



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

ESTUDIO GEOFÍSICO PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO DEL PUENTE VEHICULAR "EL MOLINO".

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

ESTUDIO DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE LOS MÉTODOS REFRACCIÓN SÍSMICA, ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES, DOWN-HOLE Y VIBRACIÓN AMBIENTAL EN CIUDAD DE ORIZABA, VERACRUZ.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos	3
1.2. Alcances	3
2. LOCALIZACIÓN	3
3. VÍAS Y MEDIOS DE COMUNICACIÓN	5
4. FISIOGRAFÍA	6
5. GEOLOGÍA	7
6. MÉTODOS GEOFÍSICOS	9
6.1 Método de Refracción Sísmica (TRS)	9
6.2 Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)	10
6.3 Método Sísmico Down Hole (DH)	10
6.4 Método de Vibración Ambiental (VA)	10
7. ADQUISICIÓN DE DATOS	11
7.1 Adquisición de Métodos Sísmicos (TRS-MASW)	11
7.2 Adquisición de Método Down Hole (DH)	13
7.3 Adquisición Método sísmico de Vibración Ambiental (VA)	14
8. SONDEOS	15
9. RESULTADOS	16
9.1 Métodos de Refracción Sísmica (TRS) y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)	16
9.2 Método de Vibración Ambiental (VA)	30
9.3 Método Down Hole (DH)	32
10. CONCLUSIONES	36
11. REFERENCIAS	37
Anexo 1 Reporte Fotográfico	38
Anexo 2 Descripción y fundamento teórico de los métodos geofísicos	54



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Anexo 3 Determinación del espectro de diseño y análisis de respuesta de sitio para el proyecto "puente vehicular el molino"

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1. Localización geográfica del sitio de estudio con respecto a la Ciudad de Orizaba (arriba) y acercamiento a la zona de estudio (abajo). Fuente: Modificado de Google Earth.
- Fig. 2. Acceso y vías de comunicación para el transporte de la zona centro de la Ciudad de Orizaba. Fuente: Modificado de Google Earth.
- Fig. 3. Fisiografía del área cercana a la zona de estudio. Fuente: Modificado de Google Earth.
- Fig. 4. Geología de la zona circundante a la Ciudad de Orizaba. Zona de Estudio marcada con punto color rojo. Fuente: Carta geológica-minera E14-6 "Orizaba", SGM.
- Fig. 5. Localización geográfica de la línea de Métodos Sísmicos. Fuente: Modificado de Google Earth.
- Fig. 6. Sismógrafo ES-3000 de Geometrics.
- Figura 7. Ubicación de los sondeos Down Hole sobre plano topográfico.
- Figura 8. Ubicación del punto de Vibración Ambiental sobre plano topográfico.
- Figura 9. Ubicación de los sondeos junto con los métodos geofísicos aplicados.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Línea de métodos sísmicos, indicando nomenclatura, longitud y coordenadas.
- Tabla 2. Especificaciones técnicas del sismógrafo ES-3000 de Geometrics.
- Tabla 3. Datos del método Down Hole realizado indicando nomenclatura, profundidad y coordenadas.
- Tabla 4. Puntos VA realizados, indicando nomenclatura y coordenadas de inicio y fin.
- Tabla 5. Coordenadas de los sondeos considerados.
- Tabla 6. Clasificación geosísmica para valores V_p .
- Tabla 7. Clasificación del suelo por V_{s30} (IBC,2012)

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se llevó a cabo utilizando los métodos de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), Down Hole (DH) y Vibración Ambiental (VA) ubicado a orillas del Paseo del Río Orizaba, en la Ciudad de Orizaba.

Dicho estudio estuvo compuesto por 4 líneas de tendido de refracción sísmica/análisis multicanal de ondas superficiales, 1 punto del método sísmico down hole y 3 puntos de método sísmico de vibración ambiental las cuales se planea utilizar como herramienta para localizar anomalías en el subsuelo.

1.1. Objetivos

Los métodos Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y Refracción Sísmica (TRS) han sido propuestos con la finalidad de determinar, en forma indirecta las características estratigráficas, el espesor de los materiales de cobertura, las condiciones de meteorización y fracturación de las rocas: asimismo detectar la presencia y profundidad del basamento rocoso y la presencia de posibles fallas geológicas.

Los sondeos Down Hole (DH) y puntos de Vibración Ambiental (VA) tienen como objetivo obtener parámetros de onda de corte (V_s) y periodo fundamental para realizar el espectro de diseño por sismo.

1.2. Alcances

En este informe se describen los trabajos de campo y gabinete que sirvieron como base para definir los objetivos planteados previamente en el proyecto.

2. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra en la zona centro de la Ciudad de Orizaba, en la colonia Urbana Librado Rivera, sobre las calles Pte. 13 y Ote. 14; cruzando Paseo del Río Orizaba, en las coordenadas 699909.50 m E, 2084462.39 m N (UTM Zona 14N). La elevación promedio en la zona oscila entre los 1220 y 1223 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m).

La **Figura 1** muestra la ubicación geográfica de la zona de estudio y su ubicación en relación con la Ciudad de Orizaba.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

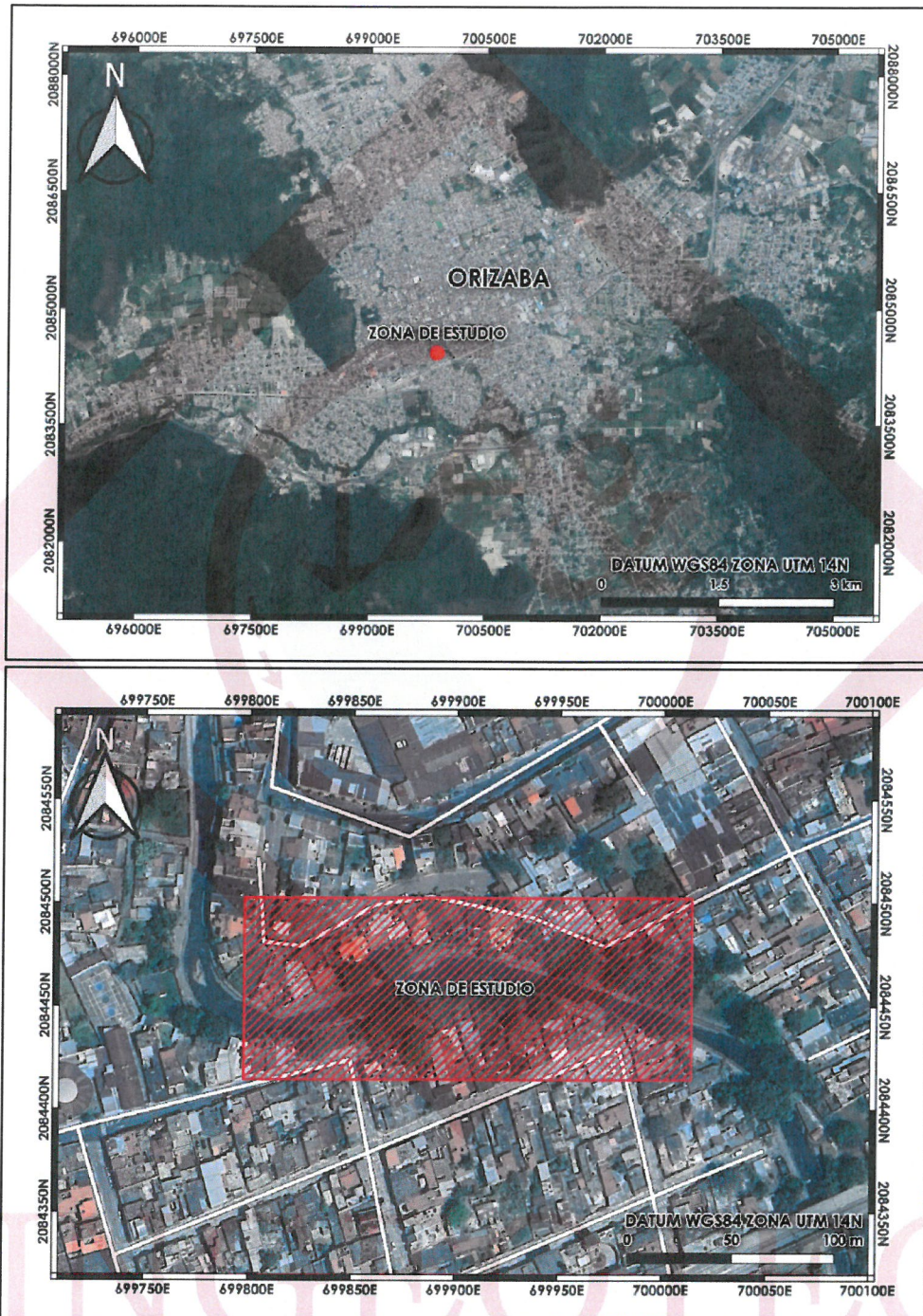


Fig. 1. Localización geográfica del sitio de estudio con respecto a la Ciudad de Orizaba (arriba) y acercamiento a la zona de estudio (abajo). Fuente: Modificado de Google Earth.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

3. VÍAS Y MEDIOS DE COMUNICACIÓN

La zona de estudio es accesible principalmente a través de la Avenida Poniente 15, que conecta con diversas calles transversales como la Calle Sur 6 y la Calle Sur 10.

Además, la Avenida Poniente 13 sirve como otra vía de acceso significativa, interceptando con calles como la Calle Sur 4 y la Calle Sur 6.

La **figura 2** se muestra un mapa con la infraestructura para el acceso y vías de comunicación obtenida del Consejo de Recursos Minerales (2021).

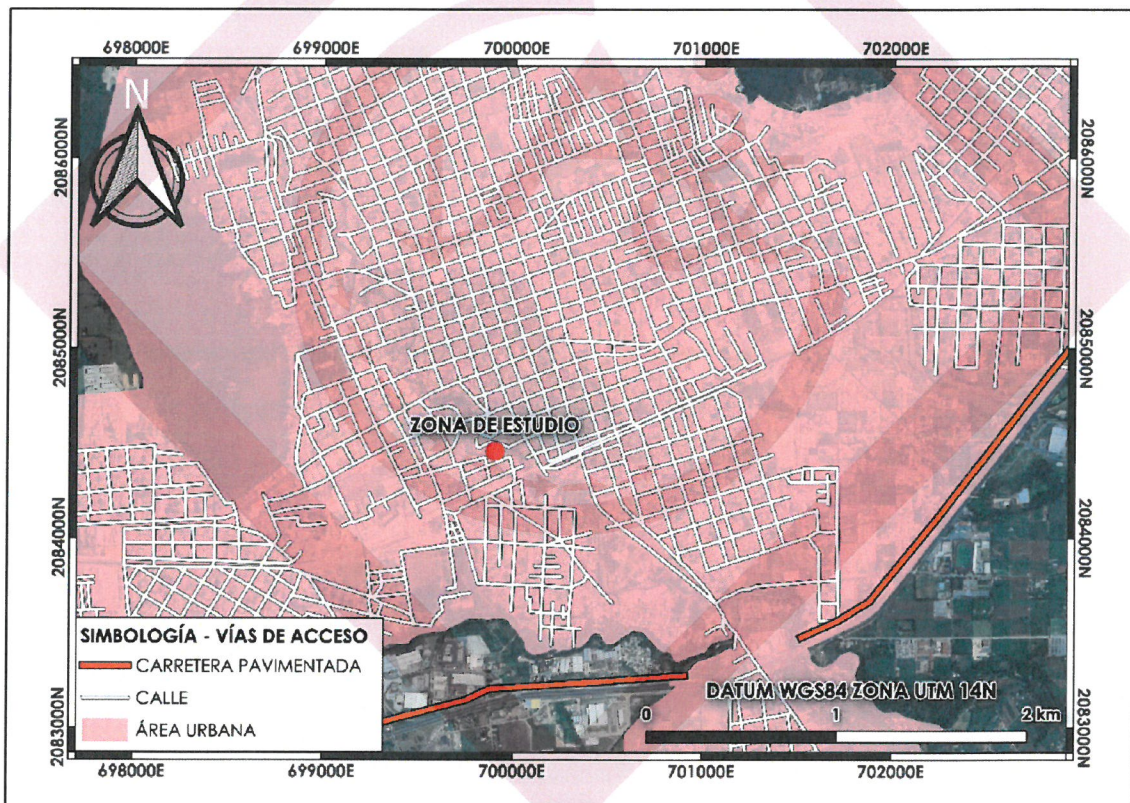


Fig. 2. Acceso y vías de comunicación para el transporte de la zona centro de la Ciudad de Orizaba. Fuente: Modificado de Google Earth.

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

4. FISIOGRAFÍA

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Raisz (1964), la zona de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica Sierra Madre del sur, subprovincia Sierras Orientales como se muestra en la **figura 3**.

La Sierra Madre del Sur es una provincia fisiográfica ubicada en el sur de México, extendiéndose a lo largo de los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Se trata de un sistema montañoso de origen tectónico que se formó a partir de procesos orogénicos asociados a la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica. Su relieve es abrupto, con pendientes pronunciadas y altitudes que oscilan entre los 500 y 3,700 metros sobre el nivel del mar (msnm), siendo las elevaciones más destacadas el Cerro Nube Flan en Oaxaca y la Sierra de Atoyac en Guerrero. Su configuración geológica está compuesta principalmente por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, además de afloramientos de rocas metamórficas del Precámbrico y Paleozoico, lo que indica una historia geológica compleja de deformaciones y fracturamiento.

En términos climáticos, la Sierra Madre del Sur presenta una marcada influencia orográfica que genera una gran variedad de microclimas, desde templados subhúmedos en las zonas altas hasta cálidos húmedos en las vertientes que descienden hacia la costa del Pacífico. La vegetación es igualmente diversa e incluye bosques de pino-encino, selvas caducifolias y mesófilas de montaña, que albergan una rica biodiversidad con especies endémicas. Suelos de origen volcánico, principalmente andosoles y litosoles, predominan en la región, con variaciones locales que determinan la productividad agrícola y la distribución de la vegetación.

Dentro de esta provincia, la subprovincia Sierras Orientales se localiza en la porción oriental de la Sierra Madre del Sur, abarcando principalmente el estado de Oaxaca. Su relieve está conformado por sierras angostas y alineadas, separadas por valles intermontanos y cañadas profundas, producto de la intensa actividad tectónica y erosiva. Las altitudes en esta subprovincia varían entre 1,000 y 3,200 msnm, con elevaciones como la Sierra de Juárez y la Sierra de Miahuatlán, que representan algunas de las formaciones más prominentes. Su geología se caracteriza por la presencia de rocas metamórficas del Paleozoico, calizas del Cretácico y rocas ígneas intrusivas del Terciario, lo que denota un origen tectónico-sedimentario con intrusiones magmáticas posteriores.

INGEOTEC



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

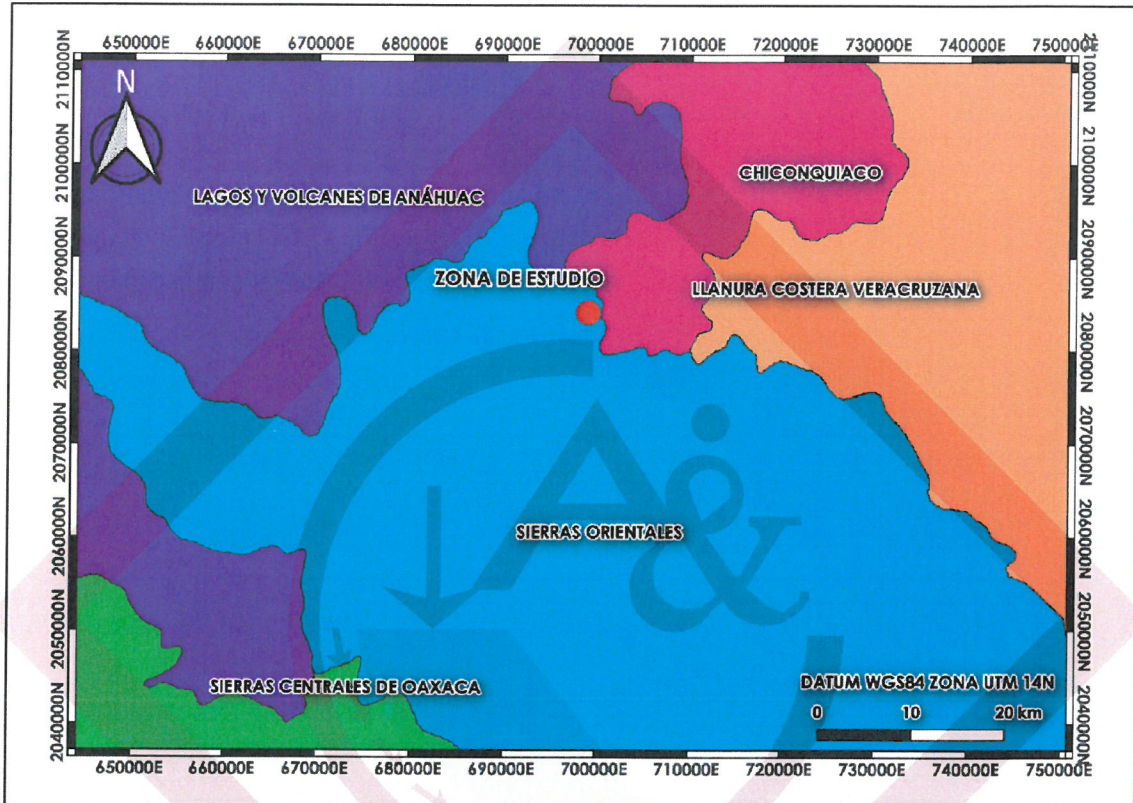


Fig. 3 Fisiografía del área cercana a la zona de estudio. Fuente: Modificado de Google Earth.

5. GEOLOGÍA

La ciudad de Orizaba, Veracruz, se encuentra en una región de alta complejidad geológica, influenciada por procesos tectónicos, volcánicos y sedimentarios que han dado lugar a una diversidad de unidades litológicas. De acuerdo a la carta geológica E14-6 "Orizaba" que abarca los estados de Veracruz, Puebla y Oaxaca, en la zona afloran depósitos volcánicos, calizas y estructuras tectónicas que han modelado el relieve actual.

Uno de los materiales predominantes en la geología superficial de Orizaba es el lahar-arena (QptLh-Ar), el cual corresponde a depósitos volcánicos transportados por flujos de lodo y escombros asociados a la actividad del Pico de Orizaba, un estratovolcán activo que ha influenciado la evolución geológica de la región. Estos depósitos están constituidos principalmente por materiales piroclásticos no consolidados, con una granulometría variable que va desde arenas finas hasta bloques más gruesos, lo que los hace susceptibles a procesos de erosión y remoción en masa.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Asimismo, la presencia de calizas y lutitas es significativa en la zona. Se identifican unidades litológicas como la caliza-lutita (KtssCz-Lu) y la caliza-dolomía (KaceCz-Do), que corresponden a formaciones sedimentarias del Cretácico Superior, originadas en ambientes marinos someros durante el periodo en el que esta región formaba parte de la plataforma continental sumergida. Estas rocas han experimentado procesos de diagénesis y dolomitización, lo que ha dado lugar a estructuras estratificadas con variaciones en su resistencia mecánica y grado de fracturamiento.

Otra unidad identificada es la caliza-lutita (KbeapCz-Lu), que indica la presencia de secuencias sedimentarias más complejas con intercalaciones de materiales de diferente competencia, lo que sugiere variaciones en el régimen deposicional y en la estabilidad tectónica de la zona durante su formación.

El relieve de la región está condicionado por una importante actividad tectónica, evidenciada en la presencia de múltiples fallas de tipo normal e inversa, las cuales han influido en la deformación de las unidades geológicas. Estas fallas, indicadas en el mapa con líneas y símbolos de desplazamiento, están asociadas a los procesos de subducción y deformación cortical generados por la interacción entre la Placa de Cocos y la Placa de Norteamérica. El sistema de fallas ha contribuido al alineamiento de estructuras geológicas, a la generación de fracturamiento en las rocas y a la presencia de manantiales y fuentes termales en la región.

En términos de suelos, la zona presenta una mezcla de suelos volcánicos y sedimentarios, con una distribución que depende del tipo de roca subyacente y de los procesos de intemperismo y erosión. La estabilidad del terreno en algunas zonas puede verse comprometida por la combinación de materiales piroclásticos poco consolidados y la acción de agentes erosivos como el agua y la actividad sísmica.

Desde una perspectiva geológica y geotécnica, la ciudad de Orizaba se encuentra en un entorno de alta dinámica natural, influenciado por la actividad volcánica pasada y los procesos tectónicos en curso. La presencia de materiales volcánicos sueltos puede representar riesgos geotécnicos en ciertas áreas, como subsidencias o deslizamientos, especialmente en pendientes pronunciadas o en zonas con drenaje deficiente. Por otro lado, las formaciones calizas pueden presentar fenómenos de karstificación, lo que implica la posible formación de cavidades y hundimientos.

La geología superficial que aflora en la zona muestra en la **figura. 4.**



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

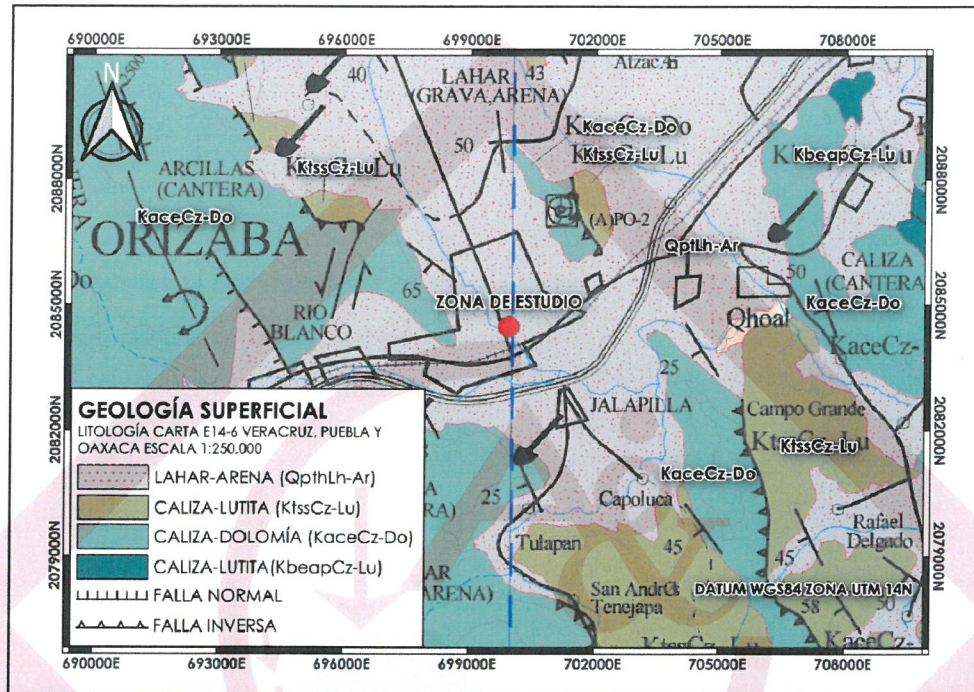


Fig. 4 Geología de la zona circundante a la Ciudad de Orizaba. Zona de Estudio marcada con punto color rojo. Fuente: Carta geológica-minera E14-6 "Orizaba", SGM.

6. MÉTODOS GEOFÍSICOS

La exploración Geofísica consiste en realizar e interpretar mediciones de propiedades físicas para determinar las condiciones del subsuelo, está basada en el análisis de las características físicas del terreno y de las variaciones superficiales de los campos naturales de la Tierra.

Para este proyecto se implementaron cuatro métodos: el método de sismica de refracción (TRS), el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), el método Down Hole (DH) y el método de Vibración Ambiental (VA).

6.1 Método de Refracción Sísmica (TRS)

El método de refracción sísmica se encuentra fundamentado en la geometría que muestran las ondas sísmicas que se han refractado con un ángulo crítico. Si la onda P incide sobre el límite entre dos estratos los cuales muestran un contraste en su velocidad de propagación, parte de la onda P será reflejada y otra parte será transmitida. **Para una descripción más detallada del método y su fundamento teórico consultar ANEXO 2.**



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

6.2 Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, MASW por sus siglas en inglés, es un método sísmico no destructivo para evaluar la velocidad de onda S del subsuelo. Proporciona información sobre la velocidad de la onda de corte VS de los materiales cercanos a la superficie de una manera muy rentable. Debido al valor significativo de esta información, en la mayoría de los proyectos de ingeniería geotécnica y también debido a la operación relativamente simple en el campo y al procesamiento de datos, está ganando popularidad entre las comunidades de ingenieros. El módulo de corte está directamente relacionado con la rigidez de un material, dado que la VS aumenta a medida que la rigidez del material (resistencia al corte) aumenta y sísmicamente la velocidad de onda de corte (VS) es su mejor indicador, por lo que es uno de los parámetros de ingeniería más críticos.

Para una descripción más detallada del método y su fundamento teórico consultar ANEXO 2.

6.3 Método Sísmico Down Hole (DH)

Es un método que se usa comúnmente para determinar los perfiles de la onda de compresión (V_p) y de corte (V_s) en función de la profundidad. El ensayo consiste en generar ondas sísmicas mediante una fuente de energía desde la superficie del terreno, esta perturbación se registra a profundidad a través de un geófono que está ubicado en la parte inferior de un pozo previamente realizado. El geófono registra el movimiento y envía la señal a un sismógrafo donde es amplificada y digitalizada para un posterior tratamiento. Para este ensayo se requiere que el pozo haya sido entubado y se pueden situar uno o varios geófonos. **Para una descripción más detallada del método y su fundamento teórico consultar ANEXO 2.**

6.4 Método de Vibración Ambiental (VA)

El método de Vibración Ambiental (VA) es una técnica sísmica in situ propuesta por Louie (2001) que permite obtener el perfil de distribución de velocidad de propagación de las ondas S (V_s) en el terreno a partir del registro del ruido ambiental. Por lo tanto, se trata de una técnica de adquisición sísmica especialmente adecuada para caracterizar la V_s en ciudades o plantas industriales donde el nivel de ruido es muy alto e impide la adquisición de la onda S mediante otras técnicas. La técnica analiza las ondas superficiales con un amplio rango de frecuencias con una transformada en 2D de lentitud-frecuencia (p-f), este hecho separa las ondas Rayleigh de otras ondas sísmicas y permite el reconocimiento de la velocidad de fase verdadera de las velocidades aparentes. **Para una descripción más detallada del método y su fundamento teórico consultar ANEXO 2.**



7. ADQUISICIÓN DE DATOS

7.1 Adquisición de Métodos Sísmicos (TRS-MASW)

El método de refracción sísmica (TRS) y el análisis (MASW) son generados con los mismos datos de adquisición. El trabajo de campo consistió en la realización de 4 líneas que se realizaron utilizando 24 geófonos con un espaciamiento entre geófono de 3 metros para así lograr una longitud total de 69 metros en cada línea. La **tabla 1** sintetiza la información de las líneas sísmicas indicando su nomenclatura, longitud total de la línea y coordenadas de inicio y final.

Tabla 1. Línea de métodos sísmicos, indicando nomenclatura, longitud y coordenadas.

Nomenclatura	Coordenadas UTM Zona 14				Longitud [m]
	Inicio		Final		
	X	Y	X	Y	
TRS-01	699811.98	2084420.98	699878.97	2084441.64	69
TRS-02	699804.02	2084438.9	699869.94	2084446.89	69
TRS-03	699934.03	2084469.93	700000.00	2084496.95	69
TRS-04	699931.01	2084475.96	700000.93	2084462.87	69

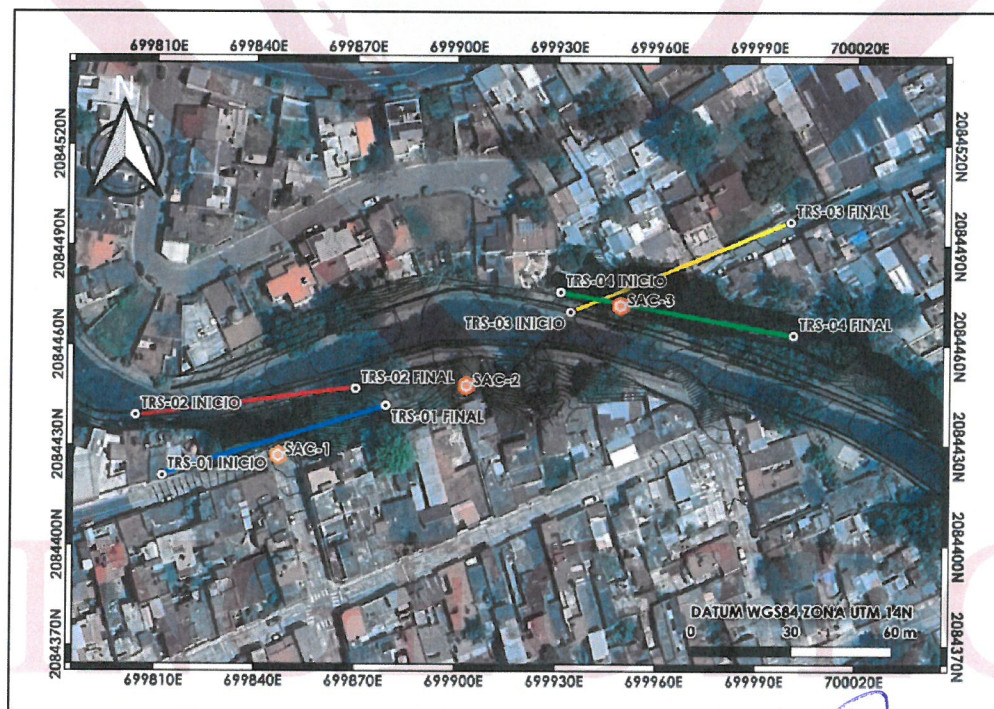


Fig. 5. Localización geográfica de la línea de Métodos Sísmicos. Fuente: Modificado de Google Earth.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Se utilizó un sismógrafo ES-3000 de Geometrics, que permite la adquisición de datos sísmicos con alta precisión en los datos de ondas sísmicas. Este sistema portátil ofrece una amplia gama de funciones y características que lo hacen ideal para diversas aplicaciones geofísicas, como la exploración de hidrocarburos, la ingeniería geotécnica y la investigación sísmica. Con su diseño robusto y su capacidad para registrar y analizar datos sísmicos con precisión, proporciona una herramienta confiable para la caracterización del subsuelo y la evaluación de riesgos sísmicos.



Fig. 6. Sismógrafo ES-3000 de Geometrics.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del sismógrafo ES-3000 de Geometrics.

SISMOGRAFI ES-3000 DE GEOMETRICS	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Número de canales	16
Intervalo de muestreo	31, 62, 125, 250 y 500 microsegundos
Longitud de registro	2048 muestras que igualen duraciones de 64, 128, 256, 512 y 1024 milisegundos
Filtros	Las bajas frecuencias son: 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280 y 400 Hz
Pantalla	Pantalla en equipo con Windows 7 en adelante
Control de ganancia	Controles instantáneos de ganancia de puente flotante
Geófonos para los ensayos por el método de refracción	24 de 14 Hz
Geófonos para los ensayos por el método del MASW	24 de 4.5 Hz



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

7.2 Adquisición de Método Down Hole (DH)

Para la adquisición del método sísmico Down-Hole y con el propósito de caracterizar tanto la onda compresional como de corte, se realizó un golpe horizontal y otro vertical sobre una placa metálica, empleando como fuente sísmica un marro de 16 libras. El intervalo de adquisición fue a cada metro de distancia hasta alcanzar la profundidad deseada, misma que fue variable en cada sondeo. Para el correcto registro del arribo de las ondas se empleó un geófono triaxial. La **tabla 3** indica nomenclatura, profundidad y coordenadas de cada sondeo DH.

Tabla 3. Datos del método Down Hole realizado indicando nomenclatura, profundidad y coordenadas.

Nombre	Profundidad (m)	Coordenadas UTM Zona 14	
		Este	Norte
DH-01	29	699903.28	2084448.57

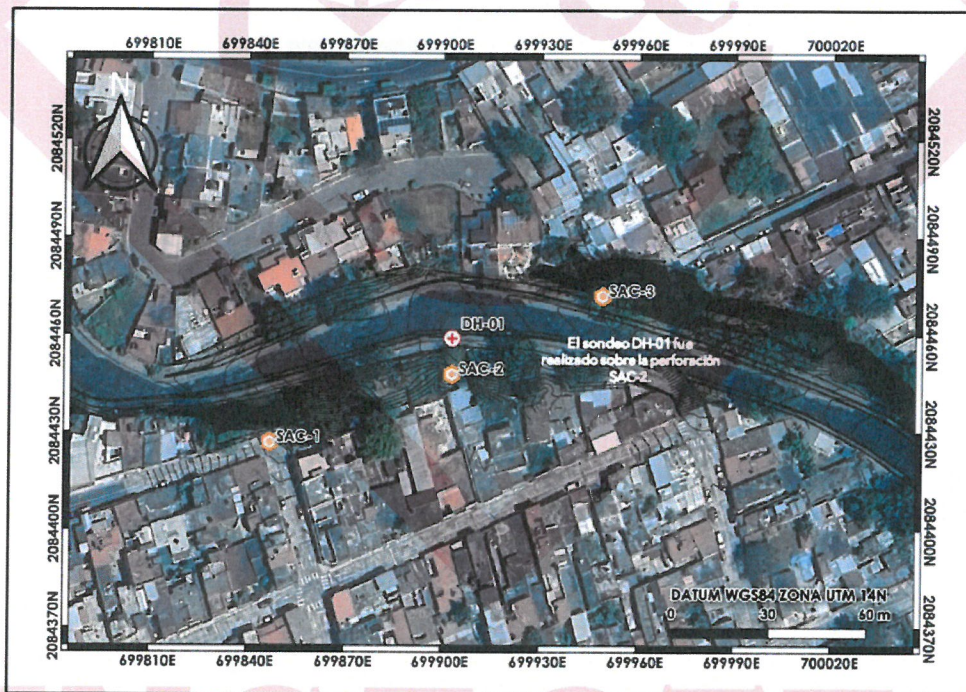


Figura 7. Ubicación de los sondeos Down Hole sobre plano topográfico.

El equipo utilizado fue el sismógrafo ES-3000 de Geometrics utilizado para los métodos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales pero equipado con una sonda o geófono pozo de 3 componentes de marca RT.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

7.3 Adquisición Método sísmico de Vibración Ambiental (VA)

La prueba de vibración ambiental (VA) se realizó en tres estaciones en diferentes puntos del sitio, empleó un acelerómetro de tres componentes que registró las ondas sísmicas propagadas de fuentes naturales y antropogénicas, en un lapso variado de tiempo para cada estación. Se registraron las amplificaciones inducidas en términos de aceleración de partícula en función del tiempo.

Tabla 4. Puntos VA realizados, indicando nomenclatura y coordenadas de inicio y fin.

Nombre	Tiempo de adquisición (s)	Número de muestras	Coordenadas UTM Zona 14	
			Este	Norte
VA-01	40	60	699843.27	2084433.17
VA-02	40	60	699899.35	2084461.89
VA-03	40	60	699968.96	2084484.15

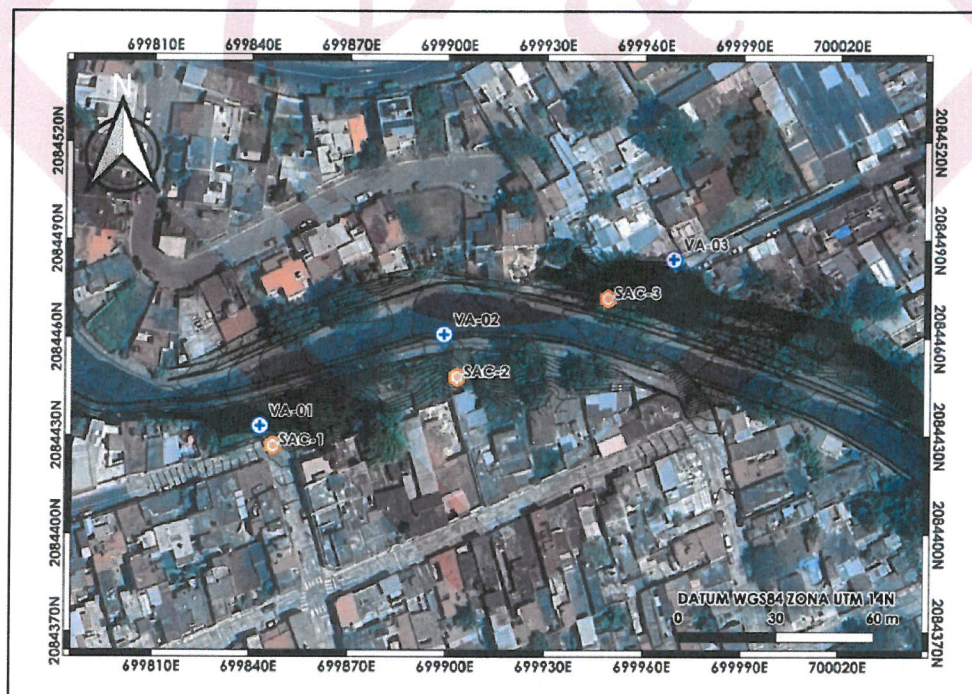


Figura 8. Ubicación del punto de Vibración Ambiental sobre plano topográfico.

El equipo utilizado fue **GeoBox de Sara Electronics**. es un instrumento basado en SADC20. Diseñado para alcanzar el máximo rendimiento combinado con un sensor electrodinámico de 4.5Hz a 0.1Hz (SS-45/20 o SS-10/08/02/01) incorporado en el instrumento, puede equiparse con o sin GPS para la sincronización con otros instrumentos.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

8. SONDEOS

Para complementar la información obtenida a través de los métodos geofísicos, se llevaron a cabo sondeos en puntos estratégicamente seleccionados. Las coordenadas de cada sondeo se presentan en la tabla 5, permitiendo correlacionar los resultados con los datos geofísicos y mejorar la interpretación del subsuelo.

Tabla 5. Coordenadas de los sondeos considerados.

Nombre	Coordenadas UTM Zona 14	
	Este	Norte
SAC-1	699847.87	2084427.99
SAC-2	699903.28	2084448.57
SAC-3	699949.29	2084472.44

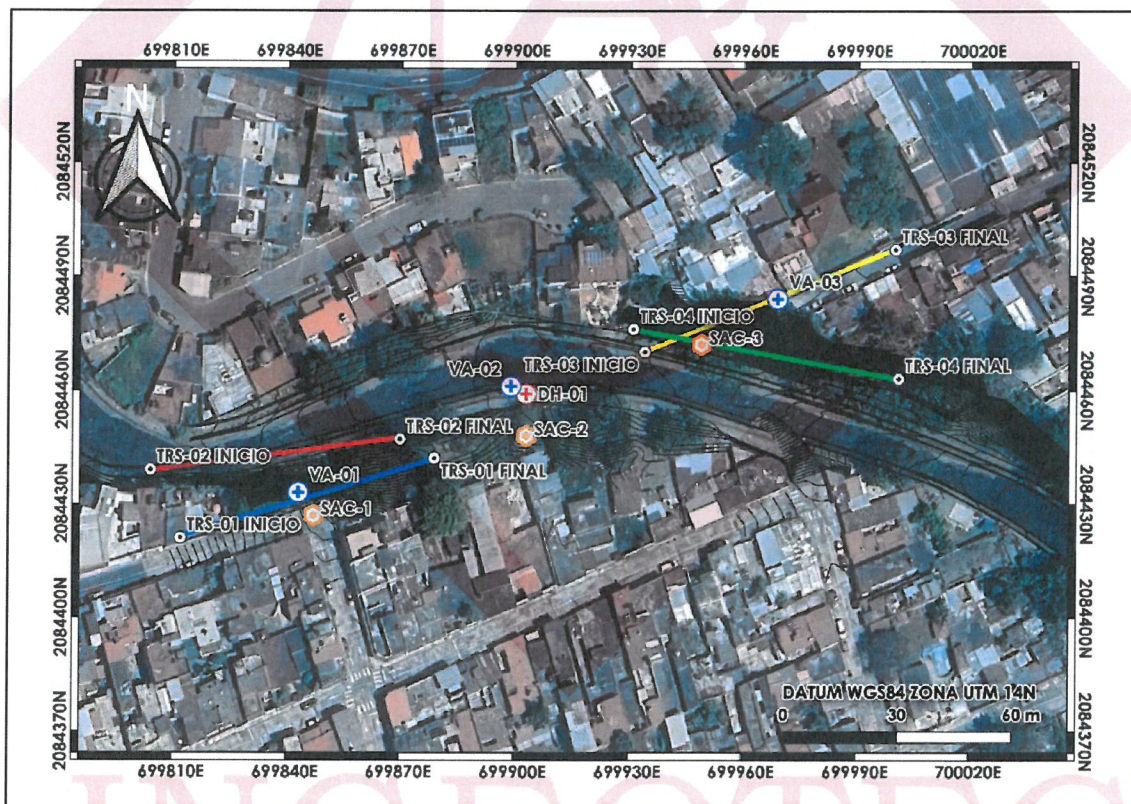


Figura 9. Ubicación de los sondeos junto con los métodos geofísicos aplicados.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

9. RESULTADOS

Los resultados que se mostrarán a continuación se correlacionaron con lo obtenido de los sondeos cercanos a los tendidos, las ligeras variaciones de correlación que pueden existir, es debido principalmente a que estos métodos son indirectos y los parámetros físicos que se estudian pueden tener similares interacciones dependiendo los factores que lleguen a haber en el subsuelo.

9.1 Métodos de Refracción Sísmica (TRS) y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

Para tener una mejor correlación y visión general de la zona de estudio, el rango de valores que se utilizó para los perfiles de Velocidad V_p es de 400 m/s a 3000 m/s. Se describen las siguientes unidades geosísmicas:

Tabla 6. Clasificación geosísmica para valores V_p .

Unidad	Rango de Velocidad de Onda P (m/s)	Simbología	Descripción
UP-1	400-1000 		Material de relleno. Depósitos de material granular de poca compactación
UP-2	1100-2000 		Material granular muy compacto o conglomerado.
UP-3	>2000 		Conglomerado muy denso o compacto.

Mientras que para V_s se utilizó la clasificación V_{s30} :

Tabla 7. Clasificación del suelo por V_{s30} (IBC,2012)

Tipo de Suelo	Nombre del Suelo	Velocidades de onda de corte, V_{s30} (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, N	Resistencia a la corte no drenada S_u (psf)
A	Roca muy dura	$V_s > 1500$	N/A	N/A
B	Roca	$760 < V_s < 1500$	N/A	N/A
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < V_s < 760$	$N > 50$	$S_u > 2000$
D	Suelo rígido	$180 < V_s < 360$	$15 < N < 50$	$1000 < S_u < 2000$
E	Suelo blando	$V_s < 180$	$N < 15$	$S_u < 1000$
F	-	Cualquier perfil de suelo de 3 m de espesor que tenga las siguientes características: 1. Índice de plasticidad (IP) > 2. Contenido de humedad (w) > 40%		



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

G	-	Cualquier perfil de suelo que contenga		
		una o más de las siguientes características 1. Suelos vulnerables a una posible fractura o colapso bajo efecto sísmico, por ejemplo: suelos licuables, arcillas altamente sensibles y suelos débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas (H>3 de turba y/o arcillas altamente orgánicas, donde H= espesor del suelo). 3. Arcillas de muy alta plasticidad (H>7.6 m con índice de plasticidad IP>75) 4. Arcillas gruesas suaves a medias (H>36m)		

INGEOTEC

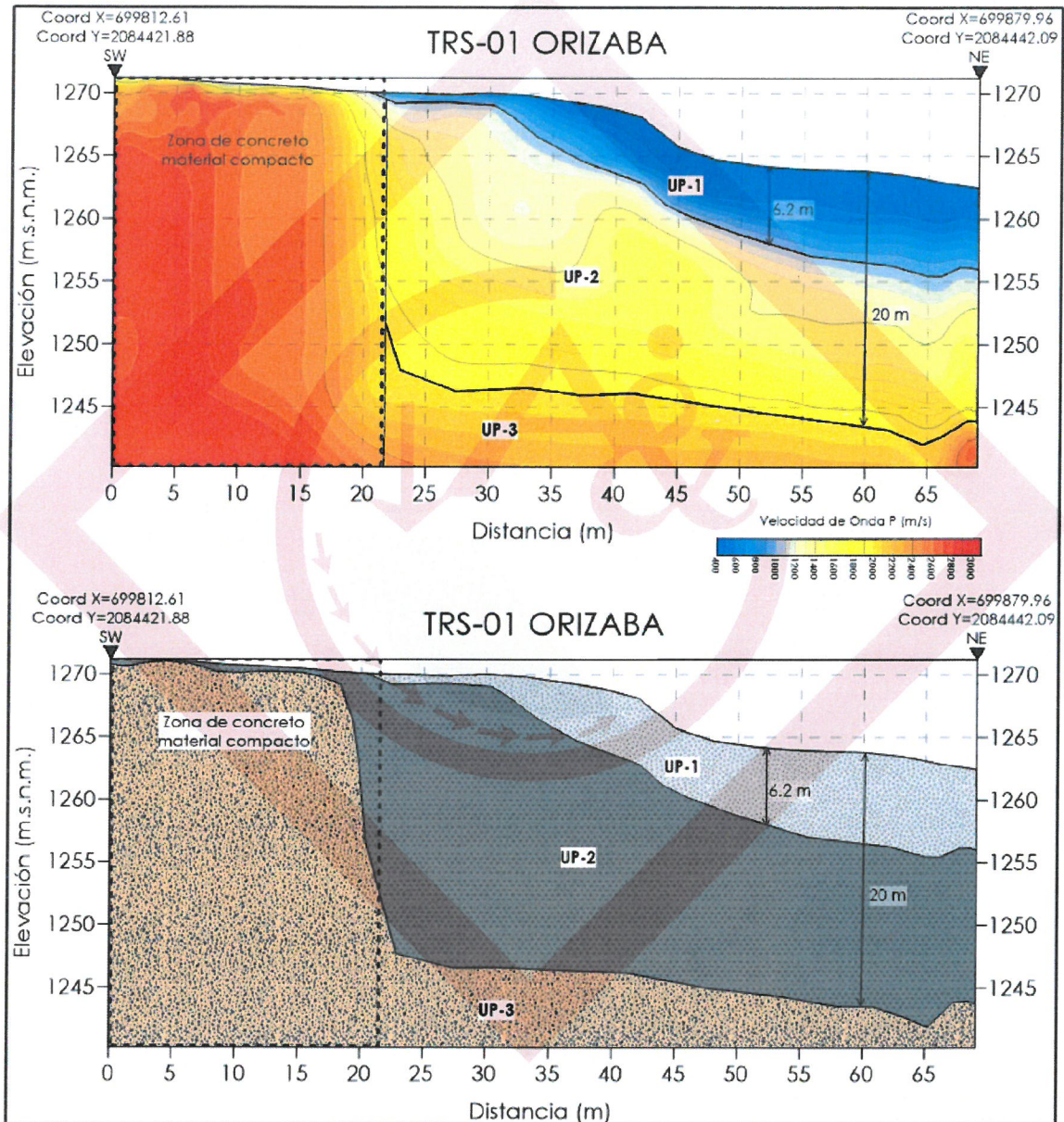


Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

TRS/MASW-01



El perfil de refracción sísmica TRS-01 cuenta con una distancia total de 69 metros y con dirección SW-NE. Está conformado por 24 geófonos dispuestos a una distancia de 3 metros. Se observan valores de velocidad de onda P de 400 a 3000 m/s. Se distinguen 3 unidades geosísmicas descritas a continuación:



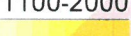

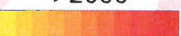



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

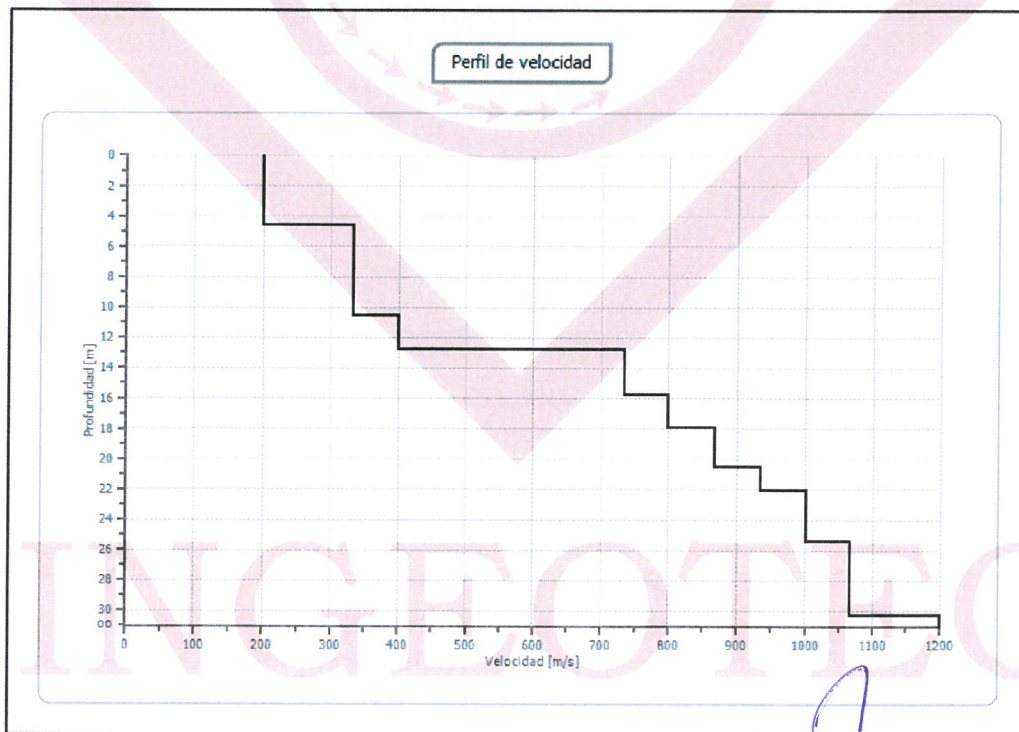
Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Unidad	Rango de Velocidad de Onda P (m/s)	Simbología	Descripción
UP-1	400-1000 		La primera y más superficial unidad, se observa a partir de los 20 m de distancia, cuenta con espesores desde 0.5 hasta 6.2 metros. La unidad se asocia a material de relleno. Depósitos de material granular de poca compactación.
UP-2	1100-2000 		Esta unidad, al encontrarse consecuente a la UP-1, se encuentra a profundidades de hasta 6.2, así como también en superficie. Los espesores de la unidad varían hasta los 22 metros. Esta unidad muestra un adelgazamiento en los primeros metros del perfil debido a un aumento en la compactación del material dado que parte del perfil se encuentra en zona de concreto.
UP-3	>2000 		Finalmente, la unidad UP-3, se encuentra a profundidades de hasta 20 metros. Esta unidad se asocia a conglomerado muy denso o compacto. Esta unidad también sufre una alteración debido a la zona de concreto.

Perfil 1D general onda de corte:





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

Vs30 (m/s)	458.54
Categoría de suelo	C

Suelo de tipo C: Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la profundidad y por valores Vs,30 comprendidos entre 360 m/s y 800 m/s (o NSPT,30 > 50 en suelos de grano grueso y cu,30 > 250 kPa en suelos de grano fino).

n.	Profundidad [m]	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	0	4.56	199.99
2	4.56	5.98	333.04
3	10.54	2.23	399.87
4	12.77	2.97	732.94
5	15.74	2.18	798.66
6	17.92	2.56	866.43
7	20.49	1.56	933.12
8	22.04	3.40	999.73
9	25.45	4.83	1066.31
10	30.28	1.59	1199.70

INGEOTEC

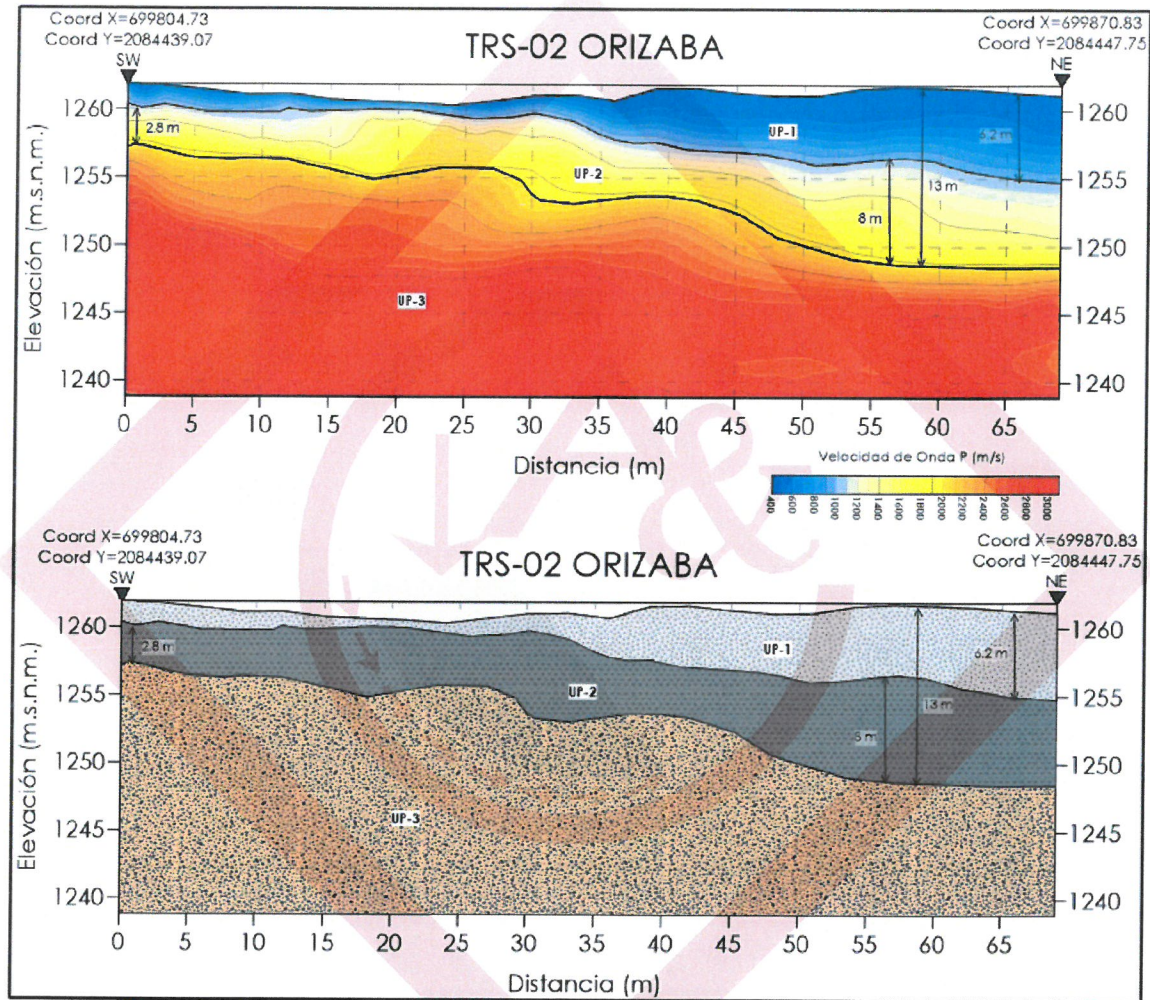


Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

TRS/MASW-02





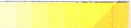
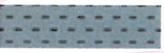


El perfil de refracción sísmica TRS-02 cuenta con una distancia total de 69 metros y con dirección SW-NE. Está conformado por 24 geófonos dispuestos a una distancia de 3 metros. Se observan valores de velocidad de onda P de 400 a 3000 m/s. Se distinguen 3 unidades geosísmicas descritas a continuación:



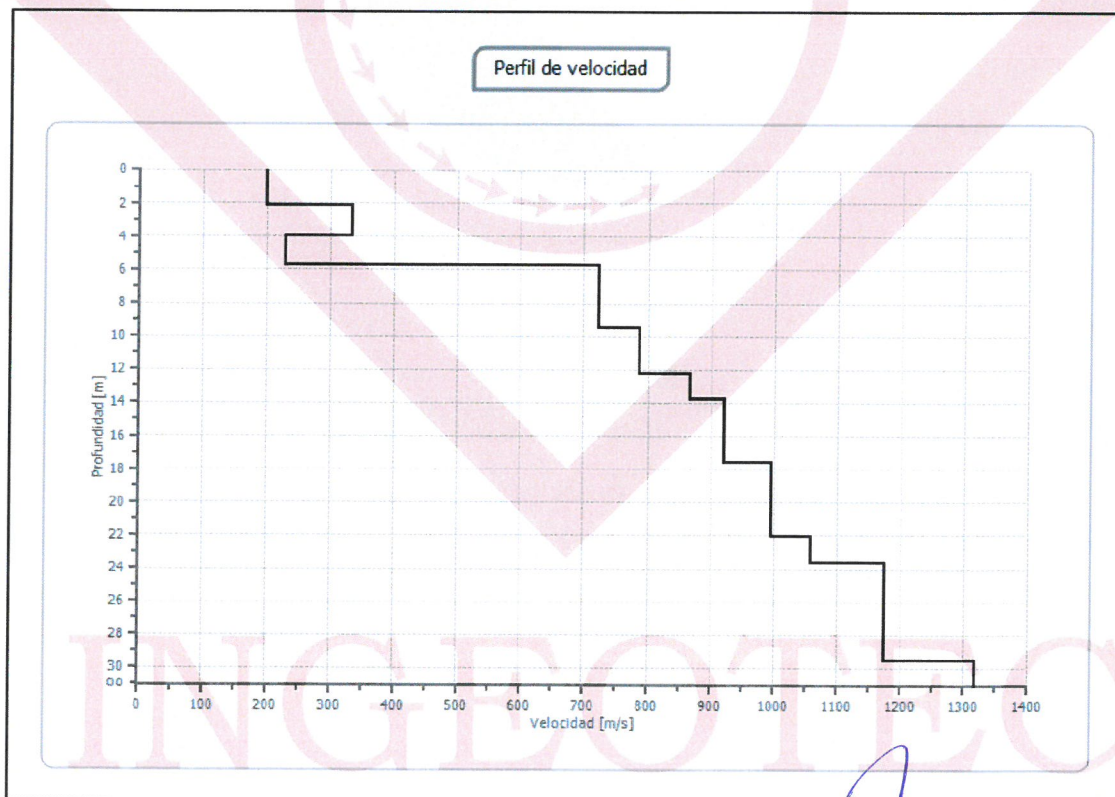
Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Unidad	Rango de Velocidad de Onda P (m/s)	Simbología	Descripción
UP-1	400-1000 		La unidad UP-1 se observa de forma continua en la parte más somera del perfil. Los espesores de la unidad varían entre los 0.6 a 6.2 metros. La unidad se asocia a material de relleno. Depósitos de material granular de poca compactación.
UP-2	1100-2000 		Dicha unidad se encuentra consecutiva a la unidad anterior, por lo que se puede encontrar a profundidades de entre 0.6 a 6.2 metros. Los espesores que la unidad presenta van desde los 2.8 hasta los 8 metros. Unidad asociada a material granular muy compacto o conglomerado.
UP-3	>2000 		Para finalizar, en la base del perfil, a profundidades de entre 4.5 a 13 metros, se observa la unidad UP-3, unidad que se asocia a conglomerado muy denso o compacto.

Perfil 1D general onda de corte:





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

Vs30 (m/s)	598.33
Categoría de suelo	C

Suelo de tipo C: Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la profundidad y por valores Vs,30 comprendidos entre 360 m/s y 800 m/s (o NSPT,30 > 50 en suelos de grano grueso y cu,30 > 250 kPa en suelos de grano fino).

n.	Profundidad [m]	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	0	2.17	198.92
2	2.17	1.79	333.33
3	3.96	1.82	228.90
4	5.78	3.71	722.38
5	9.48	2.78	785.55
6	12.27	1.53	864.77
7	13.79	3.78	919.84
8	17.58	4.44	995.74
9	22.01	1.61	1058.23
10	23.63	5.89	1174.19
11	29.52	oo	1317.26

INGEOTEC

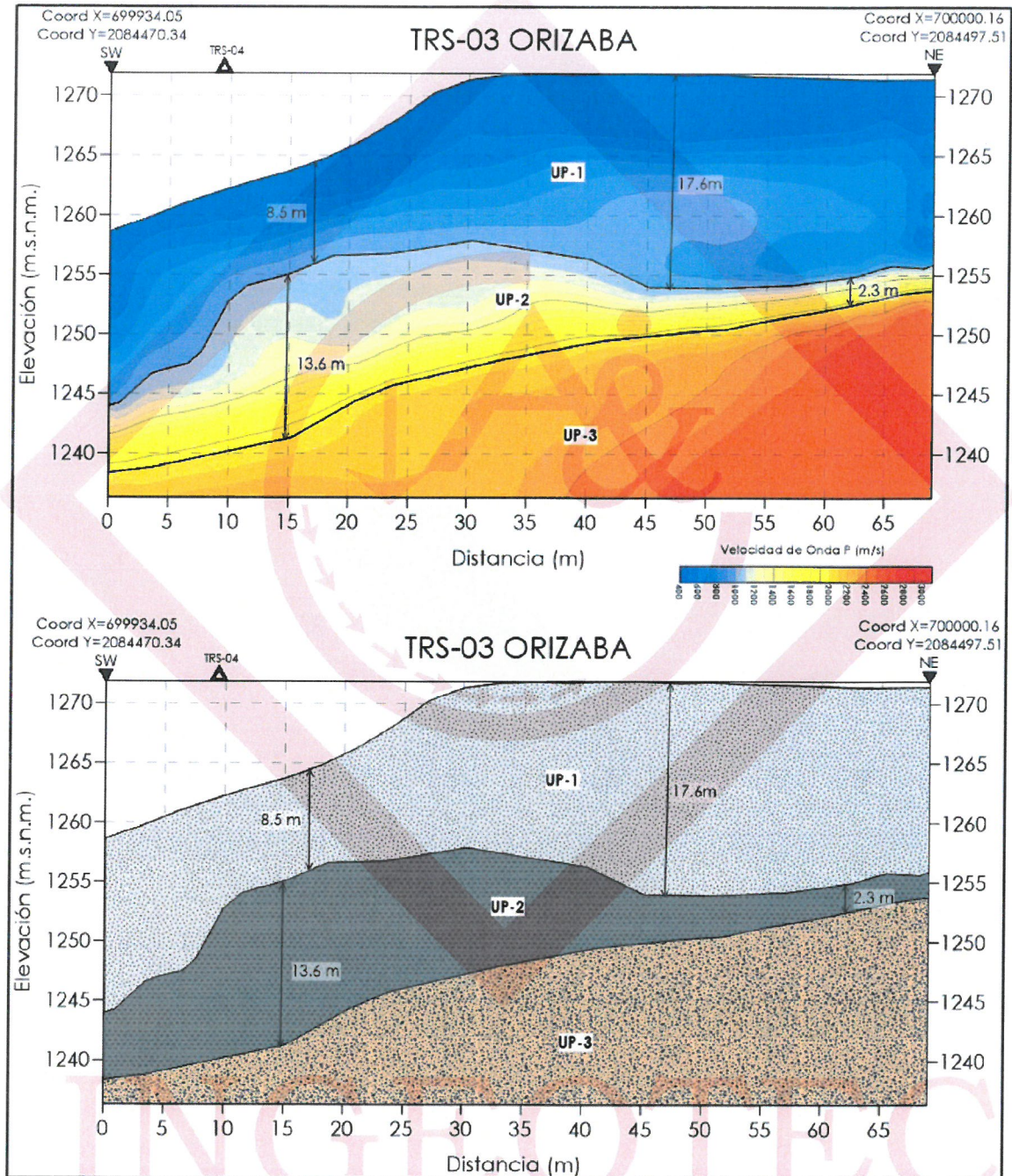


Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

TRS/MASW-03





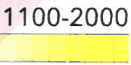





Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

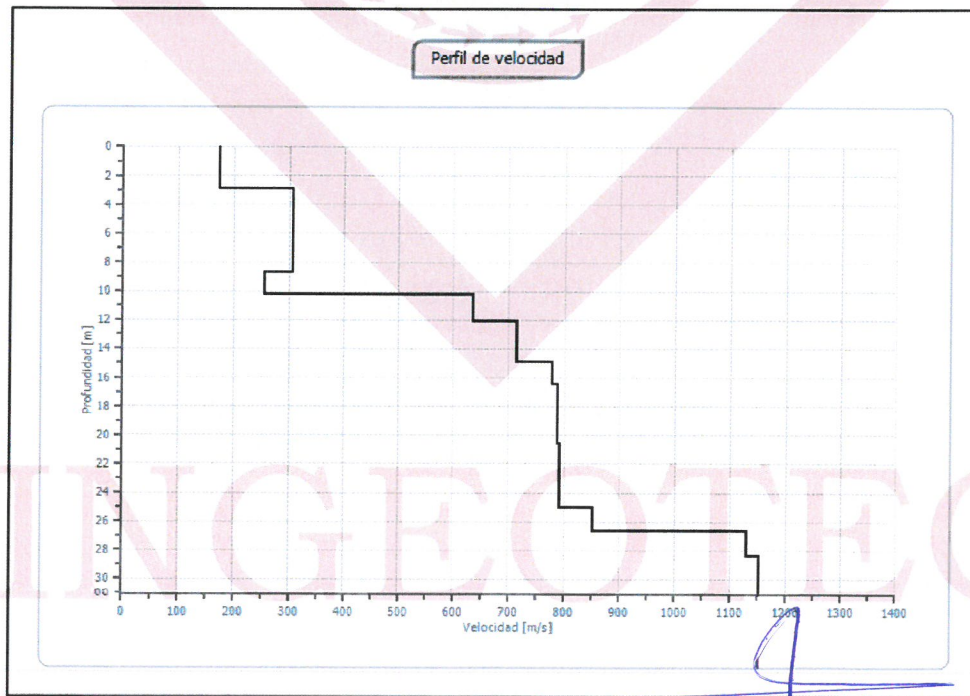
Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

El perfil de refracción sísmica TRS-03 cuenta con una distancia total de 69 metros y con dirección SW-NE. Está conformado por 24 geófonos dispuestos a una distancia de 3 metros. Se observan valores de velocidad de onda P de 400 a 3000 m/s. Se distinguen 3 unidades geosísmicas descritas a continuación:

Unidad	Rango de Velocidad de Onda P (m/s)	Simbología	Descripción
UP-1	400-1000 		La unidad UP-1, la más somera del perfil; se observa sin interrupciones a lo largo del mismo. La unidad cuenta con espesores variables desde los 8.5 hasta los 17.6 metros. Unidad asociada a material de relleno, depósitos de material granular de poca compactación.
UP-2	1100-2000 		Esta unidad se encuentra a continuación de la unidad anterior, por lo que las profundidades a partir de las que se encuentra oscilan entre los 8.5 a 17.6 metros. Los espesores en esta unidad van desde los 2.3 hasta los 13.6 metros. La unidad se asocia a material granular muy compacto o conglomerado.
UP-3	>2000 		Para finalizar, la unidad UP-3; se observa a profundidades de entre 18 a 20 metros. Se asocia con conglomerado muy denso o compacto.

Perfil 1D general onda de corte:





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

Vs30 (m/s)	451.07
Categoría de suelo	C

Suelo de tipo C: Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la profundidad y por valores Vs,30 comprendidos entre 360 m/s y 800 m/s (o NSPT,30 > 50 en suelos de grano grueso y cu,30 > 250 kPa en suelos de grano fino).

n.	Profundidad [m]	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	0	2.92	172.95
2	2.92	5.82	303.66
3	8.74	1.51	254.78
4	10.25	1.82	633.49
5	12.07	2.83	713.36
6	14.90	1.57	777.74
7	16.46	4.11	786.99
8	20.57	4.49	791.22
9	25.06	1.55	851.00
10	26.61	1.82	1129.95
11	28.43	oo	1150.80

INGEOTEC

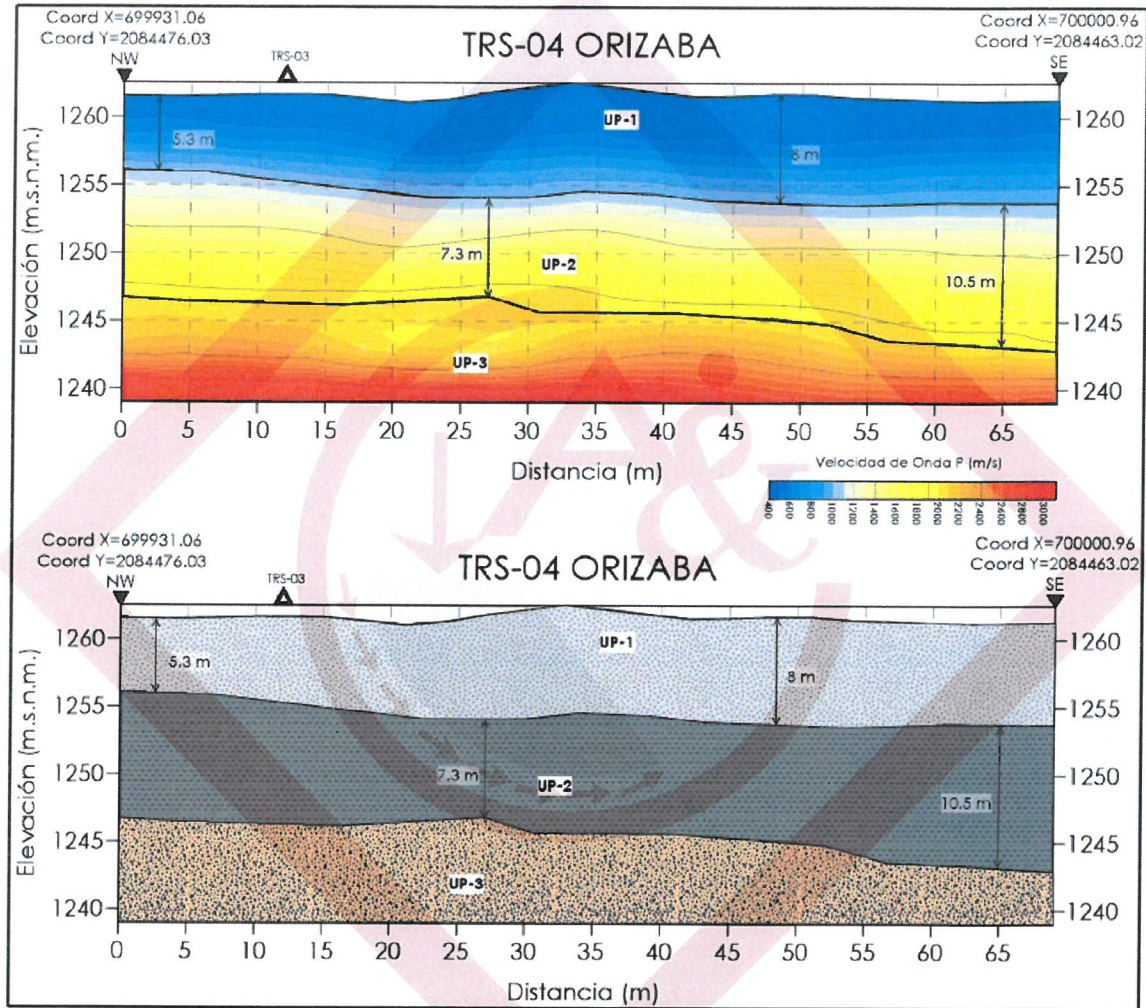


Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

TRS/MASW-04









El perfil de refracción sísmica TRS-04 cuenta con una distancia total de 69 metros y con dirección NW-SE. Está conformado por 24 geófonos dispuestos a una distancia de 3 metros. Se observan valores de velocidad de onda P de 400 a 3000 m/s. Se distinguen 3 unidades geosísmicas descritas a continuación:



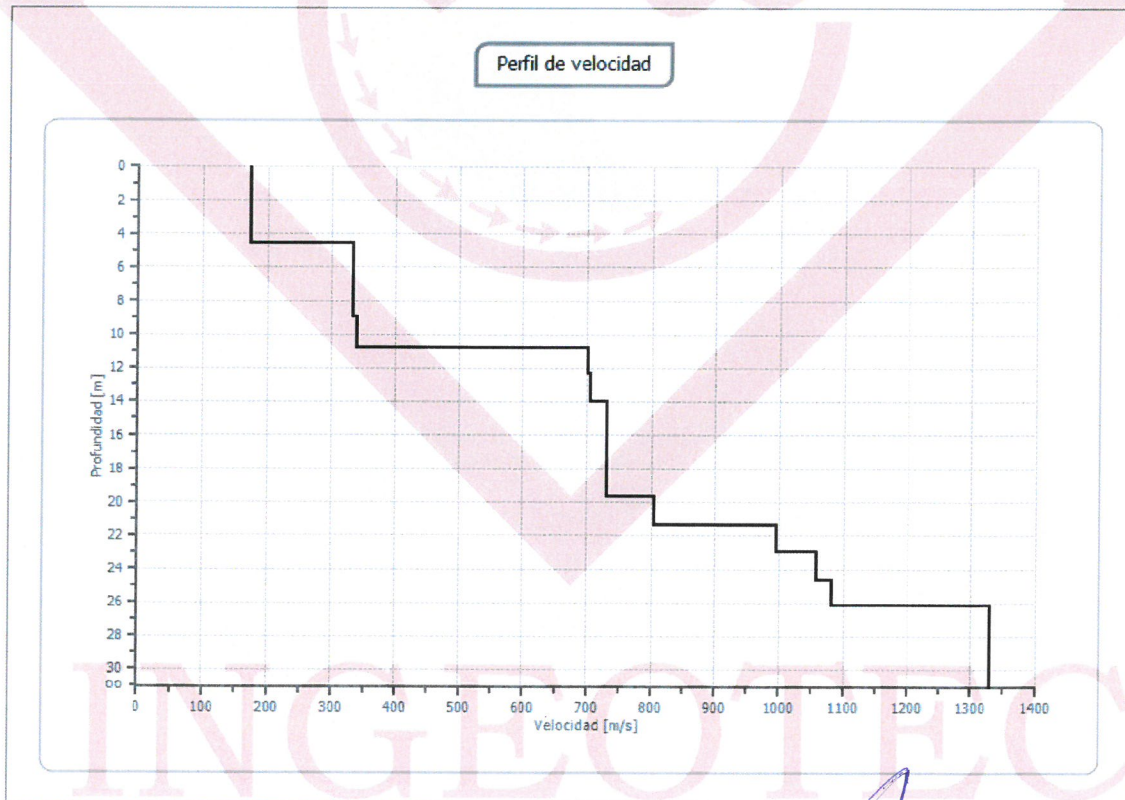
Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Unidad	Rango de Velocidad de Onda P (m/s)	Simbología	Descripción
UP-1	400-1000 		La unidad UP-1 es la más somera del perfil y se observa ininterrumpidamente a lo largo del mismo. Los espesores que la unidad presenta varían entre los 5.3 a 8 m. La unidad se asocia a material de relleno, depósitos de material granular de poca compactación.
UP-2	1100-2000 		Esta unidad, al ser consecuente a la UP-1, se observa a profundidades desde 5.3 hasta 8 m. Sus espesores varían entre los 7.3 a 10.5 metros. Unidad asociada a material granular muy compacto o conglomerado.
UP-3	>2000 		La ultima unidad, la UP-3, se observa a profundidades de entre 14 a 17.8 metros. Se asocia a conglomerado muy denso o compacto.

Perfil 1D general onda de corte:





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

Vs30 (m/s)	449.05
Categoría de suelo	C

Suelo de tipo C: Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la profundidad y por valores Vs,30 comprendidos entre 360 m/s y 800 m/s (o NSPT,30 > 50 en suelos de grano grueso y cu,30 > 250 kPa en suelos de grano fino).

n.	Profundidad [m]	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	0	4.56	173.31
2	4.56	4.37	333.33
3	8.92	1.84	338.42
4	10.77	1.56	699.04
5	12.33	1.69	703.15
6	14.02	5.61	730.12
7	19.64	1.70	803.28
8	21.33	1.66	994.88
9	22.99	1.64	1056.84
10	24.63	1.54	1082.07
11	26.17	oo	1328.86

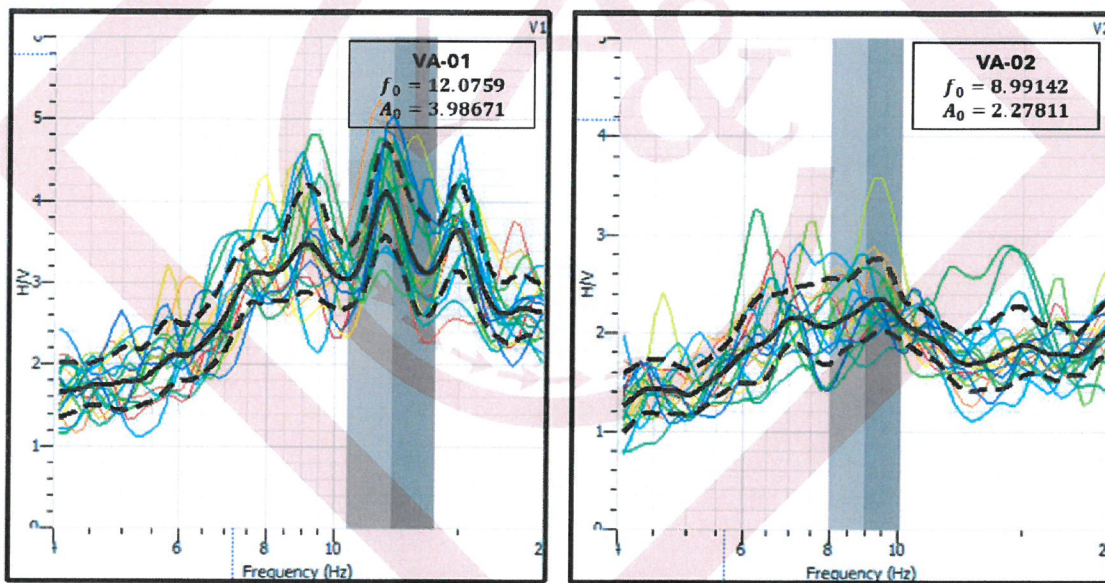
INGEOTEC



9.2 Método de Vibración Ambiental (VA)

Se calculó la relación H/V de las componentes horizontal y vertical de cada ventana obtenida. Finalmente, para el cociente espectral final se generó una gráfica de amplitud versus frecuencia, la cual se obtuvo mediante un promedio de las relaciones H/V de las ventanas consideradas para la estación en sitio.

A continuación, se presenta el cociente espectral en función de la frecuencia correspondiente a las 3 estaciones en sitio, se logra apreciar con línea discontinua el límite superior e inferior de la curva de cociente espectral, y el promedio con línea continua. Así mismo, se logra apreciar una línea vertical de color gris que define el ancho de banda de la frecuencia en la que oscila, caracterizado por su máxima amplitud.



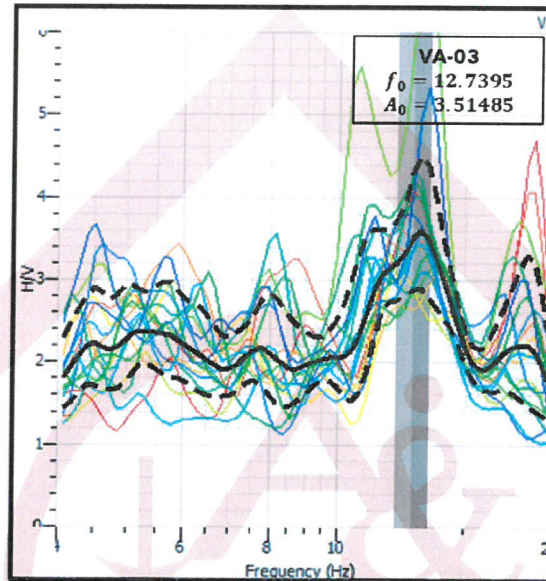
INGEOTEC



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177



Los parámetros obtenidos del procesamiento de datos en GEOPSY se presentan en la siguiente tabla:

Estación	Longitud de ventana l_w	Número de ventanas n_w	Estadísticas de la frecuencia de ventanas individuales		
			f_0 (Hz)	A_0 (H/V)	T_s (s)
VA-1	40	24	12.0759	3.98671	0.08280956
VA-2	40	18	8.99142	2.27811	0.11121714
VA-3	40	28	12.7395	3.51485	0.07849602

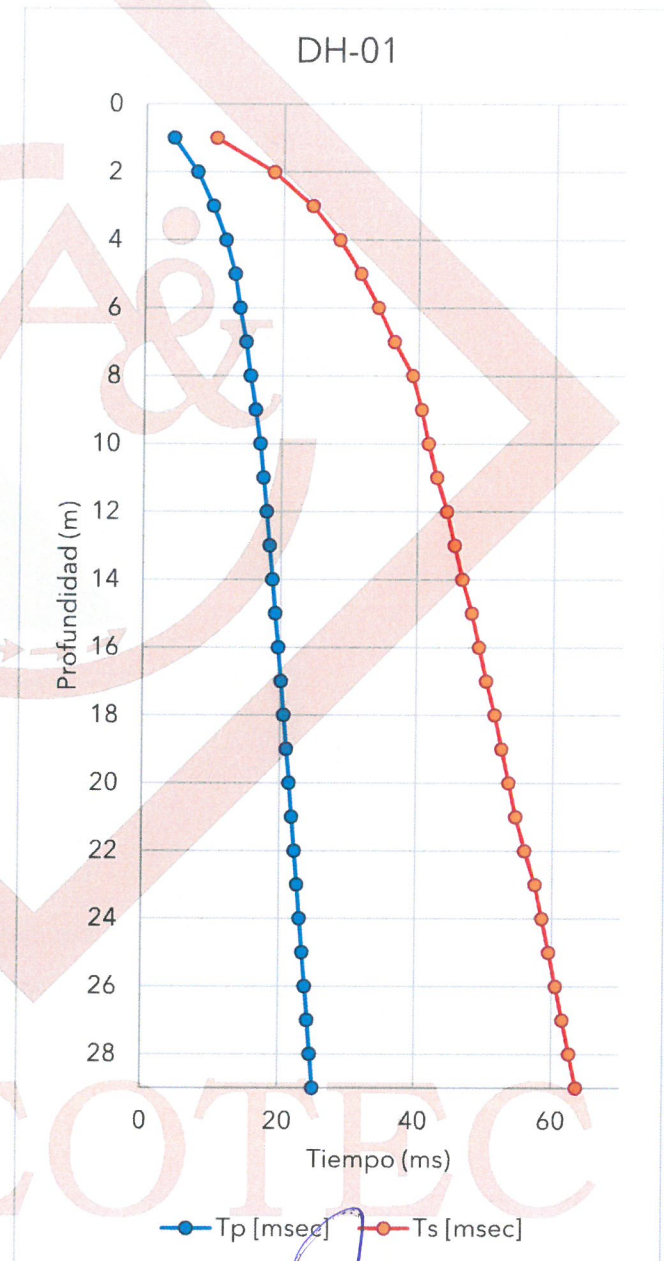
INGEOTEC



9.3 Método Down Hole (DH)

A continuación, se presentan los resultados de velocidades obtenidos del procesamiento de los tiempos de arribo en cada golpe realizado, sintetizado en una curva y tablas para cada metro del sondeo.

DH-01		
DEPTH(m)	Tp [msec]	Ts [msec]
1	4.0477	10.2458
2	7.4885	18.5825
3	9.8288	24.2538
4	11.68	28.24
5	13.0339	31.3842
6	13.7742	33.9882
7	14.7063	36.3981
8	15.3558	39.1386
9	16.1276	40.5088
10	16.8577	41.5697
11	17.3658	42.8355
12	17.8506	44.3355
13	18.3186	45.5041
14	18.7738	46.6412
15	19.2194	48.0485
16	19.6574	49.1436
17	20.0896	50.224
18	20.517	51.4898
19	20.9406	52.549
20	21.361	53.6004
21	21.7789	54.6452
22	22.1946	55.9819
23	22.6085	57.5128
24	23.0209	58.5444
25	23.4319	59.5726
26	23.8418	60.598
27	24.2508	61.6208
28	24.6589	62.6415
29	25.0563	63.6603



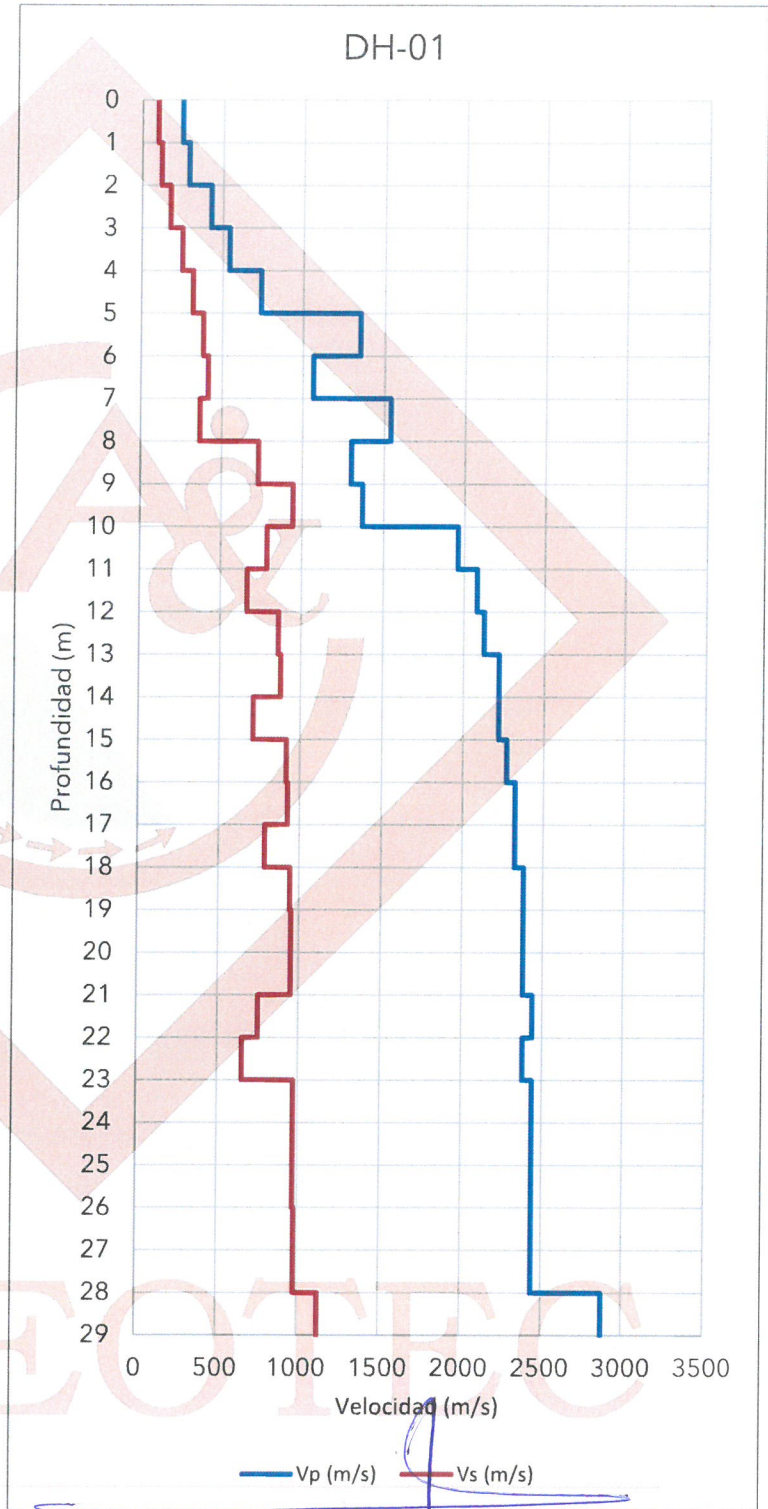


Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

DH-01		
DEPTH(m)	VP (m/s)	VS (m/s)
1	248.82	98.5
2	290.52	119.95
3	427.35	176.37
4	540.54	250.63
5	740.74	318.47
6	1351.35	383.14
7	1063.83	414.94
8	1538.46	364.96
9	1298.7	729.93
10	1369.86	943.4
11	1960.78	787.4
12	2083.33	666.67
13	2127.66	862.07
14	2222.22	877.19
15	2222.22	709.22
16	2272.73	917.43
17	2325.58	925.93
18	2325.58	787.4
19	2380.95	943.4
20	2380.95	952.38
21	2380.95	952.38
22	2439.02	751.88
23	2380.95	653.59
24	2439.02	970.87
25	2439.02	970.87
26	2439.02	970.87
27	2439.02	980.39
28	2439.02	980.39
29	2875	1127.45



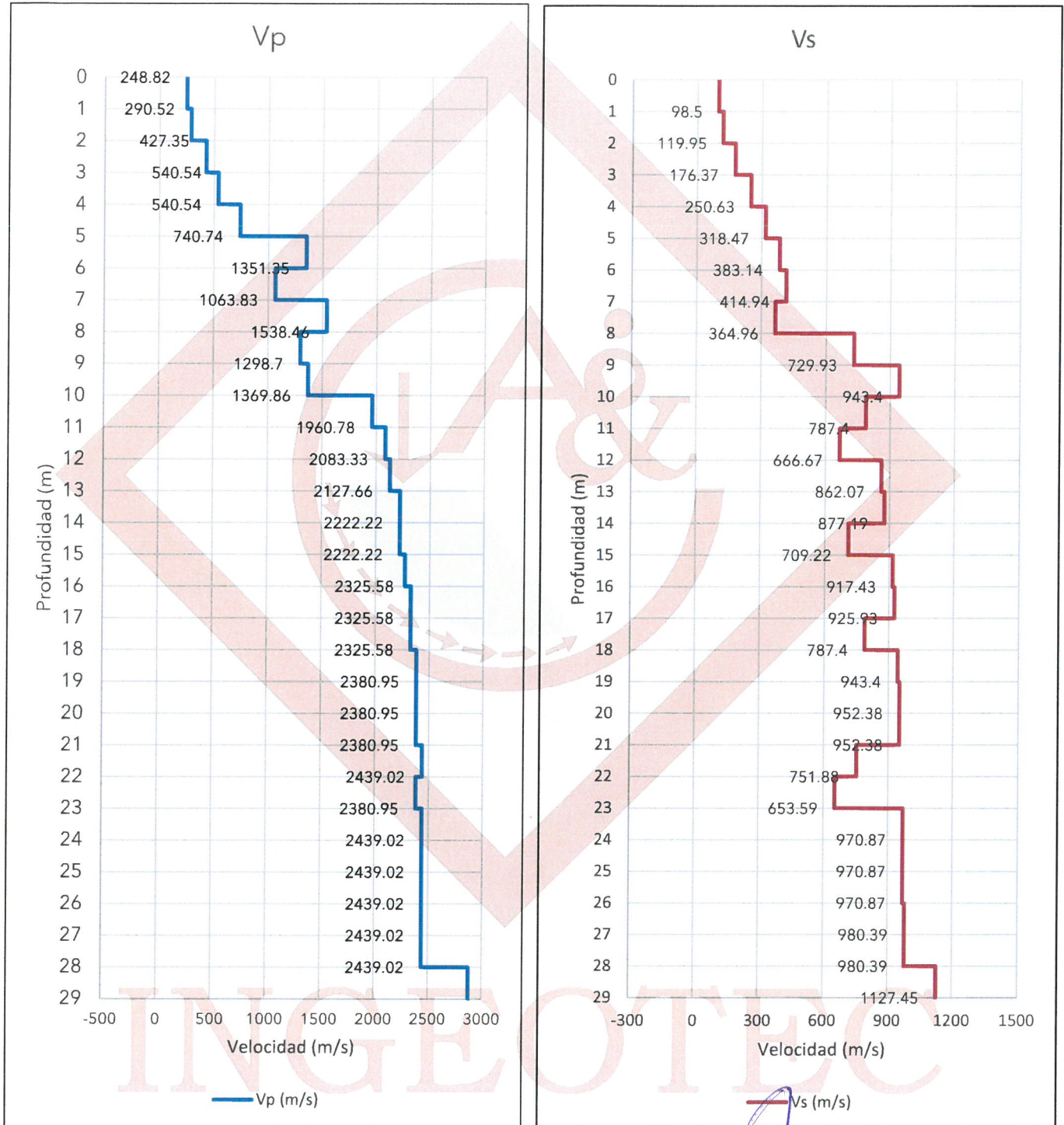


INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

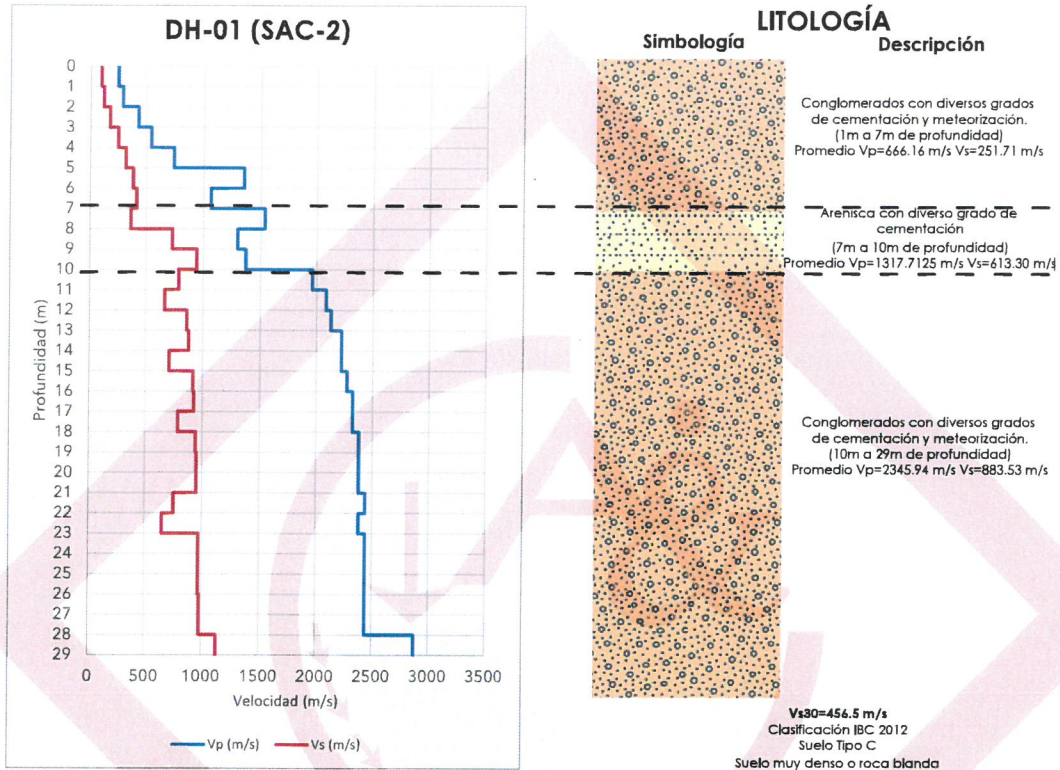




Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

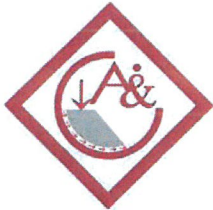
Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC



El Down-Hole DH-01(SAC-2), fue realizado hasta una profundidad de 29 metros, mostrando como resultado un valor de **VS30=456.5 m/s** y una clasificación IBC de **suelo muy denso o roca blanda**.

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

10. CONCLUSIONES

Se realizó satisfactoriamente la adquisición y el procesamiento de datos Geofísicos realizados en la Ciudad de Orizaba, Veracruz, utilizando los métodos de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), Down Hole (DH) y Vibración Ambiental (VA).

Los resultados presentes en los estudios **TRS-MASW** indican la presencia de tres unidades geosísmicas principales con variaciones en la velocidad de propagación de ondas sísmicas, desde materiales de relleno de baja compacidad (UP-1) hasta conglomerados muy densos o compactos (UP-3).

El método **Down Hole (DH)** permitió determinar perfiles de velocidades de onda de compresión (V_p) y corte (V_s), identificando un incremento progresivo de la rigidez del subsuelo con la profundidad. Dado los resultados obtenidos la clasificación del suelo según V_{s30} lo ubica en la categoría C, lo que sugiere condiciones de suelo rígido a rocas blandas con depósitos de grano grueso muy densos.

El método de **Vibración Ambiental (VA)**, en función de los objetivos planteados y considerando las características estratigráficas del depósito de suelo en el sitio de estudio, permitió obtener los siguientes resultados:

A partir de los registros obtenidos en la prueba y aplicando la técnica de Cociente Espectral H/V (Nakamura, 1989), se determinó el período fundamental del suelo en cinco estaciones dentro del área de estudio, obteniéndose los valores: $T_{sVA01} = 0.0828$ s, $T_{sVA02} = 0.1112$ s y $T_{sVA03} = 0.0784$ s."

Los resultados obtenidos de los estudios geofísicos ayudaran a obtener los valores de espectro de diseño sísmico específicos del sitio.

Sin más por el momento, me despido, no sin antes desear el mayor de los éxitos en este nuevo proyecto.

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

11. REFERENCIAS

1. De Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. **(2002)**. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education.
2. Sheriff, R. **(2002)**. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists.
3. Telford, W., Geldart, L. y Sheriff, R. **(1990)**. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 2nd edition.
4. Manual REFLEXW (Nº de versión 3.55). **(2006)**.
5. Servicio Geológico Mexicano. **(1999)**. Carta Geológica E14-6 "Orizaba"
6. INEGI. **(2021)**. Aspecto Geograficos de Veracruz.

XALAPA, VER. 2025.

Geofísica

Ing. Alexis Saúl Ruiz Ortiz

Céd. Prof. 11092296

Espectro

Ing. Zianya Xareny González Ramírez

Céd. Prof. 11780802

Vo. Bo.

Ing. Fernando Pérez Castillo.
Céd. Prof. 4616796.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Anexo 1 Reporte Fotográfico

Sísmica de Refracción (TRS) / Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

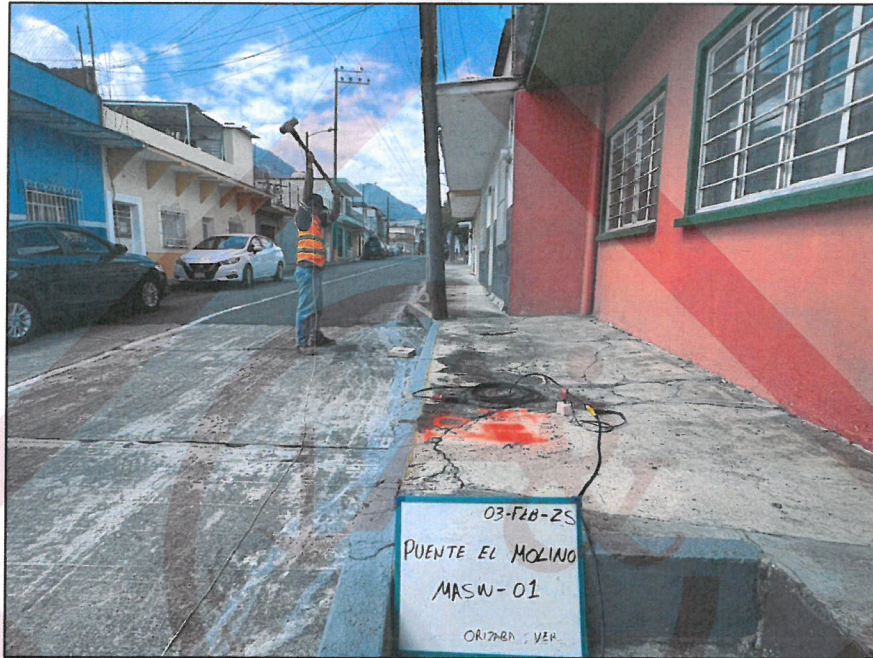




INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

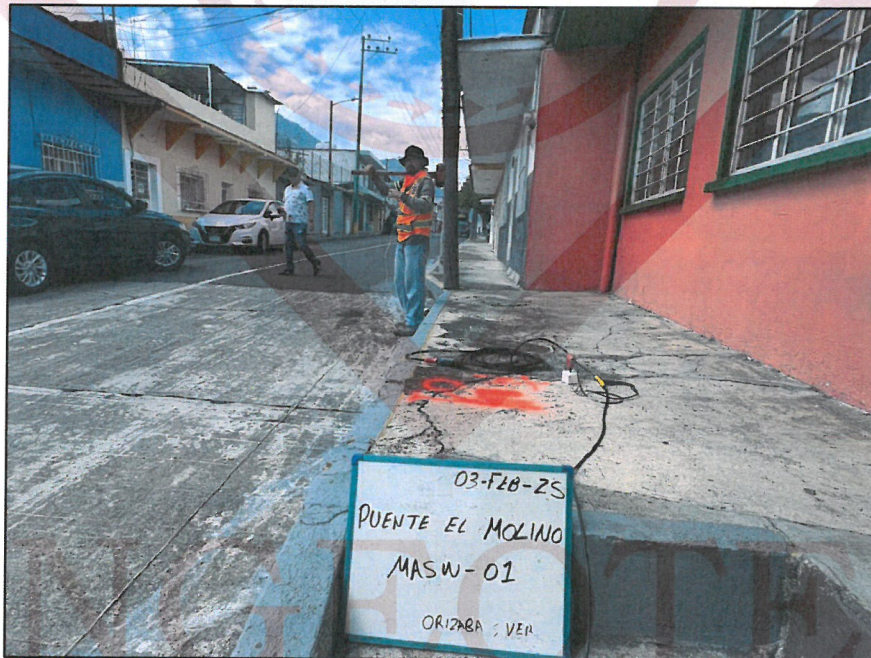




INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

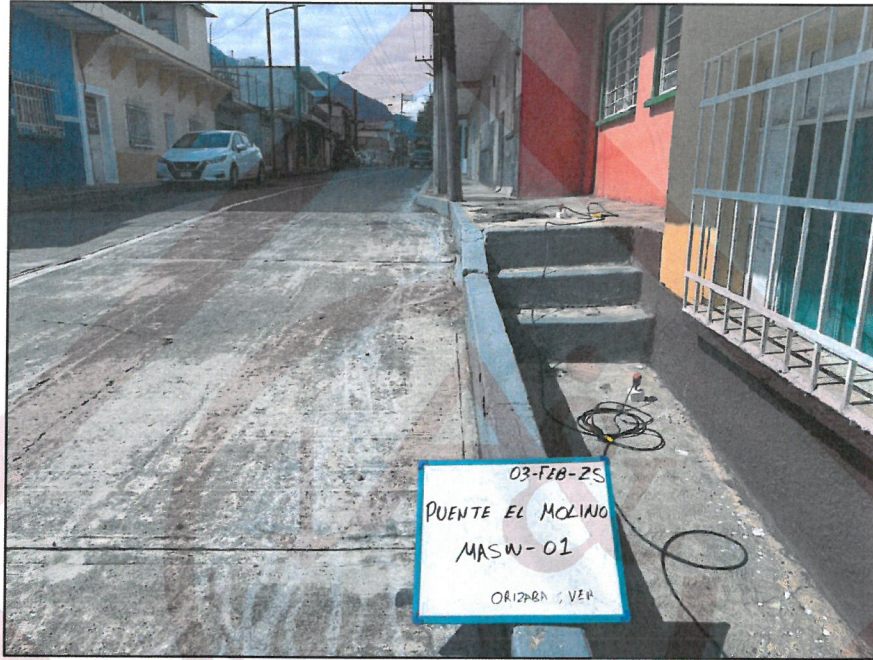




INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Down Hole (DH)

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177



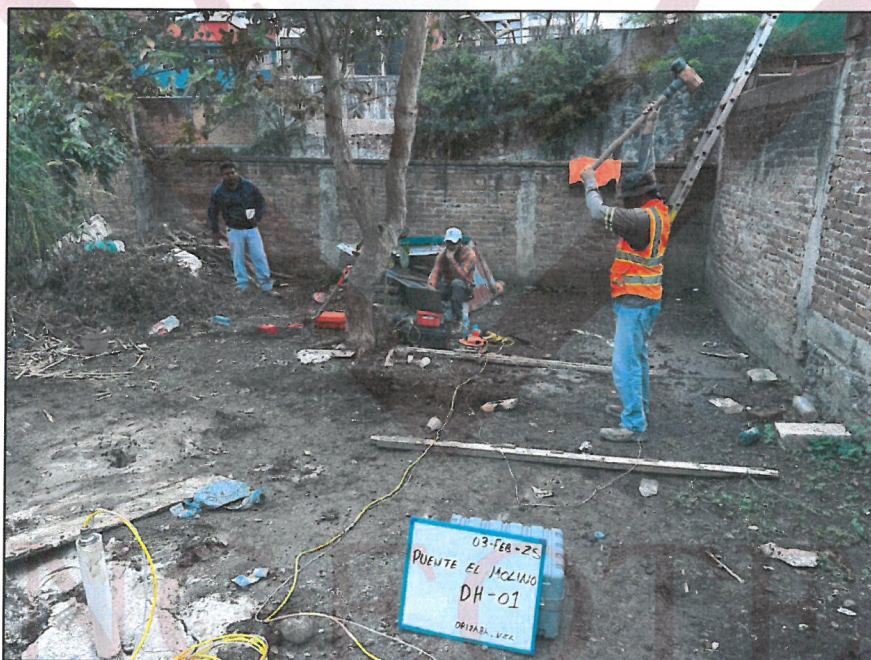


INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177





Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Vibración Ambiental (VA)





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177





INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177



INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Anexo 2 Descripción y fundamento teórico de los métodos geofísicos

Métodos Sísmicos Refracción Sísmica (TRS)

Los métodos sísmicos estudian la propagación de ondas sísmicas producidas artificialmente, estableciendo su relación con la configuración geológica del subsuelo. La velocidad de propagación depende básicamente de las constantes elásticas y la densidad del medio. Los contactos entre los cuerpos geológicos con diferente velocidad de transmisión de las ondas sísmicas, permiten estudiar la energía que vuelve a la superficie tras sufrir refracción total en superficies límite del subsuelo.

El método sísmico de refracción es de los más empleados en ingeniería, principalmente para la determinación de espesores de recubrimiento, de la estructura del subsuelo, ripabilidad de los materiales, cubicación de áreas, además de ser un buen indicador de las características geotécnicas de los materiales.

Consiste en la realización de perfiles longitudinales instrumentados con sensores (geófonos), espaciados entre sí una distancia conocida y generalmente regular. La energía liberada por la fuente (mazo, explosiones o caída peso libre), llega a los sensores provocando una perturbación que se registra en un sismógrafo. La medida de los tiempos de llegada de las ondas elásticas a los geófonos proporciona el valor de la velocidad de propagación y espesor de los distintos materiales atravesados. Se mide el tiempo transcurrido entre el momento del disparo y la llegada de la primera perturbación a cada geófono. Las primeras en llegar son las ondas directas; sin embargo, a partir de un punto (distancia crítica), llegan primero las ondas refractadas, es decir, las que circulan por los niveles inferiores del subsuelo. La mayor distancia recorrida por estas ondas es compensada por la mayor velocidad.

INGEOTEC



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

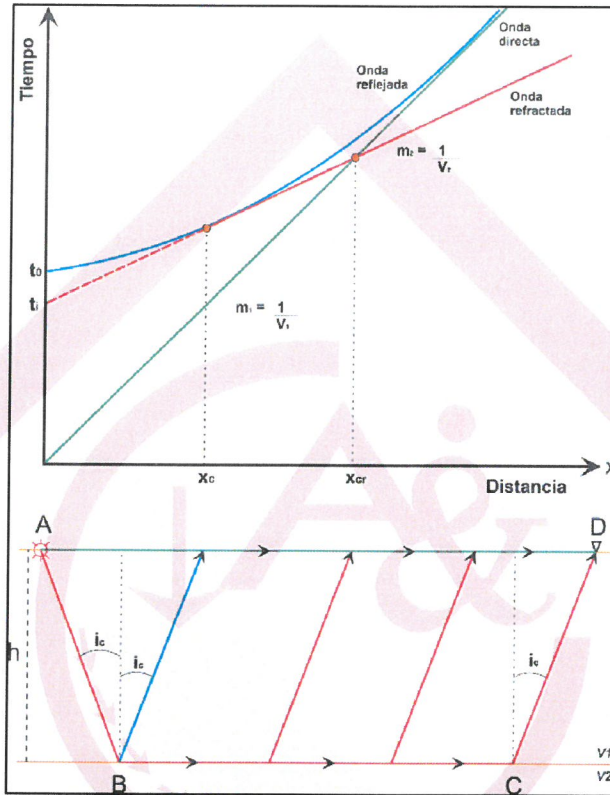


Figura A1. Curvas de tiempo de viaje para las ondas P en los distintos geófonos. Onda directa, reflejada y refractada y las dromocrónicas correspondientes en un modelo de dos capas, ambas de velocidad constante ($V_1 < V_2$); distancia crítica y tiempo de intersección refractado.

La dromocrona es la función lineal que relaciona el tiempo de llegada de la primera onda con la distancia recorrida por la misma. A cada refractor corresponde una dromocrona, y las características de dicha recta (pendiente y ordenada al origen) permiten calcular la velocidad del medio y la profundidad a la que se encuentra la superficie de refracción.

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Fundamento teórico

El método de refracción sísmica se ilustra para el caso de una interface plana entre dos capas horizontales en la **Figura A1**. Siendo la profundidad a la interface **h** y las velocidades sísmicas de las capas superior e inferior **V1** y **V2** respectivamente ($V1 < V2$). La onda directa del punto fuente **A** es registrado por un geófono **D** a una distancia **x** sobre la superficie en un tiempo dado por

$$td = \frac{x}{V_1} \quad (1)$$

La curva de tiempo de viaje de la onda directa es una línea recta desde el origen con una pendiente

$$m_1 = \frac{1}{V_1} \quad (2)$$

La onda refractada viaja a lo largo de la trayectoria **AB** con la velocidad **V1** de la capa superior, incide con un ángulo crítico i_c sobre la interface en **B**, pasa por el segmento BC con velocidad $V2$ de la capa inferior, y regresa sobre la trayectoria **CD** con velocidad **V1**. Los segmentos **AB** y **CD** son iguales por lo que el tiempo de viaje para el trayecto **ABCD** puede ser descrito como

$$t = \frac{2SC}{V_1} + \frac{CD}{V_2} \quad (3)$$

por lo cual

$$t = \frac{2h}{V_1 \cos i_c} + \frac{(x-2h \tan i_c)}{V_2} \quad (4)$$

Reordenando los términos y usando la Ley de Snell, $\sin i_c = V_1/V_2$, obtenemos el tiempo de viaje para la onda refractada

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h}{V_1} \cos i_c \quad (5)$$



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

La ecuación representa una línea recta con pendiente $m_2 = 1/V_2$. Las ondas refractadas son registradas únicamente a distancias más grandes que la distancia crítica X_c . El **tiempo de intersección t_i** es encontrado interpolando la curva de refracción $t-x$ con el eje de tiempo y está dada por

$$t_i = \frac{2h}{V_1} \cos i_c = 2h \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2} \quad (6)$$

Parte de la trayectoria de la onda refractada viaja a una velocidad más alta dado que se propaga por la capa inferior, así que eventualmente supera la onda directa y se convierte en la primera onda en ser registrada. La línea recta de la onda directa y de la onda refractada se cruzan a una distancia la cual es llamada distancia de cruce X_{cr} . Se calcula igualando los tiempos de viaje de la onda directa y la onda refractada

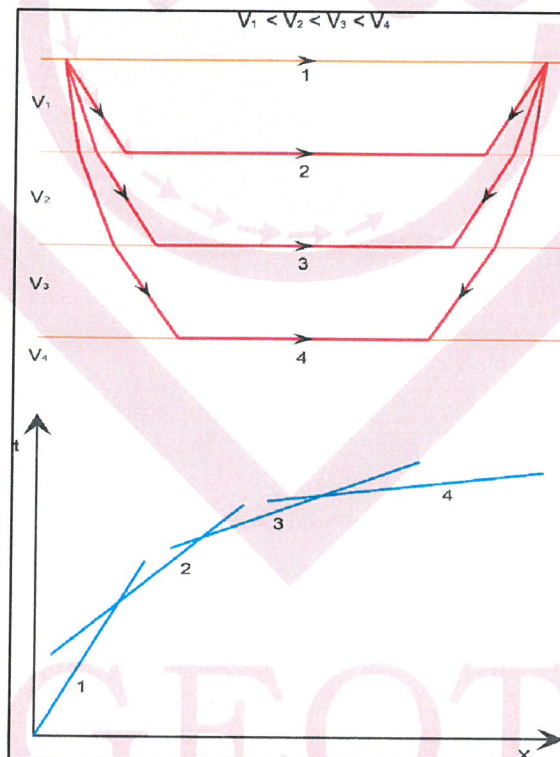


Figura A2 Trayectorias de las ondas sísmicas y dromocrónicas en medios estratificados con dos capas o más con velocidades $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

$$\frac{x}{v_1} = \frac{x}{v_2} + 2h \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \quad (7)$$

$$x_{cr} = 2h \sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}} \quad (8)$$

El método sísmico de refracción nos da las velocidades de las capas del subsuelo directamente de las pendientes correspondientes a las ondas directas y refractadas registradas en las dromocronas. Una vez estas velocidades han sido determinadas es posible calcular la profundidad h a la interfaz usando el tiempo de intercepción el cual puede ser leído directamente

$$h = \frac{1}{2} t_i \frac{v_1 v_2}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (9)$$

La generalización para n capas planas horizontales superpuestas en las que la velocidad de capa aumenta con la profundidad, no impone ninguna dificultad. La expresión para los tiempos de recorrido de las ondas refractadas en la capa n viene dada por

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2h_i \sqrt{v_n^2 - v_i^2}}{v_n v_i} \quad (10)$$

Las dromocrónicas resultantes son una serie de rectas de pendiente cada vez menor (ver **Figura A2**).



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Métodos Sísmicos Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW por sus siglas en inglés) es un método sísmico no destructivo para evaluar la velocidad de onda S del subsuelo. Proporciona información sobre la velocidad de la onda de corte **V_s** de los materiales cercanos a la superficie de una manera muy rentable. Debido al valor significativo de esta información, en la mayoría de los proyectos de ingeniería geotécnica y también debido

a la operación relativamente simple en el campo y al procesamiento de datos, está ganando popularidad entre las comunidades de ingenieros. El módulo de corte está directamente relacionado con la rigidez de un material, dado que la **V_s** aumenta a medida que la rigidez del material (resistencia al corte) aumenta y sísmicamente la velocidad de onda de corte (**V_s**) es su mejor indicador, por lo que es uno de los parámetros de ingeniería más críticos.

El método MASW se ha aplicado con éxito a problemas como la caracterización de pavimentos, estudios de la relación de Poisson, estudio de diques y subrasantes, investigación de la rigidez de los sedimentos del fondo marino, mapeo de zonas de falla, así como la medición de la velocidad de la onda S en función de la profundidad.

En la mayoría de los levantamientos sísmicos que utilizan una fuente sísmica vertical como un mazo, más de dos tercios de la energía sísmica total generada se propaga como ondas superficiales tipo Rayleigh, el componente principal del Ground roll (onda superficial de baja velocidad, baja frecuencia y alta amplitud). Suponiendo una variación vertical de velocidad, cada componente de frecuencia de las ondas superficiales tiene una velocidad de propagación diferente (velocidad de fase), lo que genera diferentes longitudes de onda para cada frecuencia propagada. Esta propiedad es llamada dispersión. El método MASW utiliza esta propiedad de las ondas superficiales con el propósito de generar perfiles 1D o 2D de velocidad de onda de corte.

INGEOTEC



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

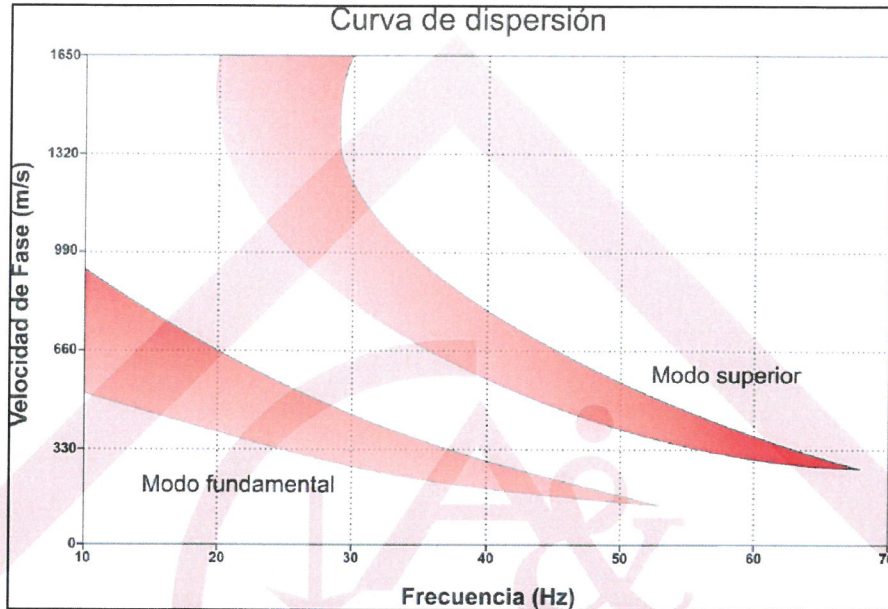


Figura A3 Curva de dispersión en el dominio de las frecuencias y velocidad de fase producto de una transformada en los datos sísmicos.

Básicamente es un método sísmico que trabaja con bajas frecuencias (3-30 Hz) que utiliza múltiples receptores equiespaciados (24 o más geófonos) desplegados en un patrón lineal. Utiliza las ondas superficiales que se propagan horizontalmente a lo largo de la superficie de medición directamente desde el punto de impacto hasta los receptores. Cada canal se encarga de registrar la señal de cada receptor. Un registro multicanal consiste de un número múltiple de series de tiempo (llamadas trazas) de todos los receptores de una manera ordenada. La profundidad máxima de investigación (**ZMAX**) suele estar en el rango de 10 m a 30 m, pero este puede variar según el sitio y el tipo de fuente activa utilizada.

Los datos sísmicos de cada registro se transforman al dominio frecuencia - velocidad de fase en la que se evalúa la tendencia de la curva de dispersión del modo fundamental (ver **Figura A3**). Se pueden utilizar diversas técnicas para calcular la curva de dispersión. La imagen y calidad de la tendencia de la curva de dispersión del modo fundamental, esencial para el método, pueden verse influenciadas por los parámetros de adquisición de datos de campo, como la intensidad de la fuente, la frecuencia dominante del receptor, etc. Con el enfoque multicanal, se obtienen imágenes de las propiedades de dispersión de todo tipo de ondas (tanto de cuerpo como superficiales) donde se



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

reconoce un patrón de dispersión específico en la imagen transformada. Esta transformación elimina todo el ruido ambiental, así como el ruido generado por la fuente, ondas dispersas y reflejadas.

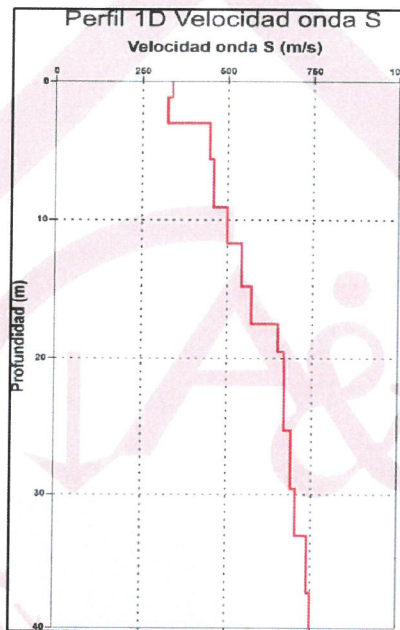


Figura A4 Perfil 1D de Vs obtenido de la inversión de datos.

La curva de dispersión extraída se utiliza finalmente como referencia para obtener perfiles 1D de **Vs** en función con la profundidad del área de estudio. Este cálculo se llama inversión y se logra de forma iterativa usando la curva de dispersión como referencia para el modelado directo o de mínimos cuadrados (ver Figura A1.6). El valor promedio de las ondas de corte se calcula mediante la siguiente expresión

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n v_{si}} \quad (11)$$

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Al aplicarlo a numerosos modelos 1D derivados de registros de disparos sísmicos registrados consecutivamente a lo largo de una línea sísmica, se puede obtener un modelo 2D de V_s a través de un esquema apropiado de interpolación. Por lo general, valores de la relación de Poisson se estiman durante este proceso.

Métodos Sísmicos Down Hole (DH)

Es un método que se usa comúnmente para determinar los perfiles de la onda de compresión (V_p) y de corte (V_s) en función de la profundidad. El ensayo consiste en generar ondas sísmicas mediante una fuente de energía desde la superficie del terreno, esta perturbación se registra a profundidad a través de un geófono que está ubicado en la parte inferior de un pozo previamente realizado. El geófono registra el movimiento y envía la señal a un sismógrafo donde es amplificada y digitalizada para un posterior tratamiento. Para este ensayo se requiere que el sondeo haya sido entubado y se pueden situar uno o varios geófonos.

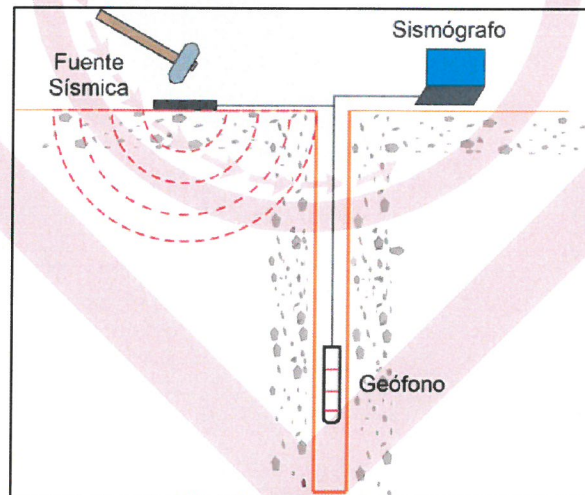


Figura A5 Esquema de ensayo Down-Hole.

Este método trata de medir los distintos retardos que sufre la onda al viajar por el terreno siguiendo la trayectoria más rápida, por tanto, determinar el retardo que sufre la onda P y onda S al desplazarse entre el origen del golpe y el geófono. Conociendo la geometría fuente-geófonos del dispositivo y los tiempos de llegada de las ondas sísmicas es posible calcular las velocidades de propagación a distintos niveles de profundidad a lo largo del pozo.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Las mediciones se realizan generalmente a una profundidad que varía de una manera constante (ej. 1 m) desde la superficie y hasta la máxima profundidad alcanzada con los sondeos exploratorios. Con el análisis a diferente profundidad, se construye la curva dromocrónica que asocia la profundidad con el tiempo de arribo de las ondas. La pendiente establecida en estas curvas refleja la velocidad con que se propagan las ondas sísmicas en los materiales estudiados.

La herramienta de Down Hole puede proporcionar respuestas críticas a una serie de aspectos en el área de aguas subterráneas, ambientales y geotécnicas que incluyen: Inspección y verificación de la construcción del pozo, evaluación estratigráfica detallada, identificación de zonas de fractura, falla o alteración, evaluación de las condiciones del pozo antes del sellado y abandono.

Métodos Sísmicos Vibración Ambiental (VA)

La prueba de Vibración Ambiental (VA) forma parte de los métodos sísmicos pasivos, debido a que la prueba no emplea una fuente artificial como la caída de un marro o una masa, el uso de dinamita, entre otras herramientas utilizadas en la prospección de sísmica activa para la caracterización dinámica del subsuelo.

Los métodos sísmicos pasivos se basan en el registro de las señales generadas por microtemblores o ruido ambiental; términos que se emplean para denotar todo tipo de vibraciones ambientales naturales y de actividad humana como lo son: los efectos del viento en árboles o edificios, tránsito vehicular, maquinaria industrial, fábricas, etc. La energía generada por estas fuentes se presenta y propaga en forma de ondas sísmicas. En la Figura A se presenta esquemáticamente el espectro sísmico de los diferentes tipos de fuentes. Las frecuencias que contiene la prueba de Vibración Ambiental oscilan en los rangos de 0.1 y 10 Hz.

INGEOTEC



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

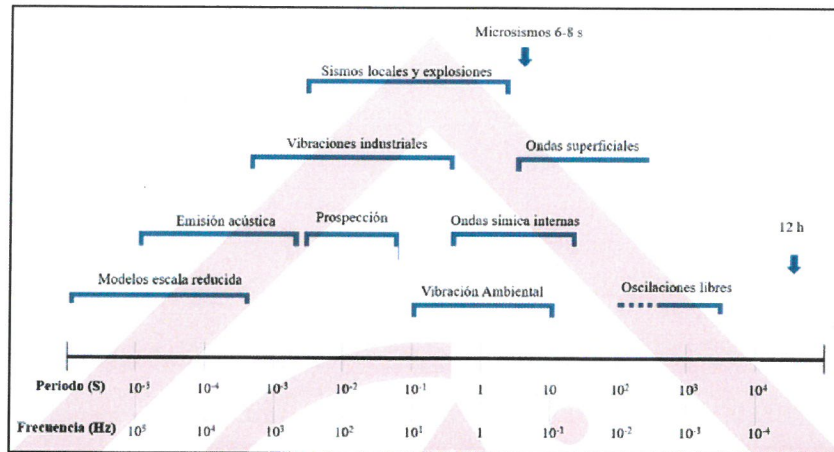


Figura A6 Esquema modificado del espectro sísmico de diferentes tipos de fuentes sísmicas (Vargas J., 2013).

Con base en lo anterior, es preciso mencionar que el método de Vibración Ambiental no estima el periodo fundamental del suelo (T_s) por sí mismo, únicamente registra la información obtenida de campo (vibraciones del terreno). Para la estimación del T_s (parámetro que contribuye a la evaluación del efecto del sitio) se emplea la técnica de *Cocientes Espectrales H/V* (Nakamura Y., 1989).

Nogoshi e Igarashi (1971), citados por Bard (1999), introdujeron por primera vez la idea de estimar el cociente espectral H/V de una sola estación entre las componentes horizontal y vertical. Mostrando su relación con la curva de elipticidad de la onda Rayleigh, y aprovecharon la coincidencia que se presentó entre el máximo de frecuencia más baja de la curva del cociente espectral H/V con la frecuencia de resonancia fundamental del suelo. Con base en ello, se empleó como un indicador de la estructura subterránea de un depósito de suelo (Jaramillo, 2012).

La interpretación de Nogoshi e Igarashi se sustentó en la suposición de que el ruido predominantemente consta de ondas superficiales y argumentaron los siguiente (Nogoshi & Igarashi, 1971):

- El cociente espectral H/V está básicamente relacionada con la elipticidad de las ondas Rayleigh, debido a la predominancia de este tipo de ondas en la componente vertical;
- El movimiento elíptico que tiene la onda depende de la frecuencia y comprende un rango corto de amplitudes máximas correspondientes a la frecuencia fundamental del sitio, considerando todos los materiales que componen el



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

depósito del suelo. La máxima amplitud que presenta el espectro también se asocia al comportamiento elíptico inverso de la componente vertical;

- Con base en lo postulado por Nogoshi e Igarashi (1971), la técnica de Cociente Espectral o también conocida como H/V fue retomada e implementada por Nakamura (1989), quien afirma que el cociente es una estimación confiable de la función de transferencia del sitio de las ondas S (Bard, 1999).

Nakamura supone que la razón espectral corresponde a la función de transferencia de los niveles superficiales sometidos a movimientos horizontales. Fundamenta su trabajo en la hipótesis de que un microtemblor está compuesto por ondas de cuerpo y ondas superficiales de Rayleigh, principalmente, inducidas por fuentes naturales y antropogénicas. Considerando que las componentes horizontal y vertical del registro son similares en la base rocosa y que los registros se amplifican por los estratos de suelo blando que yacen sobre el basamento rocoso.

La interpretación de Nakamura del cociente H/V, está basada en la suposición de que el efecto de las ondas superficiales puede ser "eliminado", de modo que el resultado final, está relacionado directamente con las funciones de transferencia para las ondas S.

En referencia a lo anterior, (Nakamura Y. , 2000) presenta un segundo trabajo, ligeramente modificado. En el cual expone la separación de los microtemblores en las ondas de cuerpo y las ondas superficiales, asumiendo lo siguiente:

- Los microtemblores consisten en ondas de Rayleigh, propagándose en una capa que está encima de un semiespacio. Estas microtemblos son amplificadas por las capas superficiales blandas de suelo acumuladas sobre un substrato duro;
- El efecto de las ondas de Rayleigh es igual para las componentes horizontales y verticales en superficie;
- La componente vertical de las microtemblos no es amplificada por las capas horizontales;
- Se puede considerar que la componente horizontal de las microtemblos es amplificada por la multireflexión de la onda S y la componente vertical por multireflexión de la onda P;
- El movimiento es totalmente debido a fuentes locales y todas las fuentes profundas son despreciadas;
- Las fuentes locales no afectan el movimiento de los microtemblores en la base del estrato del suelo.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

La metodología para estimar el cociente espectral H/V es llamado por Nakamura (2000) como Técnica Quasi Transfer Spectrum (QTS), y consiste en obtener la relación de los Espectros de Amplitud de Fourier (FAS) de las componentes horizontales (N-S y O-E) entre el FAS de la componente vertical de los *microtemblores* registrados mediante un sensor triaxial colocado en la superficie del terreno. Finalmente, se define una relación espectral que se asemeja a la función de transferencia del movimiento horizontal de las capas superficiales, estimando así el periodo fundamental del depósito de suelo de un sitio.

Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$SE(w) = \frac{Hs(w)}{Hb(w)}$$

(12)

Donde $SE(w)$ representa el espectro de los efectos de sitio, $Hs(w)$ es el espectro de la onda horizontal en superficie y $Hb(w)$ es el espectro de la onda horizontal en la base del movimiento.

Puesto que las ondas internas de los microtemblores contienen ondas superficiales, es necesario corregirlas removiendo los efectos de las ondas superficiales. Nakamura, asume que el efecto de las ondas Rayleigh (As), está incluido en el espectro de ondas verticales superficiales (Vs) y no en la base del movimiento (Vb) y consecuentemente puede ser definido como:

$$AS(w) = \frac{Vs(w)}{Vb(w)}$$

(13)

Removiendo el efecto de las ondas Rayleigh, el espectro de sitio modificado queda definido por:

$$SM(w) = \frac{Hs(w)}{Vb(w)} = \frac{Hs(w)}{Hb(w)} \frac{Vs(w)}{Vb(w)}$$



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

(14)

Nakamura demostró experimentalmente, usando registros directos y de microtemores que:

$$\frac{Vb(w)}{Hb(w)} \approx 1$$

(15)

Sustituyendo la ecuación 4 en 3 se obtiene que:

$$SM(w) \approx \frac{Hs(w)}{Vs(w)}$$

(16)

Por lo que Nakamura concluyó que el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical del movimiento en un mismo sitio puede ser usada como un estimativo de los efectos de sitio para ondas internas. La técnica elimina los efectos de fuente, patrón de radiación y trayectoria que se presentan en los sismos.

INGEOTEC



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

ANEXO 3: DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO Y ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO PARA EL PROYECTO “PUENTE VEHICULAR EL MOLINO”

INGEOTEC



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivo	3
1.2. Alcances	3
2. CONDICIONES GEOTÉCNICAS	4
2.1. Localización del sitio en estudio	4
2.2. Espectro de diseño Sísmico PRODISIS (CFE, 2015).....	5
2.3. Trabajos de campo	6
2.4. Propiedades dinámicas.....	6
2.4.1. Curvas de degradación del módulo de rigidez al esfuerzo cortante y relación de amortiguamiento para suelos.	8
3. DEFINICIÓN DEL AMBIENTE SÍSMICO	11
3.1. Espectro de peligro uniforme.....	12
3.2. Generación de los acelerogramas sintéticos.....	13
4. ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO	15
5. ESPECTRO DE SITIO TRANSPARENTE	17
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	20
Referencias Bibliográficas	21

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

ANEXO A

Relación de Tablas

Tabla 1. Parámetros sísmicos del espectro transparente regional PRODISIS (CFE, 2015).	5
Tabla 2. Velocidades de onda de cortante del terreno estimadas.	7
Tabla 3. Registros semilla empleados para la generación de los sismos sintéticos.	12
Tabla 4. Espectros de respuesta para cada grupo estructural.	17
Tabla 5. Parámetros de los espectros propuestos suavizados en superficie para estructuras del Grupo B1 y A2.	19

Relación de Figuras

Figura 1. Localización del sitio (Google Maps, 2024).	4
Figura 2. Espectro de diseño transparente regional PRODISIS (CFE, 2015).	5
Figura 3. Perfiles de velocidades de onda de cortante.	8
Figura 4. Curvas de degradación del módulo de rigidez normalizado, $G/G_{m\acute{a}x}$ para arcillas (Vucetic y Dobry, 1991).	9
Figura 5. Curvas de la relación de amortiguamiento, λ , para arcillas (Vucetic y Dobry, 1991).	9
Figura 6. Curvas de degradación del módulo de rigidez normalizado, $G/G_{m\acute{a}x}$ para arenas.	10
Figura 7. Curvas de degradación relación de amortiguamiento, λ (%) para arenas.	10
Figura 8. Ubicación de las estaciones sismológicas en terreno rocoso.	11
Figura 9. Ubicación de los epicentros.	12
Figura 8. Espectros de peligro uniforme en roca obtenido de PRODISIS, CFE (2015).	13
Figura 9. Comparación de los espectros de los sismos sintéticos con el EPU (CFE, 2015), para los eventos considerados.	14
Figura 10. Espectros de respuesta en superficie para el EPU de referencia y envolvente de los análisis de respuesta de sitio.	15
Figura 11. Aceleraciones máximas con la profundidad.	16
Figura 12. Deformaciones angulares máximas con la profundidad.	16
Figura 13. Envolvente ARS, espectros transparentes Prodisis y propuestos para estructuras del grupo B1 y A2.	17
Figura 14. Espectro propuesto transparente para estructura del Grupo B1 y A2.	18
Figura 15. Sismo sintético CSER9906.15.C2.BC generado para el EPU de referencia.	22
Figura 16. Sismo sintético CSER1104.07.C2.BC generado para el EPU de referencia.	22
Figura 17. Sismo sintético CSER1203.20.C2.BC generado para el EPU de referencia.	23
Figura 18. Sismo sintético CSER9909.301.C2BC generado para el EPU de referencia.	23
Figura 19. Sismo sintético XALE1709.19.C3.BC generado para el EPU de referencia.	24



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

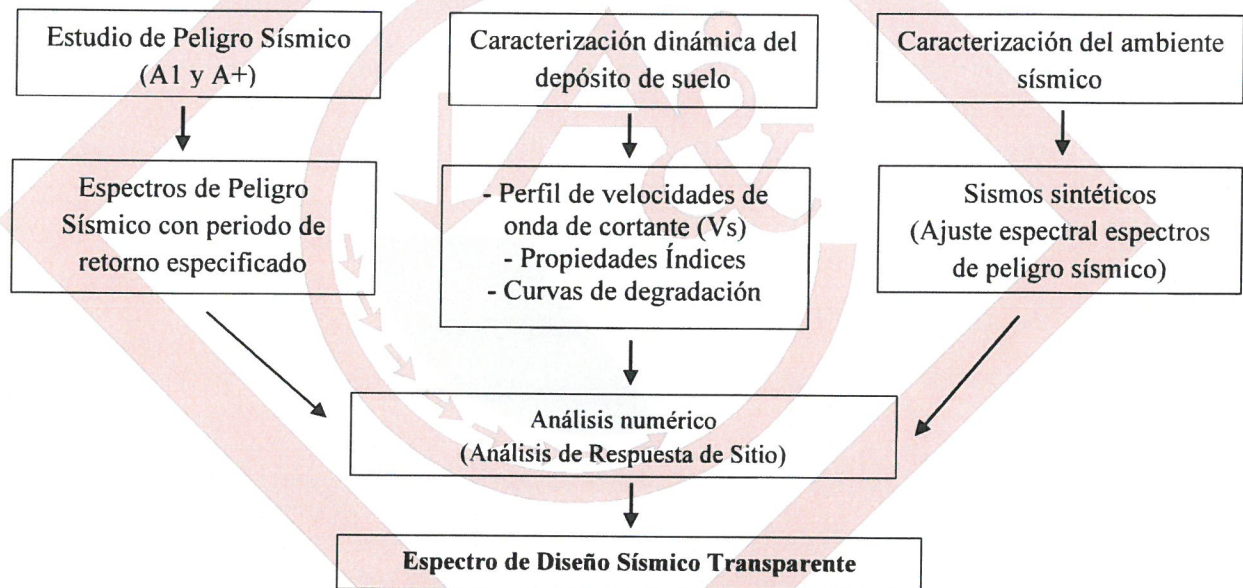
INGEOTEC

1. INTRODUCCIÓN

A solicitud del cliente, en este trabajo se determinó el espectro de diseño sísmico a emplearse en el puente vehicular "El Molino", Orizaba, Veracruz.

En este trabajo se lleva a cabo la definición del ambiente sísmico, así como los análisis y consideraciones de los aspectos dinámicos del suelo involucrados en el diseño sísmico de la estructura a construirse dentro del predio en cuestión.

El espectro de diseño se determinó de acuerdo con el requerimiento dado por el cliente, y siguiendo los lineamientos y consideraciones dadas en el Manual de Comisión de Electricidad de Diseño por Sismo en su edición de 2015, de acuerdo con el siguiente diagrama.



1.1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es determinar el espectro de diseño sísmico para el área en estudio cubriendo los diferentes escenarios sísmicos a los cuales pudieran estar sometidas las estructuras.

1.2. Alcances

- Definición del ambiente sísmico a través del espectro de referencia (ER), correspondiente al sitio de estudio (análisis probabilista) correspondiente al Espectro de Peligro Uniforme dado en el Manual de la Comisión Federal de Electricidad (CFE-2015).
- Análisis de respuesta de sitio considerando la estratigrafía y las propiedades de los materiales obtenidas de la exploración geofísica y geotécnica en el sitio en estudio, mediante modelos unidimensionales de propagación de onda (Deepsoil).
- Definición de cinco acelerogramas sintéticos para ser empleados en el análisis de respuesta de sitio.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

- Definición del espectro de diseño sísmico tomando en cuenta las recomendaciones del Manual de la Comisión Federal de Electricidad (CFE-2015), aplicable y vigente y los análisis de respuesta de sitio generados.

2. CONDICIONES GEOTÉCNICAS

2.1. Localización del sitio en estudio

El sitio en estudio se ubica en el municipio "El Molino", Orizaba, Veracruz. La ubicación del proyecto en estudio se encuentra en una zona de intensidad sísmica tipo C de acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles-Diseño por Sismo (Figura 1).



Figura 1. Localización del sitio (Google Maps, 2024).



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

2.2. Espectro de diseño Sísmico PRODISIS (CFE, 2015)

En función del espectro de diseño para el sitio en estudio proporcionado por el programa PRODISIS (CFE, 2015), el periodo del sitio es de $T_{SPRODISIS} = 0.1$ s, para una estructura tipo B con suelo Tipo III y zona sísmica C. Considerando la V_s ponderada de la prueba de Downhole de $V_s = 600$ m/s y un espesor de suelo de 30 metros (ARGEOTEC, 2025).

Tabla 1. Parámetros sísmicos del espectro transparente regional PRODISIS (CFE, 2015).

Zona sísmica Tipo C	
Longitud: -97.1027 O Latitud: 18.8424 N	
Espectro en roca	Espectro en sitio
a0r: 114.71 cm/s ²	a0: 270.23 cm/s ²
c: 382.29 cm/s ²	c: 964.9 cm/s ²
	Ta: 0.2 s
	Tb: 1.5 s
	Tc: 2 s
	k: 1
	r: 0.67

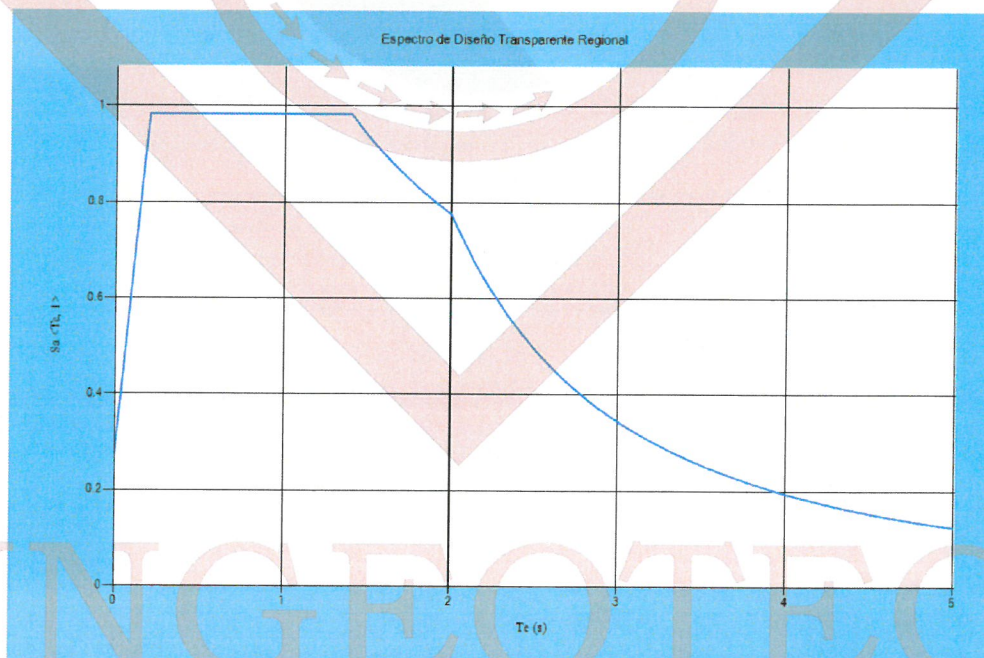


Figura 2. Espectro de diseño transparente regional PRODISIS (CFE, 2015).



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

2.3. Trabajos de campo

Para caracterizar las condiciones dinámicas del terreno de cimentación del sitio en estudio, se empleó el perfil de velocidades de onda de cortante (V_s), estimado de la prueba de "Downhole" y el periodo fundamental del suelo (T_s) de las pruebas de "Vibración Ambiental",

Así mismo, de acuerdo con la mecánica de suelos realizada en el sitio, empleando la información de los sondeos mixtos, se caracterizaron las condiciones estratigráficas y dinámicas del terreno del sitio (INGEOTEC, 2025).

2.4. Propiedades dinámicas

De la exploración geofísica, se estimaron los perfiles de velocidades de propagación de onda longitudinal y de onda de corte a diferentes profundidades. Por otro parte, con base en la información de la exploración geotécnica, se incluyó la variabilidad de las propiedades dinámicas en los análisis generando dos perfiles de V_s de los sondeos mixtos SAC, empleando correlaciones que involucran como parámetro el número de golpes de la prueba de SPT, como se indica a continuación.

Correlación SPT

Con la expresión de 1 se obtiene V_s a partir del número de golpes de la prueba SPT de los sondeos y del esfuerzo efectivo medio, mediante la siguiente expresión (Ohta y Goto, 1978).

$$V_s = 85.34N^{0.348} \quad (1)$$

Donde, N es el número de golpes de la prueba de penetración estándar corregido por energía y esfuerzo de confinamiento. Se sabe que la corrección con esfuerzo de confinamiento es el principal factor que afecta al N por lo que se aplicó la siguiente corrección:

$$C_N = \left(\frac{95.76}{p'_0}\right)^{0.5} \quad \text{si } C_N < 1 \quad (2)$$

Donde, p'_0 es el esfuerzo vertical efectivo.

Finalmente se obtuvo un perfil de V_s mejor estimado (ME) con base en los resultados de la prueba de DH. Para cubrir la variabilidad espacial de las propiedades dinámicas (i.e. variaciones en las velocidades de onda de cortante), con base en el perfil mejor estimado y asumiendo una distribución de probabilidad normal y una desviación estándar de +/- 15% en el sitio, se obtuvieron 7 perfiles de velocidades aleatorios, así mismo se incluyeron los perfiles de V_s calculados de los tres sondeos geotécnicos, dando un total de 11 perfiles de V_s empleados en los análisis (Figura 3). En la Tabla 2 se resumen los valores de V_s estimados para el área en estudio.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

Tabla 2. Velocidades de onda de cortante del terreno estimadas.

Prof.	Vs ME	Vs_1	Vs_2	Vs_3	Vs_4	Vs_5	Vs_6	Vs_7	Vs_8	Vs_9	Vs_10
(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1.00	176	150	176	160	150	163	158	156	150	120	110
2.00	200	215	193	188	216	188	221	198	197	201	170
3.00	246	257	221	246	277	252	264	225	268	239	224
4.00	251	265	263	244	247	238	266	228	265	216	251
5.00	318	324	353	314	340	351	277	336	346	316	271
6.00	383	431	432	394	426	429	377	352	382	342	410
7.00	415	387	453	430	469	407	402	432	470	383	431
8.00	365	360	370	358	371	397	361	347	390	318	416
9.00	730	765	728	741	632	725	638	811	648	804	788
10.00	943	1053	959	867	854	863	838	1074	1063	926	941
11.00	787	684	734	874	721	786	845	783	730	767	838
12.00	667	668	605	727	626	746	669	627	619	608	578
13.00	862	884	851	777	775	974	862	909	825	777	990
14.00	877	845	749	806	937	930	798	882	853	778	945
15.00	709	785	654	635	631	734	627	677	616	757	612
16.00	917	882	990	1013	850	921	942	918	797	804	897
17.00	926	894	955	1050	823	935	1049	1013	864	948	1055
18.00	787	797	823	778	843	739	877	688	847	787	762
19.00	943	1010	938	1078	871	832	864	1034	1040	938	822
20.00	952	1004	1083	872	947	1022	1033	962	880	919	909
21.00	952	1073	1088	997	934	1033	1040	1087	821	840	1021
22.00	752	672	747	672	860	829	830	739	811	774	791
23.00	654	687	662	644	735	622	728	742	584	668	693
24.00	971	1033	1033	873	1110	992	1072	1015	1039	957	988
25.00	971	1031	1072	842	895	983	1005	1034	985	1064	834
26.00	971	929	964	1059	1097	980	834	941	924	875	978
27.00	980	1104	1024	835	1077	1039	847	984	1063	956	885
28.00	980	969	840	1003	853	1113	1125	927	914	1074	922
29.00	1127	1001	1007	1146	992	1266	1075	1104	979	1173	1028
30.00	176	1001	1007	1146	992	1266	1075	1104	979	1173	1028



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

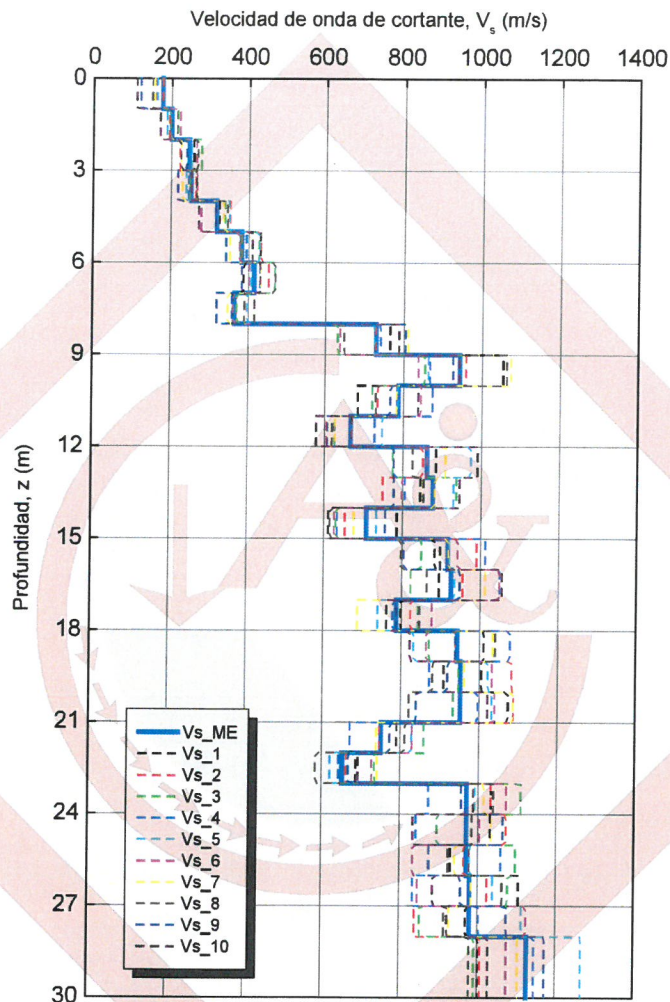


Figura 3. Perfiles de velocidades de onda de cortante.

2.4.1. Curvas de degradación del módulo de rigidez al esfuerzo cortante y relación de amortiguamiento para suelos.

Al no contar con pruebas dinámicas de laboratorio, las cuales permiten caracterizar la degradación del módulo de rigidez normalizado, G/G_{\max} , y de relación de amortiguamiento, λ , en función de la deformación angular. Se emplearon curvas empíricas de la literatura especializada que se basan en estudios de laboratorio para la realización de los análisis.

Con relación al índice de plasticidad que presentaron los materiales en el área de estudio se emplearon dos tipos de curvas. Para arcillas de baja plasticidad, se ocuparon curvas de degradación (en función de la deformación angular) propuestas por Vucetic y Dobry (1991) ver Figura 4 y Figura 5.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

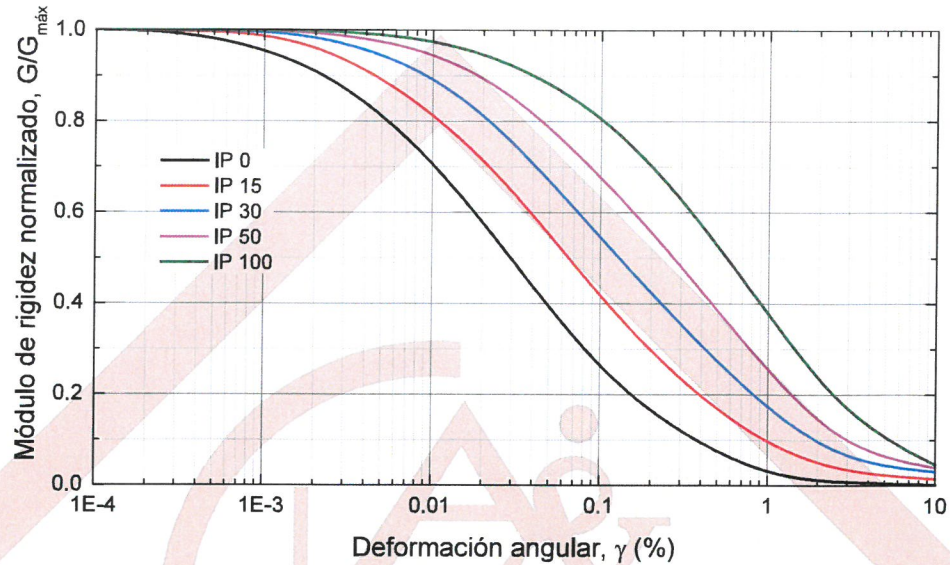


Figura 4. Curvas de degradación del módulo de rigidez normalizado, $G/G_{máx}$ para arcillas (Vucetic y Dobry, 1991)

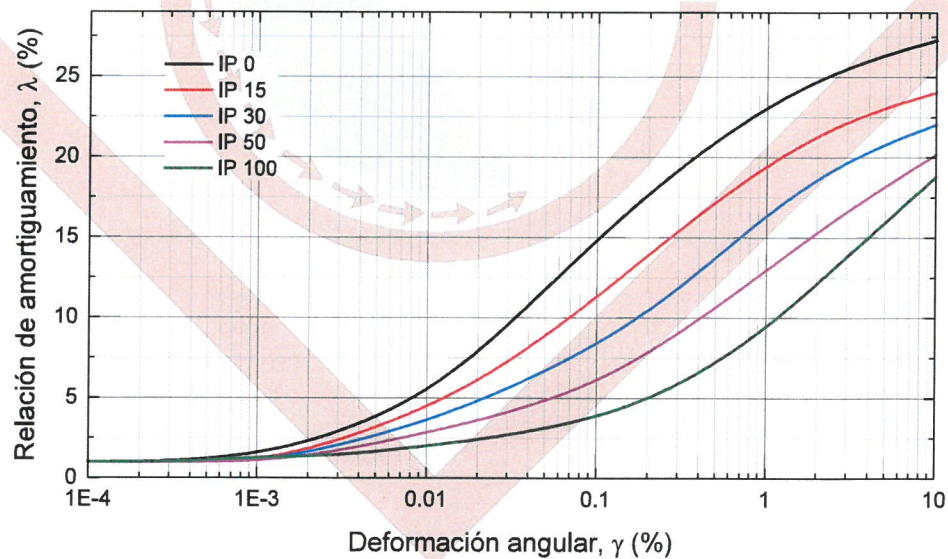


Figura 5. Curvas de la relación de amortiguamiento, λ , para arcillas (Vucetic y Dobry, 1991)

Debido a la dificultad práctica asociada al muestreo de suelos limosos, arenosos y gravas como en este caso en particular, se tomaron como referencia las curvas propuestas por Seed e Idriss (1970) para los estratos de arenas identificados, ver Figura 6 y Figura 7.

Se considera que la roca del semi espacio no presenta una degradación del módulo de rigidez, y se asume en los análisis una relación de amortiguamiento del 2%.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

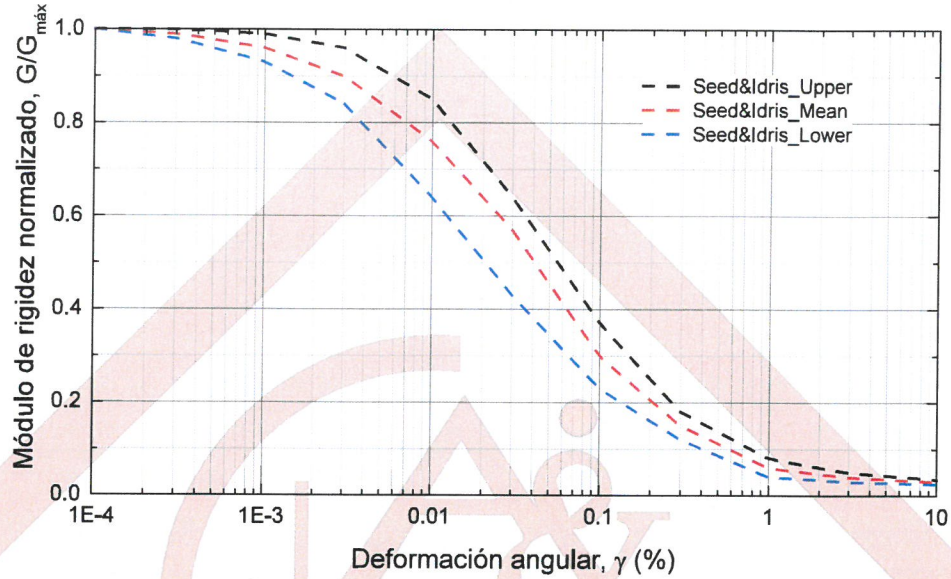


Figura 6. Curvas de degradación del módulo de rigidez normalizado, G/G_{max} para arenas.

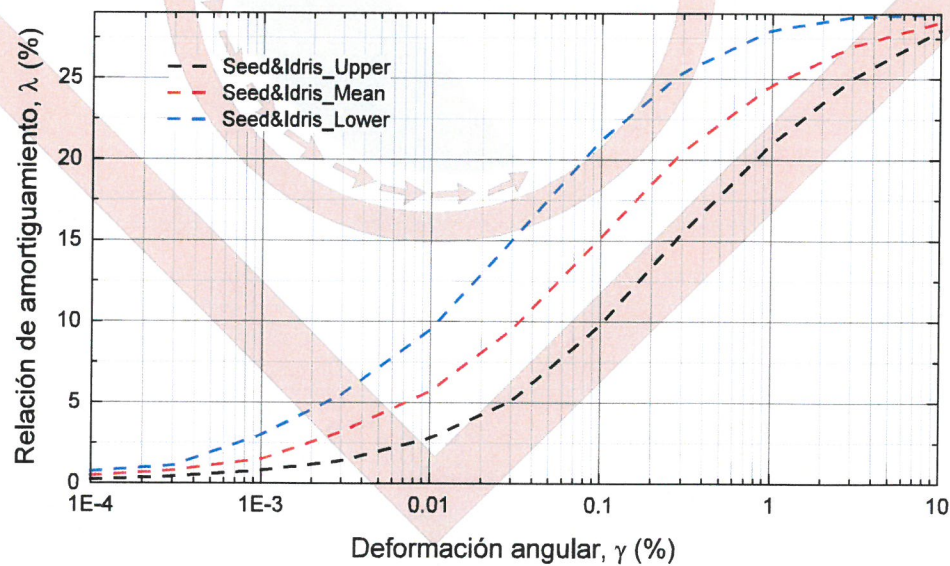


Figura 7. Curvas de degradación relación de amortiguamiento, λ (%) para arenas.

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

3. DEFINICIÓN DEL AMBIENTE SÍSMICO

Con la finalidad de llevar a cabo estimaciones confiables, respecto a los movimientos del terreno que se asocian a eventos sísmicos, se han analizado distintas características de los eventos registrados, como la fuente de liberación, el área de ruptura, la profundidad, la magnitud y los periodos de retorno. Con este fin se han estructurado varios sistemas nacionales de estaciones sismológicas que cubren gran parte de la República Mexicana (BMSF, 1996 y Pérez-Yañez et. Al, 2014) y que están divididas en redes regionales bajo la responsabilidad de distintas entidades e instituciones nacionales.

En el presente estudio se tomó en cuenta el peligró sísmico que resulta del Manual de CFE (2015). Adicionalmente, se analizaron los registros obtenidos de estaciones ubicadas sobre roca, mismos que serán empleados como sismos semilla para generar los sismos sintéticos. En la Figura 8 se muestran dos estaciones cercanas al sitio en estudio, están se encuentran aproximadamente a 30 km y 75 km de distancia del sitio.



Figura 8. Ubicación de las estaciones sismológicas en terreno rocoso.

Se identificaron los movimientos sísmicos registrados con magnitudes iguales o mayores a 6.5. Los epicentros se encuentran aproximadamente entre 60 y 350 km de distancia, de las estaciones acelerográfica. Si embargo, se consideró el sismo del 19 de septiembre del 2017. Los registros contienen una cantidad de datos considerable y una señal clara. En la Figura 9 se muestra la ubicación de las fuentes sísmicas consideradas en los análisis. Los datos generales de los registros seleccionados se detallan en la Tabla 3.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

Tabla 3. Registros semilla empleados para la generación de los sismos sintéticos.

EVENTO	FECHA	COORDENADAS ESTACIÓN		TIPO DE SUELO	MAGNITUD	TIPO DE FUENTE	COORDENADAS DEL EPICENTRO		ORIENTACIÓN	Amáx (gal)
		Latitud	Longitud				Latitud	Longitud		
CSER9906.151	15/06/1999	18.98907	97.37739	Roca	6.5	PROF. INTERM.	18.180	97.510	/V/N90E/N00E	/-108/199/-171
CSER9909.301	30/09/1999	18.98907	97.37739	Roca	6.5	SUBDUCCIÓN	15.950	97.030	/V/N90E/N00E	/-15.4/-32.3/43.3
CSER1104.071	07/04/2011	18.98907	97.37739	Roca	6.7	INTRAPLACA	17.200	94.340	/N00W/N90W/V	/-6.6/15.1/-16.6
CSER1203.201	20/03/2012	18.98907	97.37739	Roca	7.4	SUBDUCCIÓN	16.251	98.521	/V/N00E/N90E	/-9.1/23.7/-25.4
XALA1709.191	19/09/2017	19.52988	96.90197	Roca	7.1	PROF. INTERM.	18.335	98.676	/V/N00E/N90E	/5.70/8.32/8.31

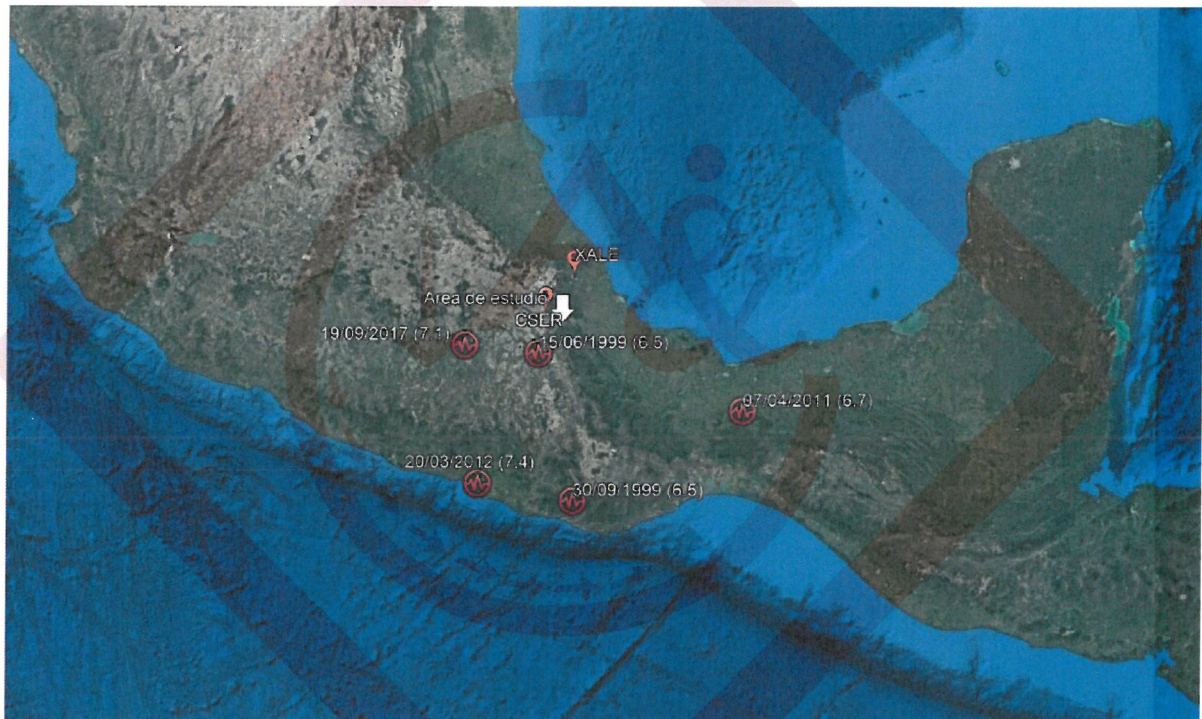


Figura 9. Ubicación de los epicentros.

3.1. Espectro de peligro uniforme

Los efectos de sitio deben ser incorporados en el espectro de diseño basándose en el peligro sísmico determinado para cada sitio en particular. En este trabajo se definió el ambiente sísmico a través del espectro de peligro sísmico, EPU dado en el manual de CFE, empleando el programa PRODISIS (v4.1). En Figura 10 se muestra el espectro de diseño en roca para el sitio en estudio (CFE-2015). Cabe mencionar que, este espectro es transparente, es decir, carece de reducciones ajenas al peligro sísmico.

Una vez definido el EPU, el manual de CFE-2015 indica que se deben emplear al menos 5 sismos que tengan sus espectros asociados al EPU de la Figura 10. Por lo que se generaron 5 sismos sintéticos para emplearse en los análisis de respuesta de sitio.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

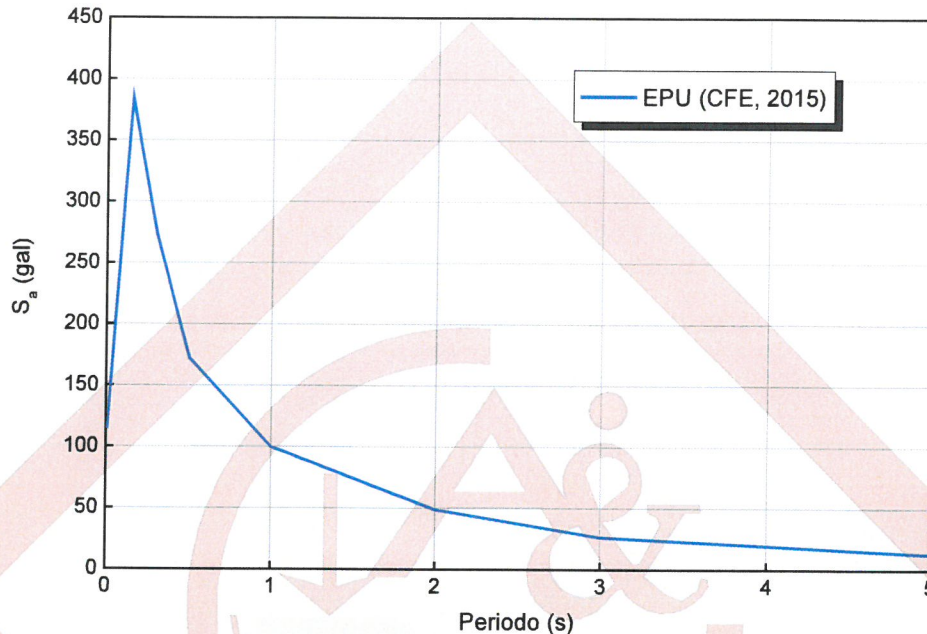


Figura 10. Espectros de peligro uniforme en roca obtenido de PRODISIS, CFE (2015).

3.2. Generación de los acelerogramas sintéticos

La generación de un acelerogramas sintético surge de distintas necesidades, entre ellas está, a) la definición de la acción sísmica en función del tiempo como dato de entrada en estudios de diseño, amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico; b) el analizar y diseñar estructuras en un sitio específico, en donde no se cuenta con suficiente información o no existan registros de historias de aceleraciones; c) analizar estructuras que por su importancia o forma no puedan ser analizadas y diseñadas con estándares propuestos en las normas de diseño, y en donde generalmente no es suficiente el enfoque lineal contemplado en estos códigos, y se hace necesario un estudio de comportamiento no-lineal tanto del suelo como de la estructura de interés.

En particular, en este estudio los sismos sintéticos fueron generados empleando la metodología propuesta por Lilhanand y Tseng (1988), y modificada e implementada por Abrahamson (1993) en el programa Spectral Matching Program. Posteriormente fue modificada por Atik y Abrahamson (2010). En esta metodología se lleva a cabo una modificación en el dominio del tiempo de una historia de aceleraciones para hacerla compatible con un espectro de referencia dado.

Con base en el manual de CFE-201, se emplearon 5 sismos semilla, asociando sus espectros de respuesta al EPU, ver Figura 10, generando 5 sismos sintéticos para emplearse en los análisis de respuesta de sitio. En la Figura 11 se muestra la comparación de los espectros de EPU de las NTC-DS con los obtenidos de los sismos sintéticos generados en este trabajo.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

En el ANEXO I se muestran los sismos sintéticos generados y corregidos por línea base, así mismo, sus espectros ajustados.

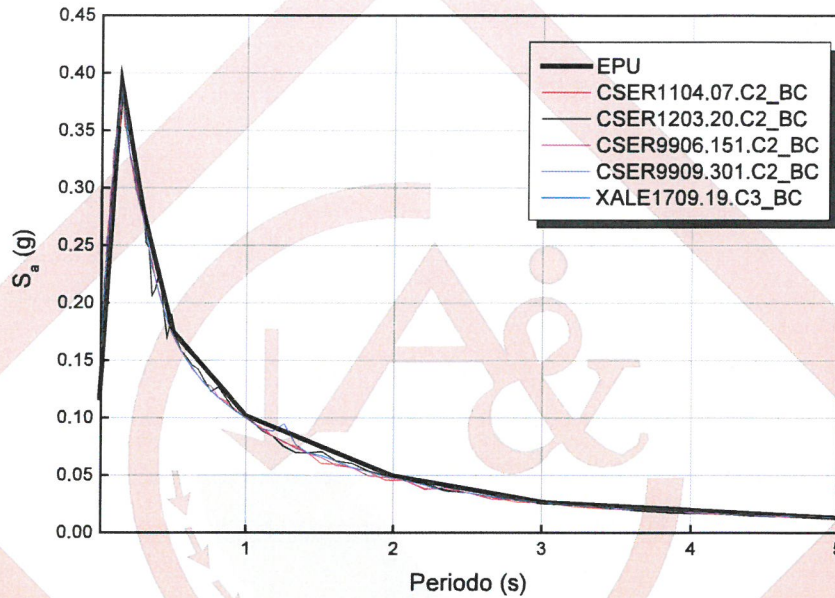


Figura 11. Comparación de los espectros de los sismos sintéticos con el EPU (CFE, 2015), para los eventos considerados.

INGEOTEC



4. ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO

Se realizaron los análisis de respuesta de sitio con el programa Deepsoil (Hashash et al, 2011), que emplea diversos métodos en el dominio del tiempo y la frecuencia, entre ellos el método lineal equivalente para considerar la no linealidad del suelo. Se emplearon las curvas de G/G_{\max} y relación de amortiguamiento en función de la deformación angular de la sección 2.3.1. Los perfiles de velocidades utilizados corresponden a los determinados con base en los resultados de la campaña de exploración geofísica y los perfiles aleatorios. Se colocaron los 5 sismos en la base del modelo y se propagaron las ondas de corte SH verticalmente obteniéndose la respuesta del depósito de suelo en término de espectros de respuesta.

En esta sección se presenta el espectro de sitio transparente obtenido empleado la forma funcional como lo indica el Manual de CFE-2015. En la Figura 12 se muestran en color gris los 55 espectros de respuesta en superficie y con línea negra la envolvente de estos, de acuerdo con la metodología del manual de CFE (2015). El espectro propuesto corresponde a la superficie del terreno.

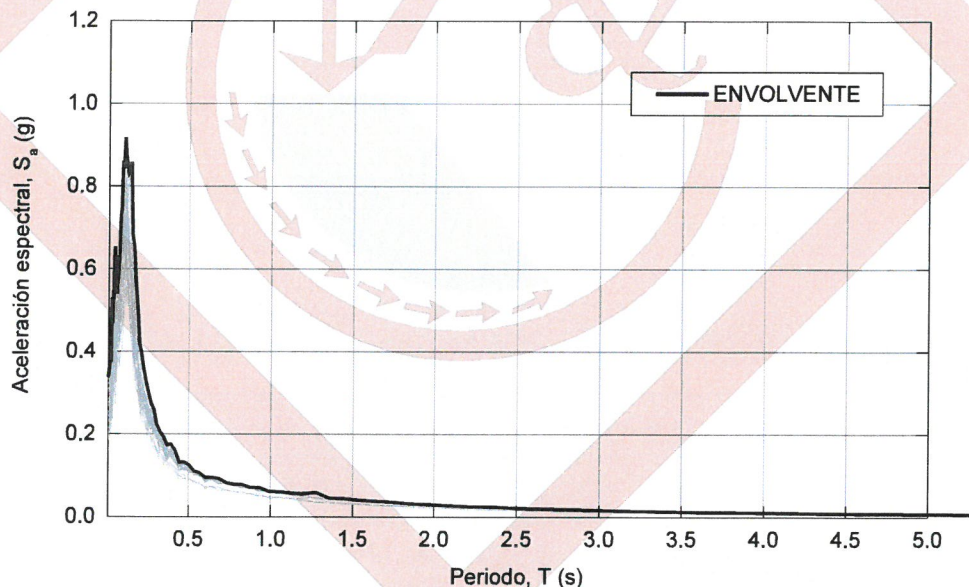


Figura 12. Espectros de respuesta en superficie para el EPU de referencia y envolvente de los análisis de respuesta de sitio.

Así mismo, de los análisis de respuesta de sitio se determinaron las aceleraciones y deformaciones angulares máximas con la profundidad, ver de la Figura 13 y Figura 14. Se puede observar que, las aceleraciones máximas con la profundidad se dan en los primeros metros muy cercanos a la superficie.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física

RFC: PECF750607177

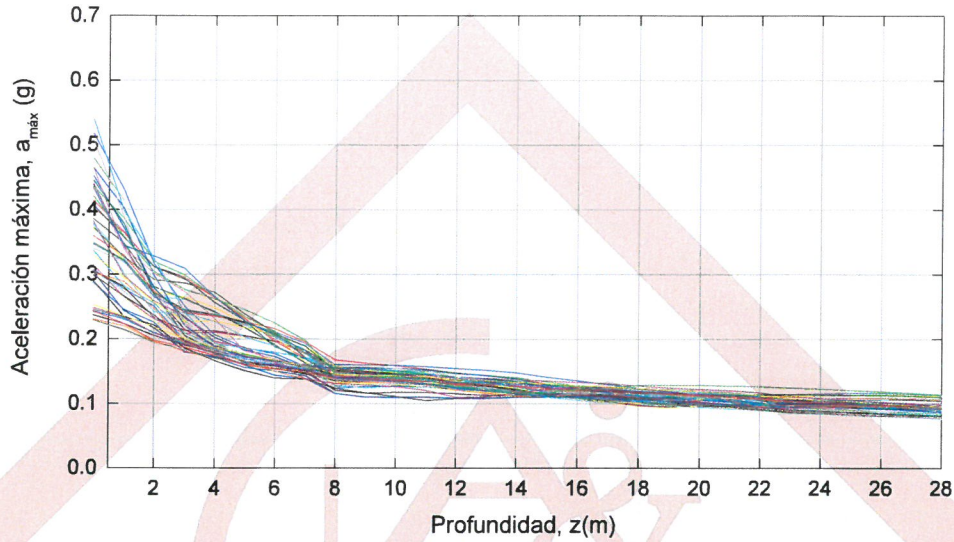


Figura 13. Aceleraciones máximas con la profundidad.

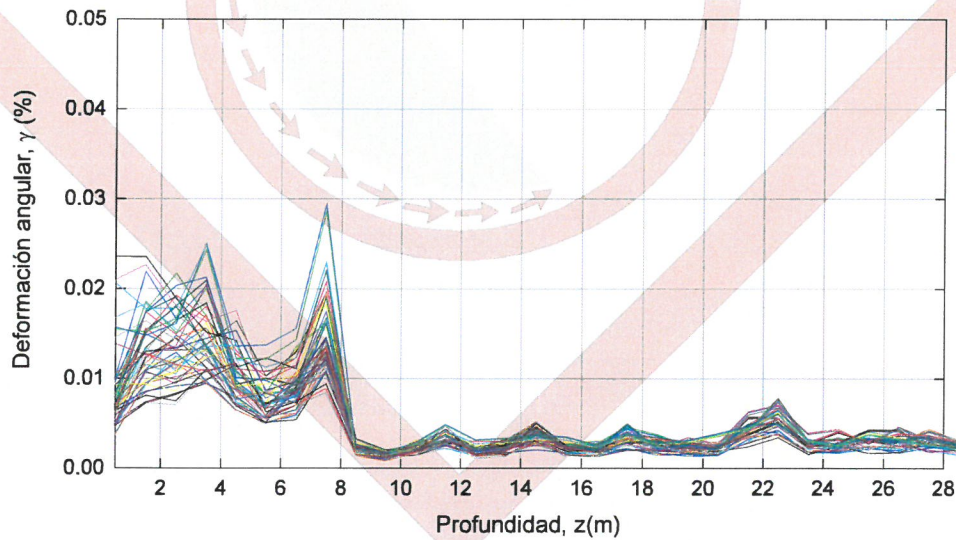


Figura 14. Deformaciones angulares máximas con la profundidad.

INGEOTEC



5. ESPECTRO DE SITIO TRANSPARENTE

Con base en el Manual de CFE-2015 y de acuerdo con la solicitud del cliente, en la Figura 15 se presenta los espectros de diseño para los grupos estructurales B1 y A2, con factor de importancia estructural (FIE) para el grupo A1, valor que se muestra en Tabla 4. En el grafico se incluye la comparación con el espectro que se determina con el manual de CFE en línea color negro y roja para las dos estructuras (2015) y el espectro obtenido del programa Prodisis en línea punteada color verde y azul.

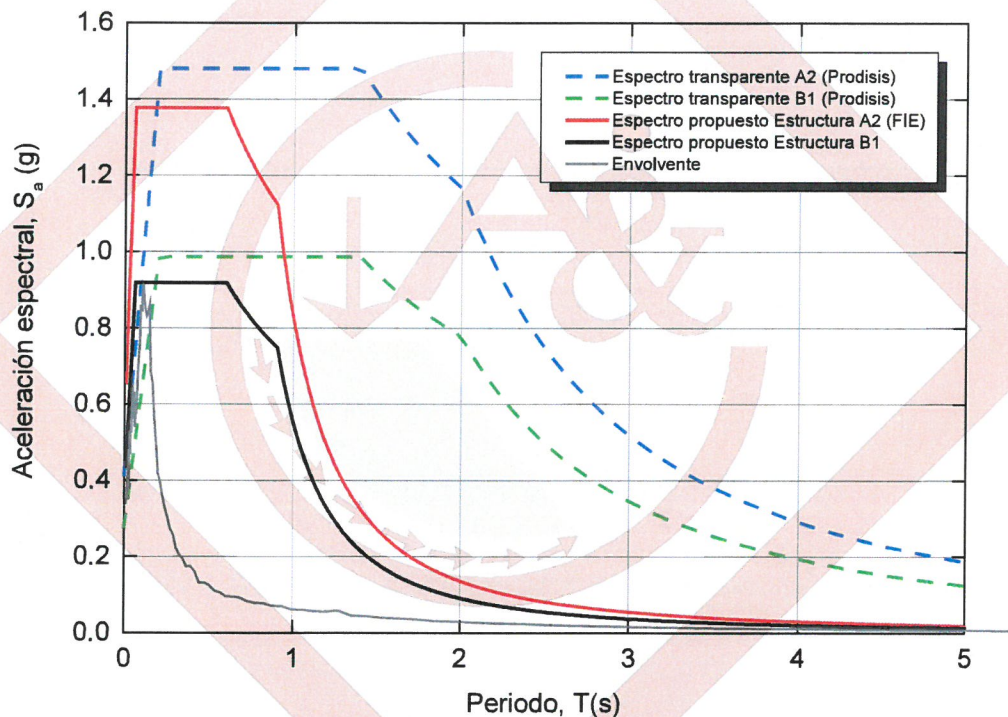


Figura 15. Envoltente ARS, espectros transparentes Prodisis y propuestos para estructuras del grupo B1 y A2.

Tabla 4. Espectros de respuesta para cada grupo estructural.

Estructuras	Espectro de respuesta	Factor de Importancia Estructural F_{IE}
B2	Espectro de aceleración constante	1.0
B1	Espectro probabilista de referencia ER	1.0
A2	Espectro probabilista de referencia ER	1.5
A1	Alguno de los siguientes espectros, según se indique en las especificaciones del proyecto: a) Espectro probabilista para periodo de retorno especificado	1.0



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

Estructuras	Espectro de respuesta	Factor de Importancia Estructural F_{IE}
A1	b) Espectro determinista máximo creíble EMC, menor o igual que el espectro probabilista de referencia EPR para un periodo de retorno de 2475 años	1.0
	c) Espectro probabilista de referencia ER	1.5
	d) Envoltive de los incisos a, b y c	1.0
A+	Alguno de los siguientes espectros, según se indique en las especificaciones del proyecto:	
	a) Espectro probabilista a periodo de retorno especificado	1.0
	b) Espectro determinista máximo creíble EMC, menor o igual que el espectro probabilista de referencia EPR para un periodo de retorno de 10,000 años	1.0
	c) Espectro probabilista de referencia ER	1.75
	d) Envoltive de los incisos a, b y c	1.0

Finalmente, en la en la Figura 16 se presentan los espectros de sitio transparentes determinados en la superficie de suelo para la condición de colapso y corresponde a estructuras del Grupo B1 y A2, empleado la forma funcional como lo indica el Manual de CFE-2015. Asimismo, los espectros propuestos incluyen el periodo fundamental del sitio $T_s = 0.1$ s obtenido de la prueba de Vibración Ambiental. La Tabla 5 resume los valores de los parámetros de los espectros transparentes para estructuras del grupo B1 y A1.

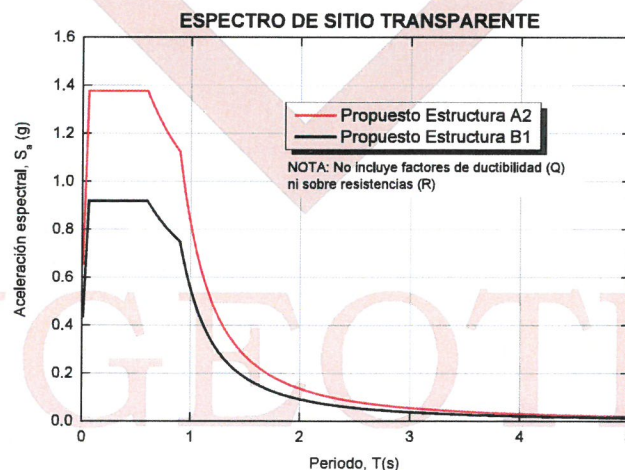


Figura 16. Espectro propuesto transparente para estructura del Grupo B1 y A2.



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Tabla 5. Parámetros de los espectros propuestos suavizados en superficie para estructuras del Grupo B1 y A2.

TIPO DE ESTRUCTURA	a ₀ (1/g)	c (1/g)	T _a (s)	T _b (s)	T _c (s)	Π _e (%)	r	k	Π
Grupo B1	0.436	0.918	0.0.06	0.6	0.9	5	0.5	0.5	1.0
Grupo A2	0.654	1.377	0.0.06	0.6	0.9	5	0.5	0.5	1.0

El espectro suavizado propuesto no incluye factores de ductilidad (Q') ni sobre-resistencia (R).

Las ecuaciones de la forma funcional del espectro propuesto son las siguientes:

$$S_a = \begin{cases} a_0 + [c\beta - a_0] \frac{T_e}{T_a} & \text{si } T_e < T_a \\ c\beta & \text{si } T_a \leq T_e < T_b \\ c\beta \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r & \text{si } T_b \leq T_e < T_c \\ c\beta \left(\frac{T_b}{T_c}\right)^r p_c \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad p_c = k + (1 - k) \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2$$

Donde;

a_0 = es la aceleración máxima del terreno, en cm/s²

c = es la aceleración máxima espectral, en cm/s²

T_a = es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño, en segundos

T_b = es el límite superior de la meseta del espectro de diseño, en segundos

T_c = es el periodo de inicio de la rama descendente en que los desplazamientos espectrales tienden correctamente al desplazamiento del terreno, en segundos

T_e = es el periodo estructural en la dirección del análisis, en segundos

β = es el factor de amortiguamiento

r = es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para $T_b \leq T_e < T_c$

k = es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para $T_e \geq T_c$

p_c = es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se definió el ambiente sísmico con base en los espectros de peligro uniforme del Manual de CFE (2015). Se generaron 5 sismos sintéticos con los registros sísmicos de las estaciones cercanas ubicadas en roca.

Con base en el Manual de CFE (2015) y de acuerdo con el cliente, las estructuras de este proyecto en particular se clasifican dentro del grupo estructural B1 y A2.

Se llevaron a cabo 55 análisis de respuesta de sitio para el área en estudio, tomando en cuenta la variabilidad del suelo y se obtuvieron los espectros de respuesta en superficie considerando la no-linealidad del suelo. El espectro suavizado propuesto para estructuras del grupo B1 y A2 se determinó tomando en cuenta las recomendaciones del manual de CFE (2015), aplicable y vigente. Se observó que las amplitudes máximas de los espectros se dan en un rango de periodos entre 0.1 y 0.5 s.

De la prueba de Vibración Ambiental realizada se obtuvo un T_s de 0.1 s (10 Hz) por lo que este valor definió el parámetro T_b de la meseta del espectro transparente.

En la Tabla 5 se resumen los parámetros del espectro suavizado propuesto para estructuras del grupo A1. El espectro suavizado propuesto no incluye factores de ductilidad (Q') ni sobre-resistencia (R).

El espectro determinado en este documento corresponde únicamente a la estructura que se proyectó de acuerdo con la información recibida al día de la elaboración de este informe.

INGEOTEC



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177

INGEOTEC

Referencias Bibliográficas

Abrahamson N. (1993). *Non-stationary spectral matching program, unpublished.*

ARGEOTEC. (2025). *Estudio geofísico.*

Avitabile, P. (2001). *Experimental modal analysis - A simple non-mathematical presentation.* Massachusetts Lowell: University of Massachusetts Lowell.

BMSF. (1996). *Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Actualización de los Catálogos de Estaciones a 1995 y Acelerogramas a 1994.*

Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles.* México.

Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Groholski, D., Phillips, C., & Park, D. (2015). *Deepsoil 6.0, User Manual.*

INGEOTEC. (2025). *Perfiles estraigraficos.*

Perez-Yanez, C., Ramirez-Guzman, L., Ruiz G, A. L., Delgado D, R., Macias C, M. A., Sandoval G, H., . . . Quiroz R, A. (2014). *Strong Ground Motion Database System for the Mexican Seismic Network. AGU Fall Meeting San Francisco, Diciembre 14-19.*

PRODISIS v4.1. (n.d.). *Programa de la Comisión Federal de Electricidad.*

XALAPA, VER. 2025.

Geofísica

Ing. Alexis Saúl Ruiz Ortiz

Céd. Prof. 11092296

Espectro

Ing. Zianya Xareny González Ramírez

Céd. Prof. 11780802

Vo. Bo.

Ing. Fernando Pérez Castillo.

Céd. Prof. 4616796.



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

ANEXO A SISMOS SINTÉTICOS

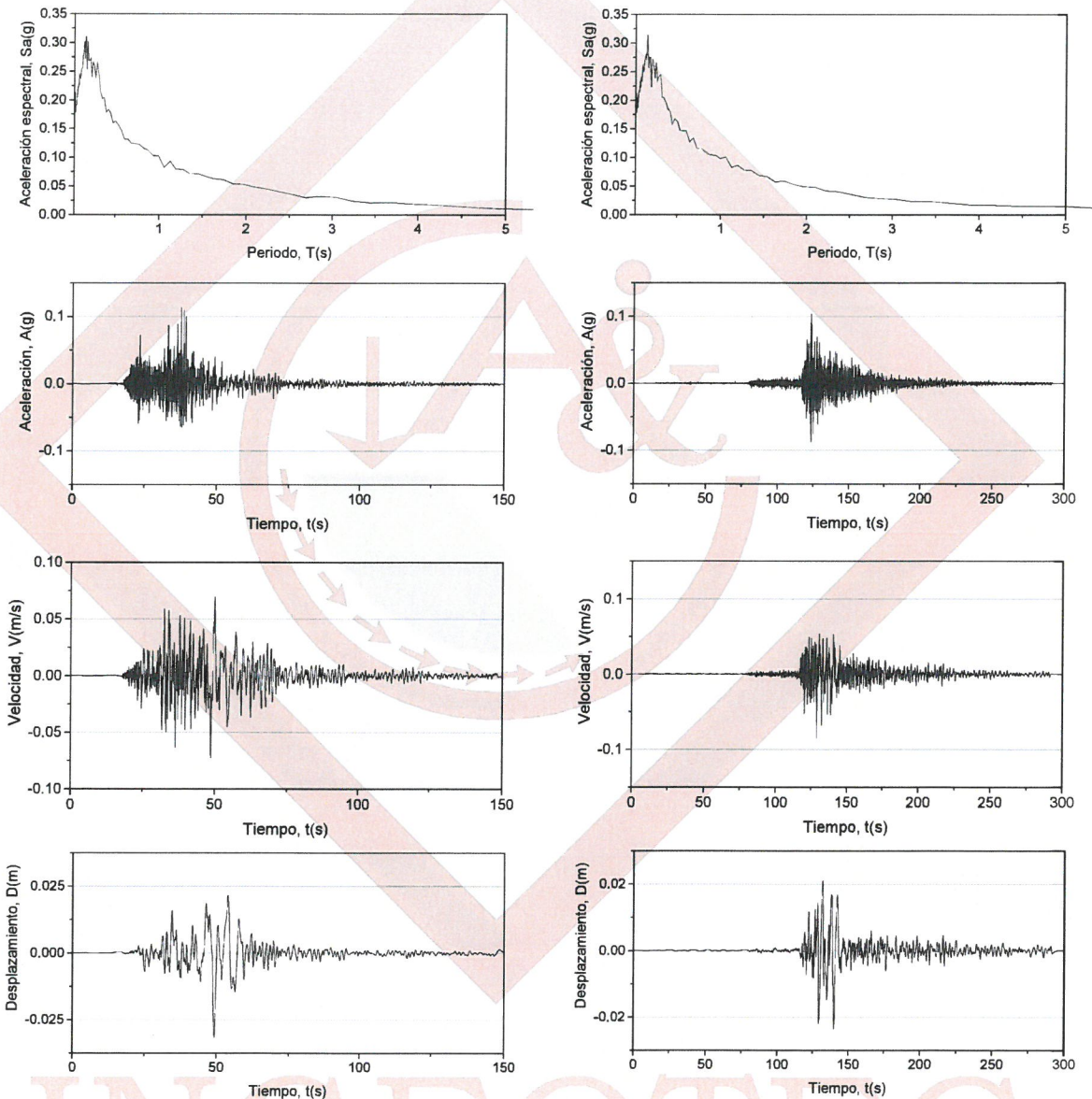


Figura 17. Sismo sintético
CSER9906.15.C2.BC generado para el EPU
de referencia

Figura 18. Sismo sintético
CSER1104.07.C2.BC generado para el EPU
de referencia



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo, Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC

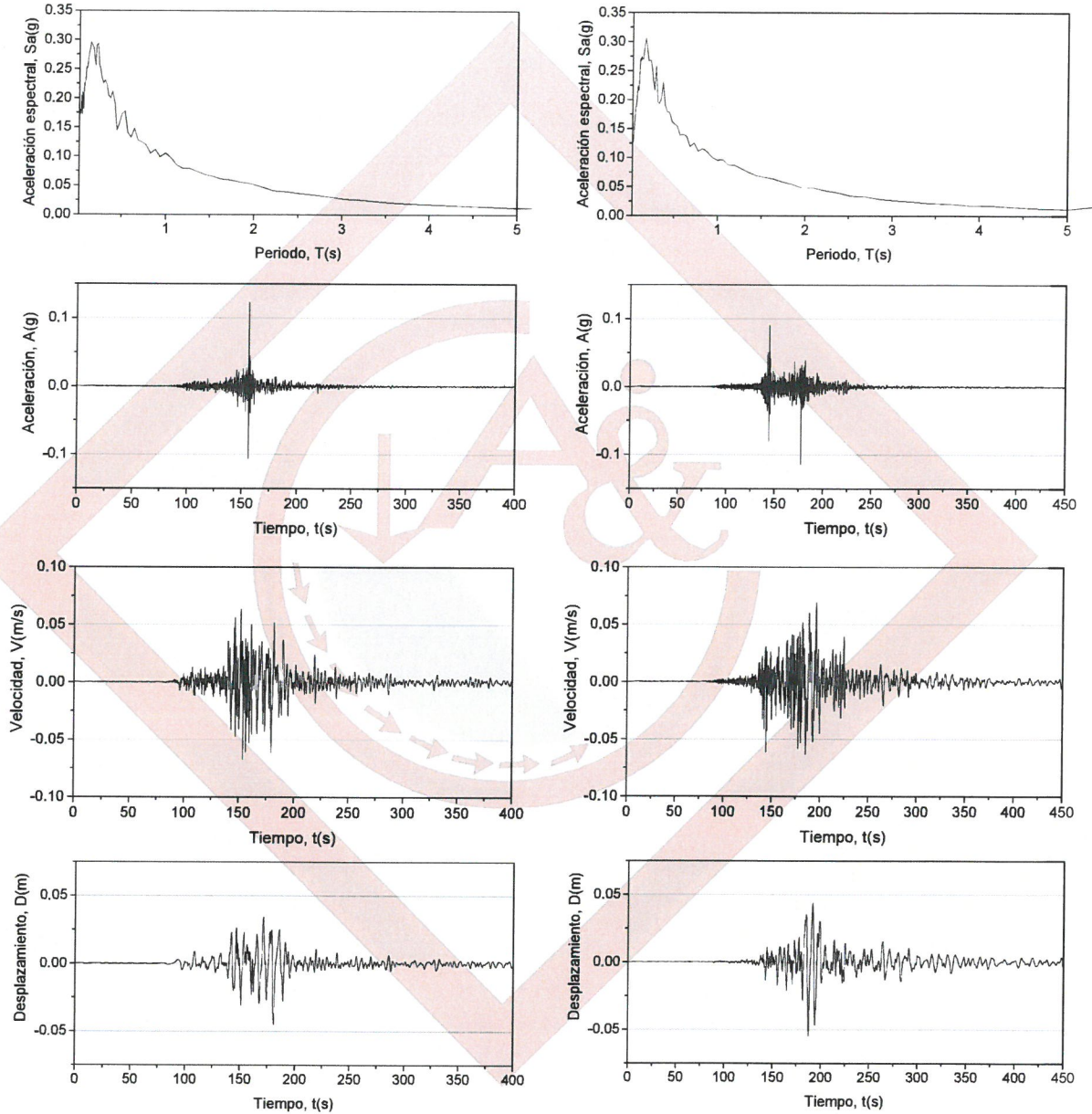


Figura 19. Sismo sintético
CSER1203.20.C2.BC generado para el EPU
de referencia

Figura 20. Sismo sintético
CSER9909.301.C2BC generado para el EPU
de referencia



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

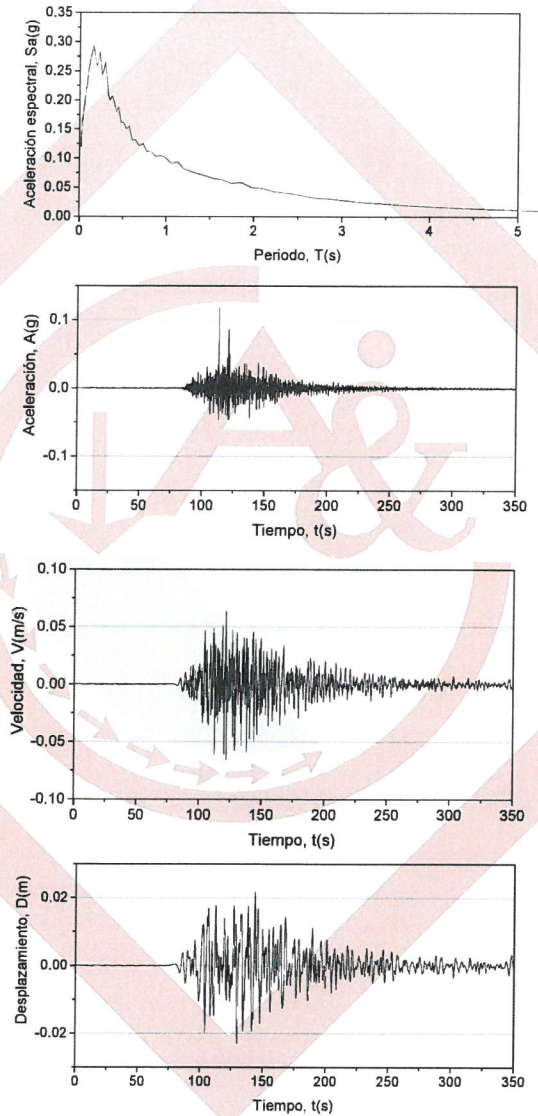


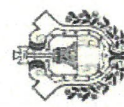
Figura 21. Sismo sintético
XALE1709.19.C3.BC generado para el EPU de
referencia



Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177

INGEOTEC



SEV

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
DEL ESTADO DE VERACRUZ



EL COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES DE XALAPA A.C. Y EL COMITÉ DICTAMINADOR DE PERITOS PROFESIONALES DE LOS INGENIEROS CIVILES, EXTIENDE A:

ING. FERNANDO PÉREZ CASTILLO

EL PRESENTE CERTIFICADO, CON BASE EN LA CONSTANCIA NÚMERO EEC-P-000015 DE FECHA 10 DE DICIEMBRE DE 2014, EMITIDA POR LA COORDINACIÓN DE PROFESIONES DE LA SECRETARÍA DE EDUCACIÓN DE VERACRUZ, COMO:

PERITO PROFESIONAL EN LA ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA EN GEOTÉCNICA

EN VIRTUD DE HABER CUMPLIDO CON LOS LINEAMIENTOS EXIGIDOS EN EL ACUERDO DE DESIGNACIÓN DE PERITOS PROFESIONALES POR ESPECIALIDAD

Xalapa-Enríquez, Veracruz, 13 de Febrero de 2015

Certificado No. 27

MTRA. ACELA MEDINA SERVÍN
COORDINADORA DE PROFESIONES
TESTIGO DE HONOR

ING. JULIETTE LÓPEZ MÁRQUEZ
PRESIDENTA DEL COMITÉ DICTAMINADOR
DE PERITOS PROFESIONALES

ING. JOSÉ-LUIS EUSEBIO HERNÁNDEZ SUÁREZ
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES DE XALAPA A.C.

División del Norte # 113, Col. Rafael Lucio, Xalapa, Ver. C.P. 91110
Ing. Fernando Pérez Castillo e-mail ing_fdoperez@yahoo.com.mx
Cel.: 2282042845; 2281621921 Ofic.: 01(228) 200-60-62



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177



SECRETARÍA
DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

EL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

en ejercicio de las atribuciones que para el cumplimiento
de sus finalidades le confiere la fracción VII,
del artículo 4 de su Ley Orgánica, expide a



FERNANDO PÉREZ CASTILLO

el título de

INGENIERO CIVIL

en atención a que demostró haber hecho los estudios
requeridos conforme al plan y programas autorizados.

Dado en la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 7 de junio de 2005.

LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA

EL SECRETARIO GENERAL

BONIFACIO EFRÉN PARADA ARIAS

EL DIRECTOR GENERAL


JOSÉ ENRIQUE VILLA RIVERA



INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física
RFC: PECF750607177


Firma del interesado

9431.508
107438
ESIA "2"

012288 001108



Título No. 39438




Huella digital



Sello del IPN

Se hace constar que según acta de fecha 9 de diciembre de 2004.
el C. FERNANDO PEREZ CASTILLO
sustentó en esta
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA UNIDAD
ZACATENCO
el examen profesional reglamentario, con resultado aprobatorio.
México, D.F., 7 de junio de 2005.

El Director de la Escuela


JOSÉ LUIS MINABURO CASTILLO

Se tomó nota del presente título a fojas No. 086 del libro No. 3/2005 del registro respectivo.
México, D.F., 7 de junio de 2005.

El Director de Servicios Escolares


SIGFRIDO LÓPEZ CARRILLO



Folio 129355

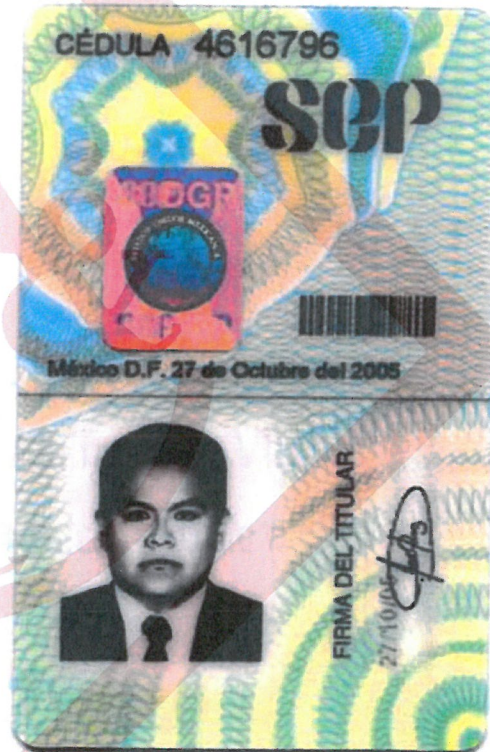


INGEOTEC

Ingeniería Geotécnica de Obra Civil

Fernando Pérez Castillo. Persona Física

RFC: PECF750607177



INGEOTEC

División del Norte # 113, Col. Rafael Lucio, Xalapa, Ver. C.P. 91110

Ing. Fernando Pérez Castillo e-mail ing_fdoperez@yahoo.com.mx

Cel.: 2282042845; 2281621921 Ofic.: 01(228) 200-60-62