m según cada una de las tres hipótesis planteadas en FAREM-Carazo.

Después de estimar las velocidades a la profundidad deseada se procedió a estimar el modelo de  $V_s$ , éste contiene tres estratos; el primero llega hasta los 9.9 m, el segundo llega hasta los 19.8 m y el tercero llega hasta una profundidad de 30 m.

Los modelos calculados con pendiente promedio dieron como resultado, para  $N$  de campo, 219 m/s en el primer estrato, 362 m/s en el segundo estrato y 475 m/s a los 30 m; y, para  $N$  corregido, 194 m/s a 9.9 m, 318 m/s a 19.8 m y 452 m/s en el estrato más profundo. Con la proyección se obtiene un  $V_s$  promedio de 308 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 279 m/s ( $N_{\text{corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un  $V_s$  promedio de 320 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 287 m/s ( $N_{\text{corregido}}$ ).

Para la segunda hipótesis, pendiente directa, el modelo estimado con  $N$  de campo arroja que a los 9.9 m la velocidad de onda de corte es 219 m/s, a 19.8 m  $V_s$  es igual a 408 m/s y a los 30 m alcanza 600 m/s; para  $N$  corregido, en el estrato superficial se tiene una velocidad de 194 m/s, 325 m/s en el segundo estrato, y 471 m/s en el estrato más profundo. Con la proyección se obtiene un  $V_s$  promedio de 333 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 283 m/s ( $N_{\text{corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un  $V_s$  promedio de 347 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 291 m/s ( $N_{\text{corregido}}$ ).

Usando la hipótesis de  $V_s$  proyectada, se obtuvo 218 m/s para el primer estrato, 295 m/s para el segundo y tercer estrato, hasta 30m de profundidad, para  $N$  de campo; con  $N$

corregido se obtuvo 194 m/s hasta 9.9 m, y 240 m/s hasta 30 m. Con la proyección se obtiene un  $V_s$  promedio de 257 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 219 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un  $V_s$  promedio de 264 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 223 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ).

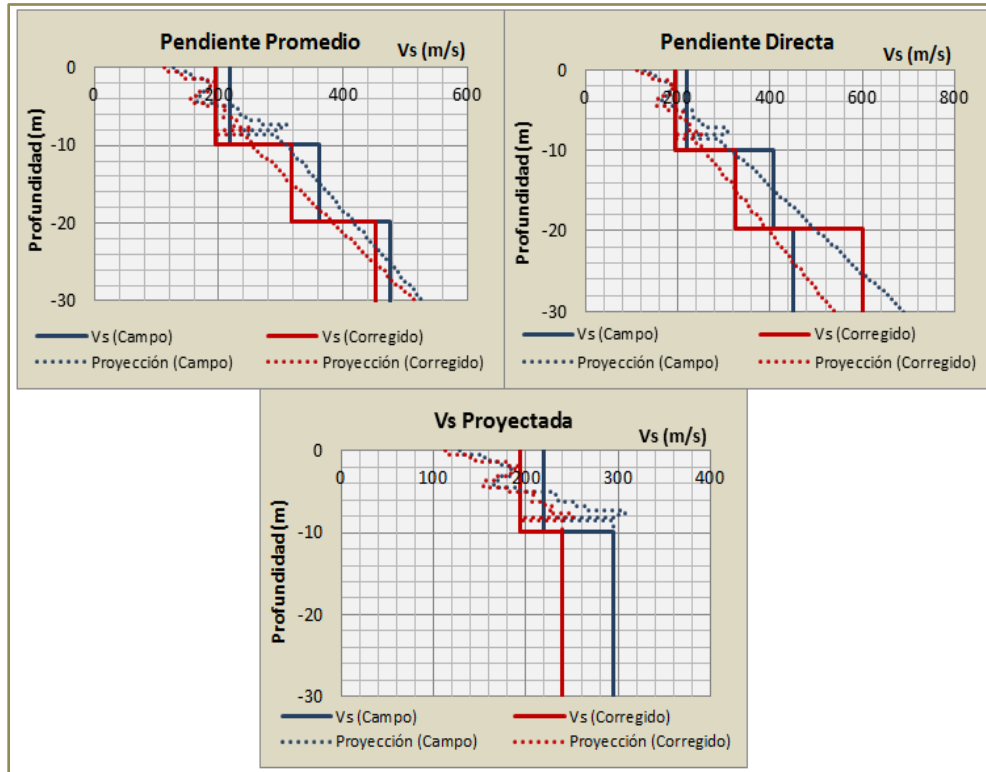


Figura 6.13. Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el FAREM-Carazo.

### 6.1.3. Facultad Regional Multidisciplinaria, Chontales (FAREM-Chontales).

Se estimaron velocidades de onda de corte hasta 4.95m. Hasta esta profundidad, el modelo estimado resulta del promedio calculado de las velocidades de cada una de las correlaciones; obteniéndose una velocidad máxima de 367 m/s, para  $N_{\text{campo}}$ ; y, 317 m/s, para  $V_s$  calculada con  $N_{\text{corregido}}$ . Para el cálculo de estas velocidades se utilizaron las correlaciones mostradas en la Tabla 6.2.

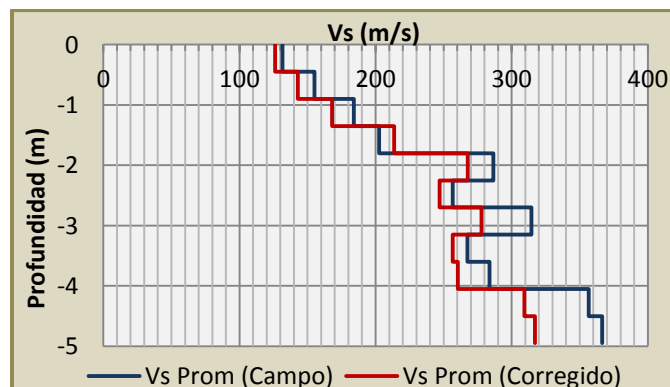


Figura 6.14. Modelo  $V_s$  de  $N$  campo y corregido, calculado hasta 4.95m, para FAREM-Chontales.

En este sitio, al igual que los descritos anteriormente, se estimaron las velocidades de onda de corte hasta 30 m de profundidad, con  $N_{\text{campo}}$  y  $N_{\text{corregido}}$  (Figura 6.12.); a esa profundidad se encontraron valores de  $V_s$  de 1823 m/s para  $N_{\text{campo}}$  y 1141 m/s para  $N_{\text{corregido}}$  con pendiente promedio; 1584 m/s para  $N_{\text{campo}}$  y 1306 m/s para  $N_{\text{corregido}}$  con pendiente directa; y 367 m/s para  $N_{\text{campo}}$  y 317 m/s para  $N_{\text{corregido}}$  con  $V_s$  Proyectada.

Después de estimar las velocidades a la profundidad deseada se procedió a estimar el modelo de  $V_s$ , éste contiene dos estratos, para pendiente promedio y pendiente directa ya que se encuentran velocidades de basamento en el tercer estrato. Estos modelos contemplan que el primer estrato llega hasta los 9.9 m, el segundo llega hasta los 19.8 m y el basamento se proyecta hasta una profundidad de 30 m.

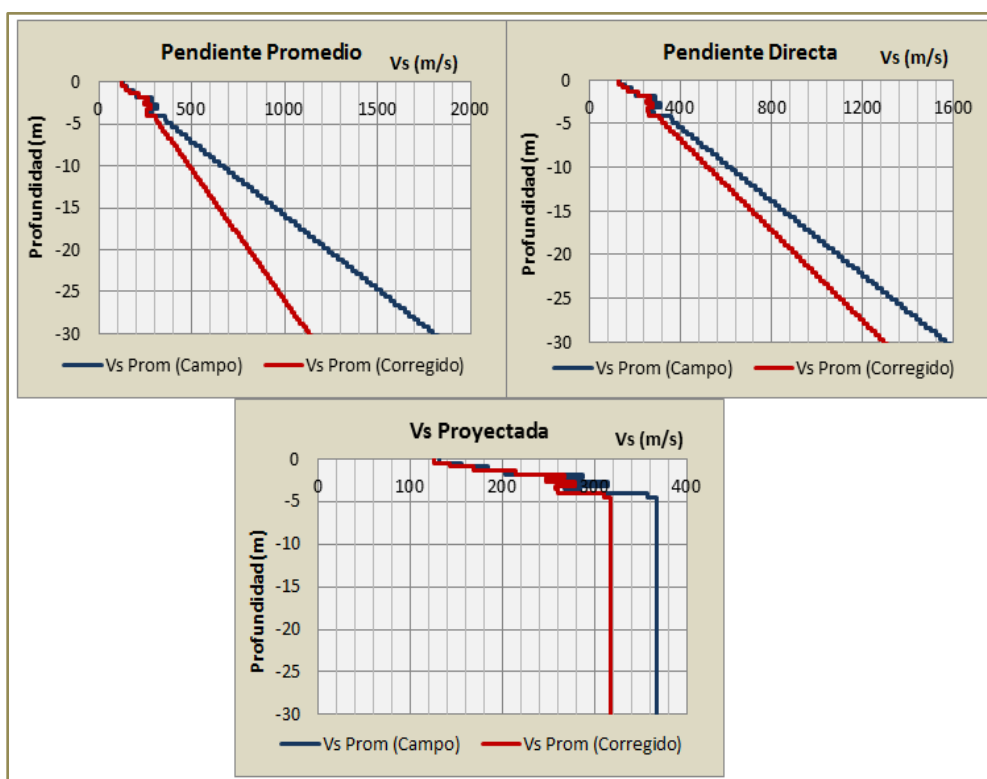


Figura 6.15. Proyección de  $V_s$  hasta 30m según cada una de las tres hipótesis planteadas en FAREM-Chontales.

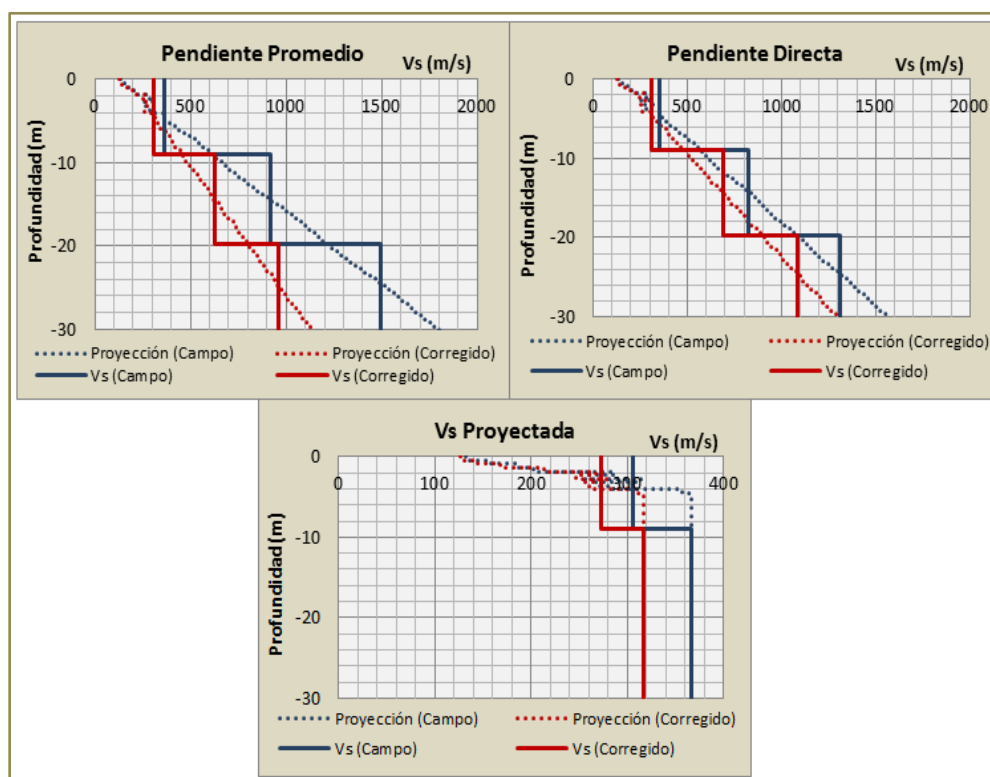
Después de estimar las velocidades 30 m de profundidad se procedió a estimar el modelo de  $V_s$ , éste contiene dos estratos, ya que se encuentran velocidades de basamento en el tercer estrato, para pendiente promedio y pendiente directa. Estos modelos contemplan que el primero llega hasta los 9.9m y el segundo llega hasta los 19.8m.

Los modelos calculados con pendiente promedio dieron como resultado, para  $N$  de campo, 363 m/s en el primer estrato, encontrando el basamento con 916 m/s en el segundo estrato y 1497 m/s en el basamento; y, para  $N$  corregido, 305 m/s a 9.9 m, 628 m/s a 19.8 m y 957 m/s en el basamento rocoso. Con la proyección se obtiene un  $V_s$  promedio de 624 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y

494 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un  $V_s$  promedio de 670 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 510 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ).

Para la segunda hipótesis, pendiente directa, el modelo estimado con  $N$  de campo arroja que a los 9.9 m la velocidad de onda de corte es 353 m/s, a 19.8 m  $V_s$  es igual a 826 m/s, encontrándose aquí el basamento, y a los 30 m alcanza 1312 m/s; para  $N$  corregido, en el estrato superficial se tiene una velocidad de 311 m/s, 690 m/s en el segundo estrato, y 1085 m/s en el basamento. Con la proyección se obtiene un  $V_s$  promedio de 584 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 513 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un  $V_s$  promedio de 629 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 540 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ).

Usando la hipótesis de  $V_s$  proyectada, se obtuvo 305 m/s para el primer estrato, 367 m/s para el segundo y tercer estrato, hasta 30 m de profundidad, para  $N$  de campo; con  $N$  corregido se obtuvo 272 m/s hasta 9.9 m, y 317 m/s hasta 30 m. Con la proyección se obtiene un  $V_s$  promedio de 336 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 296 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ); mientras que el modelo tiene un  $V_s$  promedio de 344 m/s ( $N_{\text{Campo}}$ ) y 300 m/s ( $N_{\text{Corregido}}$ ).



**Figura 6.16.** Modelos de velocidad de onda de corte, estimados con cada una de las hipótesis planteadas, para el FAREM-Chontales.

## 6.2. Clasificación de sitio.

La clasificación de sitio se hizo en función del RNC-07, NEHRP y USGS. Para esto, se tomó el parámetro Vs 30; el cuál se calculó con las velocidades de onda estimadas con  $N_{\text{corregido}}$ , para cada una de las tres hipótesis. Para clasificar el sitio se toma un promedio de los Vs 30 calculados con cada hipótesis, y así obtener un Vs 30 único, del sitio.

### 6.2.1. RURD-Managua.

#### 6.2.1.1. CIGEO.

**Tabla 6.3.** Clasificación de sitio RURD-CIGEO, según el RNC-07, NEHRP y USGS.

| Hipótesis          | Vs 30      | RNC-07          | NEHRP    | USGS     |
|--------------------|------------|-----------------|----------|----------|
| Pendiente Promedio | 394        | Tipo III        | D        | C        |
| Pendiente Directa  | 376        | Tipo III        | D        | C        |
| Vs Proyectada      | 296        | Tipo III        | D        | C        |
| <b>Promedio</b>    | <b>355</b> | <i>Tipo III</i> | <i>D</i> | <i>C</i> |

Según el RNC-07, el sitio se clasifica como Suelo moderadamente blando, esto para las tres hipótesis y el Vs promedio calculado de ellas; ya que el Vs promedio se encuentra en el intervalo de  $180 \leq Vs \leq 360$  m/s. El NEHRP, lo clasifica como Suelo rígido; ya que los valores se encuentran contenido en el intervalo de  $360 \geq Vs \geq 180$  m/s.

#### 6.2.1.2. Arlen Siu.

**Tabla 6.4.** Clasificación del sitio RURD-Arlen Siu, según el RNC-07, NEHRP y USGS.

| Hipótesis          | Vs 30      | RNC-07         | NEHRP    | USGS     |
|--------------------|------------|----------------|----------|----------|
| Pendiente Promedio | 516        | Tipo II        | C        | B        |
| Pendiente Directa  | 541        | Tipo II        | C        | B        |
| Vs Proyectada      | 354        | Tipo III       | D        | C        |
| <b>Promedio</b>    | <b>470</b> | <i>Tipo II</i> | <i>C</i> | <i>B</i> |

El RNC-07, clasifica al sitio como Suelo firme; así se evidencia en las dos primeras hipótesis planteadas y el Vs 30 promedio calculado; ya que el Vs 30 se encuentra en el intervalo de  $360 \leq Vs \leq 750$  m/s. El NEHRP, lo clasifica como Suelo muy denso y roca blanda; ya que los valores se encuentran en el intervalo de  $760 \geq Vs \geq 360$  m/s.

### 6.2.2. FAREM-CARAZO.

**Tabla 6.5** Clasificación de sitio FAREM-Carazo, según el RNC-07, NEHRP y USGS.

| Hipótesis          | Vs 30      | RNC-07          | NEHRP    | USGS     |
|--------------------|------------|-----------------|----------|----------|
| Pendiente Promedio | 287        | Tipo III        | D        | C        |
| Pendiente Directa  | 291        | Tipo III        | D        | C        |
| Vs Proyectada      | 233        | Tipo III        | D        | C        |
| <b>Promedio</b>    | <b>270</b> | <i>Tipo III</i> | <i>D</i> | <i>C</i> |

El FAREM-Carazo se clasifica como sitio de Suelo moderadamente blando, según el RNC-07, en función del  $V_s 30$  calculado en las tres hipótesis y el promedio; ya que el  $V_s 30$  se encuentra en el intervalo de  $180 \leq V_s \leq 360$  m/s. El NEHRP, lo clasifica como Suelo rígido; ya que los valores se encuentran contenido en el intervalo de  $360 \geq V_s \geq 180$  m/s.

### 6.2.3. FAREM-CHONTALES.

**Tabla 6.6.** Clasificación de sitio FAREM-Chontales, según el RNC-07, NEHRP y USGS.

| Hipótesis          | Vs 30      | RNC-07         | NEHRP    | USGS     |
|--------------------|------------|----------------|----------|----------|
| Pendiente Promedio | 510        | Tipo II        | C        | B        |
| Pendiente Directa  | 540        | Tipo II        | C        | B        |
| Vs Proyectada      | 300        | Tipo III       | D        | C        |
| <b>Promedio</b>    | <i>450</i> | <i>Tipo II</i> | <i>C</i> | <i>B</i> |

El FAREM-Chontales se clasifica como sitio de Suelo firme, según el RNC-07, en función del  $V_s 30$  calculado en las hipótesis y el promedio; ya que el  $V_s 30$  se encuentra en el intervalo de  $360 \leq V_s \leq 750$  m/s. El NEHRP, lo clasifica como Suelo muy denso y roca blanda; ya que los valores se encuentran contenido en el intervalo de  $760 \geq V_s \geq 360$  m/s.

### 6.3. Respuesta sísmica de sitio.

Con los modelos de velocidad de onda de corte, anteriormente mostrados para cada sitio e hipótesis, pesos volumétricos de los suelos, definidas las curvas de deformación y amortiguamiento, se determinó la respuesta sísmica de sitio mediante el Análisis lineal equivalente realizado en Deepsoil. Se obtuvieron espectros elásticos de respuesta para cada sismo, calculados con un 5% de amortiguamiento; además, en cada sitio se determinaron espectros suavizados envolventes para ser comparados con el espectro de diseño del RNC-07.

#### 6.3.1. Espectros elásticos de respuesta.

En el RURD, se encontraron diferentes resultados en las máximas aceleraciones generadas en los espectros y los intervalos de períodos que las contienen, entre el sitio del CIGEO y el residencial Universitario Arlen Siu. Las características dinámicas de los suelos de ambas zonas estudiadas son diferentes, a esto se debe la variabilidad de los resultados.



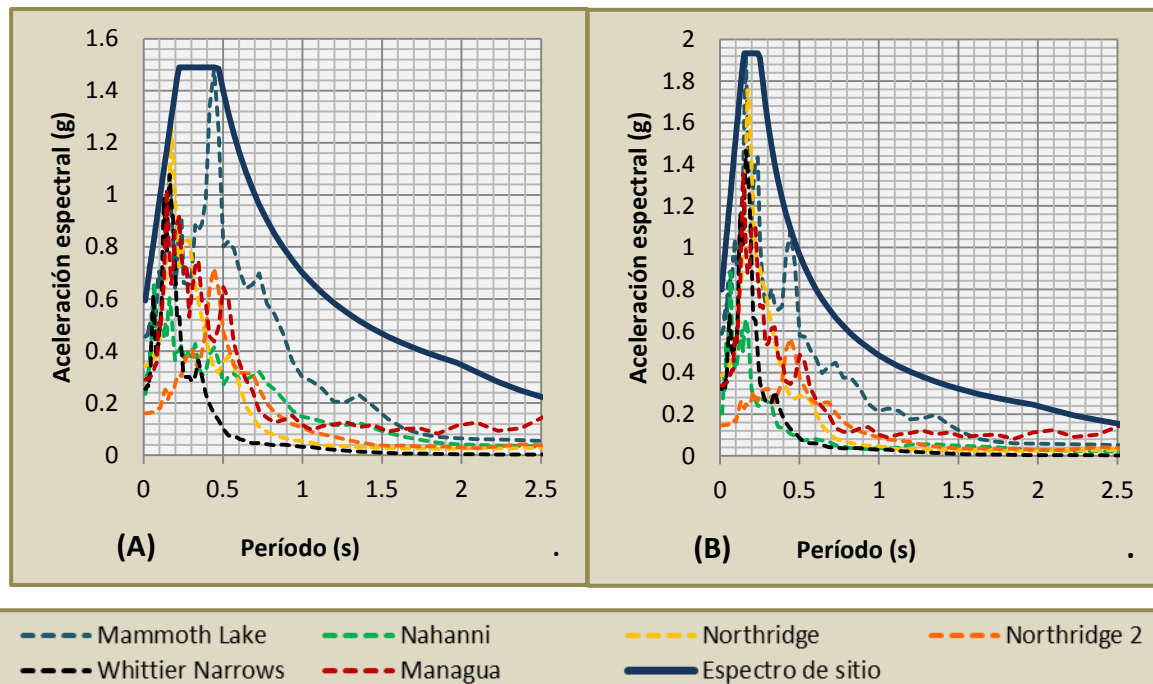


Figura 6.17. Espectros de respuesta en función de la aceleración espectral; (A) CIGEO, (B) Arlen Siu.

En el CIGEO se encontraron aceleraciones máximas de 1.48 g y 1.26 g, generadas por los sismos de Mammoth Lake y Northridge, respectivamente; el sismo de Managua (1972) generó una aceleración espectral de 1.02 g. Los valores de máximas aceleraciones espectrales, para todos los sismos analizados, se encontraron en el intervalo de período relativamente cortos, de 0.16 s y 0.42 s.

En la zona del residencial Arlen Siu las máximas aceleraciones espectrales también son generadas por los sismos de Mammoth Lake y Northridge, con valores de 1.93 g y 1.96 g, respectivamente; el sismo de Managua genera una aceleración espectral de 1.35 g. En este sitio el intervalo de período fundamental está más definido, en períodos cortos que van desde 0.14 s a 0.22 s, para todos los sismos analizados.

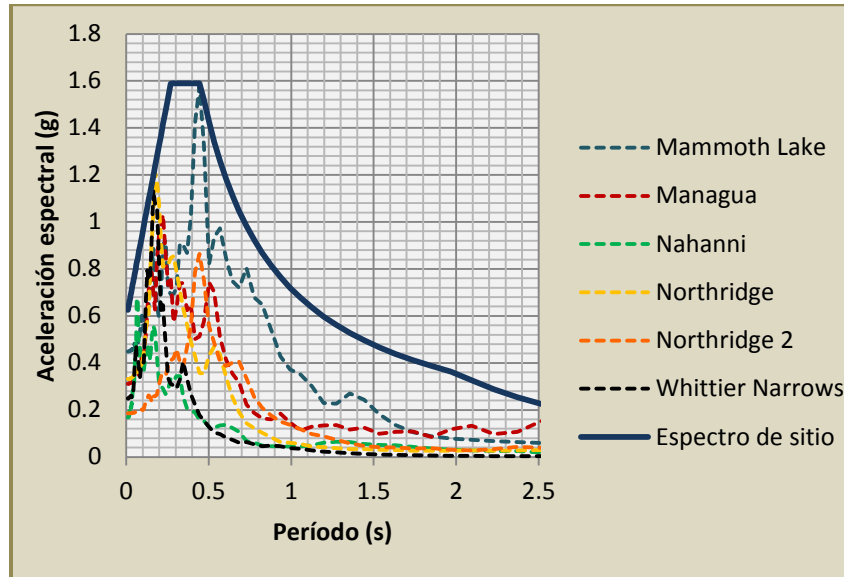


Figura 6.18. Espectros de respuesta en función de la aceleración espectral, en FAREM-Carazo.

En el FAREM-Carazo, los sismos de Mammoth Lake, Northridge y Whittier Narrows generaron las mayores aceleraciones espectrales, con: 1.59 g, 1.20 g y 1.14 g, respectivamente. Para el sismo de Managua de 1972, la mayor aceleración espectral es de 1.03 g, siendo la cuarta mayor generada en el sitio. Los rangos de períodos en que se generan las mayores aceleraciones va de 0.15s a 0.42; el amplio intervalo de períodos se debe a la poca rigidez de los suelos del sitio.

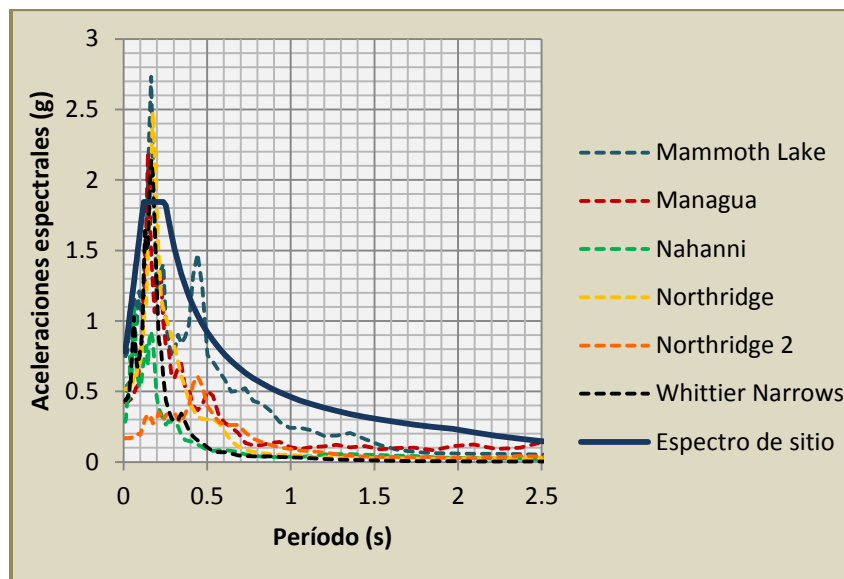


Figura 6.19. Espectros de respuesta en función de la aceleración espectral, en FAREM-Chontales.

En el FAREM-Chontales, los sismos de Mammoth Lake y Northridge generaron las mayores aceleraciones espectrales, con: 2.73 g y 2.48 g, respectivamente. El sismo de Managua que generó 2.19 g. Los rangos de períodos en que se generan las mayores aceleraciones va de 0.14 s a 0.17 s; de los 3 sitios estudiados, éste es el que presenta mayor definición en los rangos de períodos, en períodos cortos, debido a la rigidez del suelo.

### 6.3.2. Espectros suavizados y comparación con el espectro de diseño del RNC-07.

El RNC-07 establece un procedimiento para determinar espectros de respuesta; además de las características de los suelos con las cuales se constituye el espectro de diseño para cada una de las zonas sísmicas del país. Siguiendo el procedimiento establecido en el RNC-07, se calculó el espectro de respuesta suavizado para cada uno de los sitios, y se compararon con los espectros de diseño del RNC-07.

En la Figura 6.20. se muestra la comparación de los espectros de sitios con el espectro de diseño del RNC-07, transponiendo los espectros.

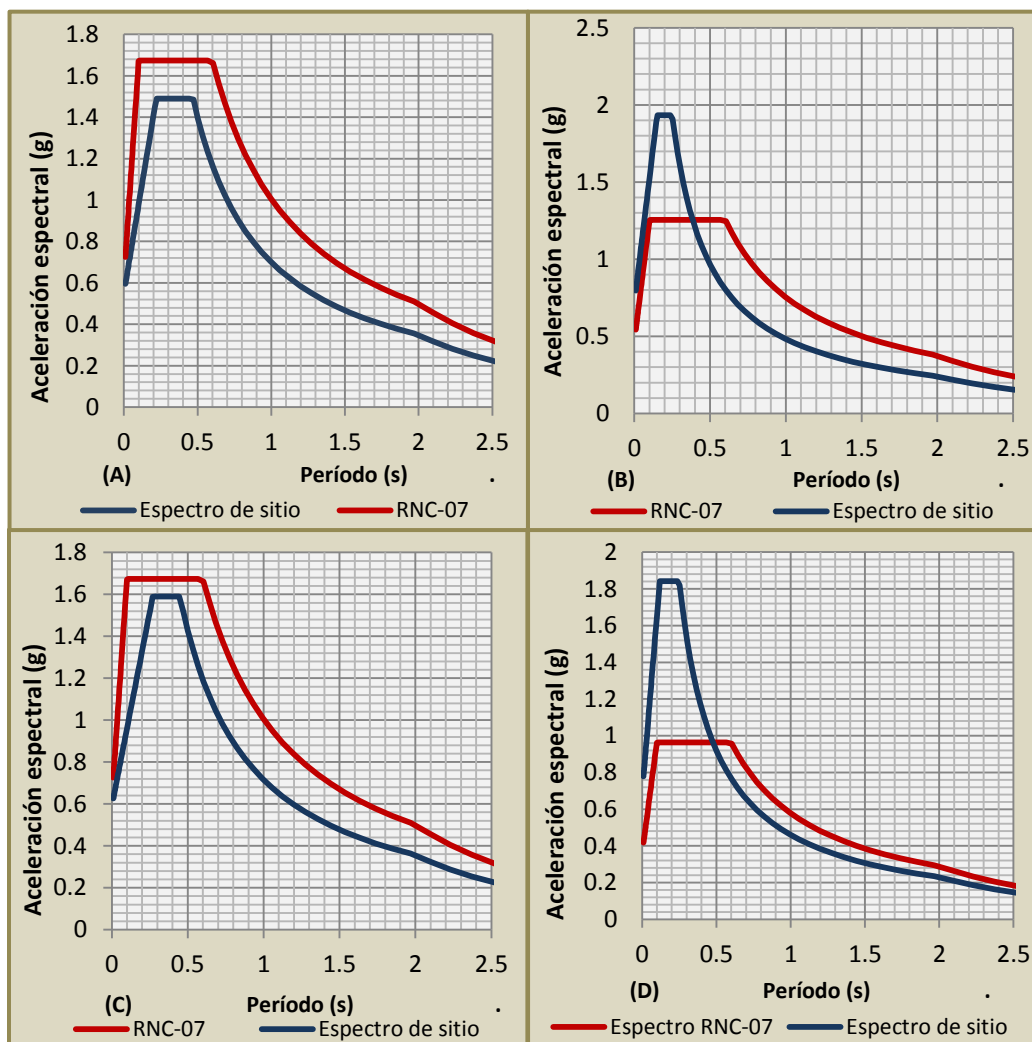


Figura 6.20. Comparación de espectros suavizados de la respuesta de sitio con el Espectro de diseño del RNC-07; (A) RURD-CIGEO, (B) RURD-Arlen Siu, (C) FAREM-Carazo, (D) FAREM-Chontales.

En el RURD-CIGEO se obtuvo un espectro suavizado con aceleraciones espectrales máximas de 1.49 g, con un plateau de 0.22 s a 0.47s, períodos relativamente cortos. Para este tipo de sitio el RNC-07 establece una aceleración máxima de 1.67 g, la cual es mayor 0.18 g que la aceleración espectral máxima encontrada, lo que en porcentaje representa 10.7% más que la aceleración del sitio.

Por otro lado, en RURD-Arlen Siu, se encontraron aceleraciones espectrales de 1.89 g, lo cual es mayor que la establecida en el RNC-07, por 0.22 g, que representa el 13%. Las aceleraciones máximas del sitio se definieron en un Plateau de 0.15 s a 0.25 s, que son períodos cortos.

El espectro calculado en el FAREM-Carazo es similar al espectro del RURD-CIGEO, esto se debe a que ambos sitios poseen suelos con características sísmicas similares, según lo establecido en el RNC-07. En este sitio las aceleraciones espectrales máximas son de 1.59 g que, en comparación con el RNC-07, son menores. Las máximas aceleraciones espectrales del reglamento son de 1.67 g; 5% mayores que las del sitio. En este sitio los períodos dominantes se reflejan en un Plateau que va de 0.27 s a 0.45 s, que son períodos un poco más largos que los estimados en el RURD.

El espectro suavizado determinado para el FAREM-Chontales, es el que presenta mayor aceleración espectral de todos los sitios, con 1.84 g, y no alcanza a envolver los picos o máximas aceleraciones de cuatro de los seis sismos analizados para el sitio. Para llegar a generar un espectro suavizado con esa aceleración, se debió utilizar un factor de amplificación (s) de 3.25, que es mucho mayor que el máximo valor del RNC-07 de 2.4, y así obtener una aceleración espectral que represente un 67% de la mayor aceleración espectral generada por los sismos analizados (Elgamal & Fraser, 2010). En comparación con el RNC-07 el espectro de respuesta suavizado del sitio es mucho mayor; ya que el espectro del RNC-07 tiene una aceleración espectral máxima de 0.96 g, que representa, a penas, el 52% de la mayor aceleración del espectro del sitio. Para este sitio se determinó un Plateau de 0.12 s a 0.25 s, lo que hace ver que este sitio presenta un período dominante bien definido en períodos cortos.

**Tabla 6.7.** Plateau y parámetros para los espectros suavizados del RNC-07 y los espectros suavizados de los sitios.

| Sitio | Espectro          | (Psa) | Ta(s) | Tb(s) | Tc(s) | S    |
|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| A     | RNC-07            | 1.67  | 0.1   | 0.6   | 2     | 2    |
|       | Espectro de sitio | 1.49  | 0.22  | 0.47  | 2     | 1.78 |
| B     | RNC-07            | 1.67  | 0.1   | 0.6   | 2     | 1.5  |
|       | Espectro de sitio | 1.89  | 0.15  | 0.25  | 2     | 2.31 |
| C     | RNC-07            | 1.67  | 0.1   | 0.6   | 2     | 2    |
|       | Espectro de sitio | 1.59  | 0.27  | 0.45  | 2     | 1.9  |
| D     | RNC-07            | 0.96  | 0.1   | 0.6   | 2     | 1.7  |
|       | Espectro de sitio | 1.84  | 0.12  | 0.25  | 2     | 3.25 |

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Las velocidades de onda de corte, determinadas en cada uno de los estratos encontrados, utilizando el valor de  $N$  del SPT, son mayores con el valor de  $N_{\text{campo}}$  en comparación con los valores encontrados con  $N_{\text{corregido}}$ . Los factores que afectan la corrección el  $N_{\text{Golpe}}$  hacen que este disminuya con respecto al determinado en campo. Además el  $N_{\text{Golpe}}$  tiende a aumentar a mayores profundidades; ya que  $V_s$  es proporcional a  $N$ , esta también aumenta en función de la profundidad.
- La comparación realizada entre el modelo de  $V_s$  estimado por (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011) y los modelos de  $V_s$  estimados con las hipótesis planteadas, deja ver que los resultados obtenidos en este estudio son bastante acertados; y proyectar velocidades de onda de corte utilizando estas hipótesis puede ser una alternativa para conocer información del suelo a profundidades en las que se desconocen las características del suelo.
- Es necesario realizar una microzonificación sísmica a la hora de evaluar la respuesta del suelo; ya que las características de rigidez del suelo varían en distancias cortas.
- Los modelos de  $V_s$  obtenidos para los sitios del RURD-CIGEO y el FAREM-Carazo, definen que estos sitios están constituidos por suelos moderadamente blandos según el RNC-07, esto, hasta la profundidad estudiada de 30m. Por lo que, se podría afirmar que la profundidad del basamento es bastante considerable.

En cambio, en los sitios RURD-Arlen Siu y el FAREM-Chontales, los modelos de  $V_s$  definen que estos sitios están constituidos por un suelo firme según el RNC-07; además que el basamento es bastante superficial; ya que se encontraron velocidades mayores a 760m/s en profundidades de aproximadamente 20m.

- En el FAREM-Chontales y en el RURD, en la zona del Arlen Siu, la respuesta sísmica muestra que las aceleraciones espectrales son altas. Los espectros suavizados evidencian que las amplitudes son mayores en sitios con basamento rocoso superficial. Se encontró que los espectros de sitio son mayores a los del reglamento; por lo que, posiblemente, el reglamento subestime el factor de amplificación para este tipo de suelos.

La respuesta sísmica es distinta en el FAREM-Carazo y en el RURD, en la zona del CIGEO. En estos sitios los suelos son menos rígidos y con basamento rocoso más profundo, generando que las aceleraciones espectrales sean menores, y/o

relativamente bajas en comparación con los otros sitios estudiados. Para este tipo de suelos, los factores de amplificación establecidos en el RNC-07 son acertados, determinándose espectros de sitio menores que el espectro de diseño del reglamento.

- En los sitios con suelos más rígidos el período natural de vibración del suelo está bien definido en intervalos pequeños, en periodos cortos, menores a 0.3 s. En cambio, en los sitios con suelos menos rígidos, o moderadamente blandos, el período natural del suelo se define hacia períodos un poco más largos, menores a 0.5 s, en intervalos más amplios, no tan bien definidos como en suelos más rígidos. Los períodos naturales establecidos para los espectros de diseño del RNC-07 se definen para un intervalo bastante amplio, lo que puede definirse como sobre-diseño; los resultados obtenidos en este estudio respaldan esta afirmación.

### 7.1. Recomendaciones.

Se espera que los resultados obtenidos en este estudio sean utilizados como información preliminar en futuros estudios a realizarse en estos sitios o que se desarrollen abordando el tema de respuesta sísmica de sitio. Por esta razón, se recomienda lo siguiente:

- Realizar pruebas de campo con métodos que permitan obtener información del suelo a mayores profundidades, para determinar características del suelo de una manera más exacta.
- Realizar una microzonificación sísmica en los sitios donde se pretende evaluar la respuesta sísmica de sitio; refiriéndose específicamente al Recinto Universitario Rubén Darío; ya que presenta un área bastante extensa y es necesario determinar las características del suelo en varios puntos para estimar una respuesta sísmica más precisa.
- Determinar correlaciones empíricas Vs-N SPT propias para las características sísmicas, geotécnicas y geológicas de la región, para obtener resultados más confiables al utilizar este método.
- Evaluar la respuesta sísmica de sitio utilizando otros métodos que tomen en cuenta ciertas características o parámetros que desprecia el método lineal equivalente.
- Estimar la respuesta sísmica de sitio utilizando registros sísmicos que se ajusten más a las características sísmicas de la región, o de sismos ocurridos en la región. Además generados en la zona de subducción, ya que estos podrían presentar



características de frecuencias distintas a los sismos ocurridos por fallamiento superficial, que fueron los utilizados en este estudio.

- Determinar la respuesta sísmica de sitio utilizando relaciones de atenuación en los sitios estudiados.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Alfaro, A. J. (2007). Correlación entre el valor N del ensayo de penetraición estándar y la velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá-Colombia. *Épsilon*, 13-23.
- Aponte, J. A. (2011). *Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica*. Bogotá: Pontificia Univesidad JAVERIANA.
- ASTM-D1586-08. (s.f.). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*.
- Bazán, E., & Meli, R. (1985). *Diseño sísmico de edificios*. México: Limusa.
- Bermúdez, M., Franco, L., & Martínez, S. (2002). Cálculo del período fundamental del suelo como herramienta para la microzonificación sísmica: casos colombianos. *III Coloquio de microzonificación sísmica-Caracas*.
- Castillo, W., & Zepeda, E. (2013). *Análisis no lineal de la respuesta sísmica de sitio a partir del modelamiento de propagación de ondas en una dimensión en el área urbana de la ciudad de Managua, Nicaragua*. Managua: Universidad Centroamericana (UCA).
- Castrillo, E., & Ulloa, H. (2005). *Caracterización geotécnica para propósito de cimentación, en el sitio donde se proyecta la construcción del estadio Nacional de Football, en la UNAN-Managua*. Managua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua).
- Castro, N. (2011). *Evaluación de la respuesta sísmica no-lineal de un depósito de suelo pre-consolidado de la ciudad de Cali*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- CENAPRED. (1999). *Curso sobre Diseño y Construcción sismorresistente de estructuras*. México: Secretaría de gobernación.
- Choppra, A. K. (1995). *Dynamics of structures (Theory and Applications to earthquake engineering)*. New Jersey: Prentice Hall.
- CIGEO. (2001). *Estudio geológico de riesgo sísmico en terreno donde se proyecta construir el Laboratorio del CIGEO-UNAN, Managua*. Managua: CIGEO/UNAN-Managua.
- CIGEO. (2004). *Estudio de riesgo sísmico por fallamiento geológico superficial, en el sitio donde se construirán los edificios para residencial estudiantiles en el RURD de la UNAN-Managua*. Managua: CIGEO/UNAN-Managua.
- CIGEO. (2004). *Informe de estudio geotécnico, Residencia Universitaria Arlen Siu*. Managua: CIGEO/UNAN-Managua.
- CIGEO. (2005). *Estudio geológico-geofísico por fallamiento superficial, en el sitio donde se construirá el Estadio Nacional de Fútbol*. Managua: CIGEO/UNAN-Managua.

- CIGEO. (2012). *Estudio geotécnico para el proyecto "Construcción de pabellón de aulas, servicios sanitarios, accesos y estacionamiento de Jinotepe"*. Managua: IGG-CIGEO/UNAN-Managua.
- CIGEO. (2012). *Estudio geotécnico y de dinámica de suelos para el proyecto "Construcción de pabellones de aulas, servicios sanitarios, accesos y estacionamientos, en UNAN, FAREM-Chontales"*. Managua: CIGEO/UNAN-Managua.
- Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Crisafulli, F., & Villafañe, E. (2002). *Espectros de respuesta y de diseño*. Universidad Nacional de Cuyo.
- Decourt et al. (1988). Standard Penetration Test (SPT): International reference test procedure. *Proc. 1st Int. Sympo. On Penetration Testing*, (págs. 3-26). Orlando.
- Díaz, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie*. México D.F.
- Elgamal, A., & Fraser, M. (2010). International Building code 2006-Section 1613 Earthquake loads. *Earthquake Engineering Course Note*, 1-28.
- Escorcía, K., & Ochoa, A. (2013). *Análisis de la respuesta sísmica de sitio y su efecto en el comportamiento dinámico de estructuras en el área urbana de la ciudad de Managua*. Managua: Universidad Centroamericana (UCA).
- Gallardo, G. (2005). *Curso de ingeniería de cimentaciones*. Perú.
- Grajales, E. (2003). *Comportamiento dinámico de los edificios provistos con dispositivos disipadores de energía*. San Nicolas de los Garzas: Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).
- Hashash, Y. (2011). *User Manual and Tutorial*. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hashash, Y., & Park, D. (2001). Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. *ELSEVIER*, 185-206.
- Hernández, O. (2009). *Reevaluación del efecto de sitio y propuesta de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico para Managua, Nicaragua*. Managua: CIGEO/UNAN-Managua.
- Hodgson, G. (1983). Generalidades de la geología de Nicaragua. *Primer seminario de Hidrología*. Managua: ANGPA.
- INETER & BRG. (2004). *Mapa geológico minero de la República de Nicaragua*. Managua.
- INETER. (2004). *Evaluación de las amenazas geológicas e hidrometeorológicas para sitios de urbanización en el casco urbano de Juigalpa, Chontales*. Managua.
- Johansson, L. (1988). *Seismic hazard analysis of Managua-Nicaragua*. Stockholm: Department of Civil and Engineering, Royal Institute of Technology.

- Kramer, S. (1996). *GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING*. New Jersey: Prentice-Hall.
- López, B., & Tórrez, A. (2012). *Propuesta de plan maestro para el desarrollo físico del Recinto Universitario Rubén Darío de la UNAN-Managua durante el período 2012-2032*. Managua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua).
- López, R. (2003). *Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración*. Argentina.
- Ludeña, L. (2007). *Variabilidad espacial del ensayo de penetración estándar en los sedimentos volcánicos del subsuelo del centro-norte de la ciudad de Quito*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- Mazuera, F., & González, L. (2009). Determinación de períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Merida, Venezuela, a partir de mediciones de ruido sísmico ambiental. *Ciencia e Ingeniería*, 57-68.
- Moore, F. (2001). *Zonificación sísmica preliminar para Nicaragua y microzonificación sísmica para Posoltega y Quezalaguaque*. Managua: Movimondo-ECHO.
- Moore, F. (2004). *Recopilación de información sobre amenaza sísmica para Managua*. Managua: Proyecto Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de Managua, DRM.
- MTI. (2007). *Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07)*. Managua: Ministerio de Transporte e Infraestructura.
- NEHRP. (2003). *NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES (FEMA 450)*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Obando, E. A. (2006). *Dynamic properties of the soils in the area of Managua, Nicaragua*. Lund: Lunds Universitet.
- Obando, E., Ryden, N., & Ulriksen, P. (2011). A mobile multi-depth borehole sensor set-up to study the surface-to-base seismic transfer functions. *Engineering Geology*, 246-258.
- Ohta, & Goto. (1978). Empirical Shear wave velocity equations in term of characteristics soil indexes. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 167-187.
- Parrales, R., & Picado, M. (2001). *Análisis de espectros de respuesta en el área de la ciudad de Managua*. Managua: Univesidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- Ramírez, R., Santana, G., & Chacón, O. (1996). Mapa de amplificación de ondas del valle central, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 37-55.
- Rodas, E. J. (Noviembre de 2011). *Susceptibilidad a la licuefacción por medio del sondeo de penetración estándar: Las Lisas, Santa Rosa, Guatemala*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos De Guatemala (USAC).
- Rodríguez, M. (2009). *Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos. Aplicación en Barcelona*. Barcelona: Universidad Politécnia de Cataluña (UPC).

- Schnabel, P., Lysmer, J., & Seed, H. (1972). *SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. Berkeley: University of California.
- Stharam, T., & Anbazhagan, P. (2013). Evaluation of dynamic properties and ground propiles usin MASW: Correlation between Vs and N60. *13th Symposium on Earthquake Engineering*, 11.
- Strauch, W. (2000). *Microzonificación sísmica de Managua*. Managua: INETER.
- Valle, M. (2006). *Estudio geológico por fallamiento superficial del terreno "Edificio Centro de Investigaciones Geocientíficas CIGEO/UNAN-Managua"*. Managua: CIGEO.
- Valle, M. (2007). *Estudio geológico por fallamiento superficial del terreno, de un lote destinado a la construcción de un edificio para bodegas, ubicado al sur de la UNICIT, Managua*. Managua: CEDOC-CIGEO.
- Vidal, F. (s.f.). Los terremotos y sus causas. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos. VII Jornada geotécnica de la ingeniería colombiana. (s.f.).
- Vilchez, J. A. (Abril de 2009). *Caracterización sísmica del terreno previa a la construcción de la estación de transferencia Guaraira Repano, La Urbina-Caracas*. Sartenajas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Villafañe, G. (1998). *Primeras mediciones de la energía del ensayo de penetración estándar (spt)*. Colombia.
- Zúñiga, F. R. (Febrero de 2011). *Sismología*. Centro de Geociencias, UNAM-Campus JURQUILLA.

# ANEXOS



**ANEXO A. Sondeos de SPT realizados en los sitios de estudio.**

**ANEXO A.1. RURD-CIGEO.**

# I - 5. Sondeos de SPT existentes

## Sondeo: prs-1

Proyecto: CIGEO(UNAN)

Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua

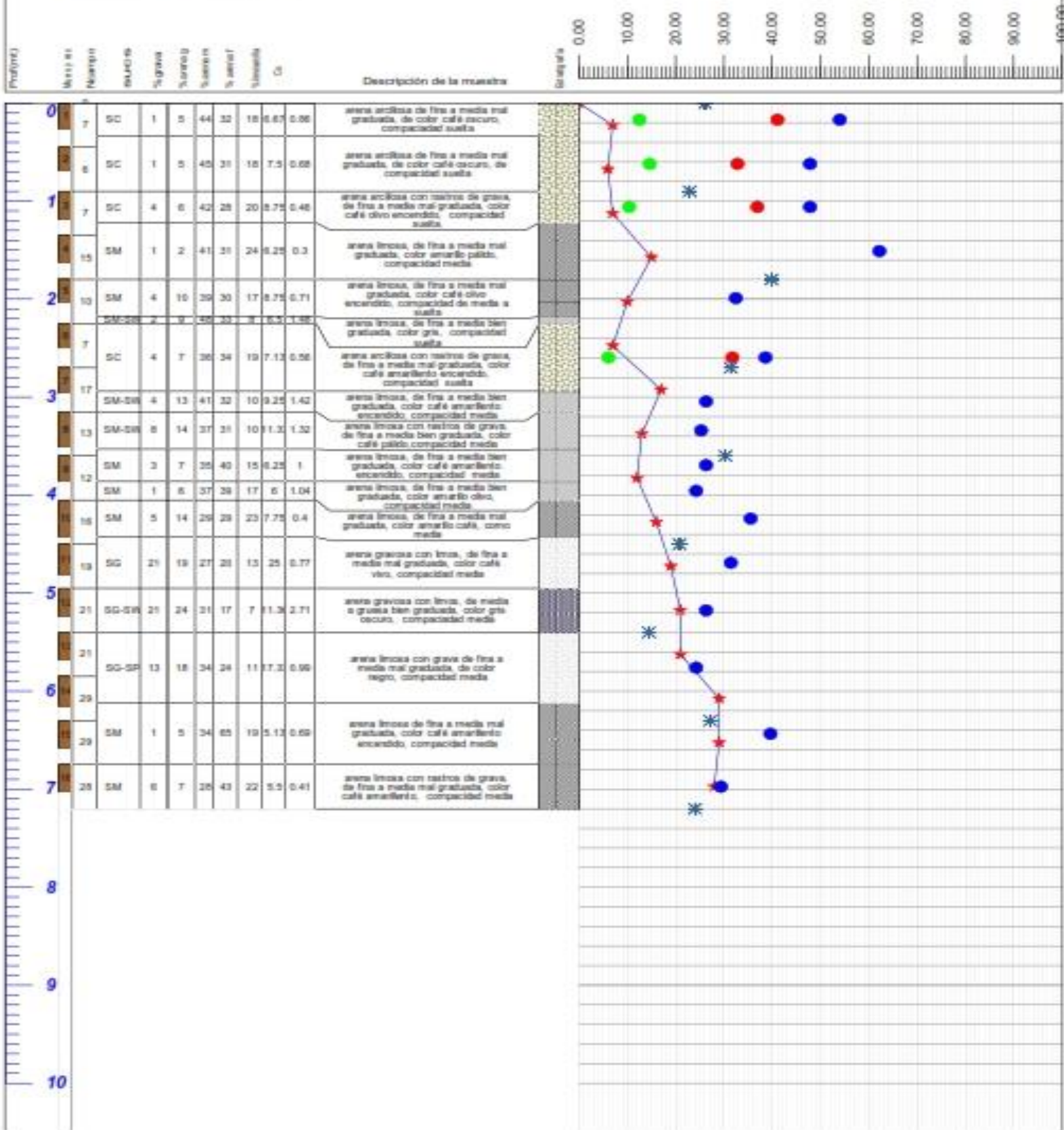
Elevación superior (manm): 49.90

Profundidad del nivel freático (manm): 1.00

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06

Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06

Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



★ Número de golpes

✱ Humedad in-situ

▨ Arena arcillosa mal graduada

□ arena gravosa mal graduada

● Límite líquido

● Índice de plasticidad

▨ Arena limosa bien graduada

▨ Arena gravosa bien graduada

● Límite plástico

▨ Arena limosa mal graduada

▨ Arena arcillosa bien graduada

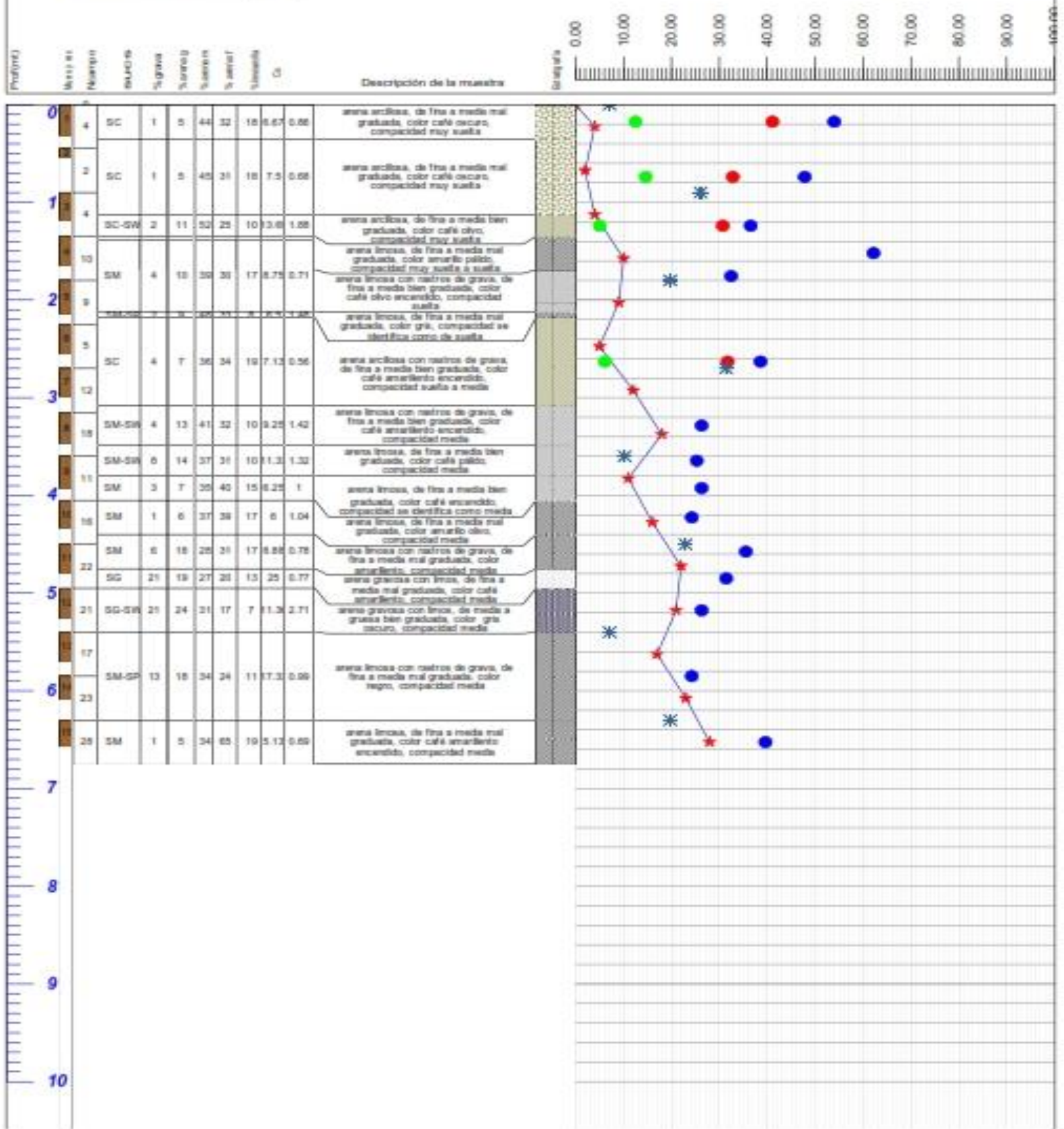
▨ Arena arcillosa y limosa

# Registro de perforación

## Sondeo: prs-2

Proyecto: CIGEO(UNAN).  
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua  
 Elevación superior (manm): 2000  
 Profundidad del nivel freático (manm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06  
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



### Leyenda

|                  |                       |                              |                               |
|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Número de golpes | Humedad in-situ       | Arena arcillosa mal graduada | arena gravosa mal graduada    |
| Límite líquido   | Índice de plasticidad | Arena limosa bien graduada   | Arena gravosa bien graduada   |
| Límite plástico  |                       | Arena limosa mal graduada    | Arena arcillosa bien graduada |
|                  |                       |                              | Arena arcillosa y limosa      |

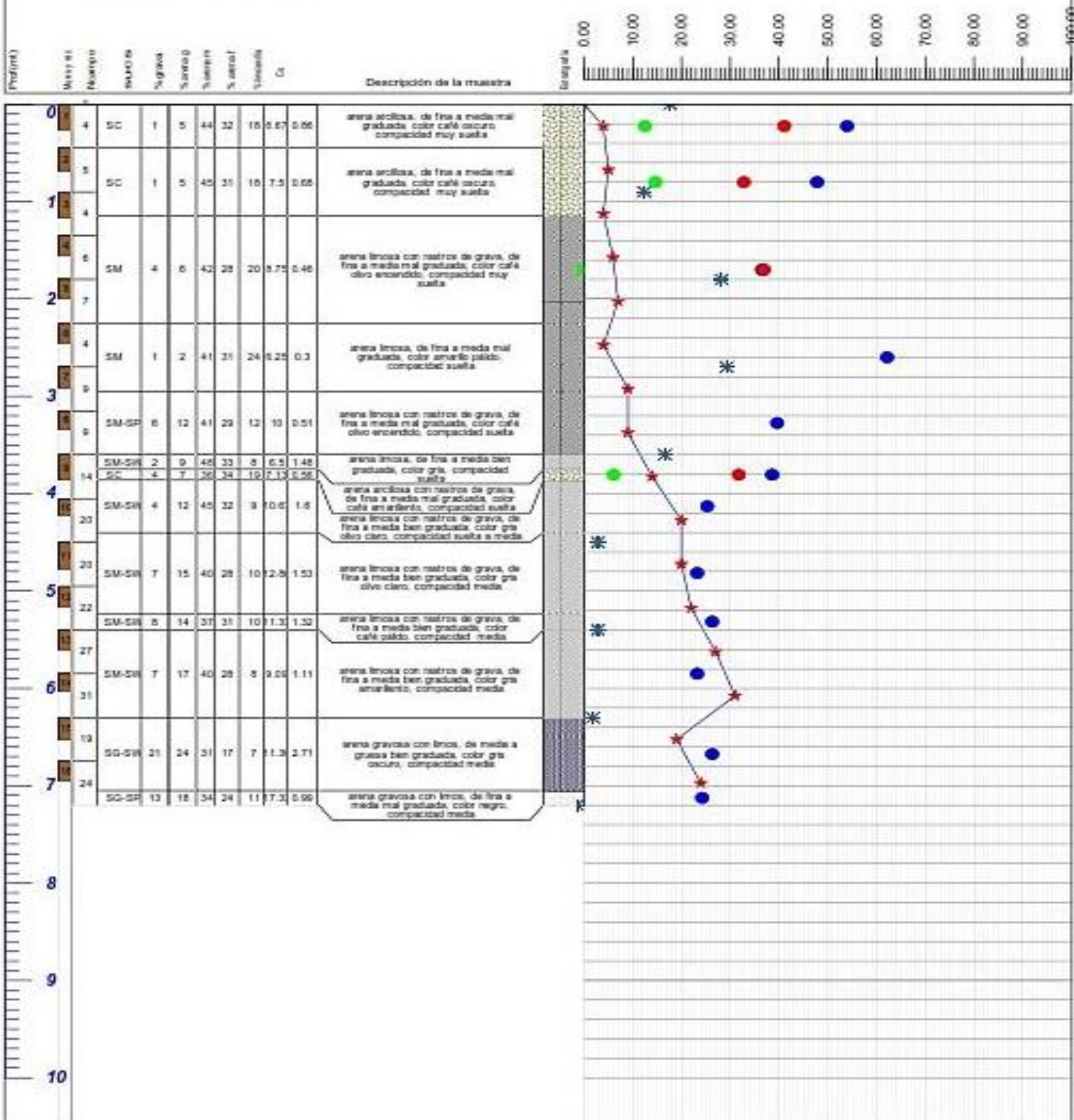


# Registro de perforación

## Sondeo: prs-3

Proyecto: CIGEO(UNAN).  
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua  
 Elevación superior (manm): 20m  
 Profundidad del nivel freático (manm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06  
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99



### Leyenda

- ★ Número de golpes
- ★ Humedad in-situ
- Arena arcillosa mal graduada
- Arena limosa bien graduada
- Arena limosa mal graduada
- Arena gravosa bien graduada
- Arena gravosa mal graduada
- Arena arcillosa bien graduada
- Arena arcillosa y limosa



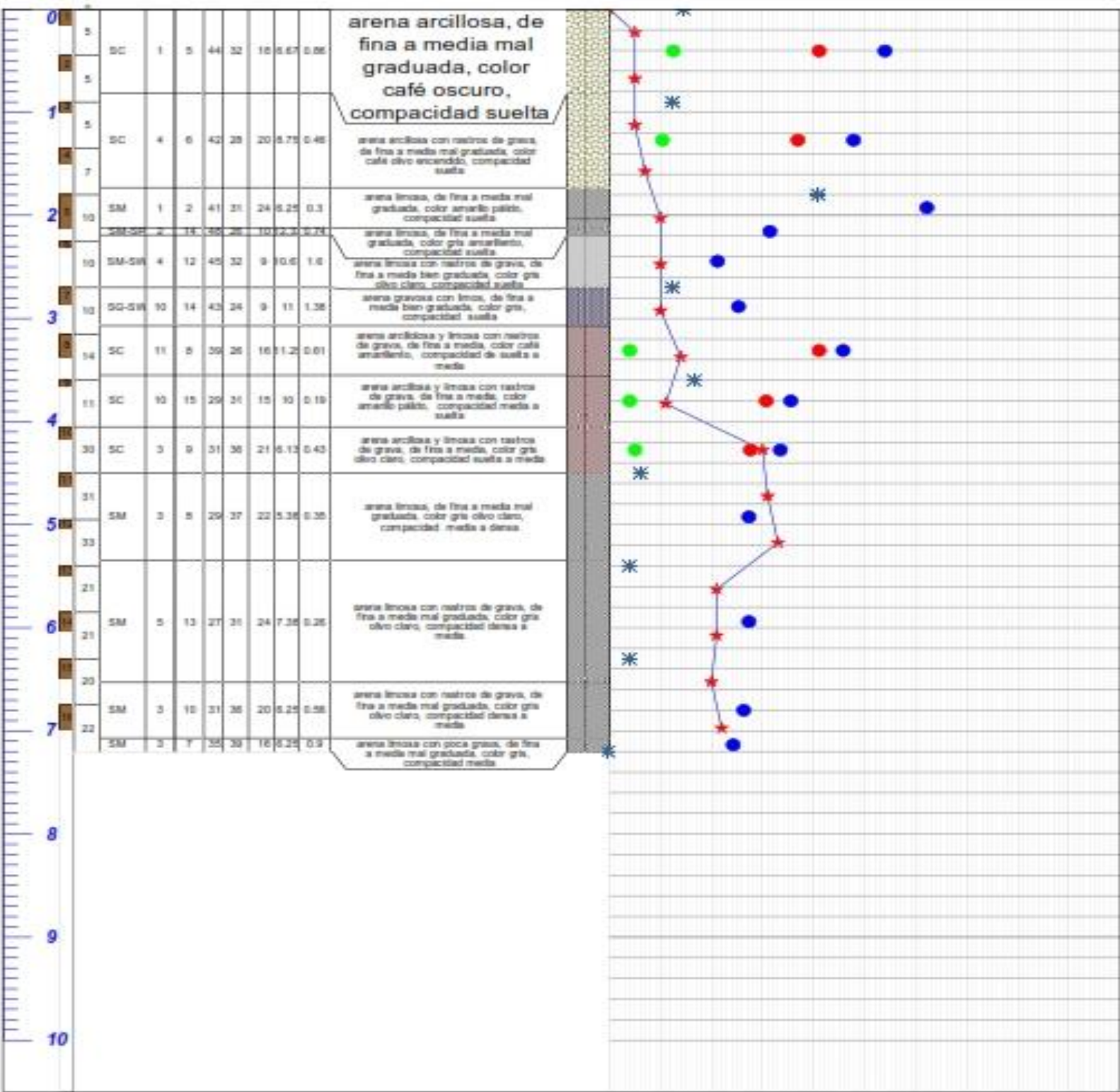


# Registro de perforación

## Sondeo: prs-5

Proyecto: CIGEO(UNAN).  
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua  
 Elevación superior (manm): 88m  
 Profundidad del nivel freático (manm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06  
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99



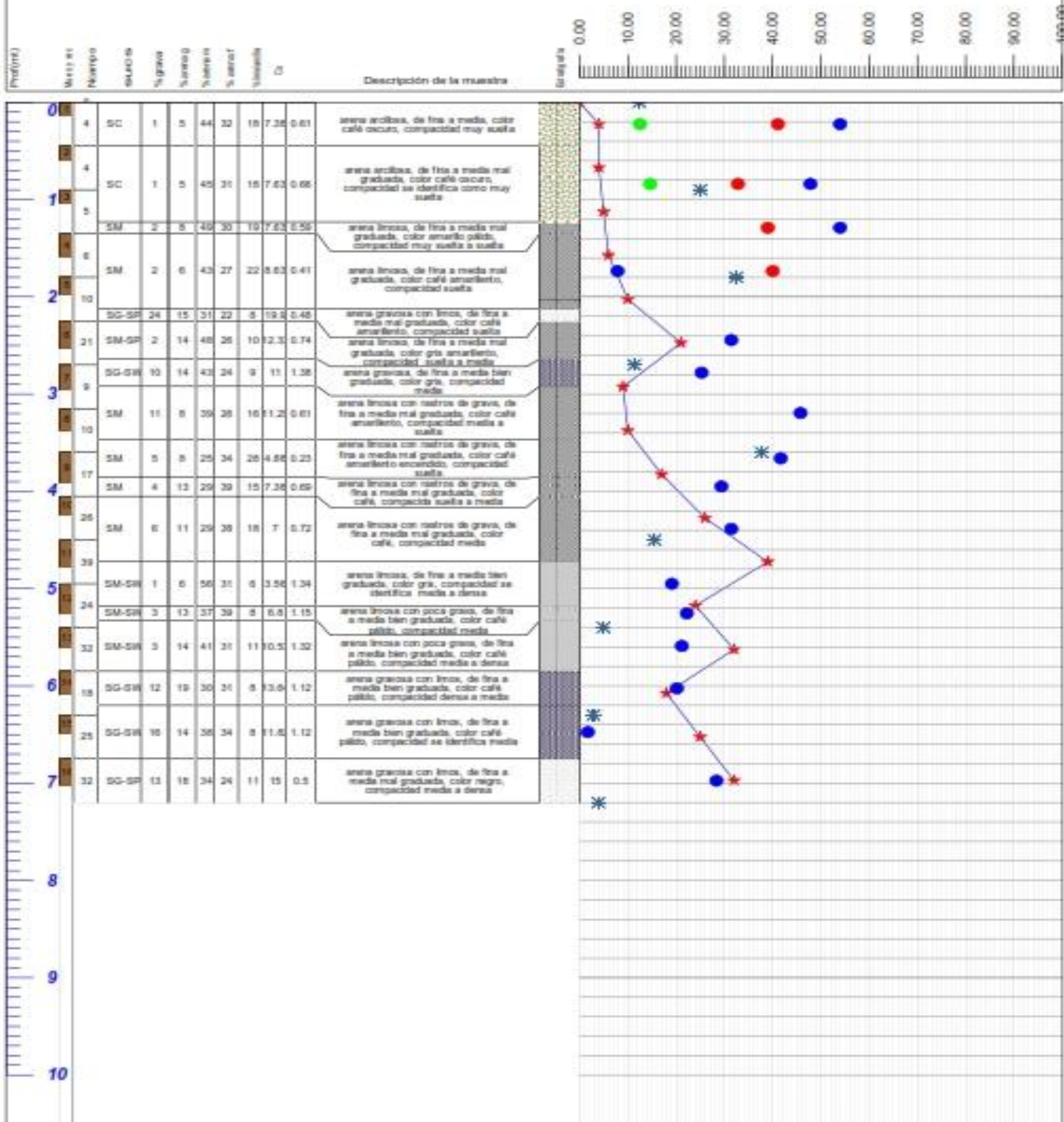


# Registro de perforación

## Sondeo: prs-6

Proyecto: CIGEO(UNAN).  
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua  
 Elevación superior (manm): anm  
 Profundidad del nivel freático (manm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06  
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



### Leyenda

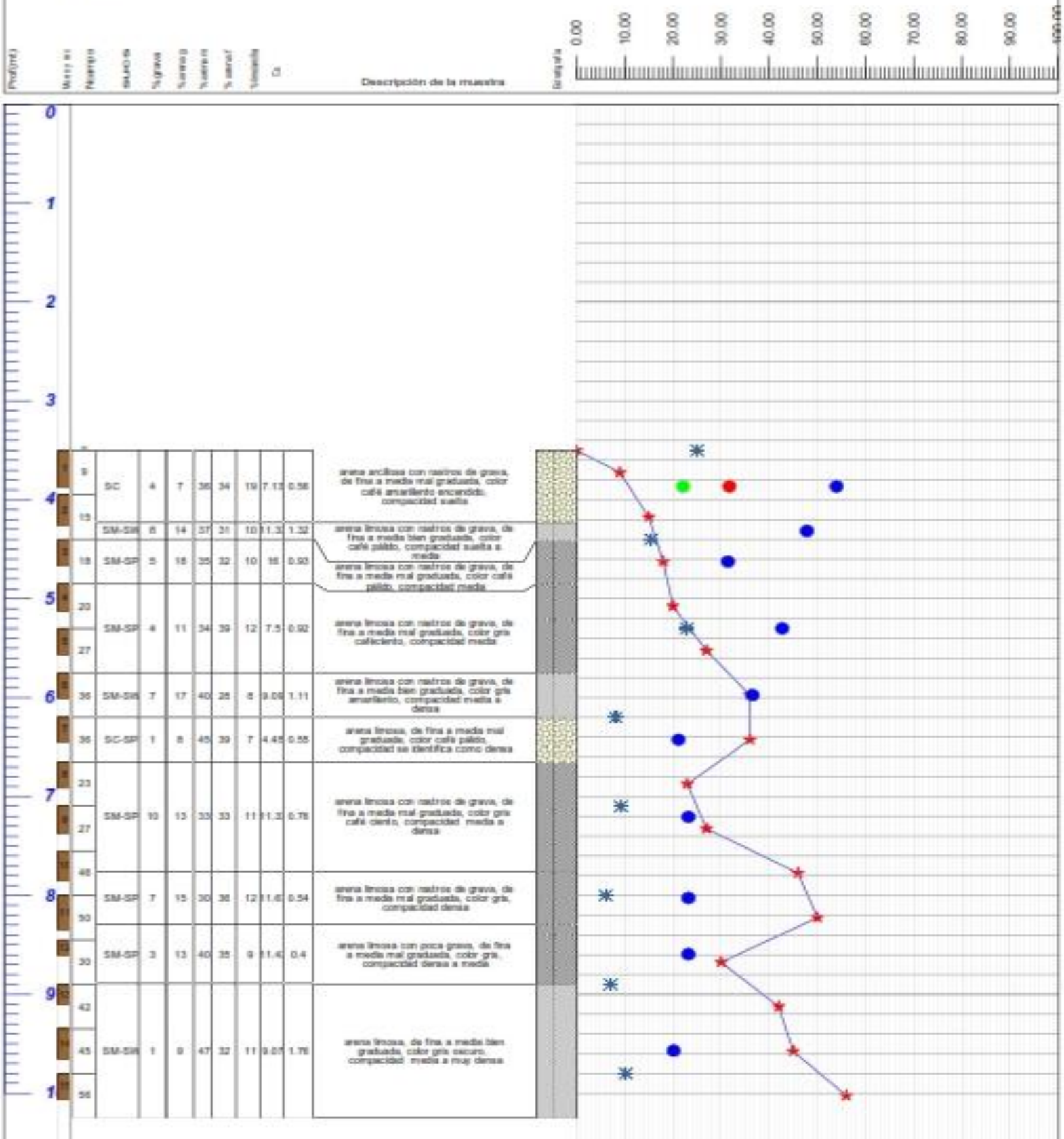
- ★ Número de golpes
- \* Humedad in-situ
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- Límite plástico
- [Pattern] Arena arcillosa mal graduada
- [Pattern] Arena limosa bien graduada
- [Pattern] Arena limosa mal graduada
- [Pattern] Arena gravosa mal graduada
- [Pattern] Arena gravosa bien graduada
- [Pattern] Arena arcillosa bien graduada
- [Pattern] Arena arcillosa y limosa

# Registro de perforación

## Sondeo: prs-7

Proyecto: CIGEO(UNAN).  
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua  
 Elevación superior (marim): amm  
 Profundidad del nivel freático(mamm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06  
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99



### Leyenda

- ★ Número de golpes
- ✱ Humedad in-situ
- [Pattern] Arena arcillosa mal graduada
- [Pattern] arena gravosa mal graduada
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- [Pattern] Arena limosa bien graduada
- [Pattern] Arena gravosa bien graduada
- Límite plástico
- [Pattern] Arena limosa mal graduada
- [Pattern] Arena arcillosa bien graduada
- [Pattern] Arena arcillosa y limosa

**ANEXO A.2. RURD-Arlen Siu.**

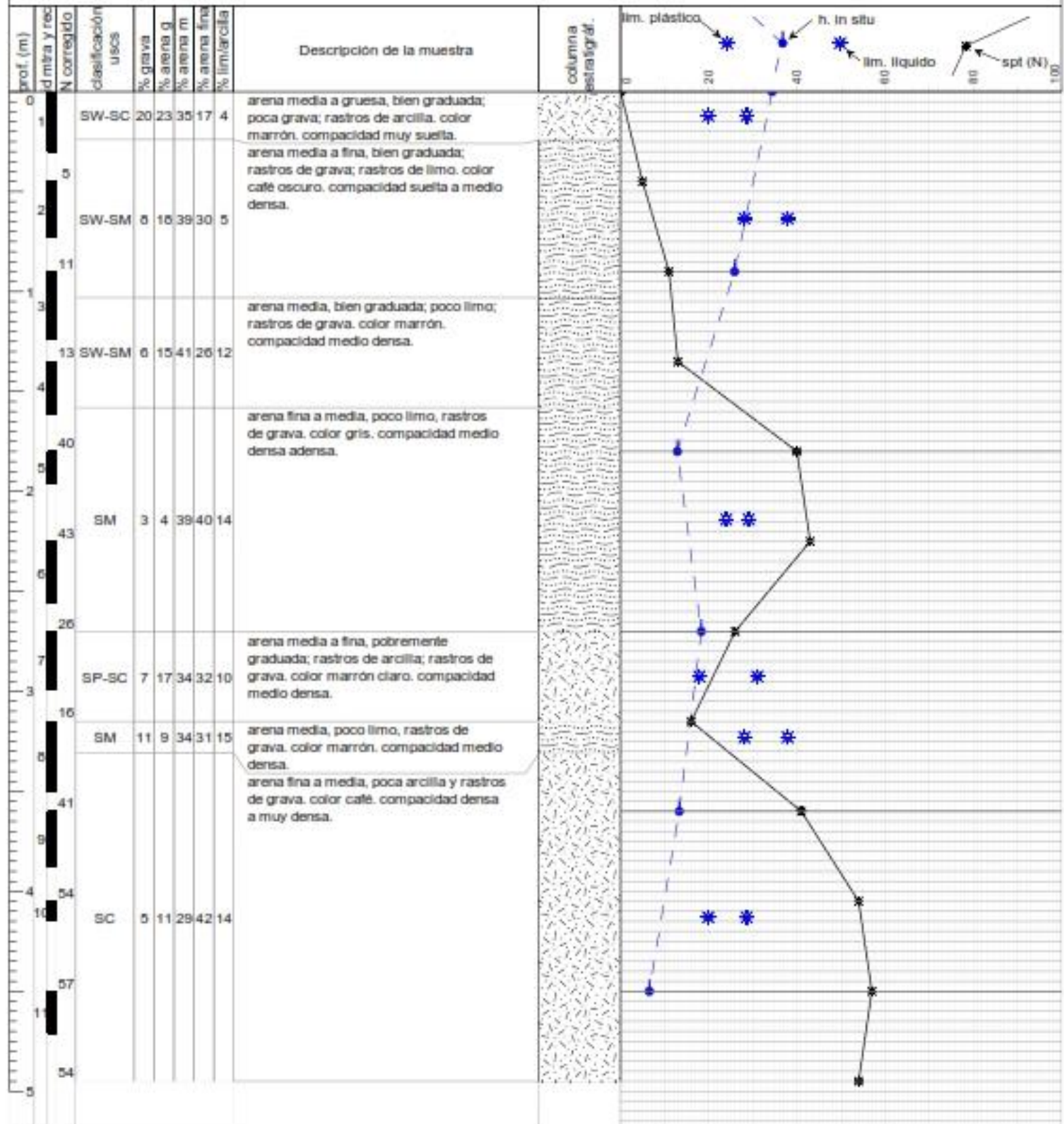


# Registro de Perforación

## Sondeo: DR-1

Proyecto: Residencia Universitaria Arlen Siu  
 Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1  
 Ubicación de sondeo: ver fig. 2  
 Elevación superior (msnm): 209  
 Elevación o profundidad de capa freática: n/a

Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.  
 Ingeniero de campo: Carlos Rubi  
 Fecha y hora de inicio: 08/06/04: 10:30  
 Fecha y hora de fin: 08/06/04: 17:30  
 Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99



# Registro de Perforación

## Sondeo: DR-2

Proyecto: Residencia Universitaria Arlen Siu

Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1

Ubicación de sondeo: ver fig. 2

Elevación superior (msnm): 211

Elevación o profundidad de capa freática: n/a

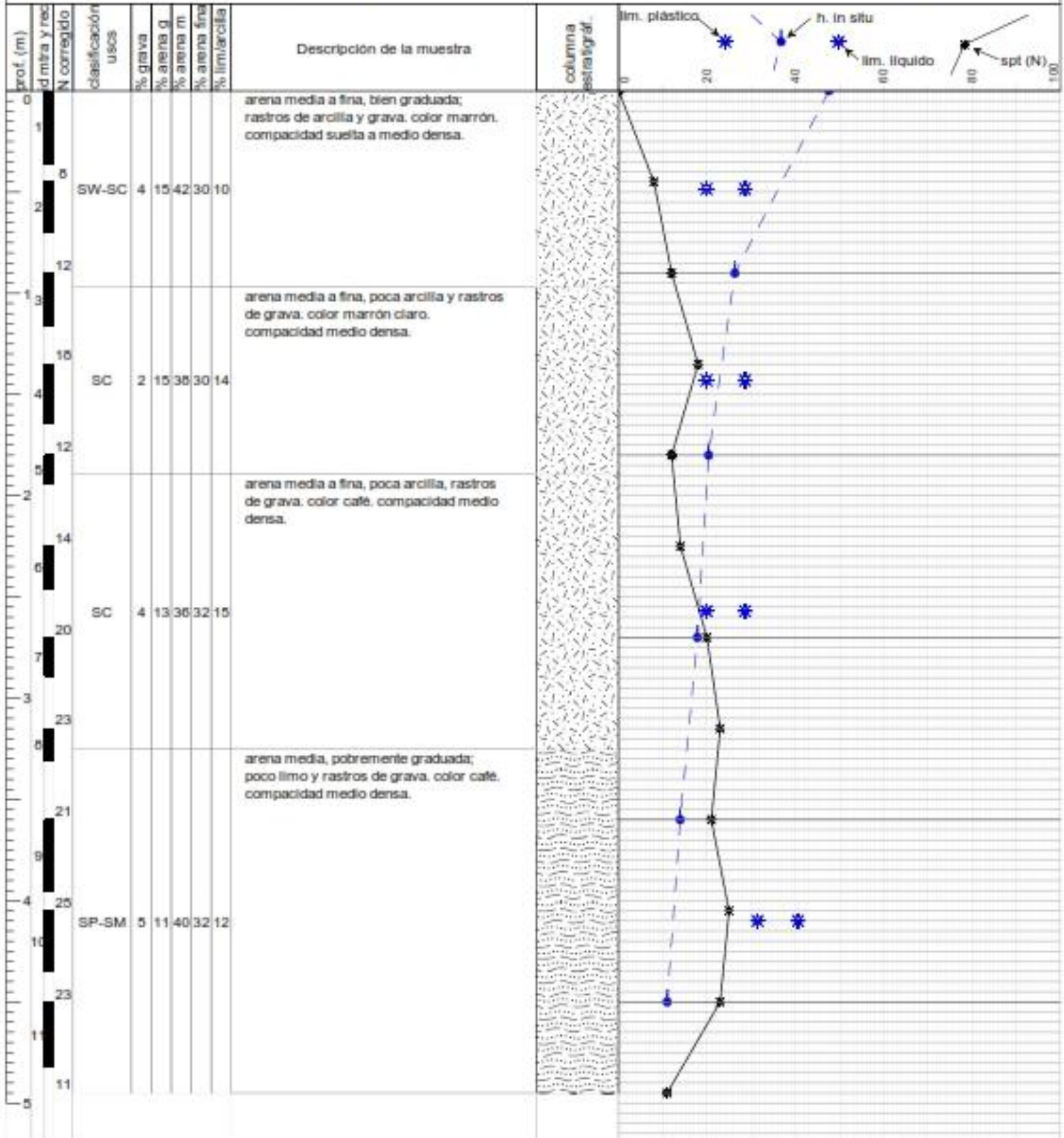
Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.

Ingeniero de campo: Carlos Rubi

Fecha y hora de inicio: 09/06/04: 09:20

Fecha y hora de fin: 09/06/04: 11:00

Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99



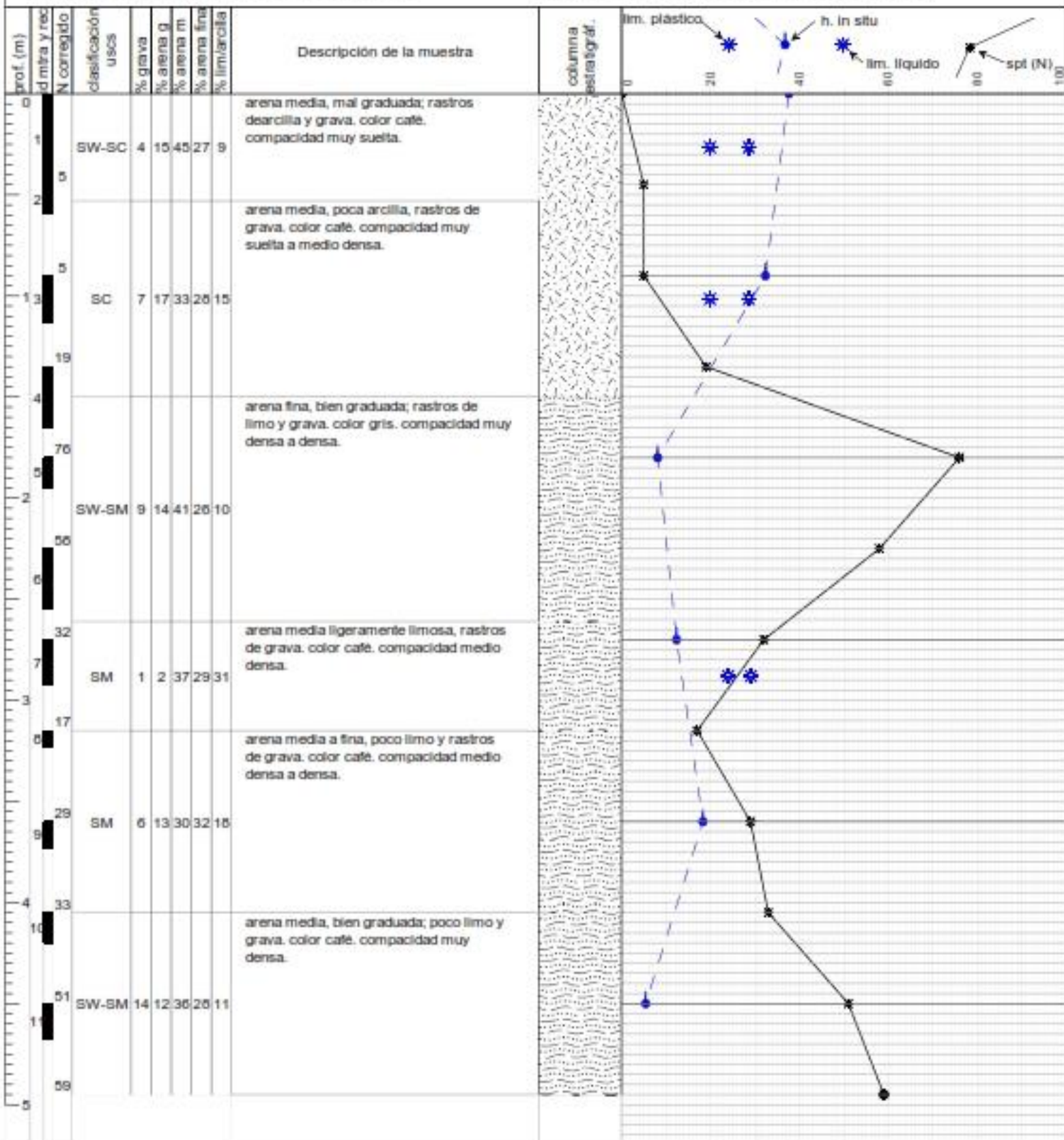


# Registro de Perforación

## Sondeo: DR-3

Proyecto: Residencia Universitaria Arlen Siu  
 Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1  
 Ubicación de sondeo: ver fig. 2  
 Elevación superior (msnmm): 210  
 Elevación o profundidad de capa freática: n/a

Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.  
 Ingeniero de campo: Carlos Rubi  
 Fecha y hora de inicio: 09/06/04: 11:30  
 Fecha y hora de fin: 09/06/04: 15:30  
 Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99



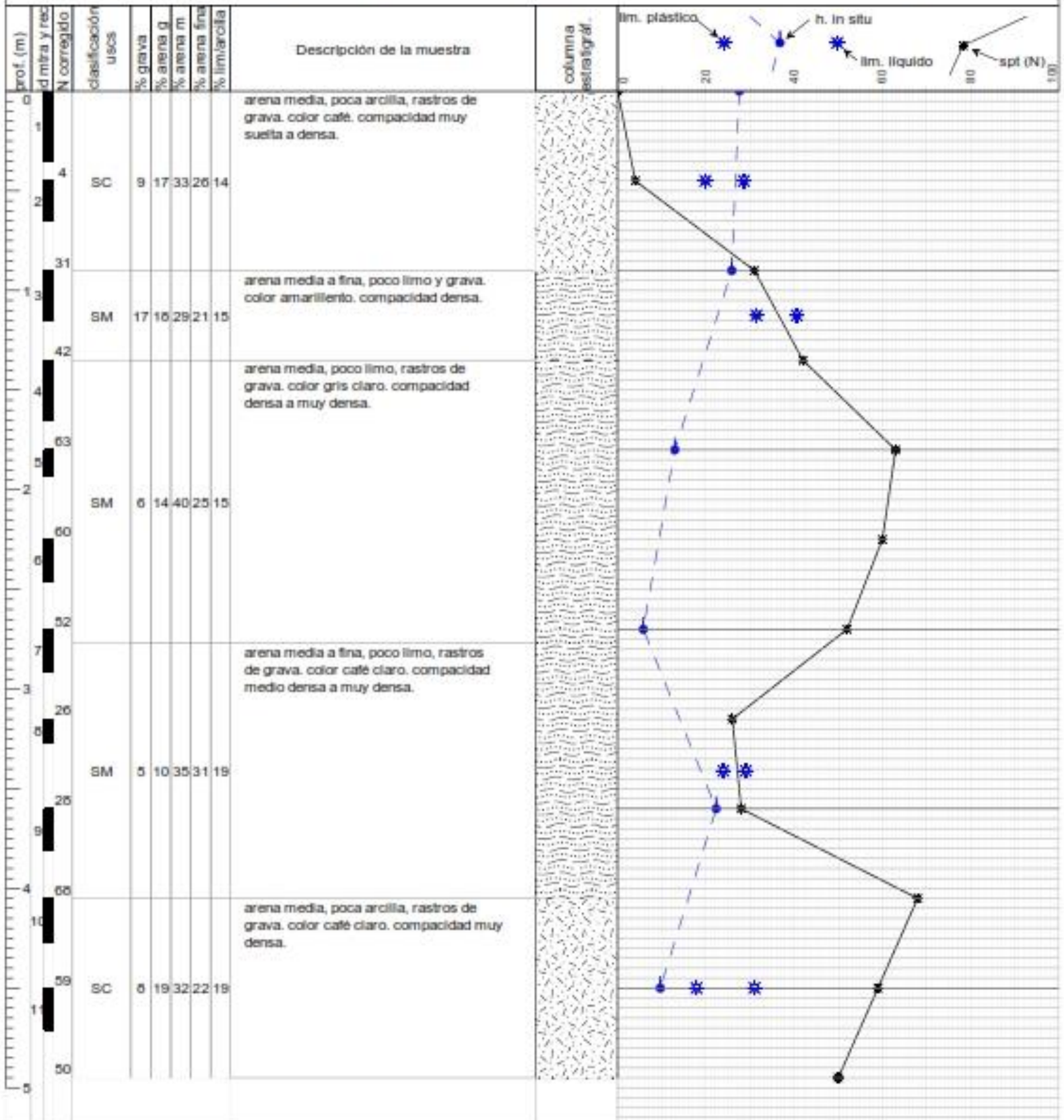


## Registro de Perforación

**Sondeo: DR-4**

Proyecto: Residencia Universitaria Arden Siu  
 Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1  
 Ubicación de sondeo: ver fig. 2  
 Elevación superior (msnm): 209  
 Elevación o profundidad de capa freática: n/a

Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.  
 Ingeniero de campo: Carlos Rubí  
 Fecha y hora de inicio: 09/06/04: 16:00  
 Fecha y hora de fin: 10/06/04: 10:30  
 Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99



## Registro de Perforación

### Sondeo: DR-5

Proyecto: Residencia Universitaria Arlen Siu

Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1

Ubicación de sondeo: ver fig. 2

Elevación superior (msnm): 213

Elevación o profundidad de capa freática: n/a

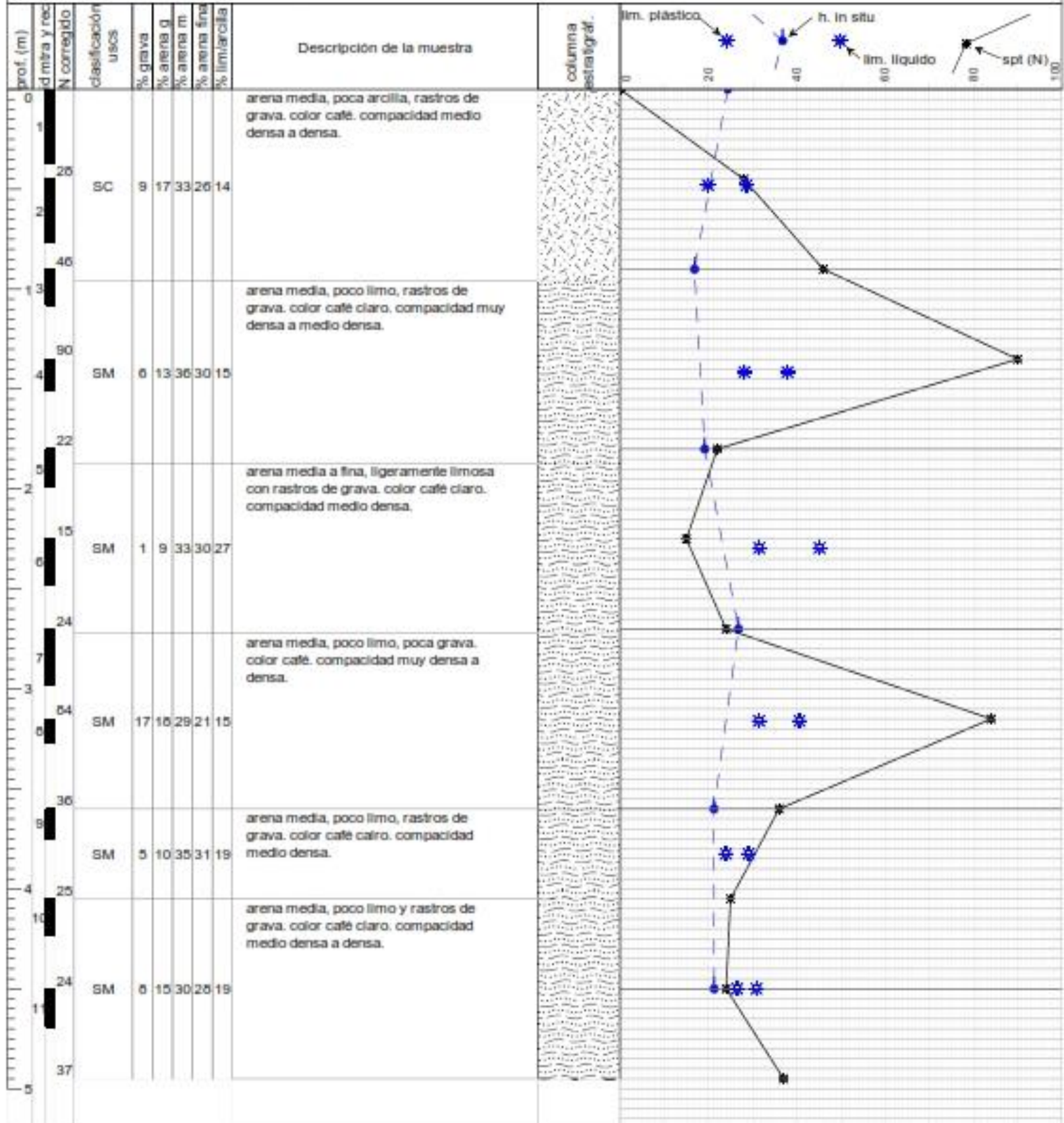
Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.

Ingeniero de campo: Carlos Rubi

Fecha y hora de inicio: 10/06/04: 11:00

Fecha y hora de fin: 10/06/04: 16:30

Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99

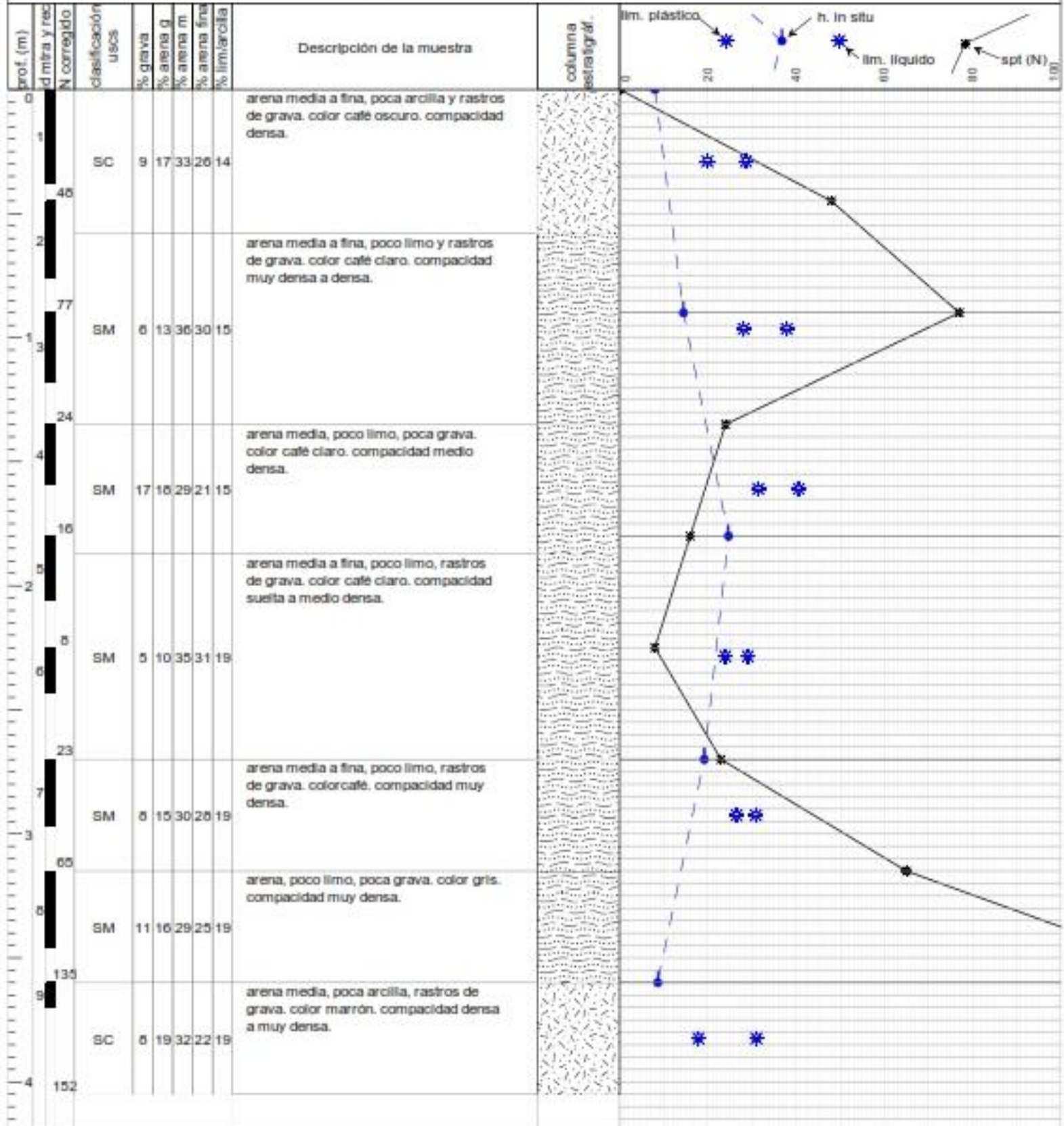




## Registro de Perforación Sondeo: DR-6

Proyecto: Residencia Universitaria Arlen Siu  
 Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1  
 Ubicación de sondeo: ver fig. 2  
 Elevación superior (msnm): 212  
 Elevación o profundidad de capa freática: n/a

Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.  
 Ingeniero de campo: Carlos Rubi  
 Fecha y hora de inicio: 11/06/04: 09:00  
 Fecha y hora de fin: 11/06/04: 16:30  
 Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99

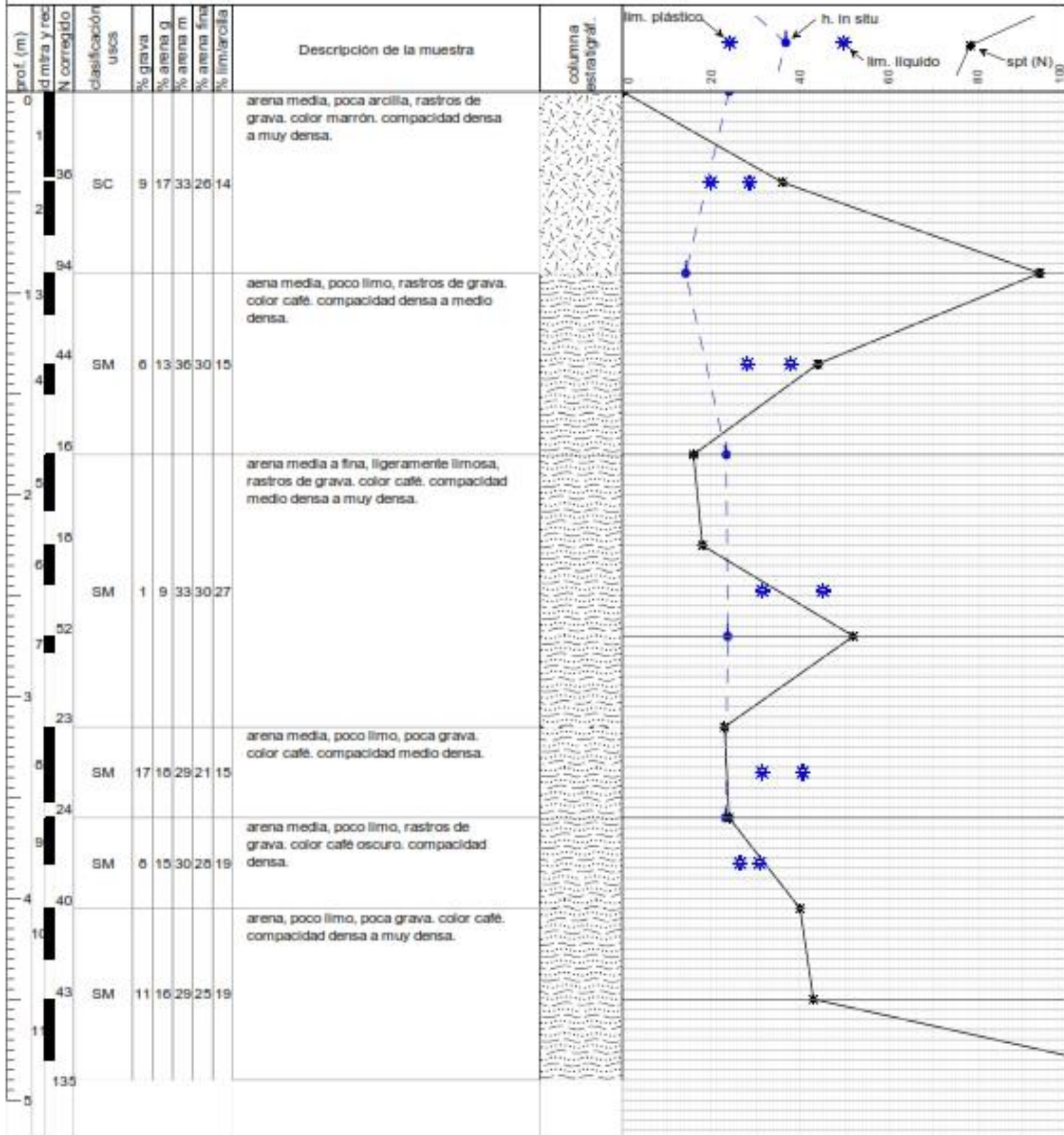


# Registro de Perforación

## Sondeo: DR-7

Proyecto: Residencia Universitaria Arlen Siu  
 Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1  
 Ubicación de sondeo: ver fig. 2  
 Elevación superior (msnm): 210  
 Elevación o profundidad de capa freática: n/a

Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.  
 Ingeniero de campo: Carlos Rubi  
 Fecha y hora de inicio: 12/06/04: 09:00  
 Fecha y hora de fin: 12/06/04: 16:30  
 Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99





## Registro de Perforación

Sondeo: DR-8

Proyecto: Residencia Universitaria Arlen Siu

Localización del proyecto: UNAN-Man., ver fig. 1

Ubicación de sondeo: ver fig. 2

Elevación superior (msnm): 209

Elevación o profundidad de capa freática: n/a

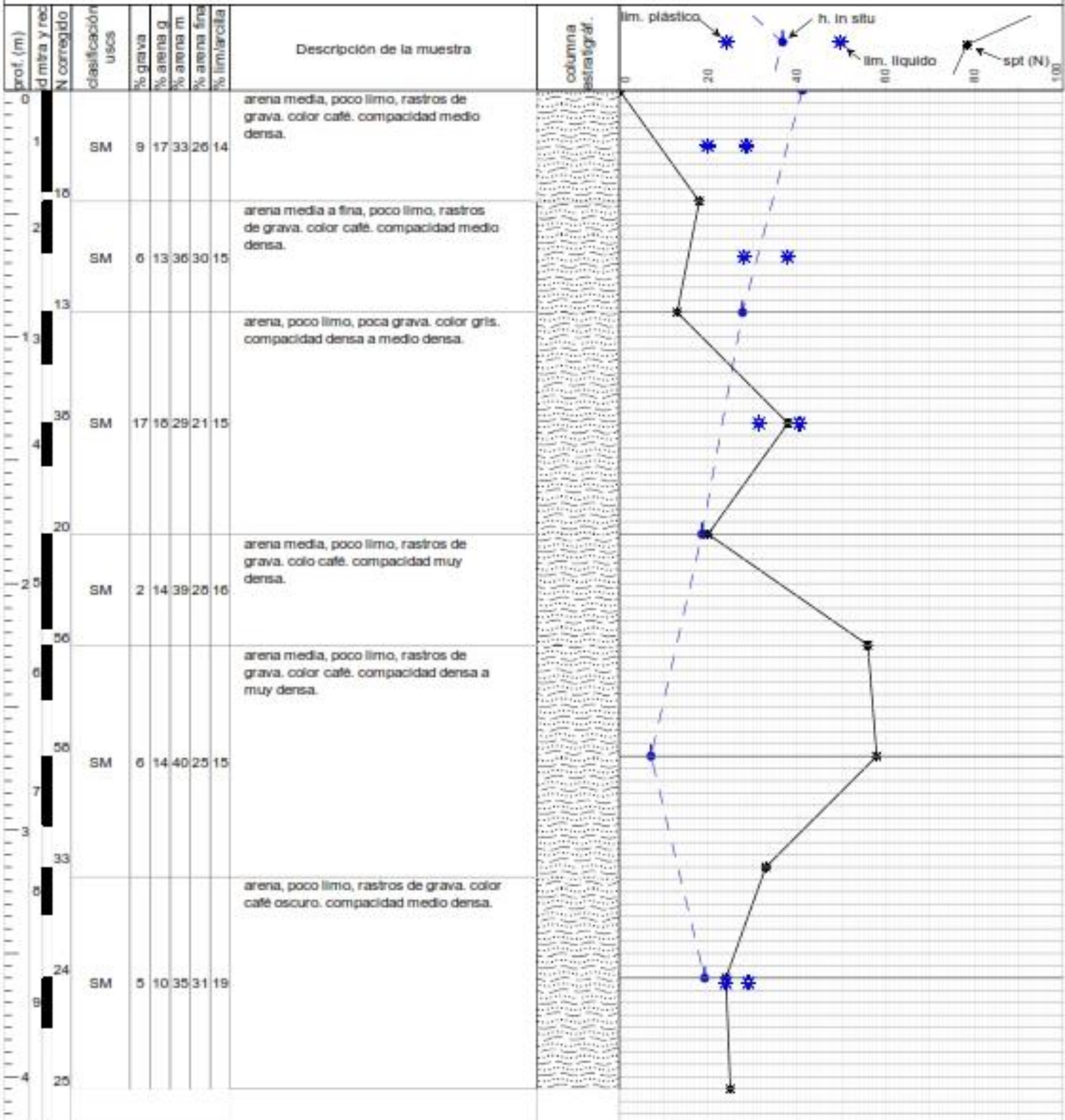
Ingeniero supervisor: Bismarck J. Contreras R.

Ingeniero de campo: Carlos Rubí

Fecha y hora de inicio: 13/06/04: 09:00

Fecha y hora de fin: 13/06/04: 16:30

Método de pref. y muestreo: ASTM D 1586-99



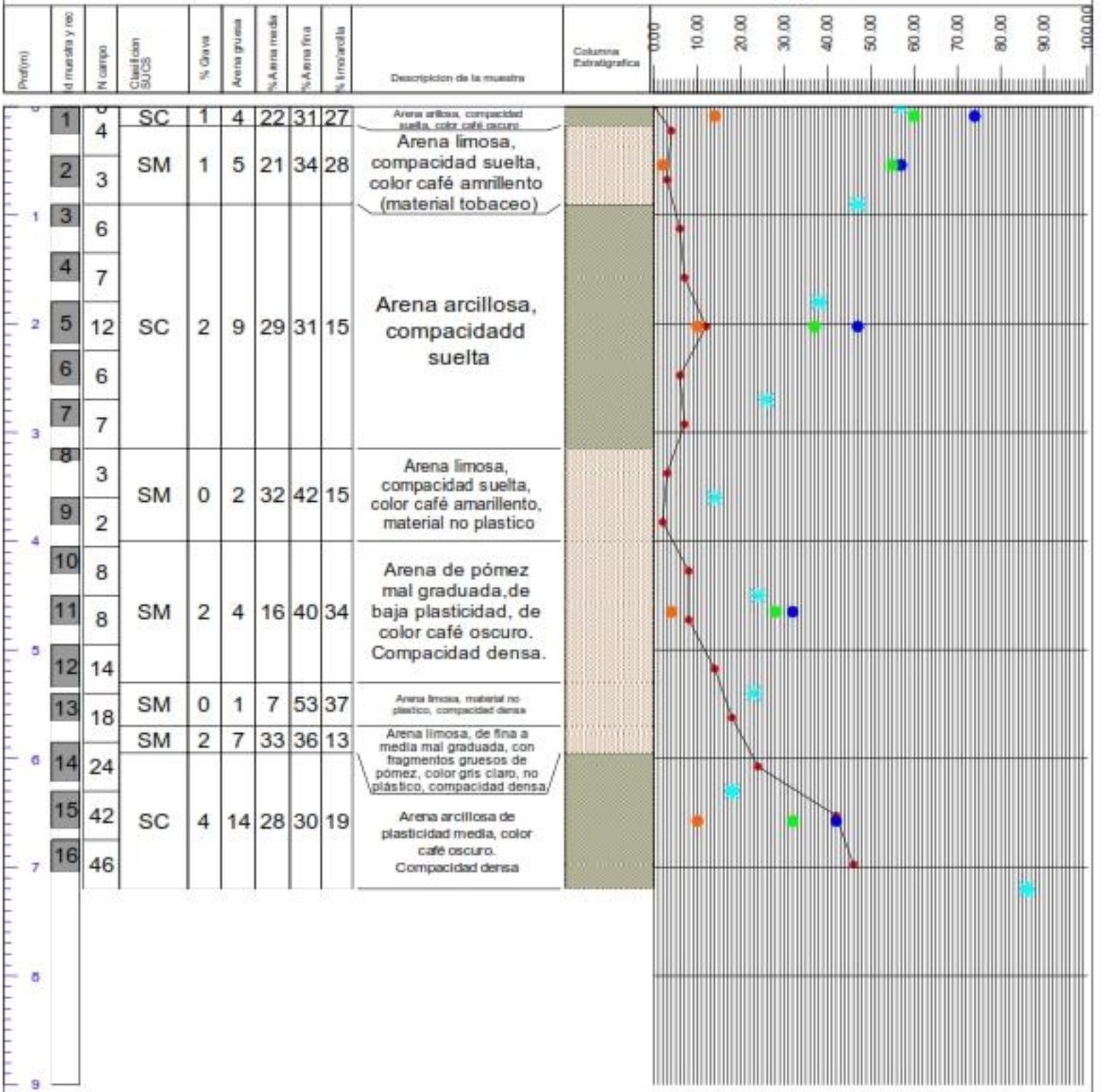
**ANEXO A.3. FAREM-Carazo.**



Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento,  
 Localización: Terrenos del FAREM Jinotepe  
 Elevación superior (msnm): (ver tabla 2.1)  
 Profundidad del nivel freático(msnm): no encontrada

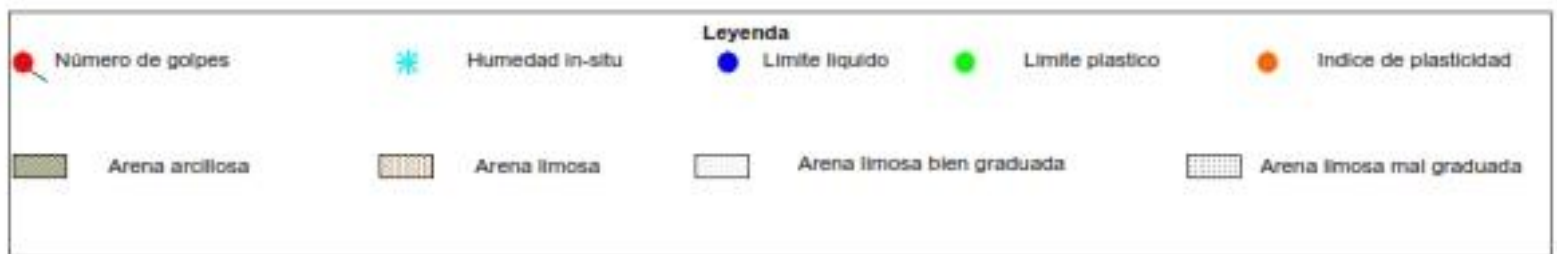
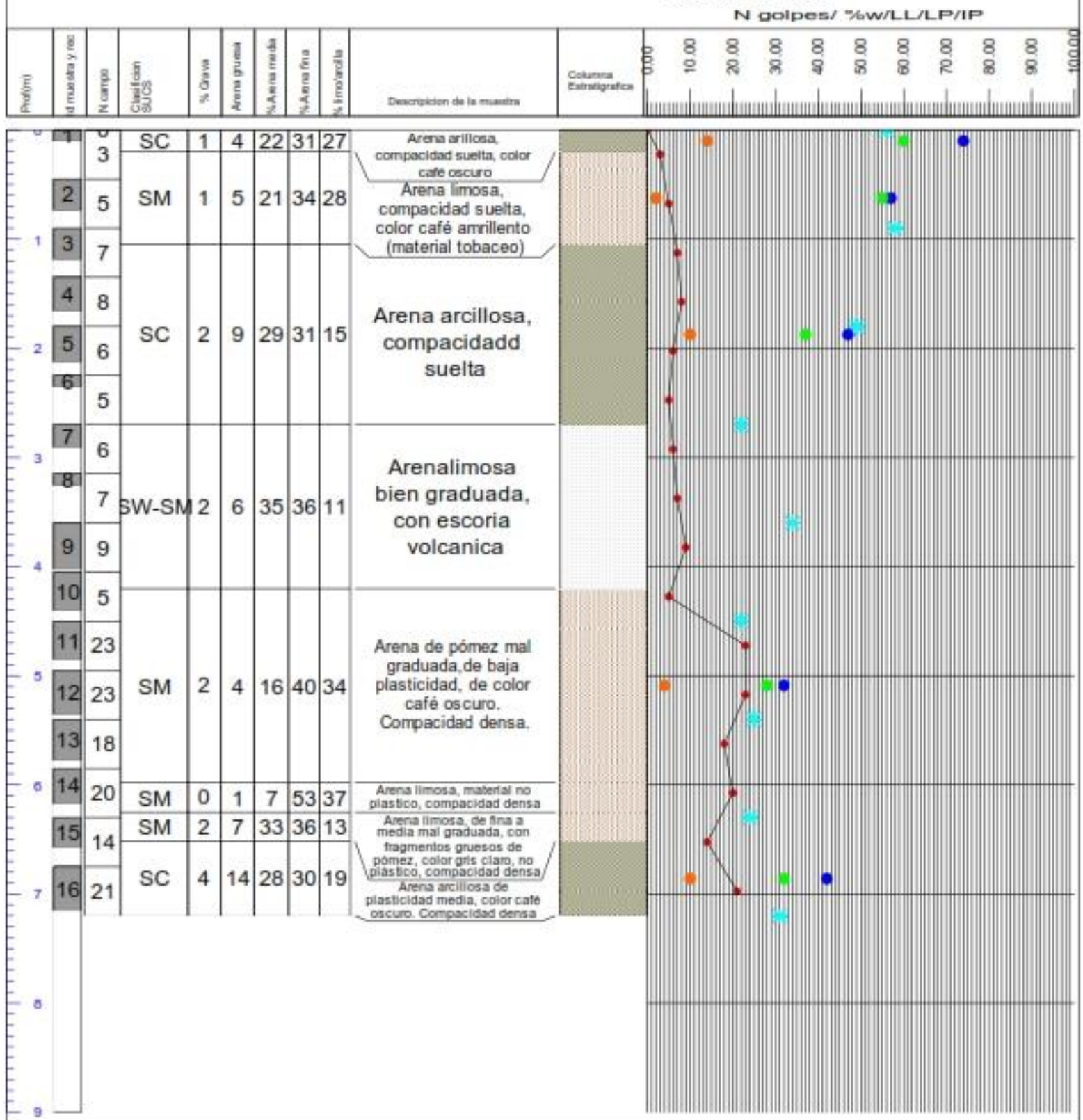
Fecha de inicio de perforaciones: Enero 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Enero 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa  
 Supervisor: Marvin Valle

N golpes/ %w/LL/LP/IP



Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento,  
 Localización: Terrenos del FAREM Jinotepe  
 Elevación superior (msnm): (ver tabla 2.1)  
 Profundidad del nivel freático(msnm): no encontrada

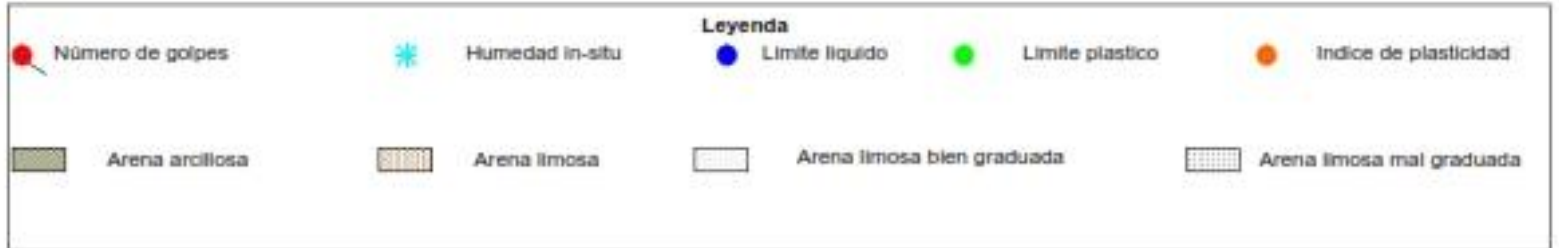
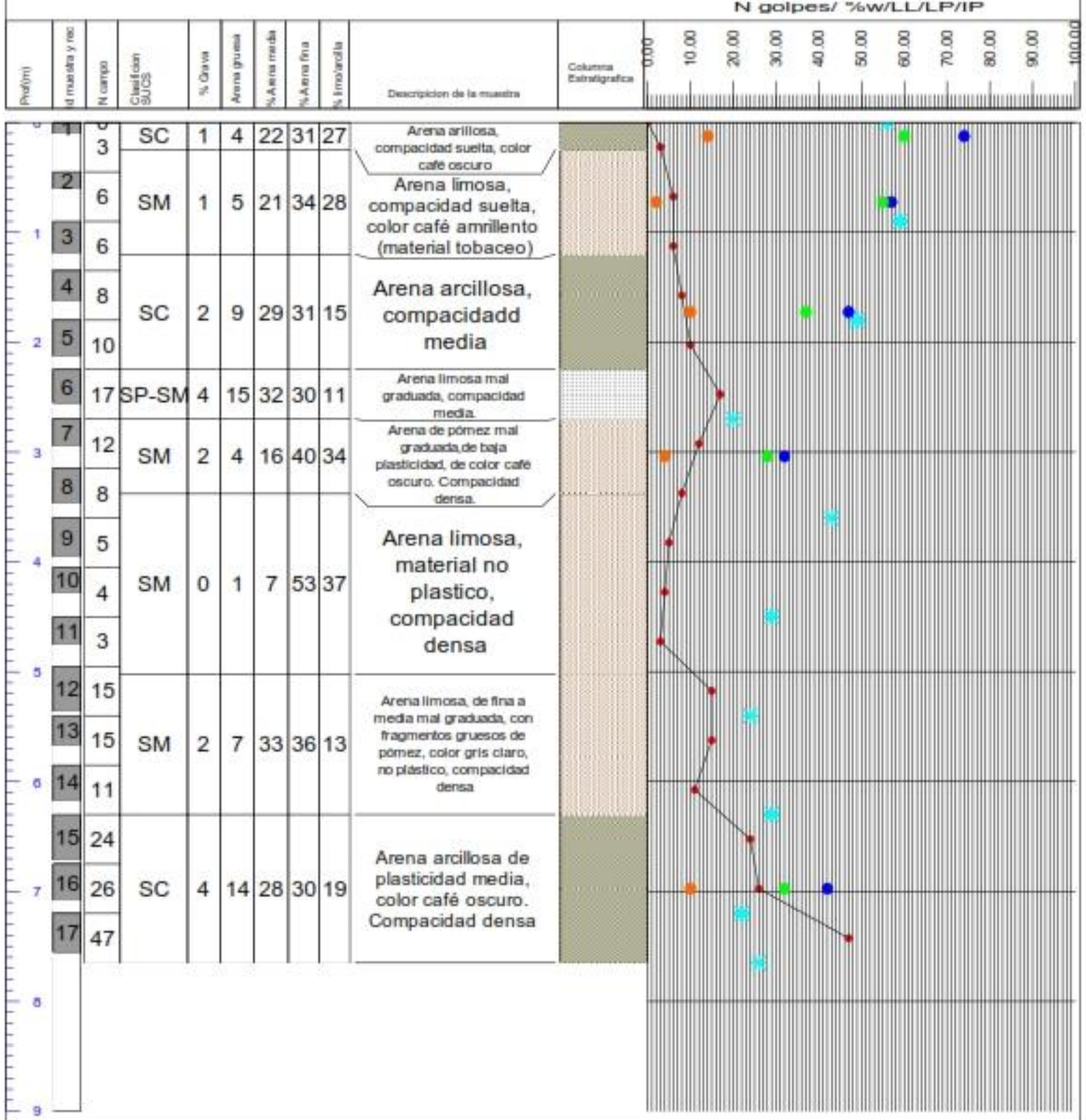
Fecha de inicio de perforaciones: Enero 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Enero 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa  
 Supervisor: Marvin Valle





Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento,  
 Localización: Terrenos del FAREM Jinotepe  
 Elevación superior (msnm): (ver tabla 2.1)  
 Profundidad del nivel freático(msnm): no encontrada

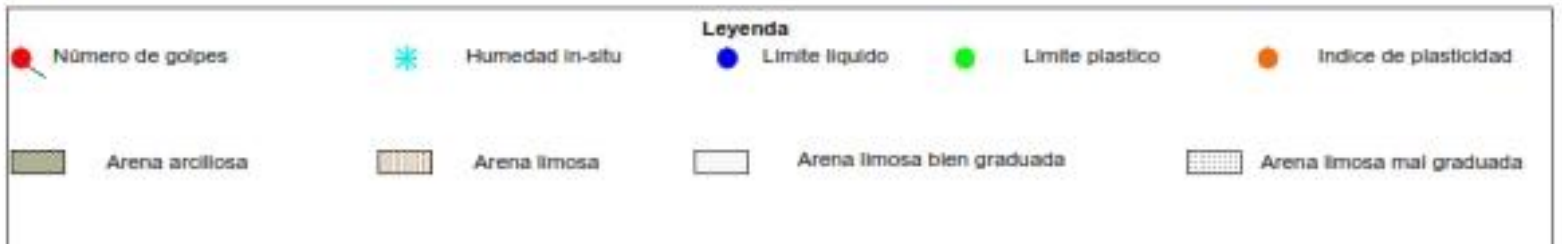
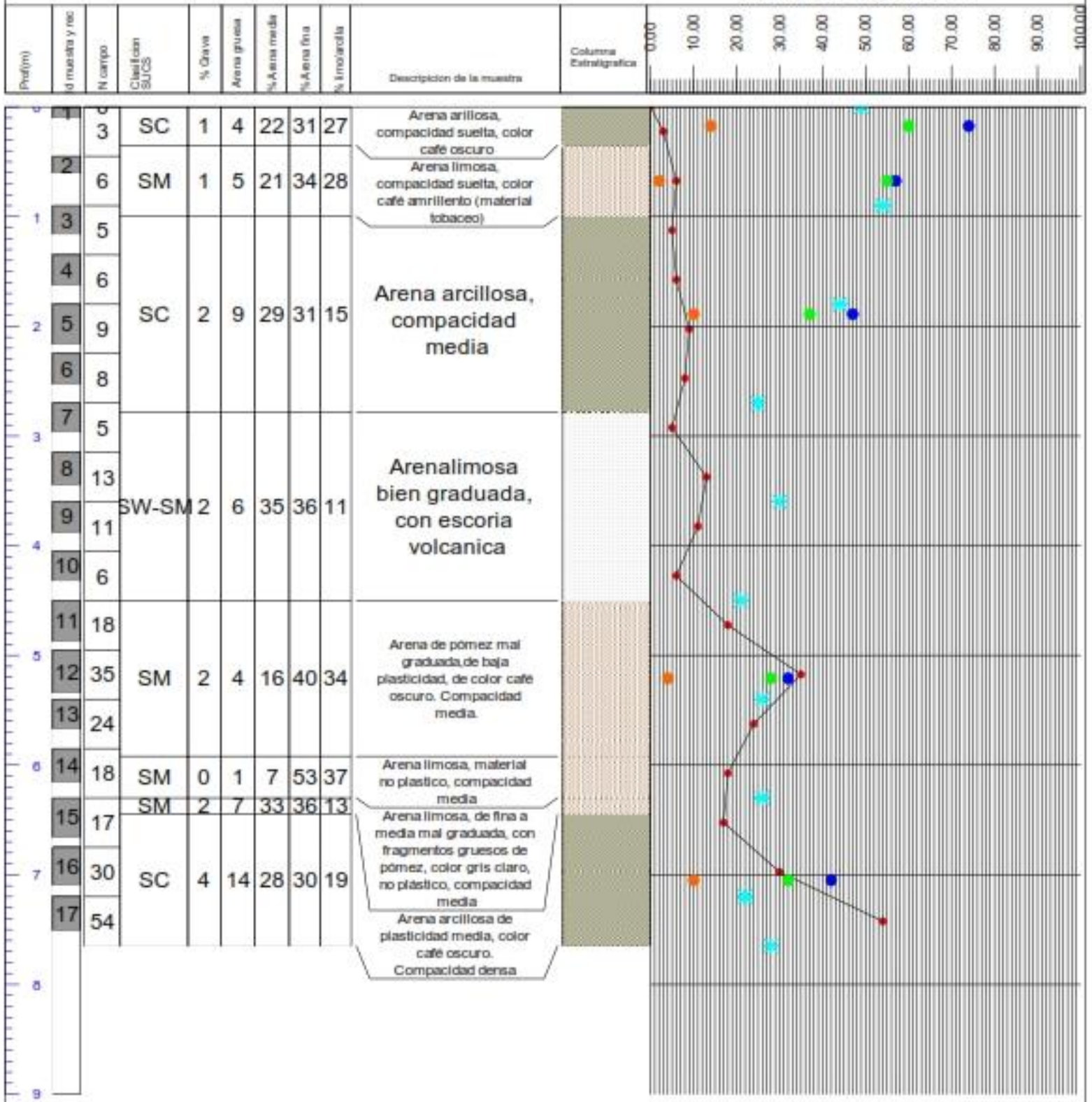
Fecha de inicio de perforaciones: Enero 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Enero 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa  
 Supervisor: Marvin Valle



Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento,  
 Localización: Terrenos del FAREM Jimotepe  
 Elevación superior (msnm): (ver tabla 2.1)  
 Profundidad del nivel freático(msnm): no encontrada

Fecha de inicio de perforaciones: Enero 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Enero 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa  
 Supervisor: Marvin Valle

N golpes/ %w/LL/LP/IP



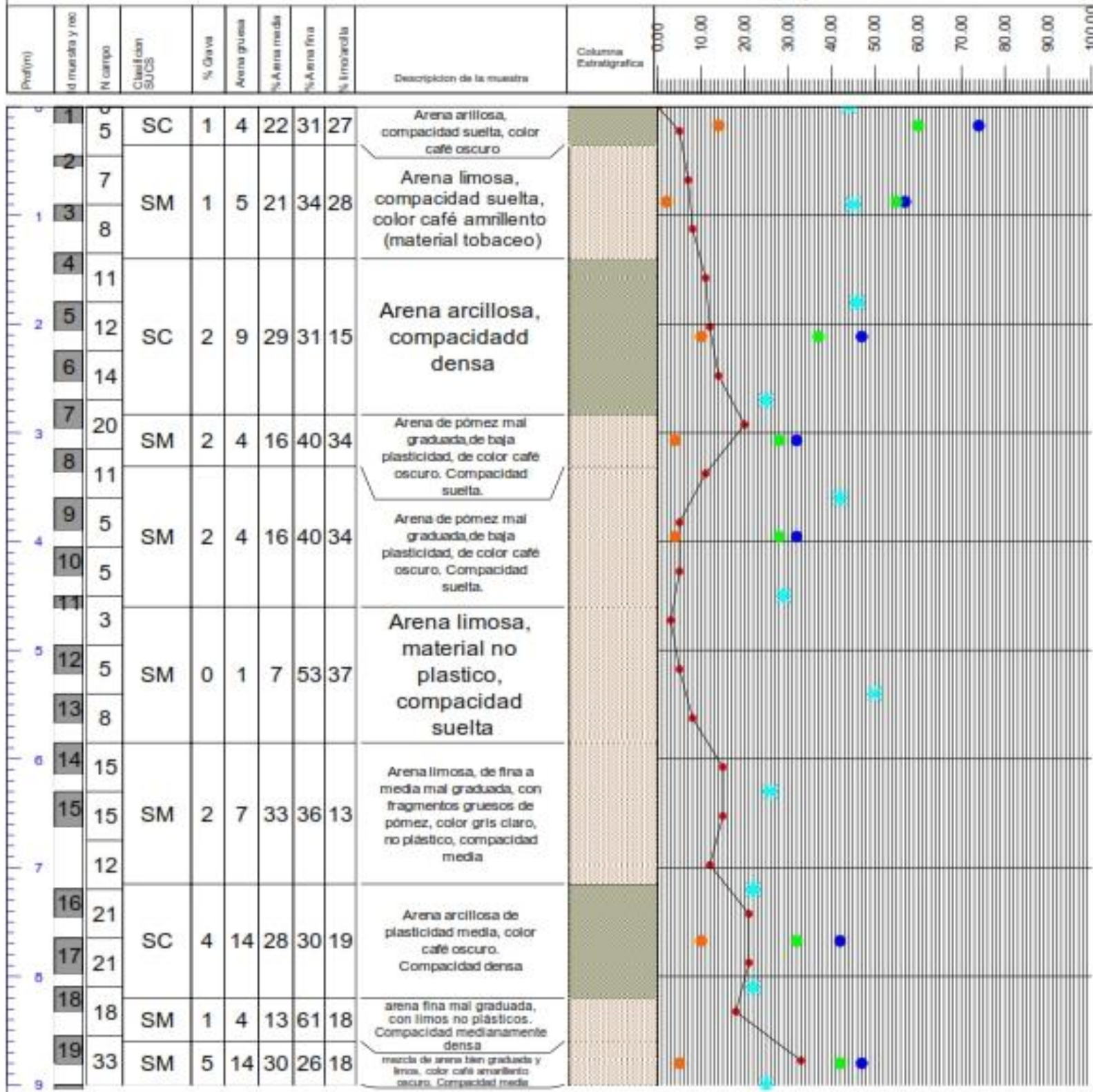


Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento,  
 Localización: Terrenos del FAREM Jinotepe  
 Elevación superior (msnm): (ver tabla 2.1)  
 Profundidad del nivel freático(msnm): no encontrada

P5

Fecha de inicio de perforaciones: Enero 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Enero 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa  
 Supervisor: Marvin Valle

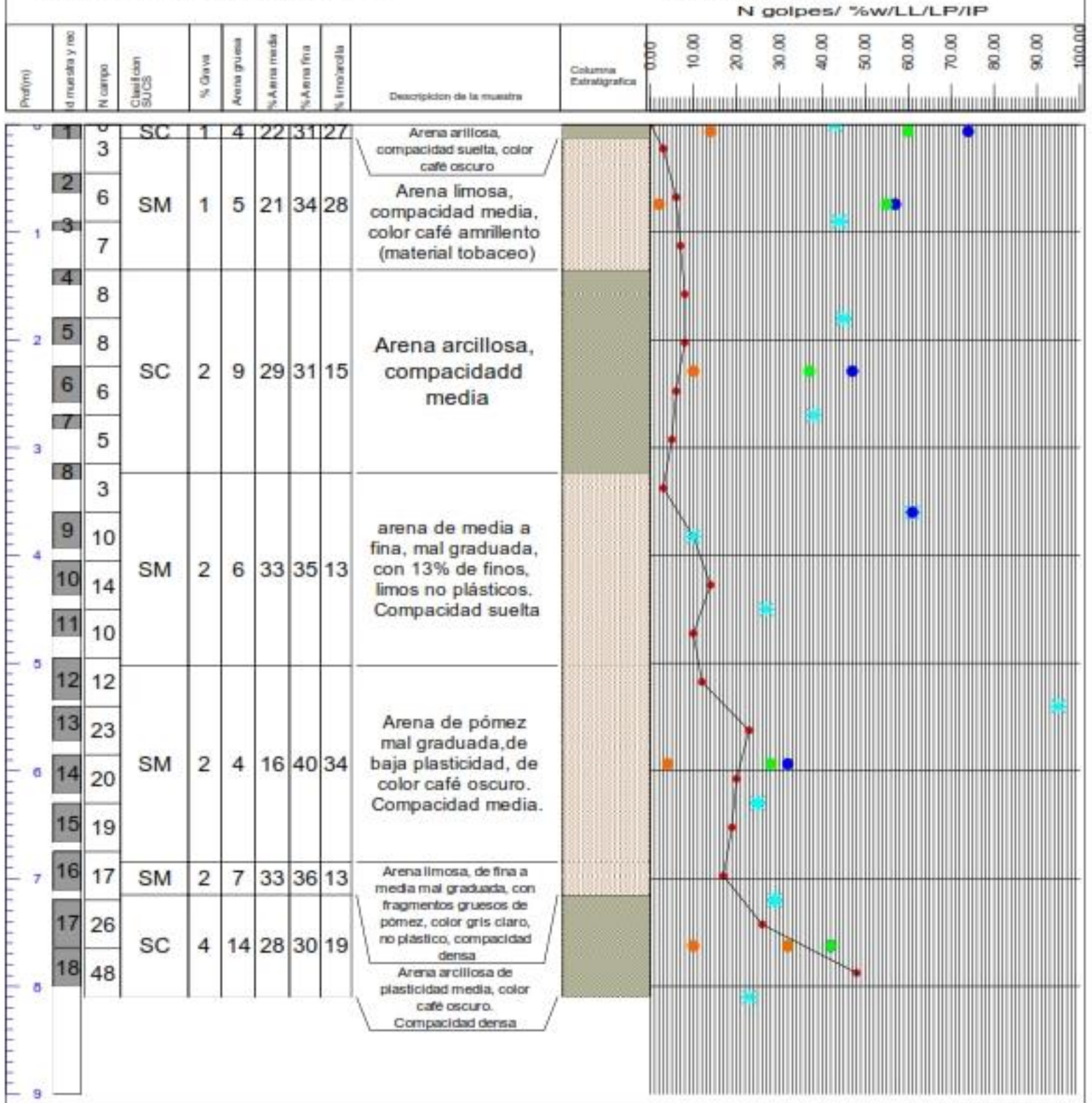
N golpes/ %w/LL/LP/IP





Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento,  
 Localización: Terrenos del FAREM Jinotepe  
 Elevación superior (msnm): (ver tabla 2.1)  
 Profundidad del nivel freático(msnm): no encontrada

Fecha de inicio de perforaciones: Enero 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Enero 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99  
 Ing: Horacio Ulloa  
 Supervisor: Marvin Valle

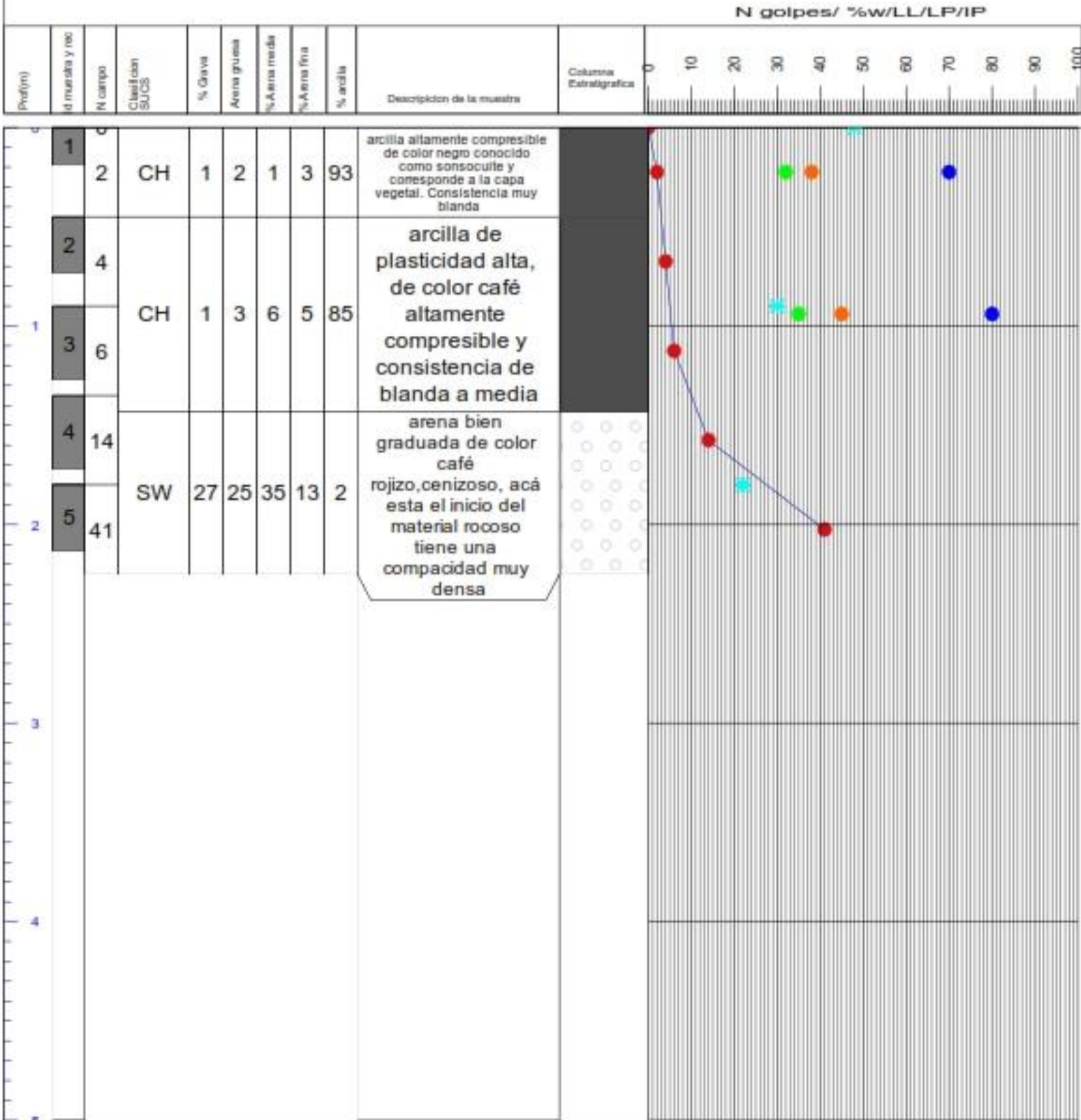


**ANEXO A.4. FAREM-CHONTALES.**

# SPT1

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREM Chontales  
 Profundidad del nivel freático (msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99  
 Ing: Horacio Ulloa



**Leyenda**

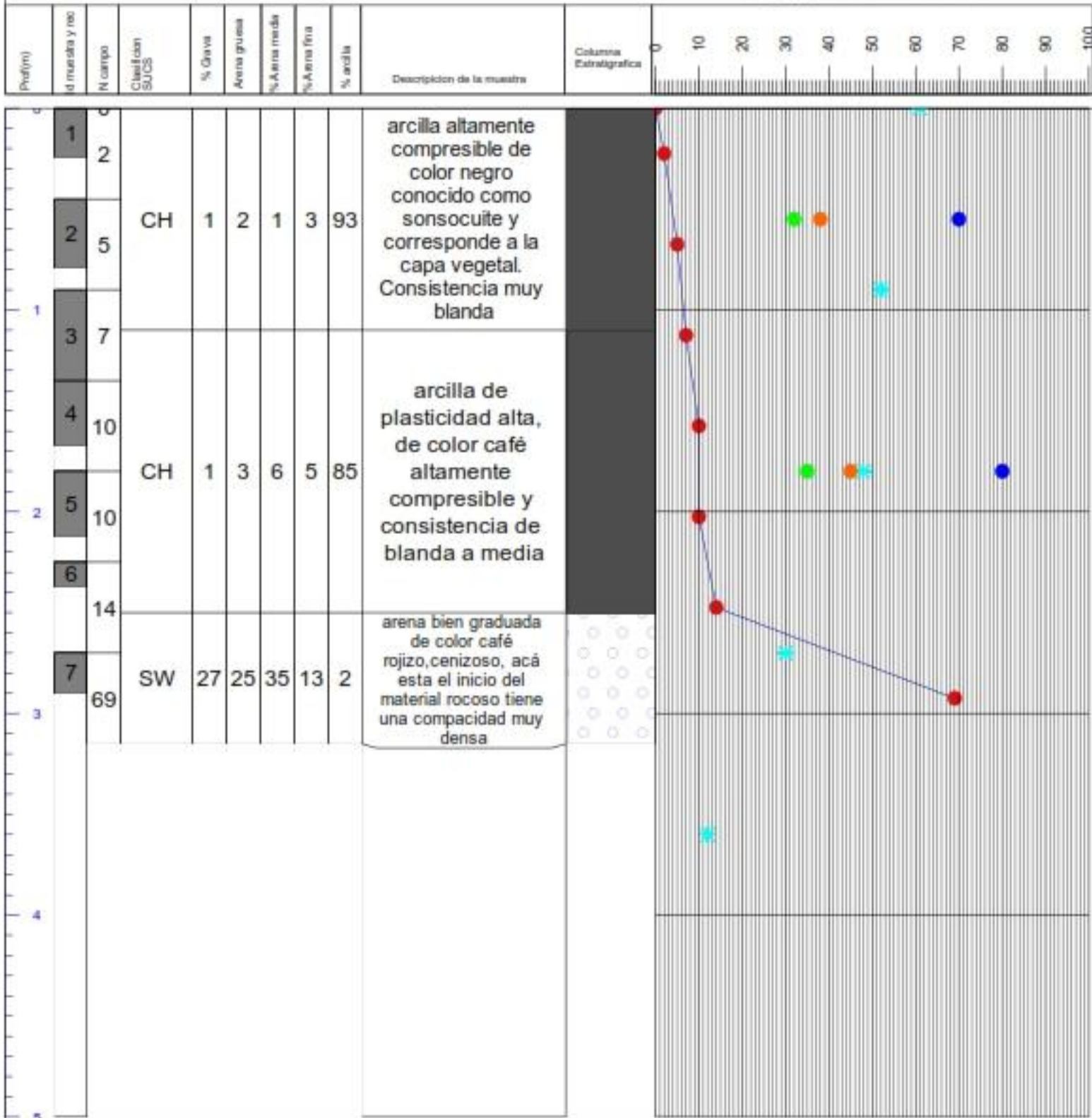
- Número de golpes
- ✦ Humedad in-situ
- Limite líquido
- Limite plástico
- Índice de plasticidad
- Arcilla altamente compresible
- Arena bien graduada
- Arena mal graduada
- Grava mal graduada

# SPT2

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREM Chorritales  
 Profundidad del nivel freático (msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP



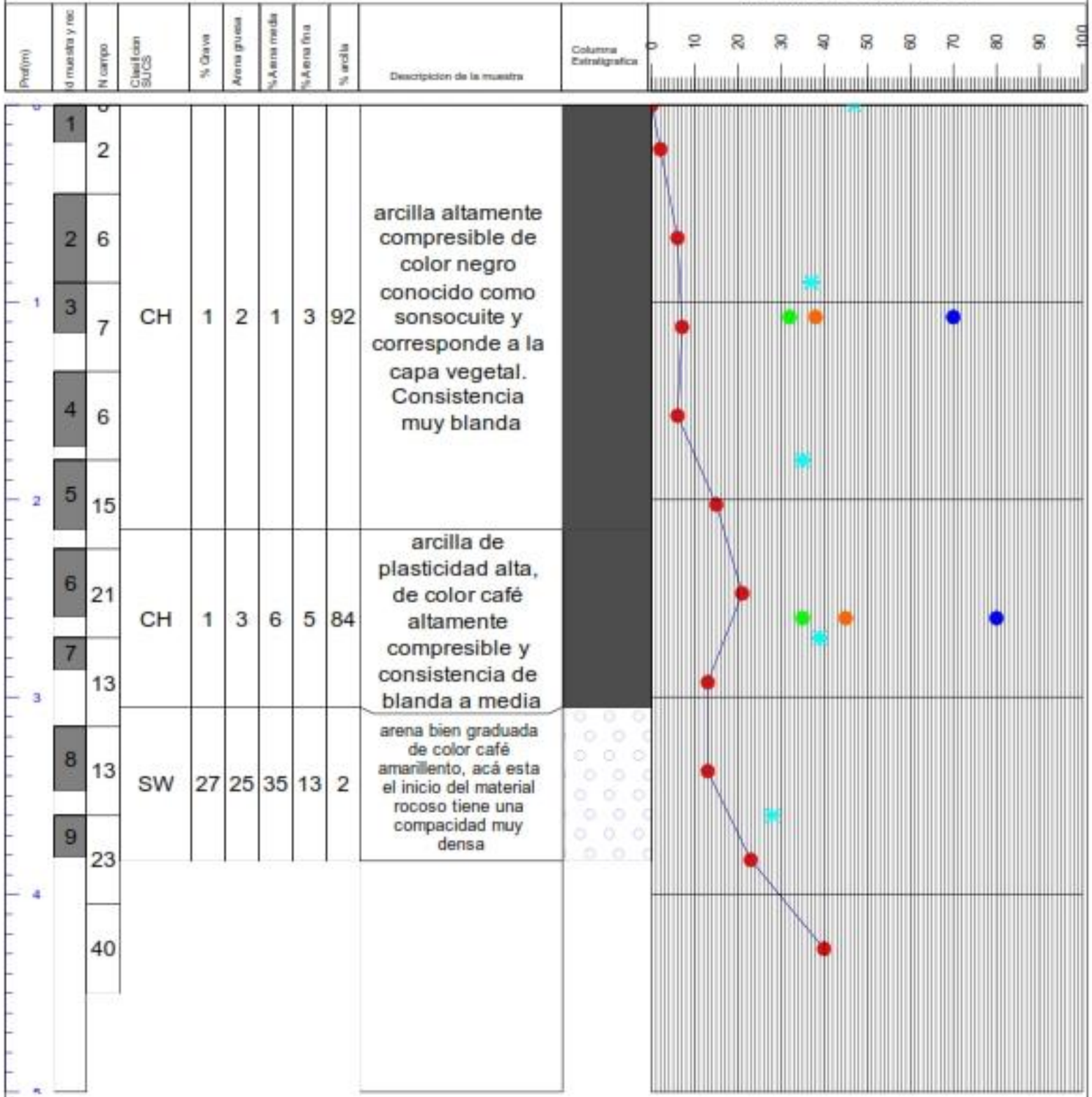


# SPT3

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREMChontales  
 Profundidad del nivel freático(msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP



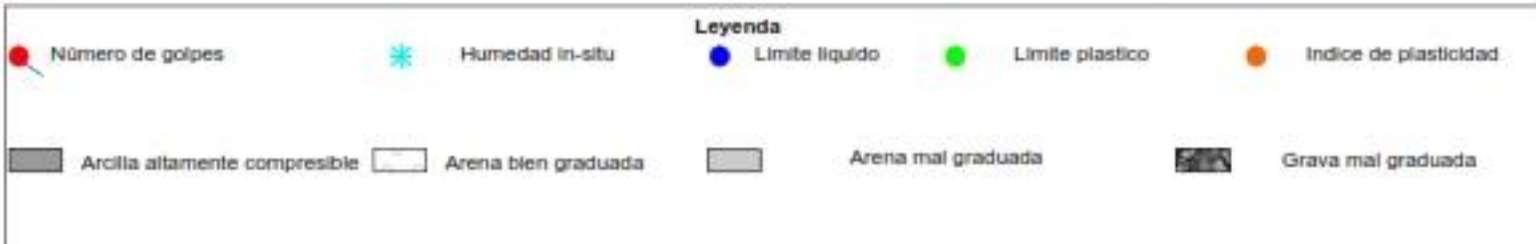
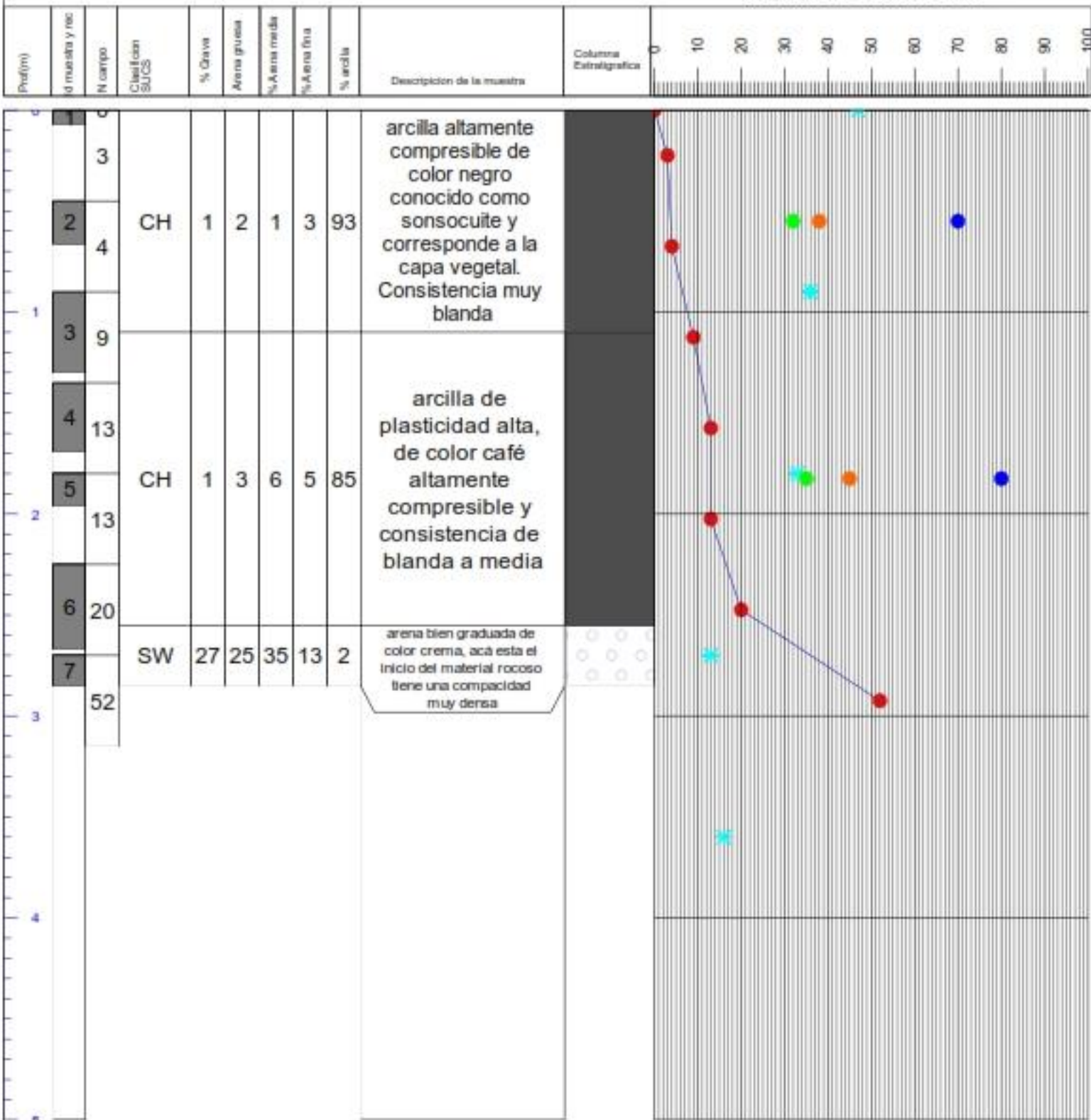


# SPT4

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREM Chontales  
 Profundidad del nivel freático (msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP

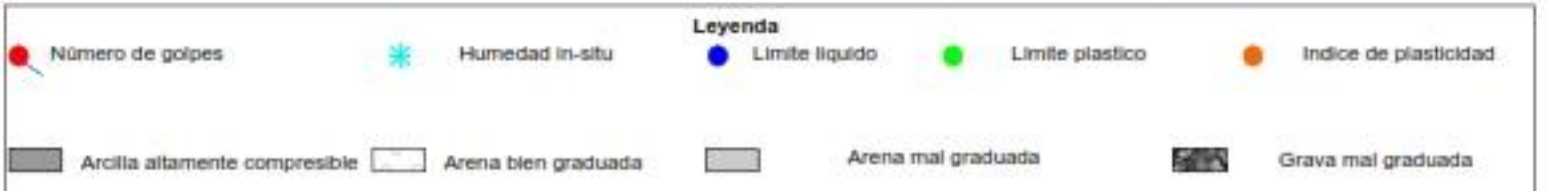
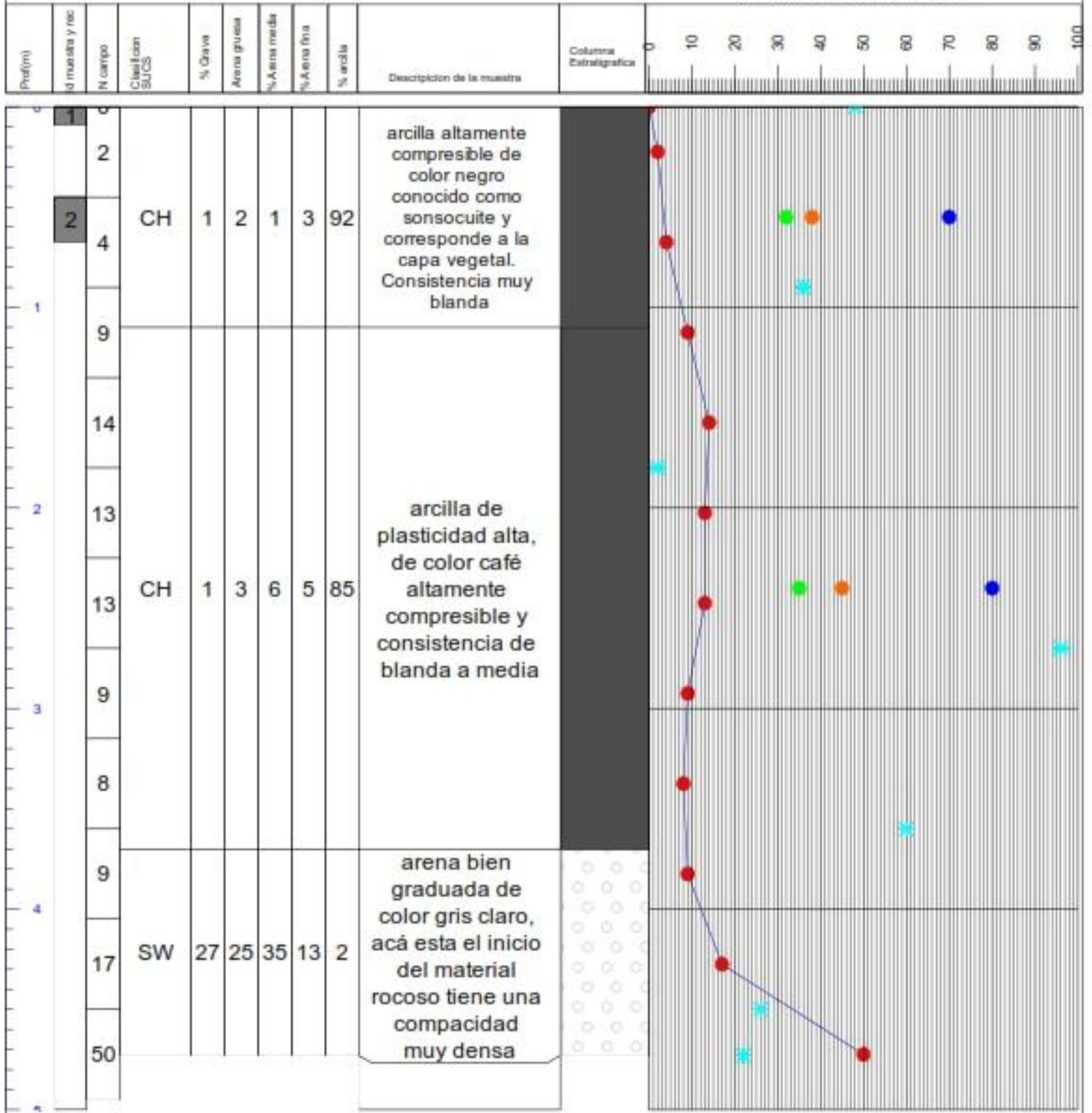


# SPT5

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREM Chorritales  
 Profundidad del nivel freático (msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP

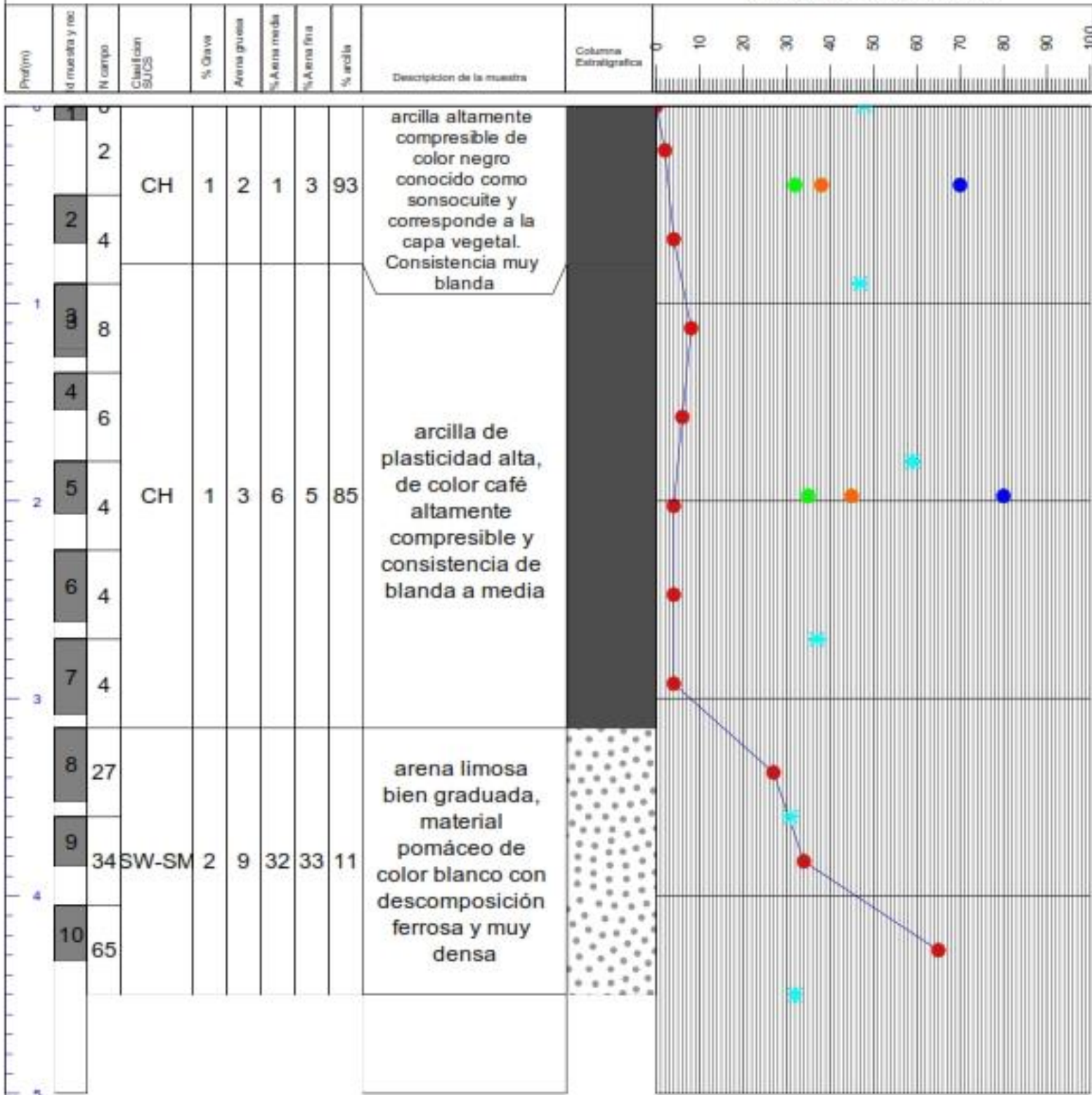


# SPT6

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREM Chontales  
 Profundidad del nivel freático (msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP

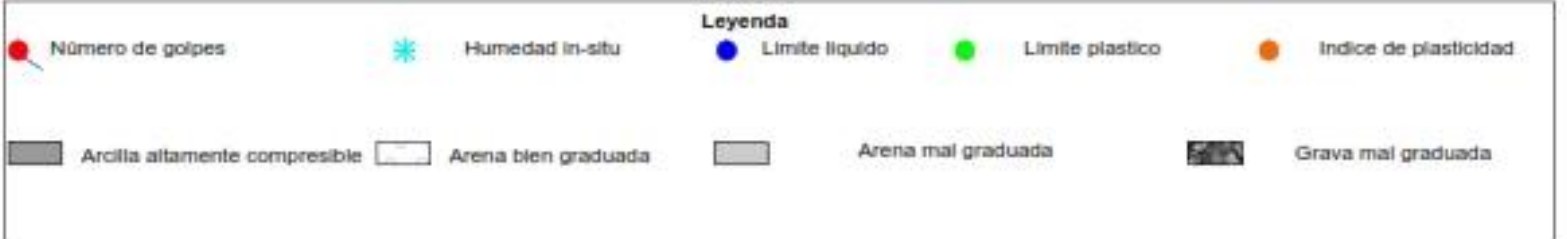
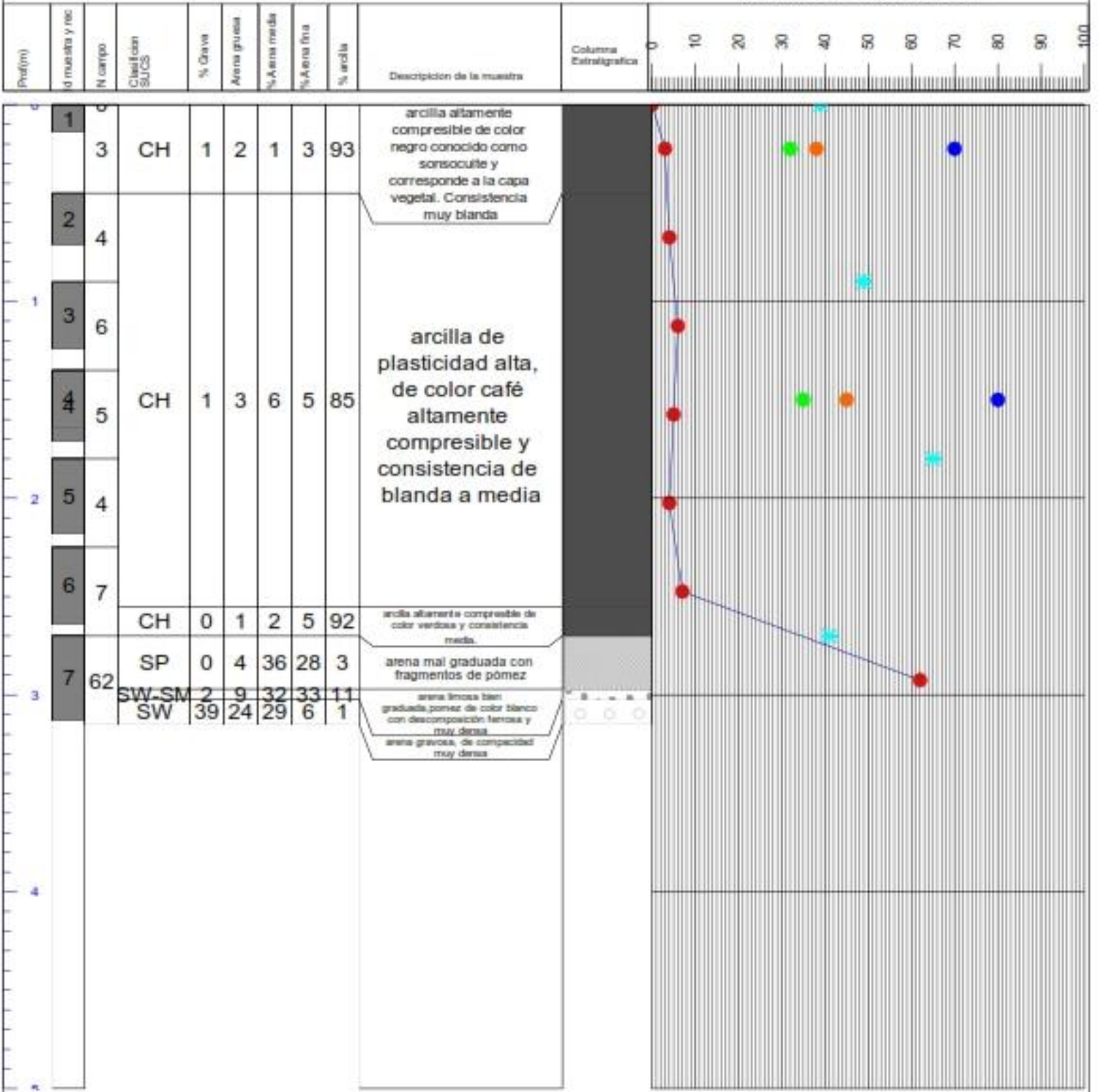


# SPT7

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREM Chontales  
 Profundidad del nivel freático (msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP



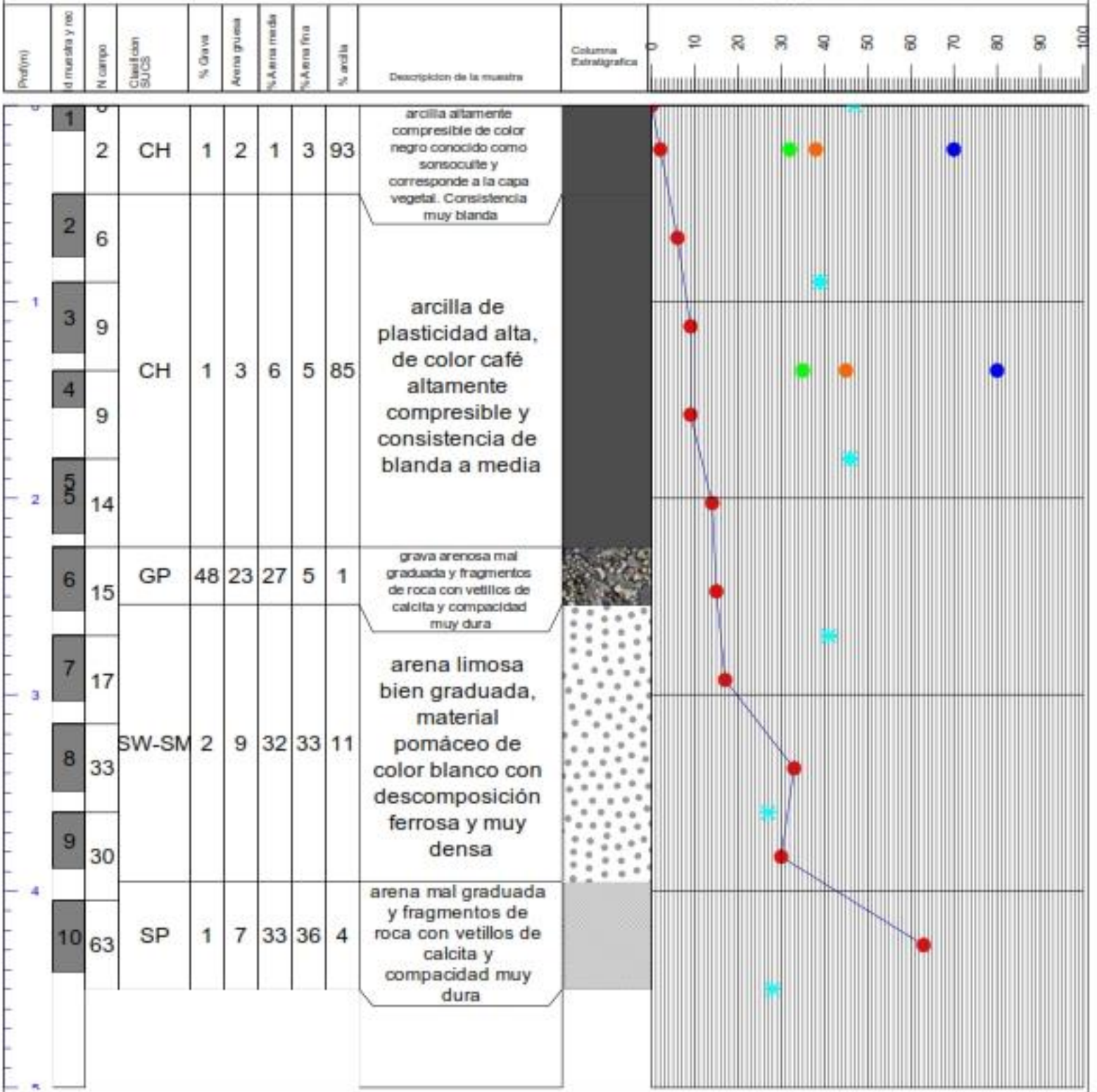


# SPT8

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREM Chontales  
 Profundidad del nivel freático (msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP



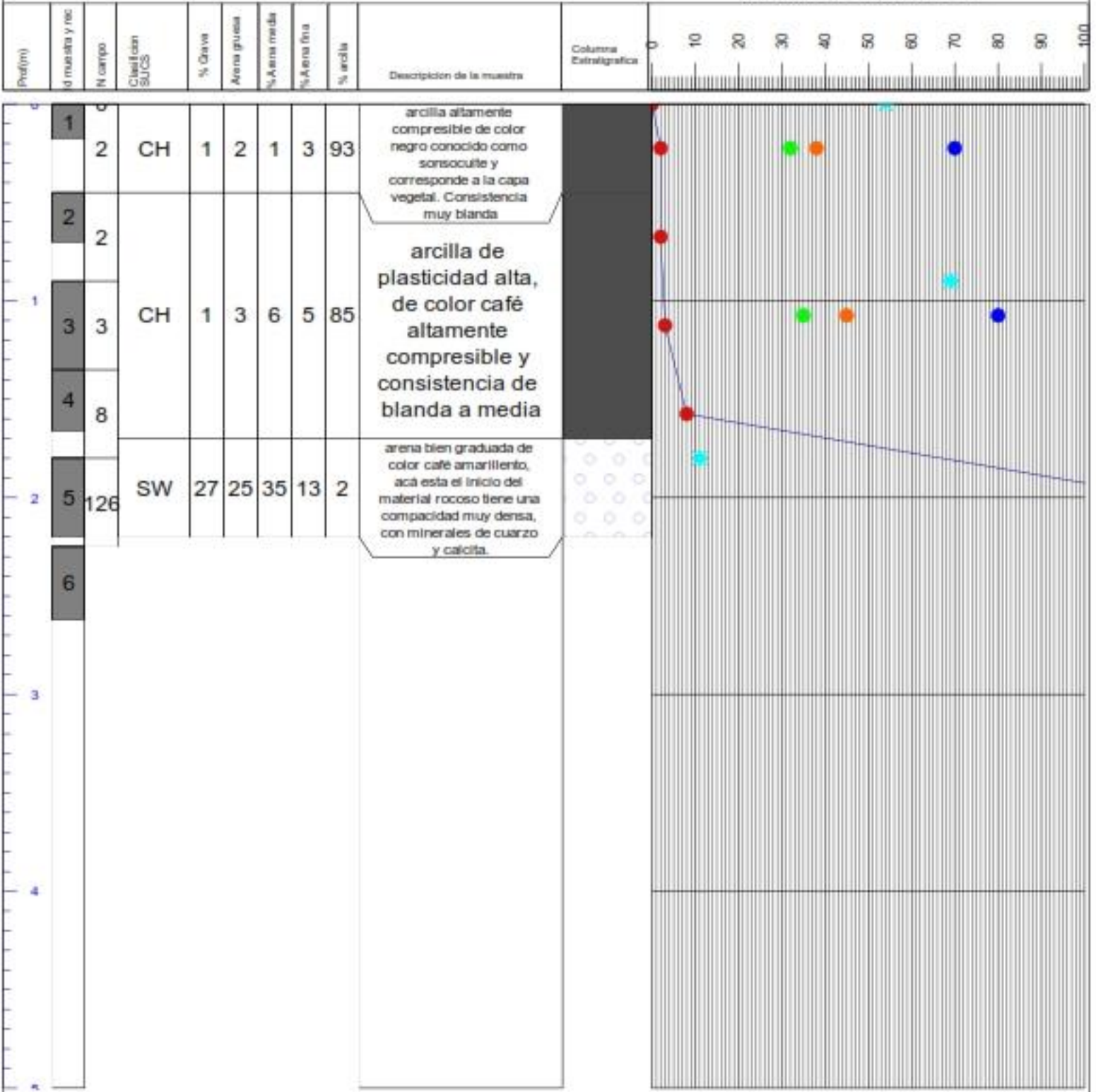


SPT9

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREMChortales  
 Profundidad del nivel freático(msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1556-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP

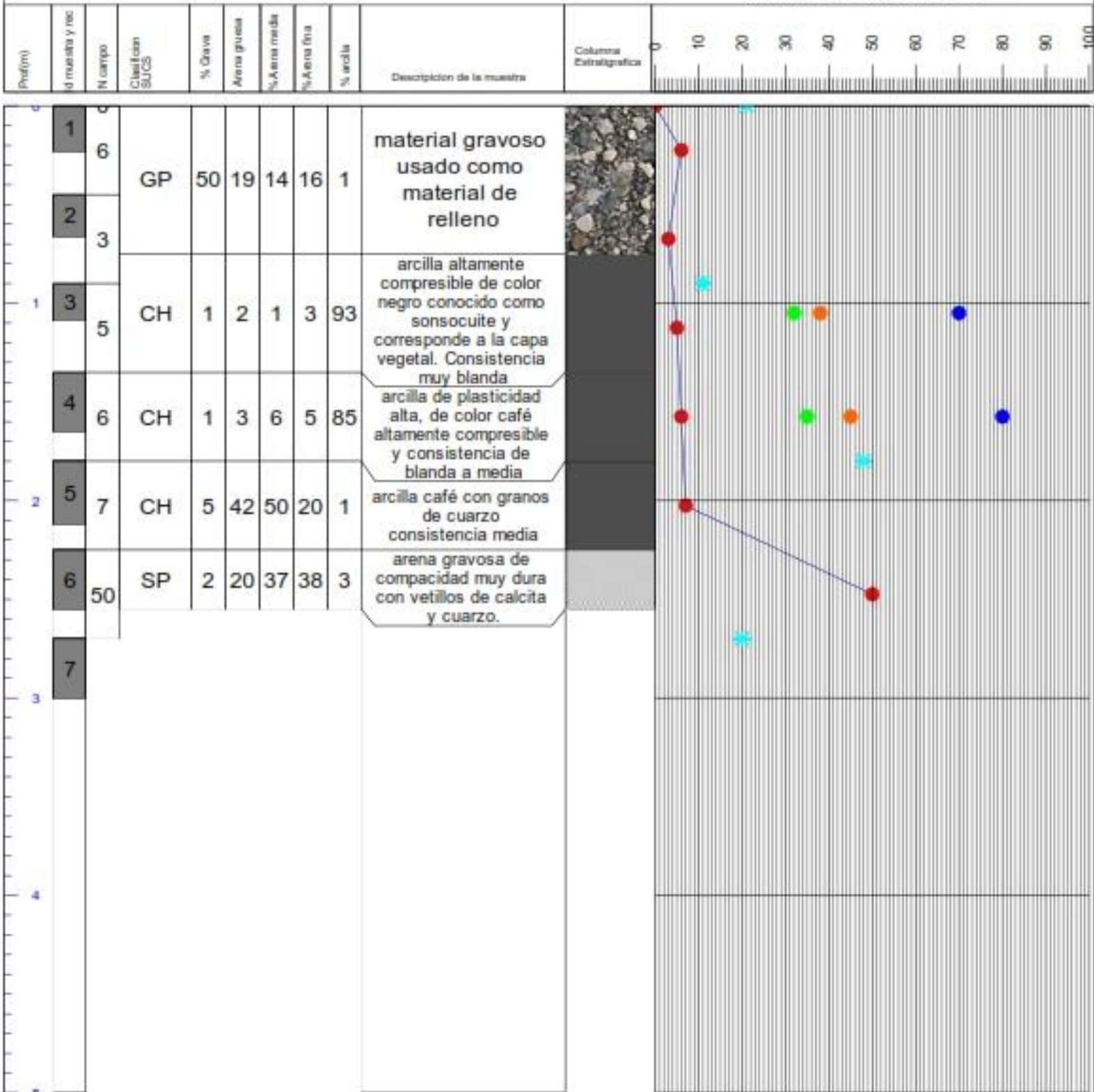


# SPT10

Proyecto: Construcción de pabellones, accesos y estacionamiento, Canchas y laboratorios  
 Localización: Terrenos del FAREMChortales  
 Profundidad del nivel freático(msnm): Variable

Fecha de inicio de perforaciones: Mayo 2012  
 Fecha de finalización de las perforaciones: Mayo 2012  
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99  
 Ing: Horacio Ulloa

N golpes/ %w/LL/LP/IP



**Leyenda**

-  Número de golpes
-  Humedad in-situ
-  Limite liquido
-  Limite plastico
-  Indice de plasticidad
-  Arcilla altamente compresible
-  Arena bien graduada
-  Arena mal graduada
-  Grava mal graduada

## ANEXO B. Corrección de número de golpes obtenidos en campo.

### *Anexo B.1. CIGEO, UNAN-MANAGUA.*

| CIGEO-UNAN, Managua |             |        |            |         |                 |         |      |         |      |
|---------------------|-------------|--------|------------|---------|-----------------|---------|------|---------|------|
| Perforación         | Profundidad | Ncampo | Ncorregido | Energía | Peso específico | Espesor | Pa   | Pa+Pant | Cn   |
| SPT 1               | 0.45        | 7      | 5          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.06    | 1.00 |
| SPT 1               | 0.90        | 6      | 5          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.13    | 1.00 |
| SPT 1               | 1.35        | 7      | 5          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.19    | 1.00 |
| SPT 1               | 1.80        | 15     | 18         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.27    | 1.58 |
| SPT 1               | 2.25        | 10     | 11         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.34    | 1.50 |
| SPT 1               | 2.70        | 7      | 7          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.40    | 1.43 |
| SPT 1               | 3.15        | 17     | 17         | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.47    | 1.36 |
| SPT 1               | 3.60        | 13     | 13         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.54    | 1.30 |
| SPT 1               | 4.05        | 12     | 11         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.61    | 1.24 |
| SPT 1               | 4.50        | 16     | 14         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.68    | 1.19 |
| SPT 1               | 4.95        | 19     | 16         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.75    | 1.14 |
| SPT 1               | 5.40        | 21     | 17         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.83    | 1.09 |
| SPT 1               | 5.85        | 21     | 17         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.90    | 1.05 |
| SPT 1               | 6.30        | 29     | 22         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.97    | 1.01 |
| SPT 1               | 6.75        | 29     | 21         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 1.04    | 0.98 |
| SPT 1               | 7.20        | 28     | 20         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 1.11    | 0.95 |
| SPT 2               | 0.45        | 4      | 3          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.06    | 1.00 |
| SPT 2               | 0.9         | 2      | 2          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.13    | 1.00 |
| SPT 2               | 1.35        | 4      | 3          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.19    | 1.00 |
| SPT 2               | 1.8         | 10     | 12         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.27    | 1.58 |
| SPT 2               | 2.25        | 9      | 10         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.34    | 1.50 |
| SPT 2               | 2.7         | 5      | 5          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.40    | 1.43 |
| SPT 2               | 3.15        | 12     | 12         | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.47    | 1.36 |
| SPT 2               | 3.6         | 18     | 18         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.54    | 1.30 |
| SPT 2               | 4.05        | 11     | 10         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.61    | 1.24 |
| SPT 2               | 4.5         | 16     | 14         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.68    | 1.19 |
| SPT 2               | 4.95        | 22     | 19         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.75    | 1.14 |
| SPT 2               | 5.4         | 21     | 17         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.83    | 1.09 |
| SPT 2               | 5.85        | 17     | 13         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.90    | 1.05 |
| SPT 2               | 6.3         | 23     | 18         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.97    | 1.01 |
| SPT 2               | 6.75        | 28     | 21         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 1.04    | 0.98 |
| SPT 3               | 0.45        | 4      | 3          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.06    | 1.00 |
| SPT 3               | 0.90        | 5      | 4          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.13    | 1.00 |
| SPT 3               | 1.35        | 4      | 3          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.19    | 1.00 |
| SPT 3               | 1.80        | 6      | 7          | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.27    | 1.58 |
| SPT 3               | 2.25        | 7      | 8          | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.34    | 1.50 |
| SPT 3               | 2.70        | 4      | 4          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.40    | 1.43 |
| SPT 3               | 3.15        | 9      | 9          | 0.75    | 1433            | 0.45    | 0.06 | 0.47    | 1.36 |
| SPT 3               | 3.60        | 9      | 9          | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.54    | 1.30 |
| SPT 3               | 4.05        | 14     | 13         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.61    | 1.24 |
| SPT 3               | 4.50        | 20     | 18         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.68    | 1.19 |
| SPT 3               | 4.95        | 20     | 17         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.75    | 1.14 |
| SPT 3               | 5.40        | 22     | 18         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.83    | 1.09 |
| SPT 3               | 5.85        | 27     | 21         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.90    | 1.05 |
| SPT 3               | 6.30        | 31     | 24         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 0.97    | 1.01 |
| SPT 3               | 6.75        | 19     | 14         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 1.04    | 0.98 |
| SPT 4               | 7.20        | 24     | 17         | 0.75    | 1601            | 0.45    | 0.07 | 1.11    | 0.95 |

|       |       |    |    |      |      |      |      |      |      |
|-------|-------|----|----|------|------|------|------|------|------|
| SPT 4 | 0.45  | 0  | 0  | 0.00 |      | 0.00 | 0.00 |      |      |
| SPT 4 | 0.9   | 0  | 0  | 0.00 |      | 0.00 | 0.00 |      |      |
| SPT 4 | 1.35  | 0  | 0  | 0.00 |      | 0.00 | 0.00 |      |      |
| SPT 4 | 1.8   | 0  | 0  | 0.00 |      | 0.00 | 0.00 |      |      |
| SPT 4 | 2.25  | 0  | 0  | 0.00 |      | 0.00 | 0.00 |      |      |
| SPT 4 | 2.7   | 0  | 0  | 0.00 |      | 0.00 | 0.00 |      |      |
| SPT 4 | 3.15  | 0  | 0  | 0.00 |      | 0.00 | 0.00 |      |      |
| SPT 4 | 3.6   | 15 | 11 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.06 | 1.00 |
| SPT 4 | 4.05  | 15 | 11 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.13 | 1.00 |
| SPT 4 | 4.5   | 20 | 15 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.20 | 1.00 |
| SPT 4 | 4.95  | 21 | 25 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.27 | 1.57 |
| SPT 4 | 5.4   | 20 | 22 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.35 | 1.49 |
| SPT 4 | 5.85  | 15 | 16 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.42 | 1.41 |
| SPT 4 | 6.3   | 16 | 16 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.49 | 1.34 |
| SPT 4 | 6.75  | 21 | 20 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.56 | 1.28 |
| SPT 4 | 7.2   | 26 | 24 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.63 | 1.22 |
| SPT 4 | 7.65  | 28 | 25 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.71 | 1.17 |
| SPT 4 | 8.1   | 31 | 26 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.78 | 1.13 |
| SPT 4 | 8.55  | 35 | 28 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.85 | 1.08 |
| SPT 4 | 9     | 49 | 38 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.92 | 1.04 |
| SPT 4 | 9.45  | 64 | 48 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.99 | 1.00 |
| SPT 5 | 0.45  | 5  | 4  | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.06 | 1.00 |
| SPT 5 | 0.90  | 5  | 4  | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.13 | 1.00 |
| SPT 5 | 1.35  | 5  | 4  | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.19 | 1.00 |
| SPT 5 | 1.80  | 7  | 8  | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.26 | 1.59 |
| SPT 5 | 2.25  | 10 | 11 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.33 | 1.50 |
| SPT 5 | 2.70  | 10 | 11 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.40 | 1.43 |
| SPT 5 | 3.15  | 10 | 10 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.47 | 1.36 |
| SPT 5 | 3.60  | 14 | 14 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.54 | 1.30 |
| SPT 5 | 4.05  | 11 | 10 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.60 | 1.25 |
| SPT 5 | 4.50  | 30 | 27 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.67 | 1.20 |
| SPT 5 | 4.95  | 31 | 27 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.74 | 1.15 |
| SPT 5 | 5.40  | 33 | 27 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.81 | 1.10 |
| SPT 5 | 5.85  | 21 | 17 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.88 | 1.06 |
| SPT 5 | 6.30  | 21 | 16 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.96 | 1.02 |
| SPT 5 | 6.75  | 20 | 15 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 1.03 | 0.99 |
| SPT 5 | 7.75  | 22 | 16 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 1.10 | 0.95 |
| SPT 6 | 0.45  | 4  | 3  | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.06 | 1.00 |
| SPT 6 | 0.9   | 4  | 3  | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.14 | 1.00 |
| SPT 6 | 1.35  | 5  | 4  | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.21 | 1.00 |
| SPT 6 | 1.8   | 6  | 7  | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.28 | 1.56 |
| SPT 6 | 2.25  | 10 | 11 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.35 | 1.48 |
| SPT 6 | 2.7   | 21 | 22 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.42 | 1.40 |
| SPT 6 | 3.15  | 9  | 9  | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.50 | 1.34 |
| SPT 6 | 3.6   | 10 | 10 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.57 | 1.27 |
| SPT 6 | 4.05  | 17 | 16 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.64 | 1.22 |
| SPT 6 | 4.5   | 26 | 23 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.71 | 1.17 |
| SPT 6 | 4.95  | 39 | 33 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.78 | 1.12 |
| SPT 6 | 5.4   | 24 | 19 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.86 | 1.08 |
| SPT 6 | 5.85  | 32 | 25 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.93 | 1.04 |
| SPT 6 | 6.3   | 18 | 13 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 1.00 | 1.00 |
| SPT 6 | 6.75  | 25 | 18 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 1.07 | 0.96 |
| SPT 6 | 7.2   | 32 | 22 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 1.15 | 0.93 |
| SPT 7 | 0.45  | 0  | 0  |      |      |      |      |      |      |
| SPT 7 | 0.90  | 0  | 0  |      |      |      |      |      |      |
| SPT 7 | 1.35  | 0  | 0  |      |      |      |      |      |      |
| SPT 7 | 1.80  | 0  | 0  |      |      |      |      |      |      |
| SPT 7 | 2.25  | 0  | 0  |      |      |      |      |      |      |
| SPT 7 | 2.70  | 0  | 0  |      |      |      |      |      |      |
| SPT 7 | 3.15  | 0  | 0  |      |      |      |      |      |      |
| SPT 7 | 3.60  | 9  | 7  | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.06 | 1.00 |
| SPT 7 | 4.05  | 9  | 7  | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.13 | 1.00 |
| SPT 7 | 4.50  | 15 | 11 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.19 | 1.00 |
| SPT 7 | 4.95  | 18 | 21 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.26 | 1.59 |
| SPT 7 | 5.40  | 20 | 23 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.33 | 1.50 |
| SPT 7 | 5.85  | 27 | 29 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.40 | 1.43 |
| SPT 7 | 6.30  | 36 | 37 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.47 | 1.36 |
| SPT 7 | 6.75  | 36 | 35 | 0.75 | 1433 | 0.45 | 0.06 | 0.54 | 1.30 |
| SPT 7 | 7.20  | 23 | 21 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.61 | 1.24 |
| SPT 7 | 7.65  | 27 | 24 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.68 | 1.19 |
| SPT 7 | 8.10  | 46 | 39 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.75 | 1.14 |
| SPT 7 | 8.55  | 50 | 41 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.83 | 1.09 |
| SPT 7 | 9.00  | 30 | 24 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.90 | 1.05 |
| SPT 7 | 9.45  | 42 | 32 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 0.97 | 1.01 |
| SPT 7 | 9.90  | 45 | 33 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 1.04 | 0.98 |
| SPT 7 | 10.35 | 56 | 40 | 0.75 | 1601 | 0.45 | 0.07 | 1.11 | 0.95 |

## Anexo B.2. FAREM-Carazo.

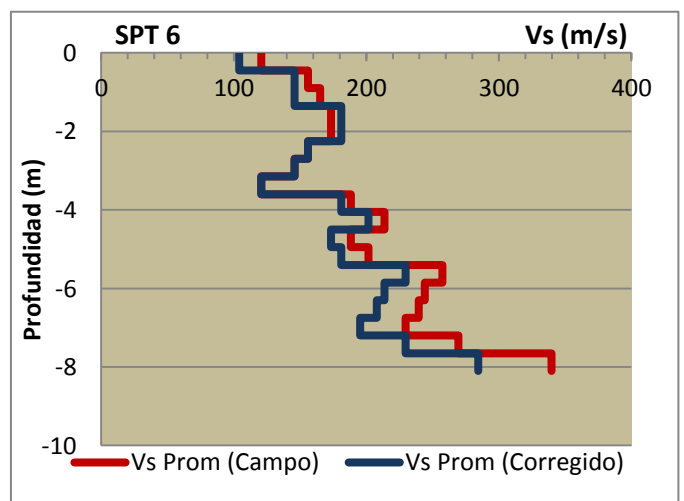
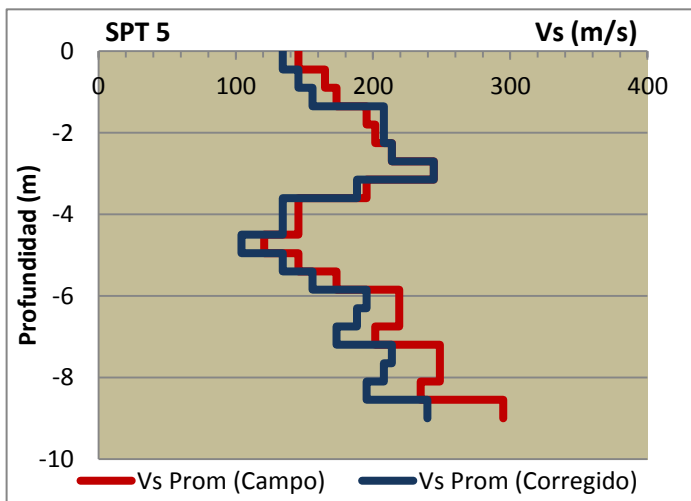
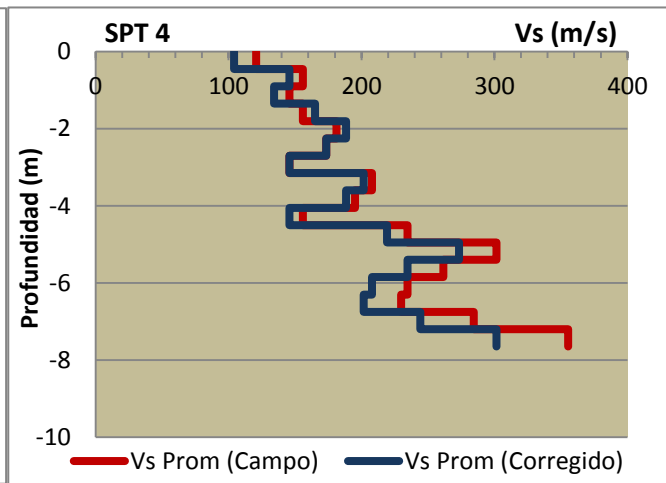
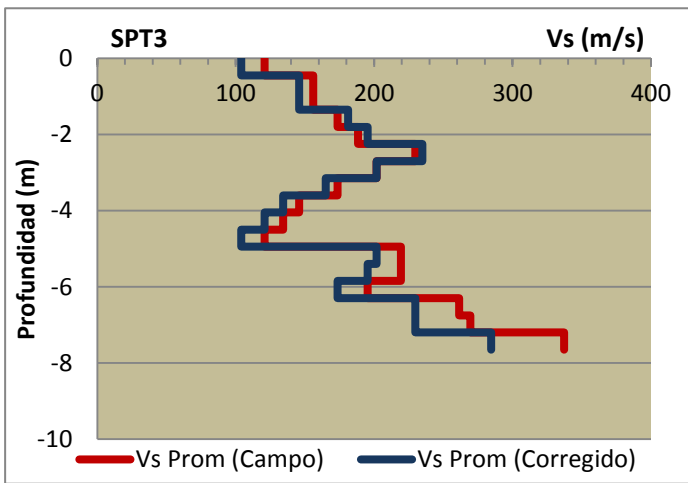
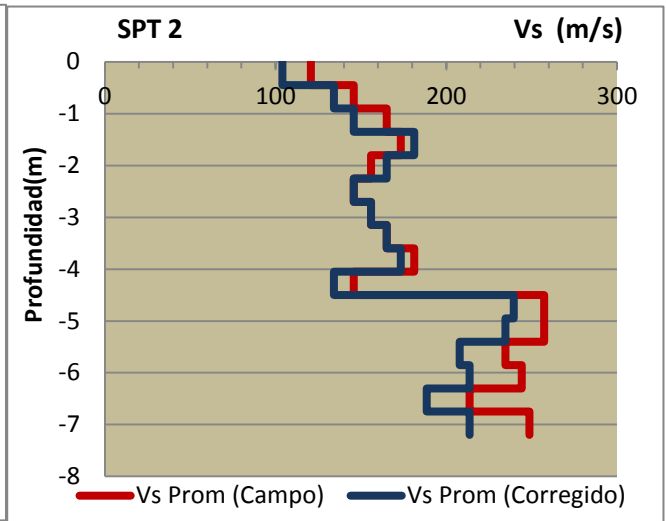
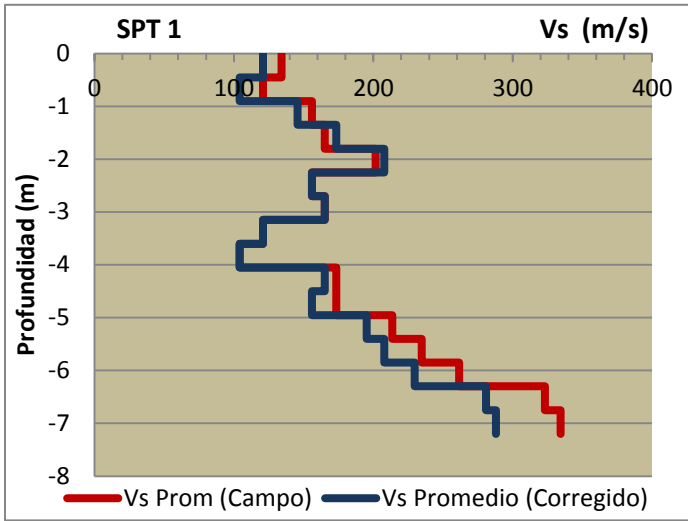
| id | de   | a    | Ngolpes | Ncorregido | energia | pesp | esp  | Pa   | Pa + Pant | Cn   |
|----|------|------|---------|------------|---------|------|------|------|-----------|------|
| P1 | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      |
| P1 | 0    | 0.45 | 4       | 3          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    |
| P1 | 0.45 | 0.9  | 3       | 2          | 0.75    | 1630 | 0.45 | 0.07 | 0.15      | 1    |
| P1 | 0.9  | 1.35 | 6       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.22      | 1.00 |
| P1 | 1.35 | 1.8  | 7       | 8          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.30      | 1.54 |
| P1 | 1.8  | 2.25 | 12      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.38      | 1.45 |
| P1 | 2.25 | 2.7  | 6       | 6          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.46      | 1.37 |
| P1 | 2.7  | 3.15 | 7       | 7          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.54      | 1.30 |
| P1 | 3.15 | 3.6  | 3       | 3          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.61      | 1.24 |
| P1 | 3.6  | 4.05 | 2       | 2          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.69      | 1.18 |
| P1 | 4.05 | 4.5  | 8       | 7          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.77      | 1.13 |
| P1 | 4.5  | 4.95 | 8       | 6          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.85      | 1.08 |
| P1 | 4.95 | 5.4  | 14      | 11         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.92      | 1.04 |
| P1 | 5.4  | 5.85 | 18      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.00      | 1.00 |
| P1 | 5.85 | 6.3  | 24      | 17         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.08      | 0.96 |
| P1 | 6.3  | 6.75 | 42      | 29         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.16      | 0.93 |
| P1 | 6.75 | 7.2  | 46      | 31         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.24      | 0.89 |
| P2 | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      |
| P2 | 0    | 0.45 | 3       | 2          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    |
| P2 | 0.45 | 0.9  | 5       | 4          | 0.75    | 1630 | 0.45 | 0.07 | 0.15      | 1    |
| P2 | 0.9  | 1.35 | 7       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.22      | 1.00 |
| P2 | 1.35 | 1.8  | 8       | 9          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.30      | 1.54 |
| P2 | 1.8  | 2.25 | 6       | 7          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.38      | 1.45 |
| P2 | 2.25 | 2.7  | 5       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.46      | 1.37 |
| P2 | 2.7  | 3.15 | 6       | 6          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.54      | 1.30 |
| P2 | 3.15 | 3.6  | 7       | 7          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.61      | 1.24 |
| P2 | 3.6  | 4.05 | 9       | 8          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.69      | 1.18 |
| P2 | 4.05 | 4.5  | 5       | 4          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.77      | 1.13 |
| P2 | 4.5  | 4.95 | 23      | 19         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.85      | 1.08 |
| P2 | 4.95 | 5.4  | 23      | 18         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.92      | 1.04 |
| P2 | 5.4  | 5.85 | 18      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.00      | 1.00 |
| P2 | 5.85 | 6.3  | 20      | 14         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.08      | 0.96 |
| P2 | 6.3  | 6.75 | 14      | 10         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.16      | 0.93 |
| P2 | 6.75 | 7.2  | 21      | 14         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.24      | 0.89 |
| P3 | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      |
| P3 | 0    | 0.45 | 3       | 2          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    |
| P3 | 0.45 | 0.9  | 6       | 5          | 0.75    | 1630 | 0.45 | 0.07 | 0.15      | 1    |
| P3 | 0.9  | 1.35 | 6       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.22      | 1.00 |
| P3 | 1.35 | 1.8  | 8       | 9          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.30      | 1.54 |
| P3 | 1.8  | 2.25 | 10      | 11         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.38      | 1.45 |
| P3 | 2.25 | 2.7  | 17      | 18         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.46      | 1.37 |
| P3 | 2.7  | 3.15 | 12      | 12         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.54      | 1.30 |
| P3 | 3.15 | 3.6  | 8       | 7          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.61      | 1.24 |
| P3 | 3.6  | 4.05 | 5       | 4          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.69      | 1.18 |
| P3 | 4.05 | 4.5  | 4       | 3          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.77      | 1.13 |
| P3 | 4.5  | 4.95 | 3       | 2          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.85      | 1.08 |
| P3 | 4.95 | 5.4  | 15      | 12         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.92      | 1.04 |
| P3 | 5.4  | 5.85 | 15      | 11         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.00      | 1.00 |
| P3 | 5.85 | 6.3  | 11      | 8          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.08      | 0.96 |
| P3 | 6.3  | 6.75 | 24      | 17         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.16      | 0.93 |
| P3 | 6.75 | 7.2  | 26      | 17         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.24      | 0.89 |
| P3 | 7.2  | 7.65 | 47      | 30         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.31      | 0.86 |
| P4 | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      |
| P4 | 0    | 0.45 | 3       | 2          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    |
| P4 | 0.45 | 0.9  | 6       | 5          | 0.75    | 1630 | 0.45 | 0.07 | 0.15      | 1    |
| P4 | 0.9  | 1.35 | 5       | 4          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.22      | 1.00 |
| P4 | 1.35 | 1.8  | 6       | 7          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.30      | 1.54 |
| P4 | 1.8  | 2.25 | 9       | 10         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.38      | 1.45 |
| P4 | 2.25 | 2.7  | 8       | 8          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.46      | 1.37 |
| P4 | 2.7  | 3.15 | 5       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.54      | 1.30 |
| P4 | 3.15 | 3.6  | 13      | 12         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.61      | 1.24 |
| P4 | 3.6  | 4.05 | 11      | 10         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.69      | 1.18 |
| P4 | 4.05 | 4.5  | 6       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.77      | 1.13 |
| P4 | 4.5  | 4.95 | 18      | 15         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.85      | 1.08 |
| P4 | 4.95 | 5.4  | 35      | 27         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.92      | 1.04 |
| P4 | 5.4  | 5.85 | 24      | 18         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.00      | 1.00 |
| P4 | 5.85 | 6.3  | 18      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.08      | 0.96 |
| P4 | 6.3  | 6.75 | 17      | 12         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.16      | 0.93 |
| P4 | 6.75 | 7.2  | 30      | 20         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.24      | 0.89 |
| P4 | 7.2  | 7.65 | 54      | 35         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.31      | 0.86 |
| P5 | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      |
| P5 | 0    | 0.45 | 5       | 4          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    |
| P5 | 0.45 | 0.9  | 7       | 5          | 0.75    | 1630 | 0.45 | 0.07 | 0.15      | 1    |
| P5 | 0.9  | 1.35 | 8       | 6          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.22      | 1.00 |
| P5 | 1.35 | 1.8  | 11      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.30      | 1.54 |
| P5 | 1.8  | 2.25 | 12      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.38      | 1.45 |
| P5 | 2.25 | 2.7  | 14      | 14         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.46      | 1.37 |
| P5 | 2.7  | 3.15 | 20      | 20         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.54      | 1.30 |
| P5 | 3.15 | 3.6  | 11      | 10         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.61      | 1.24 |
| P5 | 3.6  | 4.05 | 5       | 4          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.69      | 1.18 |
| P5 | 4.05 | 4.5  | 5       | 4          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.77      | 1.13 |
| P5 | 4.5  | 4.95 | 3       | 2          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.85      | 1.08 |
| P5 | 4.95 | 5.4  | 5       | 4          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.92      | 1.04 |
| P5 | 5.4  | 5.85 | 8       | 6          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.00      | 1.00 |
| P5 | 5.85 | 6.3  | 15      | 11         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.08      | 0.96 |
| P5 | 6.3  | 6.75 | 15      | 10         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.16      | 0.93 |
| P5 | 6.75 | 7.2  | 12      | 8          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.24      | 0.89 |
| P5 | 7.2  | 7.65 | 21      | 14         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.31      | 0.86 |
| P5 | 7.65 | 8.1  | 21      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.39      | 0.84 |
| P5 | 8.1  | 8.55 | 18      | 11         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.47      | 0.81 |
| P5 | 8.55 | 9    | 33      | 19         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.55      | 0.78 |
| P6 | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      |
| P6 | 0    | 0.45 | 3       | 2          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    |
| P6 | 0.45 | 0.9  | 6       | 5          | 0.75    | 1630 | 0.45 | 0.07 | 0.15      | 1    |
| P6 | 0.9  | 1.35 | 7       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.22      | 1.00 |
| P6 | 1.35 | 1.8  | 8       | 9          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.30      | 1.54 |
| P6 | 1.8  | 2.25 | 8       | 9          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.38      | 1.45 |
| P6 | 2.25 | 2.7  | 6       | 6          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.46      | 1.37 |
| P6 | 2.7  | 3.15 | 5       | 5          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.54      | 1.30 |
| P6 | 3.15 | 3.6  | 3       | 3          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.61      | 1.24 |
| P6 | 3.6  | 4.05 | 10      | 9          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.69      | 1.18 |
| P6 | 4.05 | 4.5  | 14      | 12         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.77      | 1.13 |
| P6 | 4.5  | 4.95 | 10      | 8          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.85      | 1.08 |
| P6 | 4.95 | 5.4  | 12      | 9          | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 0.92      | 1.04 |
| P6 | 5.4  | 5.85 | 23      | 17         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.00      | 1.00 |
| P6 | 5.85 | 6.3  | 20      | 14         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.08      | 0.96 |
| P6 | 6.3  | 6.75 | 19      | 13         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.16      | 0.93 |
| P6 | 6.75 | 7.2  | 17      | 11         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.24      | 0.89 |
| P6 | 7.2  | 7.65 | 26      | 17         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.31      | 0.86 |
| P6 | 7.65 | 8.1  | 48      | 30         | 0.75    | 1732 | 0.45 | 0.08 | 1.39      | 0.84 |

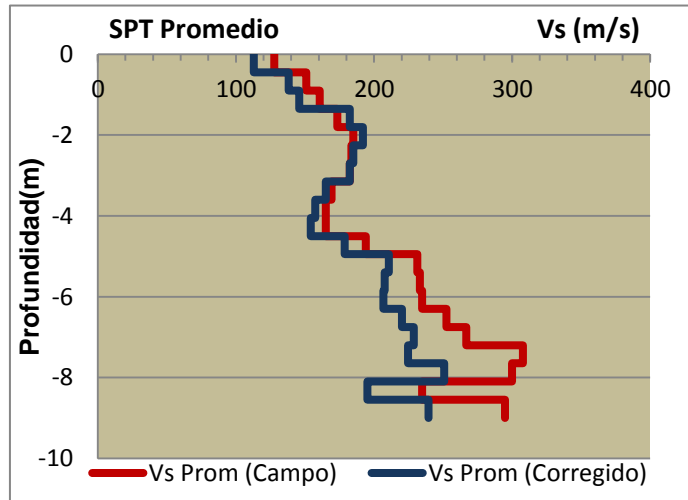


### Anexo A.3. FAREM-Chontales.

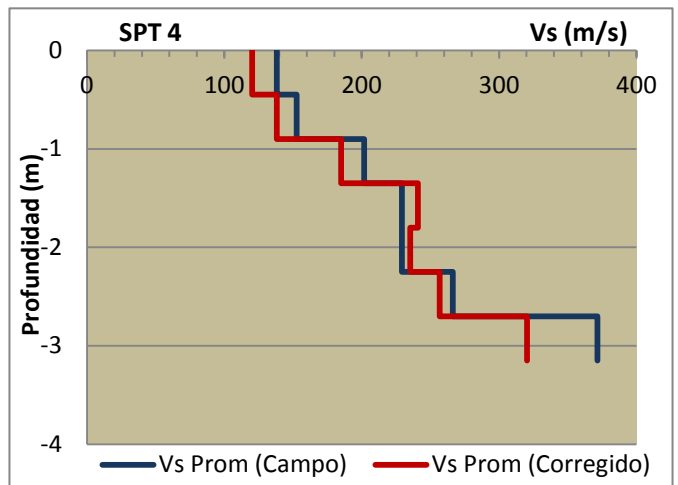
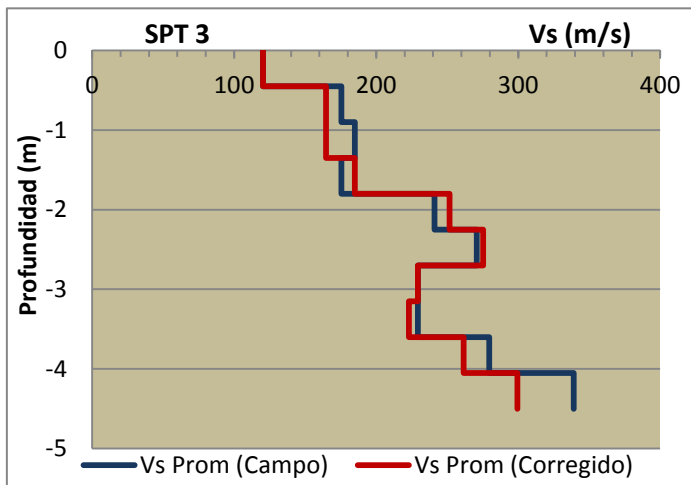
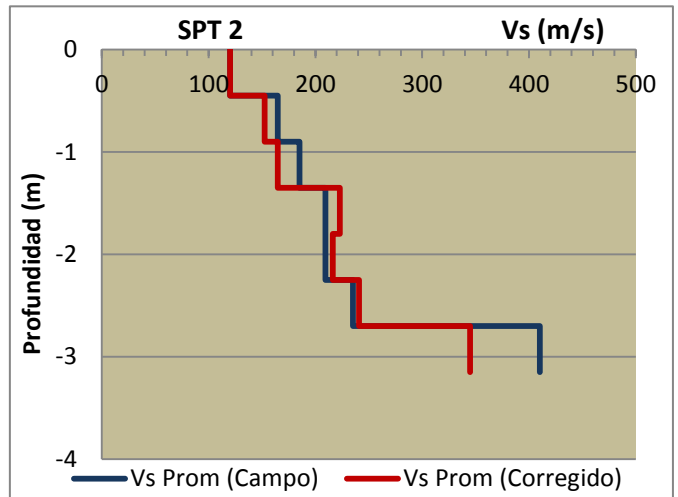
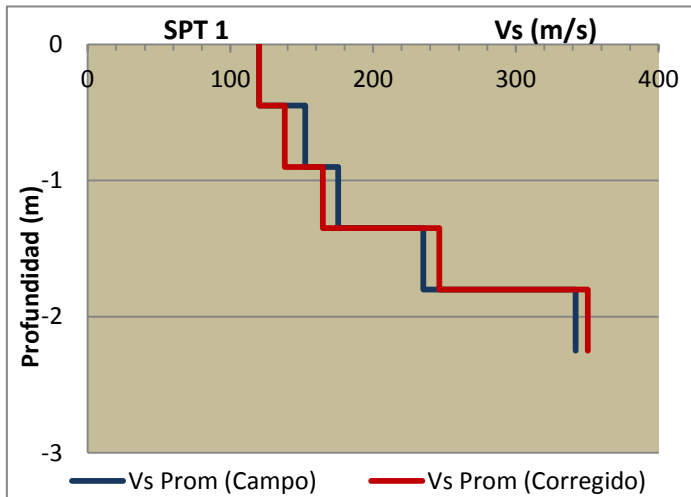
| id    | de   | a    | Ngolpes | Ncorregido | energia | pesp | esp  | Pa   | Pa + Pant | Cn   | Ncorre agua |
|-------|------|------|---------|------------|---------|------|------|------|-----------|------|-------------|
| SPT1  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT1  | 0    | 0.45 | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT1  | 0.45 | 0.9  | 4       | 3          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 3           |
| SPT1  | 0.9  | 1.35 | 6       | 5          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 5           |
| SPT1  | 1.35 | 1.8  | 14      | 16         | 0.75    | 1700 | 0.45 | 0.08 | 0.28      | 1.56 | 16          |
| SPT1  | 1.8  | 2.25 | 41      | 44         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.40      | 1.43 | 28          |
| SPT2  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT2  | 0    | 0.45 | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT2  | 0.45 | 0.9  | 5       | 4          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 4           |
| SPT2  | 0.9  | 1.35 | 7       | 5          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 5           |
| SPT2  | 1.35 | 1.8  | 10      | 12         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 12          |
| SPT2  | 1.8  | 2.25 | 10      | 11         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 11          |
| SPT2  | 2.25 | 2.7  | 14      | 15         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.42      | 1.41 | 15          |
| SPT2  | 2.7  | 3.15 | 69      | 67         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.54      | 1.30 | 42          |
| SPT3  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT3  | 0    | 0.45 | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT3  | 0.45 | 0.9  | 6       | 5          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 5           |
| SPT3  | 0.9  | 1.35 | 7       | 5          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 5           |
| SPT3  | 1.35 | 1.8  | 6       | 7          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 7           |
| SPT3  | 1.8  | 2.25 | 15      | 17         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 17          |
| SPT3  | 2.25 | 2.7  | 21      | 22         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.42      | 1.41 | 22          |
| SPT3  | 2.7  | 3.15 | 13      | 13         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.50      | 1.34 | 14          |
| SPT3  | 3.15 | 3.6  | 13      | 12         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.57      | 1.28 | 14          |
| SPT3  | 3.6  | 4.05 | 23      | 21         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.64      | 1.22 | 19          |
| SPT3  | 4.05 | 4.5  | 40      | 34         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.75      | 1.14 | 28          |
| SPT4  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT4  | 0    | 0.45 | 3       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT4  | 0.45 | 0.9  | 4       | 3          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 3           |
| SPT4  | 0.9  | 1.35 | 9       | 7          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 7           |
| SPT4  | 1.35 | 1.8  | 13      | 15         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 15          |
| SPT4  | 1.8  | 2.25 | 13      | 14         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 14          |
| SPT4  | 2.25 | 2.7  | 20      | 21         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.42      | 1.41 | 18          |
| SPT4  | 2.7  | 3.15 | 52      | 51         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.54      | 1.30 | 34          |
| SPT5  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT5  | 0    | 0.45 | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT5  | 0.45 | 0.9  | 4       | 3          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 3           |
| SPT5  | 0.9  | 1.35 | 9       | 7          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 7           |
| SPT5  | 1.35 | 1.8  | 14      | 16         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 16          |
| SPT5  | 1.8  | 2.25 | 13      | 14         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 14          |
| SPT5  | 2.25 | 2.7  | 13      | 14         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.42      | 1.41 | 14          |
| SPT5  | 2.7  | 3.15 | 9       | 9          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.50      | 1.34 | 9           |
| SPT5  | 3.15 | 3.6  | 8       | 8          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.57      | 1.28 | 8           |
| SPT5  | 3.6  | 4.05 | 9       | 8          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.64      | 1.22 | 12          |
| SPT5  | 4.05 | 4.5  | 17      | 15         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.71      | 1.17 | 16          |
| SPT5  | 4.5  | 4.95 | 50      | 41         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.82      | 1.10 | 33          |
| SPT6  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT6  | 0    | 0.45 | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT6  | 0.45 | 0.9  | 4       | 3          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 3           |
| SPT6  | 0.9  | 1.35 | 8       | 6          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 6           |
| SPT6  | 1.35 | 1.8  | 6       | 7          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 7           |
| SPT6  | 1.8  | 2.25 | 4       | 4          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 4           |
| SPT6  | 2.25 | 2.7  | 4       | 4          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.42      | 1.41 | 10          |
| SPT6  | 2.7  | 3.15 | 4       | 4          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.50      | 1.34 | 10          |
| SPT6  | 3.15 | 3.6  | 27      | 25         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.61      | 1.24 | 21          |
| SPT6  | 3.6  | 4.05 | 34      | 30         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.72      | 1.16 | 25          |
| SPT6  | 4.05 | 4.5  | 65      | 53         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.83      | 1.09 | 40          |
| SPT7  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT7  | 0    | 0.45 | 3       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT7  | 0.45 | 0.9  | 4       | 3          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 3           |
| SPT7  | 0.9  | 1.35 | 6       | 5          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 5           |
| SPT7  | 1.35 | 1.8  | 5       | 6          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 6           |
| SPT7  | 1.8  | 2.25 | 4       | 4          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 4           |
| SPT7  | 2.25 | 2.7  | 7       | 7          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.42      | 1.41 | 7           |
| SPT7  | 2.7  | 3.15 | 62      | 61         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.54      | 1.30 | 39          |
| SPT8  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT8  | 0    | 0.45 | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT8  | 0.45 | 0.9  | 6       | 5          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 5           |
| SPT8  | 0.9  | 1.35 | 9       | 7          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 7           |
| SPT8  | 1.35 | 1.8  | 9       | 11         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 11          |
| SPT8  | 1.8  | 2.25 | 14      | 16         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 16          |
| SPT8  | 2.25 | 2.7  | 15      | 16         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.42      | 1.41 | 16          |
| SPT8  | 2.7  | 3.15 | 17      | 17         | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.50      | 1.34 | 17          |
| SPT8  | 3.15 | 3.6  | 33      | 31         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.61      | 1.24 | 31          |
| SPT8  | 3.6  | 4.05 | 30      | 26         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.72      | 1.16 | 23          |
| SPT8  | 4.05 | 4.5  | 63      | 52         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.83      | 1.09 | 39          |
| SPT9  | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT9  | 0    | 0.45 | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 2           |
| SPT9  | 0.45 | 0.9  | 2       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 2           |
| SPT9  | 0.9  | 1.35 | 3       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.20      | 1.00 | 2           |
| SPT9  | 1.35 | 1.8  | 8       | 9          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.27      | 1.57 | 9           |
| SPT9  | 1.8  | 2.25 | 126     | 136        | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.39      | 1.44 | 71          |
| SPT10 | 0    | 0    | 0       | 0          |         |      |      |      |           |      | 0           |
| SPT10 | 0    | 0.45 | 6       | 5          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.07      | 1    | 5           |
| SPT10 | 0.45 | 0.9  | 3       | 2          | 0.75    | 1500 | 0.45 | 0.07 | 0.14      | 1    | 2           |
| SPT10 | 0.9  | 1.35 | 5       | 4          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.21      | 1.00 | 4           |
| SPT10 | 1.35 | 1.8  | 6       | 7          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.28      | 1.56 | 7           |
| SPT10 | 1.8  | 2.25 | 7       | 8          | 0.75    | 1600 | 0.45 | 0.07 | 0.35      | 1.48 | 8           |
| SPT10 | 2.25 | 2.7  | 50      | 51         | 0.75    | 2500 | 0.45 | 0.11 | 0.46      | 1.37 | 33          |

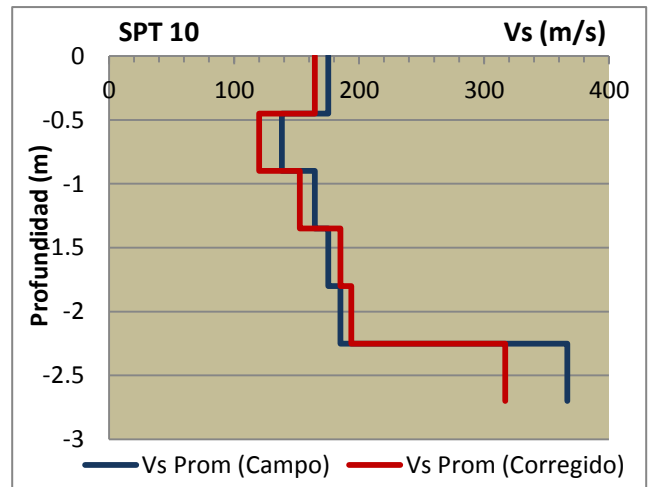
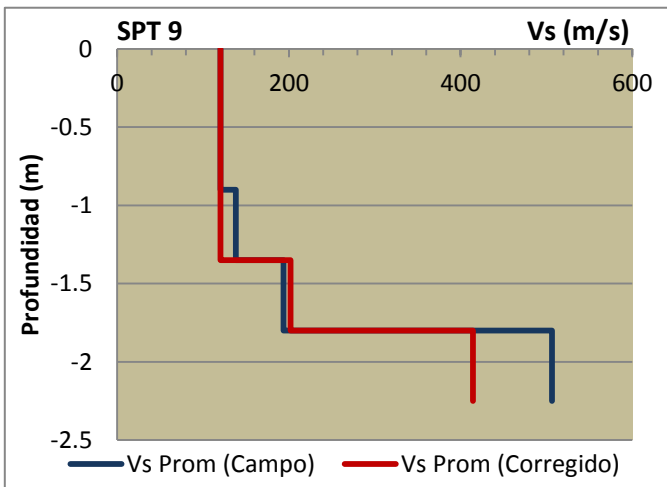
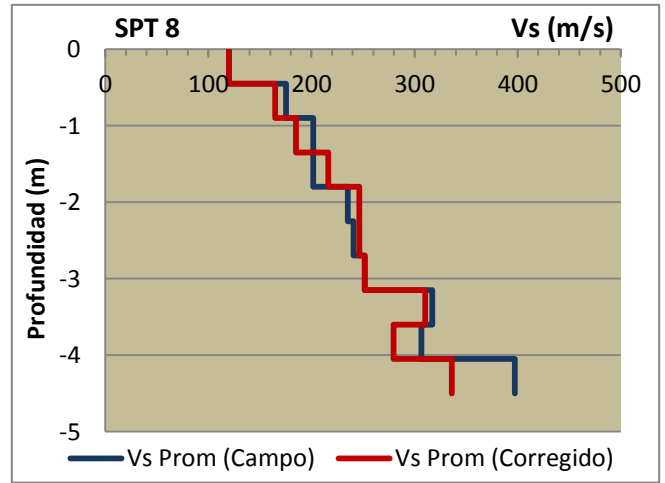
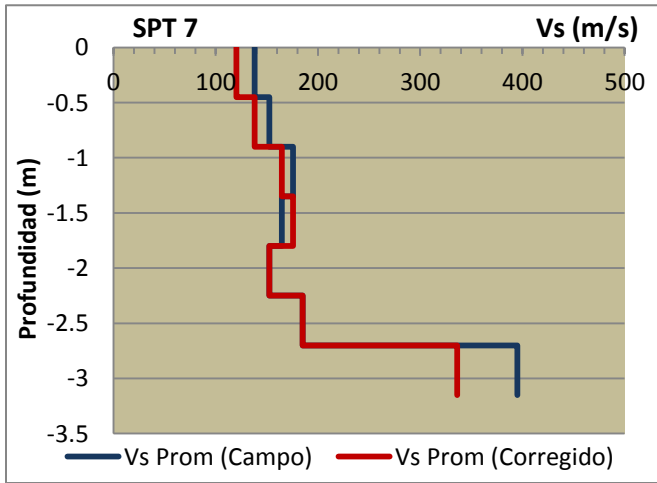
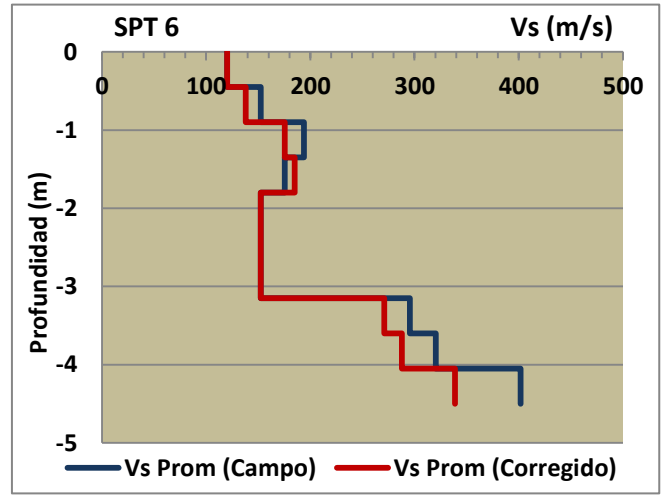
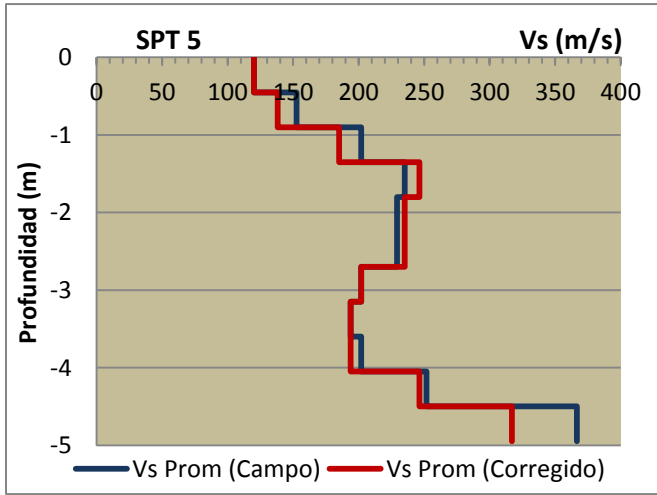
### ANEXO C. Modelos de vs para cada sitio de estudio con cada SPT.

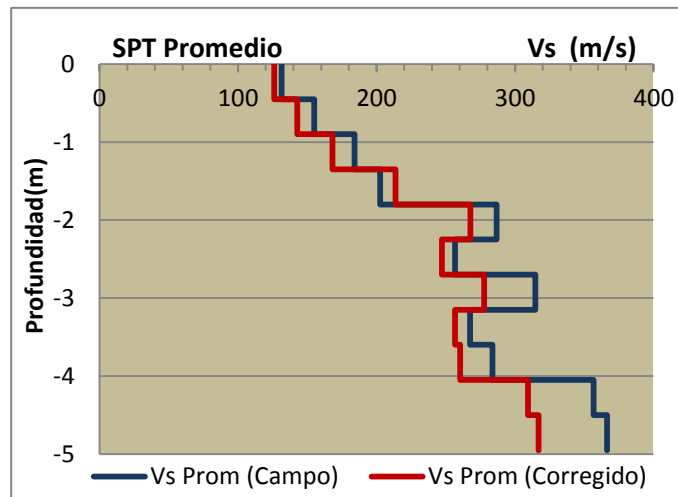




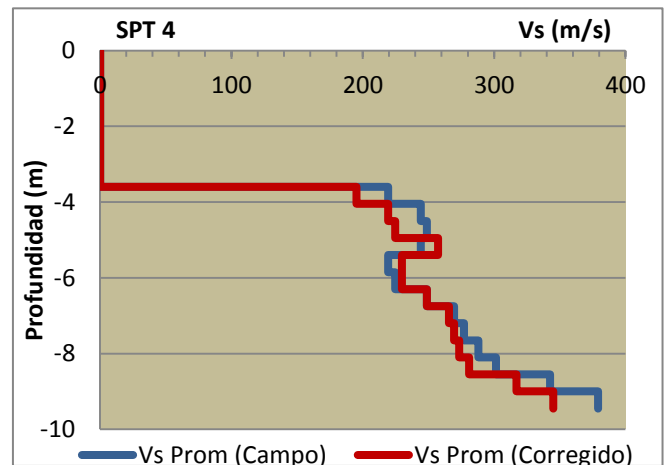
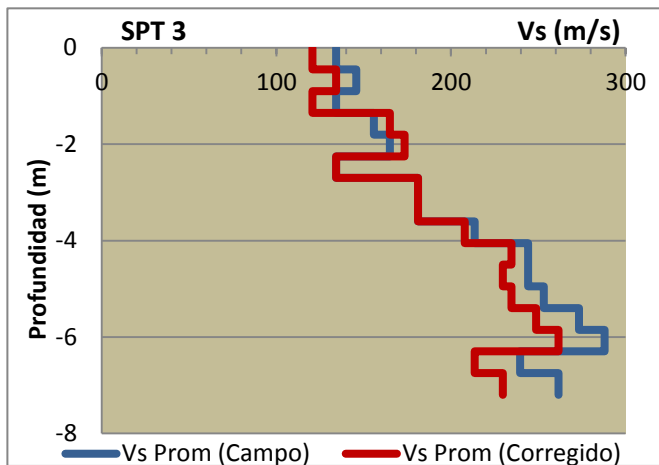
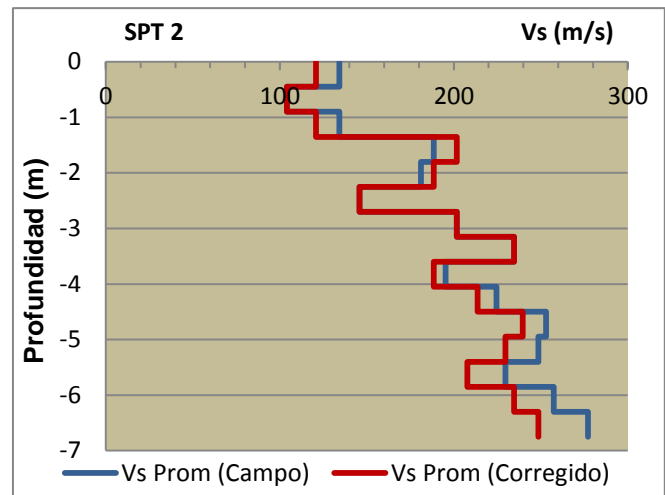
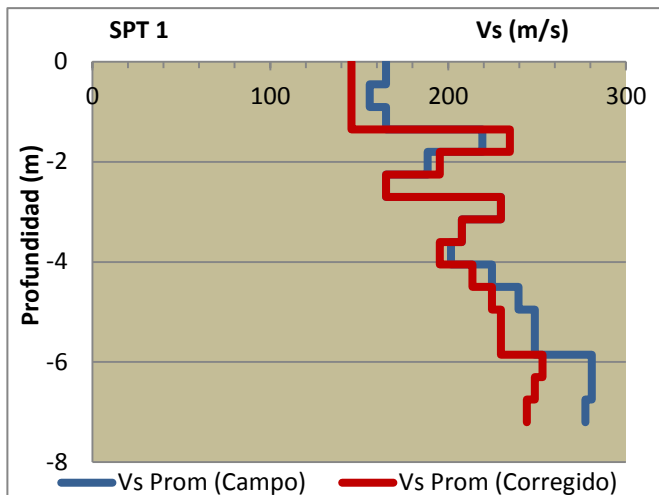
**Anexo C.1. FAREM-Carazo.**



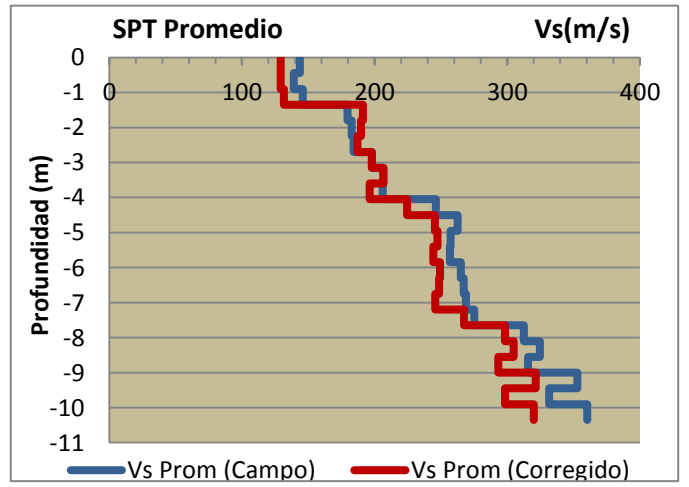
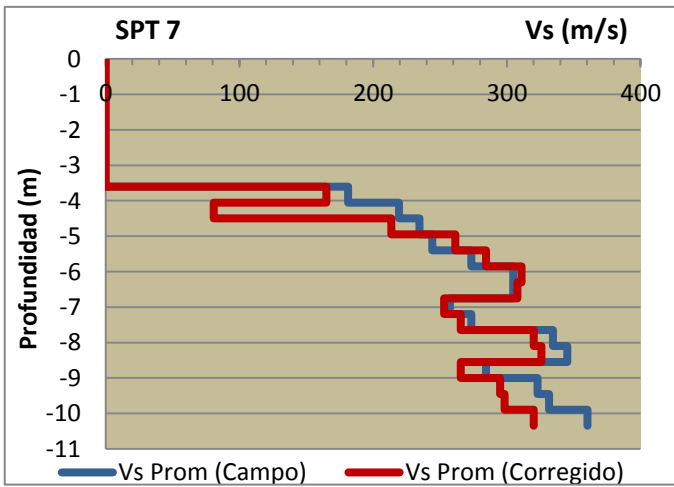
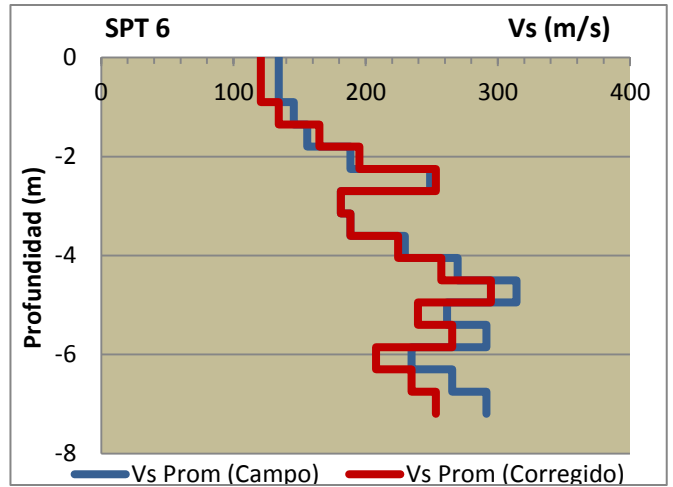
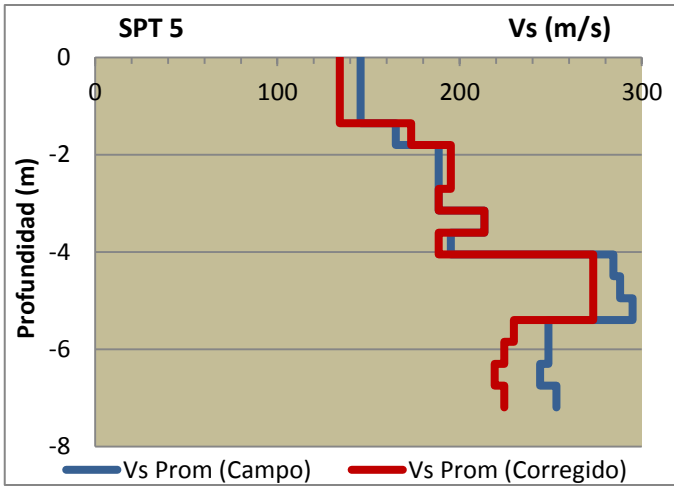




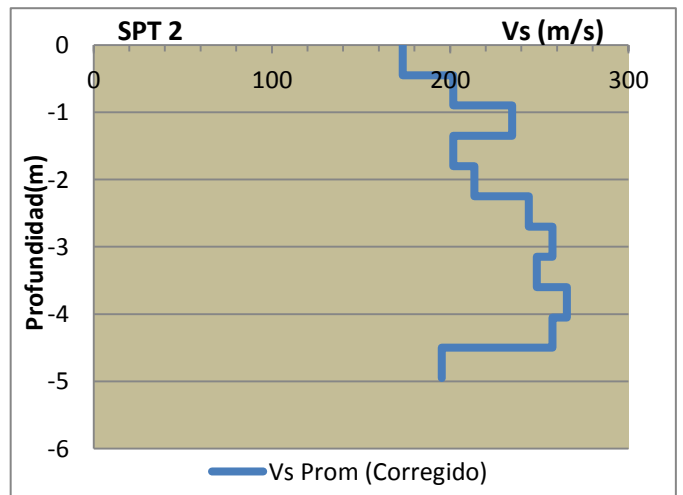
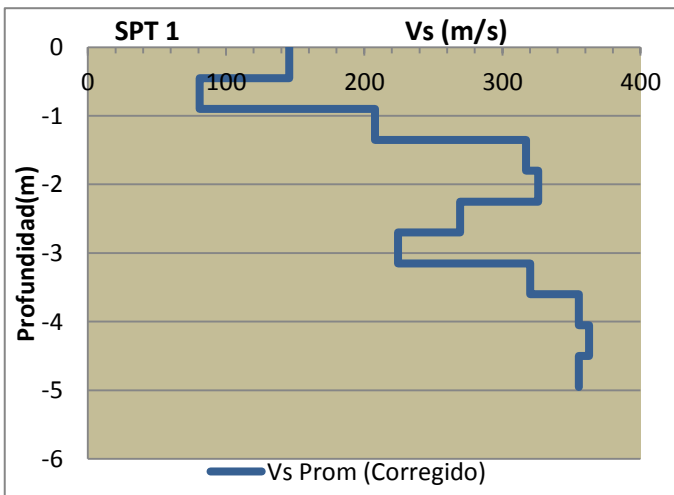
**Anexo C.2. FAREM-Chontales.**

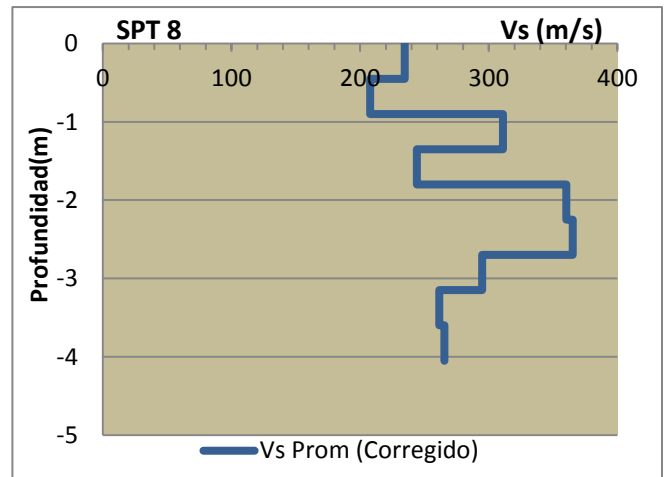
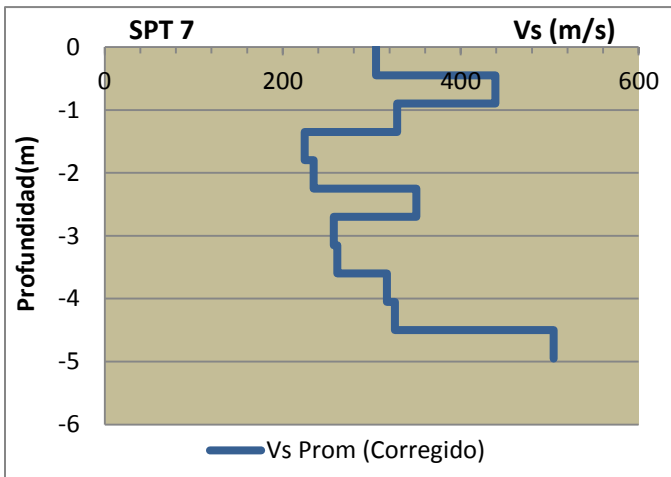
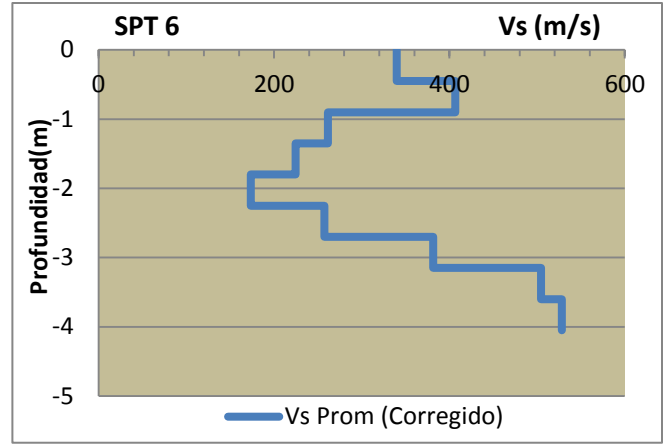
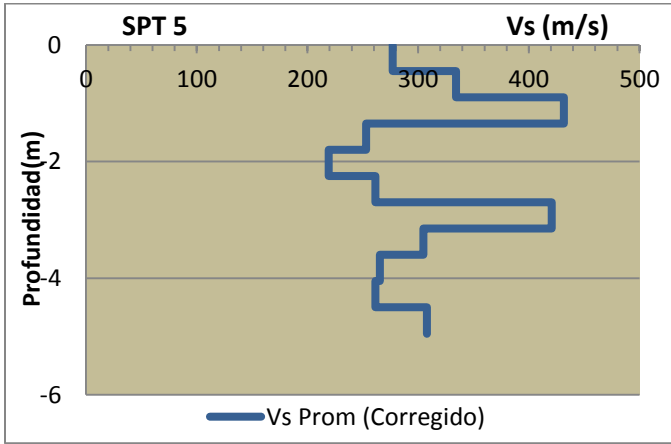
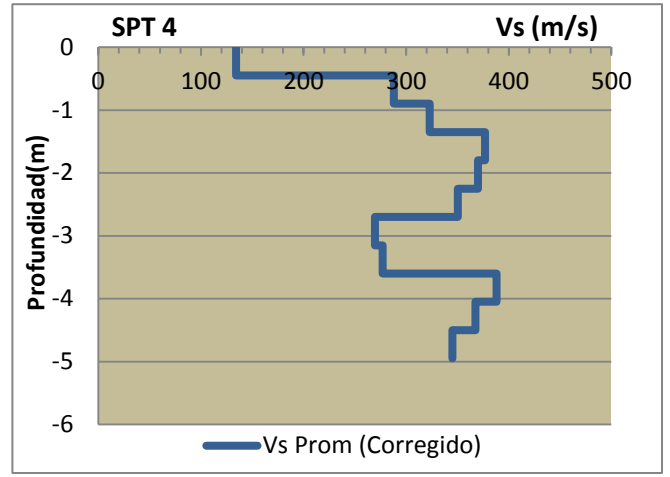
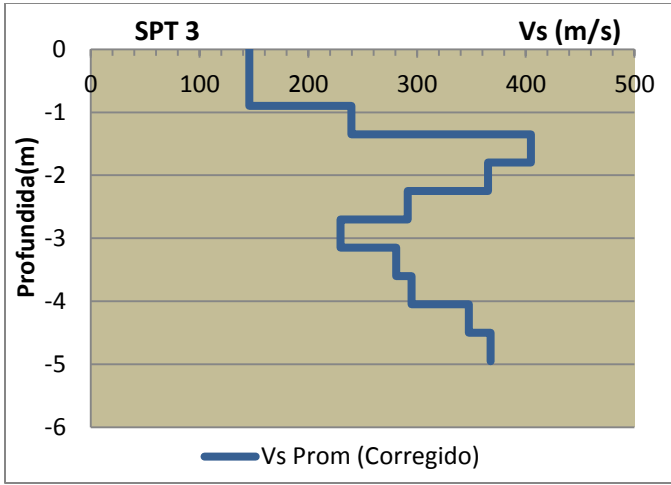


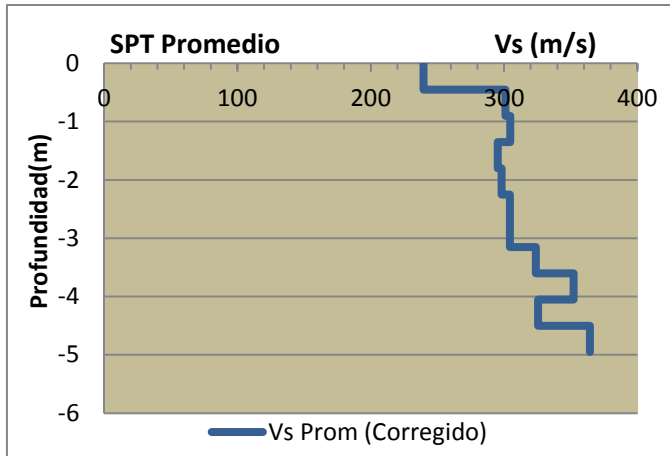




**Anexo C.3. RURD-CIGEO.**

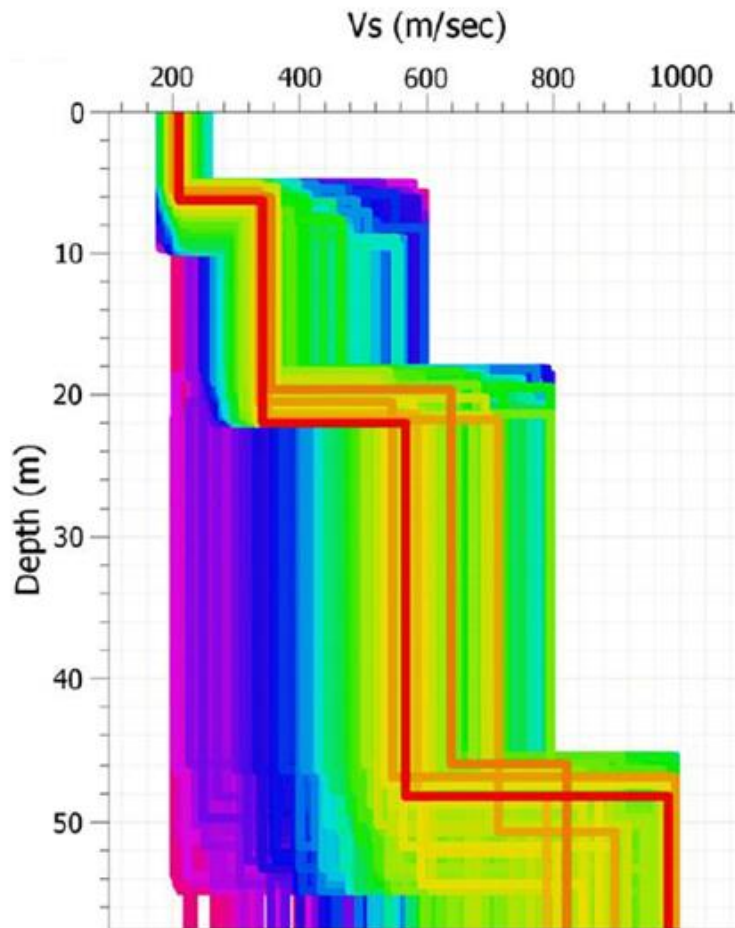




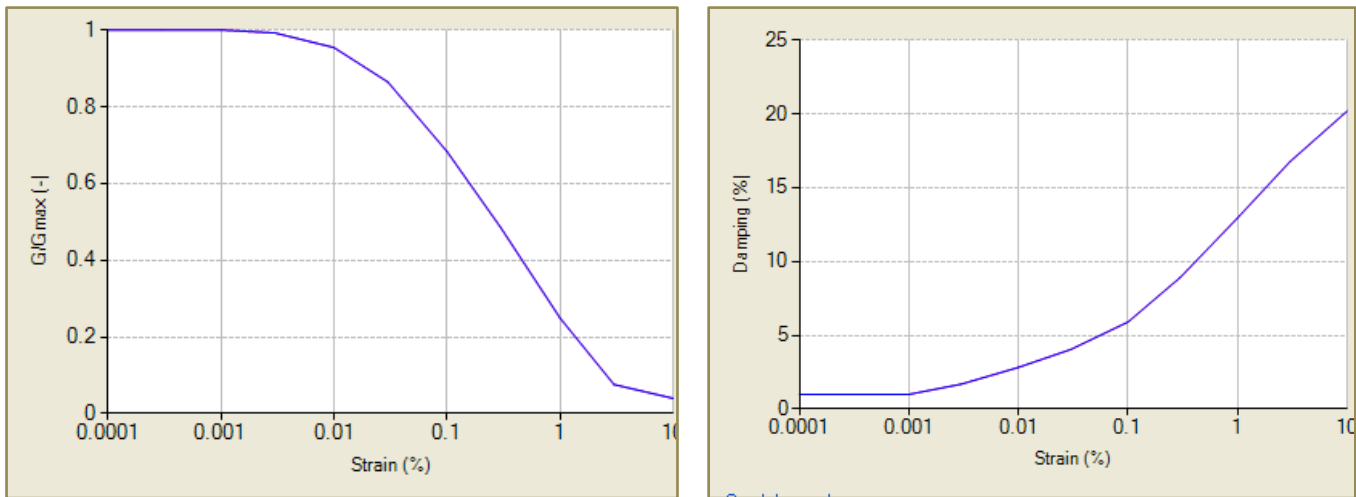


**Anexo C.4. RURD-Arlen Siu.**

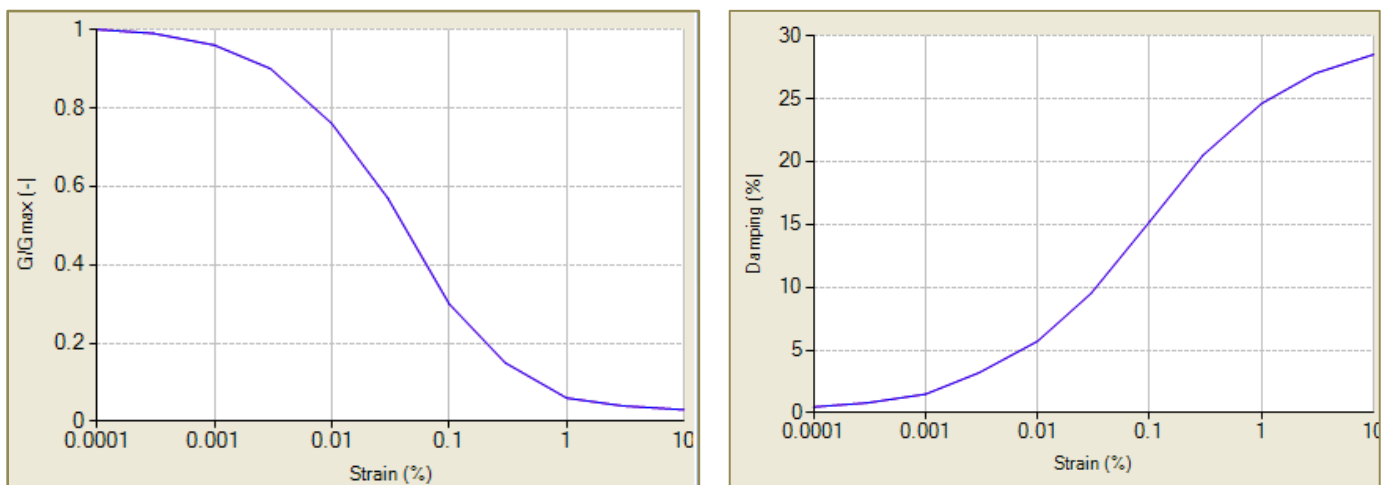
**ANEXO D. Modelo velocidad de onda de corte estimado por (Obando, Ryden, & Ulriksen, 2011) en el sitio donde se construyó el edificio del CIGEO/UNAN-Managua.**



## ANEXO E. Curvas de módulo de cortante y amortiguamiento.



**Anexo E.1.** Curvas de módulo de reducción y módulo de amortiguamiento, para estrato de arcilla media.



**Anexo E.2.** Curvas de módulo de reducción y módulo de amortiguamiento, para estrato de arena media.

**ANEXO F. Perfil general obtenido de la caracterización de suelo realizada por (Sevilla, 2008).**

| Prof. (m) | Estrato | Espesor (m) | USCS | P. U. (kN/m <sup>3</sup> ) | Vs (m/s) | Resistividad ( $\Omega$ m) |
|-----------|---------|-------------|------|----------------------------|----------|----------------------------|
| 1.52      | 1       | 1.52        | ML   | 12.49                      | 300      | 72 - 140                   |
| 3.05      | 2       | 1.52        | SM   | 14.14                      | 200      | 72 - 140                   |
| 4.57      | 3       | 1.52        | SM   | 16.65                      | 200      | 140 - 270                  |
| 6.1       | 4       | 1.52        | SM   | 17.13                      | 400      | 140 - 270                  |
| 7.62      | 5       | 1.52        | SM   | 17.06                      | 400      | 270 - 1000                 |
| 10.67     | 6       | 3.05        | SM   | 13.56                      | 400      | 1000                       |
| 13.72     | 7       | 3.05        | SM   | 12.67                      | 490      | 1000                       |
| 15.24     | 8       | 1.52        | SM   | 15.33                      | 490      | 1000                       |
| 16.76     | 9       | 1.52        | SC   | 14.26                      | 500      | 1000                       |
| 18.29     | 10      | 1.52        | SM   | 15.23                      | 500      | 1000                       |
| 19.81     | 11      | 1.52        | SM   | 14.87                      | 500      | 1000                       |
| 21.34     | 12      | 1.52        | SM   | 15.39                      | 500      | 1000                       |
| 22.86     | 13      | 1.52        | SM   | 15.34                      | 500      | 1000                       |
| 24.38     | 14      | 1.52        | SM   | 14.33                      | 500      | 1000                       |
| 25.91     | 15      | 1.52        | SM   | 14.10                      | 630      | 270 - 370                  |
| 27.43     | 16      | 1.52        | SM   | 11.90                      | 630      | 190 - 270                  |
| 28.96     | 17      | 1.52        | SM   | 12.71                      | 630      | 72 - 190                   |
| 30.48     | 18      | 1.52        | SM   | 14.12                      | 630      | 72 - 190                   |
| 35.05     | 19      | 4.57        | SM   | 12.98                      | 780      | 72 - 190                   |
| 36.58     | 20      | 1.52        | SM   | 15.17                      | 780      | 72 - 190                   |
| 38.1      | 21      | 1.52        | SM   | 15.51                      | 780      | 72 - 190                   |
| 42.67     | 22      | 4.57        | SM   | 15.20                      | 780      | 72 - 190                   |
| 44.2      | 23      | 1.52        | SM   | 12.85                      | 780      | 72 - 140                   |
| 27.24     | 24      | 3.05        | SM   | 13.32                      | 800      | 72 - 140                   |
| 51.82     | 25      | 4.57        | ML   | 12.46                      | 800      | 52 - 72                    |

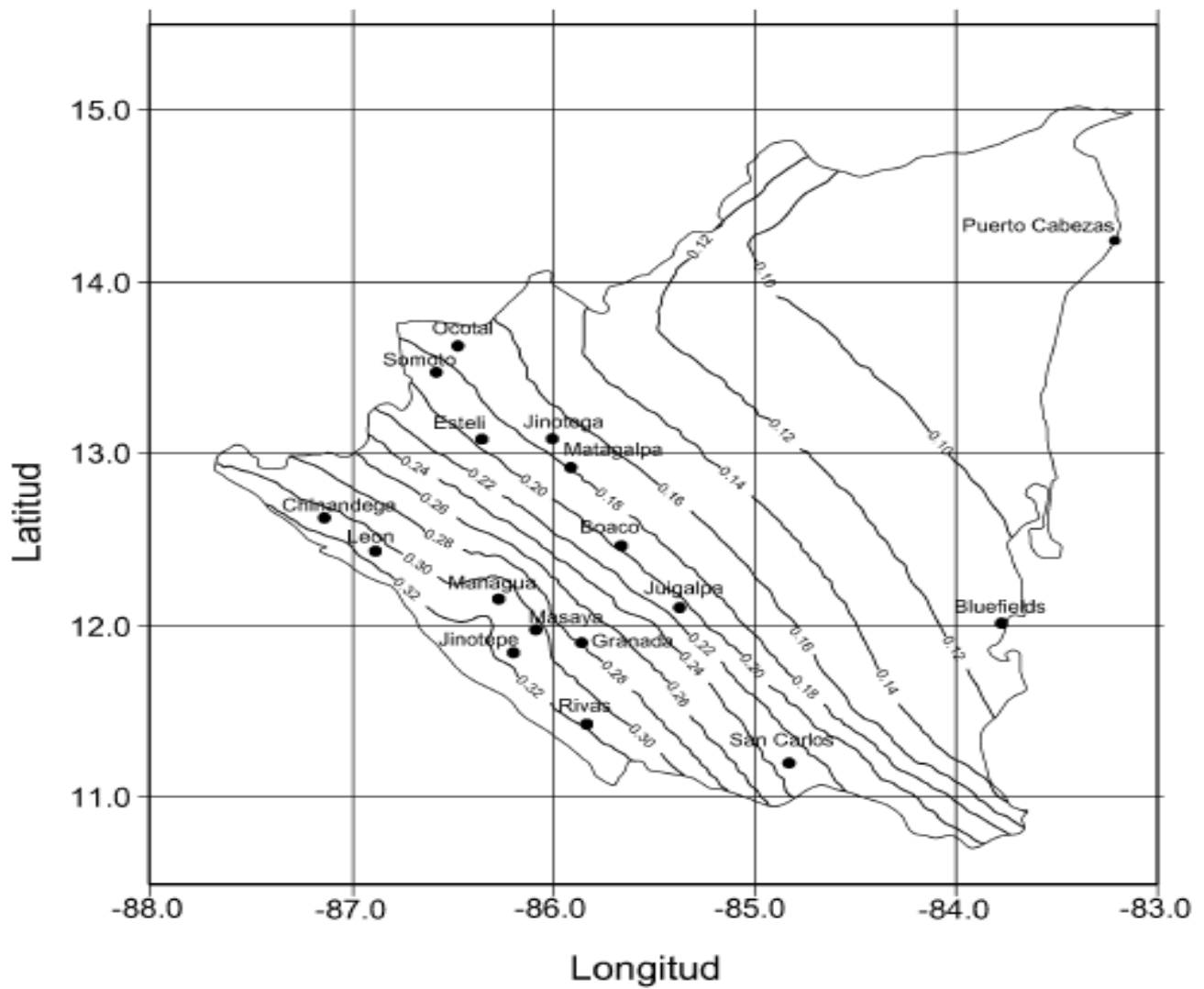


|       |    |       |    |       |      |         |
|-------|----|-------|----|-------|------|---------|
| 53.34 | 26 | 1.52  | SM | 15.54 | 800  | 37 - 52 |
| 56.39 | 27 | 3.05  | SM | 16.13 | 800  | 37 - 52 |
| 60.05 | 28 | 3.66  | SM | 17.00 | 990  | 37 - 52 |
| 60.96 | 29 | 0.91  | SM | 15.93 | 990  | nm      |
| 67.06 | 30 | 6.1   | SM | 16.49 | 990  | nm      |
| 68.58 | 31 | 1.52  | SM | 15.57 | 990  | nm      |
| 70.1  | 32 | 1.52  | SM | 16.14 | 990  | nm      |
| 79.25 | 33 | 9.14  | SM | 16.06 | 1700 | nm      |
| 80.77 | 34 | 1.52  | SM | 13.94 | 1700 | nm      |
| 82.3  | 35 | 1.52  | SM | 13.08 | 1700 | nm      |
| 83.82 | 36 | 1.52  | SM | 13.27 | 1700 | nm      |
| 99.97 | 37 | 16.15 | SM | 13.41 | 1700 | nm      |

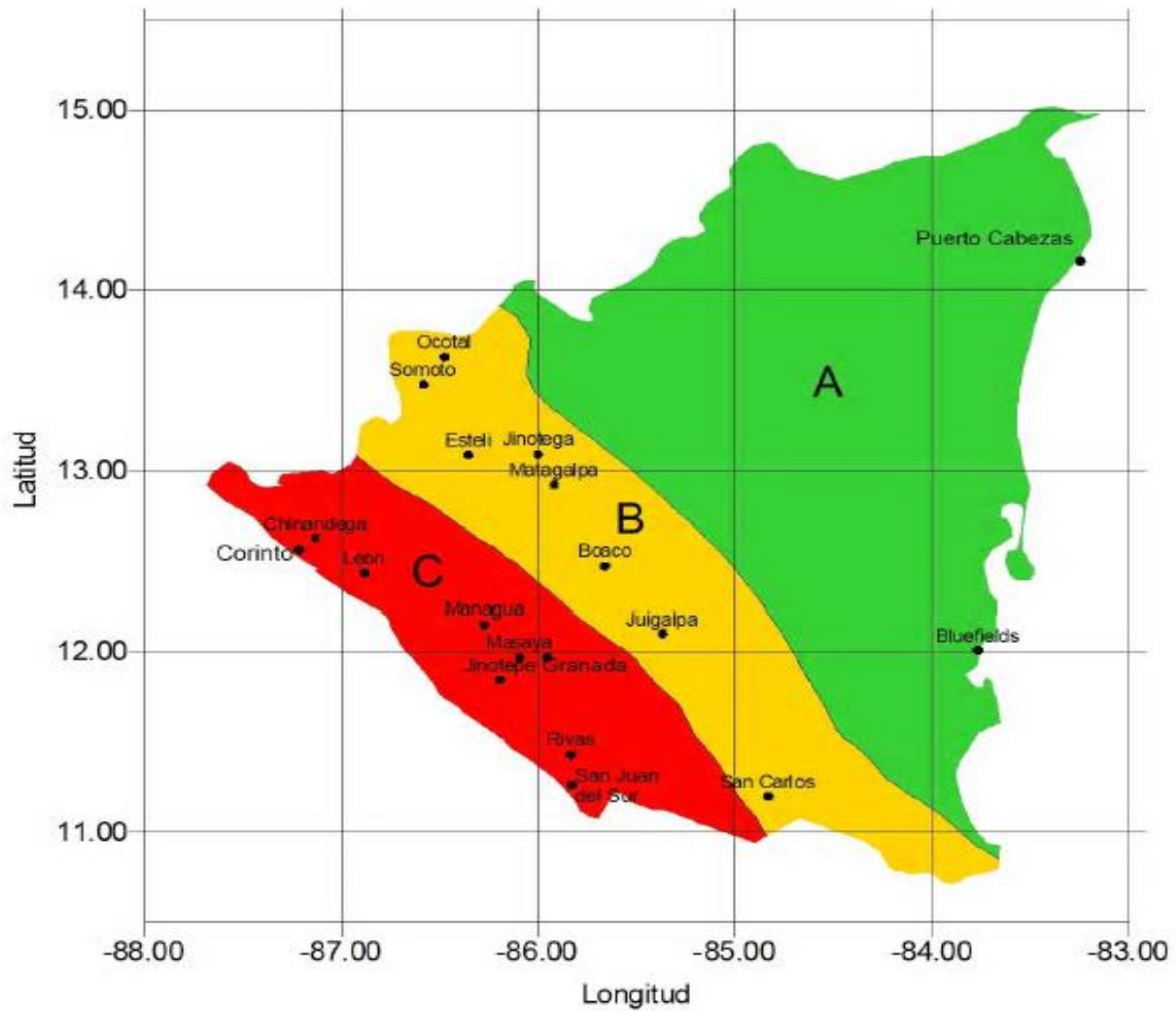
nm: valor no medido

|  |            |
|--|------------|
|  | Material 1 |
|  | Material 2 |
|  | Material 3 |

**ANEXO G. Mapas de isoaceleraciones y coeficiente sísmico en las diferentes regiones de Nicaragua.**



*Anexo G.1. Mapa de isoaceleraciones para las diferentes regiones de Nicaragua.*



**Anexo G.2.** Mapa de coeficiente sísmico para las diferentes zonas sísmicas de Nicaragua.

**ANEXO H. Factor de amplificación para los diferentes tipos de suelo establecidos en el Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-07).**

| Zona Sísmica | Tipo de suelo |     |     |
|--------------|---------------|-----|-----|
|              | I             | II  | III |
| A            | 1.0           | 1.8 | 2.4 |
| B            | 1.0           | 1.7 | 2.2 |
| C            | 1.0           | 1.5 | 2.0 |