



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

“COMPARATIVA DE ESPECTROS DE DISEÑO DE LAS NTC-DS-2017 Y ESPECTROS DE DISEÑO OBTENIDOS PARA SITIOS ESPECÍFICOS EN CDMX”

TESINA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA

ING. AXEL MURILLO AMADOR

DIRECTOR DE TESINA:

M.I. AGUSTÍN DEMENEGHI COLINA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

OCTUBRE 2023



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma Nacional de México, al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería por ofrecer la especialidad en geotecnia, ayudando a mejorar mi pensamiento crítico en esta área de la ingeniería civil, además de abrir el panorama con el que contaba de dicha especialización. Al CONACYT por la beca para el estudio, que sin la misma el enfoque y dedicación a la especialidad no podría haber sido posible.

Agradezco a mi familia, en especial a mi madre, Mónica Amador por siempre brindarme su apoyo incondicional, y motivarme a seguir creciendo profesionalmente.

Agradezco de igual forma a todas las personas y docentes que me acompañaron en este año, por la buena formación y la búsqueda de las buenas prácticas de la ingeniería.



Índice general

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. Introducción | 9 |
| Capítulo 2. Propiedades dinámicas de los suelos | 16 |
| Pruebas de campo | 17 |
| Capítulo 3. Determinación de espectros de diseño | 19 |
| Espectro de respuesta | 19 |
| Espectro de diseño | 20 |
| Capítulo 4. Espectros obtenidos con el programa SASID de la NTC-DS-2017 | 23 |
| Capítulo 5. Espectros en sitios específicos de la CDMX | 29 |
| Normativa | 29 |
| Criterios de simulación | 30 |
| Caracterización dinámica del suelo. | 34 |
| Vibración ambiental | 38 |
| Funciones de transferencia | 41 |
| Espectros de diseño | 44 |
| Capítulo 6. Comparación de los espectros | 49 |
| Capítulo 7. Conclusiones | 55 |
| Referencias Bibliográficas | 57 |



Índice de Imágenes

| | |
|---|----|
| Imagen 1 Pasos del análisis determinista del peligro sísmico..... | 11 |
| Imagen 2 Representación de estructura de un grado de libertad con masa, rigidez y amortiguamiento constante | 19 |
| Imagen 3 Zonificación de CDMX para fines de diseño por sismo, obtenida de NTC-DS-2004 | 21 |
| Imagen 4 Parámetros para obtener información, obtenida de página " https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx " | 24 |
| Imagen 5 Mapa e instrucciones para iniciar el proceso, obtenida de " https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx " | 25 |
| Imagen 6 Espectro obtenido de SASID, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan..... | 26 |
| Imagen 7 Espectro obtenido de SASID Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc | 27 |
| Imagen 8 Espectro obtenido de SASID Sitio 3, Colonia tabacalera..... | 28 |
| Imagen 9 Figura A.1.1 de NTC-DS-2017, Espectros de peligro uniforme del movimiento de diseño para la Zona de Lomas | 29 |
| Imagen 10 Espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos en terreno firme (líneas delgadas), espectro de respuesta promedio de la simulación (línea azul continua) y espectro de peligro uniforme (línea roja discontinua) para Sismos de Profundidad Intermedia con $T_r = 250$ años. | 32 |
| Imagen 11 Espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos en terreno firme (líneas delgadas), espectro de respuesta promedio de la simulación (línea azul continua) y espectro de peligro uniforme (línea roja discontinua) para sismos de Subducción con $T_r = 250$ años | 33 |
| Imagen 12 Vibración ambiental de sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan | 38 |
| Imagen 13 Vibración ambiental de Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc... .. | 39 |
| Imagen 14 Vibración ambiental de Sitio 3, Colonia Tabacalera..... | 40 |
| Imagen 15 Funciones de transferencia de Sitio 1 | 41 |
| Imagen 16 Funciones de transferencia de Sitio 2 | 42 |
| Imagen 17 Funciones de transferencia de Sitio 3 | 43 |
| Imagen 18 Espectros de diseño por subducción, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan..... | 44 |
| Imagen 19 Espectros de diseño por profundidad intermedia, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan | 45 |
| Imagen 20 Espectros de diseño por subducción, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc | 45 |
| Imagen 21 Espectros de diseño por profundidad intermedia, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc..... | 46 |
| Imagen 22 Espectros de diseño por subducción, Sitio 3, Colonia Tabacalera | 46 |
| Imagen 23 Espectros de diseño por profundidad intermedia, Sitio 3, Colonia Tabacalera..... | 47 |
| Imagen 24 Periodos predominantes del suelo, Figura A.1 de NTC-DS-2004, con sitios de interés localizados | 51 |
| Imagen 25 Espectro de diseño transparente Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan52 | |
| Imagen 26 Espectros de diseño transparente, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc | 53 |
| Imagen 27 Espectro de diseño transparente, Sitio 3, Colonia Tabacalera..... | 54 |



Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Propiedades dinámicas obtenidas de Down Hole, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan | 35 |
| Tabla 2 Propiedades dinámicas obtenidas de Down Hole, Sitio 2, Alcaldía Cuauhtémoc | 36 |
| Tabla 3 Propiedades dinámicas obtenidas de Down Hole, Sitio 3, Colonia Tabacalera | 37 |
| Tabla 4 Valores para elaborar espectros de diseño, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez alcaldía Tlalpan..... | 52 |
| Tabla 5 Valores para elaborar espectros de diseño, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc | 53 |
| Tabla 6 Valores para elaborar espectros de diseño, Sitio 3, Colonia Tabacalera | 54 |



RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis de los espectros de diseño de tres sitios específicos dentro de la Ciudad de México.

Se busca comparar los espectros que se obtienen con el uso del SASID, de conformidad con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico con comentarios publicadas en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 09 de Junio de 2020 y los espectros obtenidos realizando pruebas en sitio.

Se desarrolla el método utilizado para la formación de los espectros de diseño en sitio, tomando en cuenta el peligro sísmico y las características dinámicas de los diferentes estratos que componen el suelo y pueden verse afectadas con amplificación de ondas sísmicas.



ABSTRACT

This study presents the analysis of the design spectra of three specific sites within Mexico City.

It seeks to compare the spectra obtained with the use of the SASID, in accordance with the “Normas Tecnicas Complementarias para Diseño Sismico con comentarios” published in the Official Gazette of Mexico City on June 9, 2020 and the spectra obtained by performing tests on site. .

The method used for the formation of the design spectra on site is developed, taking into account the seismic hazard and the dynamic characteristics of the different strata that make up the soil and can be affected by amplification of seismic waves



OBJETIVO

En este estudio se pretende comparar los espectros de diseño obtenidos mediante pruebas dinámicas realizadas en sitios de la CDMX contra los espectros de diseño que se logran obtener en el programa SASID para evaluar si existe afectación del hundimiento regional.

JUSTIFICACIÓN

El programa SASID se utiliza por normativa para tomar aceleraciones máximas para el diseño de estructuras, por lo tanto, estas aceleraciones deben de estar lo más cercano al comportamiento real que tiene el suelo, para así poder modelar el comportamiento que tendrán dichas estructuras cuando reciban esta excitación por sismos.

Al desarrollar el estudio de las propiedades dinámicas de un sitio en específico nos permite conocer el comportamiento del mismo al momento, se considera que tendrá diferencias debido a el fenómeno del hundimiento regional, el cual da como resultado que el suelo se rigidice y reduzca su espesor gradualmente. Realizando este análisis se pretende observar si son diferencias significativas que podrían poner en riesgo las estructuras que se pretenden desplantar.



Capítulo 1. Introducción

Antes de mencionar los espectros de diseño y ver de qué manera se utilizan es necesario referirse a la dinámica de suelos. La cual es una rama de la mecánica de suelos que se encarga de estudiar las propiedades y el comportamiento de los suelos bajo esfuerzos dinámicos.

Estos esfuerzos pueden tener diferentes causas, entre las cuales se encuentran los sismos, por explosiones, maquinaria, procesos constructivos y explotación de bancos. De estas los sismos son las más estudiadas, se puede considerar que son la causa más importante debido a los esfuerzos dinámicos que pueden provocar, los cuales llegan a afectar a las estructuras.

Se llevan varios años analizando la causa de los sismos, se considera que cuando el esfuerzo provocado por los lados opuestos de macizo rocosos falle súbitamente o se deslicen de un lado a otro este fenómeno causara un sismo, debido a que los esfuerzos en la tierra alcanzan un nivel mayor al de la resistencia de la roca. Estos esfuerzos pueden actuar perpendicularmente a la falla empujando las rocas entre ellas, o paralelamente a la falla moviendo las rocas unas contra otras. La resistencia de la falla se relaciona con el coeficiente de fricción del material que forma el macizo rocoso y los esfuerzos a los cuales está sometido, cuando se acumula un esfuerzo suficientemente grande para sobrepasar la resistencia de la falla, este puede liberarse en un momento provocando que las rocas pierdan el equilibrio en el que se encontraban y liberando la energía almacenada en forma de ondas sísmicas, las cuales se van trasladando a las rocas a su alrededor.

Un terremoto empieza en un punto llamado foco o hipocentro situado en la superficie de la falla que se localiza por una latitud, longitud y profundidad, y una proyección en la superficie de la tierra, llamada epicentro con coordenadas de latitud y longitud únicamente. La ruptura progresa desde el hipocentro a lo largo de la superficie de



ruptura a una velocidad finita, hasta que se detiene. El esfuerzo acumulado se libera completamente al alcanzar una sección más fuerte que la falla o porque se ha llegado al final de la misma.

Un término importante es el peligro sísmico, se sabe que el territorio mexicano se ve afectado por diferentes fuentes sísmicas. En los estudios de peligro sísmico se identifican las fuentes potenciales que pueden afectar a una región, estableciendo sus características, distancia y magnitud máxima esperada. Estos estudios pueden ser deterministas o probabilistas.

En los primeros años de la ingeniería geotécnica sísmica, el análisis más utilizado era el riesgo sísmico determinista. Consiste en proponer un terremoto de un tamaño específico que ocurre en un lugar específico. El proceso se puede describir en 4 pasos que consta de:

1. Identificar y caracterizar todas las fuentes sísmicas capaces de producir un movimiento significativo del suelo. La caracterización de la fuente sísmica incluye la definición de la geometría de cada fuente y el potencial de un nuevo sismo.
2. Selección de un parámetro de distancia fuente-sitio para cada fuente. En la mayoría de los análisis deterministas se selecciona la distancia más corta entre la fuente y el sitio de interés. La distancia puede ser expresada como distancia hipocentral o epicentral, dependiendo de la distancia medida de la relación predictiva del siguiente paso.
3. Selección del sismo de control, generalmente expresado en términos de movimiento sísmico en el sitio. La elección se realiza comparando los niveles de movimiento producido por los sismos que presuntamente ocurrieron a la distancia identificada en el paso 2. El sismo de control es descrito en términos de magnitud y distancia del sitio.
4. El peligro del sitio está definido, en términos del movimiento del suelo producido por el sismo de control. Aceleración máxima, velocidad máxima y las ordenadas del espectro de respuesta son comúnmente utilizadas para caracterizar el peligro sísmico.

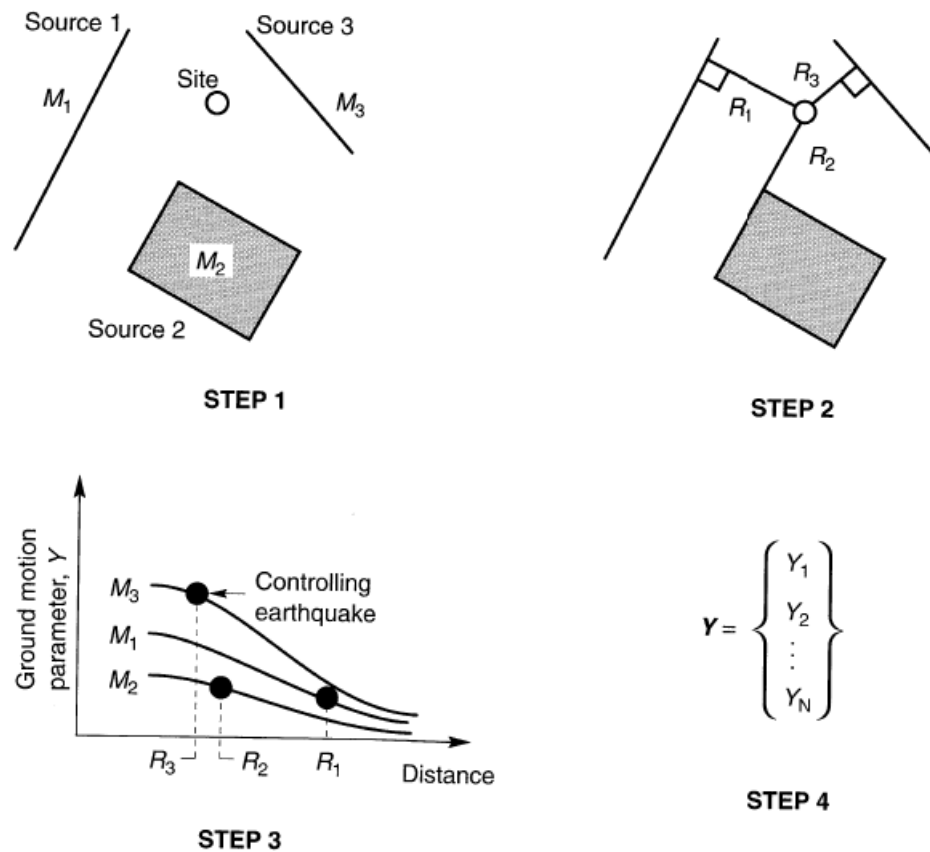


Imagen 1 Pasos del análisis determinista del peligro sísmico

En los últimos años, el uso de conceptos probabilísticos ha permitido que las incertidumbres que se tenían de los sismos como el tamaño, ubicación y tasa de ocurrencia, así como de su variación de las características del movimiento del suelo con el tamaño se consideren explícitamente en la evaluación de peligro sísmico.

El análisis de riesgo sísmico probabilístico proporciona un marco en el que estas incertidumbres pueden identificarse, cuantificarse y combinarse de manera racional proporcionando una imagen más completa del riesgo sísmico.

El análisis de riesgo sísmico probabilístico (PSHA) proporciona un marco en el que estas incertidumbres pueden identificarse, cuantificarse y combinarse de manera racional para proporcionar una imagen más completa del riesgo sísmico. El PSHA se puede describir como un procedimiento de cuatro pasos:



1. Identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, es parecido al primer paso del análisis determinista, excepto que también se debe caracterizar la distribución de probabilidad de las posibles ubicaciones de ruptura dentro de la fuente sísmica. Estas distribuciones luego se combinan con la geometría de la fuente para obtener la distribución de la probabilidad correspondiente de la distancia de la fuente al sitio.
2. Se caracteriza la sismicidad o la distribución temporal de recurrencia de sismos. Se utiliza una relación de recurrencia, que especifica la tasa promedio a la que se superara un sismo de cierta magnitud, para caracterizar la sismicidad de cada fuente.
3. El movimiento del suelo producido en el sitio por sismos de cualquier tamaño que ocurran en cualquier punto posible en cada fuente debe determinarse con el uso de relaciones predictivas.
4. Las incertidumbres en la ubicación, tamaño y predicción de los parámetros de movimiento del suelo del sismo se combinan para obtener la probabilidad de que el parámetro de movimiento del suelo sea excedido durante un periodo de tiempo particular.

Para determinar la respuesta sísmica de un sitio es necesario establecer las condiciones dinámicas regionales y locales. Para las primeras se requiere conocer la ubicación y características de las zonas potencialmente generadoras de eventos sísmicos que tengan efecto en el sitio de interés. Las condiciones de tipo local están asociadas a los efectos de sitio, definidos por la naturaleza dinámica que presentan los materiales que componen el depósito de suelo en estudio.

Para estimar el movimiento del terreno en el sitio de interés se establece en primer lugar el movimiento esperado en terreno rocoso, analizando el peligro sísmico uniforme que caracteriza a la zona. Posteriormente se toman en cuenta los efectos de sitio, caracterizando dinámicamente los depósitos de suelo que amplifican el paso de las ondas sísmicas.

En términos generales, una evaluación del peligro sísmico en un sitio específico implica los siguientes pasos:



1. Identificación y caracterización de todos los sismos capaces de producir movimientos significativos del suelo en el sitio.
2. Estimación de la magnitud y frecuencia de los sismos que pueden ser generados en el sitio.
3. Evaluación de la distancia y orientación de cada fuente respecto al sitio.
4. Establecer correlaciones estadísticas entre la magnitud de los sismos, las características de las fuentes sísmicas, distancia al sitio e intensidad del movimiento del suelo.
5. Estimación de la intensidad de movimiento sísmico esperadas en el sitio utilizando (a) las magnitudes esperadas de las fuentes identificadas, (b) las condiciones conocidas de estas fuentes y (c) la distancia estimada de la fuente al sitio.

Las razones por las cuales los efectos de sitio tienen tanta influencia son bien entendido. La flexibilidad de un depósito de suelo lo hace vibrar como una estructura flexible y no como un cuerpo rígido, como sería el caso de un macizo rocoso. De la misma manera, si dos depósitos de suelo se comportan elásticamente, tienen la misma geometría y están sujetos al mismo movimiento de entrada, pero uno contiene suelos blandos (Sitio A) y el otro suelos rígidos (Sitio B), entonces se esperaría que el depósito más suave amplificaría más los movimientos de baja frecuencia, mientras que el depósito rígido amplificaría más los movimientos de alta frecuencia.

El efecto de las condiciones del suelo en la aceleración máxima y la velocidad máxima del suelo se ha investigado mediante la realización de estudios estadísticos de los valores relativos observados en sitios con diferentes condiciones del subsuelo.

Con respecto a la influencia de las condiciones del sitio en la velocidad máxima del suelo, parece ser un acuerdo de que las condiciones del sitio tienen una influencia pronunciada en este parámetro. En general, el pico las velocidades del suelo registradas en la superficie de los depósitos del suelo son mayores que las



registradas en la roca, siendo los valores para los depósitos de suelo típicamente aproximadamente el doble que los obtenidos en sitios rocosos

El efecto de las condiciones locales del sitio sobre las características de los movimientos del suelo se puede resumir así como sigue:

1. Es probable que las aceleraciones en la superficie de los depósitos de suelo blando sean mayores que las de sitios rocosos cuando las aceleraciones son bajas y sean menores cuando las aceleraciones sean altas.
2. Las condiciones del suelo tienen una gran influencia en la velocidad máxima del suelo, y esta puede ser mucho mayor que la influencia en la aceleración máxima del suelo.
3. Las condiciones del suelo tienen una influencia significativa en la forma del espectro.
4. Las irregularidades topográficas pueden tener un efecto importante en las características de movimiento del suelo.

No se puede esperar que un espectro de diseño construido sobre la base de la aceleración máxima del suelo envuelva los espectros de respuesta obtenidos directamente de los registros de movimiento del suelo.

Por ejemplo, dos acelerogramas pueden tener la misma aceleración máxima del suelo, pero su aceleración espectral máxima puede ser diferente. En consecuencia, si se generara un espectro de diseño multiplicando la forma espectral por la aceleración máxima del suelo en cada uno de estos acelerogramas, se obtendría el mismo espectro de diseño cuando se debería obtener uno diferente para cada acelerograma, cada uno envolviendo su propio espectro de respuesta.

Por lo tanto, la normalización de los espectros de respuesta sobre la base de la aceleración máxima del suelo es equivalente a suponer que todas las ordenadas en un espectro de respuesta se ven afectados por igual por la aceleración máxima del suelo, lo cual es incorrecto. Para tomar esto hecho en consideración, Newmark y Hall sugirieron un procedimiento de normalización en el que diferentes las regiones



de un espectro se normalizan mediante diferentes medidas de la intensidad del movimiento del suelo.

Se entiende porque el interés de conocer las características dinámicas del suelo para poder estimar el comportamiento que tendrá el mismo al ocurrir algún evento sísmico. Pero, para el interés de la ingeniería en la construcción de edificaciones se tiene que tomar en cuenta el propio comportamiento que tendrá la estructura ante esta excitación del terreno.

La Ciudad de México es un sitio con una particularidad, tiene suelos sumamente susceptibles ante la ocurrencia de eventos sísmicos con fuentes sísmicas cercanas, cabe mencionar que en la ciudad existe un efecto de amplificación de ondas sujeto a las condiciones de suelos con baja resistencia y alta deformabilidad.

Los efectos de amplificación dinámica en depósitos lacustres se han manifestado y ha sido posible medirlos en eventos sísmicos pasados que han azotado a la Ciudad de México, como por ejemplo el sismo de 1985 Mw8.1 y el sismo de 2017 Mw7.1. Con estos sismos se puso en evidencia la brutal amplificación y el incremento sustancial en la duración de los movimientos en el área lacustre, comparados con los registrados en terreno firme o roca de la ciudad. Por ejemplo, la amplitud de las ondas sísmicas con periodos dominantes del suelo cercano a 2 s en la Zona de Lago puede llegar a ser 50 veces mayor que en un sitio de suelo firme de la Ciudad de México.



Capítulo 2. Propiedades dinámicas de los suelos

Las propiedades dinámicas de los suelos están regidas por la respuesta que el suelo tenga hacia cargas cíclicas. Las principales características que afectan la respuesta del suelo ante las cargas cíclicas normalmente producidas por sismos, están dadas por la velocidad de propagación de ondas, módulos elastodinámicos, la relación de Poisson, el amortiguamiento del suelo, el periodo de vibración y el espesor del mismo.

Estas propiedades dinámicas se pueden obtener mediante una variedad de pruebas de campo y laboratorio, para seleccionar cual es la prueba correcta para cada caso se necesita entender el problema específico con el que se trata.

De las propiedades mencionadas anteriormente las más importantes son la rigidez y el amortiguamiento, la rigidez se relaciona con la propagación de ondas y los módulos elastodinámicos, estas características del suelo son críticas para evaluar cómo van a responder a cargas cíclicas.

Las ondas inducen un efecto de difracción múltiple cuando se encuentran las fronteras entre estratos, generan interferencias destructivas y constructivas que se traducen en atenuaciones y amplificaciones, respectivamente. Es fundamental conocer las propiedades dinámicas del terreno para determinar su respuesta dinámica y establecer los efectos de amplificaciones, como lo son:

1. Velocidad de propagación de ondas compresionales (V_p)
2. Velocidad de propagación de ondas de corte (V_s)
3. Módulos elastodinámicos (E y G)

Las ondas sísmicas se propagan a una velocidad que depende de las características del medio que atraviesen. Las ondas internas se propagan desde el origen de la perturbación hasta la superficie del medio y se dividen en ondas primarias y en ondas secundarias.



Pruebas de campo

Las pruebas de campo permiten que las propiedades del suelo sean medidas en el sitio. Las mediciones de las propiedades dinámicas mediante pruebas de campo tienen muchas ventajas, por ejemplo el no necesitar de un muestreo, el cual puede alterar los esfuerzos, o la condición estructural del espécimen de suelo. Muchas pruebas de campo miden la respuesta de volúmenes relativamente altos. En muchas pruebas de campo, la propiedad específica de interés no es medida y debe de ser determinada indirectamente, mediante análisis teórico o correlaciones empíricas.

Algunas pruebas de campo se pueden realizar desde la superficie del suelo, mientras que otras requieren la perforación de pozos para probar el suelo.

Las pruebas sísmicas de Down-Hole se pueden realizar en un solo pozo. En la prueba de Down-Hole, una fuente de impulso se ubica en la superficie del suelo adyacente al pozo. Un solo receptor que se puede mover a diferentes profundidades, o una serie de múltiples receptores a profundidades predeterminadas, se fija contra las paredes del pozo y un solo receptor de activación se ubica en la fuente de energía. Todos los receptores están conectados a un sistema de grabación de alta velocidad para que su salida pueda medirse en función del tiempo. El objetivo de la prueba Down-hole es medir los tiempos de viaje de las ondas p y/o s desde la fuente de energía hasta el receptor. Al ubicar correctamente las posiciones del receptor, se puede generar un gráfico de tiempo de arribo contra profundidad. La pendiente de la curva de tiempo de arribo a cualquier profundidad representa la velocidad de propagación de la onda a esa profundidad.

Debido a que las ondas deben viajar a través de todos los materiales entre la fuente de impulso y los receptores, la prueba Down-Hole permite la detección de capas que pueden ocultarse en estudios de refracción sísmica. Las posibles dificultades con las pruebas de Down-hole y su interpretación pueden resultar de la perturbación del suelo durante la perforación del pozo, efectos del fluido del pozo y del



revestimiento, fuente de impulso insuficiente o excesivamente grande, efectos de ruido de fondo y efectos del nivel freático.

Se ha demostrado que el uso de micro temblores aplicando la técnica de cocientes espectrales H/V, es una herramienta de gran utilidad y bajo costo para estimar la respuesta del sitio, es decir, la frecuencia fundamental del terreno, principalmente en zonas urbanas. La metodología H/V registra el ruido natural en un sitio mediante el uso de sensores triaxiales de banda ancha. La interpretación de la medida de vibraciones naturales está basada en la suposición de que el cociente espectral entre las componentes horizontales y la componente vertical de las microtrepidaciones es una aproximación de la función de transferencia de los suelos, y actualmente es indiscutible la buena resolución de la técnica H/V para la determinación de la frecuencia fundamental de resonancia del terreno.

Para la caracterización de los materiales que componen los depósitos de suelo que se encuentran en los sitios de interés, se ejecutaron los trabajos de campo anteriormente mencionados.

Capítulo 3. Determinación de espectros de diseño

Espectro de respuesta

El concepto de espectro de respuesta se puede introducir como una estructura de un grado de libertad con masa, rigidez y amortiguamiento constante como se muestra en la figura. Se denotara el tiempo como t , $u_g(t)$ el desplazamiento del suelo respecto a una referencia fija, $u(t)$ el desplazamiento relativo de la masa de la estructura respecto a su base.

Parece ser, que la respuesta de la estructura con un grado de libertad a un movimiento sísmico, se ve en términos de desplazamiento relativo, velocidad relativa o aceleración absoluta, depende en dos parámetros de la estructura: su frecuencia natural no amortiguada y su amortiguamiento.

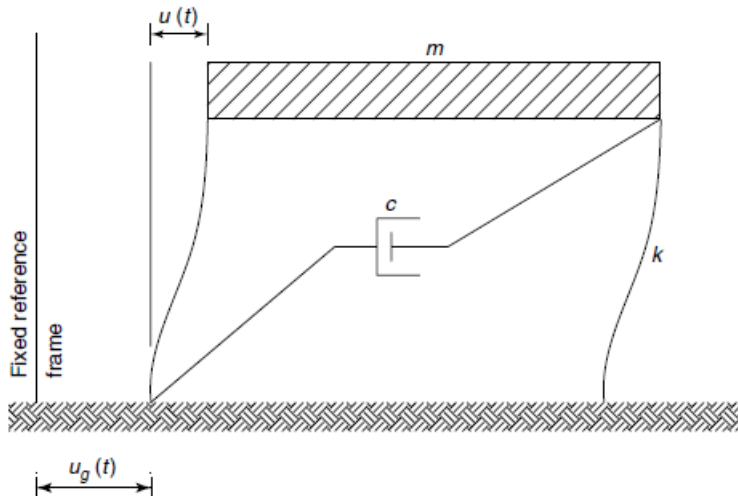


Imagen 2 Representación de estructura de un grado de libertad con masa, rigidez y amortiguamiento constante

Es entonces como un buen indicador de la respuesta que puede tener el suelo por un movimiento particular son las curvas que describen la variación de la respuesta de diferentes estructuras con frecuencias naturales y los coeficientes de



amortiguamiento de las estructuras. Estas curvas constituyen lo que se conoce como espectro de respuesta.

Con esto en mente, se puede repetir el procedimiento para una serie de diferentes estructuras con diferente periodo natural pero con el mismo amortiguamiento y así determinar los valores máximos correspondientes de su respuesta. La grafica de estos valores máximos produce el espectro de respuesta para la aceleración considerada en un historial de tiempo y el amortiguamiento seleccionado.

Espectro de diseño

Una vez conocido lo que son los espectros de respuesta se puede introducir el termino de espectro de diseño, estos son propuestos para el análisis dinámico estructural, se construyen a partir de una familia de espectros de respuesta tomando en cuenta los sismos a los que el sitio de interés puede llegar a estar sometido, utilizando en este caso un análisis de peligro sísmico probabilista.

Estos espectros buscan dar soporte al diseño sísmico de estructuras, pues se busca conocer el periodo dominante del suelo T_s , para evitar que sea similar al periodo fundamental de vibración de la estructura, T_e , con el fin de reducir la probabilidad de efectos de resonancia.

La Ciudad de México es un sitio con suelos susceptibles ante la ocurrencia de eventos sísmicos en fuentes sísmicas cercanas a la zona, por lo cual se realizó una zonificación sísmica de los suelos de la ciudad considerando la aceleración de la partícula y la amplificación de ondas, esto, con dar una idea general de cómo está el ambiente sísmico en sitios específicos de la ciudad. Es importante destacar que en los suelos de la Ciudad de México existe un efecto de amplificación de ondas debido a las condiciones del suelo, que cuentan con baja resistencia y una alta deformabilidad.

Esta amplificación se debe al entrampamiento de ondas por el contraste entre las características dinámicas de los depósitos superficiales. Se realizaron mapas de isoperiodos dominantes de la Ciudad de México, utilizando técnicas como el uso de

cocientes espectrales y funciones de transferencia, para así estimar el periodo dominante del sitio como las máximas amplitudes de esos cocientes.

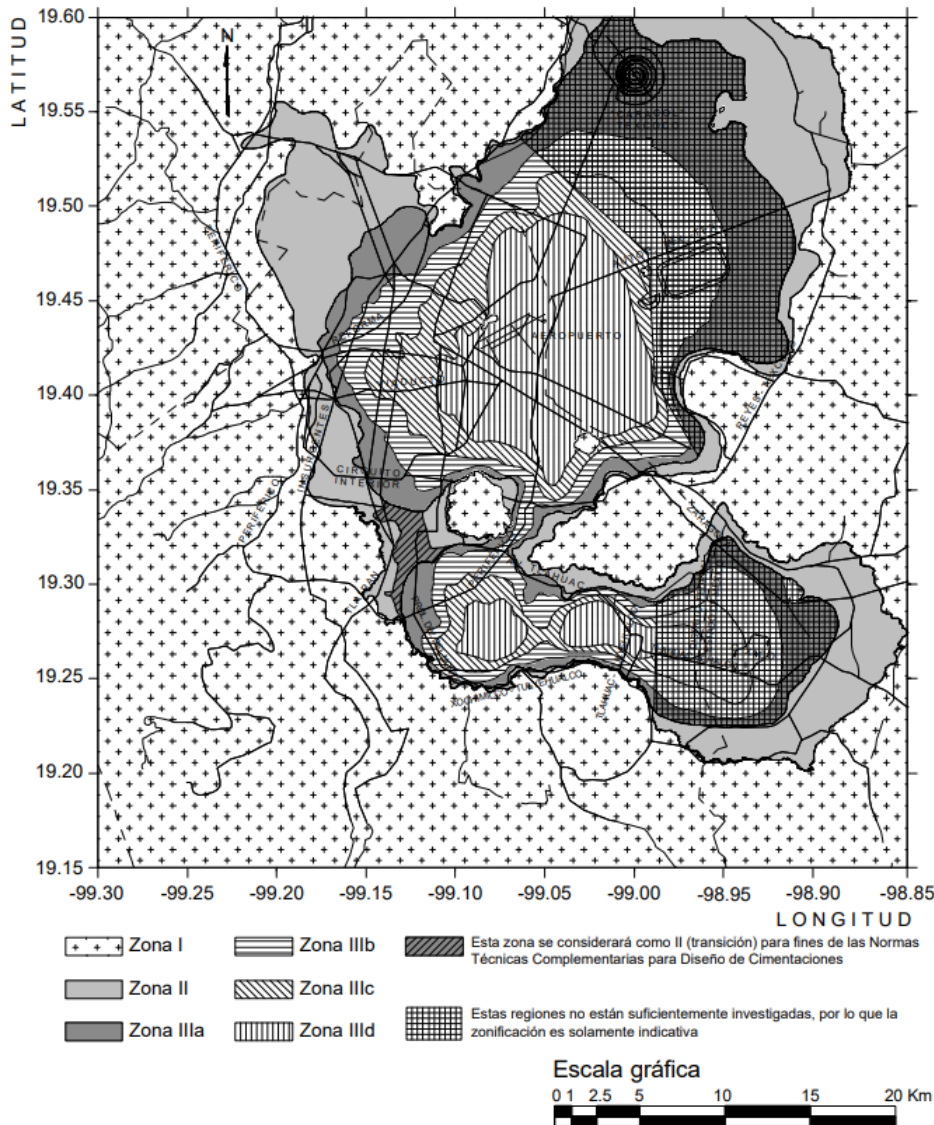


Imagen 3 Zonificación de CDMX para fines de diseño por sismo, obtenida de NTC-DS-2004

Con la Figura se puede apreciar las zonas con un valor de peligro sísmico mayor, con aceleraciones espectrales desfavorables para el diseño sísmico de estructuras. Las alcaldías con mayor peligro sísmico son: Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco.



En el reglamento en sus NTC-DS-2004 se propone el cálculo del espectro de diseño mediante fórmulas empíricas en función del periodo dominante del suelo. En función de este periodo dominante se obtienen los parámetros de aceleración máxima del terreno (a_0), la aceleración que experimentan las estructuras (c), el periodo característico menor (T_a), y el periodo característico mayor (T_b), así como el cociente entre desplazamientos máximos del suelo y de la estructura (k).

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo en su versión con comentarios 2020, “las acciones sísmicas de diseño se determinaran a partir de los espectros de diseño contenidos en el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño, denominado SASID, para la ubicación específica del predio en estudio. La dirección de internet en la que se accede al SASID <https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/>.”

En esta página se encuentra una base de datos del espectro elástico para el sitio de la construcción, y se encuentran espectros afectados por el comportamiento sísmico, identificado como Q' y por sobre-resistencia, R .

Con base en lo anterior, en este estudio se analizan los espectros de diseño obtenidos mediante el programa SASID y el espectro de diseño obtenido en un sitio específico de la ciudad de México, para así observar sus diferencias, además, se formara con las formulas empíricas el espectro de diseño que propone la NTC-DS-2004.



Capítulo 4. Espectros obtenidos con el programa SASID de la NTC-DS-2017

Para poder obtener los espectros de diseño con los cuales se realiza en análisis sísmico de las edificaciones se tiene que seguir a las Normas Técnicas Complementarias de Diseño Sísmico, que oficialmente se publicaron en el 2017, pero, el 09 de Junio de 2020 se publicaron las mismas con comentarios, entonces, con conformidad con estas normas publicadas por la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, en el capítulo 3.1 se menciona:

“Cuando se emplee el método de análisis dinámico modal definido en la sección 6.1, las acciones sísmicas de diseño se determinarán a partir de los espectros de diseño contenidos en el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño, denominado SASID, para la ubicación específica del predio en estudio. La dirección de internet en la que se accede al SASID es <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>. Se encuentran en esa base de datos el espectro elástico para el sitio de la construcción, así como el afectado por los factores de reducción por comportamiento sísmico, Q' , y por sobre-resistencia, R , según las secciones 3.4 y 3.5, que se usa para revisar el estado límite de prevención de colapso. “

Una vez se accede al link que está contenido en las normas técnicas te pedirá acceder a una cuenta, o en su defecto, a crear una nueva para poder utilizar el programa, una vez ingresado te aparecerá el siguiente cuadro, solicitando información acerca del sitio de donde se quiere obtener el espectro de diseño.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA

Selecciones los parámetros para la obtención de información:

| | | |
|--|---|---|
| Factor de hiperestaticidad (k1): <input type="text" value="0.80"/> | Factor de Importancia (Grupo): <input type="text" value="B"/> | Seleccione en el mapa el punto de interés. Si usted conoce las coordenadas del punto, por favor escribalas y presione el botón "Ir a las Coordenadas escritas" Latitud: <input type="text" value="19.43261"/> |
| Factor de Irregularidad: <input type="text" value="1.0"/> | ¿Desea generar Acelerogramas Sintéticos? <input checked="" type="radio"/> No <input type="radio"/> Si | Longitud: <input type="text" value="-99.13321"/> |
| ¿La estructura es de mampostería? <input checked="" type="radio"/> No <input type="radio"/> Si | | |
| * Proporcione una dirección del predio: (máximo 500 caracteres) <input type="text"/> | | |
| <input type="button" value="Ir a las Coordenadas escritas"/> | | |

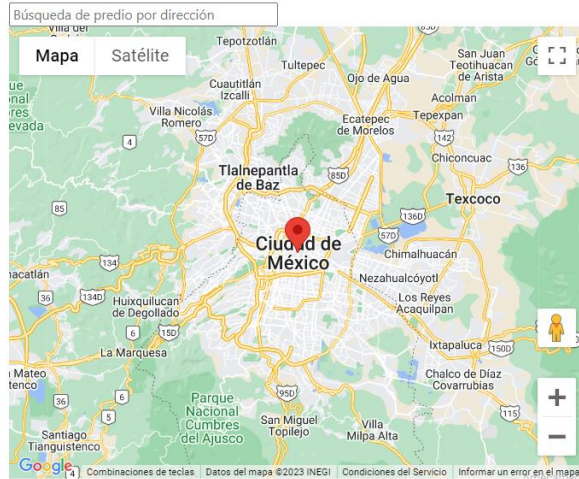
Imagen 4 Parámetros para obtener información, obtenida de página "https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx"

Para los casos de estudio, y tener una comparación acertada a las pruebas y resultados obtenidos en campo se tomó como $k_1=1.0$, Factor de irregularidad=1 y estructura contenida dentro del Grupo B.

Además de tener la opción de introducir las coordenadas del punto de interés, se puede acceder al espectro de diseño de dicho sitio mediante la dirección del predio, o colocar un puntero en el mapa interactivo, el cual se encuentra debajo del cuadro de información anteriormente colocado, se muestra a continuación con los pasos a seguir para generar el espectro de diseño.

Mapa de la Ciudad de México

Coordenadas: (19.43261 -99.13321)



Espectros

— Elástico sin reducir — Diseño, Q=1.5 — Diseño, Q=3 — Peligro uniforme
— Diseño, Q=1 — Diseño, Q=2 — Diseño, Q=4

PARA INICIAR EL PROCESO

- 1 Seleccione en el mapa el punto de interés
- 2 Con la ubicación seleccionada presione el boton **PROCESAR**
- 3 Se generarán los espectros

Procesar Generar documento

Imagen 5 Mapa e instrucciones para iniciar el proceso, obtenida de "<https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx>"

Como se puede observar, es intuitivo el uso del SASID, por lo cual se considera de fácil acceso para todo público, se puede observar que genera el espectro elástico sin reducir y con un factor de ductilidad de $Q=1, 1.5, 2, 3$ y 4 , además de generar peligro uniforme.

Una vez procesado los espectros te da la opción de descargar un archivo comprimido, se muestran de los sitios de interés la primera página de los archivos.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA

Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan, Ubicación Latitud 19.28827,
Longitud: -99.15279

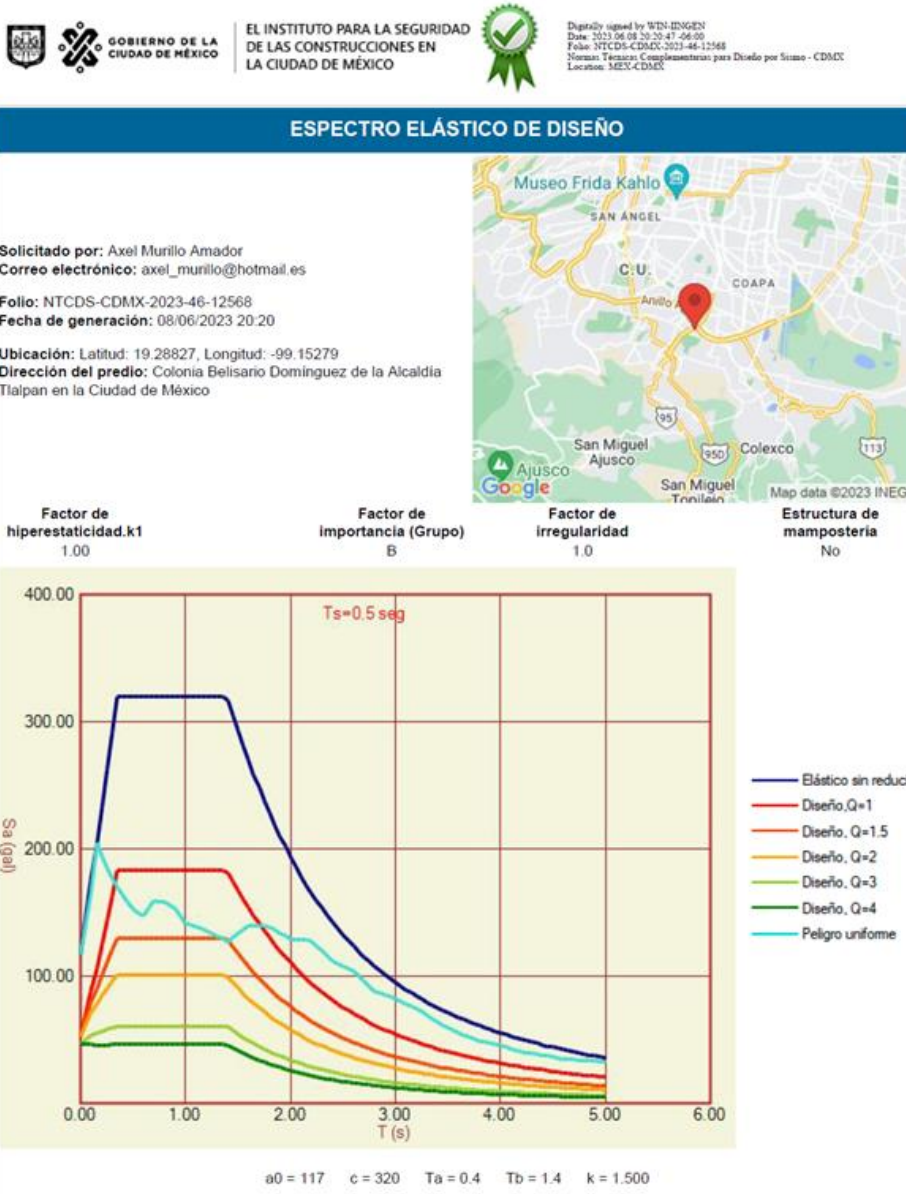


Imagen 6 Espectro obtenido de SASID, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA

Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc, Latitud: 19.45721, Longitud: -99.14061.



EL INSTITUTO PARA LA SEGURIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES EN LA CIUDAD DE MÉXICO



Digitally signed by WDM-INGENI
Date: 2023.06.08 20:34:23 -06:00
Folio: NTCDS-CDMX-2023-20-12570
Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo - CDMX
Location: MEX-CDMX

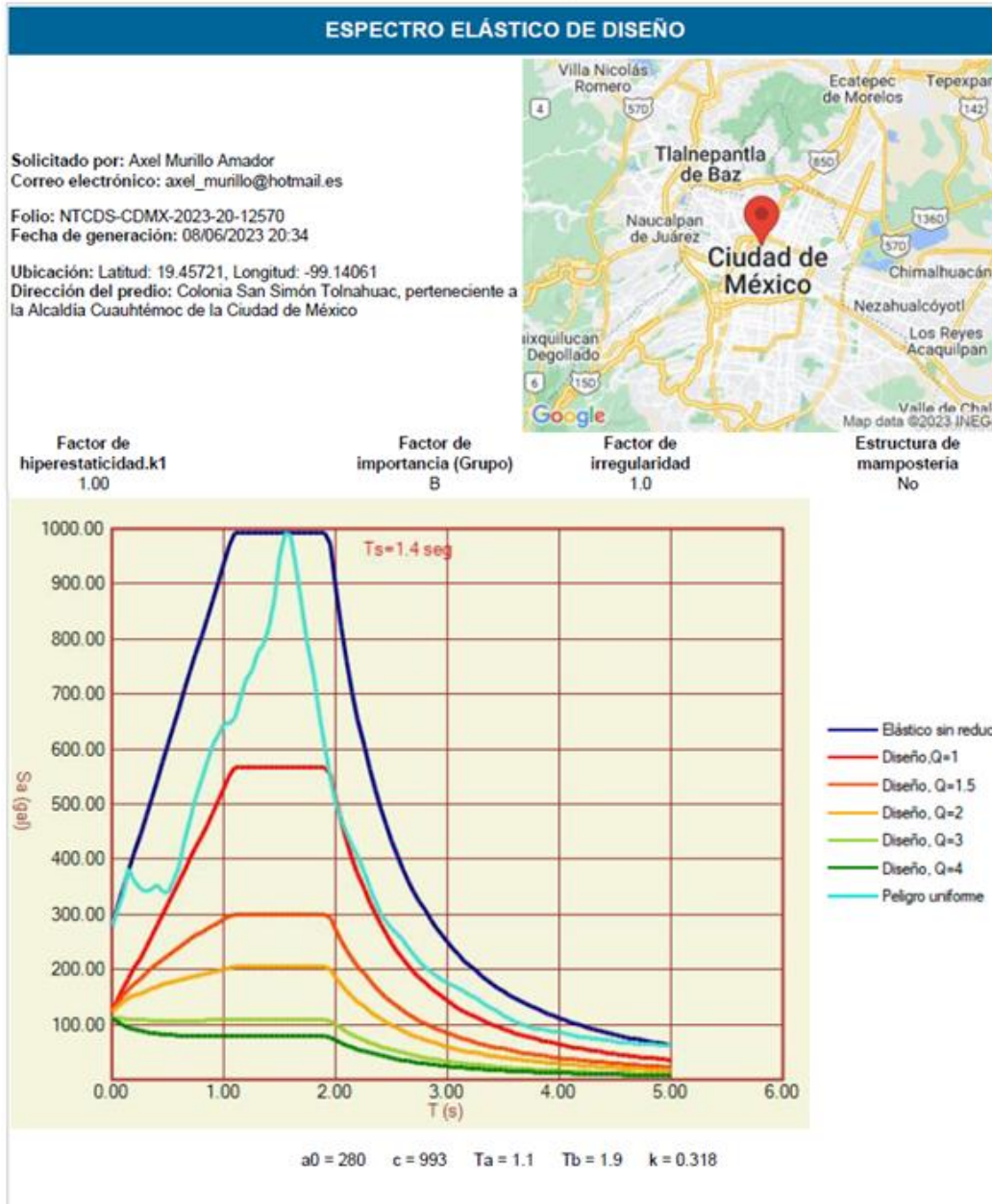


Imagen 7 Espectro obtenido de SASID Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc



Sitio 3, Colonia tabacalera, Latitud: 19.43428, Longitud: -99.15478



GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

EL INSTITUTO PARA LA SEGURIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES EN LA CIUDAD DE MÉXICO



Digitally signed by WTD-IDNGEN
Date: 2023.06.08 20:42:38 -06:00
Folio: NTCDS-CDMX-2023-37-12573
Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo - CDMX
Localidad: MEX-CDMX

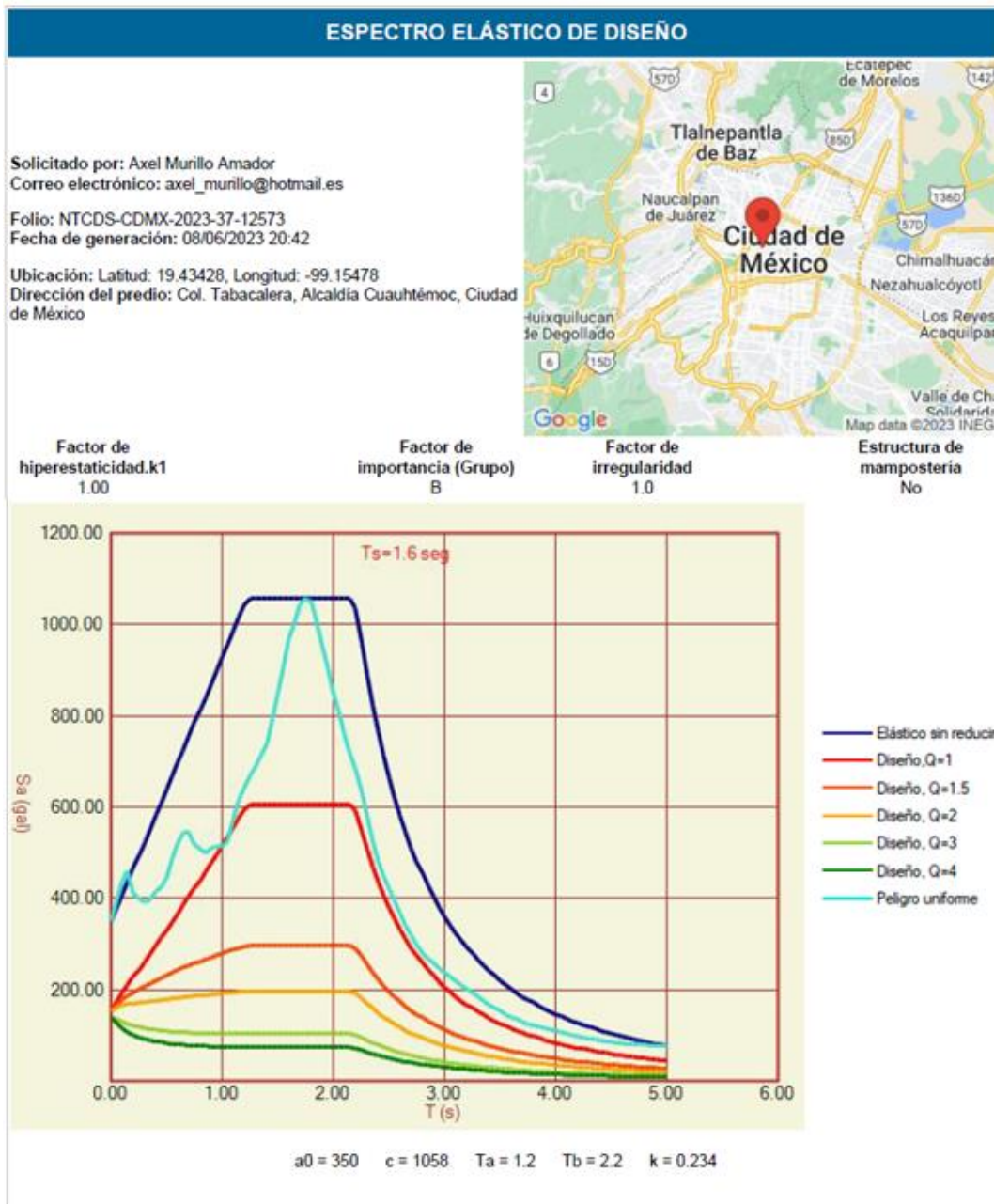


Imagen 8 Espectro obtenido de SASID Sitio 3, Colonia tabacalera



Capítulo 5. Espectros en sitios específicos de la CDMX

Normativa

Para llevar a cabo la determinación de los espectros de diseño en sitios específicos se tomó de referencia lo estipulado en la NTC-DS-2017 en el Apéndice A, el cual se cita textualmente, los siguientes pasos generales:

“a) Construir un modelo estratigráfico del subsuelo que contenga los espesores de los estratos y la profundidad del basamento, junto con los valores correspondientes de las velocidades de ondas de cortante, pesos específicos y amortiguamientos. Se entiende como basamento a la capa en la que puede considerarse ocurre el movimiento sísmico de diseño para la Zona de Lomas, caracterizado por los espectros de peligro uniforme que se presentan en la figura A.1.1.

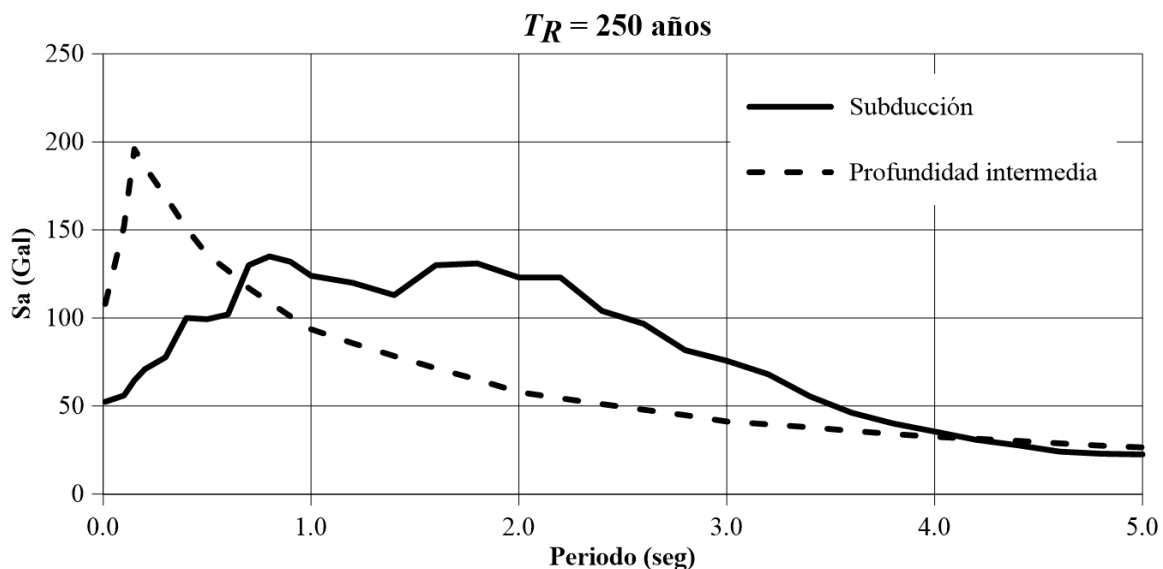


Imagen 9 Figura A.1.1 de NTC-DS-2017, Espectros de peligro uniforme del movimiento de diseño para la Zona de Lomas

b) Calcular la función de transferencia de campo libre, como el cociente del espectro de Fourier del movimiento en la superficie, entre el espectro de Fourier del movimiento de entrada, suponiendo propagación vertical de ondas de cortante. Para



este cálculo se tendrán en cuenta las incertidumbres en los parámetros del modelo estratigráfico del subsuelo, las incertidumbres inherentes a la hipótesis de propagación vertical de ondas de cortante y el efecto de la no linealidad de los materiales. Deberán usarse en este cálculo métodos de aceptación generalizada en la práctica profesional.

c) Convertir los espectros de peligro uniforme de la figura A.1.1, que corresponden a dos grupos diferentes de eventos sísmicos, en espectros de potencia o de amplitudes de Fourier. Este cálculo requiere que se especifique la duración del movimiento del suelo de entrada, D_B , que se tomará igual a:

$$D_B = \begin{cases} 80 \text{ s} & \text{eventos de subducción} \\ 40 \text{ s} & \text{profundidad intermedia} \end{cases}$$

d) Obtener el espectro de potencia en la superficie, multiplicando la amplitud de la función de transferencia de campo libre al cuadrado por el espectro de potencia en el basamento. Si no se requiere incluir el efecto de interacción cinemática suelo-estructura, deberá continuarse con el paso (e); en caso contrario, se sigue con el paso (f).

e) Si no se requiere incluir interacción suelo-estructura, se determinarán dos espectros de respuesta de sitio, uno para cada grupo de eventos, para un oscilador con 5 por ciento de amortiguamiento, usando como excitación de la base el espectro de potencia en la superficie y aplicando la teoría de vibraciones aleatorias. La duración del movimiento en la superficie, D_s , se calculará con la siguiente expresión:

$$D_s = D_B + 20(T_s - 0.5)$$

Criterios de simulación

Se determinaron acelerogramas sintéticos, estos permiten realizar un análisis inelástico del suelo, en este tipo de análisis llamado paso a paso se requiere que los acelerogramas sintéticos tomen en cuenta el carácter aleatorio tanto de las amplitudes como de las fases de dichas señales. Es recomendable el generar



diversos acelerogramas sintéticos que sean compatibles con los espectros de respuesta que se esperan de las fuentes sísmicas potenciales.

Se hizo uso de un método de simulación de temblores que permite generar acelerogramas sintéticos que cumplen con las amplitudes espectrales prescritas. El principio del método es construir señales transitorias cuyos Espectros de Amplitudes de Fourier (EAF) guarden semejanza, al menos en promedio, con un EAF objetivo. Para la simulación se construye una serie de tiempo de ruido blanco gaussiano, con media cero, varianza uno y modulada con una ventana temporal de la forma.

El espectro de Fourier de esta serie de ruido, $S(\omega)$, se multiplica por el EAF prescrito $|A_p(\omega)|$. De este modo, el acelerograma simulado se obtiene haciendo uso de la síntesis de Fourier, de acuerdo con la expresión

$$A_s(t) = \zeta^{-1} \{ |A_p(\omega)| S(\omega) \}$$

Donde ζ^{-1} representa la transformada inversa de Fourier.

Para especificar el EAF objetivo se hace uso de la relación que existe entre el espectro de respuesta de pseudovelocity para amortiguamiento nulo y el EAF de la aceleración del movimiento de la excitación. Estadísticamente, se sabe que las respuestas espectrales de pseudovelocity no amortiguadas son envolventes del EAF. Con rigor, para cualquier tipo de señales, se demuestra que el EAF es casi siempre menor que el espectro de pseudovelocity. En combinación con esta similitud, para deducir espectros de pseudovelocity S_v no amortiguados a partir de espectros de pseudoaceleración S_a amortiguados, se adaptó una correlación semiempírica propuesta en Newmark y Rosenblueth (1971), dada por

$$S_v = \frac{S_a}{\Omega} (1 + \beta \xi \Omega T_D)^K$$

Donde Ω es la frecuencia natural angular del oscilador, T_D es la duración del movimiento, ζ es el amortiguamiento del espectro de pseudoaceleración (normalmente del 5%), y $\beta=0.6$.

Con estos criterios se generaron familias de acelerogramas sintéticos para roca correspondientes a los espectros de peligro uniforme.

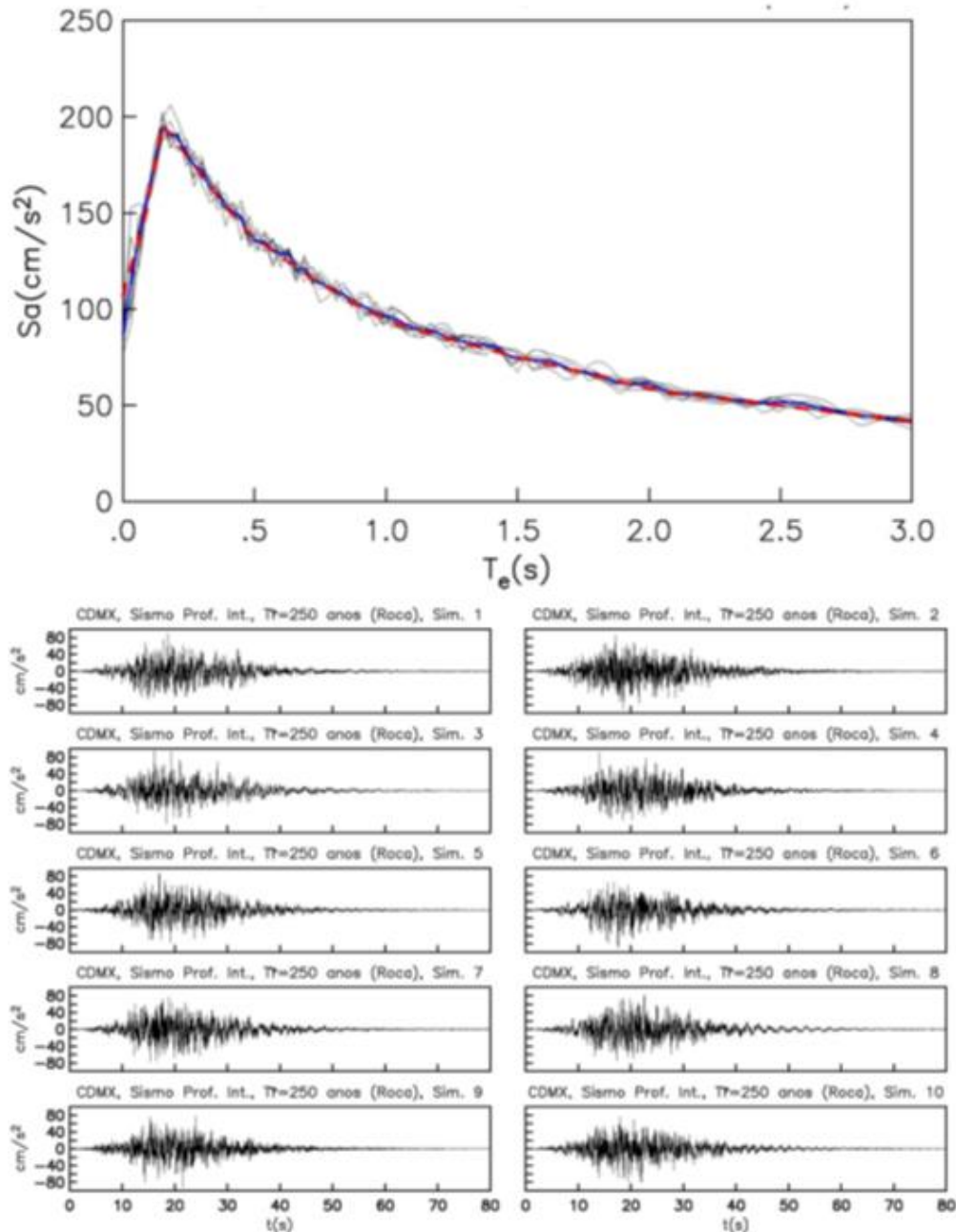


Imagen 10 Espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos en terreno firme (líneas delgadas), espectro de respuesta promedio de la simulación (línea azul continua) y espectro de peligro uniforme (línea roja discontinua) para Sismos de Profundidad Intermedia con $T_r=250$ años.

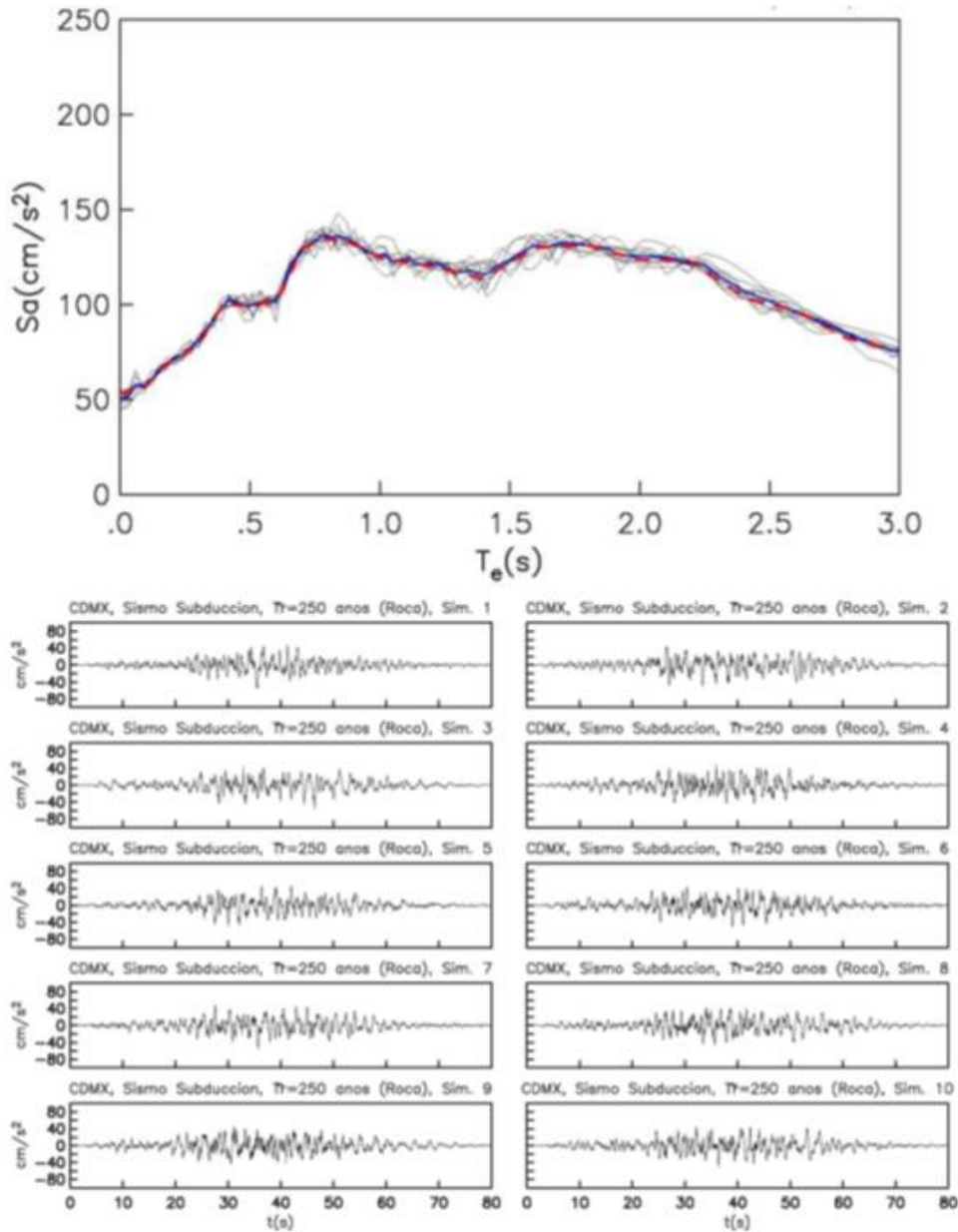


Imagen 11 Espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos en terreno firme (líneas delgadas), espectro de respuesta promedio de la simulación (línea azul continua) y espectro de peligro uniforme (línea roja discontinua) para sismos de Subducción con $T_r = 250$ años



Caracterización dinámica del suelo.

Para caracterizar dinámicamente a los materiales que componen al depósito de suelo en el sitio de interés, se ejecutaron los siguientes trabajos de campo:

- Un ensaye de Down Hole (DH)
- Un punto de monitoreo de vibración ambiental

Para la realización del ensaye del Down Hole (DH) se realizó previamente en el sitio un barreno que fue ademado con tubería de PVC con tapa en el fondo. El espacio anular entre el ademe y el barreno fue relleno con mortero.

El ensaye de Down Hole se ejecutó desde la superficie y hasta los 30.0 m de profundidad con respecto al nivel actual del terreno.

A partir del conocimiento de los valores de velocidad de propagación de ondas, y en complemento con los valores de los pesos volumétricos de los materiales que caracterizan al depósito de suelo estudiado, se establecieron las siguientes propiedades dinámicas complementarias:

Para ello, se aplicaron las relaciones siguientes:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

$$G = V_s^2 \rho$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

La siguiente ecuación de las NTC-DS-2020 nos da el cálculo el periodo dominante de vibrar del suelo, mediante la propagación de onda registradas del Down Hole.

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{G_i}\right) \left(\sum_{i=1}^N \gamma_i d_i (x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)\right)}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Se muestran los resultados de los ensayos de Down Hole en las siguientes tablas.

Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan, Ubicación Latitud 19.28827,
Longitud: -99.15279 Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac,

Tabla 1 Propiedades dinámicas obtenidas de Down Hole, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan

| Propiedades dinámicas obtenidas del Down Hole | | | | | | |
|---|-------------------|----------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Profundidad | Velocidad de onda | | Peso Vol. (t/m ³) | Relacion de Poisson | Modulos dinámicos | |
| | Vp (m/s) | Vs (m/s) | | | E (t/m ²) | G (t/m ²) |
| 1.0 | - | 755.4 | 1.50 | - | - | 87254.5 |
| 2.0 | 1,050.80 | 236.8 | 1.50 | 0.473 | 25,255.10 | 8,571.20 |
| 3.0 | 827.30 | 219.8 | 1.50 | 0.462 | 21,601.10 | 7,387.40 |
| 4.0 | 763.60 | 153.0 | 1.50 | 0.479 | 10,589.70 | 3,579.80 |
| 5.0 | 849.20 | 131.8 | 1.50 | 0.488 | 7,905.70 | 2,657.10 |
| 6.0 | 915.40 | 110.4 | 1.50 | 0.493 | 5,567.30 | 1,864.90 |
| 7.0 | 1,031.20 | 80.7 | 1.70 | 0.497 | 3,375.50 | 1,127.50 |
| 8.0 | 1,183.70 | 136.4 | 1.70 | 0.493 | 9,634.90 | 3,226.10 |
| 9.0 | 1,165.40 | 136.7 | 1.70 | 0.493 | 9,665.30 | 3,236.80 |
| 10.0 | 1,250.70 | 201.0 | 1.70 | 0.487 | 20,807.90 | 6,997.80 |
| 11.0 | 1,339.10 | 264.5 | 1.70 | 0.480 | 35,875.70 | 12,122.60 |
| 12.0 | 1,229.40 | 212.4 | 1.70 | 0.485 | 23,219.10 | 7,819.90 |
| 13.0 | 1,207.20 | 416.2 | 1.70 | 0.433 | 85,997.90 | 30,015.50 |
| 14.0 | 1,318.90 | 372.2 | 1.70 | 0.457 | 69,951.60 | 24,009.90 |
| 15.0 | 1,334.30 | 268.5 | 1.70 | 0.479 | 36,953.20 | 12,493.50 |
| 16.0 | 1,371.60 | 244.9 | 1.70 | 0.484 | 30,827.90 | 10,390.00 |
| 17.0 | 1,339.90 | 224.2 | 1.70 | 0.486 | 25,878.50 | 8,709.80 |
| 18.0 | 1,349.70 | 225.7 | 1.70 | 0.486 | 26,240.20 | 8,831.50 |
| 19.0 | 1,347.40 | 301.8 | 1.70 | 0.474 | 46,504.60 | 15,779.20 |
| 20.0 | 1,385.40 | 357.1 | 1.70 | 0.464 | 64,729.50 | 22,100.90 |
| 21.0 | 1,459.00 | 415.5 | 1.70 | 0.456 | 87,112.80 | 29,917.80 |
| 22.0 | 1,531.20 | 419.7 | 1.90 | 0.459 | 99,586.80 | 34,119.60 |
| 23.0 | 1,537.70 | 366.8 | 1.90 | 0.470 | 76,581.80 | 26,051.00 |
| 24.0 | 1,555.10 | 405.5 | 1.90 | 0.464 | 93,225.00 | 31,849.60 |
| 25.0 | 1,661.90 | 418.6 | 1.50 | 0.466 | 78,568.90 | 26,794.70 |
| 26.0 | 1,664.50 | 483.6 | 1.50 | 0.454 | 103,967.30 | 35,754.30 |
| 27.0 | 1,603.50 | 458.9 | 1.50 | 0.455 | 93,709.40 | 32,193.60 |
| 28.0 | 1,667.90 | 575.5 | 1.50 | 0.432 | 145,097.80 | 50,647.90 |
| 29.0 | 1,679.90 | 476.9 | 1.50 | 0.456 | 101,283.60 | 34,777.40 |
| 30.0 | 1,697.30 | 525.5 | 1.50 | 0.447 | 122,181.70 | 42,219.00 |



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Sitio 2, Alcaldía Cuauhtémoc, Latitud: 19.45721, Longitud: -99.14061.

Tabla 2 Propiedades dinámicas obtenidas de Down Hole, Sitio 2, Alcaldía Cuauhtémoc

| Propiedades dinámicas obtenidas del Down Hole | | | | | | |
|---|-------------------|----------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Profundidad | Velocidad de onda | | Peso Vol. (t/m ³) | Relacion de Poisson | Modulos dinámicos | |
| | Vp (m/s) | Vs (m/s) | | | E (t/m ²) | G (t/m ²) |
| 1.00 | 432.20 | 133.00 | 1.50 | 0.448 | 7,831.70 | 2,704.90 |
| 2.00 | 556.80 | 153.50 | 1.50 | 0.459 | 10,518.00 | 3,604.90 |
| 3.00 | 775.10 | 128.30 | 1.45 | 0.486 | 7,231.70 | 2,433.40 |
| 4.00 | 1,068.70 | 82.50 | 1.45 | 0.497 | 3,014.60 | 1,006.90 |
| 5.00 | 1,126.90 | 75.20 | 1.30 | 0.498 | 2,243.60 | 749.00 |
| 6.00 | 1,279.90 | 61.50 | 1.30 | 0.499 | 1,503.70 | 501.60 |
| 7.00 | 1,278.30 | 77.10 | 1.30 | 0.498 | 2,362.60 | 788.50 |
| 8.00 | 1,321.10 | 54.00 | 1.30 | 0.499 | 1,158.80 | 386.50 |
| 9.00 | 1,293.00 | 59.30 | 1.30 | 0.499 | 1,399.20 | 466.70 |
| 10.00 | 1,366.20 | 67.90 | 1.30 | 0.499 | 1,829.30 | 610.30 |
| 11.00 | 1,324.60 | 98.80 | 1.30 | 0.497 | 3,875.90 | 1,294.40 |
| 12.00 | 1,305.10 | 90.80 | 1.30 | 0.498 | 3,270.20 | 1,091.80 |
| 13.00 | 1,361.70 | 74.90 | 1.30 | 0.498 | 2,228.30 | 743.50 |
| 14.00 | 1,362.80 | 87.50 | 1.30 | 0.498 | 3,041.70 | 1,015.30 |
| 15.00 | 1,396.30 | 118.30 | 1.30 | 0.496 | 5,548.90 | 1,854.10 |
| 16.00 | 1,371.60 | 94.70 | 1.30 | 0.498 | 3,563.20 | 1,189.60 |
| 17.00 | 1,310.90 | 91.00 | 1.15 | 0.498 | 2,907.60 | 970.80 |
| 18.00 | 1,317.80 | 99.70 | 1.15 | 0.497 | 3,486.70 | 1,164.50 |
| 19.00 | 1,415.30 | 108.00 | 1.15 | 0.497 | 4,093.70 | 1,367.20 |
| 20.00 | 1,328.80 | 61.90 | 1.15 | 0.499 | 1,347.50 | 449.50 |
| 21.00 | 1,298.90 | 50.30 | 1.15 | 0.499 | 888.60 | 296.40 |
| 22.00 | 1,336.50 | 76.20 | 1.15 | 0.498 | 2,037.40 | 679.90 |
| 23.00 | 1,339.70 | 88.70 | 1.15 | 0.498 | 2,765.80 | 923.30 |
| 24.00 | 1,307.80 | 82.10 | 1.15 | 0.498 | 2,369.30 | 790.80 |
| 25.00 | 1,344.70 | 130.60 | 1.15 | 0.495 | 5,979.40 | 1,999.50 |
| 26.00 | 1,422.60 | 398.60 | 1.65 | 0.457 | 77,902.40 | 26,726.60 |
| 27.00 | 1,487.70 | 473.70 | 1.65 | 0.444 | 108,966.60 | 37,741.60 |
| 28.00 | 1,350.50 | 479.10 | 1.65 | 0.428 | 110,245.20 | 38,600.50 |
| 29.00 | 1,316.70 | 498.90 | 1.65 | 0.416 | 118,567.40 | 41,861.50 |
| 30.00 | 1,353.20 | 230.30 | 1.65 | 0.485 | 26,503.10 | 8,923.10 |
| 31.00 | 1,319.00 | 212.80 | 1.65 | 0.487 | 22,645.50 | 7,616.30 |
| 32.00 | 1,355.40 | 210.50 | 1.65 | 0.488 | 22,175.00 | 7,453.10 |
| 33.00 | 1,475.60 | 497.40 | 1.65 | 0.436 | 119,500.30 | 41,611.50 |
| 34.00 | 1,321.70 | 193.60 | 1.65 | 0.489 | 18,773.20 | 6,303.80 |
| 35.00 | 1,358.00 | 193.90 | 1.65 | 0.490 | 18,842.60 | 6,324.70 |
| 36.00 | 1,323.00 | 212.10 | 1.65 | 0.487 | 22,490.60 | 7,563.40 |
| 37.00 | 1,359.40 | 177.20 | 1.65 | 0.491 | 15,760.70 | 5,284.00 |
| 38.00 | 1,360.00 | 237.70 | 1.65 | 0.484 | 28,216.10 | 9,505.20 |
| 39.00 | 1,324.70 | 234.60 | 1.65 | 0.484 | 27,470.00 | 9,256.60 |
| 40.00 | 1,361.00 | 215.90 | 1.65 | 0.487 | 23,317.60 | 7,840.00 |
| 41.00 | 1,504.20 | 512.30 | 1.90 | 0.434 | 145,804.40 | 50,824.10 |
| 42.00 | 1,440.10 | 513.60 | 1.90 | 0.427 | 145,838.10 | 51,095.20 |
| 43.00 | 1,483.10 | 532.10 | 1.90 | 0.426 | 156,386.40 | 54,828.40 |
| 44.00 | 1,462.00 | 516.00 | 1.90 | 0.429 | 147,380.40 | 51,573.40 |



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Sitio 3, Colonia tabacalera, Latitud: 19.43428, Longitud: -99.15478

Tabla 3 Propiedades dinámicas obtenidas de Down Hole, Sitio 3, Colonia Tabacalera

| Profundidad | Velocidad de onda | | Peso Vol. (t/m ³) | Relacion de Poisson | Modulos dinámicos | |
|-------------|-------------------|----------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Vp (m/s) | Vs (m/s) | | | E (t/m ²) | G (t/m ²) |
| 1.00 | 942.40 | 202.4 | 1.65 | 0.476 | 20,329.90 | 6,887.60 |
| 2.00 | 861.20 | 60.20 | 1.65 | 0.498 | 1,826.30 | 609.8 |
| 3.00 | 979.10 | 50.10 | 1.65 | 0.499 | 1,265.10 | 422.1 |
| 4.00 | 958.20 | 57.00 | 1.65 | 0.498 | 1,639.90 | 547.30 |
| 5.00 | 1,230.50 | 44.40 | 1.65 | 0.499 | 995.5 | 332.00 |
| 6.00 | 1,287.10 | 57.80 | 1.12 | 0.50 | 1,143.50 | 381.40 |
| 7.00 | 1,451.60 | 62.6 | 1.12 | 0.50 | 1,342.90 | 447.90 |
| 8.00 | 1,425.40 | 64.7 | 1.12 | 0.499 | 1,431.90 | 477.60 |
| 9.00 | 1,372.40 | 77.00 | 1.12 | 0.498 | 2,028.60 | 676.9 |
| 10.00 | 1,345.90 | 90.70 | 1.12 | 0.498 | 2,813.40 | 939.2 |
| 11.00 | 1,337.90 | 86.40 | 1.12 | 0.498 | 2,553.20 | 852.30 |
| 12.00 | 1,248.10 | 79.60 | 1.12 | 0.498 | 2,167.20 | 723.40 |
| 13.00 | 1,310.30 | 49.70 | 1.12 | 0.50 | 844.30 | 281.60 |
| 14.00 | 1,319.70 | 51.1 | 1.12 | 0.50 | 892.70 | 297.70 |
| 15.00 | 1,445.70 | 45.30 | 1.12 | 0.5 | 701.3 | 233.90 |
| 16.00 | 1,392.70 | 64.30 | 1.12 | 0.50 | 1,416.50 | 472.50 |
| 17.00 | 1,463.70 | 86.60 | 1.12 | 0.50 | 2,568.50 | 857.20 |
| 18.00 | 1,246.90 | 67.20 | 1.12 | 0.50 | 1,545.00 | 515.50 |
| 19.00 | 1,410.80 | 116.20 | 1.12 | 0.50 | 4,610.30 | 1,540.30 |
| 20.00 | 1,417.10 | 104.90 | 1.12 | 0.50 | 3,763.90 | 1,256.90 |
| 21.00 | 1,419.00 | 115.10 | 1.12 | 0.50 | 4,529.10 | 1,513.00 |
| 22.00 | 1,363.10 | 101.90 | 1.12 | 0.50 | 3,550.30 | 1,185.70 |
| 23.00 | 1,492.00 | 178.80 | 1.12 | 0.49 | 10,893.90 | 3,649.00 |
| 24.00 | 1,367.80 | 101.90 | 1.12 | 0.50 | 3,553.00 | 1,186.50 |
| 25.00 | 1,263.70 | 97.30 | 1.12 | 0.50 | 3,234.20 | 1,080.20 |
| 26.00 | 1,316.00 | 85.2 | 1.12 | 0.498 | 2,480.30 | 827.9 |
| 27.00 | 1,372.70 | 84.8 | 1.12 | 0.498 | 2,460.50 | 821.2 |
| 28.00 | 1,372.70 | 90.6 | 1.12 | 0.498 | 2,808.20 | 937.4 |
| 29.00 | 1,378.40 | 90.2 | 1.12 | 0.498 | 2,783.00 | 929 |
| 30.00 | 1,437.10 | 105.00 | 1.12 | 0.50 | 3,768.00 | 1,258.20 |
| 31.00 | 1,440.20 | 142.20 | 1.12 | 0.50 | 6,898.50 | 2,307.10 |
| 32.00 | 1,439.20 | 189.20 | 1.22 | 0.49 | 13,277.00 | 4,451.70 |
| 33.00 | 1,442.20 | 204.10 | 1.22 | 0.49 | 15,431.90 | 5,179.20 |
| 34.00 | 1,510.10 | 231.00 | 1.22 | 0.49 | 19,747.90 | 6,635.60 |
| 35.00 | 1,508.70 | 205 | 1.22 | 0.491 | 15,584.40 | 5,227.60 |
| 36.00 | 1,444.50 | 106.3 | 1.22 | 0.497 | 4,212.00 | 1,406.50 |
| 37.00 | 1,359.20 | 109.3 | 1.22 | 0.497 | 4,448.60 | 1,486.10 |
| 38.00 | 1,347.00 | 114 | 1.22 | 0.496 | 4,834.00 | 1,615.20 |
| 39.00 | 1,326.00 | 149.00 | 1.8 | 0.49 | 12,175.50 | 4,075.90 |
| 40.00 | 1,383.00 | 157.90 | 1.8 | 0.49 | 13,657.00 | 4,572.50 |



Vibración ambiental

Se analizaron los registros capturados durante la campaña de Vibración Ambiental (VA) para establecer el intervalo en que se ubica el periodo dominante de vibración en la zona de estudio.

A partir de los espectros de Fourier calculados de los registros de VA, se obtuvo la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (técnica de Nakamura, REHV o H/V), para determinar las frecuencias dominantes de vibración del terreno.

Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan, Ubicación Latitud 19.28827, Longitud: -99.15279

En estos cocientes se ha determinado que la frecuencia dominante de vibración del terreno se ubica en 1.46 Hz, asociada a un periodo de vibración de:

$$T_s = 0.68 \text{ s}$$

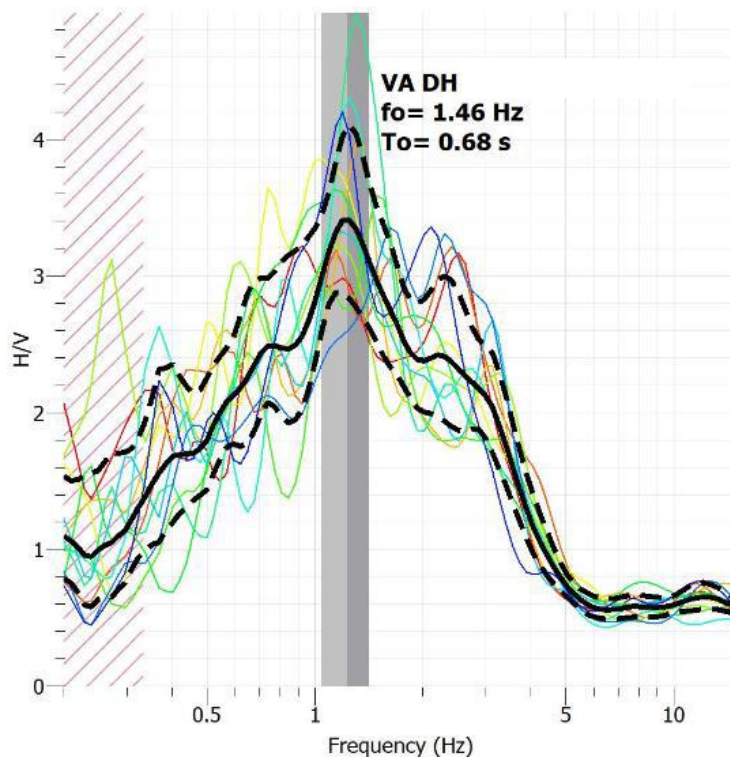


Imagen 12 Vibración ambiental de sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc, Latitud: 19.45721,
Longitud: -99.14061.

En estos cocientes se ha determinado que la frecuencia dominante de vibración del terreno se ubica en 0.72 Hz, asociada a un periodo de vibración de:

Ts: 1.39 s

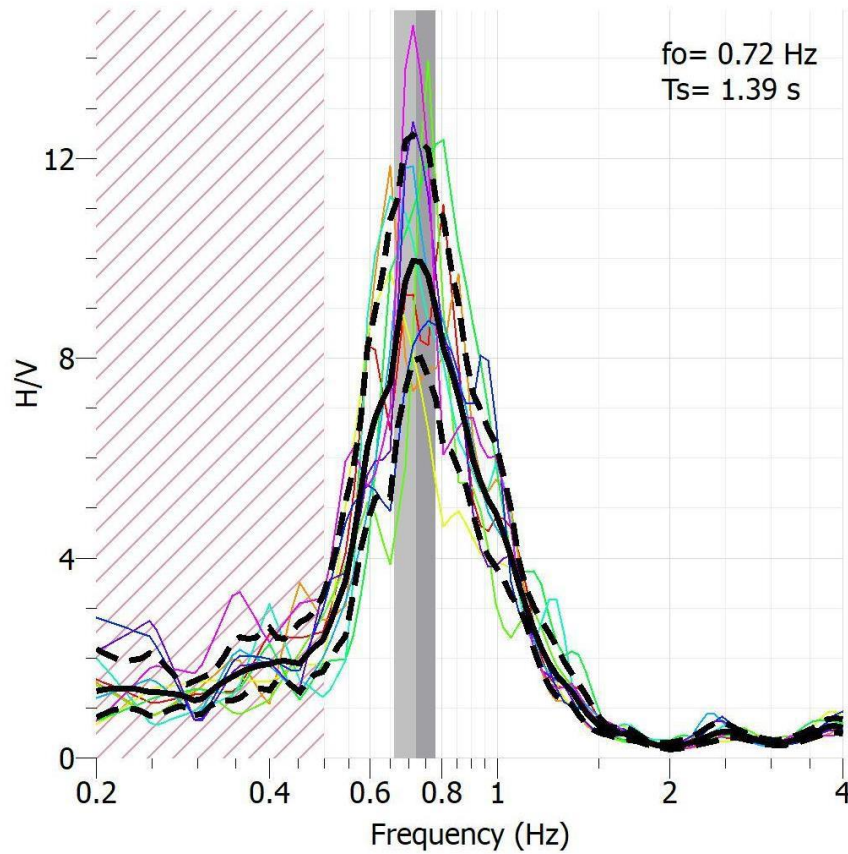


Imagen 13 Vibración ambiental de Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc

Sitio 3, Colonia Tabacalera, Latitud: 19.43428, Longitud: -99.15478

En estos cocientes se ha determinado que la frecuencia dominante de vibración del terreno se ubica en 0.53 Hz, asociada a un periodo de vibración de:

Ts: 1.9 s

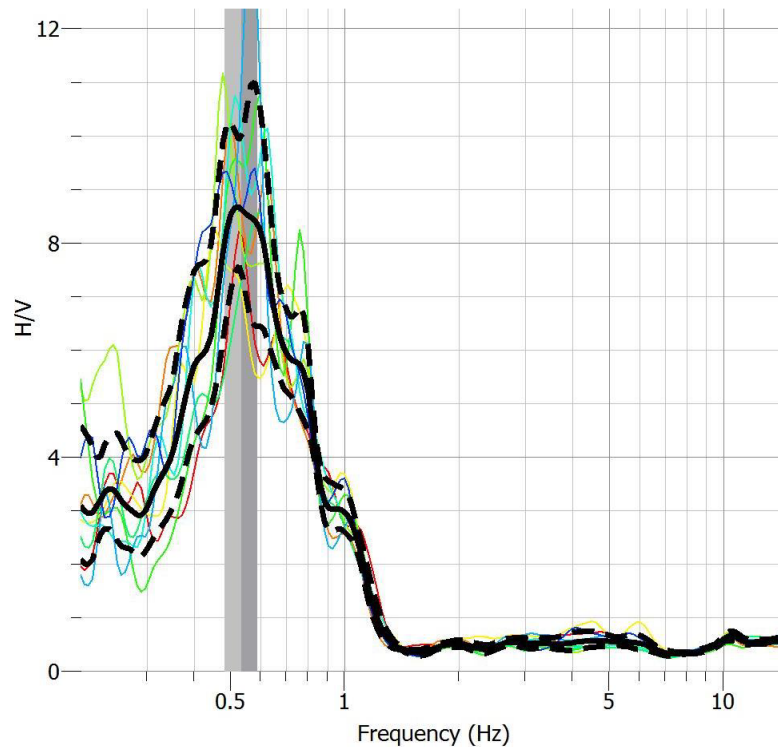


Imagen 14 Vibración ambiental de Sitio 3, Colonia Tabacalera

Para evaluar la respuesta dinámica del depósito en estudio se construyeron modelos geodinámicos a partir de las velocidades de propagación, el amortiguamiento material del suelo y los pesos volumétricos asociados a cada una de las unidades estratigráficas. En la formación de los modelos se definió la posición a la que se encuentra el basamento local del sitio.

Para establecer la función de transferencia representativa del terreno en estudio, se emplearon las propiedades dinámicas obtenidas del ensaye de Down Hole. Sin embargo, para considerar las posibles variaciones en las propiedades establecidas, se utilizó un modelo estadístico que permite determinar la respuesta sísmica de un medio estratificado. Se trata de un modelo teórico de propagación de ondas con que



se calcula la respuesta sísmica de un medio con estratificación horizontal de extensión lateral infinita, sujeto a la incidencia vertical de ondas de cortante en la base. Cada estrato se caracteriza por su espesor, velocidad de ondas de corte, densidad de masa y amortiguamiento.

Funciones de transferencia

Considerando el comportamiento dinámico del suelo y los modelos construidos, en la Figura se presentan las Funciones de Trasterencia determinista (línea azul continua), obtenidas de las propiedades definidas con el Down Hole, la Función de Trasterencia media (línea roja discontinua) y media más desviación estándar (línea negra punteada), obtenidas del análisis probabilista.

El periodo dominante de vibración del sitio se establece a partir de la forma que presentan las funciones de transferencia, mediante el inverso de la frecuencia de vibración asociada al máximo nivel de amplificación.

Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan, Ubicación Latitud 19.28827, Longitud: -99.15279

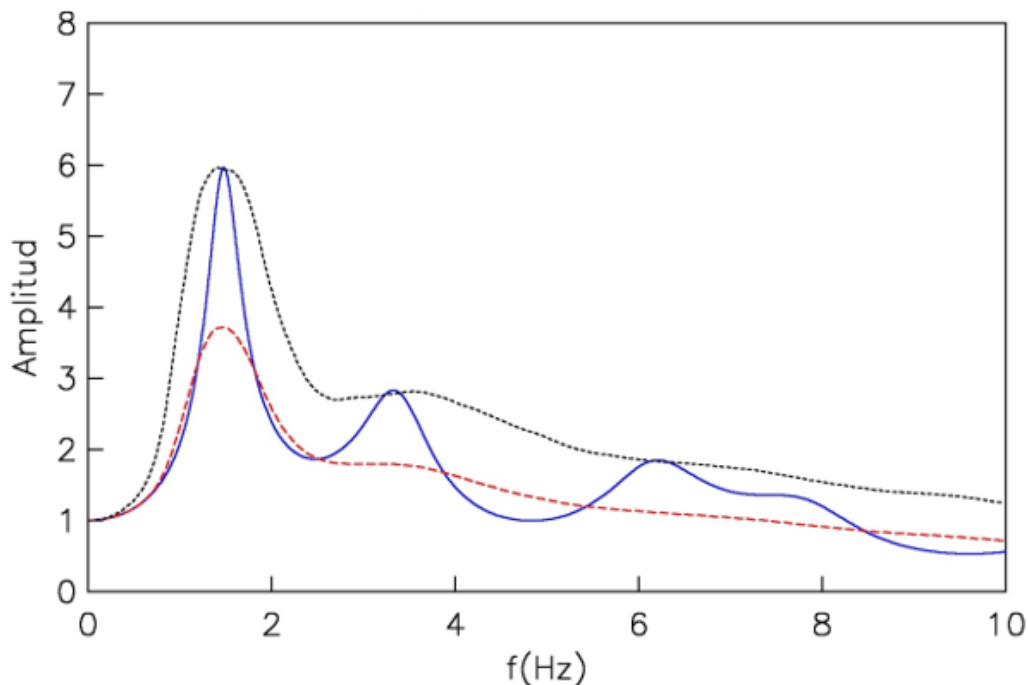


Imagen 15 Funciones de transferencia de Sitio 1



Con las funciones de transferencia obtenidas del análisis probabilista, se tiene que la frecuencia característica se ubica cercana a 1.45 Hz, que se asocia con un periodo dominante de vibración del suelo próximo a $T_s=0.70$ s, que resulta congruente con lo observado durante el monitoreo de la Vibración Ambiental.

Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc, Latitud: 19.45721, Longitud: -99.14061.

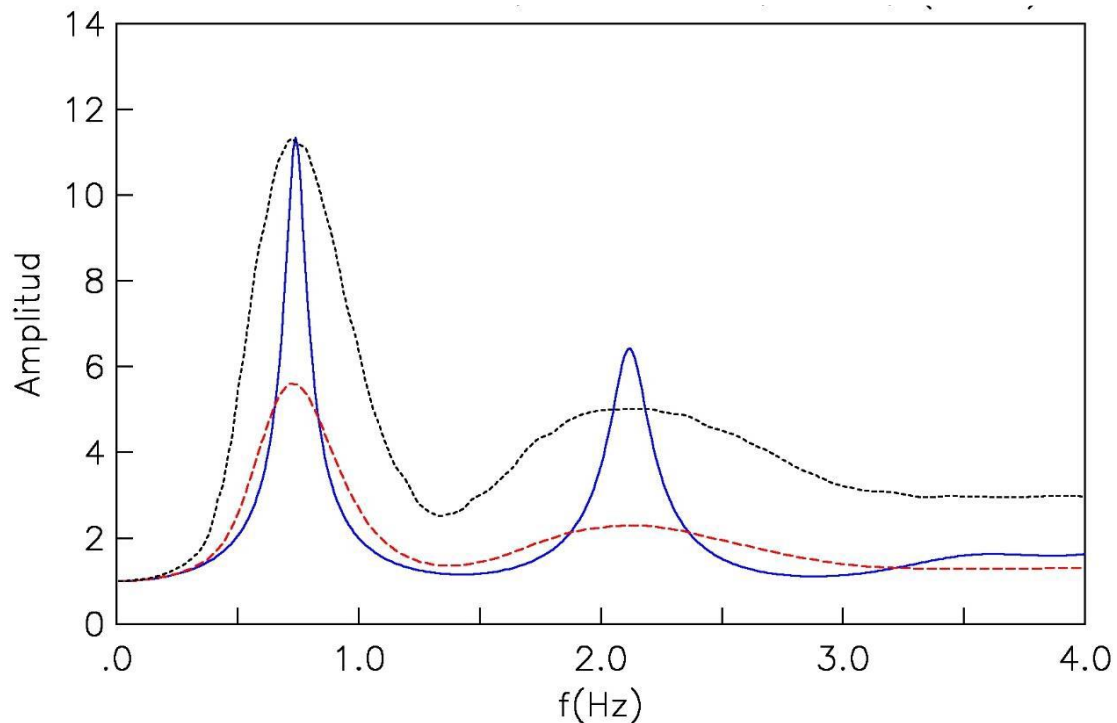


Imagen 16 Funciones de transferencia de Sitio 2

Con las funciones de transferencia obtenidas del análisis probabilista, se tiene que la frecuencia característica se ubica cercana a 0.7 Hz, que se asocia con un periodo de vibración del suelo próximo a $T_s=1.4$ s, que resulta congruente con lo observado durante el monitoreo de la Vibración Ambiental.



Sitio 3, Colonia tabacalera, Latitud: 19.43428, Longitud: -99.15478

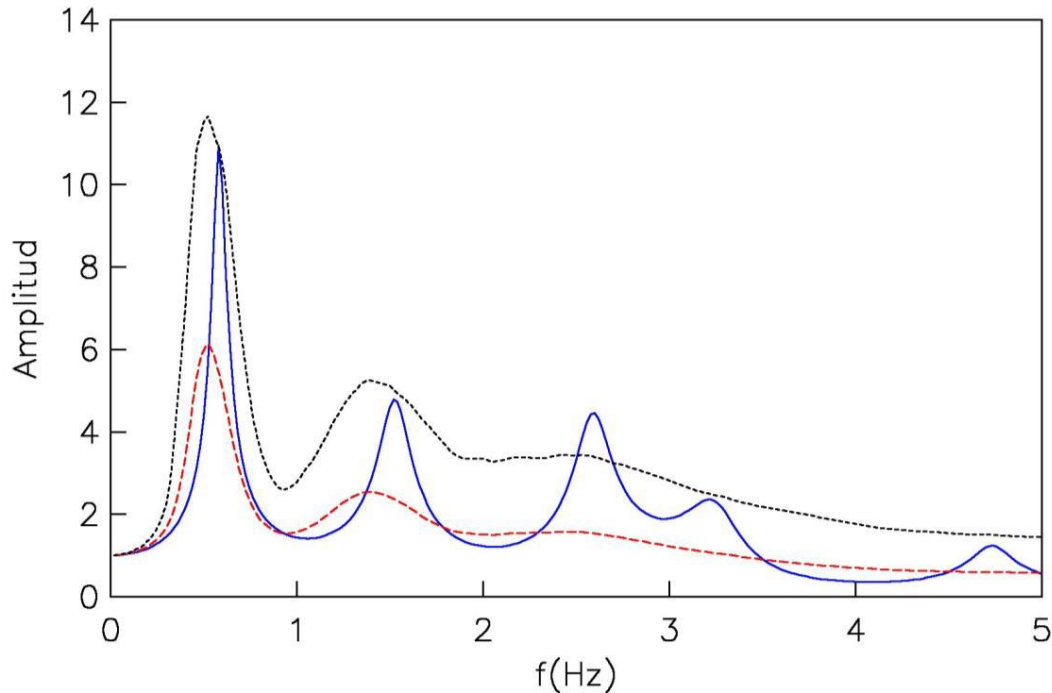


Imagen 17 Funciones de transferencia de Sitio 3

Con las funciones de transferencia obtenidas del análisis probabilista, se tiene que la frecuencia característica se ubica cercana a 0.5 Hz, que se asocia con un periodo de vibración del suelo próximo a $T_s=2.0$ s, que resulta congruente con lo observado durante el monitoreo de la Vibración Ambiental.

La construcción de los espectros de campo libre se obtiene a partir de la respuesta sísmica determinada en la superficie del terreno. Para ello, se hace uso de los acelerogramas sintéticos establecidos para la roca proveniente del análisis de peligro sísmico y la función de transferencia del depósito de suelo que contiene los efectos de amplificación dinámica del sitio.

Las amplificaciones dinámicas del terreno estudiado están caracterizadas por las funciones de transferencia de los modelos postulados que, para este estudio se han adoptado las que resultan del promedio más una desviación estándar

Para determinar la respuesta sísmica del sitio es necesario construir espectros de sitio a partir de la respuesta establecida para la superficie del terreno. De esta forma,



la excitación en campo libre corresponde a la del terreno firme modificada por las características de las unidades estratigráficas que forman el depósito.

Espectros de diseño

Buscando envolver a los espectros de respuestas promedio calculadas, se han construido los espectros de diseño envolventes aplicables.

Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan, Ubicación Latitud 19.28827, Longitud: -99.15279

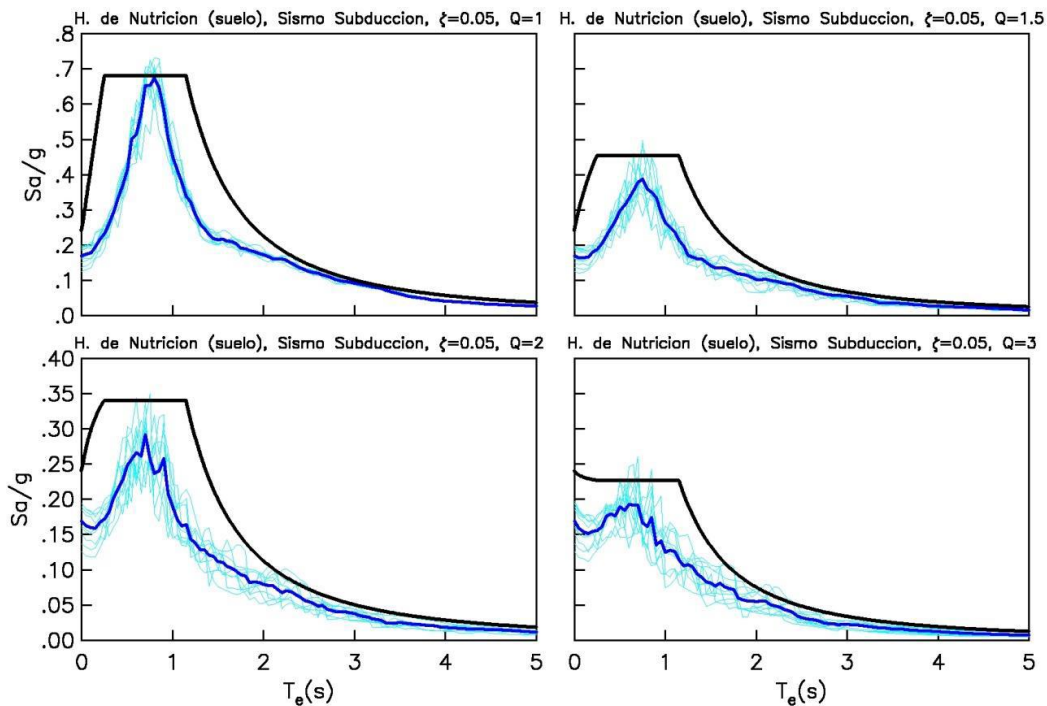


Imagen 18 Espectros de diseño por subducción, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan

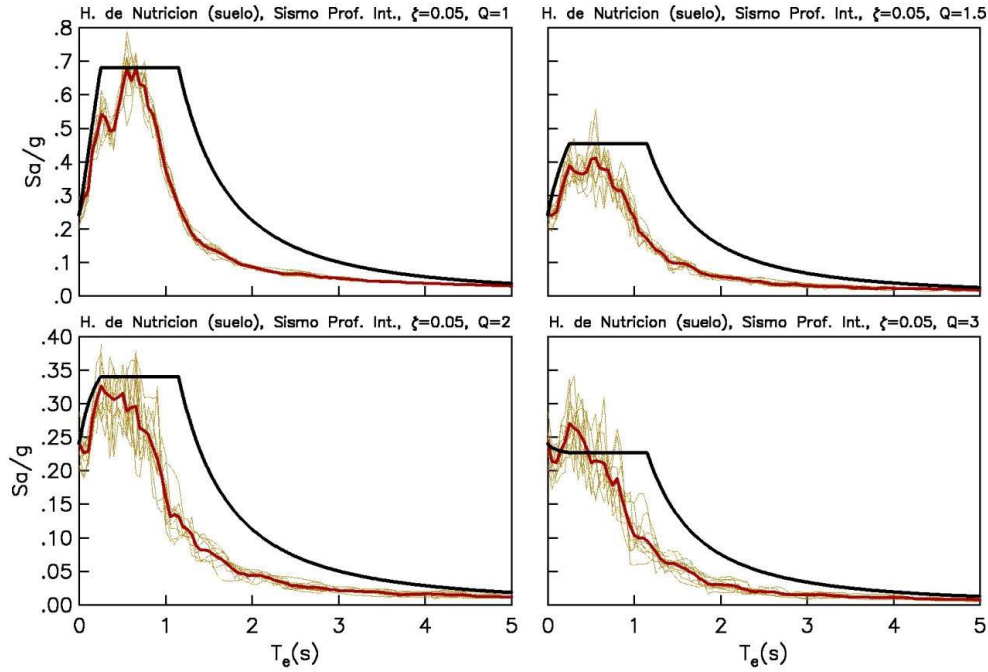


Imagen 19 Espectros de diseño por profundidad intermedia, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan

Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc, Latitud: 19.45721,
Longitud: -99.14061.

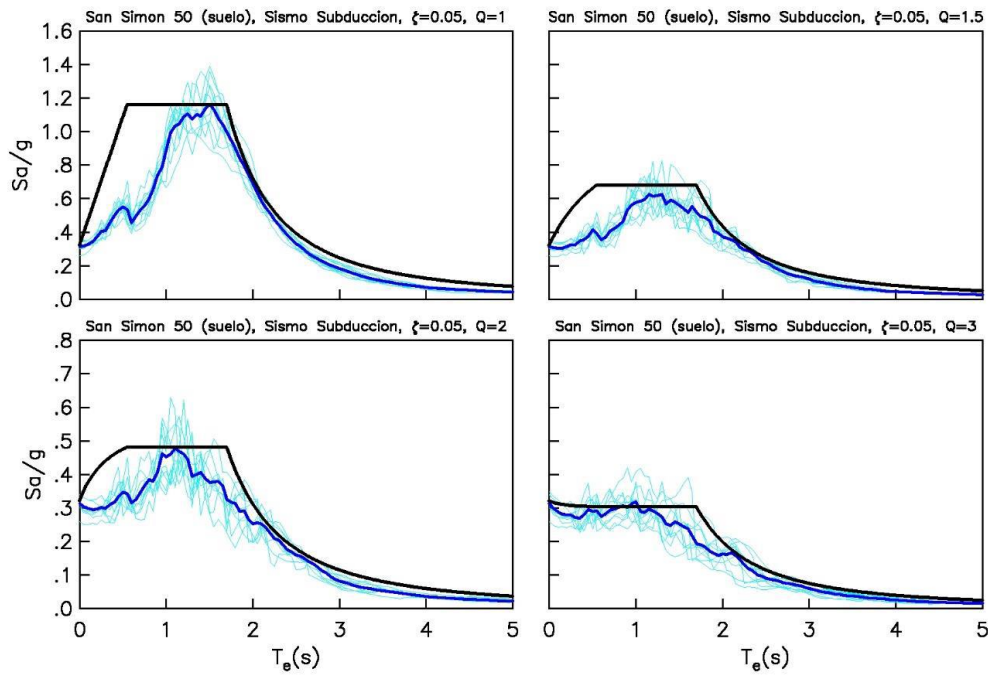


Imagen 20 Espectros de diseño por subducción, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc

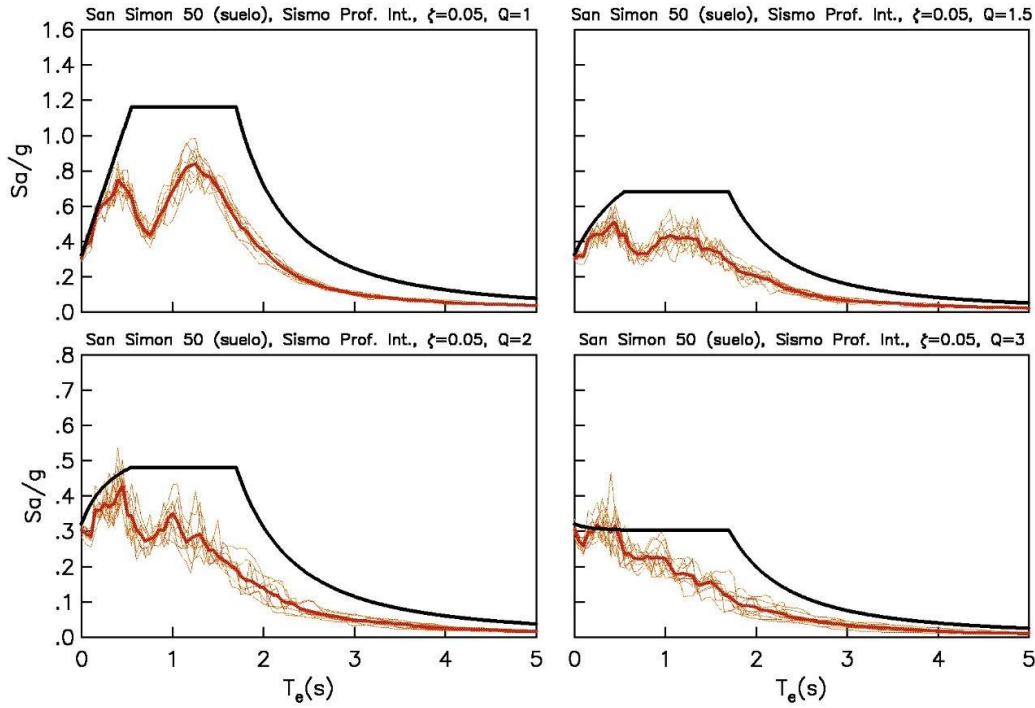


Imagen 21 Espectros de diseño por profundidad intermedia, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc

Sitio 3, Colonia Tabacalera, Latitud: 19.43428, Longitud: -99.15478

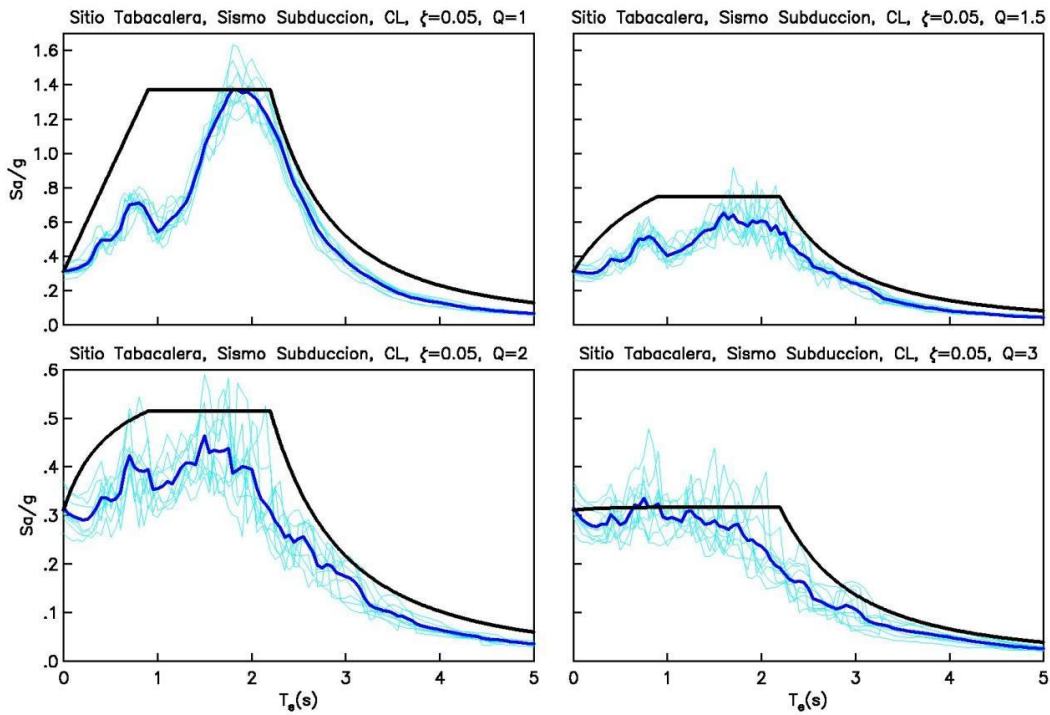


Imagen 22 Espectros de diseño por subducción, Sitio 3, Colonia Tabacalera

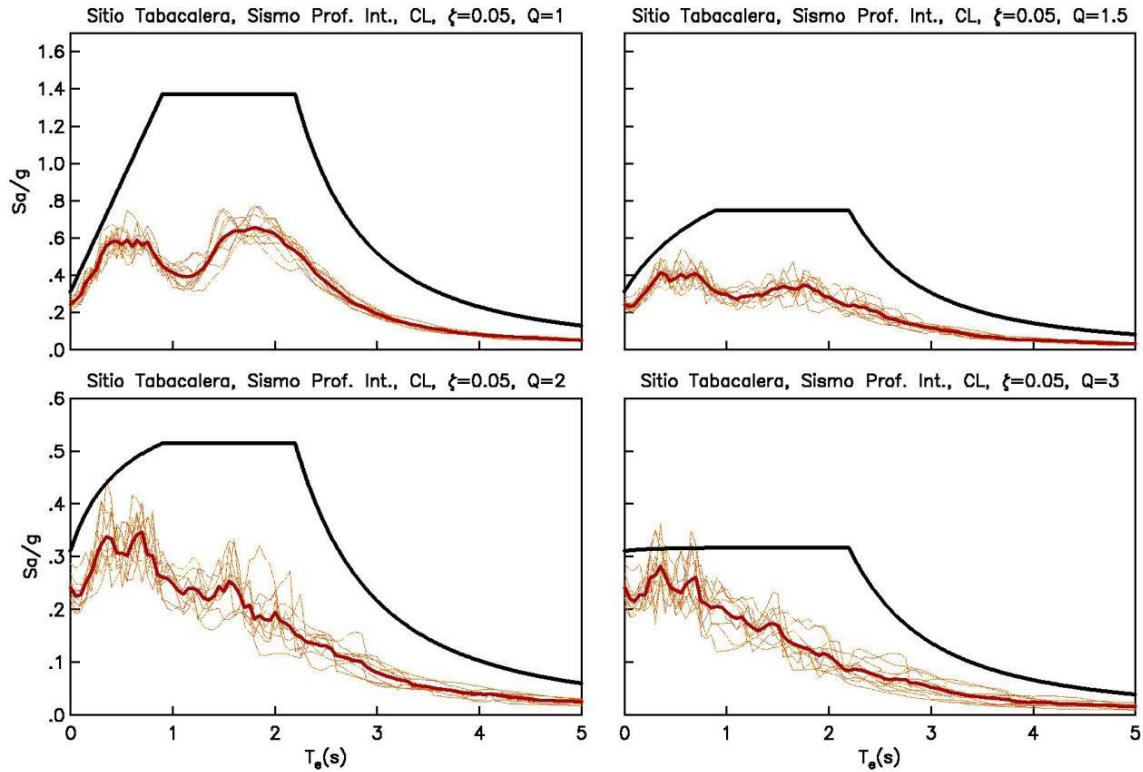


Imagen 23 Espectros de diseño por profundidad intermedia, Sitio 3, Colonia Tabacalera

Con base en los resultados obtenidos, los espectros de diseño sísmico representativo del sitio se consideran aquellos que cubren a los espectros de respuesta promedio.

Para $Q=1$ el espectro de diseño propuesto se reproduce a partir de la siguiente forma funcional (NTC-DS, 2020):

$$a = \frac{Sa(T_e)}{g} = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T_e}{T_a} & \text{si } T_e < T_a \\ \beta c & \text{si } T_a \leq T_e < T_b \\ \beta c p \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^2 & \text{si } T_e \geq T_b \end{cases}$$

Con

$$p = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^2$$



Donde,

a Aceleración espectral normalizada con la aceleración de la gravedad

a_0 Aceleración máxima del terreno

c Aceleración máxima espectral o coeficiente sísmico

T_e Periodo estructural

T_a Límite inferior de la meseta del espectro de diseño

T_b Límite superior de la meseta del espectro de diseño

k Parámetro que participa en la caída de la rama descendente

β Factor de amortiguamiento, considerado unitario para 5% de amortiguamiento

g aceleración de la gravedad.



Capítulo 6. Comparación de los espectros

Se presenta el espectro de diseño elástico obtenido con el criterio fijado por las NTC-DS-2017, que fueron actualizadas con comentarios en el 2020, por lo cual se refiere como NTC-DS,2020, a través del programa SASID (Sistema de Acciones Sísmica de Diseño), y el espectro obtenido a campo libre en el sitio, se muestran los parámetros que definen la forma del espectro de diseño transparente para $Q=1$ y $R=1$, con 5% de amortiguamiento para estructuras del grupo B.

Se añade, además, para tener un tercer espectro de diseño, el obtenido mediante las expresiones que se presentan en la antigua normativa de construcción, las Normas Técnicas Complementarias Diseño Sísmico del 2004.

Se muestra la zonificación propuesta en las NTC-DS-2004 con los puntos ubicados, con un punto de color rojo el Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan, Ubicación Latitud 19.28827, Longitud: -99.15279, de color amarillo el sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc, Latitud: 19.45721, Longitud: -99.14061, de color azul el sitio 3, Colonia tabacalera, Latitud: 19.43428, Longitud: -99.15478.

De las NTC-DS-2004 del Apéndice A del mismo:

“Se adoptara como ordenada del espectro de aceleraciones para diseño sísmico, a , expresada como fracción de la aceleración de la gravedad, la que se estipula a continuación:

$$a = a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T}{T_a}; \quad \text{si } T < T_a$$

$$a = \beta c; \quad \text{si } T_a \leq T \leq T_b$$



$$a = \beta c p \left(\frac{T_b}{T}\right)^2 ; \quad \text{si } T \geq T_b$$

Donde

$$p = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T}\right)^r \text{ y}$$

B es un factor de reducción por amortiguamiento suplementario, que es igual a uno si se ignora la interacción suelo-estructura.

El coeficiente de aceleración del terreno, a_0 , el coeficiente sísmico c , el coeficiente k y los periodos característicos T_a y T_b del espectro de aceleraciones se obtendrán función del periodo dominante del sitio, usando las siguientes expresiones:

$$a_0 = \begin{cases} 0.1 + 0.15(T_s - 0.5); & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 0.25; & \text{si } T_s > 1.5 \text{ s} \end{cases}$$

$$T_a = \begin{cases} 0.2 + 0.65(T_s - 0.5); & \text{si } 0.5 < T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.5; & \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.25 \text{ s} \\ 4.75 - T_s; & \text{si } 3.25 < T_s \leq 3.9 \text{ s} \\ 0.85; & \text{si } T_s > 3.9 \text{ s} \end{cases}$$

$$T_b = \begin{cases} 1.35; & \text{si } T_s \leq 1.125 \text{ s} \\ 1.2 T_s; & \text{si } 1.125 < T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 4.2; & \text{si } T_s > 3.5 \text{ s} \end{cases}$$

$$k = \begin{cases} 2 - T_s; & \text{si } 0.5 < T_s \leq 1.65 \text{ s} \\ 0.35; & \text{si } T_s > 1.65 \text{ s} \end{cases}$$

El valor de T_s se tomara de la figura A.1”

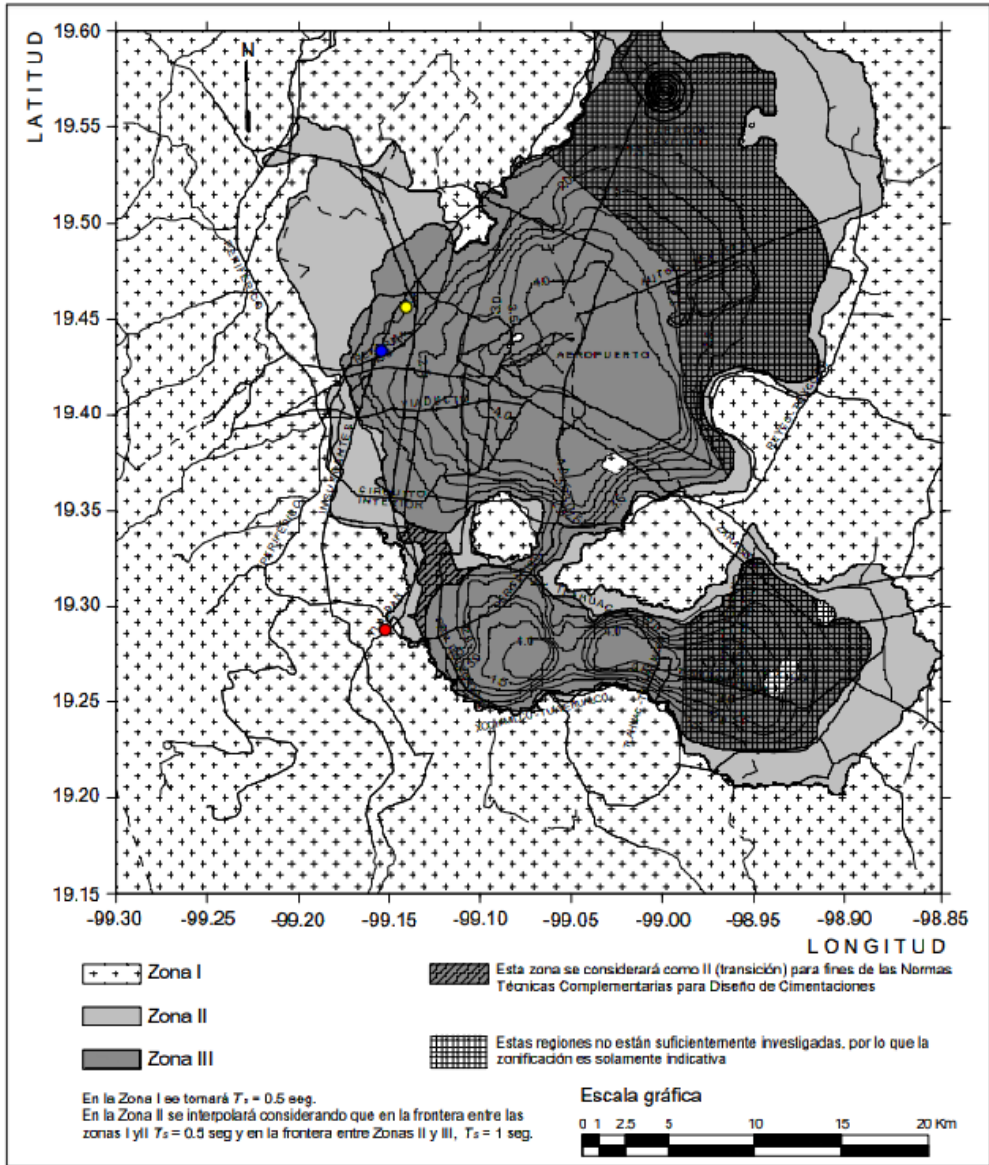


Imagen 24 Periodos predominantes del suelo, Figura A.1 de NTC-DS-2004, con sitios de interés localizados



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan, Ubicación Latitud 19.28827,
Longitud: -99.15279

Tabla 4 Valores para elaborar espectros de diseño, Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez alcaldía Tlalpan

| Espectros de sitio | T_s | a_0 | c | T_a | T_b | k | β |
|--------------------|-------|-------|------|-------|-------|-----|---------|
| Con $T_r=250$ años | 0.68 | 0.24 | 0.68 | 0.25 | 1.15 | 1 | 1 |
| SASID-NTCDS,2020 | 0.5 | 0.12 | 0.32 | 0.4 | 1.4 | 1.5 | 1 |
| NTC-DS-2004 | 0.5 | 0.1 | 0.28 | 0.2 | 1.35 | 1.5 | 1 |

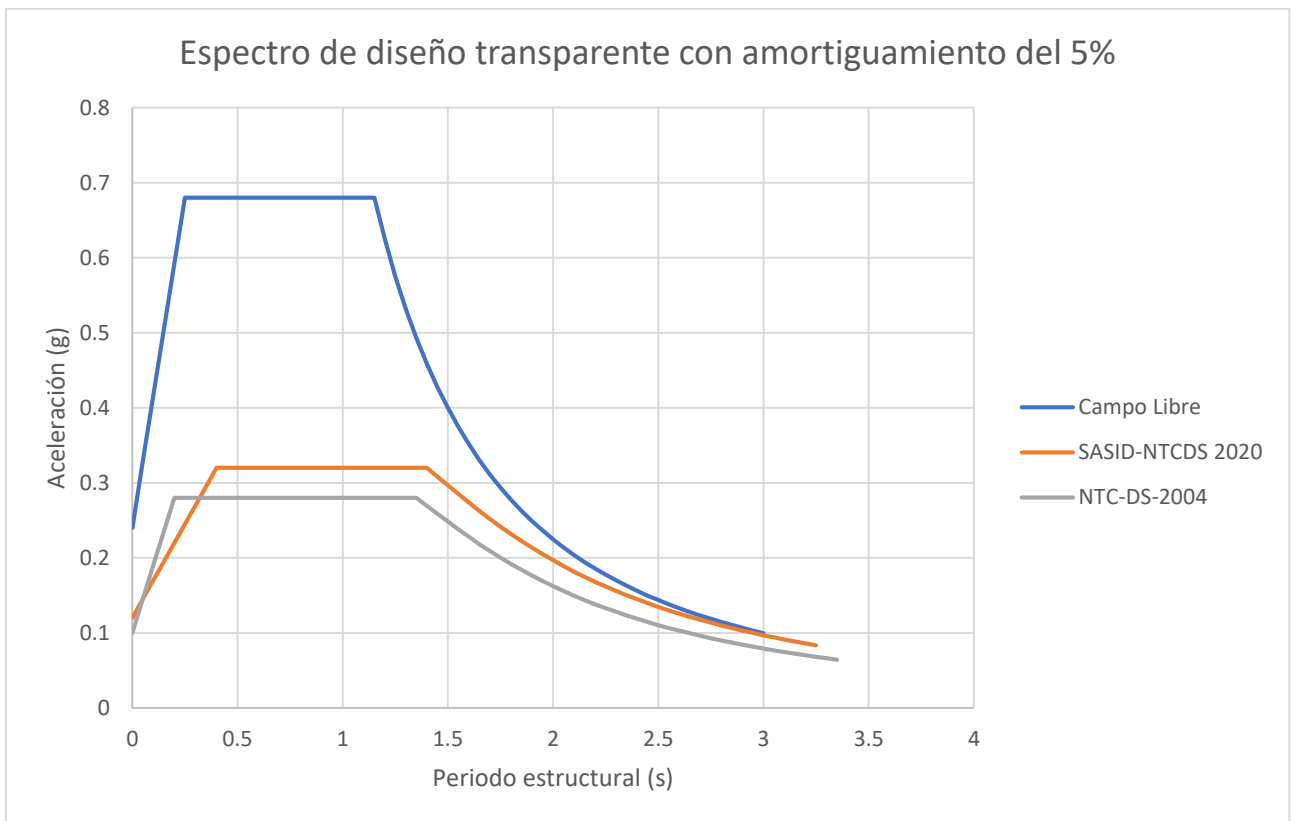


Imagen 25 Espectro de diseño transparente Sitio 1, Colonia Belisario Domínguez Alcaldía Tlalpan



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc, Latitud: 19.45721,
Longitud: -99.14061.

Tabla 5 Valores para elaborar espectros de diseño, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc

| Espectro de sitio | T_s | a_0 | c | T_a | T_b | k | β |
|--------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|---------|
| Con $T_r=250$ años | 1.39 | 0.32 | 1.16 | 0.55 | 1.7 | 0.5 | 1 |
| SASID-NTCDS, 2020 | 1.4 | 0.29 | 1 | 1.1 | 1.9 | 0.32 | 1 |
| NTC-DS-2004 | 1.5 | 0.25 | 1.2 | 0.85 | 1.8 | 0.5 | 1 |

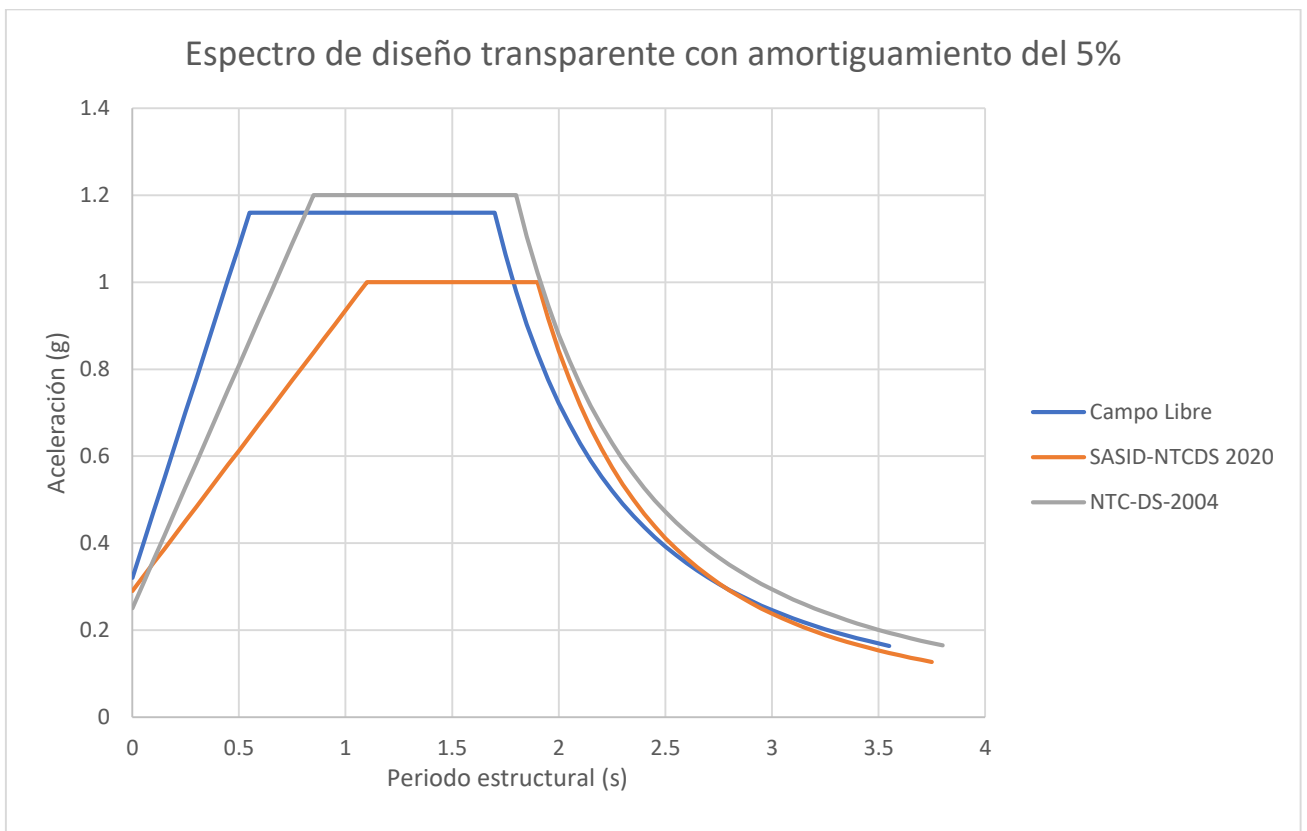


Imagen 26 Espectros de diseño transparente, Sitio 2, Colonia San Simón Tolnahuac, Alcaldía Cuauhtémoc



Sitio 3, Colonia Tabacalera, Latitud: 19.43428, Longitud: -99.15478

Tabla 6 Valores para elaborar espectros de diseño, Sitio 3, Colonia Tabacalera

| Espectro de sitio | T_s | a_0 | c | T_a | T_b | k | β |
|--------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|---------|
| Con $T_r=250$ años | 1.9 | 0.31 | 1.37 | 0.9 | 2.2 | 0.36 | 1 |
| SASID-NTCDS, 2020 | 1.69 | 0.36 | 1.02 | 1.56 | 2.29 | 0.56 | 1 |
| NTC-DS-2004 | 2 | 0.25 | 1.2 | 1.175 | 2.4 | 0.35 | 1 |

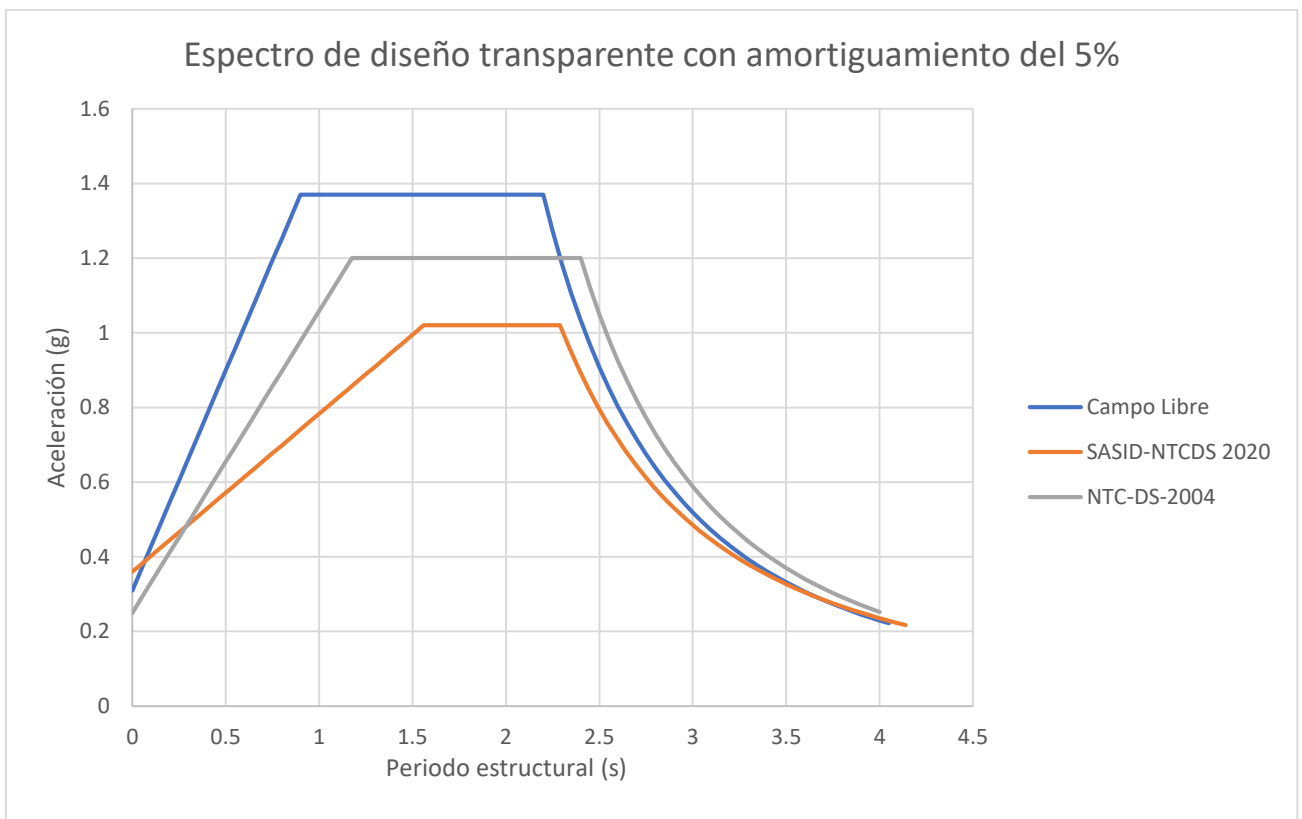


Imagen 27 Espectro de diseño transparente, Sitio 3, Colonia Tabacalera



Capítulo 7. Conclusiones

Se presentaron las diferencias existentes en los espectros de diseño obtenidos mediante pruebas de campo, conociendo las características dinámicas de los estratos que son susceptibles a amplificación de las fuerzas sísmicas.

A partir del peligro sísmico establecido para la zona y de acuerdo con las disposiciones reglamentarias, se determinaron espectros de amenaza para los sismo de tipo interplaca y subducción. Se construyeron familias de acelerogramas sintéticos que reproducen correctamente a los espectros de amenaza sísmica, siendo estos empleados como movimiento de entrada en la base del depósito. Para establecer efectos de amplificación local se ejecutaron ensayos de Down Hole y monitoreo de Vibración Ambiental en los tres sitios. Con los resultados del DH y el monitoreo de la VA, se construyeron los modelos geodinámicos representativos del sitio en estudio, permitiendo obtener la función de transferencia representativa de los efectos de amplificación dinámicas locales. Con base en los acelerogramas sintéticos en el basamento representativo del peligro sísmico, y la función de transferencia del depósito del suelo, se obtuvieron los acelerogramas en la superficie del terreno. Con ellos se calcularon los espectros de respuesta de campo libre asociados a los sismos de subducción y profundidad intermedia. A partir de estos resultados se postularon espectros de diseño, los que son envolventes suavizadas de valores medios de los espectros de respuesta de campo libre.

En la comparación de espectros se puede observar que existen diferencias importantes entre los espectros obtenidos con pruebas en sitio y los generados por el programa SASID, en los tres casos se pueden ver mayores aceleraciones del terreno con los espectros obtenidos de pruebas en sitio, por lo cual se recalca la importancia de la caracterización dinámica del suelo.



Es necesario el notar como en los tres casos, los espectros de diseño obtenidos con pruebas de campo tienen un rango mayor en la meseta que los espectros de diseño obtenidos con el SASID, lo cual, dependiendo del periodo de la estructura a construir puede provocar mayores problemas, al mover la aceleración con la cual se está diseñando dicha estructura, puede que para el espectro de SASID se encuentre en la rama ascendente pero, al utilizar el obtenido en campo se encuentre dentro de la aceleración máxima posible dentro del espectro de diseño. Lo cual estaría subestimando la aceleración de diseño.

Con los espectros obtenidos con el Apéndice A de las NTC-DS-2004 se puede observar que en cada caso se comporta diferente comparándolo con los resultados obtenidos con pruebas de campo y el programa SASID, se observa menor que ambos resultados en el primer sitio, mayor que ambos en el segundo sitio y en un punto intermedio en el tercer lugar, se puede considerar que en algunos casos se acerca a los resultados obtenidos en campo, pero al resultar tan variado con lo aquí considerado se menciona que los resultados del programa SASID siguen una misma línea más congruente.

Se considera que una posible causa de las diferencias existentes pueda deberse a la variación que existe en la composición de los estratos de suelo de la CDMX y a como estos se ven afectados por sus características que propician la amplificación de las ondas dinámicas. Además del existente problema con el hundimiento regional, lo cual provoca un cambio en el espesor de los estratos y esto induce a la variación de la velocidad con la que las ondas de corte se transmiten por dichos estratos, lo cual provoca un cambio en su respuesta dinámica.



Referencias Bibliográficas

- Aristóteles Jaramillo, M. c. (2012). *Comparación de la estimación del periodo de suelo en diez sitios de la ciudad de Mexico mediante el uso de vibracion ambiental y sismos de mediana magnitud*. Cancún.
- CDMX, I. p. (2004). *Normas Tecnicas Complementarias para Diseño Sismico*. Ciudad de Mexico.
- ISC. (2020). *Normas Tecnicas Complementarias para Diseño Sismico*. Gobierno de la Ciudad de Mexico.
- ISC. (2023). *NTCDS-CDMX*. Obtenido de <https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- L. Mendoza, J. A. (2015). *Mapa de periodos dominantes de la vibracion ambiental de los suelos blandos del valle de Mexico*. CDMX.
- Ricardo Dorby, M. V. (1987). *Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits*. Ciudad de Mexico: Memorias del simposio internacional de ingenieria geotecnica de suelos blandos.
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*. New York: CRC Press.