

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN SÍSMICA Y SONDAJE GEOTÉCNICO DE
POZOS EN LA CIUDAD DE CARACAS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la T.S.U. Flores Almeida, Yelitza
Para optar al Título de
Ingeniera Geofísico

Caracas, Noviembre de 2006.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN SÍSMICA Y SONDAJE GEOTÉCNICO DE POZOS EN LA CIUDAD DE CARACAS

Tutor Académico: Prof. Michael Schmitz.
Tutor Industrial: Ing. Moralis J. González.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la T.S.U. Flores Almeida, Yelitza
Para optar al Título de
Ingeniera Geofísico

Caracas, Noviembre de 2006

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Geofísica y Minas, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la T.S.U. Yelitza Flores Almeida, titulado:

EVALUACIÓN SÍSMICA Y SONDAJE GEOTÉCNICO DE POZOS EN LA CIUDAD DE CARACAS

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Jurado

Jurado

Dr. Michael Schmitz
Tutor Académico

Ing. Moralis González
Tutor Industrial

DEDICATORIA

Dedicado a mis seres queridos; en especial para Miguel Alejandro y para Alejandrina.

Para todos aquellos que con esfuerzo y dedicación logran sus metas.

AGRADECIMIENTOS

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela por permitirme formar parte de ella.

A la Universidad Simón Bolívar, en la persona del Prof. Carlos Izarra, por el préstamo de parte del equipo de adquisición.

A FUNVISIS por el apoyo inmensurable de su gente, en especial al Dr. Gustavo Malavé por su confianza.

Al Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”, en la persona del Dr. Arturo Montes, por otorgarme un espacio de tiempo para dedicarle a esta actividad, y a los compañeros que me suplieron durante mi ausencia.

A mis tutores por el apoyo brindado.

A mis grandes compañeros de campo: Cecilio, Kenny, Edwin, hoy día ingenieros de esta República, y a los ingenieros Cristián y Jesús. Sin ellos, hubiese sido muy difícil cumplir esta fase del trabajo.

Al ingeniero Amancio Pérez y el TSU. Felipe Fernández, por toda la colaboración prestada en las labores de campo.

Al ingeniero Javier Sánchez por prestarme asesoría siempre que la necesité.

Al ingeniero José Domingo Alviar, por sus valiosas observaciones sobre el trabajo final.

A mi gran amigo Henry Duque por su apoyo incondicional, no sólo con su presencia sino a distancia.

A mis compañeros de trabajo, docentes del I.U.T., especialmente a Mario y a Manuel.

A mis amigas Liliana y Raiza, por darme siempre palabras de aliento para continuar.

A mis familiares más cercanos por prestarme ayuda cuando más lo necesité.

A mi hijo por otorgarme, sin saberlo, tiempo para alcanzar esta meta.

Y por sobre todos ellos: a Ti que llenas de voluntad día a día a todos estos corazones. Tú Quien todo lo puede...

A todos, ¡Gracias!...

Flores A., Yelitza

EVALUACIÓN SÍSMICA Y SONDAJE GEOTÉCNICO DE POZOS EN LA CIUDAD DE CARACAS

Tutor Académico: Prof. Michael Schmitz. Tutor Industrial: Ing. Moralis
J. González. Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2006.

Palabras Claves: Sísmica, Pozos, Sondeo, Geotecnia, Correlaciones.

RESUMEN

La evaluación sísmica y geotécnica de pozos del proyecto Microzonificación Sísmica de la ciudad de Caracas, tuvo como objetivo determinar las velocidades de ondas de cuerpo en los primeros 30 m de profundidad y el tipo de espectro que debe ser usado según las especificaciones de la norma sismorresistente para edificaciones COVENIN 1756 (2001), en pozos ubicados en los sectores: Los Chorros, Sebucán y La Carlota, mediante la aplicación de las técnicas “*Downhole*” y “*Crosshole*”. Adicionalmente, se correlacionaron los perfiles sísmicos y litológicos (los últimos elaborados con el Ensayo de Penetración Estándar) y se determinó qué curvas de estimación, obtenidas por otros investigadores, se ajustaban mejor a las zonas estudiadas.

Con el “*Downhole*”, el promedio de las velocidades de onda P, en los primeros 30 m, en Los Chorros, Sebucán y La Carlota, es 870, 1160 y 1526 m/s, respectivamente; y las de onda S, 457, 530 y 284 m/s, respectivamente. Las diferencias de velocidades entre los pozos ubicados al norte y al sur del valle se deben al tipo y la condición en que se encuentran los sedimentos. Con los perfiles de velocidad se determinó, para los pozos ubicados al norte y sur del valle, que los espectros asociados son S1 y S2, respectivamente.

El “*Crosshole*” sólo se aplicó en Sebucán a partir de los 10 metros de profundidad en paralelo con el ensayo SPT. La metodología puesta en práctica, mostró resultados equiparables con los hallados en el “*Downhole*”.

Las velocidades promedio de onda de corte hallados en cada pozo en función de los parámetros de la geotecnia y las curvas de estimación, mostraron que la curva de mejor ajuste para los pozos ubicados al norte del valle de Caracas fue la de Campos (2004), mientras que las de Ohta y Goto (1978) se adecuó más a los sedimentos de los pozos ubicados en La Carlota.

ÍNDICE

CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE.....	viii
LISTAS DE FIGURAS Y GRÁFICOS.....	xi
LISTAS DE TABLAS.....	xv
CAPÍTULO I.....	17
<i>INTRODUCCIÓN.....</i>	17
<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</i>	20
<i>ANTECEDENTES.....</i>	22
CAPÍTULO II.....	26
<i>GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE CARACAS.....</i>	26
El Basamento Rocoso.....	28
El Valle de Caracas.....	28
CAPÍTULO III.....	32
<i>SÍSMICA DE POZOS.....</i>	32
Principios y Conceptos Básicos en Sísmica de Pozos.....	33
Cálculo de las Constantes Elásticas del Medio.....	34
Características del Equipo empleado en Sísmica de Pozos Geotécnicos.....	36
CAPÍTULO IV.....	38
<i>ADQUISICIÓN SÍSMICA DE POZOS CON LA TÉCNICA DOWNHOLE.....</i>	38
Calidad de los Datos.....	39

Metodología para la Adquisición en la Ciudad de Caracas.....	40
Procesamiento de los Datos Sísmicos.....	43
Resultados y Discusión de Resultados.	47
CAPÍTULO V.....	63
<i>ADQUISICIÓN SÍSMICA DE POZOS CON LA TÉCNICA CROSSHOLE.....</i>	<i>63</i>
Metodología para la Adquisición en la Ciudad de Caracas.....	65
Procesamiento de los Datos Sísmicos.....	68
Resultados y Discusión de Resultados.....	69
CAPÍTULO VI.....	73
<i>EVALUACIÓN GEOTÉCNICA.....</i>	<i>73</i>
Ensayo de Penetración Estándar.	73
Aplicación del Ensayo SPT en el Estudio de Microzonificación Sísmica de Caracas.	78
Procesamiento de los Datos Geotécnicos.	80
Resultados y Discusión de Resultados.	81
CAPÍTULO VII.....	85
<i>ANÁLISIS INTEGRADO DE LOS RESULTADOS.....</i>	<i>86</i>
Los Chorros.	86
Sebucán.....	93
La Carlota.	100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
REFERENCIAS	109
APÉNDICE A.	112
<i>SECCIONES SÍSMICAS DE CONTROL DE LOS POZOS DEL PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARACAS.....</i>	<i>112</i>
APÉNDICE B.....	117
<i>CONSIDERACIONES PARA LA GEOTECNIA.....</i>	<i>117</i>

APÉNDICE C.	122
------------------	-----

<i>PERFILES LITOLÓGICOS DE LOS POZOS GEOTECNICOS PARA EL PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARACAS.....</i>	<i>122</i>
--	------------

LISTAS DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1. Sectores seleccionados para la exploración inicial del subsuelo al noreste de Caracas (Sánchez et al, 2005).	20
Figura 2. Modelos 1D realizados con refracción sísmica en el Valle de Caracas (Morales, 2006). Arriba: Los Chorros. Abajo: La Carlota.....	25
Figura 3. Mapa geológico y de fallas de Caracas (Urbani y Rodríguez, 2004).	27
Figura 4. Mapa de espesor de sedimentos del Distrito Metropolitano (Kantak et al, 2005).	31
Figura 5. Geófono de pozo modelo BHG-3, marca Geostuff con brazo de sujeción.	36
Figura 6. Esquema de la geometría del método Downhole (TRX, 2005).....	39
Figura 7. Equipo de adquisición sísmica de pozos en el sector Los Chorros. Al pie de la foto: el instrumental. A la derecha: la fuente. Al fondo: Equipo de perforación de pozos.	41
Figura 8. Sección original de onda P componente vertical sin corrección estática y sin filtros. Técnica “ <i>Downhole</i> ”.....	43
Figura 9. Sección final de onda P componente vertical. Método “ <i>Downhole</i> ”	45
Figura 10. Sección final polarizada de onda S_{NS} según “ <i>Downhole</i> ”.....	45
Figura 11. Sección final onda P componente vertical. Método Downhole, Los Chorros.	48
Figura 12. Sección final onda S_{NS} . Método <i>Downhole</i> , Los Chorros.	48
Figura 13. Sección final onda S_{EW} . Método <i>Downhole</i> , Los Chorros.	49
Figura 14. Propiedades dinámicas usando el método <i>Downhole</i> en el pozo P-6, Los Chorros.	50
Figura 15. Sección final de onda P componente vertical. Método <i>Downhole</i> , Sebucán.	51
Figura 16. Sección final de onda S_{NS} . Método <i>Downhole</i> , Sebucán.....	51

Figura 17. Sección final de onda S_{EW} . Método <i>Downhole</i> , Sebucán.....	52
Figura 18. Propiedades dinámicas usando el método <i>Downhole</i> en el pozo P-4, Sebucán.....	53
Figura 19. Sección final onda P componente vertical. Método <i>Downhole</i> , La Carlota. Pozo P-2.	54
Figura 20. Sección final onda S_{NS} . Método <i>Downhole</i> , La Carlota. Pozo P-2.	54
Figura 21. Sección final onda S_{EW} . Método <i>Downhole</i> , La Carlota. Pozo P-2.....	55
Figura 22. Propiedades dinámicas usando el método <i>Downhole</i> en el pozo P-2, La Carlota.....	56
Figura 23. Sección final onda P componente vertical. Método <i>Downhole</i> . Pozo P-2', La Carlota.....	57
Figura 24. Sección final onda S_{NS} . Método <i>Downhole</i> . Pozo P-2', La Carlota.	57
Figura 25. Sección final onda S_{EW} . Método <i>Downhole</i> . Pozo P-2', La Carlota.....	58
Figura 26. Propiedades dinámicas usando el método <i>Downhole</i> en el pozo P-2', La Carlota.	59
Figura 27. Esquema de un levantamiento “ <i>Crosshole</i> ” mostrando el pozo-fuente y dos pozos receptores. El tipo de onda generado dependerá de la fuente empleada.	63
Figura 28. Equipo utilizado para el <i>Crosshole</i> en La Escuela de Enfermería de la U.C.V., sector Sebucán. A la izquierda: Máquina de perforación geotécnica.	67
Figura 29. Sección final de onda P_{EW} . Método <i>Crosshole</i> , Sebucán.	70
Figura 30. Sección final de onda P_{NS} . Método <i>Crosshole</i> , Sebucán.....	70
Figura 31. Sección final de onda S. Método <i>Crosshole</i> , Sebucán.....	70
Figura 32. Propiedades dinámicas usando el método <i>Crosshole</i> en el pozo P-4, sector Sebucán.....	71
Figura 33. Esquema del ensayo SPT conducido con un martillo tipo Donut. ...	76
Figura 34. Esquema del muestreador Cuchara Partida del SPT.....	77

Figura 35. Equipo de Ensayo SPT utilizado en el sector Sebucán.....	79
Figura 36. Muestra de arena recuperada con la cuchara partida (Pozo P-2, La Carlota).	80
Figura 37. Gráfico de valores de N , N_{60} , $N_{1(60)}$ por nivel de profundidad en Los Chorros.	82
Figura 38. Gráfico de valores de N , N_{60} por nivel de profundidad en Sebucán.....	83
Figura 39. Gráfico de valores de N , N_{60} por nivel de profundidad en La Carlota.....	84
Figura 40. Gráfico comparativo entre las velocidades de ondas de corte estimadas con curvas empíricas y las del <i>Downhole</i> en Los Chorros.	88
Figura 41. Modelo unidimensional obtenido con refracción sísmica superficial en Los Chorros (Morales, 2006).....	89
Figura 42. Gráficos de correlación de las variables N , N_{60} contra velocidad de corte. Pozo P-6, Los Chorros.....	90
Figura 43. Gráficos de correlación (por capas) de las variables N , N_{60} contra velocidad de corte. Pozo P-6, Los Chorros.	91
Figura 44. Análisis estadístico de los datos del pozo P-6, Los Chorros.	92
Figura 45. Gráfico comparativo entre las velocidades de ondas de corte estimadas con curvas empíricas y las del <i>Downhole</i> en Sebucán.....	96
Figura 46. Gráficos de correlación de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-4, Sebucán.....	97
Figura 47. Resultados del análisis estadístico de los datos del pozo P-4, Sebucán.....	98
Figura 48. Gráficos de correlación (por capas) de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-6, Los Chorros.	99
Figura 49. Gráfico comparativo de las velocidades de ondas de corte estimadas con curvas empíricas y las del <i>Downhole</i> en La Carlota.	102
Figura 50. Gráficos de correlación de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-2, La Carlota.....	103

Figura 51. Gráficos de correlación (por capas según la geotecnia) de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-2, La Carlota.	104
Figura 52. Análisis estadístico de los datos del pozo P-2, La Carlota.	105

LISTAS DE TABLAS.

Tabla 1. Velocidades* sísmicas obtenidas mediante refracción sísmica en el Valle de Caracas Kantak, Schmitz y Audemard (2005) en comparación con Weston (1969).....	24
Tabla 2. Características de los sedimentos encontrados en el valle de Caracas (extraído de Kantak, 2001).....	30
Tabla 3. Parámetros de fuentes sísmicas usadas en adquisición (Alvarello, 1999).	37
Tabla 4. Ubicación geográfica de los pozos para la adquisición <i>Downhole</i> del estudio de Micro zonificación Sísmica de la ciudad de Caracas.	40
Tabla 5. Valores promedios por capa de las velocidades y módulo de Poisson obtenidos con <i>Downhole</i> para el estudio de Micro zonificación Sísmica de Caracas.....	60
Tabla 6. Parámetros del perfil geotécnico de los pozos evaluados con el <i>Downhole</i> y la norma COVENIN 1756-2001 en comparación con el $V_s(30)$	61
Tabla 7. Coordenadas geográficas de los pozos para el <i>Crosshole</i> en Sebucán.....	66
Tabla 8. Parámetros promedios obtenidos en el sector Sebucán con los dos métodos geofísicos aplicados.....	72
Tabla 9. Relación entre la consistencia de suelos cohesivos, el número de golpes SPT y la resistencia el corte no drenada según Terzaghi y Peck (Juárez y Rico, 1978).....	75
Tabla 10. Relación entre la compacidad, el número de golpes SPT y la densidad relativa según Terzaghi y Peck (Juárez y Rico, 1978).....	75
Tabla 11. Distribución de capas con el <i>Downhole</i> y la Geotecnia (Pozo P-6, Los Chorros).....	86

Tabla 12. Velocidad promedio de ondas de corte y Vs(30) calculadas según distintas curvas de ajuste en comparación con los resultados del <i>Downhole</i> en Los Chorros.	87
Tabla 13. Distribución de capas con el <i>Downhole</i> y la Geotecnia (Pozo P-4, Sebucán).	93
Tabla 14. Velocidad promedio de ondas de corte y Vs30 calculadas según distintos curvas de ajuste en comparación con los resultados del <i>Downhole</i> en Sebucán.....	94
Tabla 15. Distribución de capas según Downhole y Geotecnia en Pozo P-2 (INPARQUES).	100
Tabla 16. Velocidad promedio de ondas de corte y Vs30 calculadas según distintos curvas de ajuste en comparación con los resultados del <i>Downhole</i> en INPARQUES (Pozo P-2).	101

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

En el marco del proyecto Microzonificación Sísmica de Caracas que lideriza la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, FUNVISIS, se centra el presente trabajo como parte de un programa de perforación del subsuelo, de acuerdo con estudios previos que se realizaron en la ciudad (Weston, 1969; FUNVISIS, 1978) donde se evidenció que efectos de sitio, como altos espesores de sedimentos, influye en la respuesta del subsuelo ante la amenaza de un sismo.

La norma sismorresistente para edificaciones COVENIN 1756-2001 señala la necesidad de establecer el perfil geotécnico del subsuelo, a lo fines de obtener las velocidades de propagación de las ondas de corte en los primeros 50 m de profundidad, como parámetro fundamental, para estimar la respuesta del subsuelo en zonas urbanas sísmicamente activas. El estudio permitirá complementar la información que dejara la Agencia Internacional del Japón (JICA), con el propósito de servir de base para la definición de ordenanzas municipales que se pongan en práctica antes de realizar desarrollos urbanísticos con las especificaciones contempladas en esta norma.

Dentro de este contexto, se desarrolló el presente trabajo, cuyo objetivo primordial es evaluar tres sitios ubicados en el este de la ciudad de Caracas (urbanizaciones Los Chorros, Sebucán y La Carlota), desde el punto de vista sísmico y de sondeo geotécnico. Para ello se requirió:

- Asistir en la supervisión de las perforaciones de pozos geotécnicos.
- Adquirir datos geofísicos de campo mediante sísmica de pozos.
- Procesar los datos originados de la adquisición geofísica.
- Realizar modelos del subsuelo de las zonas de estudio e interpretarlos.
- Obtener la velocidad promedio de propagación de ondas de corte según la norma COVENIN 1756-2001.

- Determinar la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad.
- Correlacionar los resultados obtenidos de las mediciones geofísicas con los de la exploración geotécnica.
- Comparar los espectros del diseño sismorresistente obtenidos con la velocidad promedio de ondas de corte, con la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m. y las velocidades de onda de corte calculadas con diversas ecuaciones empíricas.
- Evaluar la aplicación a priori de las ecuaciones empíricas en los sitios explorados para la obtención de los espectros de diseño sismorresistente.

En este sentido, el tema objeto de este estudio se ha desarrollado a continuación en seis capítulos. Cada capítulo engloba un aspecto en su totalidad; haciendo mención a los fundamentos teóricos, descripción de las técnicas utilizadas y desglose de los resultados con sus respectivos análisis, a excepción de los capítulos dos y siete. El capítulo dos muestra de manera resumida la geología de la zona de estudio. A éste le sigue, información precisa sobre sísmica de pozos (capítulo 3) para luego tratar en más detalle las técnicas *Downhole* (capítulo 4) y *Crosshole* (capítulo 5) como los métodos sísmicos para pozos geotécnicos empleados en este proyecto, así como los perfiles sísmicos o modelos unidimensionales a los que se llegaron. El capítulo seis se ha relacionado con la evaluación geotécnica como tal, y en el séptimo, se han integrado los resultados de todos los métodos, tanto geofísicos como geotécnicos con la finalidad de correlacionarlos cualitativa y cuantitativamente, en función de las velocidades de ondas de cuerpo y de los datos del Ensayo de Penetración Estándar. En este último capítulo se ha incluido el tipo de espectro de cada zona, de acuerdo con las especificaciones de la norma sismorresistente para edificaciones COVENIN 1756-2001, como resultado de la obtención de las velocidades promedio de propagación de ondas de corte con el perfil sísmico para la profundidad total de los pozos de 30 m y con las ecuaciones

empíricas de estimación que relacionan velocidades de corte y número de golpes del ensayo de Penetración Estándar (SPT). Finalmente, se concluye en función de los resultados obtenidos y de las comparaciones realizadas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Atendiendo al proyecto de Microzonificación Sísmica, iniciado en enero de 2005 con fondos del convenio FONACIT (proyecto FONACIT 200400738), en agosto del mismo año se comenzaron los trabajos de perforación de pozos hasta encontrar roca fresca (P-1, P-3 y P-5) y hasta 30 m de profundidad (P-2, P-4 y P-6) en tres localidades ubicadas en el Este del valle de Caracas cercanos a la cuenca de Los Palos Grandes (Figura 1).

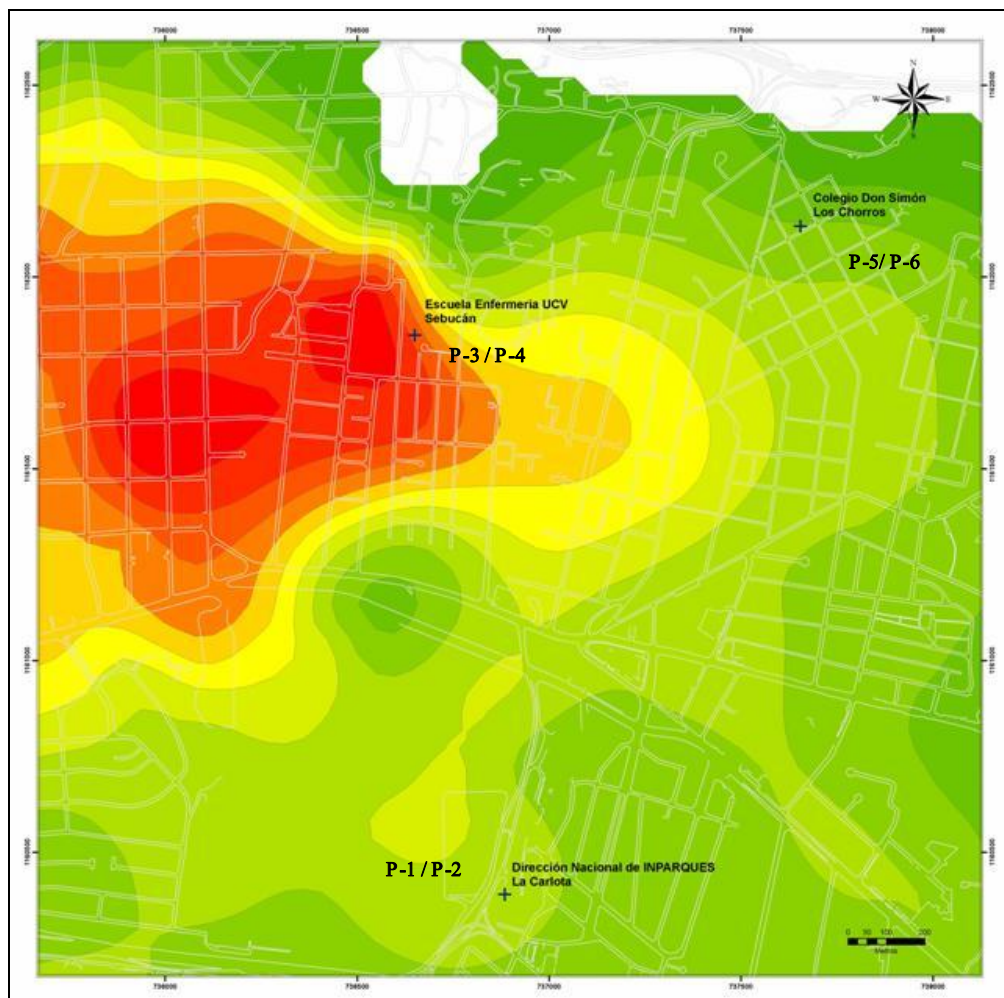


Figura 1. Sectores seleccionados para la exploración inicial del subsuelo al noreste de Caracas (Sánchez et al, 2005).

Los trabajos se iniciaron en el Colegio Don Simón, Urbanización Los Chorros (noreste de la cuenca de Los Palos Grandes), con la perforación de los pozos P-2 y P-1. Posteriormente, se inició la perforación del pozo P-2 en la sede de la Dirección Nacional de INPARQUES, Urbanización La Carlota, pero por problemas que se encontraron en sitio, fue necesario redefinir la posición de los pozos P-1 y P-2 más hacia el norte de la sede, teniéndose como resultado un pozo adicional de 30 m de profundidad al sur de esta zona de estudio, adicional a los planteados originalmente en el proyecto. Paralelamente, se inició la perforación del pozo P-4 en la Escuela de Enfermería de la U.C.V., en Sebuacán, para concluir con la perforación del pozo P-3 en la misma localidad. Aunado a ello, se realizaron perforaciones geotécnicas en los tres sitios, especialmente en INPARQUES (La Carlota) se sondeó la columna de sedimentos (120 m de profundidad).

La perforación de los pozos de 30 metros de profundidad, tuvo como finalidad preliminar hacer mediciones sísmicas con las técnicas *Downhole* y *Crosshole* para obtener información acerca de la velocidad de propagación de ondas de corte hasta esta profundidad y correlacionar los resultados con los de las pruebas geotécnicas a fin de evaluar una metodología más eficaz en estudios futuros que puedan ser puestos en práctica en la exploración de subsuelos sometidos a una elevada amenaza sísmica y a los efectos de sitio.

ANTECEDENTES.

A raíz del sismo ocurrido en Caracas en el año 1967, Weston (1969) realizó mediciones con refracción sísmica profunda en algunas zonas de la ciudad donde se reportaron grandes daños; tal información fue integrada con datos de pozos existentes. Estos estudios constituyeron los primeros pasos hacia la Microzonificación Sísmica. Parte de la información suministrada por Weston fue actualizada por Kantak (2001) con un nivel de resolución mayor (tabla 1) en estratos cercanos a superficie.

Campos (2004) realizó mediciones “*Downhole*”, “*Crosshole*” y Tomografía Sísmica en las avenidas San Martín y Lecuna del municipio Libertador en pozos perforados para la construcción de la línea 4 del Metro de Caracas. Con datos del ensayo de Penetración Estándar realizados en pozos aledaños y las velocidades de corte obtenidas, logró establecer la primera curva de correlación entre las variables N_{SPT} y V_S para Caracas (Ec. 1). Con estos métodos, identificó dos a tres capas en los primeros 30 metros de profundidad con velocidades promedio para las ondas “P” entre 1063 – 1969 m/s y para las ondas “S” entre 378 – 679 m/s.

$$V_S = 98,808 N^{0,3892} \quad (\text{Ec. 1})$$

Ohta y Goto (1978) realizaron análisis estadístico entre la relación velocidades de onda de corte y datos geológicos de más de 300 datos. Una de las ecuaciones empíricas a la que llegaron es la utilizada en este trabajo (ecuación 3), con un error probable de 27,4 y coeficiente de correlación igual 0,719 (Calpa, C. et al, 2001).

$$V_S = 85,34 N^{0,348} \quad (\text{Ec. 2})$$

Otra relación entre el parámetro N_{SPT} y las velocidades de ondas de corte es la encontrada por Imai y Yoshimura (1970).

$$V_S = 89,8 N^{0,341} \quad (\text{Ec. 3})$$

Bajo el contexto del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, Morales (2006) realizó mediciones con refracción sísmica en los municipios Baruta y Libertador, complementando la información suministrada por Kantak (2001) y Weston (1969), permitiéndole elaborar mapas de velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad, V_{s30} , y de conversión $N(SPT) - V_{s30}$ utilizando datos geotécnicos de la base de datos JICA (2001), con el fin de aportar información sobre la clasificación de los suelos del valle de Caracas según la norma para edificaciones sismorresistentes COVENIN 1756 (2001). A tal efecto, determinó un valor promedio de V_{s30} de 440 en sedimentos (suelos muy duros o muy densos) y 510 m/s en roca dura. La figura 2 muestra los modelos 1D realizados por el mismo autor para los sectores Los Chorros (Colegio Don Simón donde se realizó la adquisición del “*Downhole*” objeto de este trabajo) y La Carlota (Parque del Este), respectivamente.

Tabla 1. Velocidades* sísmicas obtenidas mediante refracción sísmica en el Valle de Caracas
Kantak, Schmitz y Audemard (2005) en comparación con Weston (1969).

Peter Kantak, 2001					Weston Geophysical Engineers International INC., 1969			
Location	Depth (m)	V _p (ms)	V _s (ms)	Geology	Depth (m)	V _p (ms)	V _s (ms)	Geology
Country Club	0	410 - 700	250 - 400	proximal fan region (gravel dominated); massive matrix supported gravel, massive gravel and boulders, sand	0	400 - 900	240 - 290	loose soils, soils
	0,80 - 1,20	630 - 740	440 - 510				---	
	3,00 - 7,00	920 - 960	560 - 570				---	
	11,00 - 16,00	1860	---	water table, saturated sediments	15 - 20	1500	---	soils saturated
	---	---	---	---	40 - 50	1700 - 1850	---	soils, compacted valley fill
Parque del Este	0	360 - 410	240 - 250	distal fan region (sand dominated); sand, and sands with lower portion of gravel and fragments, subordinated silt and clay	0	400 - 500	---	loose soils
	3,30 - 4,50	680	375 - 390					
	9,70 - 12,40	1750 - 1770	---	water table, saturated sediments	10 - 12,50	1700 - 1850	---	soils, compacted valley fill
	---	---	---	---	130	4000	---	gneiss or massive schist
La Carlota	0	410 - 450	(240 - 265)	distal fan region (sand dominated); massive matrix supported gravel, massive gravel and boulders, sand	0	400 - 900	---	loose soils, soils
	3,00 - 4,50	795	(468)					
	18,50 - 18,60	1750	---	water table, saturated sediments	20 - 32,50	1700 - 1850	---	soils, compacted valley fill
	---	---	---	---	120	4000	---	gneiss or massive schist
El Marqués	0	470	(276)	landfill	---	---	---	---
	0 - 4,70	580 - 630	(340 - 365)	talus and conical deposits, (gravel and fragments in sandy matrix)	---	---	---	---
	11,80 - 16,30	2200	(1294)	metamorphic rock	---	---	---	---
Los Caobos	0	500 - 610	(294 - 359)	distal fan region (sand dominated); interbedded with floodplain deposits: sand, and sands with lower portion of gravel and fragments, silts and clays	---	---	---	---
	4,40 - 5,80	1030	(606)		---	---	---	---
Parque del Oeste	0	500 - 670	(294 - 394)	residual soil	---	---	---	---
	5,90 - 7,20	2200	(1294)	metamorphic rock	---	---	---	---
El Lionito	0	720	---	residual soil	---	---	---	---
	5,00 - 10,00	2300	---	Metamorphic rocks belonging to the Las Mercedes formation	---	---	---	---
Los Palos Grandes	---	---	---	---	0	370 - 400	180 - 230	valley fill, consisting of clay, sand and boulders
	---	---	---	---	5	1300 - 1700	430	
	---	---	---	---	50	1800 - 1900	430	
	---	---	---	---	60	2000 - 2200	480	

*Velocidades de corte estimadas según velocidad de onda P ($V_p = 1,7 V_s$).

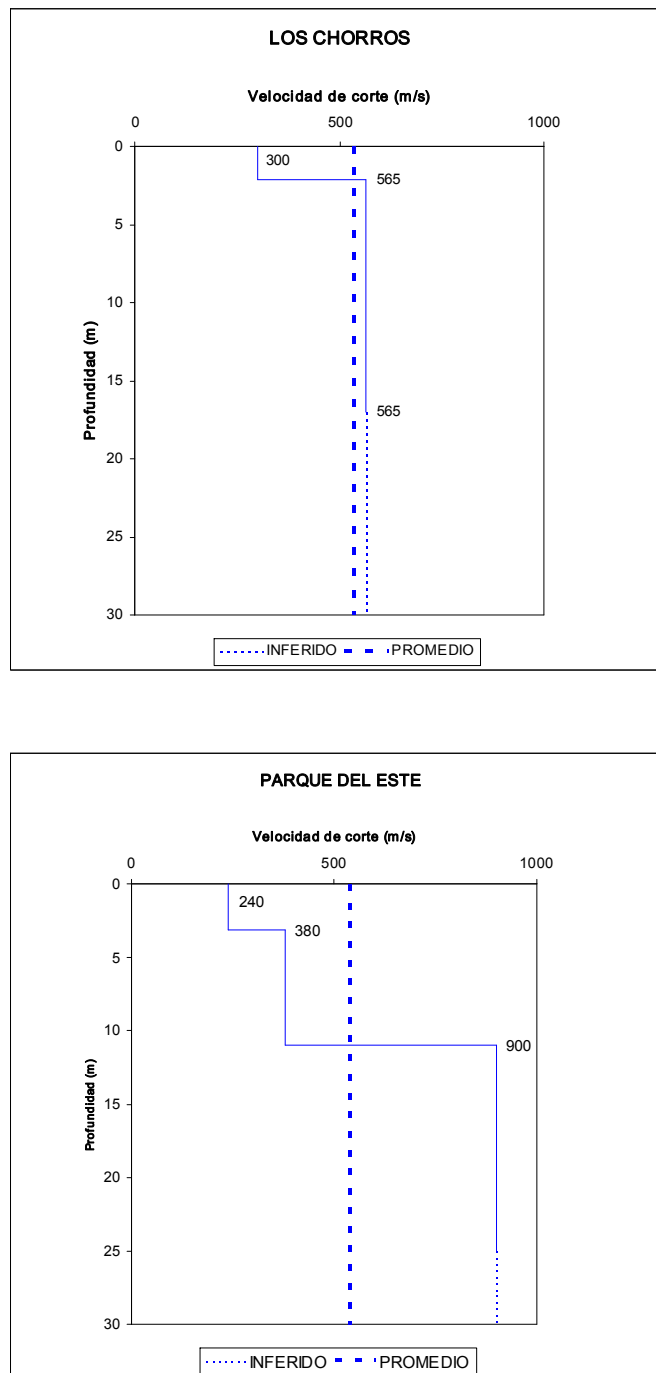


Figura 2. Modelos 1D realizados con refracción sísmica en el Valle de Caracas (Morales, 2006).

Arriba: Los Chorros. Abajo: La Carlota.

CAPÍTULO II.

GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE CARACAS.

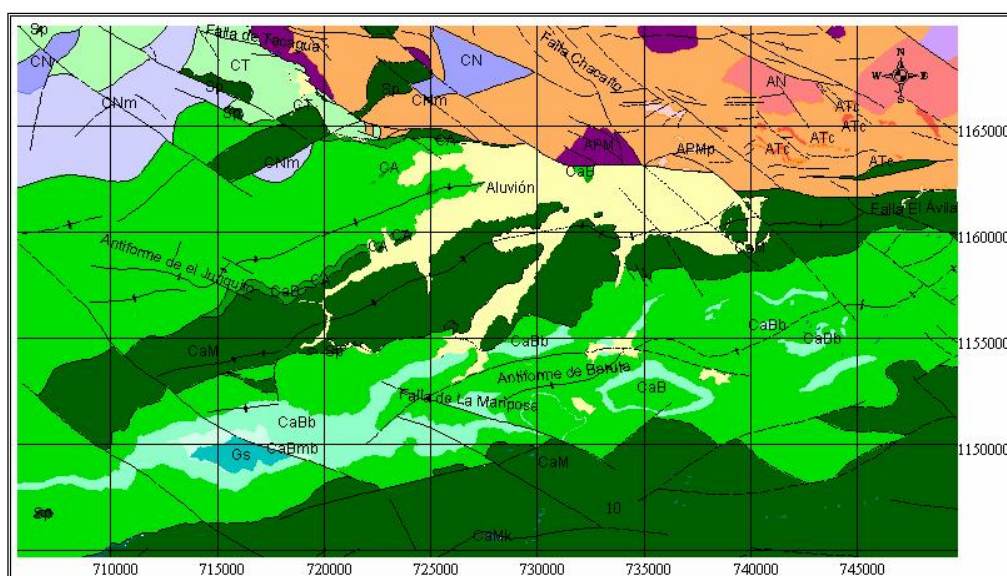
Dengo (1951) enfocó sus estudios en las rocas que conforman la Cordillera de la Costa, apoyándose en los estudios previos que publicaron Aguerrevere y Zuloaga en 1938. La zona la dividió en Cordillera de la Costa (hacia el Norte) y la Serranía del Interior (hacia el Sur), delimitadas en conjunto por el Mar Caribe y Los Llanos, extendiéndose ambas desde el Golfo de Barcelona en el este hasta cerca de Barquisimeto al oeste. Topográficamente, la Cordillera de la Costa está dividida por el Macizo Ávila (al norte), el valle de Caracas (en el centro) y los montes hacia el sur y oeste de Caracas.

El Macizo Ávila cuyas rocas pertenecen a la Asociación Metamórfica Ávila (Urbani, 2005) se caracteriza por escarpados de una zona de fallas que se extiende de este a oeste, con ríos que descienden hacia el centro cortando valles profundos en forma de V como las quebradas Anauco y Chacaíto (Dengo, 1951). Esta situación ha originado que gran cantidad de sedimentos, provenientes del macizo, se hayan trasladado durante reciente tiempo geológico al pie de la falda, dando lugar a los depósitos coluviales y aluviales del valle de Caracas.

Por su parte, el valle de Caracas se originó a raíz del sistema de fallas que se encuentra a lo largo de la falda sur de la misma sierra (figura 4). Es un valle largo y angosto, atravesado de oeste a este por el río Güaire; se cree que originalmente éste debió correr más hacia el norte y paralelo a la zona de fallas (Singer, 1977).

A los fines de este trabajo, es de especial interés la constitución de los sedimentos de las zonas de estudio, muy bien estudiados por Singer (1977), y parte de las características del basamento rocoso de tales sedimentos, razón por la que no se hace referencia a los montes del sur y oeste de Caracas en este trabajo. Adicionalmente, interesa la constitución mineralógica de tales

materiales con el objeto de correlacionarlos con los resultados obtenidos de las pruebas geotécnicas y geofísicas.



Leyenda:

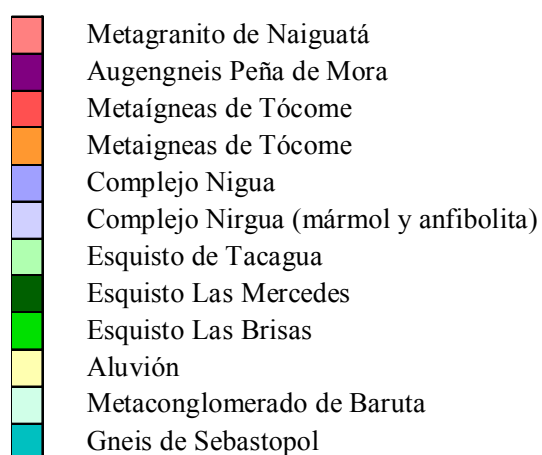


Figura 3. Mapa geológico y de fallas de Caracas (Urbani y Rodríguez, 2004).

El Basamento Rocoso.

Los sitios explorados para este trabajo se encuentran ubicados hacia el este del valle de Caracas. El basamento al que se hace referencia corresponde con los Esquitos de Las Mercedes (figura 4). Estas rocas forman parte de la Asociación Metasedimentaria Caracas, y descansan sobre los Esquistos de Las Brisas perteneciente a la misma asociación (Urbani, 2005).

El Esquisto Las Mercedes es calcáreo, posee entre un 25 a 50 % de calcita recrystalizada, cuarzo, moscovita, clorita y grafito, este último abunda más en su parte superior, con frecuencia tiene pirita. La roca es de granulometría fina y su color fresco es gris rosado. Al meteorizarse adquiere un color rojo oscuro. El esquito presenta capas delgadas de caliza negra de grano fino. Adicionalmente, tiene gran cantidad de vetas de cuarzo concordantes con su foliación (Dengo, 1951).

Por su parte, el Esquisto de Las Brisas es principalmente micáceo y con cuarzo.

Otras rocas pertenecientes a la Asociación Metasedimentaria Caracas son los Esquistos de Chuspita, sobre los cuales descansa las mencionadas anteriormente y que aquí no se destacan por no aflorar en Caracas.

El Valle de Caracas.

Las unidades litodémicas cuaternarias del Valle de Caracas, presentan una geometría asociada a las condiciones morfoclimáticas y a los procesos tectónicos contemporáneos y posteriores a su depositación (Singer, 1977).

Este valle se caracteriza por ser un semigraben, limitado al norte por la falla del Ávila tal como se visualiza en la figura No. 4. En la zona oriental se encuentran los mayores espesores de la cuenca, evidenciado por estudios geofísicos realizados con anterioridad (Weston, 1967; Moncada, 2005) y confirmado en dos de las perforaciones realizadas en el proyecto objeto de este

estudio: 210 metros hasta el tope de roca en Los Chorros (GISCA, 2005) y 129 metros en La Carlota (GISCA, 2006). La tercera perforación en Sebucán alcanzó los 281 m sin llegar al tope de la roca.

Desde tiempos pasados, el valle ha estado sometido a aludes torrenciales como el ocurrido en el estado Vargas en el año 1999, originando la movilización y superposición de materiales aluvionales de forma caótica; así como a otros procesos de origen coluvial.

En lo que respecta a la depositación de las formaciones holocenas, las terrazas que dominan las vegas subactuales del río Guaire presentan varios metros de limos arenosos de desborde y/o capas de lodo que descansan sobre un paleo-suelo del cuaternario superior (Singer, 1977). Estos depósitos están asociados a meandros recortados que indican sobre aluvionamiento “anormal” originados por inundaciones de gran magnitud producidas por el represamiento del río Guaire y de sus afluentes (Petare, Bello Monte, Plaza Venezuela, Puente Hierro, Quebrada Chapellín, Country Club y Monte Cristo). Las perforaciones geotécnicas realizadas muestran las acumulaciones caóticas de escombros rocosos del Pedregal, Altamira, Los Palos Grandes, Sebucán y Los Chorros.

Las zonas apicales y proximales de los abanicos aluviales están constituidas por sabanas de escombros de granulometría muy grosera con bloques de hasta varios metros cúbicos, arrastrados por flujos de consistencia viscosa capaces de acarrearlos.

La tabla 2 resume el tipo de sedimento mayoritariamente encontrado en Caracas resumido por Kantak (2001) en base a los estudios realizados por Singer (1977).

Tabla 2. Características de los sedimentos encontrados en el valle de Caracas (extraído de Kantak, 2001).

Tipo de sedimento	Espesor	Litología
Depósitos artificiales	Variable (< 5m)	Rellenos
Depósitos de abanico aluvial	(1-5 m)	Se distinguen dos facies (Singer, 1977): <i>Proximal:</i> canales llenos de arenas arcillosas con porciones de fragmentos grandes, gravas, guijarros y cantos rodados en una matriz arenosa. Forma lenticular e irregular, frecuentemente, apilados vertical y lateralmente. Los canales más jóvenes cortan los más viejos. Son muy raras las arcillas y limos. Las gravas son muy raras por la susceptibilidad del esquisto a la humedad, más bien se consiguen fragmentos de cuarzo. El grado de meteorización en el esquisto disminuye con el aumento de la profundidad. <i>Distal:</i> Granulación más fina dominada por arenas limosas, con pocas porciones de fragmentos; guijarros y cantos rodados; gravas menos frecuentes. Son frecuentes los limos y arcillas en pocas cantidades. Capas delgadas y casi horizontales menores a un metro de espesor.

El mapa de espesores (Fig. 4) elaborado con los datos de perforaciones para la localización de acuíferos y mediciones sísmicas realizadas en años

anteriores, muestra claramente la distribución de espesores de los materiales aluvionales y coluviales del Valle de Caracas.

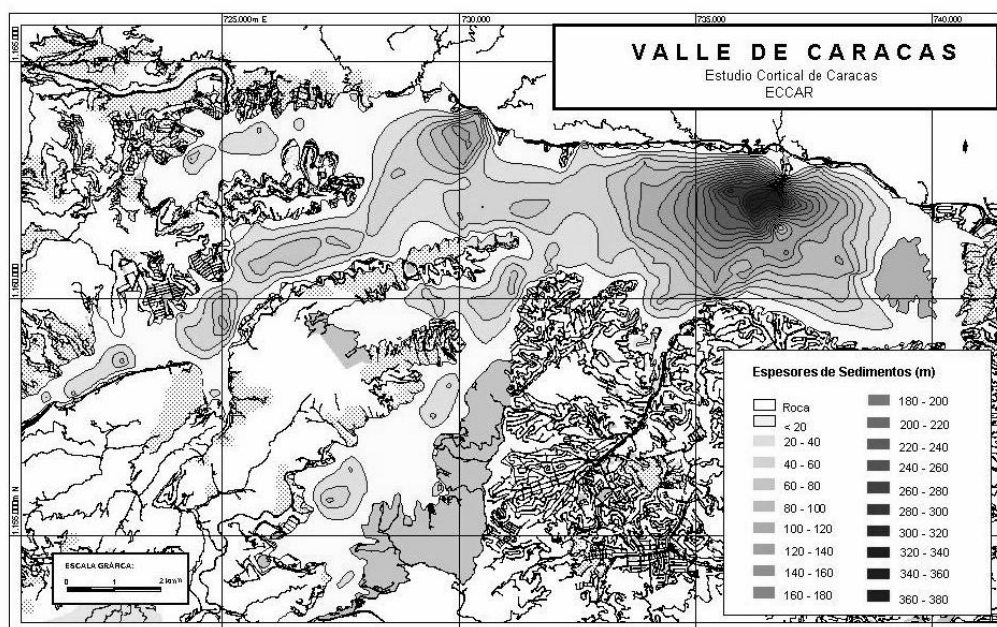


Figura 4. Mapa de espesor de sedimentos del Distrito Metropolitano (Kantak et al, 2005).

CAPÍTULO III. SÍSMICA DE POZOS

La sísmica de pozos abarca los métodos de prospección geofísica que implican la toma de mediciones en el interior de pozos (entubados o no) con el propósito de hacer investigaciones con fines geológicos o geotécnicos, para el estudio de yacimientos petrolíferos; sismológicos y sobre investigaciones geotécnicas-geológicas para ingeniería civil, evaluación de riesgo y diseño estructural de fundaciones, determinación de parámetros dinámicos, e inclusive, microzonificación sísmica (TRX, 2005).

Dentro de los métodos más empleados a nivel de geotecnia, que es el interés principal de este trabajo, se tienen: el *Downhole*, *Uphole*, *Crosshole* y Tomografía Sísmica.

La configuración de la adquisición del método “*Downhole*” consiste en colocar una fuente en superficie y un receptor o arreglo de receptores a distintas profundidades ubicados dentro de un pozo, con el fin de medir el tiempo que tarda una onda en viajar por el medio desde la fuente hasta el sensor.

El método “*Uphole*” es inverso al “*Downhole*”, ya que en este caso la fuente se coloca a distintas profundidades dentro del pozo, mientras que el geófono o arreglo de geófonos está en superficie.

La metodología “*Crosshole*” requiere como mínimo dos pozos, uno de ellos contiene la fuente de emisión de energía a una profundidad determinada, en tanto que en el otro pozo, o en los restantes, se coloca un receptor a la misma profundidad que la fuente. Cada registro grabado corresponde a una nivel de medición. De este modo, el conjunto fuente-receptor avanza hacia el fondo de los pozos.

La Tomografía Sísmica proporciona resultados de mayor cobertura que el “*Crosshole*”, debido a que en un pozo se coloca la fuente de energía, mientras que en otro se recibe la señal simultáneamente en receptores ubicados a distintas profundidades. Luego, se cambia la profundidad de la fuente y

nuevamente se graban las señales en el arreglo de receptores, así hasta llegar al último nivel de muestreo.

La información detallada acerca de los métodos sísmicos empleados en este trabajo se mostrará más adelante, dejando de lado los restantes.

Principios y Conceptos Básicos en Sísmica de Pozos.

Al igual que otros métodos sísmicos, en sísmica de pozos la energía se propaga en forma de un tren de ondas elásticas que viajan a través de un medio. Estas ondas producen una perturbación del medio originando que las partículas se muevan en una dirección preferencial. Cuando las partículas se mueven en la misma dirección que el tren de ondas se dice que la onda es compresiva o primaria, también llamada onda P. Si las partículas se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, la onda es de cizalla o secundaria, denominada generalmente onda S. Los términos “*primaria*” y “*secundaria*” están asociados al tiempo de llegada de cada onda; como las P son más rápidas, son las primeras en llegar a los sensores.

En el medio, las ondas pueden viajar de forma directa hasta llegar al receptor; o pueden reflejarse al encontrar una interfase o capa cuya impedancia sea mayor que la del medio de donde proviene la onda; o pueden transmitirse y atravesar una interfase y refractarse.

Cuando se emplea el método “*Crosshole*”, se espera que las ondas sean directas, es decir, que partan de la fuente en línea recta hasta llegar al receptor. En este caso la velocidad de la onda, se calcula sencillamente dividiendo la longitud de la separación entre pozos (para cada profundidad) por el tiempo que tarda la onda en el intervalo de recorrido. Esto siempre bajo el supuesto que las capas son horizontales y el medio es homogéneo. Bajo esta concepción se obtiene una velocidad interválica. Dado el caso que exista refracción, el tratamiento de los resultados se debe hacer según la ley de Snell.

Para recordar, cuando la onda se refracta críticamente el rayo incidente viaja paralelo a la interfase con un ángulo crítico de 90° por lo que la ecuación de Snell queda simplificada a:

$$\text{Sen}(\alpha_i) = \frac{V_i}{V_j} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

α_i : ángulo de incidencia.

V_i : velocidad de la capa sobre la interfase.

V_j : velocidad de la capa bajo la interfase.

Más complejo aun es el tratamiento del método *Downhole*, ya que las ondas viajan desde la superficie, en donde está la fuente, hasta el geófono de pozo atravesando posiblemente el medio de forma directa, transmitida o, simplemente, se refleja en una interfase antes de llegar al sensor.

Cálculo de las Constantes Elásticas del Medio.

A partir de las secciones sísmicas que relacionan tiempo de viaje de la onda en función de la profundidad, se obtienen las velocidades de ondas primarias (V_p) y secundarias (V_s) del subsuelo, en cada intervalo de profundidad, y directamente la Relación de Poisson (Ec. 5). Si además se conoce la densidad del material (ρ), es posible calcular el Módulo de Corte (G), Módulo de Young (E) y Módulo Bulk (K), como constantes elásticas del medio. Estos parámetros relacionan un esfuerzo aplicado sobre el medio material con la magnitud de la deformación que se produce, y son de suma importancia porque proporcionan información concerniente a la rigidez de los suelos permitiendo predecir su comportamiento mecánico; además, se aplican directamente en diseño de estructuras de ingeniería, mediante modelos de predicción matemática que permiten conocer el comportamiento de éstas al ser construidas sobre estratos rocosos o suelos.

El ejemplo tipo con el que se puede ilustrar la relación de Poisson (ν) es sobre una barra que se somete a un esfuerzo longitudinal; originándose un cambio en el diámetro y la longitud de la barra. La relación que existe entre ambas deformaciones es lo que se denomina *Relación de Poisson*. A partir de las velocidades de ondas sísmicas, este módulo se obtiene con la ecuación 5. La razón de Poisson presenta los siguientes valores típicos para propagación de ondas en baja tensión (Calderón, 2000): suelos entre 0,3 – 0,48, rocas entre 0,05 – 0,3.

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Cuando se toma en cuenta la deformación longitudinal de la barra con respecto a su longitud inicial se tiene la *deformación unitaria longitudinal*. El módulo de Young (E) se define como la relación entre el esfuerzo aplicado y esta deformación unitaria; en términos del módulo de Poisson, éste se puede determinar con la ecuación 6.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (\text{Ec. 6})$$

El parámetro G en la ecuación anterior representa el Módulo de Corte también conocido como Módulo de Rigidez, se refiere a la resistencia de un cuerpo ante un esfuerzo de cizalla. Este parámetro es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de la onda de corte y a la densidad del material.

$$G = \rho V_s^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

El Módulo Bulk o Módulo de Volumen (K) es la medida de la respuesta de un cuerpo ante un esfuerzo compresional, específicamente con respecto a su cambio de volumen. Para obtener este valor se utiliza la siguiente expresión:

$$K = \frac{1}{3} \frac{E}{1 - 2\nu} \quad (\text{Ec. 8})$$

Estos parámetros expresan el comportamiento dinámico de los materiales por cuanto están relacionados con las velocidades de ondas de cuerpo.

Características del Equipo empleado en Sísmica de Pozos Geotécnicos.

El receptor.

El receptor utilizado para sísmica de pozos puede ser un hidrófono o un geófono de pozo tricomponente conformado internamente por un geófono vertical y dos geófonos horizontales ortogonales entre sí (longitudinal y transversal). El equipo posee un mecanismo o brazo resorte que permite que se acople fijamente en hoyos cuyo diámetro máximo sea de 6 pulgadas. Posee también un servo orientador para dirigir el geófono longitudinal con respecto a un azimut específico o norte magnético.

El geófono debe ser conectado a un cable de transferencia con siete conductores de cobre. El otro extremo del cable se conecta a la caja que controla el brazo de acople, el azimut de adquisición y la transferencia de la señal del geófono al cable de geófonos o directamente al sismógrafo. La figura 5 muestra el geófono de pozo utilizado para este estudio.

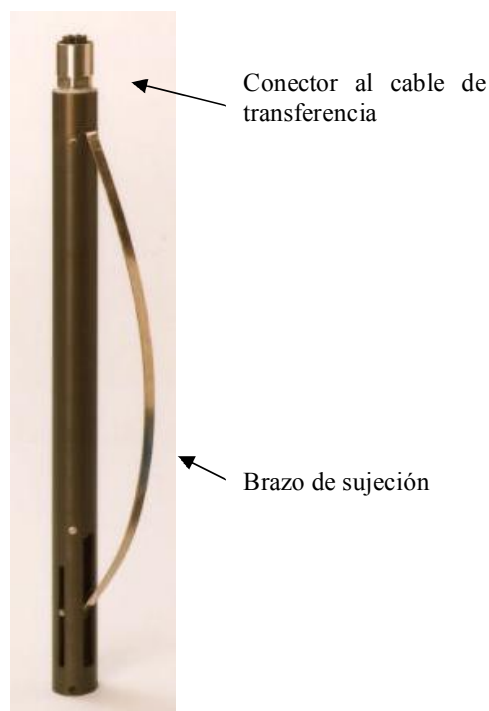


Figura 5. Geófono de pozo modelo BHG-3, marca Geostuff con brazo de sujeción.

La fuente.

Las fuentes empleadas comúnmente son las que se muestran según la siguiente tabla:

Tabla 3. Parámetros de fuentes sísmicas usadas en adquisición (Alvarello, 1999).

Tipo de Fuente	Intervalo de Frecuencia (Hz)	Intervalo de Frecuencia (Hz) (*)
Explosivos	1-150	1-20
Mandarria	5-200	10-40
Vibrocompactadora	50-100	65

(*) Con amplitudes mayores a 20 % de la máxima.

CAPÍTULO IV. ADQUISICIÓN SÍSMICA DE POZOS CON LA TÉCNICA *DOWNHOLE*.

El método *Downhole* es utilizado para determinar la velocidad de ondas compresivas y de corte a distintas profundidades, con el fin de valorar la respuesta sísmica y geológica de un sitio en particular, con un nivel de resolución que no proporcionan otros métodos como por ejemplo el de refracción sísmica. Es de gran utilidad sobre todo en suelos aluvionales.

En este tipo de levantamiento sísmico, la fuente es colocada en superficie a una distancia entre 0.6 a 1.5 metros del tope de un pozo para evitar los efectos de las ondas de tubo en las mediciones que se propagan en el interior del pozo a la velocidad del fluido que contienen.

Dentro del pozo se fija un receptor o arreglo de receptores en línea separados a un intervalo predefinido que puede ser calculado con la ecuación 6 para evitar los efectos de *aliasing*.

$$z \leq \frac{V}{2 f_{\max}} \quad (\text{Ec. 9})$$

donde:

- z: intervalo de muestreo.
- V: velocidad estimada de la capa.
- $f_{\max}$: frecuencia máxima de la señal.

La figura 6 esquematiza la configuración de un levantamiento aplicando esta técnica.

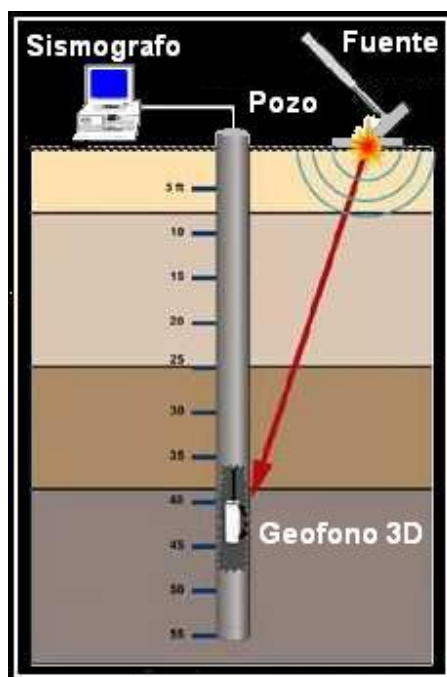


Figura 6. Esquema de la geometría del método Downhole (TRX, 2005).

Las ondas compresivas se generan golpeando con una mandarina una placa metálica colocada sobre la superficie. Las ondas de cizalla se originan golpeando, con el mismo objeto, los extremos de una viga de madera o estructura metálica lo suficientemente pesada para poder transmitir las ondas al suelo. El hecho de golpear la viga por ambos extremos origina sendas señales polarizadas que permiten visualizar mejor la llegada de la onda S en un registro sísmico; minimizando así la interferencia de la onda P sobre la onda S por ser la primera en llegar al receptor. El hecho de golpear la viga a lo largo de su eje mayor, produce que la componente de corte de la onda generada sea superior a la generada con la placa y, en consecuencia, su amplitud superior a la de la onda P. Las ondas de tubo producidas durante las mediciones, también interfieren en la interpretación de la llegada de las ondas de corte.

Calidad de los Datos.

Existen varios factores que mejoran los registros del levantamiento *Downhole* (NGA, 2005), a saber:

- Preparación apropiada del hoyo para asegurar buen acople entre el geófono y el suelo circundante o formación.
- Reconocimiento y mejora del tiempo de arribo de las ondas primarias y de corte, así como la supresión de ondas de tubo.
- Coordinación lógica de la llegada de las ondas.
- Selección adecuada de profundidad de muestreo para resolver las transiciones de interés.

Metodología para la Adquisición en la Ciudad de Caracas.

Una vez realizada la recopilación bibliográfica acerca de la geología de los sitios de estudio, se realizó la adquisición en los pozos entubados ubicados en el Colegio Don Simón, sector Los Chorros; Sede de INPARQUES en La Carlota y Escuela de Enfermería de la Universidad Central de Venezuela en Sebuacán.

Tabla 4. Ubicación geográfica de los pozos para la adquisición *Downhole* del estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Caracas.

Localidad	Coordenadas UTM Huso 19 PS1D56		Profundidad de muestreo (m)
INPARQUES P-2S	736.871	1.160.362	30
INPARQUES P-2	736.877	1.160.444	30
Escuela de Enfermería U.C.V.- Sebuacán P-4	736.618	1.161.821	30
Colegio Don Simón-Los Chorros P-6	737.857	1.162.505	28

El instrumental utilizado consistió de (figura 8):

- (a) Geófono tricomponente de pozo modelo BHG-3 (10 – 14 Hz).

- (b) Cable de transmisión compuesto de siete conductores de cobre (dos para cada componente y uno para manejo del servo compás)
- (c) Caja de control para manejar el brazo de sujeción, orientar los geófonos horizontales y permitir la transferencia de señales.
- (d) Sismógrafo GEOMETRICS SMARTSEIS de 24 canales.
- (e) Cable de transmisión para geófonos superficiales.
- (f) Geófonos de componente vertical de 28 Hz para control en superficie y control de “*trigger*”.
- (g) Mandarria de 10 Kg.
- (h) Placa de acero para generar ondas P y estructura metálica para generar ondas S.
- (i) Cable triaxial de tiempo cero (“*trigger*”).
- (j) Baterías de 600A para alimentar la caja de control y el sismógrafo.



Figura 7. Equipo de adquisición sísmica de pozos en el sector Los Chorros. Al pie de la foto: el instrumental. A la derecha: la fuente. Al fondo: Equipo de perforación de pozos.

Las mediciones se llevaron a cabo considerando un intervalo de muestreo de un metro (1 m) y la separación superficial entre la fuente y la boca

del hoyo entubado entre 3 y 3,5 metros para evitar el efecto de las ondas de tubo.

Para generar la onda S, la estructura metálica se colocó a un lado de la placa de acero con su eje más largo perpendicular al norte magnético, con la finalidad de favorecer la señal según la orientación de los geófonos horizontales, y mantener el mismo sistema de referencia en los tres sitios explorados.

El geófono de control se colocó a 50 cm de la cabecera de los pozos. El geófono de pozo se fijó al forro del hoyo y se orientó respecto al norte magnético en cada nivel de muestreo mediante la caja controladora.

Las señales se grabaron en tres archivos diferentes por cada nivel sin considerar ningún tipo de filtro. La frecuencia de muestro fue 250 milisegundos. Se suministraron entre 10 y 15 golpes sobre la placa de acero para apilar las señales de onda compresivas y entre 15 a 20 golpes por la derecha y 15 a 20 golpes por la izquierda de la estructura metálica para generar ondas transversales polarizables entre sí. Al finalizar esta secuencia de registros, se liberó el brazo de sujeción y se bajó el receptor al siguiente nivel, repitiéndose el mismo procedimiento hasta terminar con la longitud total del pozo.

En total se obtuvieron y procesaron seis secciones por cada sitio investigado; una de onda P componente vertical, dos de onda S (componente longitudinal y transversal) y tres secciones de control de “*trigger*” tanto para onda P como para onda S (por cada *shot*), respectivamente.

Procesamiento de los Datos Sísmicos.

En primer lugar, los archivos originados en la adquisición se importaron al formato SEG2 a través de la aplicación ReflexW versión 2.0. El tratamiento de las señales se desarrolló con este programa a pesar de no contarse con el módulo para sísmica de pozo. En vez de ello, las secciones fueron tratadas como si los datos provinieran de una refracción sísmica. Para ello, fue necesario como primer paso establecer la geometría de la adquisición por nivel de profundidad mediante un archivo ASCII. El procedimiento para generar cada sección como la mostrada en la figura 8, consistió en:

1. C:\Archivos de programa\REFLEX\SEBUCAN\PROCADATA\Secciones apiladas originales\DHPSEBUC.02T / traces: 26 / samples: 1233

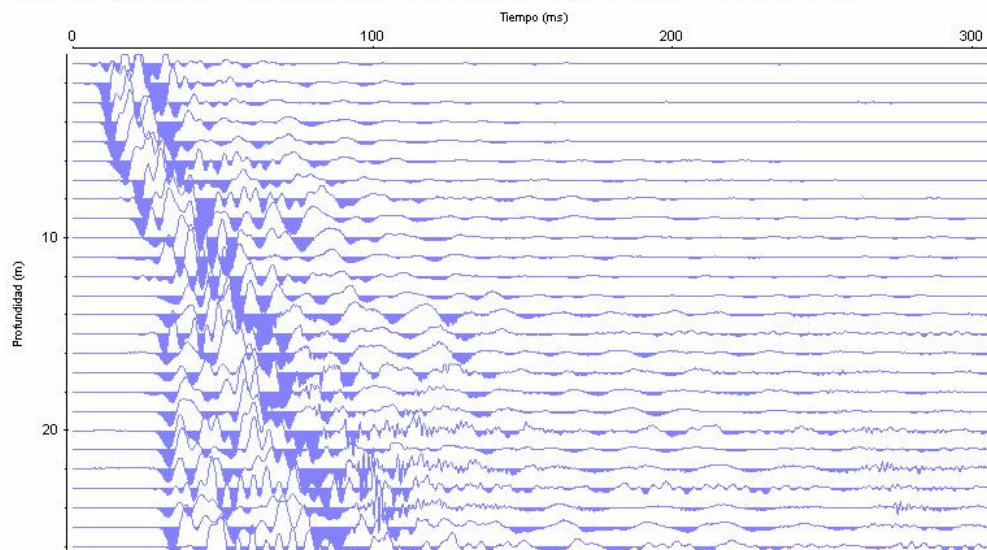


Figura 8. Sección original de onda P componente vertical sin corrección estática y sin filtros.
Técnica “*Downhole*”.

- (a) Agrupar de forma ordenada los archivos importados en una sola sección, por tipo de “shot” (placa o estructura metálica), correspondiente a la adquisición de un pozo; es decir, una de onda P y dos de onda S. Cada una de estas secciones tiene la información de los cuatro primeros canales del sismógrafo por cada disparo, de las señales

correspondientes a onda P, onda S norte - sur (S_{NS}), onda S este – oeste (S_{EW}) y onda directa recibida en el geófono de control.

- (b) Extraer de cada sección no procesada las trazas respectivas, según la explicación anterior, para generar las secciones de onda P y onda S polarizable (golpe por la derecha y golpe por la izquierda), así como las señales de control (Apéndice A). Este procedimiento generó doce (12) secciones por cada sitio de estudio.

Una vez construidas las secciones se le aplicó la siguiente secuencia de procesamiento:

- (a) Aplicación de un control de ganancia en tiempo.
- (b) Revisión de la sección de control y aplicación de corrección estática por efectos de “*trigger*”.
- (c) Corrección del tiempo de inicio de grabación, ya que las señales se comenzaron a grabar con un retraso de 10 ms (a excepción de las del pozo de Los Chorros).
- (d) Aplicación de filtros pasabanda con frecuencias de corte promedio iguales a 10, 20, 60, 100 Hz.

La figura 9 representa la sección anterior ya procesada. Ambas pertenecientes al pozo ubicado en la Escuela de Enfermería de la Universidad Central de Venezuela en la urbanización Sebucán.

1. C:\Archivos de programa\REFLEX\SEBUCAN\PROCDATA\secciones static definitivas\DHPSEBUC.07T / traces: 26 / samples: 1237

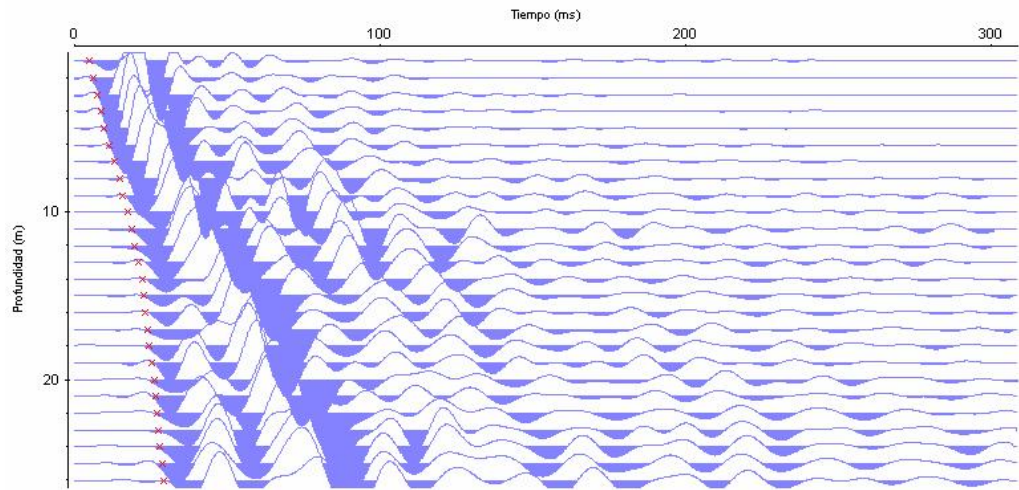


Figura 9. Sección final de onda P componente vertical. Método “*Downhole*”.

Para determinar la primera llegada de las ondas S, se aplicó el procedimiento de polarización de las señales, tal como se ilustra en la figura 10.

1. C:\Archivos de programa\REFLEX\DONSIMON\PROCDATA\secciones static definitivas\DHSLRQJ0.01T / traces: 28 / samples: 1201

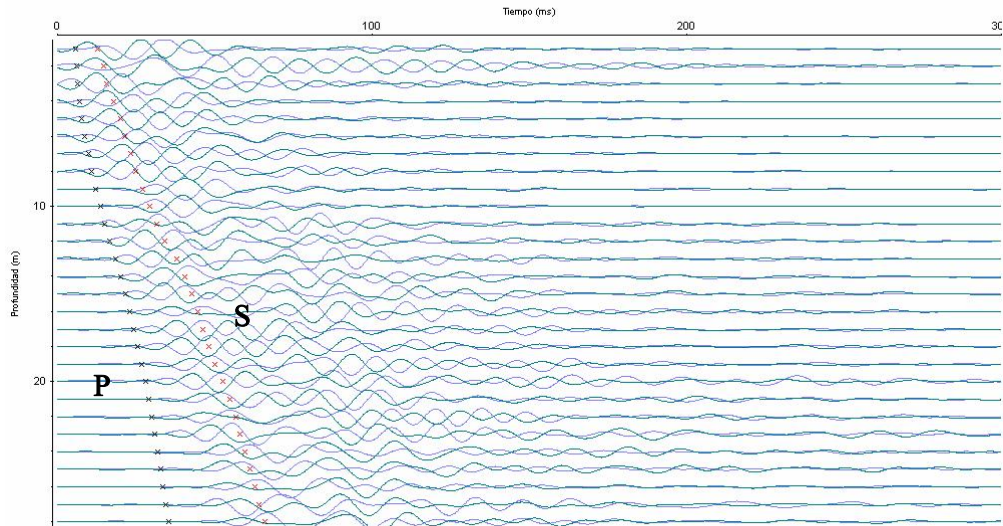


Figura 10. Sección final polarizada de onda S_{NS} según “*Downhole*”.

Con las velocidades de ondas directas se calcularon las velocidades interválicas (Ec. 10), según cada tipo de onda y las constantes elásticas, así como la relación V_S - V_P al cuadrado (γ).

La ecuación de Dix (Sheriff, 1991) permite hallar la velocidad interválica (V_{int}), en cada nivel de muestreo, con la expresión:

$$V_{int} = \sqrt{\frac{V_B^2 t_B - V_A^2 t_A}{t_B - t_A}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

V_B : Velocidad de un rayo recto que viaja desde el punto donde está la fuente hasta el nivel de muestreo.

t_B : tiempo que tarda la onda en llegar a ese nivel.

V_A : Velocidad de un rayo recto que viaja desde el punto donde está la fuente hasta al nivel anterior al que se está muestreando.

t_A : tiempo que tarda la onda en llegar al nivel anterior al muestreado.

Una vez obtenidas las velocidades interválicas, se elaboraron los modelos unidimensionales (1D) o perfiles del pozo en Grafer 2.0.

Con estos perfiles, se definieron los estratos sísmicamente distinguibles, y se determinó la velocidad promedio de onda de corte (Ec. 11) en cada pozo según las especificaciones del capítulo 5 de la norma COVENIN 1756-2001 (Apéndice B) para, posteriormente, establecer el tipo de suelo, espectro de aceleración y el coeficiente de aceleración horizontal asociados para el diseño sismorresistente de edificaciones.

$$V_{sp} = \frac{H}{\sum_{i=1} t_i} \quad (\text{Ec. 11}).$$

Donde:

H: es la profundidad del estrato (o capa) a partir de la cual la velocidad de las ondas de corte es superior a los 500 m/s (una vez que se han definido estratos con el modelo 1D). El espesor del estrato debe ser superior a $\frac{1}{4}$ del valor de H para ser considerado en el cálculo de la V_{sp} .

t_i : es el tiempo de viaje de la onda en la capa número i , calculado como la relación entre el espesor de la capa y la velocidad promedio de las ondas de corte en la capa.

Adicionalmente, se calculó la velocidad de propagación de onda de corte en los primeros 30 m de profundidad, o V_{s30} , haciendo uso también de la ecuación 11, con la diferencia que para calcular este parámetro se estima que H es igual a 30 m y se consideran todas las capas por encima de este nivel.

Resultados y Discusión de Resultados.

En este aparte, se incluyen las secciones sísmicas procesadas y los perfiles de los pozos de las zonas de estudio mostrados según la ubicación geográfica, de norte a sur.

En general, se utilizaron las observaciones en las direcciones norte-sur y este-oeste, para poder visualizar mejor las primeras llegadas en las secciones polarizadas. Debido a la poca desviación entre las mediciones, atribuible a un nivel bajo de anisotropía en la adyacencia de los pozos estudiados hasta un radio de 3 a 3,5 m; las velocidades de onda de corte que aparecen en los modelo 1D representan el promedio de los resultados. No obstante, se han incluido las secciones sísmicas de onda S en ambas direcciones. El criterio para la selección de los tiempos de llegada ha sido mantener la misma fase, hasta la profundidad total de muestreo, del primer par de ondículas polarizadas en cada sección.

Para definir las capas litológicas presentes a lo largo de los pozos, se consideró principalmente la variación del coeficiente gamma o $(V_s/V_p)^2$ y el módulo de Poisson.

Los Chorros.

Las secciones sísmicas procesadas del pozo P-6 se muestran en las figuras 11, 12 y 13 con sus respectivos tiempos de llegada.

1. C:\Archivos de programa\REFLEX\DONSIMON\PROCDATA\secciones static definitivas\DHOP.02T / traces: 28 / samples: 806

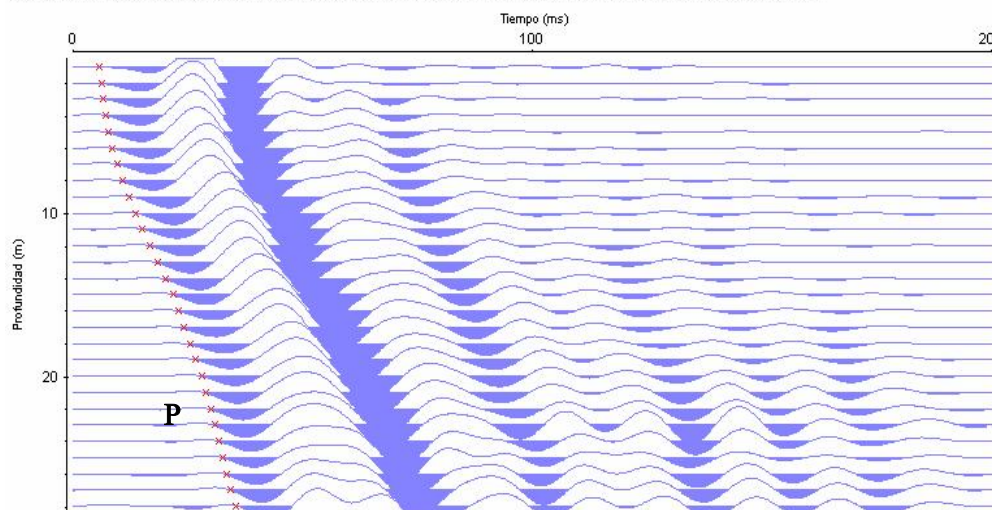


Figura 11. Sección final onda P componente vertical. Método Downhole, Los Chorros.

1. C:\Archivos de programa\REFLEX\DONSIMON\PROCDATA\DHSLR010.00T / traces: 28 / samples: 801

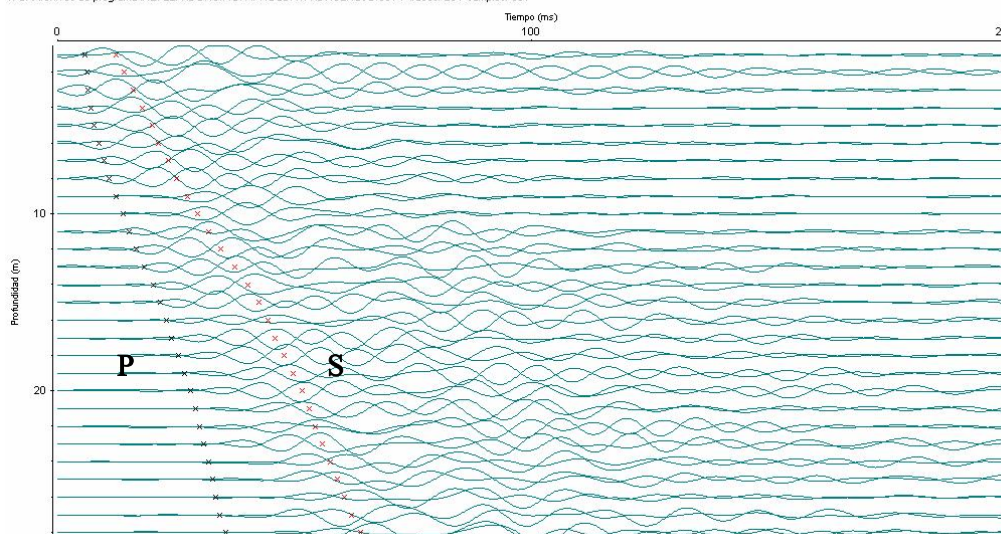


Figura 12. Sección final onda S_{NS} . Método *Downhole*, Los Chorros.

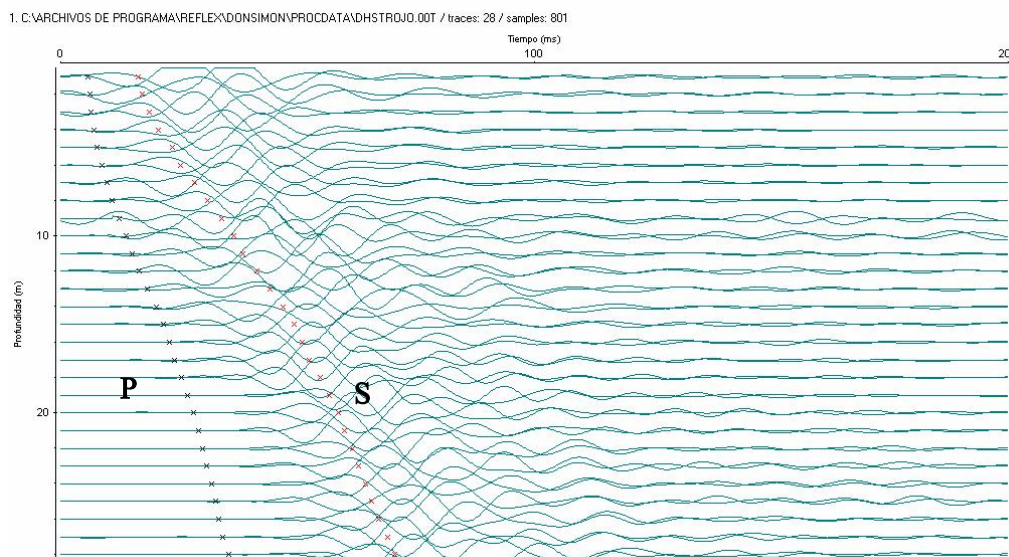


Figura 13. Sección final onda S_{EW} . Método *Downhole*, Los Chorros.

La figura 14 muestra el perfil del subsuelo en esta zona con gran variación de los parámetros físicos, asociado posiblemente al ambiente caótico de la facies proximal, descrita por Singer (1977) en el valle de Caracas, muy cercana a la Sierra del Ávila.

Al agrupar los valores del módulo de Poisson y de gamma, se distinguieron cinco capas con los siguientes valores promedios:

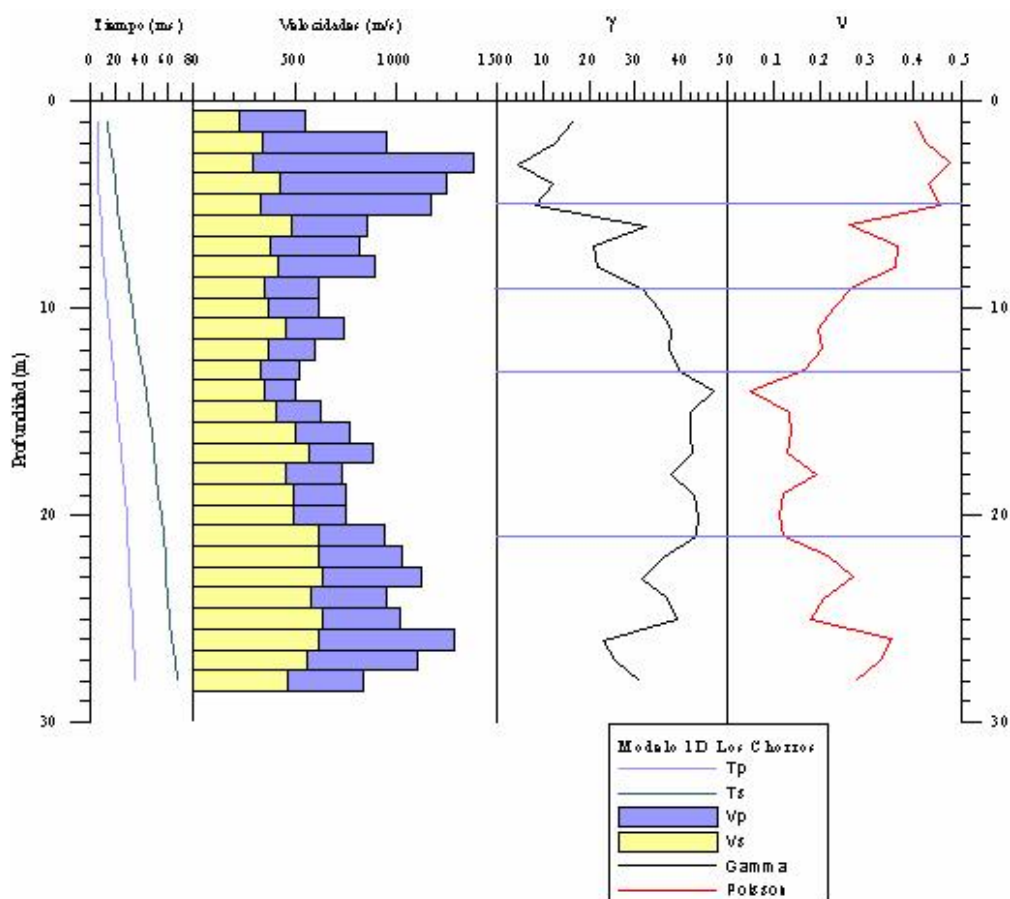
$$0 - 5 \text{ m: } \overline{Vp} = 1062 \text{ m/s; } \overline{Vs} = 324 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,45$$

$$5 - 9 \text{ m: } \overline{Vp} = 796 \text{ m/s; } \overline{Vs} = 406 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,32$$

$$9 - 13 \text{ m: } \overline{Vp} = 622 \text{ m/s; } \overline{Vs} = 381 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,20$$

$$13 - 21 \text{ m: } \overline{Vp} = 747 \text{ m/s; } \overline{Vs} = 487 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,13$$

$$21 - 28 \text{ m: } \overline{Vp} = 1052 \text{ m/s; } \overline{Vs} = 588 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,27$$



Nivel Freático: ND

Figura 14. Propiedades dinámicas usando el método *Downhole* en el pozo P-6, Los Chorros.

Las velocidades de onda P muestran que en los primeros 28 m. no se determinó (ND) el nivel freático, siendo este resultado corroborado por la perforación de los tres pozos del sitio. Por otra parte, las velocidades de onda de corte en los últimos 20 m. fue difícil obtenerlas en función de los tiempos de llegada marcados en las secciones polarizadas; sin embargo con estos resultados se garantiza que el módulo de poisson está en el rango 0 a 0,5.

Sebucán.

Las secciones sísmicas procesadas del pozo P-4 son las que se muestran en las figuras 15,16 y 17 con sus respectivos tiempos de llegada.

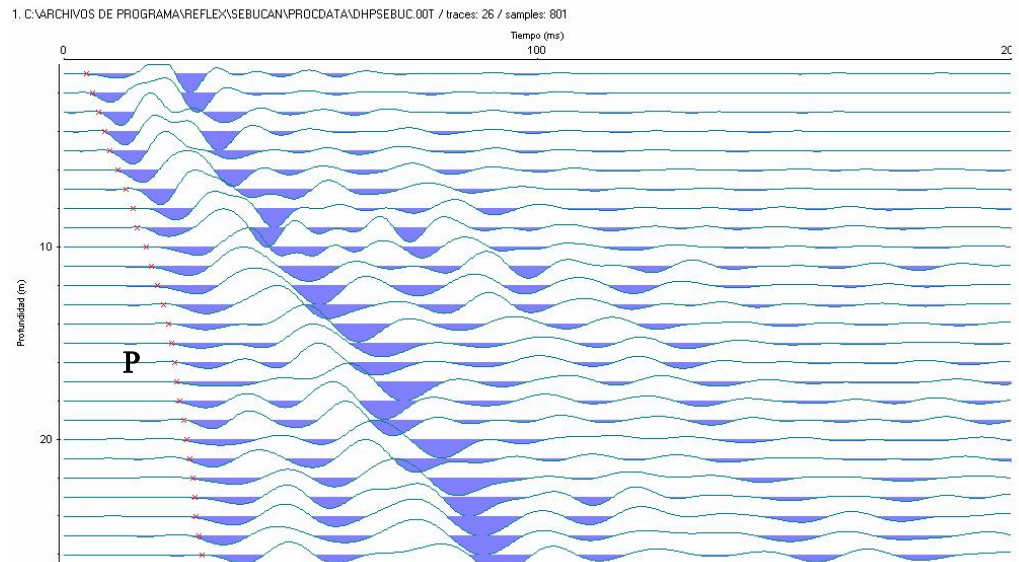


Figura 15. Sección final de onda P componente vertical. Método *Downhole*, Sebucán.

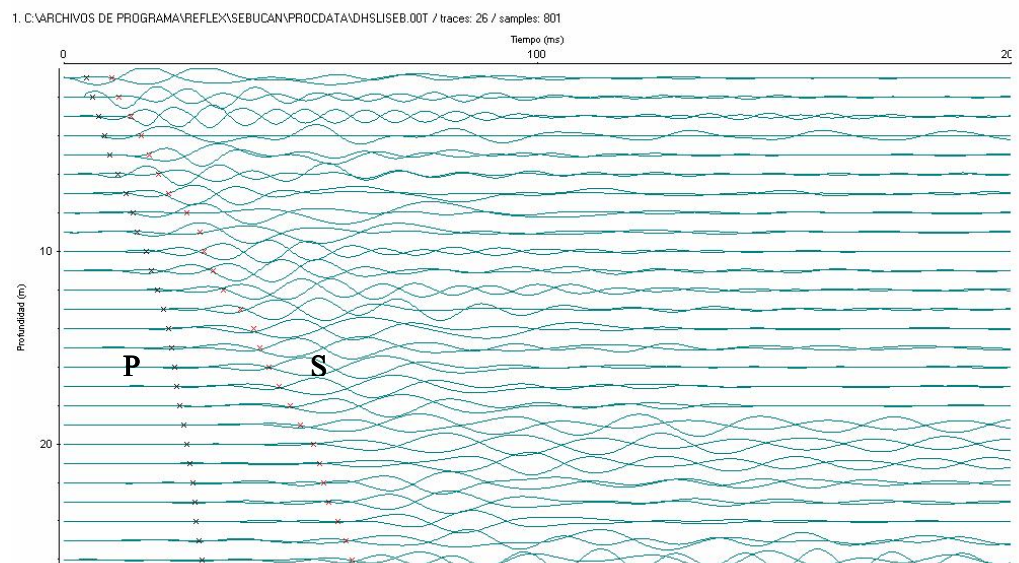


Figura 16. Sección final de onda S_{NS} . Método *Downhole*, Sebucán.

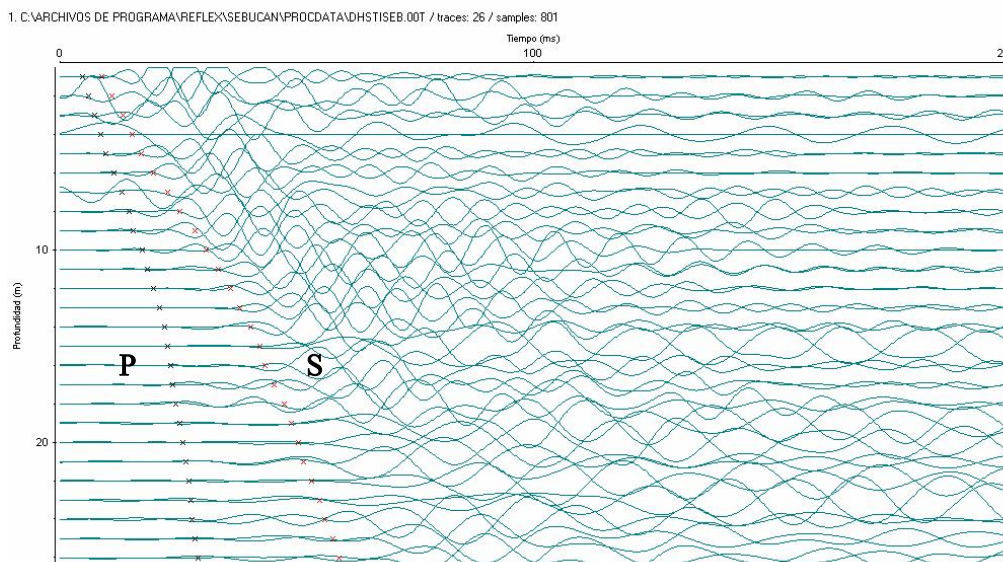


Figura 17. Sección final de onda S_{EW} . Método *Downhole*, Sebucán.

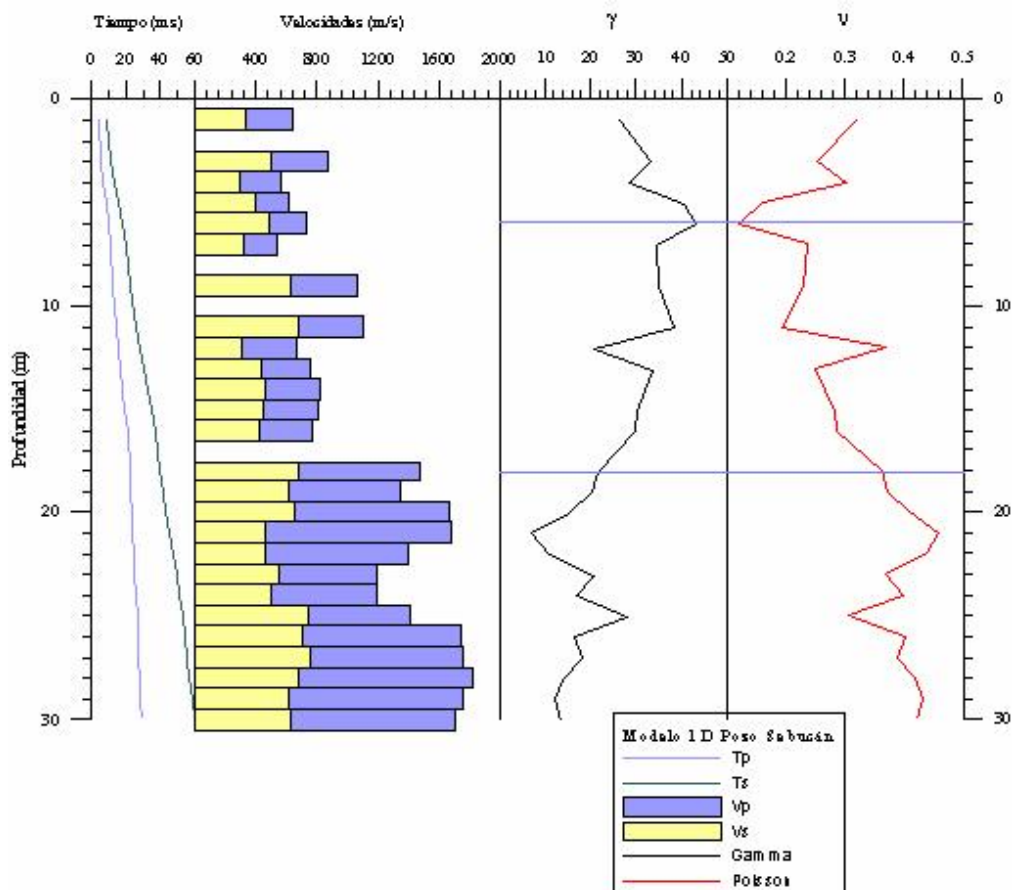
El perfil del pozo (figura 18) muestra aumento gradual de la velocidad de ondas P y gran variación del módulo de Poisson (atribuible al ambiente caótico de depositación correspondiente con la facie distal del valle). No obstante, se identificaron tres capas con las siguientes propiedades dinámicas:

$$0 - 6 \text{ m: } \overline{V_p} = 688 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 403 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,23.$$

$$6 - 16 \text{ m: } \overline{V_p} = 814 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 462 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,26.$$

$$18 - 30 \text{ m: } \overline{V_p} = 1550 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 619 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,40.$$

Las velocidades de onda P próximas a 1500 m/s no se corresponden con niveles saturados de agua, ya que en ninguno de los pozos de este sitio, se encontró nivel freático antes de los 30 m. En este caso, puede corresponderse a niveles altos de densificación.



Nivel Freático (GISCA): 32m.

Nivel Freático (*Downhole*): ND

Figura 18. Propiedades dinámicas usando el método *Downhole* en el pozo P-4, Sebacán.

La Carlota.

En la sede de la dirección de INPARQUES se realizaron dos mediciones “*Downhole*”. El Pozo 2 está ubicado cerca de la entrada a la sede, al norte del pozo P-2’. El pozo P-2’ se localiza más cercano a la quebrada Agua de Maíz; ambos están separados aproximadamente 82 m.

A continuación se presentan por separado los resultados obtenidos en cada pozo.

Pozo P-2. Las secciones sísmicas procesadas del pozo P-2 son las que se muestran en las figuras 19, 20 y 21 con sus respectivos tiempos de llegada.

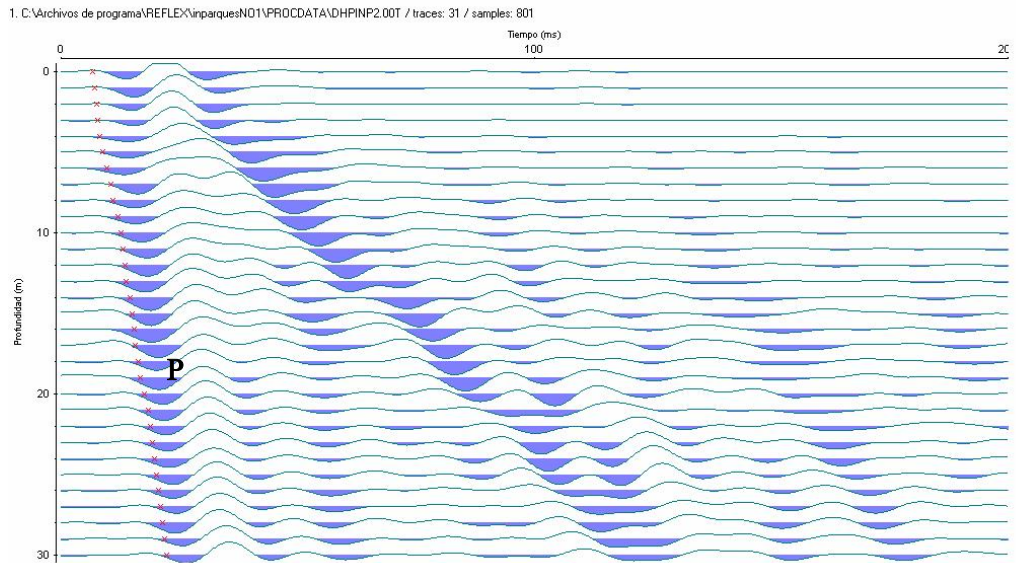


Figura 19. Sección final onda P componente vertical. Método *Downhole*, La Carlota. Pozo P-2.

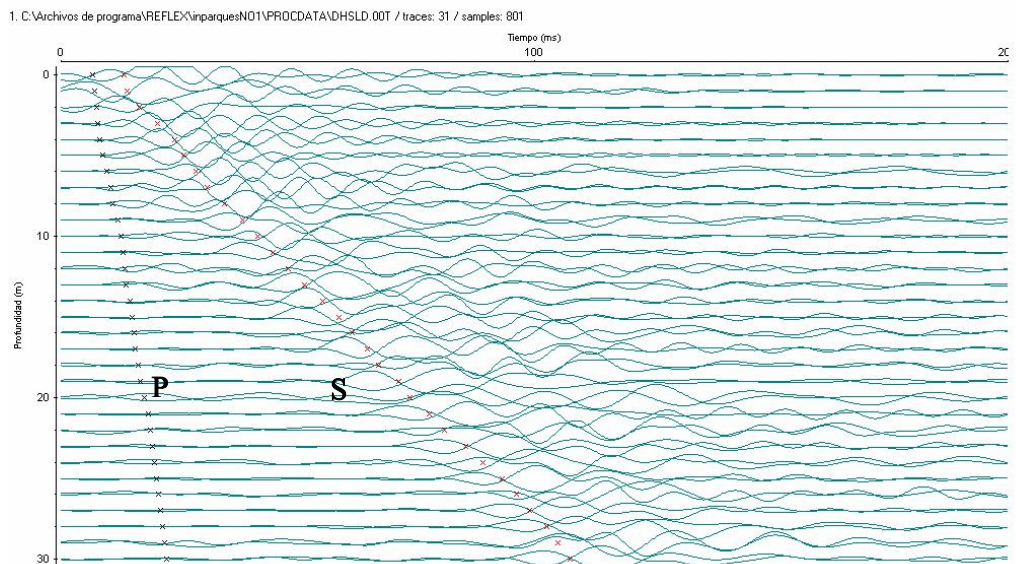


Figura 20. Sección final onda S_{NS} . Método *Downhole*, La Carlota. Pozo P-2.

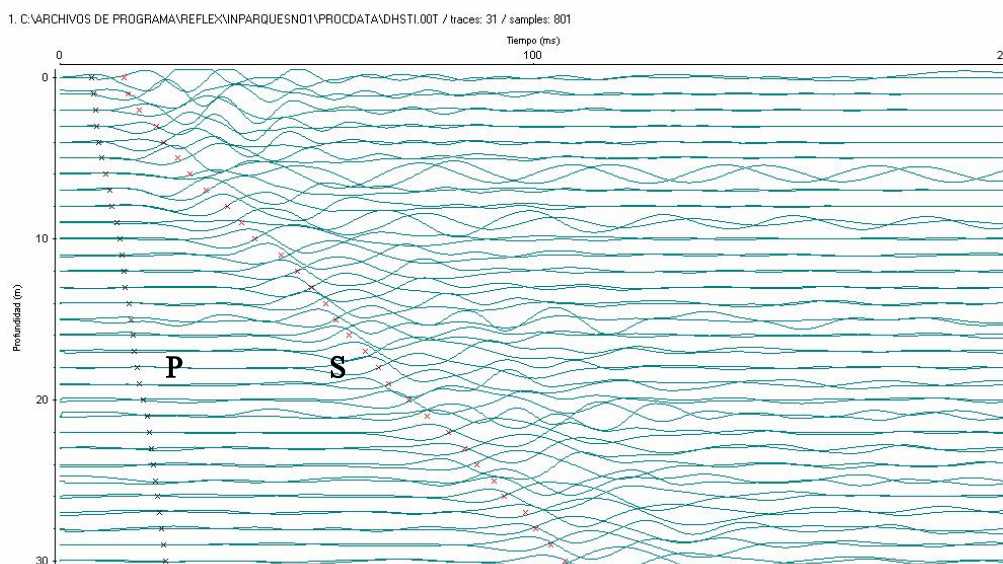


Figura 21. Sección final onda S_{EW} . Método *Downhole*, La Carlota. Pozo P-2.

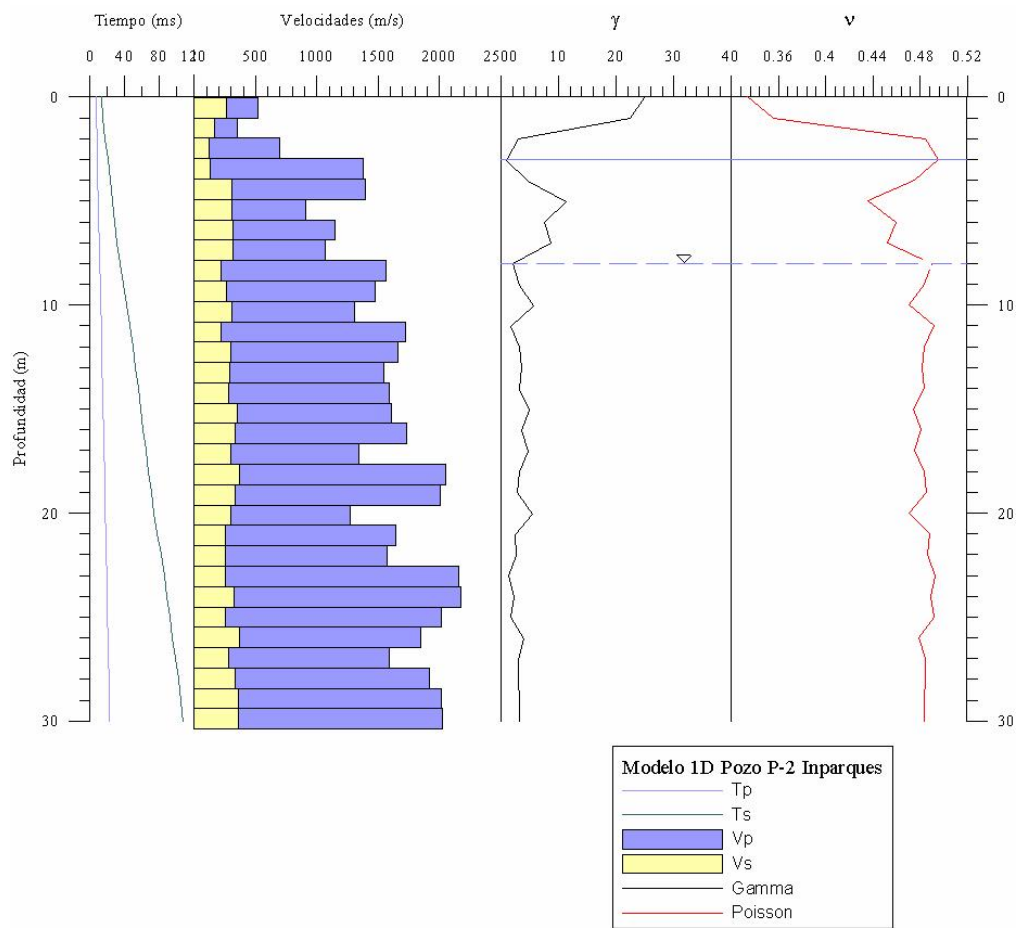
En el pozo P-2 se identificaron tres capas con niveles sísmicamente distinguibles. La figura 22 muestra el perfil del pozo y los parámetros asociados.

$$0 - 4 \text{ m: } \overline{V_p} = 736 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 169 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,47.$$

$$4 - 7 \text{ m: } \overline{V_p} = 1140 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 309 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,46.$$

$$7 - 30 \text{ m: } \overline{V_p} = 1731 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 300 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,48.$$

Las velocidades por encima de los 4 m (figura 22) están asociadas a materiales de relleno en correspondencia con el perfil geotécnico del pozo. A partir de este nivel, las velocidades de corte son próximas a 300 m/s, reflejando así estratos más homogéneos que los obtenidos en los pozos del norte del valle. Con la sísmica, el nivel freático se localizó entre los 7 y 8 m, para la fecha de la adquisición, en una capa permeable de 7 m de espesor, aproximadamente, coincidiendo con el determinado in situ durante la perforación del pozo geotécnico (7 m). En consecuencia, los valores altos de velocidad de onda P y módulo de Poisson cercano a 0,50, se asocian a estratos saturados.



Nivel Freático GISCA (Diciembre/2005): 7 m.

Nivel Freático Sísmica (Enero/2006): 7 m.

Figura 22. Propiedades dinámicas usando el método *Downhole* en el pozo P -2, La Carlota.

Pozo P-2'. Las secciones sísmicas procesadas del pozo P-2' son las que se muestran en las figuras 23, 24 y 25 con sus respectivos tiempos de llegada.

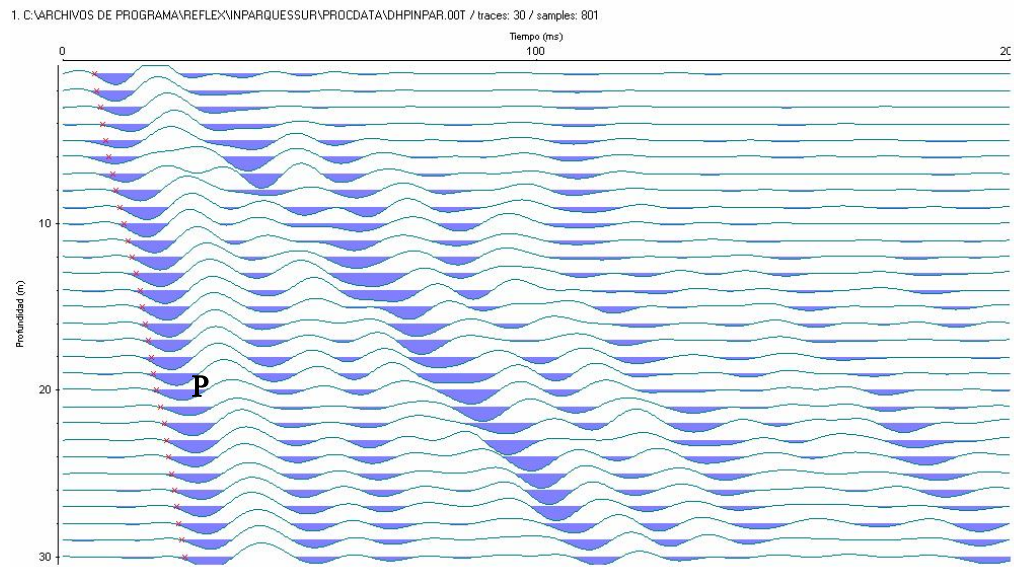


Figura 23. Sección final onda P componente vertical. Método *Downhole*. Pozo P-2', La Carlota.

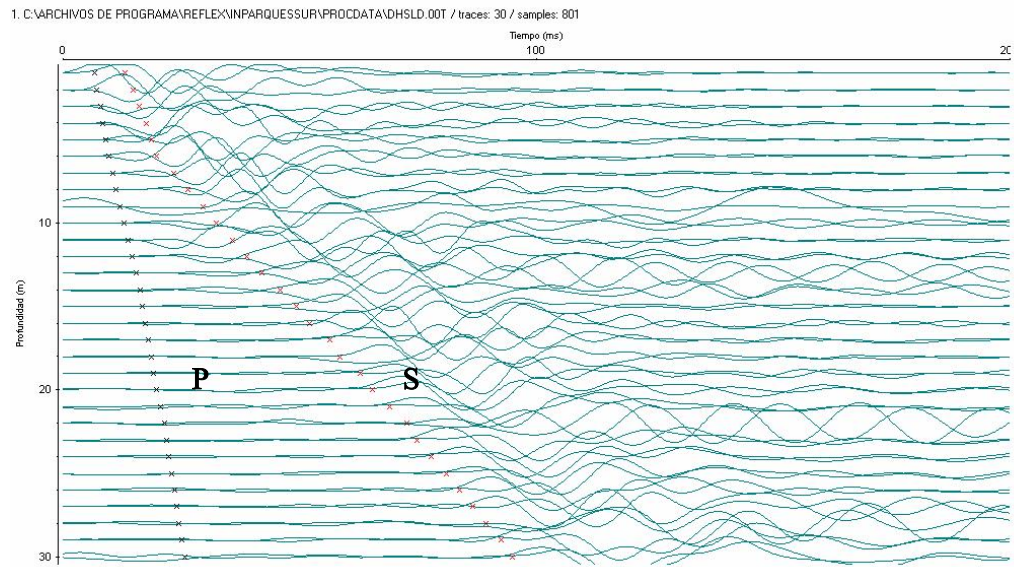


Figura 24. Sección final onda S_{NS}. Método *Downhole*. Pozo P-2', La Carlota.

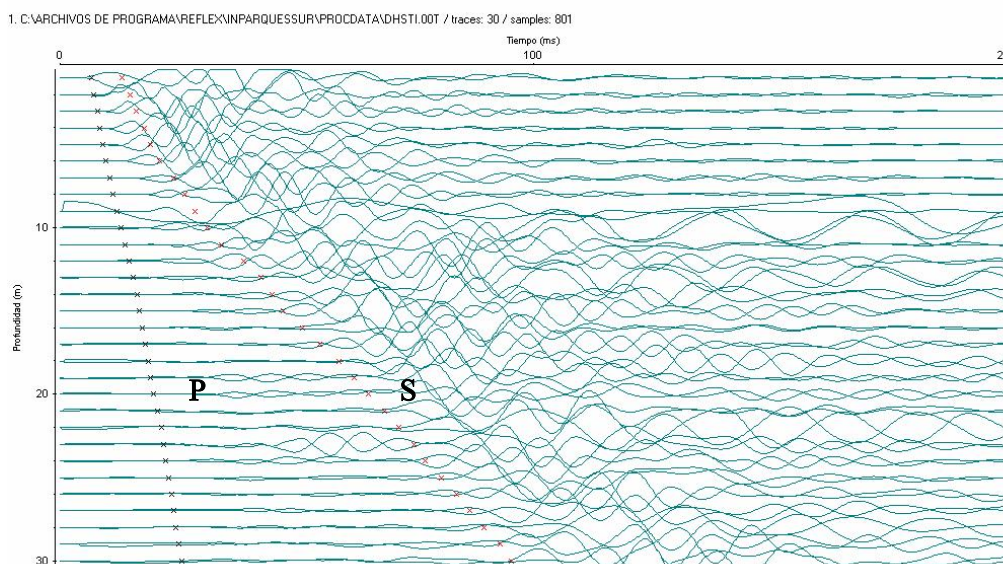


Figura 25. Sección final onda S_{EW} . Método *Downhole*. Pozo P-2', La Carlota.

En el pozo P-2' se identificaron cuatro capas:

$$0 - 4 \text{ m: } \overline{V_p} = 887 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 358 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,34.$$

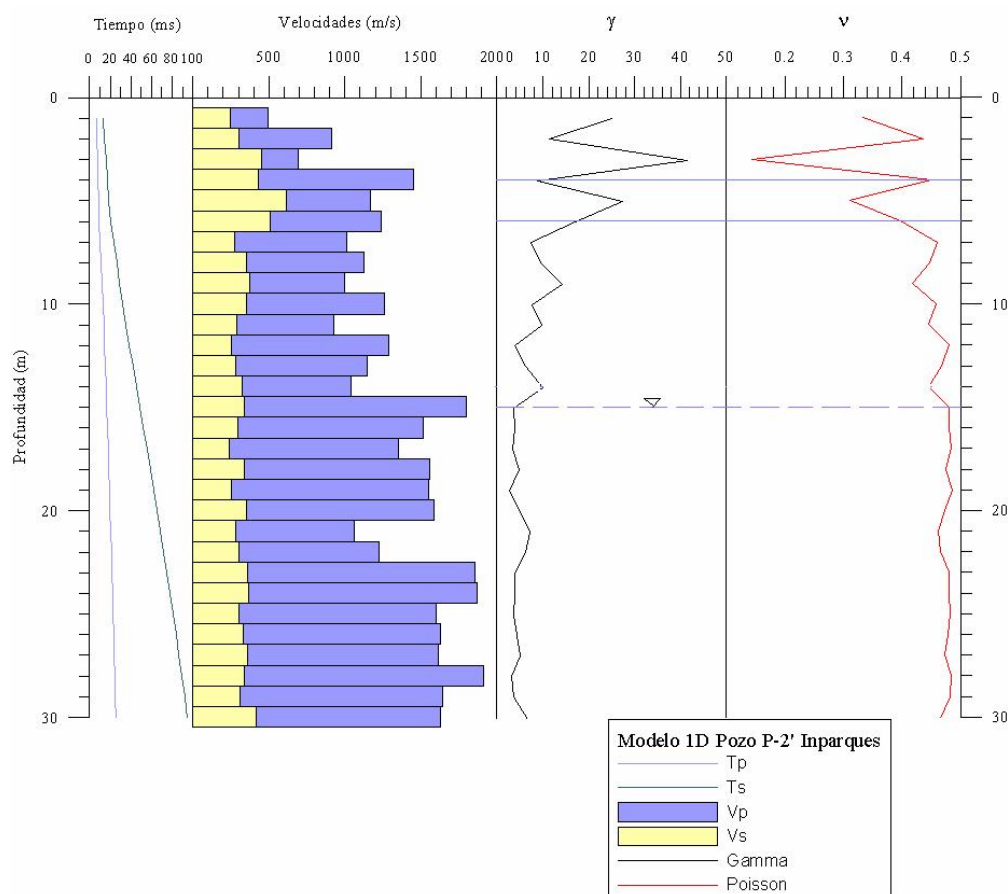
$$4 - 6 \text{ m: } \overline{V_p} = 1204 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 560 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,36.$$

$$6 - 14 \text{ m: } \overline{V_p} = 1100 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 312 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,45.$$

$$14 - 30 \text{ m: } \overline{V_p} = 1587 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 324 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,48.$$

El perfil del pozo (figura 26) muestra gran variación del valor de gamma y del módulo de poisson en los primeros 6 m de profundidad, posiblemente asociado a la presencia de los materiales de relleno encontrados en la zona.

Según los valores de velocidad de onda P, desde el punto de vista sísmico, el nivel freático se ubicó entre los 14 y 15 m. Para el momento en que se realizó la perforación del pozo, a los 20 m se determinó que éste era artesiano por el caudal de agua que emanó. Como consecuencia de ello, fue necesario concluir el pozo y perforar el pozo P-2.



Nivel freático (GISCA-Otubre/2005): 20 m.

Nivel freático Sísmica (Diciembre/2005): 15 m.

Figura 26. Propiedades dinámicas usando el método *Downhole* en el pozo P -2', La Carlota.

En Parque del Este, Weston (1969) reportó por encima de 12,5 m de profundidad velocidades de onda P menores a 1700, y por debajo de este nivel velocidades mayores a 1850 m/s; a partir de 50 m, superiores a los 2400 m/s, aproximadamente. Posteriormente, Kantak (2001) también reportó velocidades similares en esta zona (tabla 1), relacionadas con estratos saturados; a diferencia de Weston (1969), encontró velocidades de onda de corte entre 240 y 390 m/s en los primeros 4,5 m, coincidiendo completamente con las obtenidas en este pozo mediante el *Downhole*. En general, estos antecedentes son coherentes con los determinados en La Carlota mediante sísmica de pozos, a pesar de la diferencia entre los métodos aplicados y el sitio de medición. Sin embargo, se

considera mayor el nivel de resolución que proporciona la técnica empleada en este trabajo.

A fin de integrar los resultados obtenidos con este método, la tabla 5 resume la distribución de los parámetros promedios hallados según el nivel de profundidad en los tres sitios explorados.

Tabla 5. Valores promedios por capa de las velocidades y módulo de Poisson obtenidos con *Downhole* para el estudio de Micro zonificación Sísmica de Caracas.

Prof.	V _P (V _S) en m/s			
	Los Chorros	Sebucán	La Carlota	
	P-6	P-4	P-2	P-2'
1	1062 (339) v = 0,44	688 (403) v = 0,23	736 (169) v=0,47	887 (358) v=0,34
2				
3			1140 (309) v=0,46	1204 (560) v=0,36
4				
5	796 (406) v = 0,32	814 (462) v = 0,26	1731 (300) (suelo saturado hasta 22 m, v =0,48)	1100 (312) v = 0,45
6				
7				
8				
9	622 (381) v = 0,20	?	1587 (324) (suelo saturado, v = 0,48)	
10				
11				
12				
13	747 (487) v = 0,13	1550 (619) v = 0,40	1882 (341) u =0,48)	
14				
15				
16				
17	1052 (588) v = 0,27			
18				
19				
20				
21	?			
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				

En la tabla 5 se puede observar que las velocidades de onda P y el módulo de Poisson en el sector La Carlota son mayores que la de los pozos ubicados hacia el norte del valle de Caracas, asociándose este resultado a estratos saturados de agua. Por el contrario, las velocidades de ondas S son inferiores, y la diferencia se atribuye a la condición de suelos menos consolidados y de granulometría fina presentes en la zona. También se puede observar, la variabilidad de las velocidades, tanto P como S, encontradas en el pozo del sector Los Chorros, relacionándose este comportamiento al ambiente caótico de la depositación de esta zona.

En función de la distribución de capas presentadas por cada pozo, la tabla 6 muestra los resultados obtenidos al aplicar las especificaciones del capítulo 5 de la norma COVENIN 1756 (2001) (Apéndice B), en cuanto al cálculo de la velocidad promedio de onda de corte en los tres sitios explorados, así como el tipo de espectro y el coeficiente de aceleración, ϕ . A modo comparativo, se incluyó la velocidad de corte en los primeros 30 m o Vs30.

Tabla 6. Parámetros del perfil geotécnico de los pozos evaluados con el *Downhole* y la norma COVENIN 1756-2001 en comparación con el Vs30.

Pozo	H (m)	Vsp (m/s)	Espectro	ϕ	Condición del suelo	Vs30 (m/s)
P-2' La Carlota	ND	NA	ND	ND	ND	334
P-2 La Carlota						311
P-4 Sebucán	16	438	S1	1,0	Muy denso	507
P-6 Los Chorros	21	402				468

En general, los pozos ubicados en la sede de INPARQUES, La Carlota, presentaron velocidades de onda de corte inferiores a los 500 m/s. Es por ello, que el valor de H no pudo definirse (ND) en los primeros 30 m, y por consiguiente, no se aplica (NA) el cálculo de Vsp. En este sector, el promedio

de las velocidades de corte es 300 m/s. Al comparar con el parámetro Vs30, claramente se refleja la coherencia entre estos resultados, pudiéndose inferir que el suelo del sector es duro o denso (consistente con la geotecnia) y en consecuencia, su espectro es tipo S2 con coeficiente de aceleración horizontal igual a 0,90.

Las velocidades promedio de onda de corte (Vsp) en los pozos situados al norte del valle, son superiores a los 400 m/s en los primeros 30 m de profundidad, permitiendo caracterizar el suelo en estas zonas como muy denso (siendo este resultado coherente con la geotecnia) con una forma espectral de tipo S1. Por el contrario, el parámetro Vs30 resultó próximo a 500 m/s al considerar toda la columna de sedimentos de los pozos para el cálculo. Cabe señalar que, si se toma en cuenta esta variable para escoger la forma espectral, el resultado sería el espectro tipo S2, lo que en teoría significa un aumento en las ordenadas de los espectros de diseño (Ver Apéndice B) lo cual no sería contraproducente para el diseño sismorresistente de una edificación de considerarse este parámetro. Esta comparación permite tener una conclusión preliminar acerca de la variación en el tipo de espectro si se emplea el parámetro Vs30 para la obtención de la forma espectral tipificada del suelo de fundación en vez del Vsp.

CAPÍTULO V. ADQUISICIÓN SÍSMICA DE POZOS CON LA TÉCNICA *CROSSHOLE*.

La diferencia esencial entre este método y el *Downhole* radica en que se requiere al menos dos pozos para su ejecución. Generalmente, es un método de poco alcance en profundidad (menos de 100 metros) al igual que el “*Downhole*”.

La metodología consiste esencialmente en perforar como mínimo dos pozos (preferiblemente tres) separados hasta 3 m de distancia para que no se produzcan refracciones sino ondas directas entre la fuente y el receptor. Uno de ellos actúa como pozo emisor, en donde se coloca la fuente de energía a una profundidad determinada, mientras que los restantes son pozos receptores en donde se instala un sensor a la misma profundidad que la fuente, tal como lo ilustra la figura 27.

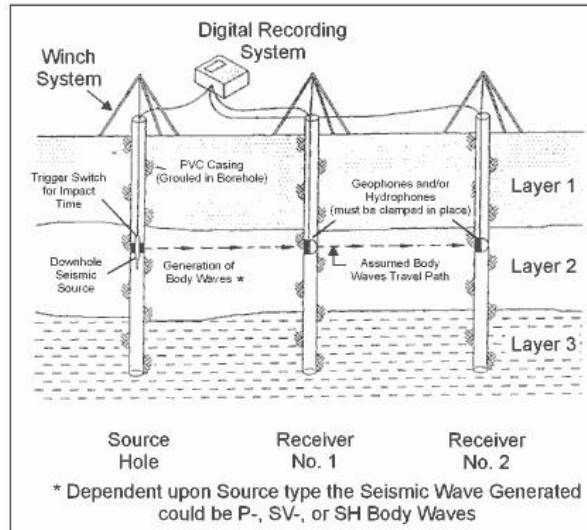


Figura 27. Esquema de un levantamiento “*Crosshole*” mostrando el pozo-fuente y dos pozos receptores. El tipo de onda generada dependerá de la fuente empleada.

La ubicación del conjunto fuente-receptor(es) avanza a intervalos equidistantes, o no, una vez que se graban las señales en una profundidad determinada. El intervalo de medición se calcula con la ecuación 6 para evitar *aliasing*, sin embargo, la norma ASTM D 4428 (1984) indica que éste no debe exceder de 1,5 m. Dicha norma establece criterios para depósitos de suelos en donde se requiere que los datos obtenidos sean de alta calidad. Entre los más relevantes se tienen:

- La separación entre pozos debe ser menor a 3 m. Si el material contenido entre los pozos es aluvional, la distancia se puede aumentar hasta de 4,5 m dependiendo del tipo de fuente.
- El tipo de fuente para generar ondas P, será la comúnmente usada (martillo, explosivos o cañones de aire). Para producir una onda S identificable, la fuente deberá transmitirse por distorsión direccionada, debe ser repetible y reversible, con una amplitud tal que, sea al menos el doble de la amplitud de la onda P.
- El intervalo de avance máximo dentro del pozo o espaciamiento entre fuentes recomendado es 1,5 m.
- Los sensores deben tener una frecuencia natural de modo que no varíe en más del 5% del rango 0,5 a 2 de la frecuencia predominante del tren de onda S en el sitio de estudio. Además serán del tipo tricomponente ortogonal (geófono de pozo) o hidrófonos.

La norma también señala una metodología opcional que puede emplearse en proyectos donde no se requiere tanta calidad en la información adquirida. Por ejemplo, se señalan aspectos como los siguientes:

- Se pueden emplear sólo dos pozos para el levantamiento.
- Una separación mayor a 6 m. entre pozos puede originar ondas refractadas y no directas, razón ésta para que los datos obtenidos se utilicen con precaución.

Gracias a que las ondas de cuerpo se generan en el pozo-fuente durante el ensayo “*Crosshole*”, las ondas superficiales “*ground roll*” no interfieren en la medición haciendo más sencillo el procesamiento.

En este levantamiento, los sensores ubicados en el plano horizontal reciben principalmente onda P, mientras que el vertical, la onda S. El sistema de referencia siempre estará direccionado mientras se conserve la misma dirección durante el levantamiento sísmico (CFLHD Geotechnical Team, 2005). En consecuencia, los tiempos de llegada en las señales pueden identificarse mejor.

Metodología para la Adquisición en la Ciudad de Caracas.

Para el proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Caracas, inicialmente estaba planteado realizar la adquisición con este método entre los pozos de 30 m y los pozos que llegan hasta el tope del basamento; sin embargo, dada la longitud de estos últimos, fue necesario construirlos de forma telescópica, lo que significó que el diámetro de los hoyos en su parte más somera alcanzó las 12 pulgadas y no 8 $\frac{3}{4}$ pulgadas como se había planificado en el proyecto inicial. Ello significó, más de dos pulgadas de espesor de cementación (FUNVISIS, 2005) lo cual probablemente introduciría más errores al aplicar el método.

Adicionalmente, no se disponía de la fuente normalmente utilizada (martillo de pozo) para hacer la adquisición y por aspectos logísticos en el sector Los Chorros, ambos pozos quedaron separados más de 8 m de distancia. Por consiguiente, sólo pudo aplicarse el ensayo en el sector Sebucán, con la particularidad de que se utilizó como fuente la energía generada por el saca muestra del ensayo SPT, aprovechando que se requería perforar un tercer pozo para realizar la geotecnia.

Los datos relevantes de los pozos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Coordenadas geográficas de los pozos para el *Crosshole* en Sebucán

Pozo	Coordenadas UTM Huso 19 PSTD 56		Altitud (m)
	Latitud	Longitud	
P-4 (receptor)	736.618	1.161.821	880
Geotécnico (fuente)	736.616	1.161815	880

La adquisición se realizó haciendo uso del equipo empleado en el “*Downhole*” y el equipo para la prueba del SPT.

La figura 28 representa una foto durante la adquisición. El equipo de geofísica se encuentra al fondo, uno de los operadores sostiene el cable de trigger. El geófono de control se adosó al sistema de barras para definir tiempo cero de la grabación. La persona que tiene el mecate en sus manos es quien maneja el martillo que produce el desplazamiento de las barras en el ensayo SPT.

Una vez definidos los parámetros de la adquisición tal como se hizo con el “*Downhole*”, se introdujo el geófono tricomponente en el pozo de 30 m. a la profundidad que se realizaría el muestreo geotécnico; se fijó al pozo y se orientaron los geófonos. Un geófono de componente vertical de 24 Hz se colocó lo más cerca posible del límite entre el yunque y el martillo del ensayo SPT para definir el tiempo cero de grabación, y se registró la altura de éste con respecto al nivel de superficie, con el fin de realizar la corrección por tiempo de viaje de la onda a lo largo del sistema de barras hasta alcanzar el otro extremo del sistema. El tiempo cero (disparo del “*trigger*”) quedó definido por el instante en que se producía el choque entre ambos elementos. Adicionalmente, se colocó un geófono de componente vertical a 1,30 metros del pozo geotécnico como un receptor *Uphole*. No obstante, los niveles de ruido debido a la vibración de la máquina perforadora impidieron tener señales fidedignas con este receptor (canal 4 del sismógrafo).



Figura 28. Equipo utilizado para el *Crosshole* en La Escuela de Enfermería de la U.C.V., sector Sebucán. A la izquierda: Máquina de perforación geotécnica.

Durante la adquisición, el intervalo de muestreo coincidió con el de la geotecnia (1m) y se consideraron los primeros 10 golpes dados con el martillo para hincar el saca muestras, para hacer apilamiento de las señales. Por cada nivel de muestreo se almacenó sólo un archivo con 10 señales apiladas. Las primeras cuatro trazas representan las señales de interés tal como en la técnica “*Downhole*”.

La metodología aquí puesta en práctica es poco común, aunque resultó ser factible, sólo que la logística debe ser controlada para poder utilizar simultáneamente el ensayo de penetración estándar desde el inicio como fuente de emisión de energía para la adquisición. Aunado a ello, se requiere llevar mayores controles en la colocación del trigger y garantizar la colocación del sensor dentro del pozo al mismo nivel de profundidad que el saca muestras. Obviamente, para aplicar el ensayo tal cual, es necesario hacer uso del equipo de perforación geotécnica. Siempre que se disponga de estas condiciones, será una ventaja a juicio de la autora, emplear esta metodología puesto que no se

requiere de mayores esfuerzos por parte de la mano de obra (a diferencia del “*Downhole*”) para aplicar la carga que servirá de fuente de energía, además el avance sólo dependerá del avance del equipo de perforación del pozo geotécnico o pozo fuente, pudiéndose tener un rendimiento de más de 15 m/día y aprovechar simultáneamente la visualización y posterior clasificación de las muestras recuperadas.

Procesamiento de los Datos Sísmicos.

El procedimiento seguido para el procesamiento de las señales fue análogo al empleado en el “*Downhole*” para el tratamiento de señales, a excepción de la corrección estática con las secciones de control. La única diferencia es que los tiempos de primera llegada fueron corregidos en función del tiempo que tarda la onda en viajar a través del sistema de barras, una vez que se produce el impacto, hasta llegar al final del saca muestra o nivel de muestreo.

En total se generaron cuatro secciones sísmicas que fueron filtradas con filtros pasa banda cuyas frecuencias de corte promedio fueron 0, 20, 60 y 100 Hz, aproximadamente.

Debido a que no se pudo aplicar la técnica de polarización de señales (por el tipo de fuente empleada), la llegada de la onda S se marcó con el criterio que teóricamente su amplitud y período son aproximadamente el doble de los de onda P.

Posteriormente, a los tiempos de primera llegada tanto para onda P como para onda S se les aplicó la corrección por tiempo de viaje a través del sistema de barras y se obtuvieron las velocidades de onda directa por cada nivel como una relación entre la distancia y tiempo de viaje entre los dos pozos.

$$V = \frac{d}{t} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$t = t_r - t_b \quad (\text{Ec. 10})$$

donde:

d: distancia fuente – receptor (se asumió un valor constante tomado como la distancia horizontal entre los dos pozos igual a 2,34 m.)

t: tiempo de viaje entre la fuente y el receptor.

t_r : tiempo del registro como llegada de la onda P u onda S.

t_b : tiempo que tarda la onda en atravesar el sistema de barras hasta llegar al contacto saca muestras – suelo. En este caso se consideró que la velocidad del acero es 6100 m/s.

Resultados y Discusión de Resultados

Las figuras 29, 30 y 31 muestran las tres secciones obtenidas en el “Crosshole”. A diferencia del *Downhole*, las figuras 29 y 30 se corresponden con la llegada de la onda P recibida por los sensores contenidos en el plano horizontal definido por la fuente y el geófono de pozo. Mientras que los tiempos de llegada de la onda de corte quedaron definidos por las señales recibidas en el sensor de componente vertical (figura 31); no obstante, las últimas 6 trazas de esta sección fueron alteradas por señales de “ruido”, dificultando la definición de los tiempos de llegada.

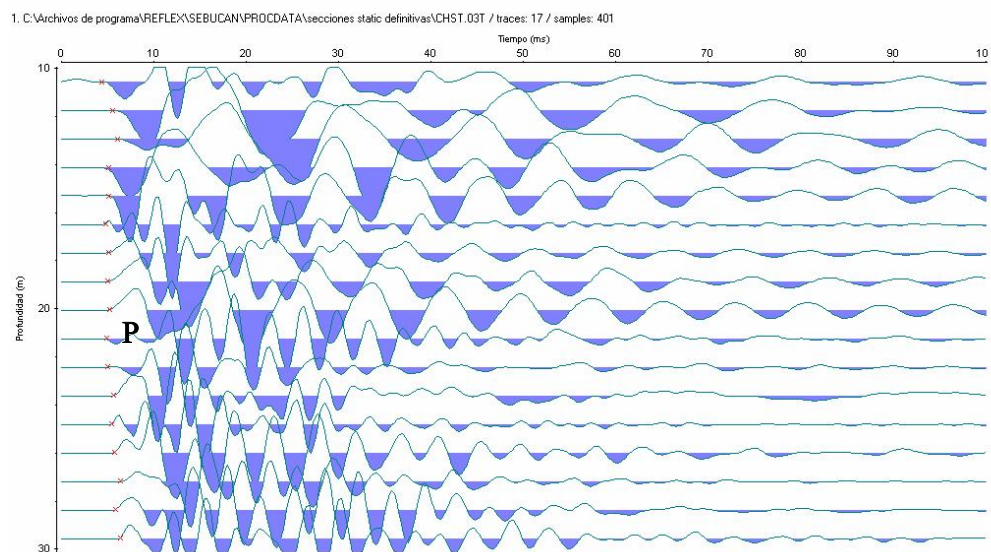


Figura 29. Sección final de onda P_{EW} . Método Crosshole, Sebucán.

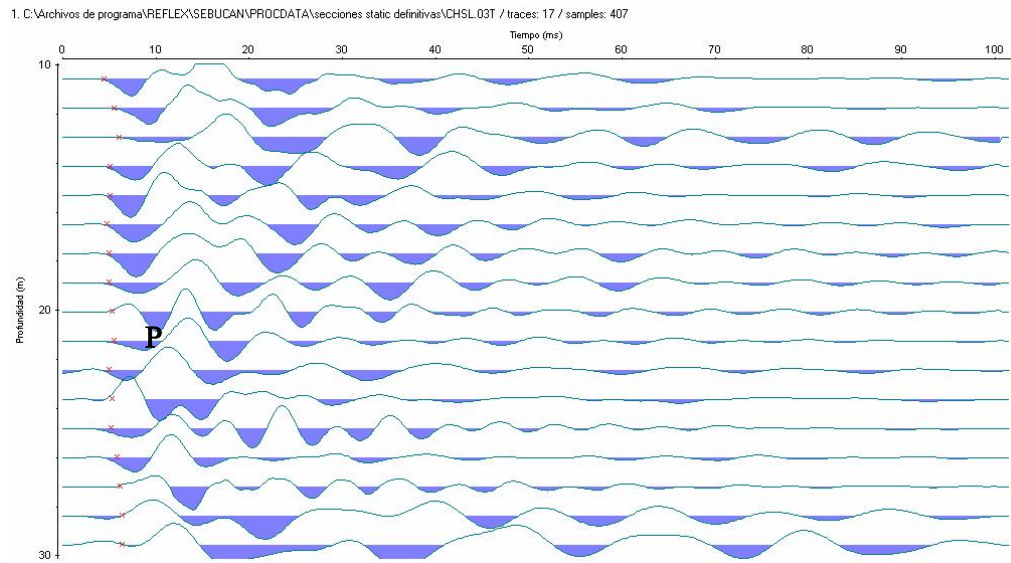


Figura 30. Sección final de onda P_{NS} . Método *Crosshole*, Sebucán.

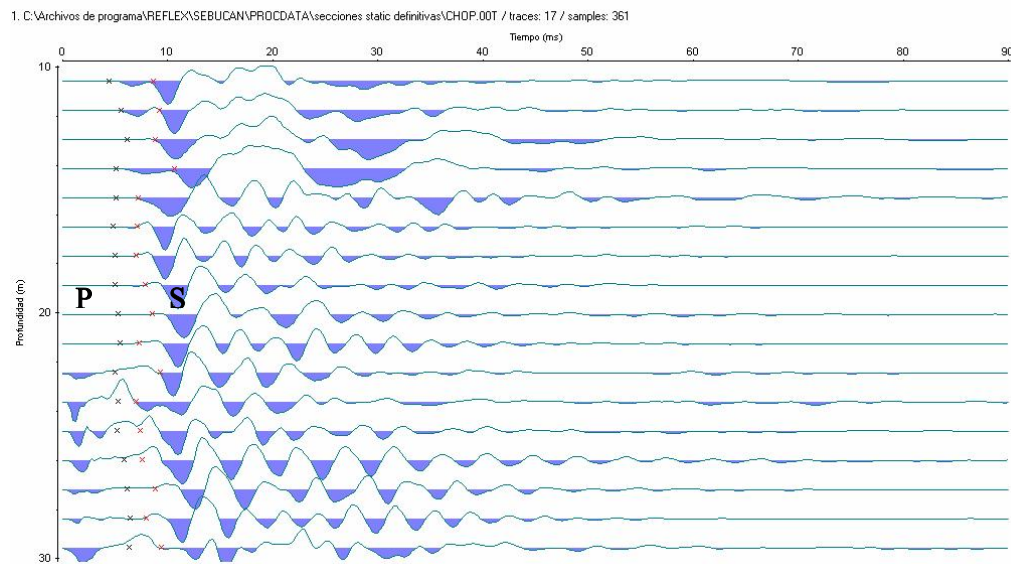
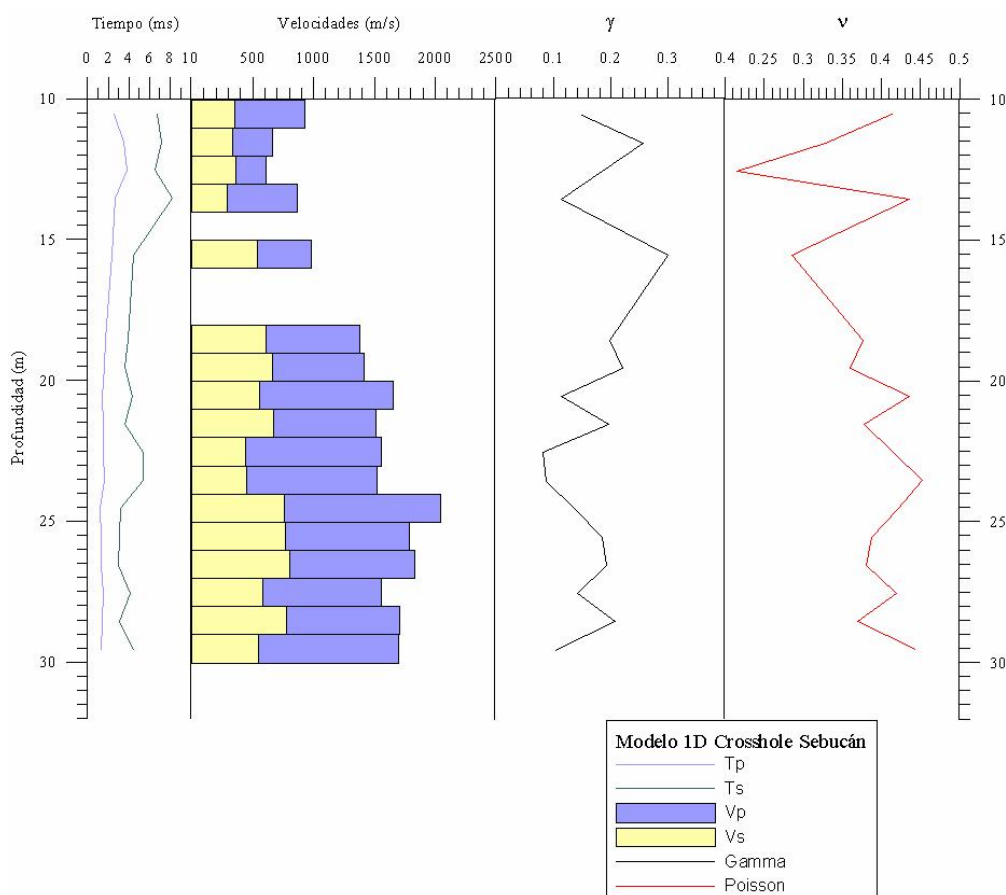


Figura 31. Sección final de onda S. Método *Crosshole*, Sebucán.

En la figura 32 se muestra el modelo 1D de velocidades de onda P promedio y de onda S, además del módulo de Poisson y el valor de gamma (γ). En función de ello, se interpretaron dos capas a partir del nivel muestreado.

$$10,55 - 15,55 \text{ m: } \overline{V_p} = 807 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 376 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,34$$

$$15,55 - 29,55 \text{ m: } \overline{V_p} = 1639 \text{ m/s; } \overline{V_s} = 635 \text{ m/s; } \overline{\nu} = 0,41$$



Nivel freático: ND.

Figura 32. Propiedades dinámicas usando el método *Crosshole* en el pozo P- 4, sector Sebucán.

Entre los 10 y 30 m, el promedio de las velocidades calculadas con este método, tanto de onda P como de onda S, es 1395 y 559 m/s, respectivamente. La tabla 8 permite comparar las velocidades obtenidas con los métodos de sísmica de pozos empleados en este trabajo. Con ambas técnicas, una de las interfases de los estratos del pozo quedó definida a los 16 m, aproximadamente. Por otra parte, las velocidades de ondas compresivas presentaron una desviación máxima de 5,7% con respecto al “*Downhole*”, mientras que las velocidades de ondas de corte 22 % (10 -16 m) y 2,6% (16 a 30 m). A juicio de

la autora, los resultados son bastantes similares por lo que la metodología puesta aquí en práctica respecto al *Crosshole* ha resultado ser confiable, al menos, en esta zona de estudio y con la geometría utilizada. También se puede inferir un nivel bajo de anisotropía en el entorno del pozo con un radio definido por la separación fuente – receptor.

Tabla 8. Parámetros promedios obtenidos en el sector Sebucán con los dos métodos geofísicos aplicados.

Prof. (m)	Método	V _P (m/s)	V _S (m/s)	$\bar{v}$
10 – 16	<i>Downhole</i>	820	459	0,27
	<i>Crosshole</i>	807	376	0,34
16 - 30	<i>Downhole</i>	1550	619	0,40
	<i>Crosshole</i>	1639	635	0,41

En otro orden de ideas, al no poseer datos por encima de los 10 metros de profundidad, no se pudo realizar el cálculo de la velocidad promedio de onda de corte con esta técnica.

CAPÍTULO VI. EVALUACIÓN GEOTÉCNICA.

Ensayo de Penetración Estándar.

Aspectos teóricos.

El ensayo de penetración estándar, comúnmente llamado SPT por sus siglas en inglés, es utilizado para obtener muestras perturbadas no drenadas de suelo, a través de un muestreador denominado cuchara partida. Adicionalmente, permite medir la resistencia al corte que ofrece el suelo a la penetración del muestreador (ASTM D 1586, 1999).

Desde el siglo pasado, gran cantidad de países aplican el método a nivel geotécnico para conocer básicamente el tipo de suelo que se encuentra a distintas profundidades a lo largo de una perforación en un sitio de interés; ya sea con fines geológicos, para reconocimiento de los estratos, para diseño de fundaciones, para localización del nivel freático y para correlacionar y validar la litología del sitio con otros parámetros importantes como por ejemplo velocidades de onda de corte. Uno de los principales usos del SPT (Alviar y Penela, 1985) además de la evaluación de la densidad relativa, lo constituye la determinación del potencial de licuación en arenas bajo la acción de efectos sísmicos.

El SPT consiste esencialmente en hacer hincar verticalmente el recuperador de muestras dentro del suelo mediante un sistema de barras enroscadas que se golpean por el extremo superior mediante un yunque que a su vez es impactado por un martillo de 63,5 kilogramos, el cual se deja caer desde una altura cercana a 76 cm.

Este ensayo es de fácil ejecución, aunque complejo por la naturaleza dinámica de la carga; ya que no toda la energía aplicada al sistema es transferida al saca muestra, sino que parte de ésta es absorbida por el terreno

(impedancia del material), por la longitud de las barras, por el contacto martillo – yunque, por el manejo del perforador, por la fricción del forro y por el tipo de muestreador. Alviar y Penela (1986), desarrollaron un método simplificado para evaluar la eficiencia energética, n , del ensayo expresada como la relación entre la energía incidente en el sistema de barras y la energía potencial teórica (475 Joules) que suministra el martillo cuando se deja caer a la altura normalizada. Es normal a nivel mundial que este valor varíe en función del equipo de perforación y de sus características, razón por la que diversos investigadores han establecidos factores para su corrección (Apéndice B1). De Marco (2001) propuso un valor de n igual a 42% para simplificar los cálculos de acuerdo con la norma venezolana sismorresistente COVENIN 1756-1998 para determinar la forma tipificada del terreno. Finalmente, los valores del número de golpes medidos en campo, N_{SPT} , son corregidos y normalizados a una energía efectiva teórica del 60% de la siguiente manera:

$$N_{60} = \frac{n}{60} \times N_{SPT} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

n : es el producto de los factores e_1 , e_2 , e_3 debidos a las características del equipo de perforación expresado de forma porcentual (Apéndice B1).

Otra corrección que se realiza sobre el ya calculado N_{60} , se debe al efecto de la presión de sobrecarga por presión litostática, denominada $N_{1(60)}$. La resistencia a la penetración en arcillas es muy poco afectada por la profundidad. En arenas esta resistencia depende esencialmente de la presión de confinamiento. La idea más aceptada es que este factor sea normalizado al valor correspondiente bajo una presión efectiva vertical de 10 t/m^2 , mediante las siguientes ecuaciones:

$$N_{60} = C_n N_{60} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$C_n = \left(\frac{10}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,5} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde: σ'_{vo} es el esfuerzo vertical efectivo a la profundidad del ensayo (valores mayores a 2,5 t/m²).

De Marco (2001) sugiere utilizar la ecuación 12 en las correlaciones entre la resistencia a la penetración en arenas y las velocidades de transmisión de las ondas de corte, V_s , necesarias para la selección de la forma espectral tipificada.

La siguiente tabla muestra una correlación entre el tipo de consistencia del suelo, el número de golpes necesarios para hincar el suelo 30 cm. (N) y la resistencia al corte no drenada (q_u); sin embargo, pueden existir dispersiones en la práctica con respecto a este último parámetro, por lo que no conviene tomarlo como base (Juárez y Rico, 1978).

Tabla 9. Relación entre la consistencia de suelos cohesivos, el número de golpes SPT y la resistencia al corte no drenada según Terzaghi y Peck (Juárez y Rico, 1978)..

Consistencia	N	q_u (Kg/cm ²)
Muy blanda	<2	<0.25
Blanda	2-4	0.25-0.50
Media	4-8	0.50-1.00
Firme	8-15	1.00-2.00
Muy firme	15-30	2.00-4.00
Dura	>30	>4.00

Para suelos granulares existe una correlación entre la compacidad del material, el número de golpes SPT y la densidad relativa, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 10. Relación entre la compacidad, el número de golpes SPT y la densidad relativa según Terzaghi y Peck (Juárez y Rico, 1978).

Compacidad	N	Densidad relativa (%)
Muy suelta	0-4	0-15
Suelta	5-10	15-35
Media	11-30	35-65
Densa	31-50	65-85
Muy densa	>50	85-100

Equipo utilizado en el ensayo y proceso de perforación.

La norma ASTM D 1586-99 (1999) ha pretendido normalizar este ensayo; pero debido a la variabilidad que existe en el mercado de los equipos utilizados y de las propiedades intrínsecas de los mismos, resulta difícil que los resultados obtenidos así lo sean. Esto constituye la razón de origen de las correcciones que se realizan al valor de N de campo, las cuales están resumidas en el Apéndice B1. El equipo debe consistir de (figura 33):

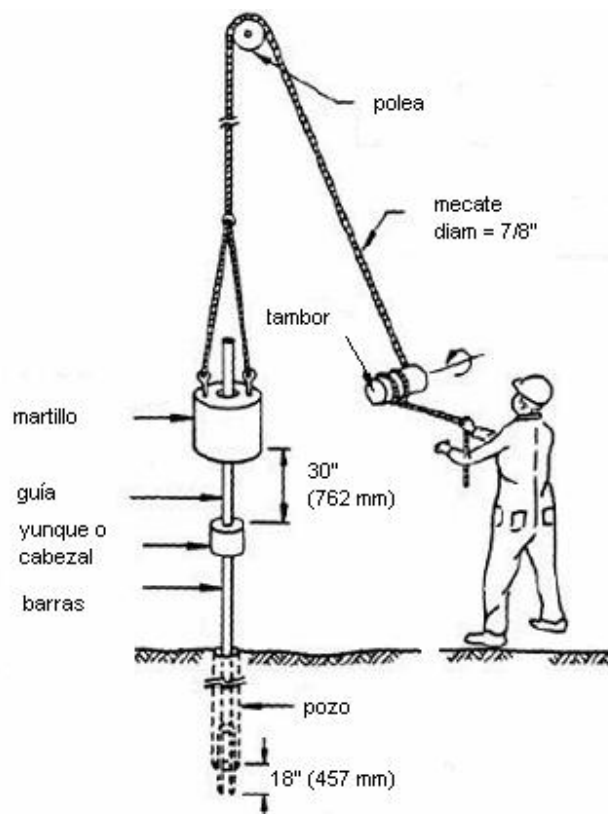


Figura 33. Esquema del ensayo SPT conducido con un martillo tipo Donut.

- Equipo de perforación constituido por taladros cuyo diámetro esté comprendido entre 2,2 y 6,5 pulgadas. Pueden emplearse taladros que permitan perforar o avanzar en el encamisado de hoyos abiertos, con

descarga lateral para evitar alteración del suelo o, si se requiere desviar el fluido de perforación, se usa el taladro “*Roller-Cone*”.

- Barras de acero con diámetro interno 1 1/8” y diámetro externo de 1 5/8” .
- Muestreador cuchara partida con rosca (figura 34). El uso de lineadotes para producir un diámetro interno constante de 1 3/8” se ha demostrado, tanto en la práctica como en la teoría, incrementan entre un 10 y 30% el número de golpes (ASTM D 1586, 1999).

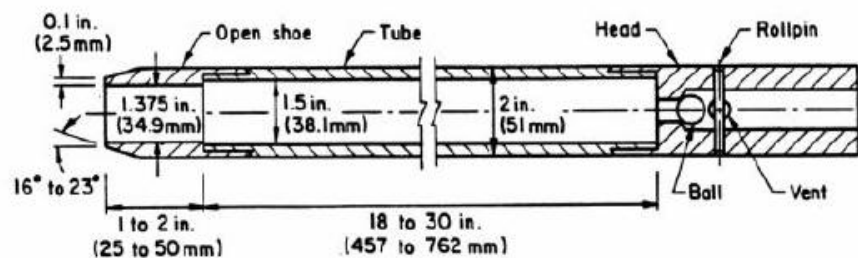


Figura 34. Esquema del muestreador Cuchara Partida del SPT.

- Equipo de manejo del peso formado por un martillo de $63,5 \pm 1$ kg, un yunque, una guía para dejar caer libremente el martillo sobre el yunque y un tambor o mecanismo automático que permita levantar el martillo y dejarlo caer desde la altura predefinida.
- Equipos adicionales como etiquetas y contenedores para las muestras, hojas de registro, dispositivos para medir nivel freático.

El proceso de perforación consiste en avanzar con un muestreo continuo o intermitente a intervalos constantes en función de las necesidades del proyecto. Se puede emplear cualquier procedimiento que proporcione un hoyo limpio y la inserción estable del saca muestra, así como que el ensayo se ejecute sobre suelo imperturbado. La norma citada los describe claramente.

Aplicación del Ensayo SPT en el Estudio de Microzonificación Sísmica de Caracas.

El ensayo SPT se aplicó al perforar pozos que estaban separados entre 2 y 5 metros de los pozos donde serán colocados los acelerómetros del Proyecto de Microzonificación sísmica. En Los Chorros la profundidad de muestreo máxima fue 22 m debido a que no se pudo continuar el avance, ya que en general, a lo largo del perfil, el material presentó valores de N superiores a 80 golpes e incluso en muchos casos, el saca muestras no penetró la profundidad normalizada. De hecho el avance al siguiente nivel de muestreo se hizo en la mayoría de los casos por rotación. En Sebucán se alcanzaron los 30 m. perforando por percusión. En La Carlota fue el único lugar donde se pudo realizar el ensayo hasta llegar al basamento (133 m.), tal como se planificó.

Las características del equipo utilizado para la realización del ensayo se correspondieron con las que estipula la norma ASTM D 1586-99 (figura 35). A saber:

- Sistema de trípode con motor incluido para levantar el martillo y extraer las barras.
- Barras de 2,5 pulgadas y de 2,65 a 3 m de longitud de tipo Ax.
- Tambor con mecate de 5/8”.
- Martillo tipo donut de 63,5 kg, 20- 30 cm de diámetro y altura igual a 20 cm.
- Yunque de 8 kg aproximadamente.
- Compresor.
- Saca muestras de 2” de diámetro.
- Forros de 4”.

Adicionalmente, el número de vueltas del mecate sobre el tambor empleadas por los operadores fue igual a 2 ¼” y la frecuencia de impactos fue de un golpe por segundo.

El proceso se realizó según indica la referida norma, con la única diferencia de que el muestreo se paralizaba al alcanzarse 80 golpes en cualquier capa de 15 cm (6"). De lo contrario, se contó el número de golpes que la



Figura 35. Equipo de Ensayo SPT utilizado en el sector Sebucán.

cuchara partida lograba penetrar 15 cm. En resumen, el procedimiento consistió en avanzar dentro del hoyo cincuenta y cinco centímetros (55 cm) por rotación o por percusión hasta el nivel de muestreo. Una vez allí se extrajeron las barras del hoyo, se les colocó el muestreador, se introdujeron de nuevo hasta el nivel y se asentaron. A ras de la superficie, sobre la barra se marcaron hacia arriba tres graduaciones de 15 cm cada una para comenzar el golpeteo. Por

cada intervalo abarcado se contó el número de golpes necesarios para hincar el sistema de barras. El valor de N de campo representa la suma de los golpes parciales dados en los últimos 30 cm. Al finalizar, se extrajeron de nuevo las barras y se recuperó el saca muestra (figura 36) para realizar la clasificación visual del material extraído y reportar composición, color, estratificación, saturación y condición. Se recuperaron y envasaron dos o tres porciones de la muestra para ser examinadas en un laboratorio a través de ensayos estáticos y dinámicos. El procedimiento se repitió hasta llegar a la profundidad máxima del muestreo.



Figura 36. Muestra de arena recuperada con la cuchara partida (Pozo P-2, La Carlota).

Corrección de los Datos Geotécnicos.

La metodología aplicada para corregir los datos de campo provenientes del ensayo SPT se basó en el procedimiento descrito por De Marco (2000), sintetizado en el diagrama mostrado en el Apéndice B1, y las características del equipo de perforación, el cual coincide con la metodología de Alviar y Penela (1986). De los ábacos respectivos, se obtuvieron los factores de corrección e_1 ,

e_2 y e_3 , equivalentes a 0.57, 0.73 y 0.75 a 1.00, respectivamente, y se calculó el valor de N_{60} (Ec. 11). El valor de N'_{60} sólo pudo calcularse en el sector Los Chorros (para algunos intervalos de muestreo) porque en el resto de los sitios de exploración no se obtuvo el peso unitario de las muestras extraídas.

Tomando como referencia el promedio de los valores de N por capas definidas con el perfil geotécnico, se calcularon las velocidades de corte estimadas según las ecuaciones de correlación de Imai y Yoshimura (1970), Ohta y Goto (1978) y Campos (2004) y con éstas, la velocidad promedio de onda de corte según la norma COVENIN 1756 (2001) para, posteriormente, comparar estos resultados con las velocidades promedios mostradas en la tabla 5. El procedimiento tiene como fin evaluar la aplicación a priori de las ecuaciones, en otros sitios que en el futuro sean explorados, sin necesidad de llevar a cabo una adquisición sísmica de pozo.

Adicionalmente, siguiendo con la metodología de Campos (2004), se correlacionaron los valores del número de golpes N con las velocidades de corte por profundidad y por capas interpretadas para cada sitio explorado para este proyecto, haciendo uso del programa estadístico SPSS versión 12 para Windows (Capítulo VII).

Resultados y Discusión de Resultados.

La aplicación del ensayo SPT en cada sitio de estudio arrojó un perfil litológico que contiene la información obtenida en campo (Apéndice C). Al número de golpes N se les aplicó las correcciones respectivas. Sólo en el sector Los Chorros pudo calcularse la corrección por confinamiento en arenas ($N_{1(60)}$) en tres niveles, tal como lo estipula la norma COVENIN 1756 (2001); en consecuencia, los resultados reportados se basan principalmente en el valor de N y de N_{60} .

De acuerdo con De Marco (2000), el valor de la eficiencia suministrada por el sistema de perforación es 42%, pero a partir de los 10 m. de profundidad. Por encima de este nivel la eficiencia energética es menor.

Las figuras 37, 38 y 39 agrupan los resultados de las pruebas de campo del ensayo SPT y la corrección realizada para eliminar los efectos producidos por el equipo de perforación. La primera observación evidente en los gráficos es la disminución del número de golpes una vez aplicada la corrección por pérdida de energía o disminución de la eficiencia energética debida a la influencia del sistema de barras.

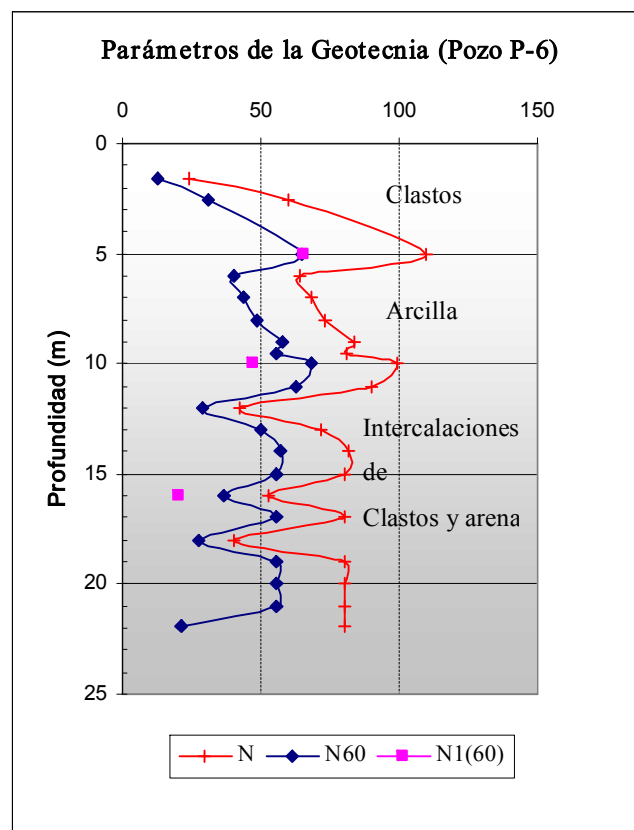


Figura 37. Gráfico de valores de N , N_{60} , $N_{1(60)}$ por nivel de profundidad en Los Chorros.

La figura 37 refleja la variación de los parámetros N , N_{60} , $N'_{(60)}$ en el pozo P-6, ubicado hacia el norte del valle de Caracas, relacionada con el ambiente caótico de la facie proximal del valle. No obstante, el comportamiento de las curvas entre los niveles 5, 11 y 20 m permite visualizar

ciertas capas que son totalmente coherentes con la descripción litológica del pozo.

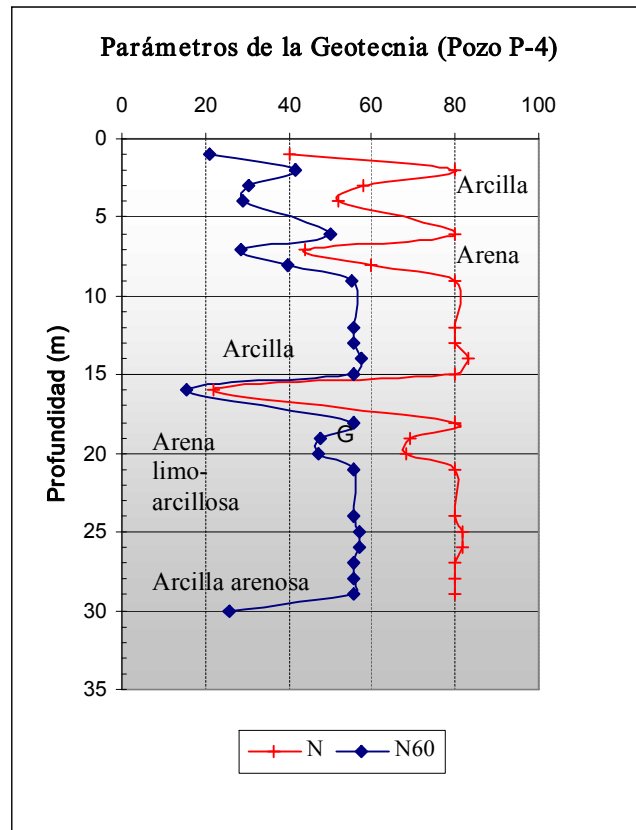


Figura 38. Gráfico de valores de N, N₆₀ por nivel de profundidad en Sebucán.

En Sebucán, la forma de las curvas ha permitido establecer estratos intercalados de arcilla y arena. Los valores de N cercanos a 80 golpes están asociados a capas con fragmentos de esquistos (que se desintegran al presionarlos con los dedos) y gneis muy meteorizados. Los tipos de sedimentos encontrados en este pozo forman parte de la facie proximal del valle de Caracas.

En general, los valores de N, así como sus respectivo N₆₀, son inferiores en el pozo ubicado al sur del valle en comparación con los situados al norte. La figura 39 muestra menor variación de los parámetros obtenidos en el sector La Carlota. Este comportamiento se debe a la presencia de sedimentos menos heterogéneos de compacidad media a densa pertenecientes a la facie distal

descrita por Singer (1977). De manera opuesta, los sedimentos de los sectores Sebucán y Los Chorros, son densos a muy densos.

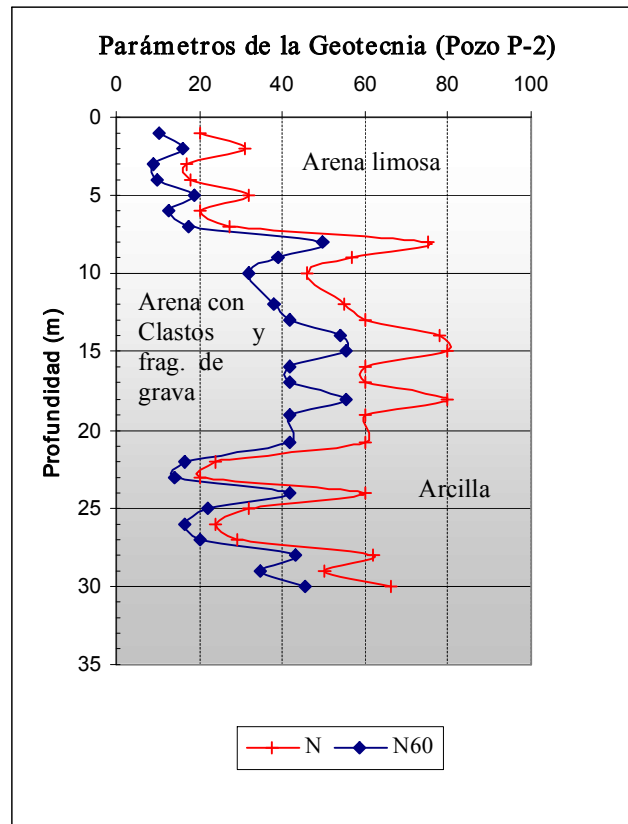


Figura 39. Gráfico de valores de N, N₆₀ por nivel de profundidad en La Carlota.

En función de la experiencia obtenida durante la perforación geotécnica de los pozos, se puede afirmar que en la mayoría de los niveles donde el valor de N fue superior a los 80 golpes, sobre todo en el sector Los Chorros, el ensayo no reprodujo la resistencia a la penetración como tal, debido a la obstrucción del saca muestras por la presencia de suelos cuya constitución eran clastos de esquistos, fragmentos de cuarzo y muy bajo contenido de suelo fino (Ver apéndice C), inclusive el muestreo se suspendía antes de penetrar los 45 cm porque el saca muestra quedaba obstruido por la presencia de partículas grandes impidiendo su avance y generando un número de golpes no asociado al proceso de penetración como tal sino a la obstrucción de la cuchara partida.

Debido a ello, la perforación geotécnica en Los Chorros se suspendió a los 22m.

CAPÍTULO VII. ANÁLISIS INTEGRADO DE LOS RESULTADOS.

Los Chorros.

La tabla 11 engloba los parámetros definidos con el “*Downhole*” y la geotecnia según las estratificaciones interpretadas con ambos métodos en los capítulos anteriores. Los colores utilizados se han colocado en función de la descripción visual in situ de las muestras extraídas de la perforación geotécnica.

El perfil litológico del pozo P-6 refleja el ambiente caótico encontrado en el sitio. No obstante, se ha logrado evidenciar la presencia de tres capas de suelo con la geotecnia, en general, formadas por intercalaciones de clastos de esquistos, arcilla y arena de las cuales, las dos primeras se correlacionan con los resultados de la sísmica de pozos, sobre todo a nivel de interfases. A partir de los 9 m, con la sísmica se aprecian tres capas adicionales cuyas interfases marcan el tope o base de capas arenosas.

Tabla 11. Distribución de capas con el *Downhole* y la Geotecnia (Pozo P-6, Los Chorros).

Prof. (m)	V _P (V _S) (m/s)	Geotecnia		
		N	N ₆₀	Litología
0-5	1062 (324) v = 0,45	42	22	Arcilla de baja plasticidad limosa. Peñones a partir de 1,55 m.
				Clastos de ESQUISTO cuarzo muscovítico feldespático
				Fragmentos roca cuarcítica
				Clastos ESQUISTO meteorizado cuarcítico con arena gruesa
5-9	796 (406) v = 0,32	80	51	Arcilla arenosa con vetas de óxido de hierro
				Arcilla de alta plasticidad arenosa con esquistos meteorizados
9-13	622 (381) v = 0,20	74	52	Clastos de ESQUISTO muy meteorizado con arena fina
				ESQUISTO de cuarzo muscovítico biotítico muy meteorizado con fragmentos de cuarzo. Canto rodado en la base
Clastos de ESQUISTO meteorizado a arcilla				
Arena fina con fragmentos de cuarzo				
Clastos de ESQUISTO cuarcítico muy meteorizado				
13-21	747 (487) v = 0,13			Arcilla (baja plas.) con fragmentos de roca esquistosa y cuarcítica
				Clastos de Gneiss cuarcítico muy meteorizado a arena fina con fragmentos de Qz.
				Clastos de ESQUISTO en matriz de arcilla con fragmentos de cuarzo
				Matriz de arena fina arcillosa con fragmentos de esquistos cuarcíticos
21-22	1029 (621) v = 0,21			Arena fina limosa
				Clastos de ESQUISTO cuarzo micáceo meteorizado en arcilla

La distribución de capas hecha con el perfil geotécnico permitió calcular las velocidades promedio de ondas de corte según la norma COVENIN 1756 (2001) y el Vs30, haciendo uso de las ecuaciones 1, 2 y 3, con el fin de evaluar cuál de éstas se ajusta mejor a las condiciones del pozo P-6 en comparación con las determinadas con la sísmica (tabla 12).

Tabla 12. Velocidad promedio de ondas de corte y Vs30 calculadas según distintas curvas de ajuste en comparación con los resultados del *Downhole* en Los Chorros.

Sísmica			Geotecnia			Velocidad de corte (m/s)		
Prof (m)	Espesor (m)	V _s (m/s)	Prof (m)	Espesor (m)	N	Ohta y Goto	Imai y Yoshimura	Campos
1	5	324	0,0	4,6	42	313	321	423
5	4	406	4,6	4,5	80	392	400	544
9	4	381	9,0	13	74	381	389	527
13	8	487						
21	7	588						
Vsp	402					NA	NA	423
Espectro	S1							S1
Suelo	Muy duro o muy denso							Muy duro o muy denso
Vs30	468					500	511	688

Como puede apreciarse, la velocidad promedio de onda de corte en los primeros 30 m es próxima a 400 m/s. Con las ecuaciones de Ohta y Goto (1978) e Imai y Yoshimura (1970) no se pudo aplicar (NA) la definición de Vsp porque ningún estrato dio velocidades superiores a los 500 m/s. La ecuación de Campos (2004) se ajustó a las condiciones del pozo, difiriendo sólo en 21 m/s; en consecuencia, se obtuvo el mismo tipo de forma espectral (S1) que con la sísmica. Si se emplea el parámetro Vs30 para definir la aceleración espectral asociada al pozo, en vez del Vsp, ésta sería de tipo S2.

Las ecuaciones de ajuste en este pozo presentaron, en general, dispersión respecto a las velocidades sísmicas (figura 40).

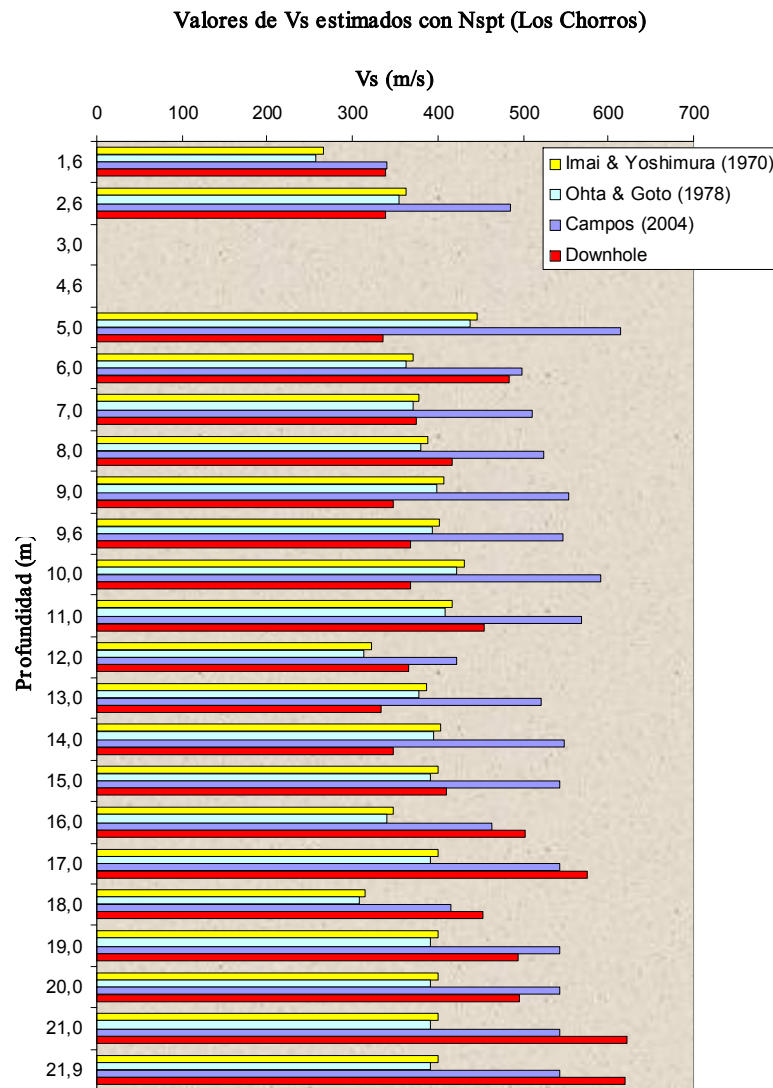


Figura 40. Gráfico comparativo entre las velocidades de ondas de corte estimadas con curvas empíricas y las del *Downhole* en Los Chorros.

Para los primeros 5 m de profundidad del pozo, las velocidades de onda “S” determinadas con el “*Downhole*”, coinciden con las obtenidas por Morales (2006) en el mismo sitio de estudio (figura 41). Sin embargo, el mismo autor reportó velocidades superiores a los 500 m/s a partir de los 3 m y sólo pudo interpretar dos capas, difiriendo así de la sísmica de pozo. La discrepancia se atribuye al mayor nivel de resolución que ofrece el *Downhole* ante el método

refracción sísmica y que con éste, no se evidencian las reducciones de velocidad (9 y 21 m).

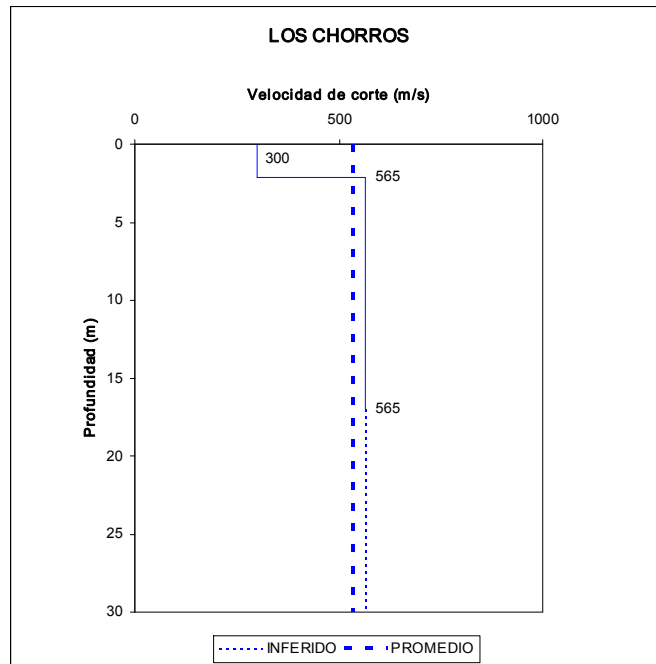


Figura 41. Modelo unidimensional obtenido con refracción sísmica superficial en Los Chorros (Morales, 2006).

En lo que respecta al análisis estadístico de los datos del pozo, los coeficientes de correlación entre las variables $N-V_s$ y $N_{60}-V_s$ son 0,079 y 0,174, respectivamente; valores éstos muy bajos. Al realizar el análisis en función de los datos filtrados en un 24%; es decir, sin considerar aquellos pares ordenados (N , V_s) inconsistentes; se obtuvieron las curvas de ajuste con una correlación superior al 49% (figura 42). Los parámetros que avalan este análisis se resumen en la figura 44.

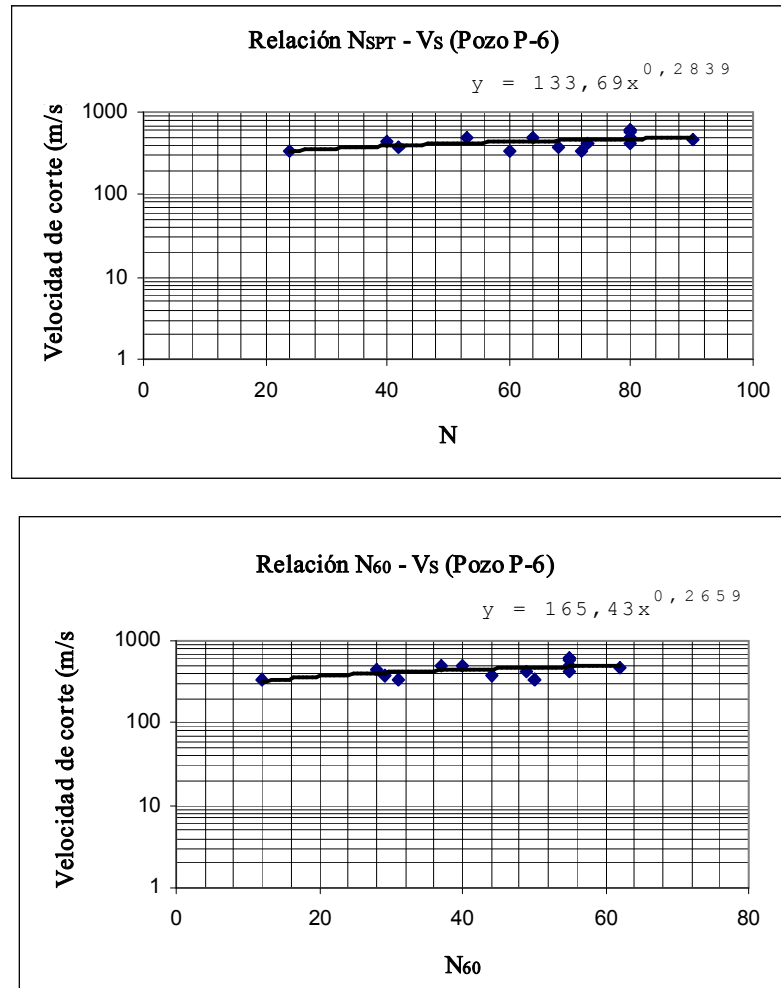


Figura 42. Gráficos de correlación de las variables N , N_{60} contra velocidad de corte. Pozo P-6, Los Chorros.

El análisis estadístico realizado en función del número de capas litológicas (tabla 11, figura 43), significó un ajuste más representativo (coeficientes R cuadrado de las variables N y N_{60} , equivalentes a 0,80 y 0,89, respectivamente).

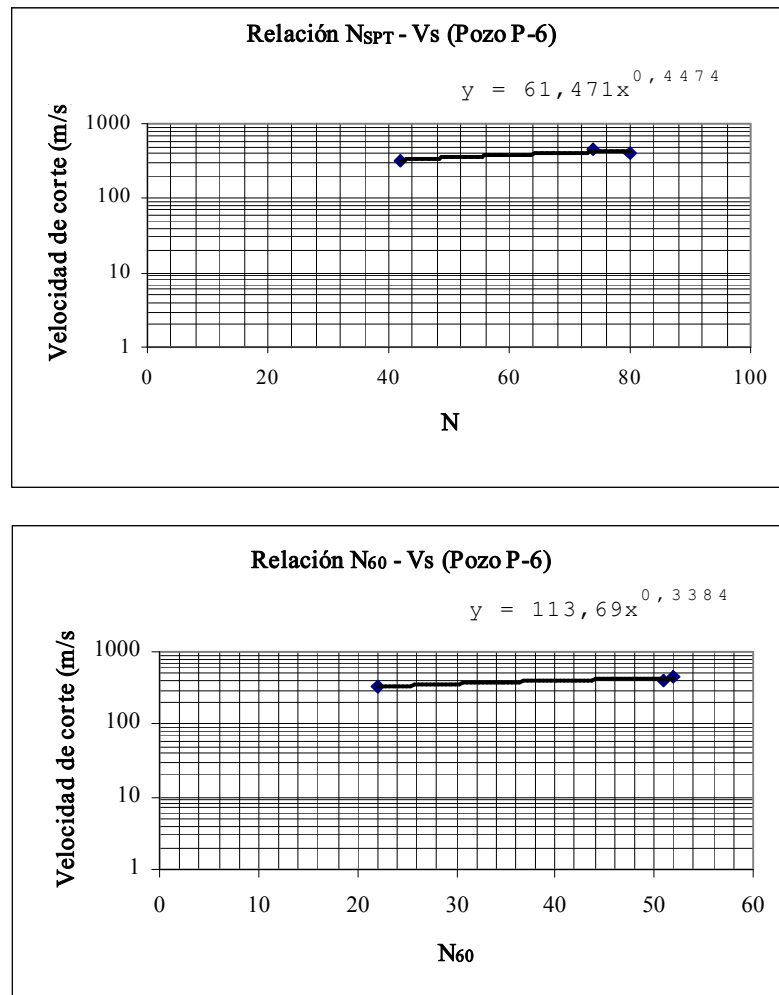


Figura 43. Gráficos de correlación (por capas) de las variables N , N_{60} contra velocidad de corte.
Pozo P-6, Los Chorros.

En la figura 44, los valores de significancia para el coeficiente F y los coeficientes T tanto para la variable independiente, N , como para la constante, son menores a la probabilidad teórica de datos poco confiables (0,10). Además, el análisis de residuos muestra que la varianza de los residuos no guarda ninguna relación sistemática. En consecuencia, el modelo de ajuste encontrado con un 90 % de confianza y con el 85% de las muestras es satisfactorio y está representado por la ecuación: $V_s = 133,69x^{0,284N}$.

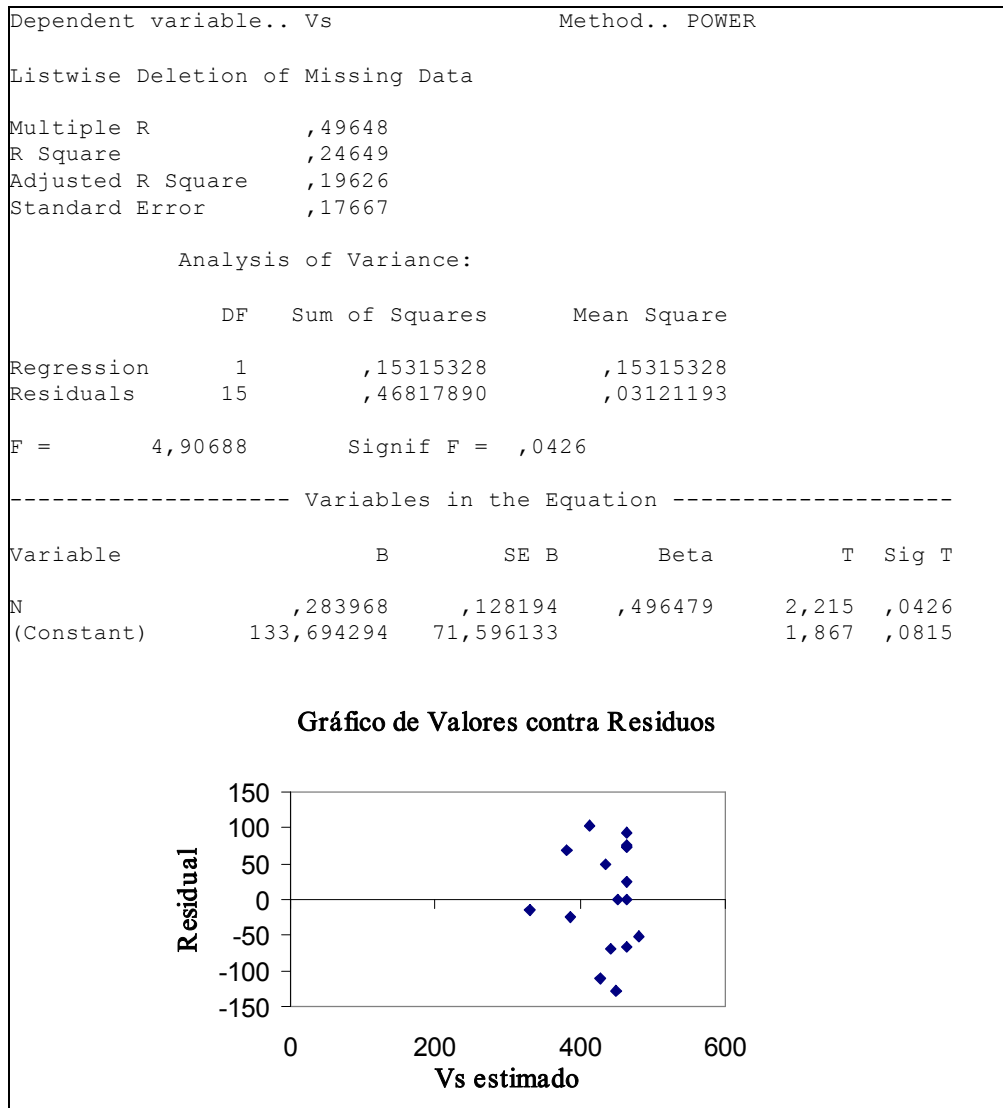


Figura 44. Análisis estadístico de los datos del pozo P-6, Los Chorros.

En el caso de la variable N_{60} , los valores de significancia resultaron menores a 0,05, siendo éste aun más aceptable que para el caso de la variable N.

A juicio de la autora, la correlación de los datos muestra lo difícil que es encontrar una relación entre las variables N-Vs en suelos cuyo ambiente de depositación es similar al encontrado en el pozo P-6 (caótico de granulometría gruesa), más aún cuando durante la perforación geotécnica se evidenció la obstrucción del saca muestra por la presencia de clastos y fragmentos grandes de material, sin poderse medir realmente la resistencia a la penetración en

ciertos niveles de muestreo. Se ha demostrado que la prueba de penetración estándar no da buenos resultados cuando se aplica sobre suelos de esta naturaleza (conversación personal con Alviar, Junio 2006).

Sebucán.

En la tabla 13 se agruparon los parámetros definidos con el “*Downhole*” y la geotecnia de acuerdo con las capas interpretadas según ambos métodos.

Tabla 13. Distribución de capas con el *Downhole* y la Geotecnia (Pozo P-4, Sebucán).

Prof. (m)	Vp (Vs) (m/s)	Geotecnia		
		N	N ₆₀	Litología
0-6	688 (403) u = 0,23	58	31	CL arenosa. Marrón grisáceo oscuro
				CL arenosa. Marrón amarillento
6-16	814 (462) u = 0,26	71	47	SM-SC (esquisto micáceo meteorizado) marrón amarillento y verde oliva
				CL arenosa
		81	57	CL muy arenosa (Esquisto micáceo meteorizado blando)
16-30	1550 (619) u = 0,26	71	50	SC fina.
				SM-SC con fragmentos de esquistos y gneiss descompuestos blandos. Marrón y gris
		72	57	SC con fragmentos de esquistos y gneiss descompuestos blandos. Marrón y gris
				CL con arena fina

La sísmica describe muy bien la capa de arcilla de baja plasticidad en los primeros 5 m; sin embargo, la interfase marcada está a los 6 m, difiriendo de la geotecnia en un metro, no obstante, esta diferencia podría ser en realidad 0,55 m ya que, la muestra que se clasifica en sitio es la que se recupera de los últimos 45 cm por cada metro de muestreo (capítulo 6). Visto el modelo 1D del “*Downhole*” con mayor nivel de detalle, entre los 11 y 12 m el valor de gamma cambia de 38 a 21, siendo esto coherente con el cambio de suelo arenoso limo – arcilloso a arcilla de baja plasticidad a los 11 m con la geotecnia. A partir de 16 m, con la sísmica se logró agrupar las capas de arena con mayor o menor contenido de finos que definió la geotecnia. Cabe reseñar, que el cambio de un suelo arenoso limo arcilloso a otro arenoso netamente arcilloso, se debe a la variación de finos entre 5 a 12 % a más de 12%, en conjunción con el valor del índice de plasticidad. La sísmica no diferencia la última capa de arcilla de baja plasticidad. En general, se considera que la variación de los niveles de interfase con ambos métodos es despreciable.

Por otra parte, la distribución de capas hecha con la geotecnia permitió calcular las velocidades promedio de ondas de corte según la norma COVENIN 1756 (2001) y el Vs30, haciendo uso de las ecuaciones 1, 2 y 3 para evaluar cuál de éstas se ajustaba mejor a las condiciones del pozo P-4 en comparación con las determinadas con la sísmica (tabla 14).

Tabla 14. Velocidad promedio de ondas de corte y Vs30 calculadas según distintas curvas de ajuste en comparación con los resultados del *Downhole* en Sebucán.

Sísmica			Geotecnia			Velocidad de corte (m/s)		
Prof. (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Prof. (m)	Espesor (m)	N			
						Ohta y Goto	Imai y Yoshimura	Campos
0	6	403	0	5	58	351	359	480
6	10	462	5	6	71	376	384	519
16	14	619	11	4	81	394	402	546
30			15	10	71	376	384	519
			25	5	72	378	386	522
Vsp	438					NA	NA	480
Espectro	S1							S1
Suelo	Muy duro o muy denso							Muy duro o muy denso
Vs30	507					374	382	516

Para este pozo, al igual que el localizado en Los Chorros, la velocidad promedio de ondas de corte calculada con la ecuación de Campos (2004) es la que se ajusta, inclusive el parámetro V_{s30} , difiriendo sólo 42 m/s más. Mientras que las ecuaciones de Ohta y Goto (1978) e Imai y Yoshimura (1970) no tuvieron aplicabilidad (NA) para el cálculo del V_{sp} . El hecho de emplear la definición de V_{s30} para inferir la forma espectral tipificada, ocasiona un aumento en la ordenada del espectro originando el espectro S2.

La figura 45 permite apreciar las diferencias encontradas al calcular la velocidad de ondas S con las ecuaciones 1, 2 y 3 y las propias del pozo. En los primeros 7 m, las diferencias de velocidades no son tan marcadas. A partir de los 9 m las ecuaciones de Ohta y Goto (1978) e Imai y Yoshimura (1970) producen velocidades distintas de la sísmica, y la ecuación de Campos (2004) reproduce velocidades superiores pero razonables en función de los resultados de la tabla 14.

En promedio, las velocidades de onda de corte en los primeros 16 m. obtenidas con la sísmica, son próximas a 460 m/s, siendo estos resultados equiparables con los de Weston (1969) en una zona cercana a Sebucán (Los Palos Grandes (Ver tabla No. 1). Posiblemente, la diferencia de velocidades a partir de los 16 m se deba a las características intrínsecas de los sedimentos propios del pozo P-4.

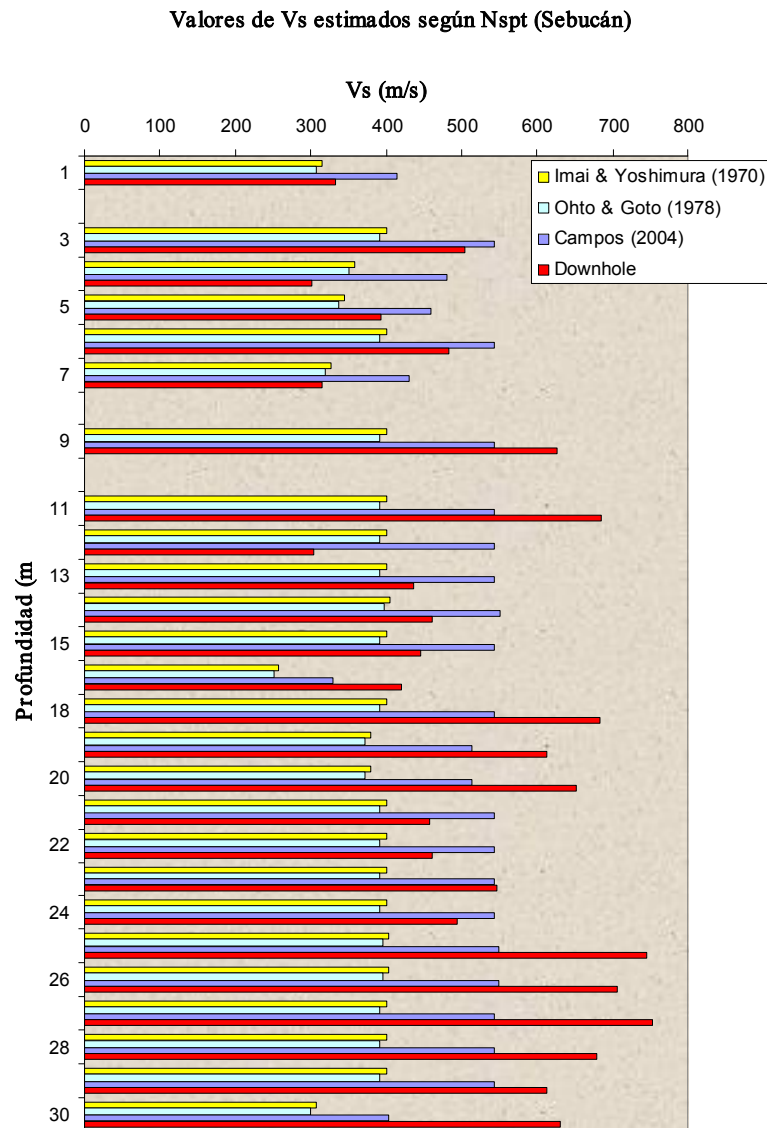


Figura 45. Gráfico comparativo entre las velocidades de ondas de corte estimadas con curvas empíricas y las del *Downhole* en Sebucán.

En lo que respecta al análisis estadístico de los datos (figuras 46 y 47), se encontró una correlación entre las variables $N-V_s$ y $N_{60}-V_s$ de 0,40 y 0,48, respectivamente. Con el 15% de los datos filtrados (27 muestras en total), los mismos aumentaron a 0,76 y 0,85 (se aplicó el mismo criterio de filtrado del

pozo P-6). A diferencia del pozo de Los Chorros, el modelo que mejor se ajusta a los datos del pozo P-4 es el exponencial.

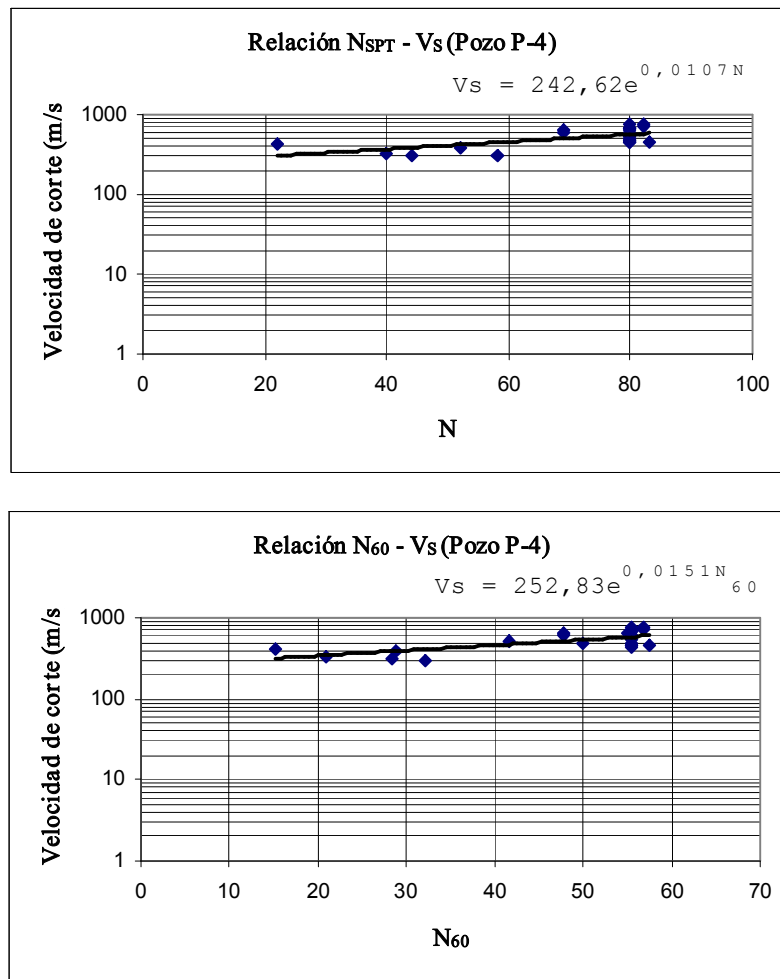


Figura 46. Gráficos de correlación de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-4, Sebucán.

La significancia del coeficiente F y los coeficientes T , tanto para la variable independiente como para la constante tienden a cero, siendo estos inferiores a la probabilidad teórica (0,05) de datos poco confiables. Además, el análisis de residuos muestra que la varianza de los residuos no guarda ninguna relación sistemática. Por lo tanto, el modelo de ajuste encontrado con un 95 % de confianza y con el 85% de las muestras, estadísticamente es satisfactorio, y está representado por la ecuación: $V_s = 242,62e^{0,0107N}$.

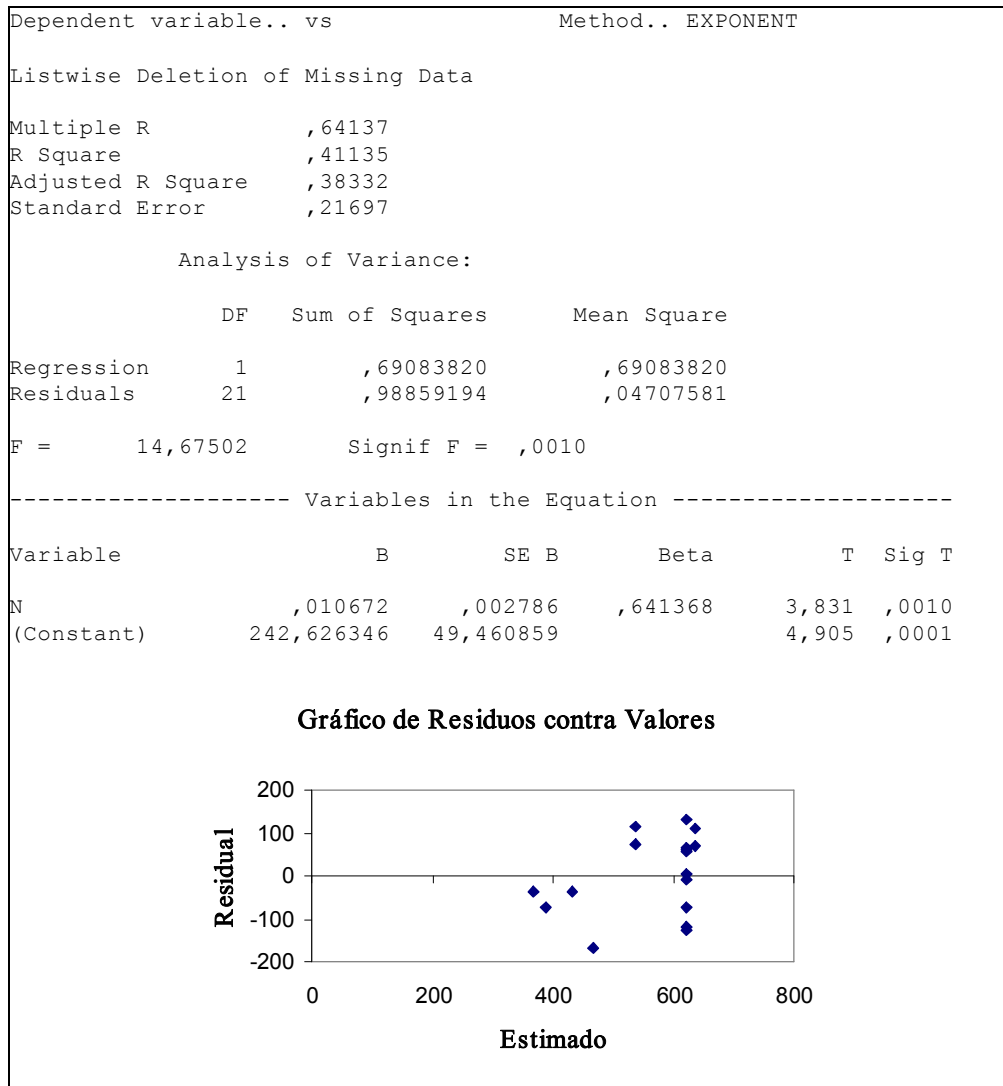


Figura 47. Resultados del análisis estadístico de los datos del pozo P-4, Sebucán.

En el caso de la variable N_{60} , los valores de significancia resultaron también menores a 0,05, siendo éstos aun más aceptable que para la variable N . En consecuencia, el modelo de ajuste encontrado fue: $V_s = 252,83e^{0,0151N_{60}}$.

Con la definición de capas (tabla 13), el coeficiente de correlación entre las variables N - V_s fue 0,22 y entre las variables N_{60} - V_s , 0,56 para un modelo de ajuste tipo potencial (figura 48); al igual que el resto de los pozos. Sin embargo, los valores de N y N_{60} aparentemente no definen bien el

comportamiento de la variable V_s , debido a que los valores de R cuadrado fueron 0,09 y 0,36, respectivamente.

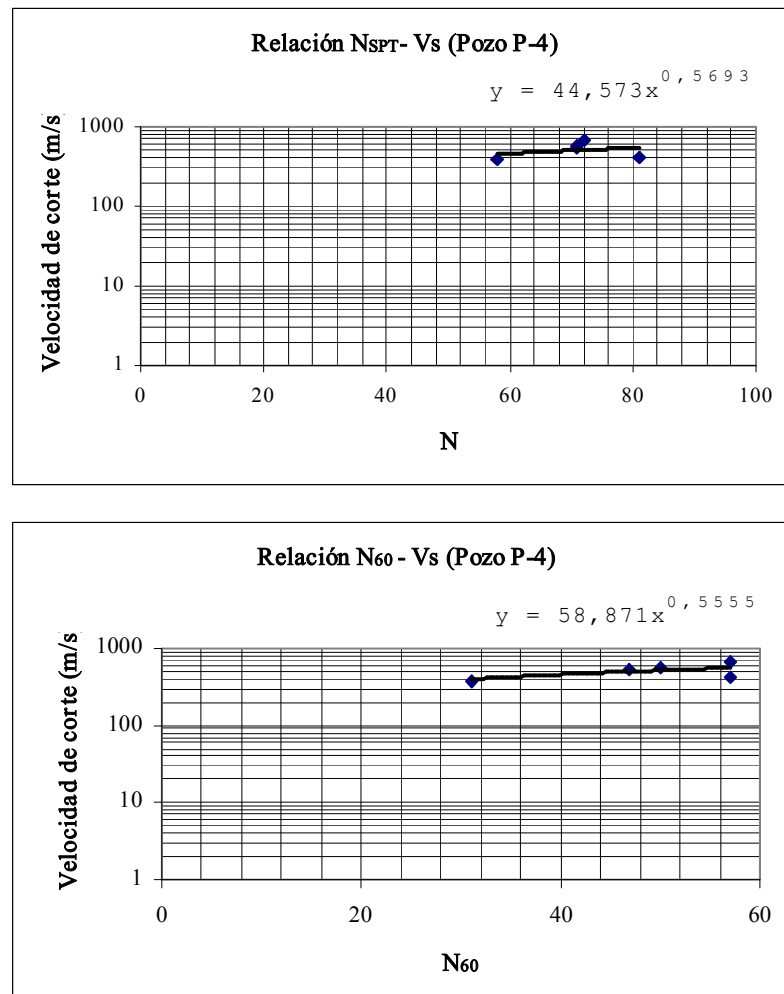


Figura 48. Gráficos de correlación (por capas) de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-6, Los Chorros.

La inconsistencia obtenida en los modelos de ajuste para este pozo, se atribuye a que más del 65% de los datos está representado por un número de golpes igual a 80 (ver gráfico de residuos), con velocidades de onda S variables. Es por ello, que al agrupar los datos según la definición de capas litológicas, el modelo de ajuste conseguido tiene la forma de las ecuaciones empíricas (1, 2 y 3) y la de los pozos ubicados en Los Chorros y La Carlota. Como conclusión,

el modelo que se tomaría como más confiable en este caso, es el realizado en base a capas litológicas.

La Carlota.

La tabla 15 agrupa los parámetros definidos con el “*Downhole*” y la geotecnia en función de las capas interpretadas con ambos métodos.

Tabla 15. Distribución de capas según Downhole y Geotecnia en Pozo P-2 (INPARQUES).

Prof. (m)	V _P (V _S) (m/s)	Geotecnia		
		N	N ₆₀	Litología
0-4	736 (169) v=0,47	24	13	Arena fina limosa (relleno) compacidad media y densa
4-7	1140 (309) v=0,46			
7-26	1731 (300) (suelo saturado hasta 22 m, v =0,48)	64	44	Arena fina a gruesa (muy densa) con grava y fragmentos de Qz, esquisto y gneis
				Arena (muy densa) con clastos meteorizados de gneis y esquisto. Gris claro entre 17 y 18 m.
				Arena media con fragmentos de grava
		32	22	Arcilla de baja plasticidad (muy firme) con fragmentos de Qz y esquisto
				Arena arcillosa con fragmentos de QZ y esquisto
26-30	1882 (341) u =0,48)	59	41	Arcilla de baja plasticidad limosa (muy firme), fragmentos de Qz y esquisto, verdoso amarillento con puntos negros
				Arcilla de baja plasticidad (dura) con bloques meteorizados de esquisto con presencia de Qz, feldespatos, mica

La sísmica muestra en los primeros 7 metros las variaciones de velocidad, seguramente debido a los cambios de densidad de la arena presente en el pozo. A partir de este nivel y hasta los 22 m, las velocidades de onda P y el módulo de Poisson marcan un estrato saturado el cual coincide con las arenas vistas con la geotecnia (capas permeables). A un mayor nivel de detalle de los resultados del *Downhole* (figura 22), entre los 21 y 25 m las velocidades de onda P son superiores y las de onda S inferiores, con respecto a su promedio, asociándose este comportamiento efectivamente a la presencia de las arcillas de baja plasticidad que mostró la geotecnia; de hecho, las velocidades de onda compresiva, tanto de esta capa como la ubicada a los 26 m, son superiores a los 1800 m/s. En consecuencia, a pesar de que la tabla 15 muestra un pozo con velocidades cuyas desviaciones son bajas respecto al promedio (suelo homogéneo), las pequeñas variaciones en las propiedades dinámicas muestran el nivel de detalle que proporciona el *Downhole*.

Con las ecuaciones 1, 2 y 3 y en función de la distribución de capas, se calcularon las velocidades de ondas de corte para obtener el parámetro V_{sp} , según la norma COVENIN 1756 (2001), y el V_{s30} (tabla 16).

Tabla 16. Velocidad promedio de ondas de corte y V_{s30} calculadas según distintas curvas de ajuste en comparación con los resultados del *Downhole* en INPARQUES (Pozo P-2).

Sísmica			Geotecnia			Velocidad de corte (m/s)		
Prof. (m)	Espesor (m)	V_s (m/s)	Prof. (m)	Espesor (m)	N	Ohta y Goto	Imai y Yoshimura	Campos
0	3	169	0	7	24	258	265	340
3	4	309	7	14	64	363	371	499
7	19	289	21	6	32	285	293	381
26	3	341	27	3	59	353	361	483
V_{sp} Espectro		NA				NA	NA	NA
V_{s30}		311				315	323	425

Por encima de los 30 m de profundidad, en el pozo P-2 no se localizaron estratos con velocidades de onda S superiores a 500 m/s, ni con la sísmica de pozos ni con las ecuaciones empíricas utilizadas; es por ello, que no se pudo calcular el parámetro V_{sp} (NA). En cambio, el V_{s30} calculado con las ecuaciones de Ohta y Goto (1978) y de Imai y Yoshimura (1970) se ajusta al

calculado con la sísmica del pozo infiriéndose la misma forma espectral en este sitio. La ecuación de Campos (2004), a pesar de originar también el espectro S2 (suelos duros o densos), produce velocidades mayores. Estas variaciones pueden verse claramente en la siguiente figura.

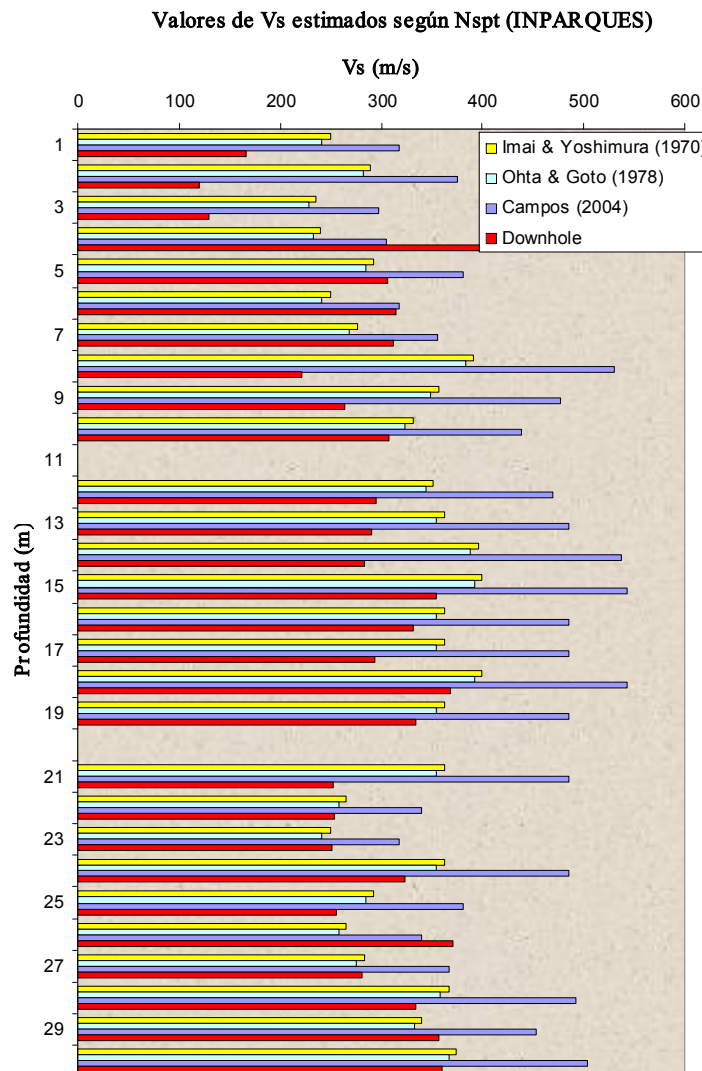


Figura 49. Gráfico comparativo de las velocidades de ondas de corte estimadas con curvas empíricas y las del *Downhole* en La Carlota.

En lo que se refiere al análisis estadístico de los datos, con el 89 % de los datos del pozo, los coeficientes de correlación entre las variables N- V_s y

N_{60} - V_s equivalentes a 0,52 y 0,54, respectivamente. Para este caso, se consideraron sólo los pares ordenados (N , V_s) consistentes (figura 50 y 51).

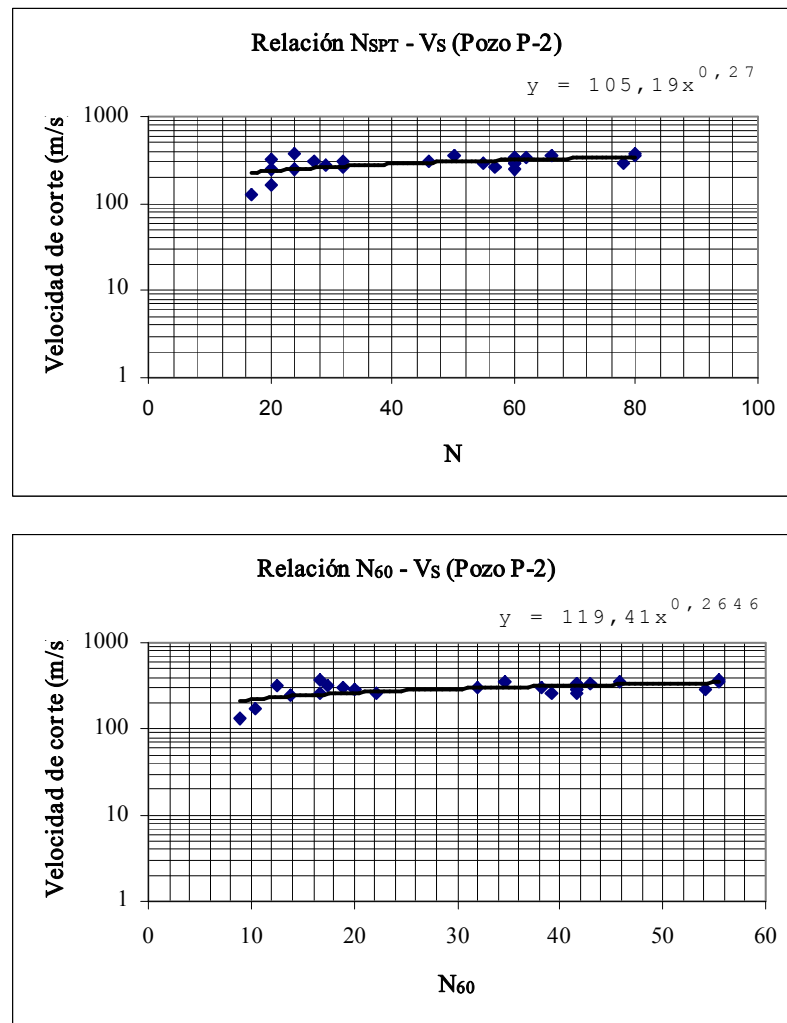


Figura 50. Gráficos de correlación de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-2, La Carlota.

El análisis estadístico realizado en función del número de capas litológicas (tabla 15, figura 49), significó un ajuste más representativo (coeficientes R cuadrado de las variables N y N_{60} , equivalentes a 0,70 y 0,75, respectivamente) con una correlación superior al 78%.

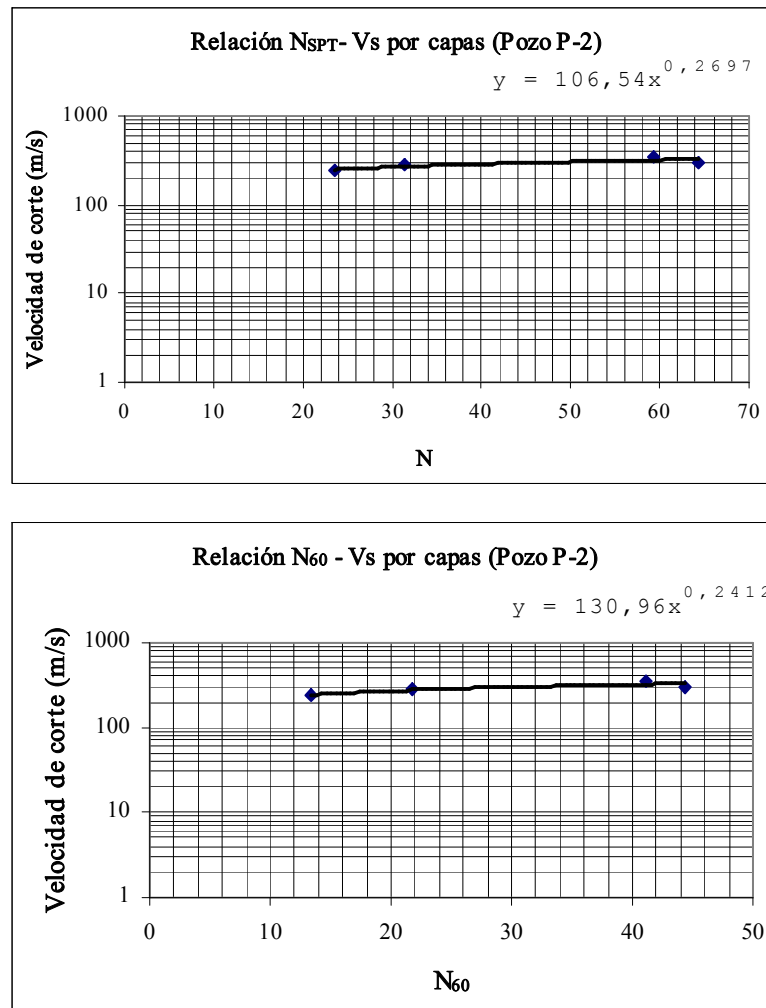


Figura 51. Gráficos de correlación (por capas según la geotecnia) de las variables N , N_{60} y V_s . Pozo P-2, La Carlota.

La significancia para el coeficiente F y el coeficiente T (figura 52), tanto de la variable independiente como de la constante, son menores a la probabilidad teórica (0,05) de datos poco confiables. El análisis de residuos muestra además que la varianza de los residuos no guarda ninguna relación sistemática. Por lo tanto, el modelo de ajuste encontrado con un 95 % de confianza y con el 89% de las muestras es satisfactorio y está representado por la ecuación: $V_s = 105,19e^{0,27N}$. En el caso de la variable N_{60} , los valores de

significancia resultaron ser aun más aceptable que para el caso de la variable N y la ecuación de ajuste resultó: $Vs = 119,419e^{0,2646 N_{60}}$

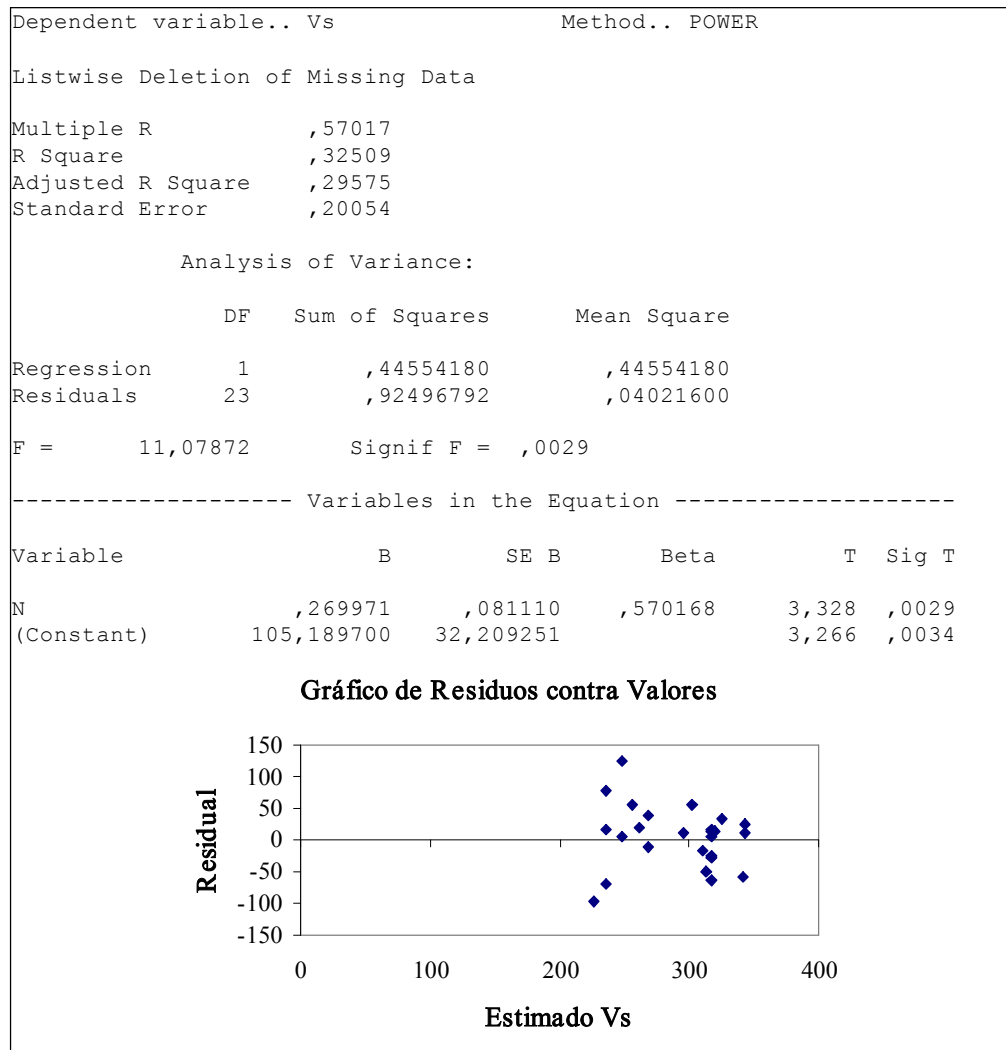


Figura 52. Análisis estadístico de los datos del pozo P-2, La Carlota.

Para este pozo, posiblemente las características de los sedimentos son similares a la de los pozos con los cuales se obtuvieron las ecuaciones empíricas (1, 2 y 3) utilizadas en este trabajo, por esta razón, es posible que los coeficientes de los modelos de ajuste encontrados, sean semejantes a los de tales ecuaciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La evaluación sísmica y geotécnica de los pozos de las zonas de estudio permitió evidenciar las diferencias encontradas entre los pozos ubicados al norte y al sur del valle de Caracas, en cuanto a las propiedades dinámicas y características de los suelos presentes.

Los perfiles de pozos se definieron principalmente con los resultados del método “*Downhole*”. En los sectores Los Chorros y Sebuacán (hacia el norte del valle), las velocidades de onda P resultaron ser en promedio equivalentes a 870 y 1160 m/s, respectivamente, mientras que en La Carlota superan los 1500 m/s debido a la presencia de estratos permeables saturados con agua. En lo que respecta a las ondas S, el comportamiento fue contrario; las mayores velocidades están hacia el norte, en promedio: 450 y 530 m/s en Los Chorros y Sebuacán, respectivamente, y en La Carlota, 290 a 340 m/s (considerando los dos pozos evaluados en el sector); en este caso, la diferencia se atribuye a la condición de suelos menos densos y de granulometría más fina presentes en el lugar. Con los perfiles geotécnicos se constató las características de estos sedimentos, pertenecientes a las facies proximal y distal descritas por Singer (1977) de los materiales aluvionales y coluviales del valle de Caracas.

En comparación con otros estudios, las velocidades de ondas de cizalla obtenidas por Morales (2006) en el colegio Don Simón en Los Chorros, coinciden sólo hasta los 5 m de profundidad; por debajo de este nivel, la diferencia se atribuye al alto nivel de resolución que ofrece el método *Downhole* en comparación con el método de refracción sísmica, sobre todo considerando que con este último no se observan las reducciones de velocidad a lo largo del perfil del subsuelo, que especialmente en esta zona quedó evidenciado con el modelo 1D y con las características de los sedimentos extraídos de las perforaciones realizadas en este lugar. En lo que respecta al sector Sebuacán, los resultados son coherentes hasta los 16 m con los obtenidos por Weston (1969) mediante refracción sísmica en Los Palos Grandes (zona

aledaña). Las diferencias de velocidades a partir de los 16 m se atribuyen a las propiedades intrínsecas del pozo evaluado en este trabajo. En el sector La Carlota, los resultados del *Downhole* son coherentes con los hallados por Weston (1969) y Kantak (2001) en Parque del Este.

En lo que se refiere al método “*Crosshole*”, las velocidades de ondas compresivas determinadas en la urbanización Sebucán, presentaron una desviación máxima de 5,7% con respecto al “*Downhole*”, mientras que con las velocidades de ondas de corte fueron 22 % (10 -16 m) y 2,6% (16 a 30 m). En consecuencia, la fuente de energía suministrada por el saca muestra del Ensayo de Penetración Estándar utilizada para aplicar este método reprodujo resultados cónsonos con el “*Downhole*” por lo que la metodología es factible de usar, siempre y cuando se disponga de los equipos y las condiciones necesarias para su ejecución, no obstante, sería conveniente validarla aplicándola en estudios futuros.

En base al análisis de los resultados y a las comparaciones realizadas, se evidencia la fortaleza de los métodos sísmicos “*Downhole*” y “*Crosshole*” para describir las propiedades dinámicas de suelos aluvionales y coluviales, por lo que su aporte es insustituible a la hora de evaluar qué método sísmico proporciona altos niveles de resolución para establecer el perfil geotécnico necesario para definir la forma espectral tipificada de acuerdo con la norma COVENIN 1756 (2001) para el diseño sismorresistentes de estructuras. Como consecuencia de la aplicación de esta norma, en las zonas estudiadas para este trabajo se obtuvo que el espectro de aceleración asociado a los pozos ubicados al norte del valle de Caracas es el S1 (suelos muy densos o muy duros) con velocidades promedio de ondas de corte entre 500 y 600 m/s y para los pozos ubicados al sur del valle es el S2 (suelos duros o densos) con velocidades promedio de ondas de corte próximas a 300 m/s.

El empleo del parámetro Vs30 no debería utilizarse para establecer la forma espectral de suelos según las especificaciones de la norma COVENIN 1756 (2001) sino el Vsp mediante sísmica de pozos.

Las velocidades promedio de onda de corte obtenidas sólo en función de los parámetros de la geotecnia y de las curvas de estimación empleadas, presentaron dispersión al compararlas entre sí y con las velocidades de la sísmica de pozos. Sin embargo, en términos generales, la ecuación de Campos (2004), que reproduce velocidades mayores que las otras ecuaciones de estimación, fue la que más se ajustó a las características de los pozos ubicados en Los Chorros y Sebugán. Las ecuaciones de Ohta y Goto (1978) e Imai y Yoshimura (1970) se ajustaron a las características de los sedimentos del pozo ubicado al norte de la sede de INPARQUES en La Carlota.

A juicio de la autora, no es suficiente comparar la velocidad de corte con mediciones directas del ensayo SPT, debido a que en este caso ni siquiera se ha corregido por pérdida de energía debido al efecto del sistema de barras. La relación entre N y V_s no es unívoca, sino que depende de las condiciones del material in situ. Generalmente, dichas ecuaciones relacionan dos o tres variables, cuando en el subsuelo se pueden encontrar otras que también modifican el comportamiento esperado como lo son: porosidad, permeabilidad, tamaño de los granos, saturación, entre otros. De hecho, las curvas obtenidas en este trabajo se sugiere emplearlas como referencia para futuros trabajos ya que la población de los datos no fue representativa. En general se observó, que las curvas de mejor ajuste son las que relacionan el número de golpes corregidos por efecto de pérdida de energía en el sistema de barras con velocidades de propagación de ondas de corte, ratificando lo antes expuesto, por lo que se sugiere utilizar más bien ecuaciones con el valor de N corregido. La corrección como tal es muy sencilla de realizar haciendo uso del diagrama de flujo (anexo), el cual resume la metodología de Alviar y Penela (1986) también citada por la norma COVENIN 1756 (2001).

REFERENCIAS

- Aguerrevere, P. y Zuloaga, G. (1937). **Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa de Venezuela**. Caracas: Geología y Minas, Bol. 1, (2-4), pp.: 3-22.
- Alvarello, J. (1999). **Caracterización de fuentes sísmicas para aplicaciones en geotecnia y geofísica superficial**. Los Teques: CIT-PDVSA-Intevep.
- Alviar, J.D y Penela, J. (1985). **Evaluación de la eficiencia del sistema martillo-barras en el ensayo de penetración normal, para aplicaciones en Ingeniería Civil**. Trabajo Especial de grado no publicado, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas.
- American Society for Testing and Materials (1984). **Standard test methods for crosshole seismic testing: ASTM D 4428/D 4428M-00**. EUA: Última edición. pp.: 1-10.
- American Society for Testing and Materials (1999). **Standard test method for penetration test and split-barrel sampling of soils: ASTM D 1586-99**. EUA. pp.: 1-5.
- Calderón, J. (2000). **Caracterización geotécnica de perfiles de suelos mediante Tomografía Sísmica**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 89 p.
- Calpa, C. et al (2001). **Evidencia de los efectos locales y mapa de susceptibilidad sísmica en la ciudad de Pasto**. Bogotá: XI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana y IV Foro sobre geotecnia de la Sabana de Bogotá. [Disponible: www.ciees.org/doc_estudios/2001_calpa_pantoja_alfaro_van_hissenhove_n.pdf]. [Consulta: 2006, Junio, 10].
- Campos, A. (2004) **Definición de las relaciones entre parámetros geofísicos en pozos disponibles a lo largo de la Línea 4 del Metro de Caracas**. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- CFLHD Geotechnical Team (25/08/2005). **General crosshole procedure**. [Disponible: <http://www.cflhd.gov/agm/geoApplications/BoreholeMethods/102GeneralCrossholeProcedures.htm>]. [Consulta: 2005, Agosto, 25].
- COVENIN (2001). **Norma COVENIN 1756-2001, Edificaciones sismorresistentes**. Caracas: FONDONORMA. 113 p.
- De Marco, P. (2000). **Determinación de la forma tipificada del terreno de acuerdo a la norma venezolana COVENIN 1756-98**. Caracas: Memorias del XVI Seminario Venezolano de Geotecnia. SVMSIF, pp.:

- 363 - 374.
- Dengo, G. (1951). **Geología de la región de Caracas**. Venezuela, Bol. Geol. 1(1): 39-116.
- FUNVISIS (2005). **Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto: Especificaciones para la exploración del subsuelo en la ciudad de Caracas**. Caracas: FUNVISIS.
- Geotecnia e Ingeniería Sísmica, GISCA (2005). **Informe preliminar: Colegio Don Simón**. Caracas, 33 p.
- Geotecnia e Ingeniería Sísmica, GISCA (2006). **Informe preliminar: Inparques**. Caracas, 28 p.
- Imai, T. y Yoshimura, M. (1970). **Elastic wave velocity and dynamics characteristics of the soft ground**. *Soil and Foundation*, 18(1), 17-22.
- JICA. (2003). **Estudio sobre el Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas, Alcaldía del Distrito Metropolitano de Caracas**. Caracas: JICA, Informe de Avance (2). pp 23-24.
- Juárez, E. y Rico, A. (1978). **Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos, Tomo I**. México, Editorial Limusa. 642 p.
- Kantak (2001). **Sediment thickness, an east-west cross section, shallow seismic velocity, and microtremor measurements in the Caracas Valley**. Tesis. 259 p.
- Kantak, P., Schmitz, M. y Audemard, F. (2005). **Sediment thickness and a west-east geologic cross section in the Caracas valley**. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela*, 20(4), 43-48.
- Kulhawm, F.H y P.H. Mayne (1990). **Manual on estimating soil properties for foundation design**. Electric Power Research Institute, EPRI.
- Ministerio de Obras Públicas, Comisión Presidencial para el estudio del Sismo (1978). **Segunda fase del estudio del sismo ocurrido en Caracas el 29 de Julio de 1967**. Caracas: FUNVISIS, Volumen A, 517 p.
- Moncada, J. (2005). **Modelado gravimétrico del basamento del Municipio Libertador, Distrito Metropolitano de Caracas**. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 128 p.
- Morales, C. (2006). **Elaboración de un mapa de velocidades de onda de corte de los primeros 30 m. de profundidad en la ciudad de Caracas mediante refracción sísmica y datos geotécnicos**. Trabajo especial de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela.
- Newbold, P. (1998). **Estadística para los negocios y la economía, 4ta.**

- Edición.** Madrid: Prentice Hall. 752 p.
- NGA-Northwest Geophysical Associates, Inc. **Downhole seismic surveys.** [Disponible: www.nga.com], [Consulta: 2005, Agosto].
- Ohta, Y. y Gota, N. (1978). **Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes.** *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, 167-187.
- Sánchez, J., Schmitz, M., Cano, V. (2005). **Mediciones sísmicas profundas en Caracas para la determinación del espesor de sedimentos y velocidades sísmicas como aporte para el estudio de microzonificación sísmica.** Caracas: Boletín Técnico IMME, Vol. 43, 20 p.
- Schmertmann, J y A. Palacios (1979), **Energy dynamics of SPT.** *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division* 105, No. GT 8, 909-926.
- Seed, H.B et al (1985). **Influence of SPT in soil liquefaction resistance evaluation,** *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, No. 12, 1425-1445.
- Sheriff, R. (1991). **Enciclopedia dictionary of exploration geophysics.** Tulsa, 376 p.
- Singer, A. (1977). **Tectónica reciente, morfogénesis sísmica y riesgo geológico en el graben de Caracas, Venezuela.** Caracas, V congreso Geológico Venezolano, pp.: 1861-1883.
- Skempton, A.W (1986). **The standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and over consolidation.** *Geotechnique*, 36(3), 425-447.
- TRX Engineering and Earth Sciences (2005). **Sísmica de pozo (Downhole Seismic).** Caracas. [Disponible: www.trxconsulting.com]. [Consulta: 2005, Julio, 25].
- Urbani, F. (2005). **Síntesis de la nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela.** Caracas: Boletín Técnico del IMME, 43(2), 1-10.
- Urbani, F. y Rodríguez, J. (2004). **Atlas geológico de la cordillera de la costa de Venezuela.** Caracas: Ediciones Fundación GEOS, escalas 1:25000. 146 p.
- Weston (Weston Geophysical Engineers International Inc.). (1969). **Investigaciones sísmicas en el valle de Caracas y en el Litoral Central,** Caracas, 22 p.

APÉNDICE A.
SECCIONES SÍSMICAS DE CONTROL DE LOS POZOS DEL
PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARACAS.

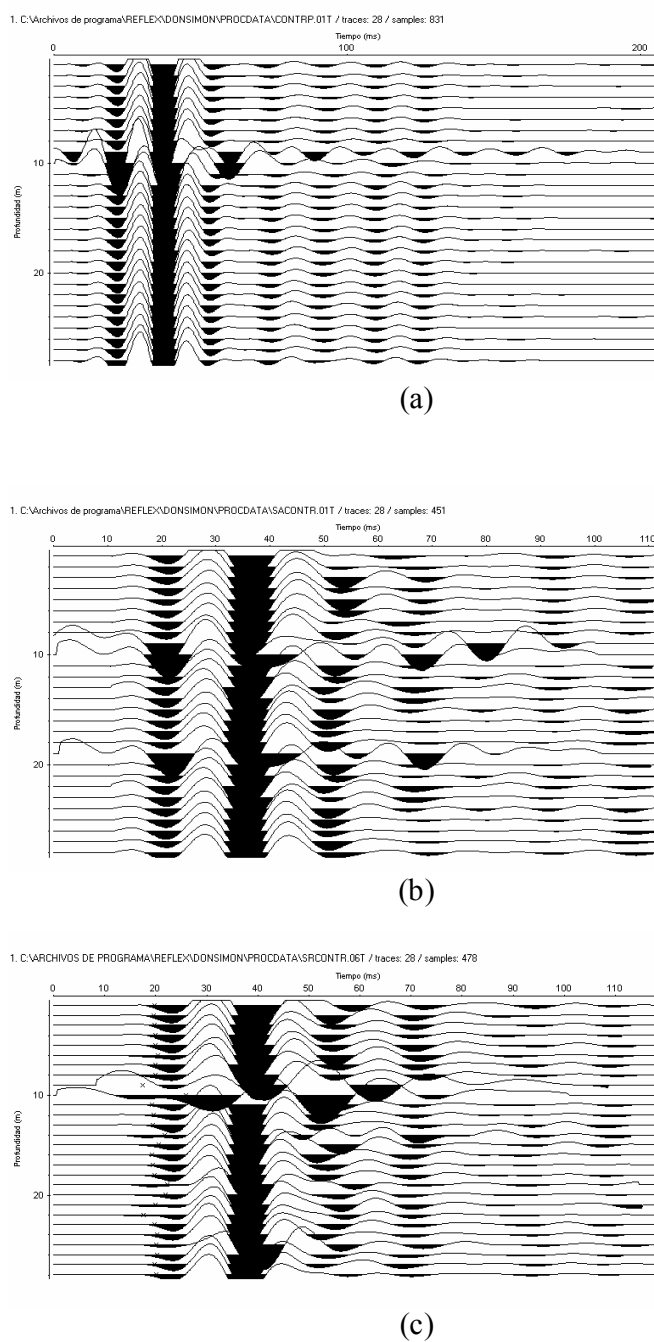
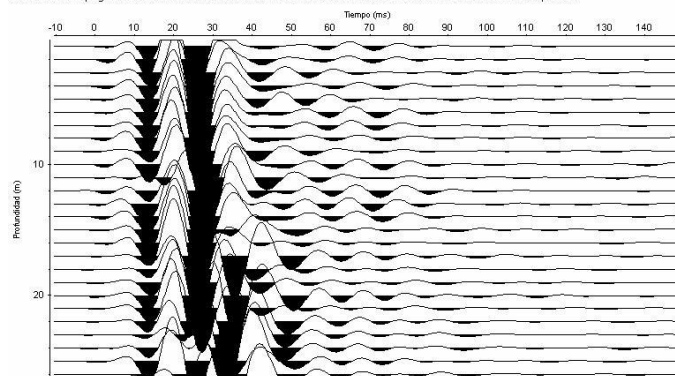


Figura A1. Secciones de control para la corrección estática de señales (*Downhole* -Los Chorros).

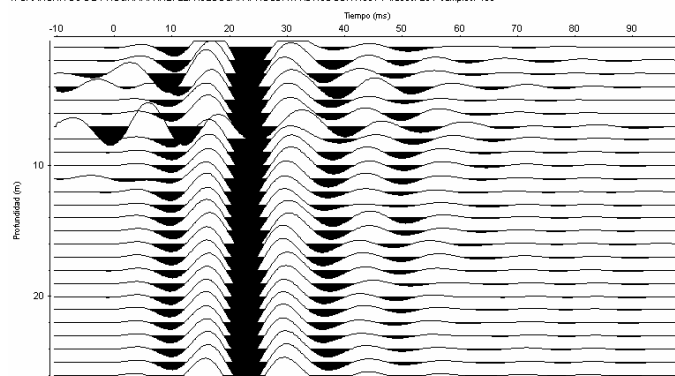
- (a) Onda P componente vertical.
- (b) Onda S (por la derecha).
- (c) Onda S (por la izquierda).

1. C:\Archivos de programa\REFLEX\SEBUCAN\PROCDATA\secciones static definitivas\DHPCONTR.01T / traces: 26 / samples: 640



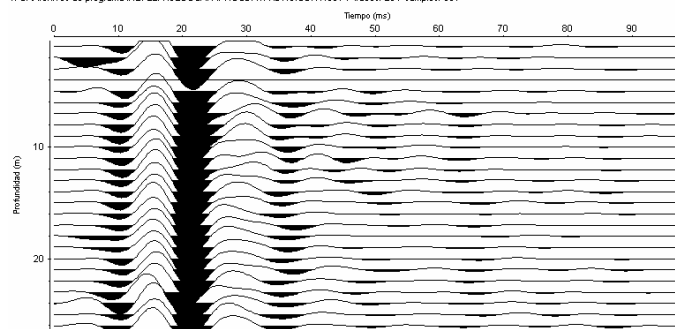
(a)

1. C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\REFLEX\SEBUCAN\PROCDATA\DHSDCONT.00T / traces: 26 / samples: 436



(b)

1. C:\Archivos de programa\REFLEX\SEBUCAN\PROCDATA\DHSDCONT.00T / traces: 26 / samples: 391



(c)

Figura A2. Secciones de control para la corrección estática de señales (*Downhole*-Sebucán).

Onda P componente vertical.

Onda S (por la derecha).

Onda S (por la izquierda).

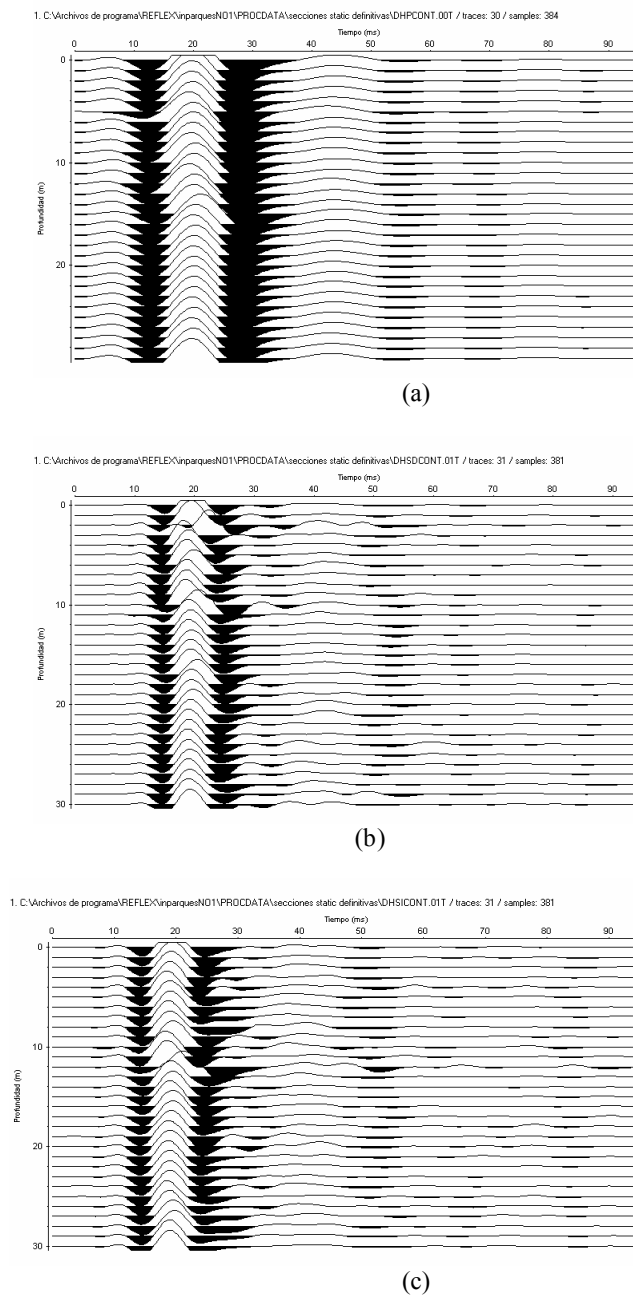


Figura A3. Secciones de control para la corrección estática de señales (*Downhole*-Inparques Norte).

- (a) Onda P componente vertical.
- (b) Onda S (por la derecha).
- (c) Onda S (por la izquierda).

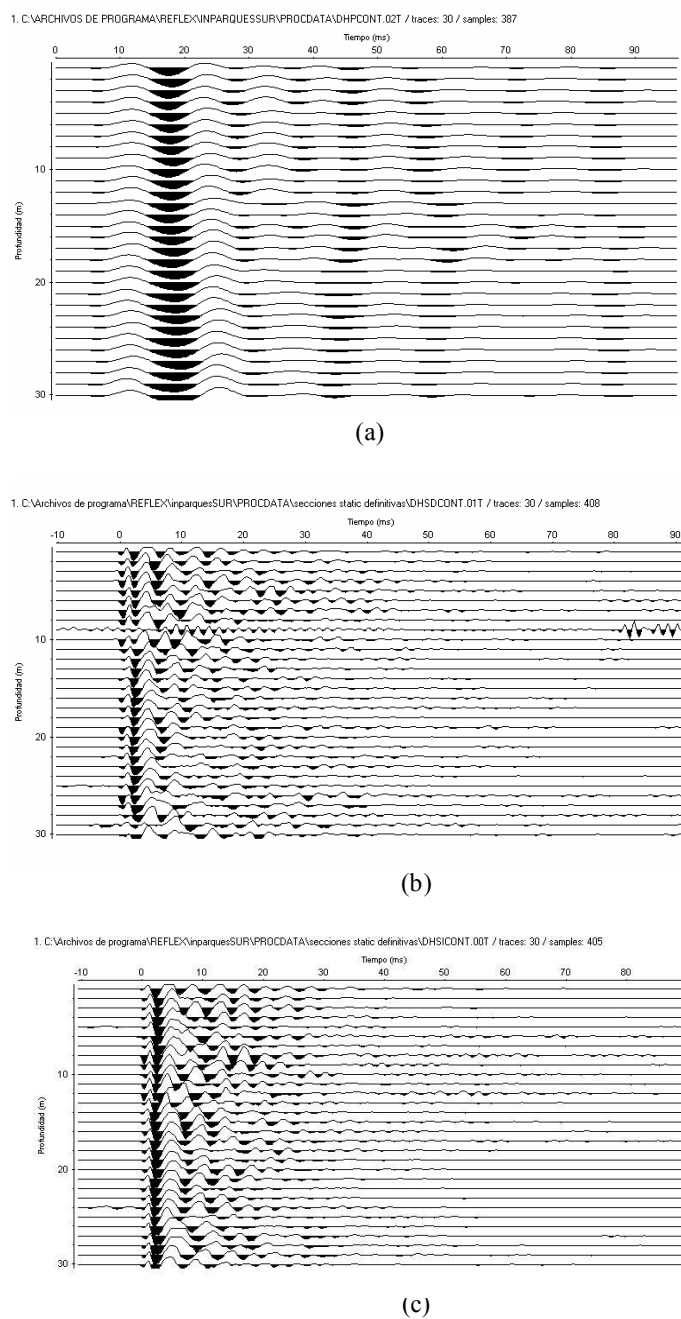
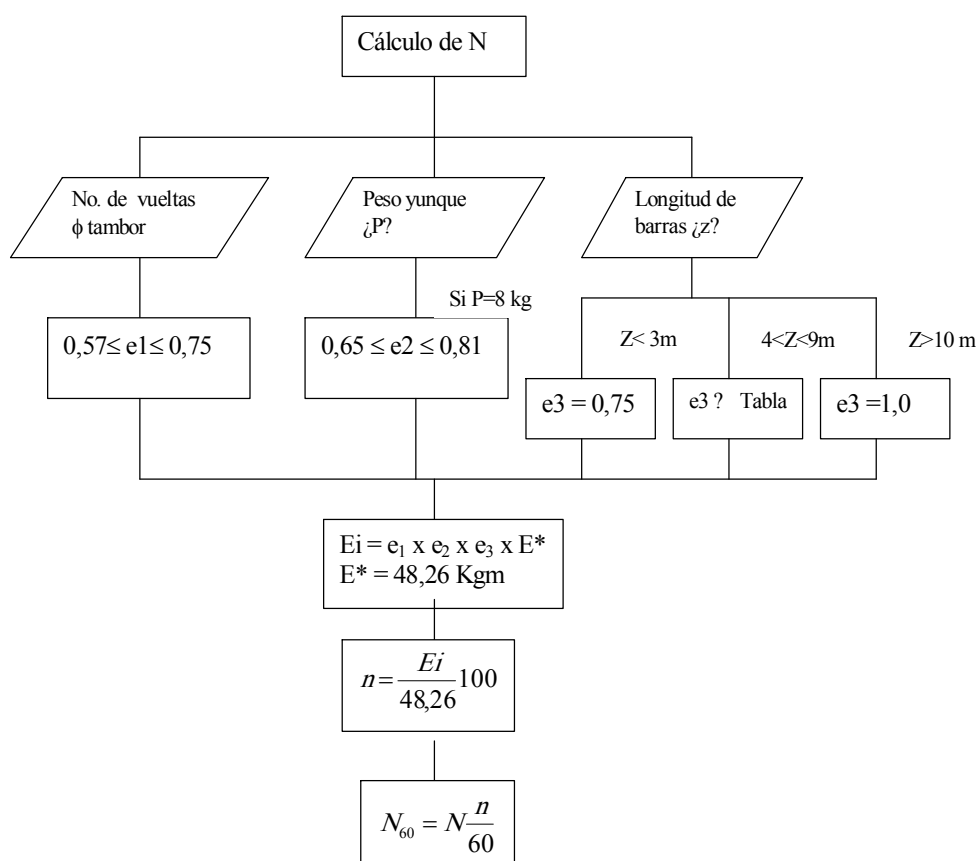


Figura A4. Secciones de control para la corrección estática de señales (*Downhole* -Inparques Sur).

- (a) Onda P componente vertical.
- (b) Onda S (por la derecha).
- (c) Onda S (por la izquierda).

APÉNDICE B.
CONSIDERACIONES PARA LA GEOTECNIA.



e1: Factor de corrección de energía cinética. Es función del número de vueltas alrededor del tambor del malacate y de su diámetro (Skempton, 1986).

e2: Eficiencia por transmisión de energía del martillo al yunque (Schmertmann y Palacios, 1979).

e3: Eficiencia por longitud crítica del varillaje de perforación, también se asocia a la longitud de las barras. (Tabla siguiente)

m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
e3	0.33	0.55	0.70	0.80	0.85	0.90	0.93	0.96	0.99	1.00
Long. (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figura B1. Diagrama de flujo para la corrección por pérdida de eficiencia sintetizado de acuerdo con De Marco (2000).

Tabla B1. Forma espectral y factor de corrección de aceleración horizontal según el perfil geotécnico.

CAPÍTULO 5

FORMAS ESPECTRALES TIPIFICADAS DE LOS TERRENOS DE FUNDACIÓN

Esta Norma considera cuatro formas espectrales tipificadas (S1 a S4) y un factor de corrección para el coeficiente de aceleración horizontal (ϕ), los cuales dependen de las características del perfil geotécnico del terreno de fundación.

5.1 SELECCIÓN DE LA FORMA ESPECTRAL Y DEL FACTOR ϕ

La selección de la forma espectral y el factor ϕ se hará con arreglo a la Tabla 5.1.

TABLA 5.1 FORMA ESPECTRAL Y FACTOR DE CORRECCIÓN ϕ

Material	Vsp (m/s)	H (m)	Zonas Sísmicas 1 a 4		Zonas Sísmicas 5 a 7	
			Forma Espectral	ϕ	Forma Espectral	ϕ
Roca sana/fracturada	>500	-	S1	0.85	S1	1.00
Roca blanda o meteorizada y suelos muy duros o muy densos	>400	<30	S1	0.85	S1	1.00
		30-50	S2	0.80	S2	0.90
		>50	S3	0.70	S2	0.90
Suelos duros o densos	250-400	<15	S1	0.80	S1	1.00
		15-50	S2	0.80	S2	0.90
		>50	S3	0.75	S2	0.90
Suelos firmes/medio densos	170-250	≤50	S3	0.70	S2	0.95
		>50	S3 ^(a)	0.70	S3	0.75
Suelos blandos/sueltos	<170	≤15	S3	0.70	S2	0.90
		>15	S3 ^(a)	0.70	S3	0.80
Suelos blandos o sueltos ^(b) intercalados con suelos más rígidos	-	H ₁	S2 ^(c)	0.65	S2	0.70

a) Si $A_o \leq 0.15$ úsese S4

b) El espesor de los estratos blandos o sueltos ($V_{sp} < 170$ m/s) debe ser mayor que $0.1 H$.

c) Si $H_1 \geq 0.25 H$ y $A_o \leq 0.20$ úsese S3.

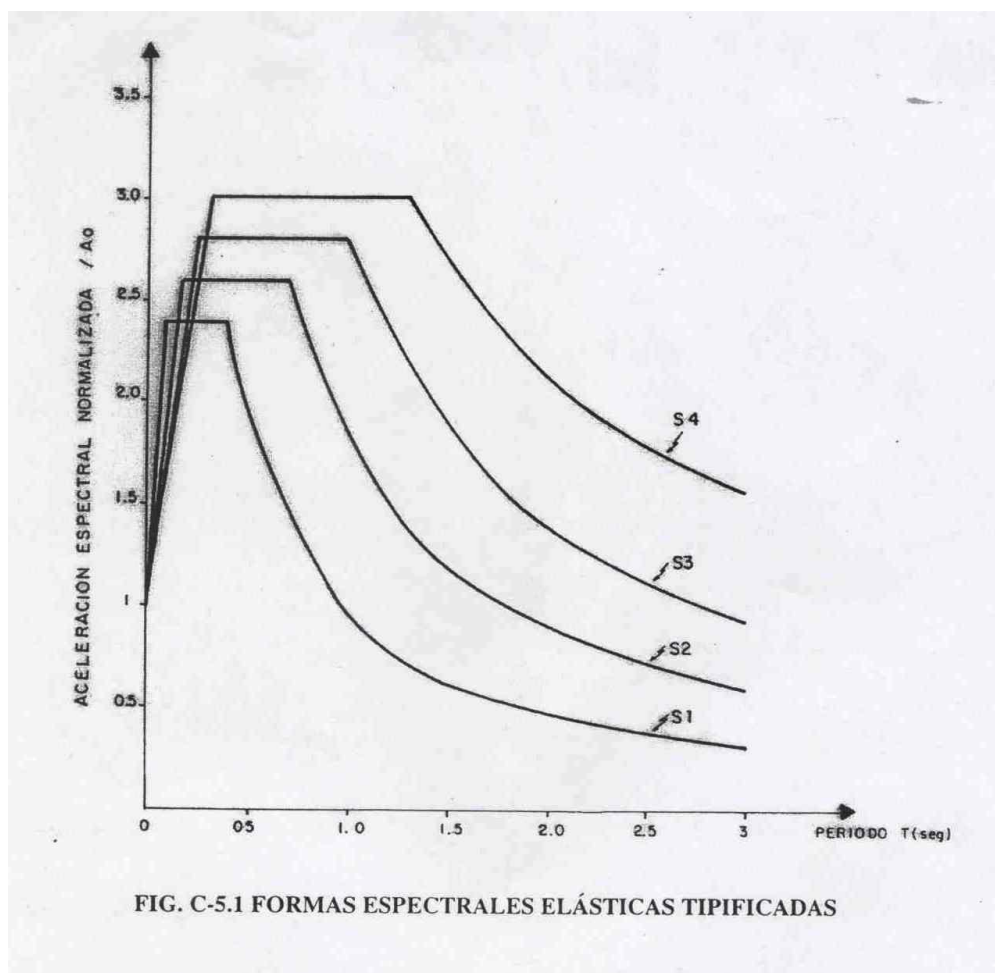


Figura B1. Formas espectrales según la Norma Sismorresistente COVENIN 1756 (2001).

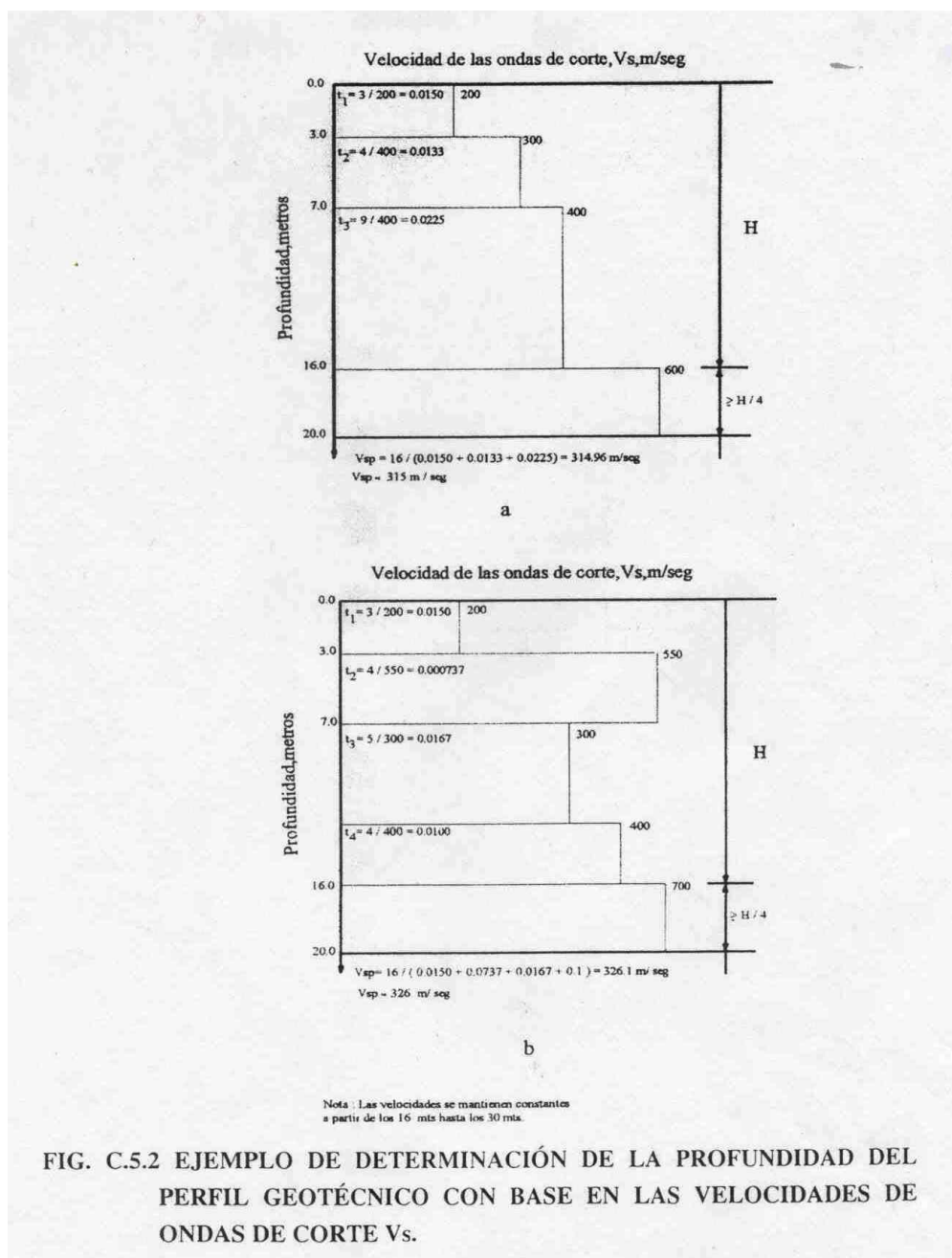


Figura B2. Ejemplo de un perfil geotécnico para el cálculo del Vsp según la Norma COVENIN 1756 (2001).

APÉNDICE C.
PERFILES LITOLÓGICOS DE LOS POZOS GEOTECNICOS PARA
EL PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARACAS.

