

Instituto Politécnico Nacional

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo

Integral Regional Unidad Oaxaca



Amplificación sísmica en los Valles Centrales del estado de Oaxaca

Tesis

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Presenta

Ricardo Vásquez Olmedo

Director de tesis

Dr. Francisco Castellanos León

Oaxaca de Juárez, Oax. 2022



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, 04 de noviembre 2022

El Colegio de Profesores de Posgrado de **CIIDIR UNIDAD OAXACA** en su Sesión
(Unidad Académica)

ordinaria No. 5 celebrada el día 02 del mes mayo de 2022 conoció la solicitud presentada por el alumno:

Apellido Paterno:	Vásquez	Apellido Materno:	Olmedo	Nombre (s):	Ricardo
-------------------	---------	-------------------	--------	-------------	---------

Número de registro: B 2 0 0 8 9 5

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

“Amplificación sísmica en los Valles Centrales del estado de Oaxaca”

Objetivo general del trabajo de tesis:

Estimar un mapa de amplificaciones sísmicas asociadas a los distintos tipos de suelos de los Valles Centrales del Estado de Oaxaca para distintos escenarios sísmicos.

2.- Se designa como Director de Tesis al profesor:

Director: Dr. Francisco Castellanos León 2° Director:

No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

En el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director de Tesis

2° Director de Tesis (en su caso)

Dr. Francisco Castellanos León

Presidente del Colegio

Aspirante

Vásquez Olmedo Ricardo

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado para examinar la tesis titulada:

del alumno:

Apellido Paterno:	Vásquez	Apellido Materno:	Olmedo	Nombre (s):	Ricardo
-------------------	---------	-------------------	--------	-------------	---------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene **11%** de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*

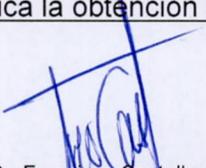
El reporte Turnitin de la tesis genera un 11% de similitud en total (se excluyen referencias, coincidencias menores a 8 palabras). De manera individual, la mayor coincidencia es del 1% con otros documentos, el cual está asociado a textos comunes de trabajos previos.

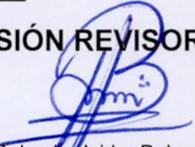
****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

La tesis cumple con los objetivos propuestos, además que se considera que el avance del estudio justifica la obtención de grado de maestría.

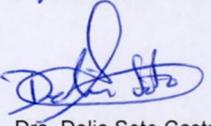
COMISIÓN REVISORA DE TESIS

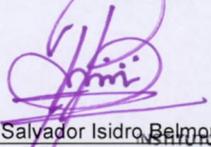

Dr. Francisco Castellanos León
Director de Tesis
Nombre completo y firma


Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez
Nombre completo y firma


M.C. Frank Manuel León Martínez
Nombre completo y firma


Dr. Prisciliano Felipe de Jesús
Cano Barrita
Nombre completo y firma


Dra. Delia Soto Castro
Nombre completo y firma


Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez
Nombre completo y firma

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 14 del mes de noviembre del año 2022, el que suscribe **Vásquez Olmedo Ricardo** alumno del programa de **Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales** con número de registro **B200895**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del **Dr. Francisco Castellanos León** y cede los derechos del trabajo intitulado **“Amplificación sísmica en los Valles Centrales del estado de Oaxaca”**, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo ricardovolmedo@outlook.com. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



Vásquez Olmedo Ricardo

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA

*A mis padres y hermano,
por su incanzable esfuerzo.*

Agradecimientos

Al programa de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales del CIIDIR, Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado para la realización de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Instituto Politécnico Nacional quien a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado me otorgó la beca BEIFI en los periodos Agosto- Diciembre 2021 y Febrero-Junio 2022.

Mi más sincero agradecimiento por su total apoyo al Dr. Francisco Castellanos León y al Dr. Luis Osorio Flores quienes dirigieron el presente trabajo.

Al comité tutorial de la tesis: Dra. Delia Soto Castro, Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, M.C. Frank Manuel León Martínez.

Al Dr. Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y la Dra. Rosa Isabel Hernández Sánchez por los datos proporcionandos.

A todos los colaboradores de este trabajo: M.C. Juventino, Dra. Rosy, Ing. Joel, Ing. Ana, Ing. Eddie, Ing. Josue, M.C. Claudia.

Por utilizar subrutinas de Matlab.

Por su apoyo L.M. Roberto Vásquez y M.C. Donají J.

Resumen

El estudio de los efectos sitios es de gran importancia para conocer el comportamiento de nuestros suelos ante distintos eventos sísmicos. En el presente trabajo se presenta una metodología para la obtención de periodos fundamentales del suelo, aceleraciones máximas del terreno, aceleraciones absolutas relacionadas a las máximas aceleraciones absolutas espectrales, para un escenario sísmico propuesto y a partir de una base de datos de perfiles de suelos de los Valles Centrales de la ciudad de Oaxaca descritos mediante un método geoestadístico, con la finalidad de mejorar la descripción de esta incompleta base de datos, necesaria para la estimación de distintas propiedades de suelos que se requieren para la estimación de los efectos de sitio presentes en el área de estudio.

Abstract

Study of site effects is of great importance for the estimation of the performance of soils subjected to different seismic scenarios. This study employs a methodology for the estimation of fundamental periods of soil, peak ground acceleration, structural fundamental periods, which yielded the highest spectral absolute acceleration for an specific seismic scenario, and employing a database of the soil properties for the Valles Centrales of the State of Oaxaca, Mexico. This database is geostatitically depicted, for a more realistic description of an uncomplete database, required for the estimation of the site effects present in the area of study.

Índice general

1. Planteamiento de la investigación	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	3
1.3. Antecedentes	4
1.4. Identificación del problema científico	9
1.5. Pregunta de investigación	10
1.6. Objetivos	11
1.6.1. General	11
1.6.2. Específicos	11
2. Marco teórico, conceptual y referencial	13
2.1. Peligro sísmico	13
2.2. Movimiento sísmico del terreno	13
2.3. El suelo responsable de los sismos	14
2.4. Efectos de sitio	14
2.5. Tipos de efectos de sitio	15
2.6. Ecuación diferencial de un oscilador de un solo grado de libertad en vibración forzada	16
2.7. Factor de amplificación dinámica	18
2.8. Propiedades del factor de amplificación dinámica en los suelos	22
2.9. Series de Fourier	22
2.9.1. Serie de Fourier trigonométrica	23
2.9.2. Serie de Fourier exponencial	23
2.10. Transformada de Fourier	23
2.10.1. Transformada de Fourier continua	24

2.10.2. Transformada de Fourier discreta en el tiempo . . .	24
2.10.3. Características de la función $f(m\Delta t)$ analizada por la transformada de Fourier discreta en el tiempo . .	24
2.10.4. Frecuencia máxima o frecuencias de Nyquist.	25
2.11. Respuesta asociada a un acelerograma	25
2.12. Análisis de respuesta de sitio utilizando el software DEEPSOIL	26
2.13. MATLAB	27
2.13.1. Mapping Toolbox	27
2.14. PRODISIS	27
2.15. Geoestadística	28
3. Metodología	29
3.1. Base de datos de estratigrafía de suelos dentro de los Valles Centrales	29
3.1.1. Distribución espacial del área de estudio	29
3.2. Frecuencias por profundidad asociada	31
3.3. Frecuencias por tipo de material	35
3.4. Geoestadística descriptiva de los materiales	36
3.5. Matriz de distancias y azimuts	38
3.6. Distribución de frecuencias acumuladas de materiales con respecto a distancias y azimuts	38
3.7. Relación SUCS y peso específico	40
3.8. Relación del índice de plasticidad, porcentaje de amortiguamiento y módulo de cortante	41
3.9. Número de golpes, tipos de suelo y velocidad al cortante . .	43
3.10. Movimiento sísmico	45
3.11. Análisis de datos en DEEPSOIL	47
4. Resultados y discusiones	49
4.1. Frecuencias por profundidades asociadas	49
4.2. Frecuencias por tipo de material	51

4.3. Geoestadística descriptiva	53
4.4. Distancias y azimuts	57
4.5. Distribución de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts	58
4.6. Velocidad de onda de cortante del perfil SEVR-G07	60
4.7. Análisis del perfil SEVR-G07 mediante DEEPSOIL	61
5. Conclusiones	69
A. Cuadros anexos	81
A.1. Matriz	81
A.2. Distribución de la media y su desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts de los 11 materiales considerados en el cuadro 3.3	104
A.3. Periodos fundamentales (s) y máximas aceleraciones del terreno (g), así como el periodo estructural con la mayor aceleración absoluta espectral (g) de los sondeos estudiados	114

Índice de cuadros

1.1. Zonificaciones Sísmicas Anteriores del Estado de Oaxaca . .	6
1.2. Zonificaciones Sísmicas Anteriores del Estado de Oaxaca . .	7
1.3. Zonificaciones Sísmicas Anteriores del Estado de Oaxaca . .	8
3.1. Clasificación de materiales	33
3.2. Clasificación de materiales mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	34
3.3. Relación SUCS y sus pesos específicos	41
3.4. Relación SUCS y sus IP , λ y G/G_{max}	43
3.5. Valores N	45
4.1. Otras variables	62
4.2. Perfil SEVR-G07	63

Índice de figuras

3.1. Área de estudio	30
3.2. Acelerograma sintético representativo propuesto como escenario sísmico para el valle de Oaxaca	47
4.1. Frecuencia relativa respecto a la profundidad de los 11 materiales considerados en el cuadro 3.3, a profundidades de 0.5 metros hasta 186 metros	50
4.2. Frecuencia relativa de los 11 tipos de materiales considerados en el cuadro 3.3 respecto a la profundidad desde 0.5 hasta 186 metros	52
4.3. Frecuencia acumulada de los 11 tipos de materiales considerados en el cuadro 3.3 a la profundidad de 0.5 hasta 186 metros	53
4.4. Profundidad media y desviación estándar de los 11 materiales	54
4.5. Profundidad media, mediana, mínima y máxima	55
4.6. Coeficiente de variación e índice de asimetría (skewness) . .	55
4.7. Promedio de los materiales por profundidad	56
4.8. Distancias entre sondeos con el mismo material y la misma profundidad, ordenadas de manera ascendente	57
4.9. Azimuts entre sondeos con el mismo material y la misma profundidad, ordenados de manera ascendente	58
4.10. Distribución de la distancia media con respecto a profundidades y azimuts del material 2 (Cuadro 3.3)	59

4.11. Distribución de la desviación estándar de la distancia con respecto a profundidades y azimuts del material 2 (Cuadro 3.3)	60
4.12. Velocidad de onda de cortante del perfil SEVR-G07	61
4.13. Periodo fundamental del suelo (s)	65
4.14. Aceleración absoluta del periodo estructural anterior	66
4.15. Periodo estructural con mayor aceleración absoluta (s)	67
4.16. Máxima aceleración del terreno	68
A.1. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 1 considerado en el cuadro 3.3	104
A.2. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 1 considerado en el cuadro 3.3	105
A.3. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 3 considerado en el cuadro 3.3	105
A.4. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 3 considerado en el cuadro 3.3	106
A.5. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 4 considerado en el cuadro 3.3	106
A.6. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 4 considerado en el cuadro 3.3	107
A.7. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 5 considerado en el cuadro 3.3	107

A.8. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 5 considerado en el cuadro 3.3	108
A.9. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 6 considerado en el cuadro 3.3	108
A.10. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 6 considerado en el cuadro 3.3	109
A.11. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 7 considerado en el cuadro 3.3	109
A.12. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 7 considerado en el cuadro 3.3	110
A.13. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 8 considerado en el cuadro 3.3	110
A.14. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 8 considerado en el cuadro 3.3	111
A.15. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 9 considerado en el cuadro 3.3	111
A.16. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 9 considerado en el cuadro 3.3	112
A.17. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 10 considerado en el cuadro 3.3	112

A.18.Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 10 considerado en el cuadro 3.3	113
A.19.Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 11 considerado en el cuadro 3.3	113
A.20.Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 11 considerado en el cuadro 3.3	114

Capítulo 1

Planteamiento de la investigación

1.1. Introducción

Oaxaca es uno de los Estados de la República Mexicana con mayor actividad sísmica, ya que se encuentra ubicada en una zona de subducción a lo largo de las costas del Pacífico de donde se han originado los sismos de mayor impacto en México (Samaniego & Chávez García, 1995). Anteriormente se han realizado trabajos de investigación de microzonificaciones sísmicas en varios Estados de la República Mexicana así como investigaciones respecto a los efectos de sitio en el Estado de Oaxaca y la recopilación de datos con información de distintos estratos de suelo y programas de análisis de respuesta de sitio han sido reportados (Samaniego & Chávez García, 1995).

Para identificar las amenazas que pueden afectar a esta región uno de los primeros pasos es analizar las amplificaciones sísmicas con respecto al movimiento en roca que sufren los distintos estratos del suelo ante un sismo. Este análisis debe basarse en datos de campo de los distintos estratos del suelo en diversos puntos alrededor de la zona de interés. El conjunto de estos datos están conformados por ubicación, profundidad, tipo de suelo y propiedades de los suelos como el peso volumétrico y propiedades mecánicas como la velocidad de onda de corte. Para realizar este análisis se procesaron los datos en DEEPSOIL v7.0.29 (Hashash et al., 2020) el cual permitió a obtener la respuesta de sitio para cada uno de los estratos del suelo ante un escenario sísmico. Para poder interpretar las gráficas espectrales obtenidas en DEEPSOIL es necesario

descomponer la señal por medio del análisis de Fourier y conocer el comportamiento en sus valores altos o intermedios de las gráficas espectrales y construir senoides a partir de su magnitud, frecuencia y ángulo de fase e interpretarlas llevándolas a una gráfica de amplificación dinámica y así conocer las aceleraciones que sufre el terreno, por último llevarlas a un mapa de amplificaciones sísmicas asociadas a distintos tipos de estructuras caracterizadas por su periodo de vibración. Previo al análisis de respuesta de sitio se requiere que la información sea complementada con técnicas geoestadísticas como primer paso para determinar la dependencia espacial entre datos medidos de cada una de las variables estudiadas (Osorio Flores, [2013](#)).

1.2. Justificación

México es uno de los países del mundo con mayor actividad sísmica, según estadísticas se registran más de 90 sismos con magnitud mayor a 4 en la escala de magnitud de momento (escala de energía en función de la energía liberada), Lo que equivale al 6% de todos los movimientos sísmicos en el mundo. Dentro de estas estadísticas se menciona que aquí se libera aproximadamente el 3% de la energía sísmica mundial, lo cual se puede traducir en la presencia de por lo menos un sismo mayor a 7 en la escala magnitud de momento cada año (ERN Ingenieros Consultores, 2010).

La principal actividad sísmica de México se encuentra en la zona de subducción ubicada en las zonas de las costas del Pacífico, en ella se encuentra ubicada la ciudad de Oaxaca, por lo que es necesario prestar atención a los eventos sísmicos y los efectos que estos producen, así como las pérdidas que se puedan presentar (ERN Ingenieros Consultores, 2010).

Oaxaca no cuenta con coeficientes sísmicos propios de sus suelos dentro de su reglamento de seguridad estructural, es por eso que analizar las aceleraciones que sufren los suelos del Valle de Oaxaca ante diversos escenarios sísmicos sería de gran importancia para determinar movimientos de diseño por sismo en zonas donde se planea construir obras de infraestructura de gran importancia.

La importancia de este proyecto se basa en la creación de un mapa de amplificaciones sísmicas en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca ya que un reglamento sísmico surge de la necesidad de proponer parámetros que definan el diseño de estructuras por construir en diferentes regiones con un cierto nivel de riesgo sísmico (Castellanos León, 2001).

1.3. Antecedentes

Desde hace varias décadas se han realizado importantes investigaciones en el Estado de Oaxaca tratando de caracterizar: 1) Los efectos de sitio (Samaniego & Chávez García, 1992), (Lermo Samaniego & Chávez García, 1993), (Samaniego & Chávez García, 1994), (Samaniego & Chávez García, 1995), (Luna Barraza, 2012) y (Pérez López, 2018) 2) Microzonificaciones sísmicas (Chávez-García et al., 1996), (M. Pérez et al., 1999), (Pérez, 2002), (Castellanos et al., 2003), (Comisión Federal de Electricidad, 2008) 3) Subsuelo (Léon, 1976), (Mendoza et al., s.f.), (Morales, 2003), (Hernández Sánchez, 2016), (Santiago Bustamante & Zamora García, 2018).

Dentro de las investigaciones de sismicidad realizadas por Lermo & Chávez García (1992, 1993, 1994, 1995) se propusieron microzonificaciones mediante el uso de microtemores, ubicando estaciones temporales instaladas en distintos puntos del municipio de Oaxaca de Juárez durante un periodo de tiempo, normalizando los registros con la estación OXIG ubicada en el cerro del Fortín.

Morales (2003) recopila información de sondeos de penetración estándar realizados en la Ciudad de Oaxaca y la mayoría de ellos con profundidades menores a 15 metros.

Castellanos y col. (2003) proponen una zonación sísmica basada en trabajos previos de los distintos tipos de los suelos que subyacen en la ciudad de Oaxaca y sus municipios conurbados.

Comisión Federal de Electricidad (2008) desarrolló dentro de su manual de Obras Civiles, un programa de diseño sísmico PRODISIS, el cual

suministra aceleraciones de diseño para un sitio ubicado por coordenadas geográficas definidas mediante un enfoque probabilista de riesgo sísmico. La resolución y precisión de estas aceleraciones de diseño disminuyen en regiones donde no se cuentan con estudios locales de amplificación sísmica, como es el caso de la mayoría del Estado de Oaxaca.

Luna Barraza (2012), Pérez López (2018) y Santiago Bustamante & Zamora García (2018) procesaron perfiles de suelos para obtener una mayor superficie dentro del área de estudio, de igual manera se proponen distintos efectos de sitio mediante el procesamiento de imágenes satelitales y el uso de un software de análisis de respuesta de sitio.

Hernández Sánchez (2016) registró información de estudios de sondeos de resistividad eléctrica para prospección de aguas subterráneas, de los cuáles se obtienen los perfiles a partir de gravimetría y magnetometría junto con sus coordenadas geoespaciales.

En los cuadros 1.1, 1.2 y 1.3 encontramos un resumen de todos los antecedentes a este trabajo.

Cuadro 1.1. Zonificaciones Sísmicas Anteriores del Estado de Oaxaca

Autor	Título	Descripción
(Léon, 1976)	Información general acerca del subsuelo de 16 ciudades de México-Oaxaca, Oax.	Subsuelo
(Samaniego & Chávez García, 1992)	Site effect evaluation using microtremor measurements: A review in three cities	Efectos de sitio
(Lermo Samaniego & Chávez García, 1993)	Site effect evaluation using spectral ratios with only one station	Efectos de sitio
(Samaniego & Chávez García, 1995)	Efectos de sitio de la ciudad de Oaxaca.	Microzonificación sísmica
(Chávez-García et al., 1996)	Seismic microzonation in Mexico, the examples of Mexico City, Oaxaca and Puebla	Microzonificación sísmica

Cuadro 1.2. Zonificaciones Sísmicas Anteriores del Estado de Oaxaca

Autor	Título	Descripción
(M. Pérez et al., 1999)	Curvas de isoperiodos para la ciudad de Oaxaca	Zonifiación sísmica
(Pérez, 2002)	Zonificación sísmica de la ciudad de Oaxaca	Zonificación sísmica
(Morales, 2003)	Estudio de las características físicas del subsuelo de la Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oax y su áreas conurbadas	Sondeos de penetración estándar
(Castellanos et al., 2003)	Zonación y determinación de coeficientes preliminares de diseño sísmico para la ciudad de Oaxaca y municipios conurbados	Zonación sísmica

Cuadro 1.3. Zonificaciones Sísmicas Anteriores del Estado de Oaxaca

Autor	Titulo	Descripción
(Comisión Federal de Electricidad, 2008)	Manual de diseño de obras civiles.	Zonificación sísmica
(Luna Barraza, 2012)	Estimación de los efectos de sitio en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca.	Efectos de sitio
(Hernández Sánchez, 2016)	Prospección de aguas subterráneas en los Valles Centrales de Oaxaca a partir de los métodos geofísicos de gravimetría, magnetometría y resistividad eléctrica.	Perfiles gravimétricos.
(Pérez López, 2018)	Efectos de Sitio en el Estado de Oaxaca.	Efectos de sitio.
(Santiago Bustamante & Zamora García, 2018)	Reporte sobre la realización de perfiles gravimétricos	Modelado en Deepsoil.

1.4. Identificación del problema científico

Oaxaca es uno de los Estados de la República Mexicana con mayor actividad sísmica, por lo cual es necesario conocer el comportamiento dinámico de sus suelos. Se sabe que el Estado de Oaxaca no cuenta con coeficientes sísmicos propios de sus suelos, es por eso que se propone un método de zonificación sísmica basado en la recopilación de datos de perfiles gravimétricos que principalmente contienen propiedades de los suelos y coordenadas geoespaciales. Los datos serán analizados por un método probabilístico que complementará la información para procesar los datos en un programa de respuesta de sitio ante diversos escenarios sísmicos, lo que nos llevará a conocer parámetros de movimiento del terreno representado en un mapa con información de riesgo sísmico.

1.5. Pregunta de investigación

¿Cuál es la distribución espacial de los factores de amplificación dinámica del suelo que se encuentran dentro de los Valles Centrales del Estado de Oaxaca?

1.6. Objetivos

1.6.1. General

Estimar un mapa de amplificaciones sísmicas asociadas a los distintos tipos de suelos en el Valle de Oaxaca para distintos escenarios sísmicos.

1.6.2. Específicos

- Generar una base de datos geoestadísticos de estratos de los suelos de los Valles Centrales del Estado de Oaxaca a partir de registros de mecánica de suelos.
- Determinar y analizar la respuesta dinámica de sitio obtenida usando el software DEEPSOIL v7.0 ante distintos escenarios sísmicos eligiendo el más desfavorable.
- Estimar los factores de amplificación dinámica del suelo con respecto a roca mediante el análisis de Fourier para generar un mapa de amplificaciones sísmicas.

Capítulo 2

Marco teórico, conceptual y referencial

2.1. Peligro sísmico

La identificación de las amenazas que pueden afectar a una región constituye uno de los primeros pasos en el análisis de riesgo, dentro de este análisis se encuentra el conocimiento de las condiciones regionales y el estudio de ocurrencia. Este análisis está basado en la frecuencia histórica de eventos y en la afectación de estos, actualmente ya se presentan avances de información geográfica y georeferenciada para la visualización y entendimiento de estas amenazas.

La mayor parte de los efectos que ocasionan los sismos están relacionados con la geología o la forma de la tierra, en los lugares donde el daño es más intenso, los daños se complican, ya que ocurren muy cerca de alguna falla donde se pueden apreciar desplazamientos a lo largo de la excitación de suelo. Los efectos son más apreciables en cuerpos de agua como ríos, mares lagos.

2.2. Movimiento sísmico del terreno

La energía liberada por un sismo se propaga desde la zona de ruptura mediante diversos tipos de ondas que hacen vibrar la corteza terrestre. Se les llaman ondas de cuerpo cuando estas llegan a la superficie o a la interfaz entre estratos, las ondas de cuerpo se dividen en ondas (P) principales y (S) secundarias. Las ondas P en la superficie experimentan

un movimiento paralelo en dirección a la propagación y las ondas S se mueven transversalmente en dirección a la propagación (Bazán & Meli, 2002).

2.3. El suelo responsable de los sismos

Con los años se ha observado que los sismos ocasionan diferentes tipos de daño dependiendo de la región y la geología en donde se provocan, algunos de estos daños quedan registrados, sismos como Niigata 1964, Bucharest 1977, Ciudad de México 1985, Armenia 1988. Durante las últimas décadas, los efectos de sitio pueden ser responsabilidad de la variación de ondas micro-sísmicas, estos han sido un tema de debate durante muchos años, y cuando estos lugares o propiedades del suelo no se toman en cuenta pueden ocurrir catástrofes. Cuando estas características de sitios se complican pueden ocurrir fenómenos como licuación (Bazán & Meli, 2002).

2.4. Efectos de sitio

Las características de las ondas en los sismos pueden cambiar dependiendo del viaje que estas realicen desde el punto de origen hasta el suelo de trabajo de los ingenieros civiles, así como las ondas de dispersión en la interfaz geológica, lo anterior se refiere a los efectos que estos tienen en su curso con la superficie, además todo esto puede tener un efecto significativo en la amplitud del sismo o movimientos del suelo y estos se conocen como efectos del sitio. Las ondas sísmicas pueden variar su grado de excitación en diferentes puntos en cualquier dirección y durante el viaje que estas tengan de un mismo sismo (Elnashai & Di Sarno, 2008).

Los efectos de sitio se producen a raíz de un sismo, proveniente la mayoría de las veces de las rupturas o fallas en las placas tectónicas, en ocasiones

también se pueden provocar por fenómenos volcánicos u otros procesos naturales como las explosiones y colapsos de minas subterráneas. Las ondas sísmicas tienen características diferentes y afectan de distinta forma, una de ellas puede ser la amplitud de la onda y estos dependen de la rigidez del suelo (Elnashai & Di Sarno, 2008).

2.5. Tipos de efectos de sitio

Existen diversos tipos de efectos de sitio que modifican las características de los movimientos, no solo en lugares planos.

- a) Efectos topográficos: estos dependen de la topografía del terreno, del tipo de onda y del ángulo de incidencia.
- b) Presencia de depósitos de arcillas: en valles aluviales o lacustres se presentan fenómenos de amplificación dinámica debido al incremento de velocidad del suelo con respecto a la profundidad del suelo, entre mayor sea la profundidad, mayor será la velocidad
- c) Presencia de estratos y depósitos de arena: en estos depósitos se puede presentar el fenómeno de licuación, esto sucede cuando el suelo pierde su capacidad de carga debido al aumento de la presión del poro, entre los casos más conocidos están los efectos generados por el sismo de Alaska en 1964
- d) Deslizamientos y deslaves: provocados por fuerzas sísmicas que encuentran perfiles inestables.
- e) Cambios en estructura superficial: debido a la heterogeneidad que forman los materiales entre si.

2.6. Ecuación diferencial de un oscilador de un solo grado de libertad en vibración forzada

Ecuación diferencial de un oscilador amortiguado en vibración forzada:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad (2.1)$$

$$\text{siendo } \frac{f(t)}{m} = De^{i\beta t}, \text{ } D \text{ y } \beta \text{ son constantes} \quad (2.2)$$

La solución de una ecuación diferencial no homogénea está compuesta de una solución homogénea + solución particular (Chopra, 2014)

Solución homogénea

$$u(t) = u(0) = u_0 \quad (2.3)$$

$$\dot{u}(t) = \dot{u}(0) = \dot{u}_0 \quad (2.4)$$

$$u_H = e^{-\omega\xi t} \sqrt{u_0^2 + \frac{(u_0\omega\xi + \dot{u}_0^2)}{\omega_D^2}} \cos(\omega_D t + \phi) \quad (2.5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-(u_0\omega\xi + \dot{u}_0^2)}{u_0\omega_D} \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

Solución particular:

$$m\ddot{u}_p + c\dot{u}_p + ku_p = f(t) \frac{1}{m} \quad (2.8)$$

$$\ddot{u}_p + \frac{c}{m}\dot{u}_p + \omega^2 u_p = \frac{f(t)}{m} \quad (2.9)$$

$$\ddot{u}_p + 2\xi\omega\dot{u}_p + \omega^2 u_p = De^{i\beta t} \quad (2.10)$$

Proponiendo solución:

$$u_p = F e^{i\lambda t} \quad (2.11)$$

$$u_{pt} = \dot{u}_p = i\lambda F e^{-i\lambda t} = i\lambda t \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} = \ddot{u}_p = -\lambda^2 F e^{i\lambda t} = -\lambda^2 u_p \quad (2.13)$$

$$(-\lambda^2 + 2\xi\omega i\lambda + \omega^2) F e^{i\lambda t} = D e^{i\beta t} \quad (2.14)$$

$$(2.15)$$

Para que se cumpla la igualdad anterior, entonces:

$$\lambda = \beta \quad (2.16)$$

$$F = \frac{D}{\omega^2 + -\lambda^2 + 2\xi\omega\beta} \quad (2.17)$$

Es evidente:

$$u_p = \frac{1}{\omega^2 - \beta^2 + i2\xi\omega\beta} D e^{i\beta t} \quad (2.18)$$

$$a + ib = \sqrt{a^2 + b^2} \exp(\arctan \frac{b}{a}) \quad (2.19)$$

$$FAD = \frac{u_p}{D e^{i\beta t}} = \frac{1}{\omega^2 - \beta^2 + i2\xi\omega\beta} = F e^{i\lambda t} \quad (2.20)$$

$$FAD = \frac{1}{\omega^2 - \beta^2 + i2\xi\omega\beta} \cdot \frac{1/\omega^2}{1/\omega^2} \quad (2.21)$$

$$FAD = \frac{1/\omega^2}{1 - r^2 + i2\xi r} \quad (2.22)$$

$$r = \frac{\beta}{\omega} \quad (2.23)$$

$$\omega^2 FAD = \frac{1}{1 - r^2 + i2\xi r} \quad (2.24)$$

2.7. Factor de amplificación dinámica

El F.A.D. es la relación entre la respuesta de un oscilador y la excitación de entrada, este nos indica la amplitud y la disminución del ángulo de fase (Chopra, 2014).

$$\omega^2 FAD = \frac{1}{1 - r^2 + i2\xi r} \quad (2.25)$$

Donde r se define como la relación de frecuencias de la excitación y la frecuencia natural de vibrar del oscilador (Chopra, 2014).

Posibles valores de r :

$$r = \frac{\beta}{\omega} \rightarrow 0 \implies \beta \ll \omega \quad (2.26)$$

$$r = \frac{\beta}{\omega} \rightarrow \infty \implies \beta \gg \omega \quad (2.27)$$

$$r = \frac{\beta}{\omega} = 1 \implies \beta = \omega \quad (2.28)$$

$$(2.29)$$

Porcentajes de amortiguamiento crítico ξ de una ecuación diferencial de un oscilador lineal amortiguado de un solo grado de libertad en vibración libre (Chopra, 2014).

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + k = 0 \quad (2.30)$$

$$u = Ae^{i\alpha t} \quad (2.31)$$

$$\frac{du}{dt} = \dot{u} = i\alpha Ae^{i\alpha t} = i\alpha u \quad (2.32)$$

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \ddot{u} = -\alpha^2 Ae^{i\alpha t} = -\alpha^2 u \quad (2.33)$$

$$(-m\alpha^2 + ci\alpha + k)u = 0 \quad (2.34)$$

$$(-m\alpha^2 + ci\alpha + k) = 0 \quad (2.35)$$

$$((i\alpha)^2 + \frac{c}{m}i\alpha + \omega^2) = 0 \quad (2.36)$$

Forma quadràtica

$$ax^2 + bx + d = 0 \quad (2.37)$$

$$i\alpha_{1,2} = -\frac{c}{m} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2\right)} \quad (2.38)$$

$$i\alpha_{1,2} - \frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2}\sqrt{\left(\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2\right)} \quad (2.39)$$

Caso 1 Amortiguamiento Crítico

$$\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2 = 0 \quad (2.40)$$

$$C_c = 2\omega m \quad (2.41)$$

$$i\alpha_{1,2} = -\frac{c}{m} \quad (2.42)$$

$$u = A_1 e^{i\alpha t} + A_2 t e^{i\alpha t} \quad (2.43)$$

$$u = A_1 e^{-\frac{c}{2m}t} + A_2 t e^{-\frac{c}{2m}t} \quad (2.44)$$

Caso 2 Sobre-amortiguamiento

$$\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2 > 0 \quad (2.45)$$

$$u = A_1 e^{-\frac{c}{2m} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2\right)}t} + A_2 e^{-\frac{c}{2m} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2\right)}t} \quad (2.46)$$

Caso 3 Sub-amortiguamiento

$$\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2 < 0 \quad (2.47)$$

Porcentaje de amortiguamiento crítico

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\omega m} \quad (2.48)$$

$$\frac{c}{m} = 2\xi\omega \quad (2.49)$$

$$i\alpha_{1,2} = -\xi \pm \frac{1}{2}\sqrt{(2\xi\omega)^2 - 4\omega^2} \quad (2.50)$$

$$i\alpha_{1,2} = -\xi\omega \pm \omega\sqrt{(\xi^2 - 1)} \quad (2.51)$$

$$\xi^2 - 1 < 0 \quad (2.52)$$

$$\xi < 1 \quad (2.53)$$

$$i\alpha_{1,2} = \omega(-\xi \pm i\sqrt{1 - \xi^2}) \quad (2.54)$$

$$u = A_1 e^{\omega(-\xi + i\sqrt{1 - \xi^2})t} + A_2 e^{\omega(-\xi + i\sqrt{1 - \xi^2})t} \quad (2.55)$$

$$u = A_1 e^{-\omega\xi + i\omega\sqrt{1 - \xi^2}t} + A_2 e^{-\omega\xi - i\omega\sqrt{1 - \xi^2}t} \quad (2.56)$$

$$\omega_D = \omega\sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.57)$$

$$u = A_1 e^{(-\omega\xi + i\omega_D)t} + A_2 e^{(-\omega\xi - i\omega_D)t} \quad (2.58)$$

$$u(t) = u(0) = u_0 \quad (2.59)$$

$$u(t) = u(0) = u_0 = A_1 + A_2 \quad (2.60)$$

$$\dot{u} = A_1(-\omega\xi + i\omega_D)e^{(-\omega\xi + i\omega_D)t} + A_2(-\omega\xi - i\omega_D)e^{(-\omega\xi - i\omega_D)t} \quad (2.61)$$

$$\dot{u} = -\omega\xi(A_1 + A_2) + i\omega_D e^{(-\omega\xi)t}(A_1 e^{i\omega_D t} - A_2 e^{-i\omega_D t}) \quad (2.62)$$

$$\dot{u}(t) = \dot{u}(0) = \dot{u}_0 = -\omega\xi(A_1 + A_2) + i\omega_D(A_1 - A_2) \quad (2.63)$$

$$\dot{u}(t) = \dot{u}(0) = \dot{u}_0 = -\omega\xi(u_0) + i\omega_D(A_1 + A_2) \quad (2.64)$$

$$\frac{\dot{u}_0 + \omega_0}{i\omega_D} = (A_1 - A_2) \quad (2.65)$$

$$(2.66)$$

Sumando la expresión del desplazamiento inicial

$$2A_1 = \frac{\dot{u}_0 + \omega\xi u_0}{i\omega_D} + u_0 = \frac{\dot{u}_0 + (\omega\xi + i\omega_D)u_0}{i\omega_D} \quad (2.67)$$

$$A_1 = \frac{\dot{u}_0 + (\omega\xi + i\omega_D)u_0}{i2\omega_D} \quad (2.68)$$

$$(2.69)$$

Haciendo la diferencia con la expresión del desplazamiento inicial

$$-2A_2 = \frac{\dot{u}_0 + \omega\xi u_0}{i\omega_D} - u_0 = \frac{\dot{u}_0 + (\omega\xi - i\omega_D)u_0}{i\omega_D} \quad (2.70)$$

$$A_1 = \frac{\dot{u}_0 + (\omega\xi - i\omega_D)u_0}{-i2\omega_D} \quad (2.71)$$

$$(2.72)$$

Entonces A_1 es el conjugado de A_2 , Sustituyendo

$$u = \frac{\dot{u}_0 + (\omega\xi + i\omega_D)u_0}{i2\omega_D} e^{(-\omega\xi + i\omega_D)t} + \frac{\dot{u}_0 + (\omega\xi - i\omega_D)u_0}{-i2\omega_D} e^{(-\omega\xi - i\omega_D)t} \quad (2.73)$$

$$(a + ib) + (a - ib) = 2a \quad (2.74)$$

$$u = 2Rr \left(\frac{i\dot{u}_0 + (i\omega\xi - \omega_D)u_0}{-2\omega_D} e^{(-\omega\xi)t} \cos(\omega_D t) + i \sin(\omega_D t) \right) \quad (2.75)$$

$$u = \frac{(e^{-\omega\xi t})}{\omega_D} (u_0 \omega_D \cos(\omega_D t) + u_0 \omega\xi + \dot{u}_0 \sin(\omega_D t)) \quad (2.76)$$

Porcentajes de amortiguamiento crítico

$$\xi = 0.03 \quad (2.77)$$

$$\xi = 0.05 \quad (2.78)$$

$$\xi = 0.07 \quad (2.79)$$

$$(2.80)$$

2.8. Propiedades del factor de amplificación dinámica en los suelos

$$r = \frac{\beta}{\omega} \rightarrow 0 \implies \beta \ll \omega \quad (2.81)$$

Sabemos que si $\omega > \beta$, el suelo en donde nos desplantamos es muy rígido, esto implica que el F.A.D. sea muy pequeño.

$$r = \frac{\beta}{\omega} \rightarrow \infty \implies \beta \gg \omega \quad (2.82)$$

Sabemos que si $\beta > \omega$, el suelo en donde nos desplantamos es demasiado arcilloso, lo que implicaría que el F.A.D. tenga amplitudes muy bajas, pero podría ser de mala calidad para construir por posibles licuaciones.

$$r = \frac{\beta}{\omega} = 1 \implies \beta = \omega \quad (2.83)$$

Sabemos que si $\beta = \omega$ el suelo en donde nos desplantamos sería poco rígido en comparación con la frecuencia de la excitación por eso el F.A.D. tiene amplitudes muy grandes.

2.9. Series de Fourier

Antes de llegar a la series de Fourier, necesitamos entender el contexto del porque las series de Fourier son tan útiles. Se utilizan propiedades de un espacio vectorial definidas como el producto interno, las funciones trigonométricas son un ejemplo. Las propiedades del espacio del producto interno, junto con las propiedades analíticas del seno y coseno dan a las series de Fourier su utilidad (Dyke & Dyke, 2001).

La suposición básica detrás de la serie de Fourier es que cualquier función dada puede ser expresada en términos de una serie de funciones seno y coseno y que una vez la serie es única. Dicho con frialdad y sin preliminares, esto suena absurdo, pero para aquellos familiarizados con la teoría de los espacios lineales no lo es. Todo lo que se requiere es que las funciones seno y coseno sean una base para el espacio lineal de funciones a las que la función dada pertenece (Dyke & Dyke, 2001).

2.9.1. Serie de Fourier trigonométrica

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n2\pi t}{T} + b_n \sin \frac{n2\pi t}{T} \right) \quad (2.84)$$

2.9.2. Serie de Fourier exponencial

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n e^{i\left(\frac{n2\pi}{T}\right)t} \quad (2.85)$$

Características de la función $f(t)$ analizada por la serie de Fourier:

- $f(t)$ es continua
- $f(t)$ es periódica (T)
- El periodo T es infinito
- $f(t)$ tiene un número finito de discontinuidades en un periodo

2.10. Transformada de Fourier

Características de la función $f(t)$ analizada por la transformada de Fourier continua: (Dyke & Dyke, 2001)

- $f(t)$ es continua
- $f(t)$ tiene un número finito de discontinuidades
- $f(t)$ es periódica T
- El periodo T es infinito

2.10.1. Transformada de Fourier continua

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\Omega)e^{i\Omega t} d\Omega \quad (2.86)$$

$$f(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{-i\Omega t} dt \quad (2.87)$$

2.10.2. Transformada de Fourier discreta en el tiempo

$$f(m\Delta t) = \sum_{\forall_k} F(k\Delta f)e^{ik\Delta f m\Delta t} \Delta f \quad (2.88)$$

donde $m = 0, 1, \dots, M$

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{M\Delta t} (\text{rad/s}) \quad (2.89)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{M\Delta t} (\text{Hz}) \quad (2.90)$$

2.10.3. Características de la función $f(m\Delta t)$ analizada por la transformada de Fourier discreta en el tiempo

- $f(m\Delta t)$ es discreta
- $f(m\Delta t)$ es periódica T , equivalente a la duración de la señal = $T = M\Delta t$, donde $M + 1$ es el número total de puntos que describen la señal

- El periodo (T) es finito

$$f(m\Delta t) = \sum_{\forall_k} F(k\Delta f) e^{ik \frac{2\pi}{M\Delta t} m\Delta t} \Delta f = \sum_{\forall_k} F(k\Delta f) e^{ik \frac{2\pi}{M} m} \Delta f \quad (2.91)$$

2.10.4. Frecuencia máxima o frecuencias de Nyquist.

$$\omega_{max} = \frac{2\pi}{2\Delta t} (rad/s) \quad (2.92)$$

$$F_{max} = \frac{2\pi}{2\Delta t} \cdot \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\Delta t} (Hz) \quad (2.93)$$

2.11. Respuesta asociada a un acelerograma

Ecuación diferencial de movimiento de un oscilador lineal amortiguado de un solo grado de libertad excitado por un movimiento sísmico cualquiera \ddot{u}_S (Chopra, 2014).

$$\ddot{u}_P + 2\xi\omega\dot{u}_P + \omega^2 u_P = \ddot{u}_S \quad (2.94)$$

Utilizando la transformada de fourier discreta en el tiempo

$$\sum_{\forall_k} F(k\Delta f) e^{ik \frac{2\pi}{M} m} \Delta f \quad (2.95)$$

Sustituyendo

$$\ddot{u}_P + 2\xi\omega\dot{u}_P + \omega^2 u_P = \sum_{\forall_k} F(k\Delta f) e^{ik \frac{2\pi}{M} m} \Delta f \quad (2.96)$$

Obteniendo K soluciones para cada una de las K senoides

$$\ddot{u}_k + 2\xi\omega\dot{u}_k + \omega^2 u_k = F(k\Delta f) e^{ik \frac{2\pi}{M} m} \Delta f \quad (2.97)$$

De tal manera, que al calcular todas las N respuestas para las K senoides en las que se descompone \ddot{U}_S , entonces

$$u_P = \sum_{k=-k}^k u_{Pk} \quad (2.98)$$

donde

$$u_{Pk} = \frac{1}{\omega^2 - \beta_k^2 + i2\xi\omega\beta_k} F(k\Delta f) e^{ik\frac{2\pi}{M}m\Delta f} \quad (2.99)$$

$$\beta_k = 2\pi K\Delta f \quad (2.100)$$

Entonces sustituyendo

$$u_P = \sum_{k=-k}^k u_{Pk} \frac{1}{\omega^2 - \beta_k^2 + i2\xi\omega\beta_k} F(k\Delta f) e^{ik\frac{2\pi}{M}m\Delta f} \quad (2.101)$$

$$u_P = \frac{1}{M\Delta t} \sum_{k=M/2}^{M/2} u_{Pk} \frac{1}{\omega^2 - \beta_k^2 + i2\xi\omega\beta_k} F(k\Delta f) e^{ik\frac{2\pi}{M}m} \quad (2.102)$$

2.12. Análisis de respuesta de sitio utilizando el software DEEPSOIL

DEEPSOIL es un programa de análisis de respuesta de sitio unidimensional que puede realizar (Hashash et al., 2020):

- a) Análisis no lineal 1-D de dominio de tiempo con y sin generación de presión de agua intersticial.
- b) Análisis lineal 1-D del dominio de la frecuencia equivalente, que incluye convolución y deconvolución.
- c) Análisis lineal 1-D del dominio de la frecuencia y el tiempo.

El uso del programa DEEPSOIL requiere previos conocimientos en la teoría de procedimientos de análisis y respuesta sísmica de sitio y de ingeniería geotécnica de terremotos. La versión del programa a utilizar en este trabajo es DEEPSOIL v7.0, esta es la última versión que se ha incluido (Hashash et al., 2020).

2.13. MATLAB

2.13.1. Mapping Toolbox

Mapping Toolbox proporciona algoritmos y funciones para transformar datos geográficos y crear visualizaciones de mapas. Se pueden visualizar datos en un contexto geográfico, crear visualizaciones de mapas a partir de diversas proyecciones de mapas y transformar datos de diversas fuentes en un sistema de coordenadas geográficas. *Mapping Toolbox* admite un flujo de trabajo completo para administrar datos geográficos. Se pueden importar datos raster y vectoriales desde una amplia gama de formatos de archivo y servidores de mapas web. Este toolbox permite procesar y personalizar datos con técnicas tales como recorte, interpolación, remuestreo, transformación de coordenadas y otras. Los datos se pueden combinar con capas de mapas base procedentes de diversas fuentes en una sola visualización de mapa. Es posible exportar los datos en formatos de archivo shapefile, GeoTIFF y KML.” (MathWorks, 2016)

2.14. PRODISIS

Es una aplicación de cómputo que suministra, para un sitio coordenadas geográficas definidas, la información relacionada con el enfoque probabilista dado por el peligro sísmico para la condición de roca (Comisión Federal de Electricidad, 2008).

- Aceleración máxima en roca a_0^Γ , correspondiente al nivel de referencia (ER).
- Aceleración máxima en roca $a_{0,EPR}^\Gamma$, correspondiente a un periodo de retorno especificado.
- Espectro de respuesta de referencia en roca (ER).

- Espectro de respuesta de periodo de retorno especificado en roca (EPR).
- Espectro de diseño transparente en roca.
- Espectro de diseño transparente regional.
- Espectro de diseño modificado.

2.15. Geoestadística

Los datos de las ciencias de la Tierra se distribuyen normalmente en el espacio o en el tiempo. El conocimiento de un valor de atributo, por ejemplo, un grado mineral o una concentración de contaminantes, por lo tanto, es de escaso interés, a menos que se conozca la ubicación o el momento de la medición y se contabilice en el análisis de datos. Las relaciones de los datos geoespaciales se pueden mostrar mediante un diagrama de dispersión, este gráfico nos puede mostrar todos los valores relacionados con los diferentes atributos medidos, lo cual nos dará las ubicaciones separadas por una distancia dada en una dirección particular (Goovaerts, [1997](#)).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Base de datos de estratigrafía de suelos dentro de los Valles Centrales

La base de datos de estratigrafía de los suelos proviene de los antecedentes a este trabajo (Sección 1.3), donde la recopilación de la información nos entregó una base de datos con 126 sondeos distribuidos en el municipio de Oaxaca de Juárez y algunos municipios conurbados. La base de datos se compone principalmente de:

- Ubicación de los sondeos
- Perfil estratigráfico
- Propiedades de los suelos

3.1.1. Distribución espacial del área de estudio

La localización de los sondeos se tiene representada de manera gráfica en *Google Earth* para poder dimensionar el área de estudio. En la figura 3.1 podemos observar la distribución espacial.

3.2. Frecuencias por profundidad asociada

La base de datos de estratigrafía de suelos se ordenó dando valores numéricos a cada uno de los 29 materiales identificados en la zona, quedando la clasificación como se observa en el cuadro 3.1, ordenados como una matriz numérica con un tamaño de (54) profundidades discretizadas por 126 sondeos.

Considerando las propiedades conocidas de los materiales en los estudios disponibles, se complementó la información de dichas propiedades en la secciones 3.7, 3.8 y 3.9, en las cuales se asignaron propiedades a partir de una revisión bibliográfica, reagrupando los materiales con propiedades similares (debido a la falta de disponibilidad de información de todos los tipos de suelos descritos) y clasificándolos según el cuadro 3.2, de tal manera que se cuente con todo lo necesario para el cálculo de la amplificación sísmica.

Dada la incertidumbre que existe en la distribución espacial de los datos debido a la separación espacial y la confiabilidad de los mismos, se realizó una descripción estadística de los sondeos utilizados en esta tesis. La primera descripción consiste en la determinación de frecuencias normalizadas de los distintos tipos de suelo que se presentan a una profundidad determinada, independientemente de su ubicación espacial. Dado un material de interés y a partir de la información de la matriz que se encuentra en el Anexo A.1, donde el primer renglón se refiere a las 54 profundidades y cada columna contiene los materiales encontrados en los 126 sondeos a una profundidad específica, cabe mencionar que la matriz es con el fin de contabilizar las frecuencias de los materiales y no para describir la estratificación específica de los sondeos. La frecuencia de los materiales a una profundidad dada se calcula como:

$$\bar{f}_p(z) = \frac{\sum_{c=1}^C f_{zcp}}{\sum_{z=1}^Z \sum_{c=1}^C f_{zcp}} \quad (3.1)$$

donde $\bar{f}_p(z)$ representa la frecuencia normalizada del tipo de material z a una profundidad p , f_{zcp} la frecuencia del tipo de material z en el sondeo c a una profundidad p . C y Z es el número total de sondeos y de materiales, respectivamente.

Cuadro 3.1. Clasificación de materiales

Materiales	Nomenclatura
Arcilla	1
Arcilla y limo	2
Arcilla y arena	3
Arcillas blandas	4
Materia orgánica	5
Arena limosa	6
Limo saturado	7
Basamento	8
Basamento roca metamórfica	9
Grava	10
Grava y limo	11
Limo	12
Arcilla arenosa	13
Relleno	14
Arenisca metamórfica	15
Grava y arcilla	16
Grava materia orgánica	17
Arena fina gris arcillosa	18
Arcilla (CL)	19
Arena mal graduada	20
SL y CL con gravas aisladas	21
SC y CL	22
Arcilla de baja plasticidad	23
Material granular	25
Limos saturados	26
Suelo residual	27
Arcillas de alta plasticidad	28
Arena bien graduada	29

Cuadro 3.2. Clasificación de materiales mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Materiales	SUCS	Nomenclatura final
Limo	ML	1
Limos saturados	OH-MH	2
Limo saturado	OH-MH	2
Arcillas blandas	CH	3
Arcillas de alta plasticidad	CH	3
Arcilla	CL	4
Arcilla (CL)	CL	4
Arcilla de baja plasticidad	CL	4
Arcilla y limo	OL	5
Materia orgánica	OL	5
Arena limosa	OL	5
Grava	GW	6
Arena bien graduada	SW	7
Arcilla y arena	SC-CL	8
Arcilla arenosa	SC-CL	8
Arena fina gris arcillosa	SC-CL	8
SL y CL con gravas aisladas	SC-CL	8
SC y CL	SC-CL	8
Arenisca metamórfica	SP	9
Arena mal graduada	SP	9
Material granular	SP	9
Grava y limo	GC	10
Relleno	GC	10
Grava y arcilla	GC	10
Grava materia orgánica	GC	10
Suelo residual	GC	10
Basamento	ROCA	11
Basamento roca metamórfica	ROCA	11

3.3. Frecuencias por tipo de material

Considerando las frecuencias por profundidad asociada, fue necesario considerar las frecuencias por tipos de materiales, tanto una frecuencia relativa y una acumulada. Dados los datos de la matriz (anexo A.1), en donde el primer renglón se refiere a las profundidades asociadas que van desde los 0.5 metros hasta los 186 m, la frecuencia relativa de un material independientemente de su ubicación espacial nos indica la probabilidad que existe de encontrar un material dado a una profundidad (columna) y se calcula como:

$$\bar{f}_z(p) = \frac{\sum_{c=1}^C f_{zcp}}{\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C f_{zcp}} \quad (3.2)$$

donde $\bar{f}_z(p)$ representa la frecuencia relativa y normalizada de un tipo de material z a una profundidad p dada, f_{zcp} la frecuencia del material z en un sondeo c a una profundidad p , P y C el número total de profundidades y sondeos.

La frecuencia acumulada es la sumatoria de las frecuencias relativas y se calcula como:

$$\bar{F}_z(p_i) = \sum_{p=1}^{p_i} \bar{f}_z(p) \quad (3.3)$$

donde $\bar{F}_z(p_i)$ representa el acumulado de la frecuencias relativas hasta la profundidad p_i , $1 \leq p_i \leq P$, $\bar{f}_z(p)$ la frecuencia relativa del material z a una profundidad p y P el total de las profundidades. La sumatoria se inicia de las mayores profundidades, de manera que en la superficie siempre se tendrá una frecuencia acumulada $\bar{F}_z(p_i) = 1$.

3.4. Geoestadística descriptiva de los materiales

Se realizó un análisis estadístico univariado de los tipos de materiales y de las profundidades asociadas. Para este análisis se utilizaron técnicas de geoestadística utilizando las siguientes ecuaciones obtenidas de (Goovaerts, 1997):

$$\bar{p}(z) = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C (f_{zcp} \cdot p)}{\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C f_{zcp}} \quad (3.4)$$

$$\sigma_p^2(z) = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C (f_{zcp} \cdot p - \bar{p})^2}{\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C f_{zcp}} \quad (3.5)$$

$$\varphi(z) = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C (f_{zcp} \cdot p - \bar{p})^3}{\sigma_p^2 \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C f_{zcp}} \quad (3.6)$$

Donde:

- $\bar{p}(z)$ representa la profundidad media a la que se encuentra el material z
- $\sigma_p^2(z)$ representa la varianza con respecto a la media definida para un material z
- $\varphi(z)$ representa una medida de asimetría (skewness)

Usualmente el valor medio de la distribución se toma como la media aritmética m , para una distribución asimétrica podemos utilizar el valor de la mediana M . Los valores mínimos y máximos definen el rango de variación de la variable. La varianza σ^2 es una medida de dispersión alrededor de la media y la raíz cuadrada de la varianza σ es la desviación estándar y su relación con la media, $\frac{\sigma}{m}$, para variables no negativas, es el coeficiente de variación. Skewness φ es una variable de asimetría con respecto a una distribución normal (Goovaerts, 1997). Si φ es cero, indica que los datos se comportan según una distribución normal, en caso de ser

positivo o negativo, implica que los datos tienen un sesgo hacia la derecha o hacia la izquierda de una distribución normal, respectivamente.

Para complementar la descripción estadística de los datos, se calculó también el promedio del material por profundidad $\bar{z}(p)$ según la siguiente ecuación

$$\bar{z}(p) = \frac{\sum_{z=1}^Z \sum_{c=1}^C (f_{zcp} \cdot z)}{\sum_{z=1}^Z \sum_{c=1}^C f_{zcp}} \quad (3.7)$$

3.5. Matriz de distancias y azimuts

La base de datos de estratigrafía de suelos contiene 126 sondeos con su respectiva geolocalización. Para esta sección se generó un vector columna con información de las coordenadas con los 126 sondeos y otro vector renglón con la misma información, estos arreglos se realizaron para conocer la distancia y el azimut en que se encuentra un sondeo contra los otros 126. Pevio al cálculo de las variables antes mencionadas se obtuvo la paquetería *Mapping Toolbox* la cuál nos proporcionó algoritmos y funciones para transformar datos geográficos y crear visualizaciones de mapas. Dentro de la paquetería se utilizó la función *distance* la cual nos ayudó a calcular la distancia medida entre coordenadas y sus respectivos azimuts, el formato de las coordenadas se generó por latitud y longitud, en grados decimales. Los resultados que nos arrojó la función *distance* estaba en grados por lo que se convirtieron a kilómetros por medio de la función *deg2km*.

La matriz resultante tiene un tamaño de 126x126, al ser una matriz cuadrada que se generó con la combinación entre vectores similares se obtuvo una diagonal principal de resultados con valor 0, los datos que nos interesan pueden ser tanto la parte triangular superior como la inferior. En este ejercicio se tomó la parte superior. Hay dos matrices de este tipo, la primera contiene las distancias entre celdas (km) y la segunda contiene los azimuts existente entre celdas (grados decimales).

3.6. Distribución de frecuencias acumuladas de materiales con respecto a distancias y azimuts

A partir de la representación gráfica tanto de las distancias (Figura 4.8) como de los azimuts (Figura 4.9), se realizó una discretización de las

distancias y de los azimuts (Sección 3.5) para su análisis. La discretización de distancias propuesta contiene los siguientes valores: 0, 0.05, 0.3, 0.5, 0.8, 14, 27, 40, 45 en kilómetros y el de azimuts con valores 0, 25, 50, 150, 210, 300, 360 en grados. Dicho análisis toma en cuenta la clasificación propuesta de 11 materiales de acuerdo al Cuadro 3.3, asociada a una matriz de materiales ordenada por sondeos y profundidades (matriz del anexo A.1). El principal objetivo de esta distribución de frecuencias es describir la probable distancia de encontrar un mismo tipo de material, a una profundidad y a un azimut dados.

La distancia media $\bar{x}(z, p, \alpha)$ para dos sondeos que contenga un mismo material y se encuentren a la misma profundidad dentro de uno de los intervalos discretizados de azimuts se estima mediante

$$\bar{x}(z, p, \alpha) = \frac{\sum_{c=1}^C (f_{xc} \cdot x(z, p, \alpha))}{\sum_{c=1}^C f_{xc}} \quad (3.8)$$

donde $x(z, p, \alpha)$ representa la distancia entre dos sondeos que contienen el material z a una profundidad p y a un azimut α , f_{xc} es la frecuencia con que se presentan dichas distancias $x(z, p, \alpha)$ en las condiciones mencionadas. Sólo se consideran las combinaciones de las distancias $x(z, p, \alpha)$ resultantes. De manera análoga, se estima la desviación estándar $\sigma_x(z, p, \alpha)$ de la distancia $x(z, p, \alpha)$ mediante

$$\sigma_x^2(z, p, \alpha) = \frac{\sum_{c=1}^C (f_{xc} \cdot x - \bar{x})^2}{\sum_{c=1}^C f_{xc}} \quad (3.9)$$

La descripción estadística de las distancias $x(z, p, \alpha)$ se puede realizar mediante la media $\bar{x}(z, p, \alpha)$ y la desviación estándar $\sigma_x(z, p, \alpha)$ así calculadas y suponiendo un comportamiento normal de los datos.

3.7. Relación SUCS y peso específico

Se relacionaron los tipos de suelos de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos SUCS (Juárez Badillo & Rico Rodriguez, 1973) ya que este sistema cubre los suelos gruesos y finos distinguiendo cada uno de los grupos de acuerdo al cribado, formando dos grupos genéricos de los cuales se subdividen otros grupos con distintas características de los suelos genéricos, lo que llevó a cambiar la nomenclatura de la base de datos de nuestros tipos de suelos agrupándolas de acuerdo con el sistema SUCS y modificando la matriz de datos de 25 tipos de materiales (Cuadro 3.1) a 11 (Cuadro 3.2). Por último se asignaron pesos específicos γ_e obtenidos en distintas pruebas de campo y laboratorio dentro de la literatura de Lambe y Whitman (1972), Terzaghi et al. (1996), Juárez Badillo (2002), Fredlund y Rahardjo (1993), de lo cual se obtuvo un promedio general de cada uno de los valores de γ_e por cada una de las referencias anteriores, proponiendo los pesos específicos mostrados en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Relación SUCS y sus pesos específicos

Nomenclatura	SUCS	γ_e (kN/m^3)
1	ML	12.28
2	OH-MH	12.40
3	CH	14.00
4	CL	14.14
5	OL	15.06
6	GW	18.36
7	SW	18.38
8	SC-CL	18.74
9	SP	18.84
10	GC	20.14
11	Roca	

3.8. Relación del índice de plasticidad, porcentaje de amortiguamiento y módulo de cortante

Vucetic y Dobry (1991) presentan un estudio de la influencia que tiene el índice de plasticidad (IP) en los parámetros de tensión-deformación cíclica de suelos saturados, los cuales son necesarios para las evaluaciones de la respuesta de sitio y microzonificación sísmica. En dicho estudio se presentan los efectos del IP en la curva que muestra la degradación de la relación entre el módulo de la secante del esfuerzo cortante y el módulo de cortante generado por deformaciones unitarias pequeñas G/G_{max} y la amplitud de la deformación unitaria al cortante cíclico γ_c , así como también los efectos de la relación del porcentaje de amortiguamiento crítico λ del material respecto a γ_c .

Para utilizar las curvas proporcionadas por Vucetic y Dobry (1991), se requieren los IPs de los distintos suelos considerados en este trabajo.

En el caso de las arcillas, dichos IPs se estimaron a partir de la Tabla 1 de (Díaz-Rodríguez & López-Molina, 2008). Para el caso de los suelos granulares se considera que su IP es cero y, por lo tanto se considera despreciable tanto su porcentaje de amortiguamiento crítico λ y G/G_{max} .

El IP de dichos datos es el resultado de un promedio, considerando los valores máximos y mínimos del estudio de (Díaz-Rodríguez & López-Molina, 2008), generando los valores restantes de otros materiales por interpolación en función de sus valores de IP. La relación de las curvas de esfuerzo cortante de acuerdo al IP asignado a nuestros suelos, se realizó con la figura 4 de Vucetic y Dobry (1991), en donde podemos observar las correlaciones entre el G/G_{max} , γ_c con respecto al IP. En la figura 5 de (Vucetic & Dobry, 1991), encontramos la correlación entre λ , γ_c con respecto al IP. Ambas figuras presentan los resultados para suelos normalmente consolidados y sobreconsolidados. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Relación SUCS y sus IP, λ y G/G_{max}

Nomenclatura	SUCS	IP	λ	G/G_{max}
1	ML	9	15	0.45
2	OH-MH	22	14	0.47
3	CH	175	7	0.78
4	CL	11	14	0.46
5	OL	9	15	0.45
6	GW	0	0	0
7	SW	0	0	0
8	SC-CL	0	0	0
9	SP	0	0	0
10	GC	0	0	0
11	Roca	0	0	0

3.9. Número de golpes, tipos de suelo y velocidad al cortante

Anbazhagan & Aditya Parihar & Rashimi (2012) presentan un estudio del módulo de cortante de baja deformación unitaria que es fundamental en la ingeniería geotécnica para poder estimar los parámetros de la respuesta del terreno con el propósito de proponer microzonificaciones sísmicas. En dicho trabajo se proponen nuevas correlaciones entre las pruebas de penetración estándar *SPT* y los tipos de suelo considerados a partir del análisis de datos obtenidos de investigaciones previas. Se tomaron los valores de número de golpes N de la tabla 1 de (Anbazhagan et al., 2012) quedando la relación según el cuadro 3.5. Los valores de *SPT* de los suelos que no se encuentran en dicha tabla 1 de (Anbazhagan et al., 2012), se obtienen a partir de una interpolación en función de sus IPs.

Osorio Flores (comunicación personal, 2022) proporciona una revisión de la

literatura sobre la estimación de la velocidad de onda de cortante a partir de la cual se estima dicha velocidad tomando en consideración las siguientes propiedades:

- γ_e
- N
- Profundidad del estrato
- Nivel freático

y considerando el promedio obtenido de las propuestas de los siguientes autores (Kanai, 1966), (Ohsaki & Iwasaki, 1973), (Imai & Yoshimura, 1975), (Imai, 1977), (Ohta & Goto, 1978), (Seed & Idriss, 1981), (Imai & Tonouchi, 1982) y (Imai et al., 1990), los cuales presentan una estructura matemática de tipo potencial de la forma $V_S = AN^B$ en m/s . La velocidad de la onda de cortante en un estudio de mecánica de suelos puede variar en función de la profundidad del estrato así como del tipo de material, para este procedimiento se propuso utilizar el mismo valor V_s para cada tipo de material de acuerdo a la clasificación de IP considerada en la sección 3.7 sin importar la profundidad o el orden en que se presente algún tipo de material en un estrato, esto derivado de la incertidumbre de los tipo de materiales que encontramos en la base de datos. Los datos de nivel freático fueron proporcionados por S. I. Belmonte Jiménez y R. I. Hernández Sánchez (comunicación personal, 2022) y se registraron entre los años 2002 y 2009.

Cuadro 3.5. Valores N

Nomenclatura	SUCS	<i>N</i>
1	ML	56
2	OH-MH	28
3	CH	1
4	CL	105
5	OL	56
6	GW	370
7	SW	185
8	SC-CL	93
9	SP	370
10	GC	185

3.10. Movimiento sísmico

Para la estimación de las amplificaciones sísmicas, fue necesario proponer un escenario o escenarios sísmicos probables que influyan en el peligro sísmico del sitio en estudio, en este caso, los Valles Centrales del Estado de Oaxaca. Dicho escenario es calculado por parte de Joel Cruz A., Líder de proyectos de peligro sísmico y salud estructural, ERN (comunicación personal, 2022). Se realizaron dos estimaciones del espectro de peligro uniforme (EPU) asociado al periodo de retorno de referencia ($T_r=345$ años) sugerido por el programa PRODISIS (2015), la primera mediante las fuentes más representativas para el sitio, acorde al MDOC-CFE (2015), la segunda estimación se realizó considerando una discretización de las fuentes de profundidad intermedia presentado por Reinoso et al. (1990), así como las fuentes de subducción propuestas por Ordaz y Reyes (1999). Respecto a las ecuaciones de predicción de movimiento, se consideraron las mismas que el MDOC-CFE (2015); para representar los eventos de subducción se empleó la ecuación propuesta por Arroyo et al.

(2010), mientras que para los sismos de profundidad intermedia se usó la relación propuesta por Zhao et al. (2006). Los acelerogramas sintéticos obtenidos a partir de los escenarios considerados son resultado de un análisis de desagregación probabilista (Bazzurro & Allin Cornell, 1999), pares de magnitud M y distancia hipocentral R con la mayor probabilidad de ocurrencia, o bien de mayor contribución al peligro sísmico del sitio considerado. La generación de los acelerogramas sintéticos correspondientes a las magnitudes de los sismos propuestas para el escenario sísmico se logra a partir de los métodos para la simulación de grandes eventos a partir de sismos pequeños empleados como funciones de Green empíricas (FGE) (Hartzell (1978); Boore (1986); Ordaz et al. (1995); Kohrs-Sansorny et al., (2005)). Entre los diversos métodos de simulación con FGE, para esta investigación se ha considerado el algoritmo de suma estocástica en dos etapas (Kohrs-Sansorny et al., 2005). Para los sismos semilla, se utilizan registros de la estación OXBJ (Escuela Benito Juárez; 17.06734° , -96.7238°), de la red del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con un período de recurrencia de 345 años. A partir de los acelerogramas sintéticos generados, se utiliza uno de ellos como representativo del proceso estocástico correspondiente para generar las amplificaciones de sitio de los distintos sondeos del Valle de Oaxaca con respecto a roca. El acelerograma empleado en el análisis se muestra en la figura 3.2

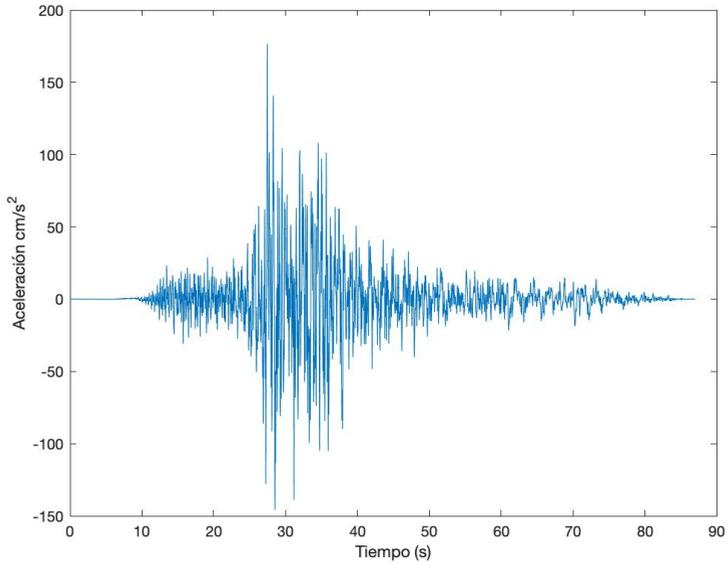


Figura 3.2. Acelerograma sintético representativo propuesto como escenario sísmico para el valle de Oaxaca

3.11. Análisis de datos en DEEPSOIL

DEEPSOIL es un software de análisis de respuesta de sitio que utiliza el método lineal equivalente de una dimensión, así como un análisis de respuesta no lineal para la estimación de las amplificaciones de sitio. Estas amplificaciones son calculadas al resolver ecuaciones de propagación de onda en una dimensión, considerando un movimiento sísmico en la base del suelo y suponiendo que ocurre en roca, además de tomar en cuenta las variaciones de las propiedades de los suelos a distintas profundidades. Las principales características de este software son: modelo no lineal de fuerza controlada, estimación del amortiguamiento independiente de la frecuencia del suelo, generación de presión de poro y modelos de disipación, interfase de usuario gráfica y capacidad de procesamiento en paralelo. El software fue

desarrollado en la Universidad de Illinois en Urbana Campaign (Hashash et al., 2020)

El procedimiento de cálculo y las variables empleadas para los distintos sondeos considerados en el presente trabajo se muestran en la sección 4.7

Capítulo 4

Resultados y discusiones

4.1. Frecuencias por profundidades asociadas

A continuación se presentan las frecuencias normalizadas según la ecuación 3.1 de los 11 tipos de materiales que podemos encontrar en los 126 sondeos, el análisis se realizó en las 54 profundidades asociadas, donde la profundidad más grande es de 186 metros. La figura 4.1 indica la probabilidad de encontrar un material z a una profundidad p con respecto a todos los materiales de todos los sondeos que se encuentran a dicha profundidad p . En la figura 4.1, donde podemos observar al material 2 (OH-MH) que corresponde al grupo de los limos de alta plasticidad, aparece con menos frecuencia en los primeros 19 metros y notamos una mayor concentración a partir de los 20 hasta los 186 metros. También se observa una frecuencia baja de los materiales 3, 4, 5 (CH, CL, OL) que corresponden a grupos de limos, arcillas de alta y baja plasticidad en profundidades menores a los 32 metros. Los materiales 8, 9 y 10 (SC-CL, SP, GC) corresponden a materiales granulares y podemos observar una frecuencia media en profundidades no mayores a los 32 metros. El material 11 (Roca) se encuentra en la base de todos los sondeos, ya que suponemos la estratigrafía de los suelos basada en un semiespacio rígido.

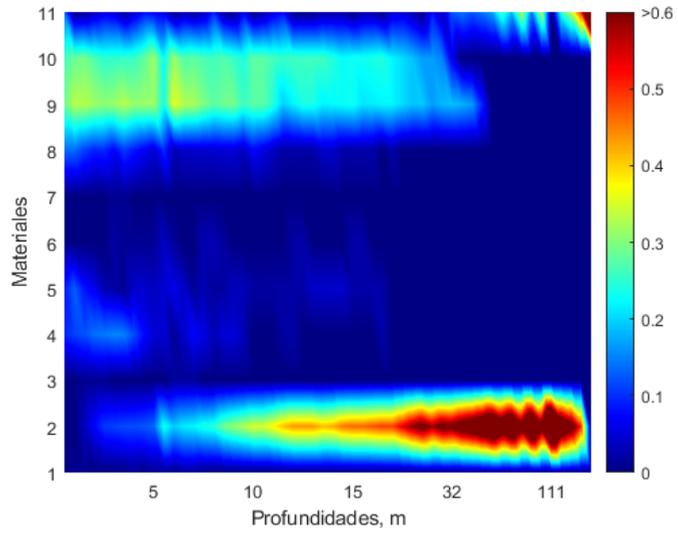


Figura 4.1. Frecuencia relativa respecto a la profundidad de los 11 materiales considerados en el cuadro 3.3, a profundidades de 0.5 metros hasta 186 metros

4.2. Frecuencias por tipo de material

A continuación se presentan las frecuencias relativas (Ecuación 3.2) y acumuladas (Ecuación 3.3) respecto a los 11 tipos de materiales dentro de las 54 profundidades que van desde los 0.5 hasta los 186 metros. En la figura 4.2 podemos observar que la probabilidad de encontrar el material 2 (OH-MH) a una profundidad dada es uniforme en la mayoría de las 54 profundidades en comparación del material 3 (CH), donde la probabilidad de encontrarlo a una profundidad de 0.5 hasta los 10 metros es mayor que en el resto de las profundidades. También podemos observar el caso del material 7 (SW), cuya probabilidad de encontrarlo a la profundidad de 4 metros es alta. Si comparamos la frecuencia relativa de los 11 materiales a profundidades menores de 5 metros, podemos observar que la frecuencia del material 1 (ML) es de la más significativas en comparación con el resto de los materiales a esa profundidad.

La frecuencia acumulada podemos observarla en la figura 4.3 y es la sumatoria de las frecuencias de los 11 tipos de materiales en las 54 profundidades (Ecuación 3.3). Todas las frecuencias acumuladas, de acuerdo a la Ecuación 3.3, en la superficie tienen por resultado 1, por lo mismo podemos observar que el acumulado de los materiales terminan en el mismo color. El acumulado de las frecuencias del material 2 (OH-MH) es el que mayor probabilidad tiene de aparecer desde los 0.5 hasta los 182 metros. En relación al material 8 (SC-CL), el acumulado de las frecuencias de este material muestra que se tiene una menor probabilidad de encontrarlo en profundidades mayores a los 32 metros, el acumulado de frecuencias del material 11 podemos observarlo en todas las profundidades ya que es el basamento o roca metamórfica de acuerdo a la información de los sondeos.

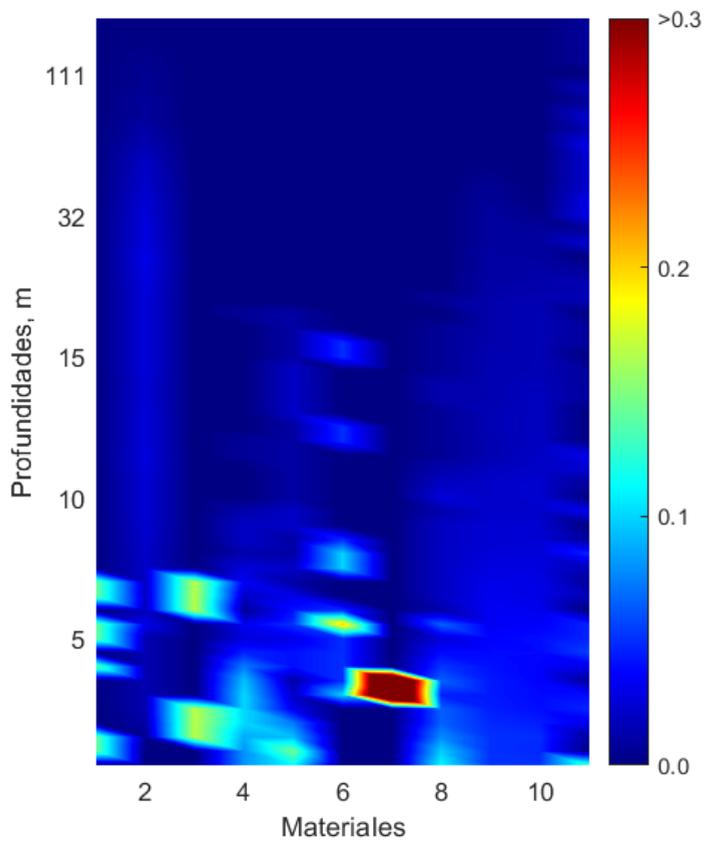


Figura 4.2. Frecuencia relativa de los 11 tipos de materiales considerados en el cuadro 3.3 respecto a la profundidad desde 0.5 hasta 186 metros

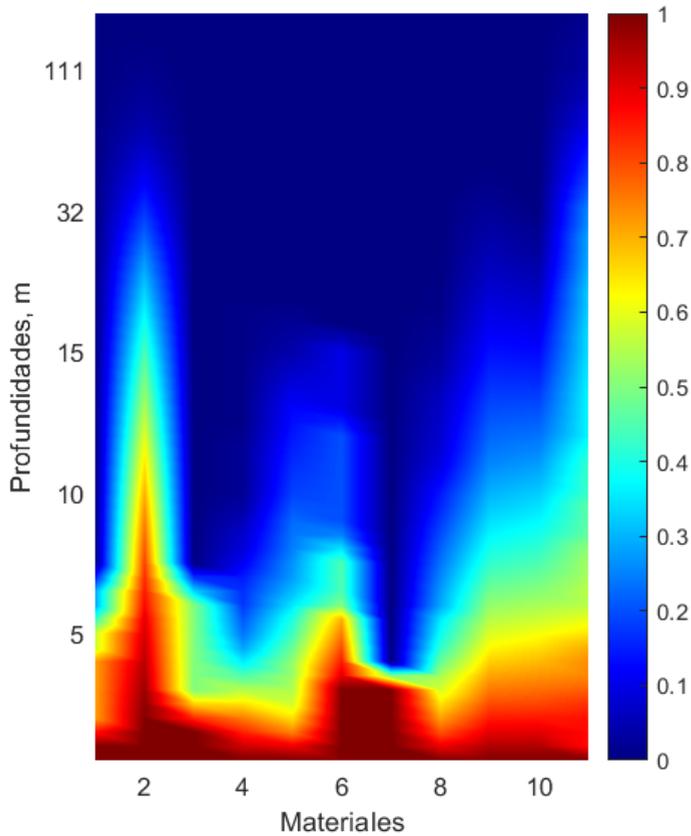


Figura 4.3. Frecuencia acumulada de los 11 tipos de materiales considerados en el cuadro 3.3 a la profundidad de 0.5 hasta 186 metros

4.3. Geoestadística descriptiva

Se presentan los resultados del análisis de los 11 materiales con relación a las 54 profundidades asociadas. En la figura 4.4 podemos observar la media de las variables descriptivas y la media más una desviación

estándar (Ecuación 3.4 y 3.5). En el caso del material 2 nos indica que derivado de las frecuencias en todas las profundidades de todos los sondeos de dicho material, podemos encontrar el valor medio de la distribución de los datos a una profundidad de 20 metros. Continuando con la figura 4.5 del mismo material, encontramos sus valores mínimo y máximo entre la profundidad 0.5 y 145 metros, podemos observar que la media y la mediana tienen valores muy próximos entre si, pero en relación con la figura 4.6, el skewness (Ecuación 3.6) arroja un valor entre 2.5 y 3 lo que nos indica un sesgo positivo y por consecuencia asimetría con respecto a una distribución normal, entonces se recomienda ocupar la mediana como medida de referencia central en nuestra distribución de datos para este material. Finalmente, se presenta la figura 4.7 en la cual se observa el promedio de los materiales obtenido a distintas profundidades (Ecuación 3.7).

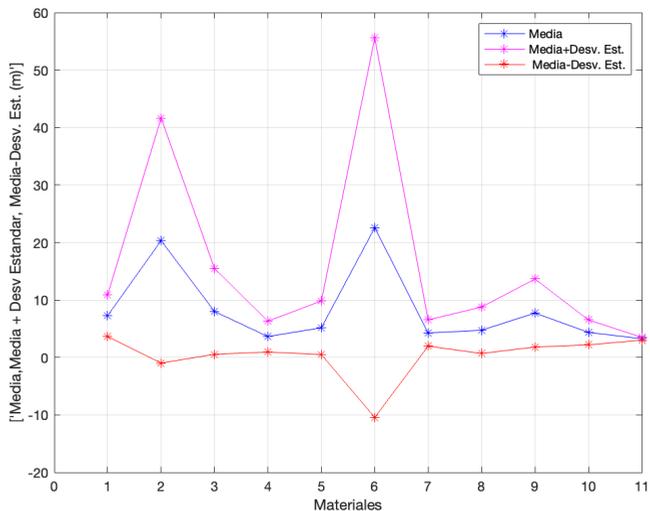


Figura 4.4. Profundidad media y desviación estándar de los 11 materiales

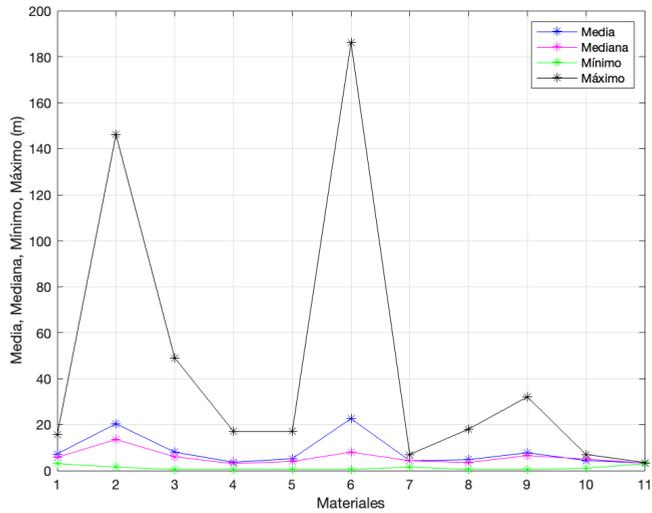


Figura 4.5. Profundidad media, mediana, mínima y máxima

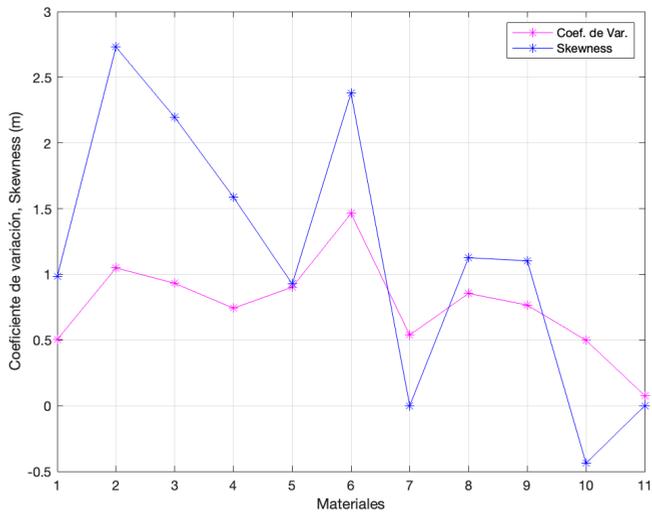


Figura 4.6. Coeficiente de variación e índice de asimetría (skewness)

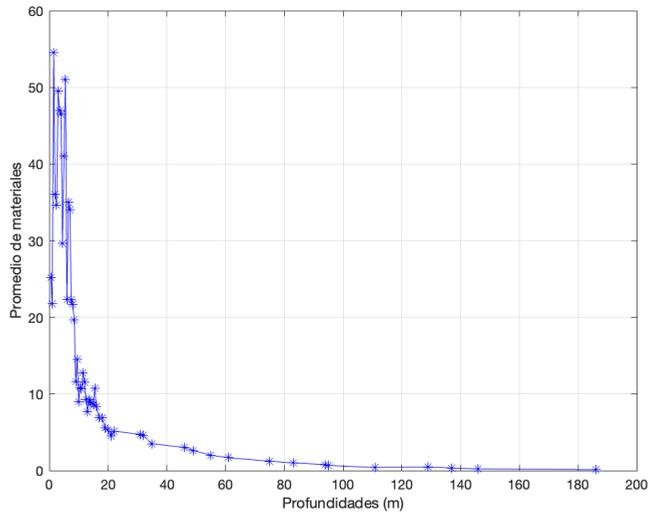


Figura 4.7. Promedio de los materiales por profundidad

4.4. Distancias y azimuts

El resultado de operar los vectores con información de coordenadas para obtener las distancias y los azimuts de los mismos, nos da como resultado dos matrices con 15876 datos, de los cuales se utilizaron 7875 referentes a la parte superior triangular y se graficaron de forma ascendente en las figuras 4.8 y 4.9. Para nuestro caso, podemos observar que la distancia máxima que existe entre los sondeos es un poco mayor a los 45 km. En esta representación no se respeta el orden de los sondeos ni su ubicación espacial, para conocer las distancias en específico tendríamos que visualizar la matriz de 126 x 126. En el caso de los azimuts 4.9 se encuentran en grados y el procedimiento para realizar el cálculo de la matriz es el mismo que el de las distancias. De igual manera podemos observar se encuentran en orden ascendente, tomando en cuenta que el mayor azimut que podemos encontrar es de 360° . Estas figuras se utilizan para proponer una discretización tanto del vector distancia como del vector azimut.

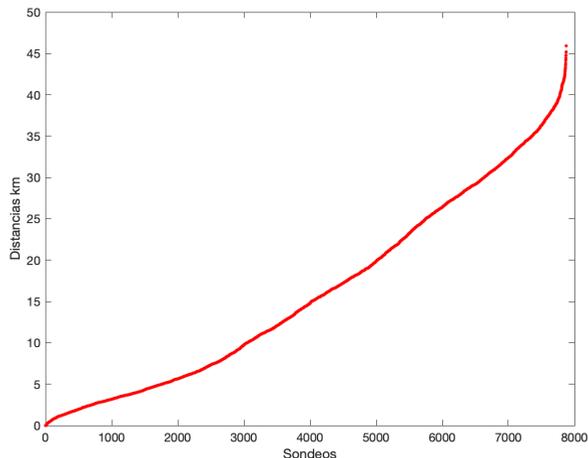


Figura 4.8. Distancias entre sondeos con el mismo material y la misma profundidad, ordenadas de manera ascendente

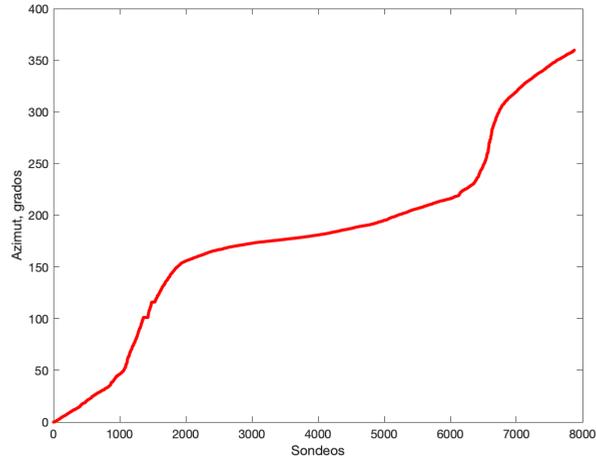


Figura 4.9. Azimuts entre sondeos con el mismo material y la misma profundidad, ordenados de manera ascendente

4.5. Distribución de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts

Se presentan los resultados del material 2 en la figura 4.12, a partir de la cual se observa la media (Ecuación 3.8) de las distancias, teniendo en cuenta que en el eje de las abscisas tenemos las profundidades asociadas, en el eje de las ordenadas, la discretización de los valores de azimuts y en z los valores medios de las distancias. Si se considera la profundidad de 40 metros, se observa que la distancia media de encontrar material 2 a esa profundidad va desde los 6 hasta 16 kilómetros, en cualquiera de las direcciones con respecto al sondeo en donde nos encontramos. De igual manera se observa que de las primeras profundidades, menores a 65 metros, se encuentran materiales a menos de 7 kilómetros de distancia en cualquiera de las direcciones, a partir de los 70 metros vemos que disminuye el intervalo de azimuts en donde podemos encontrar material 2 de acuerdo a la profundidad en donde

nos encontremos, pero siempre dentro del intervalo de los 5 hasta los 8 kilómetros. En el caso de la figura 4.11 (Ecuación 3.9) se tiene que la desviación estándar es el intervalo en donde podemos encontrar datos con mayor probabilidad al sumarle la media. Si retomamos el mismo ejemplo que la media y se considera solo la profundidad de 40 m, se puede observar que los valores de azimut de 200° a 360° es más probable que se encuentren sondeos con material 2 hasta los 60 kilómetros, en el caso de 250° hasta 90 kilómetros dentro de toda la distribución espacial. Al emplear los datos de ambas figuras y suponiendo distribuciones normales en cada uno de los análisis descriptivos de la sección 3.4, es posible describir de manera probabilista la ubicación de sondeos de material 2, en este caso. El resto de las figuras para los demás materiales se encuentran en el Anexo A.2

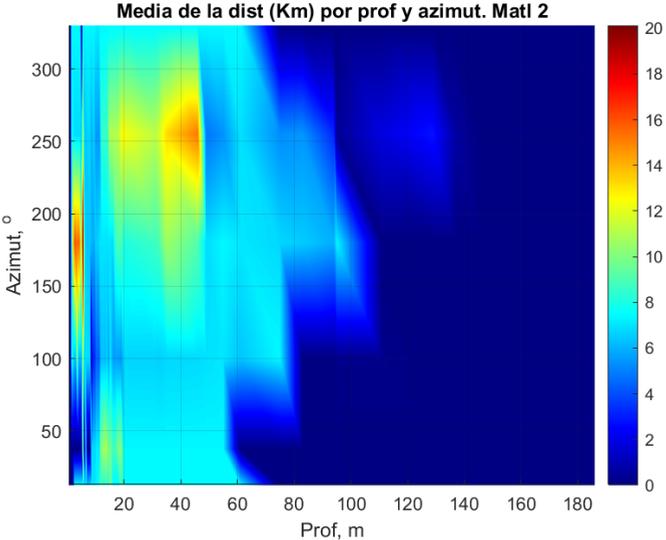


Figura 4.10. Distribución de la distancia media con respecto a profundidades y azimuts del material 2 (Cuadro 3.3)

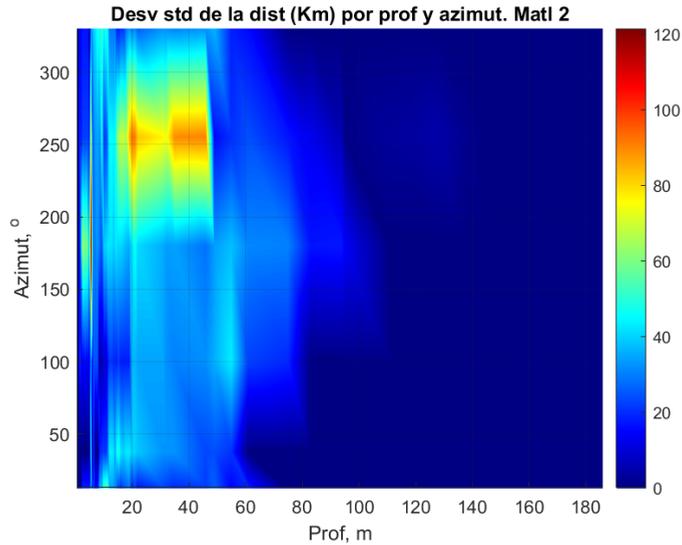


Figura 4.11. Distribución de la desviación estándar de la distancia con respecto a profundidades y azimuts del material 2 (Cuadro 3.3)

4.6. Velocidad de onda de cortante del perfil SEVR-G07

A continuación se analizan los datos del perfil SEVR-G07 como ejemplo de la estimación de la velocidad de la onda de cortante en función de la profundidad. El perfil SEVR-G07 tiene una profundidad total de 142 metros y se compone de dos tipos de materiales de acuerdo al cuadro 3.4, gravas y limos con alto contenido de humedad, de acuerdo a la sección 3.9 podemos observar que cada uno de los autores propone un modelo matemático $V_s = AN^B$ con valores distintos, la propuesta realizada por Osorio Flores (Comunicación personal, 2002) obtiene los valores de V_s para todos los estudios considerados. Posteriormente se estima un promedio y una desviación estándar, promedio que se utiliza para las

siguientes secciones. Podemos observar que la velocidad de onda de cortante está en función del tipo de material y la profundidad del estrato, para este ejercicio por la incertidumbre de la información de nuestra base de datos, se mantiene el mismo valor V_s por tipo de material independientemente de la profundidad y el N.A.F. El cálculo de la velocidad de corte se realiza de manera similar para el resto de los sondeos.

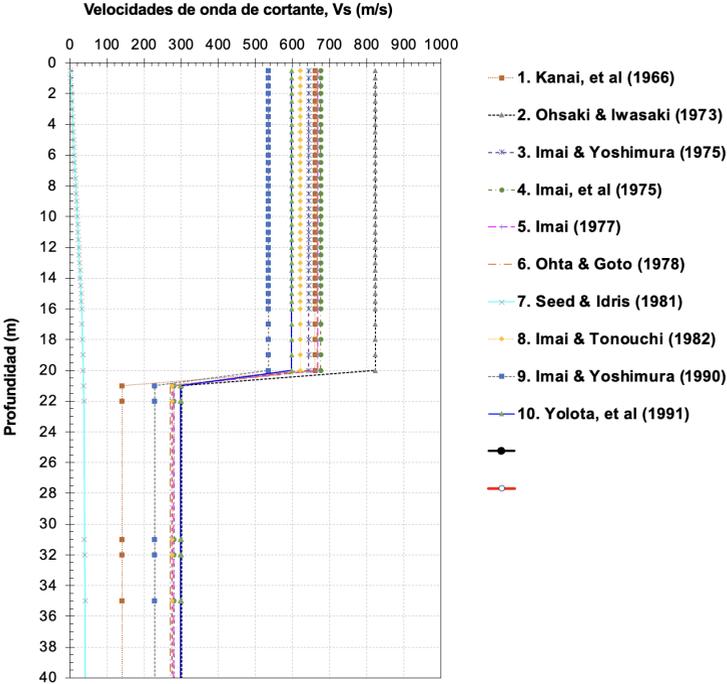


Figura 4.12. Velocidad de onda de cortante del perfil SEVR-G07

4.7. Análisis del perfil SEVR-G07 mediante DEEPSOIL

Análogamente a la sección anterior, se presenta como ejemplo de la estimación de la amplificación dinámica de los sondeos, el procedimiento

Cuadro 4.1. Otras variables

Método de análisis	Lineal equivalente
Método de análisis	Puntos discretos
Tipo de solución	Dominio de la frecuencia
Tipo de roca	Semi-espacio rígido
Número de iteraciones	20
Tipo de apoyo	Flexible

utilizando los datos del perfil SEVR-G07. Se inicializa el proceso dependiendo del método de análisis a elegir. Para este trabajo se utilizaron los parámetros del cuadro 4.1 en donde encontramos el método lineal equivalente, lo que supone es que se resuelve de manera lineal un comportamiento no lineal del suelo. Posterior a esto encontramos distintos tipos de soluciones dentro de las cuales, se requieren datos que se podrían obtener mediante una prueba de mecánica de suelos, los cuales no se cuentan pero que se suponen a partir de la literatura. Derivado de lo anterior, la solución por medio de puntos discretos nos permite procesar el perfil y los datos requeridos son los obtenidos en las secciones 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10. Dentro del método lineal equivalente se pueden encontrar curvas de distintos autores con respecto al porcentaje de amortiguamiento y módulo de cortante dependiendo del índice de plasticidad. Para este ejercicio se utilizan las curvas de Vucetic & Dobry (1991) y Seed & Idriss (1981) para materiales plásticos y para arenas y gravas, respectivamente. Estas curvas modifican los porcentajes de amortiguamiento proporcionados inicialmente. A continuación se describirá el cálculo realizado a partir de los datos del perfil SEVR-G07 que se encuentran en el cuadro 4.2. Esto se presenta tan sólo para ejemplificar el procedimiento, la información del resto de los perfiles se puede obtener a partir de consultar las secciones 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10. Dentro del perfil SEVR-G07, el N.A.F se encuentra a 2.97 metros, el cual

Cuadro 4.2. Perfil SEVR-G07

Nombre	Profundidad m	γ (kN/m)	V_s (m/s)	$\lambda\%$
GC	3	20.14	706	0.05
GC	7	20.14	706	0.05
GC	10	20.14	706	0.05
OH-MH	6	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05
OH-MH	10	12.3	267	0.05

se consideró dentro de los primeros 3 metros, posteriormente para este ejercicio se propone un estrato a cada 10 metros aunque sea del mismo tipo material. El movimiento de entrada es el que se encuentra en la sección 3.10 corregido dentro del mismo programa por línea base.

Como resultado del análisis anterior se obtiene el periodo fundamental del suelo (s) correspondiente al perfil considerado en la figura 4.13, la aceleración máxima del terreno (g) (figura 4.14) obtenida a partir de excitar la base de roca con el movimiento mostrado en la sección 3.10, el periodo estructural que presentó la mayor aceleración (g) (figura 4.15), el cual se ve influido tanto por el periodo estructural del suelo como el contenido espectral del movimiento de excitación, y por último la aceleración máxima (figura 4.16) correspondiente al periodo estructural de la figura 4.15. Este mismo procedimiento se aplica a todos los sondeos considerados, obteniendo las figuras mencionadas en esta sección, así como los resultados resumidos en el Anexo A.3

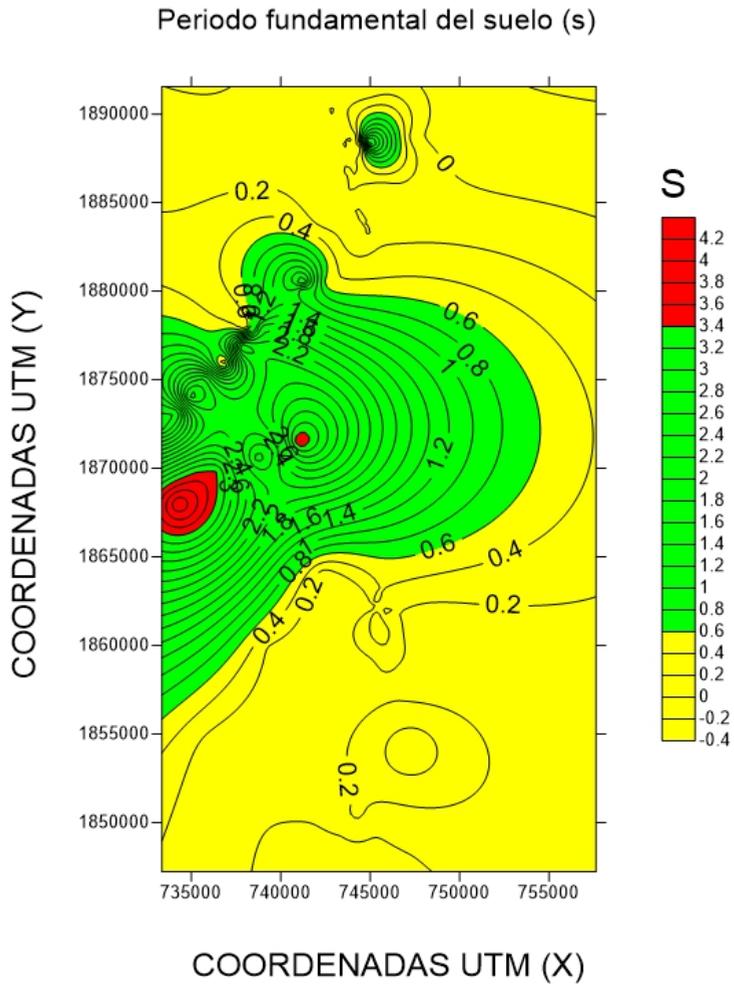


Figura 4.13. Periodo fundamental del suelo (s)

Aceleración absoluta del periodo estructural anterior (g)

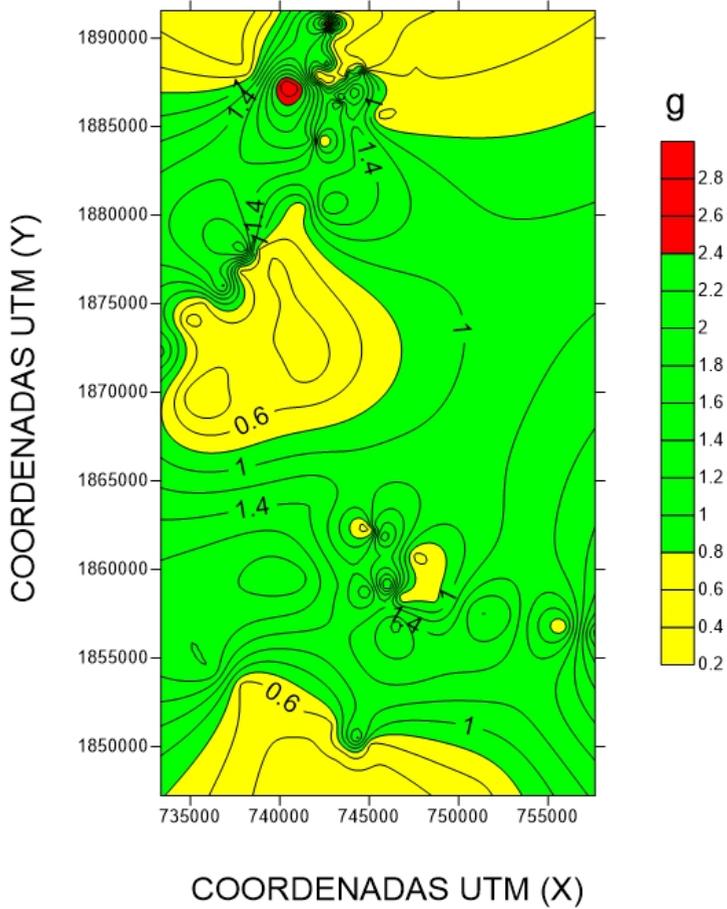


Figura 4.14. Aceleración absoluta del periodo estructural anterior

Periodo estructural con mayor aceleración absoluta (s)

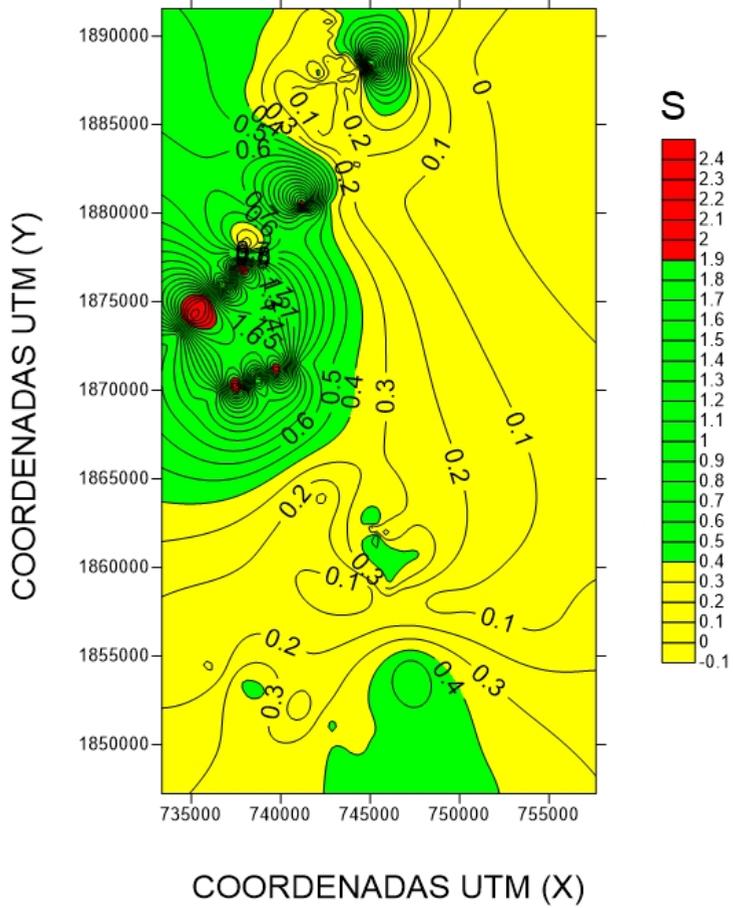


Figura 4.15. Periodo estructural con mayor aceleración absoluta (s)

Máxima aceleración del terreno (g)

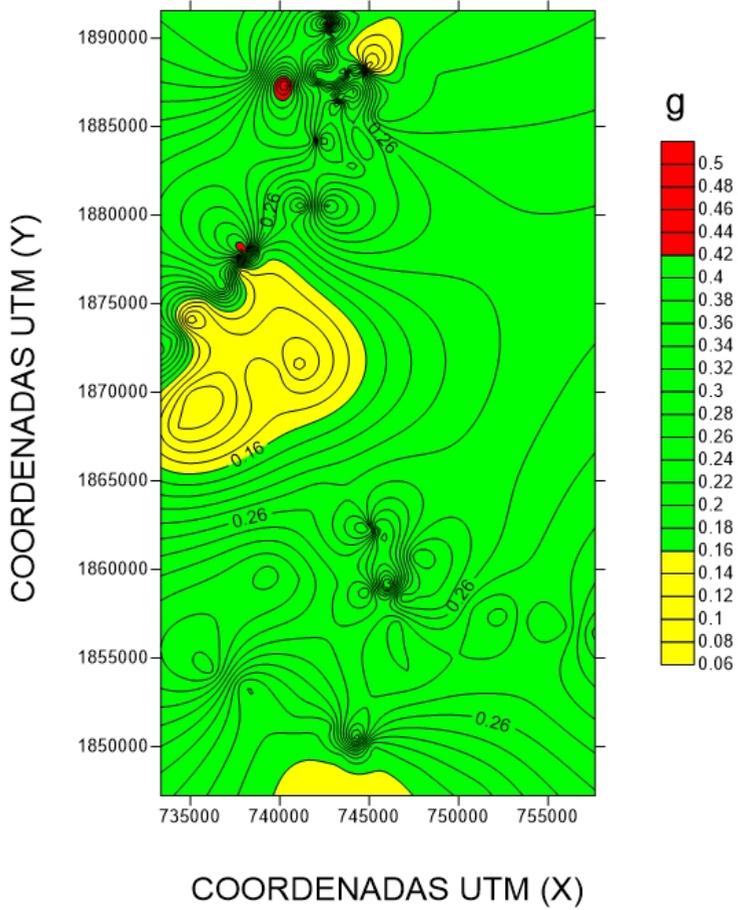


Figura 4.16. Máxima aceleración del terreno

Capítulo 5

Conclusiones

La metodología que se propone mediante la geoestadística es fundamental para conocer la variabilidad de nuestros suelos y con ello tener una mayor certeza de como se comportan a lo largo de una zona de estudio. Dentro de las variables estadísticas que encontramos en esta tesis podemos darnos cuenta de que tipo de suelo predomina más, en que profundidad y ángulo. También podemos suponer la probabilidad de que un material se encuentre en un sitio dado, en función de la distancia que existe entre sondeos y de la variabilidad en cuanto a profundidades que nos podemos encontrar, todo lo anterior está basado en un análisis descriptivo de nuestras variables de la base de datos de suelos que proviene de una recopilación de información de estudios anteriores en los cuáles podemos encontrar diferentes datos e interpretaciones sobre las propiedades de los suelos. Por tal motivo la metodología que se propone es por medio de una clasificación SUCS, siendo su principal objetivo generalizar los suelos en sus tres grupos y con ello, parte toda la información que se necesita para poder realizar un estudio del comportamiento del suelo, principalmente el IP, el cual juega un papel muy importante porque a partir de este, podemos encontrar propiedades como lo son sus pesos específicos, porcentajes de amortiguamiento, esfuerzo cortante y posteriormente número de golpes y velocidad de onda de cortante, parámetros utilizados para simular una perfil stratigráfico y poder obtener un resultado analizando dicho perfil ante un escenario sísmico. Una de las ventajas que se tiene con esta metodología es que podemos encontrar dentro del programa de respuesta de sitio, simulaciones que son muy amigables como

la es lineal equivalente, por lo que ya se tienen precargadas diferentes curvas dependiendo del tipo de material y su clasificación SUCS, donde directamente se determina el porcentaje del amortiguamiento, todo en función del IP, así mismo la corrección por línea base de la historia de aceleraciones que se propone, en este caso un movimiento registrado en la zona de los Valles Centrales del estado de Oaxaca. Inmediato de todo lo anterior se obtuvieron 109 resultados ya que los 11 restantes representan puntos basados en roca superficial por lo cual no se contemplaron en el análisis por falta de información sobre el tipo de roca. Se presentan 4 distintas figuras, donde podemos ver zonas en donde se puede presentar distintos tipos de riesgo. No obstante en cuanto a la falta de información de estudios de mecánica de suelos, se propone buscar mayor información con la que se pueda complementar el estudio, incluyendo algunas otras técnicas para calcular la velocidad de onda de cortante, entre otras propiedades.

Bibliografía

- Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological research letters*, 68(1), 94-127.
- Anbazhagan, P., Parihar, A., & Rashmi, H. N. (2012). Review of correlations between SPT N and shear modulus: a new correlation applicable to any region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 52-69.
- Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. A., & Singh, S. K. (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, 14(4), 769-785.
- Bazán, E., & Meli, R. (2002). *Diseño sísmico de edificios*. Limusa/Noriega Editores.
- Bazzurro, P., & Allin Cornell, C. (1999). Disaggregation of seismic hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), 501-520.
- Boore, D. M. (1986). On simulating large earthquakes by Green's-function addition of smaller earthquakes.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*, -1997, McGraw-Hill Book companies, Inc.
- Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997-5009.
- Castellanos, F., Caballero-Montes, J. L., García-Pérez, J., Cruz Clemente, M., Silva Crespo, S. E., Pérez Saavedra, M. E., & Jiménez Quero, V. G. (2003). Zonación y determinación de coeficientes preliminares de diseño sísmico para la ciudad de Oaxaca y municipios conurbados. *Foro SIB EJ*, 6.

- Castellanos León, F. (2001). *Métodos para zonación sísmica óptima en varias dimensiones*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castellanos León, F. (2008). *Análisis Dinámico De Sistemas En El Dominio Tiempo-Frecuencia* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castro, R. R., & Munguia, L. (1993). Attenuation of P and S waves in the Oaxaca, Mexico, subduction zone. *Physics of the earth and planetary interiors*, 76(3-4), 179-187.
- Chapman, M. C. (1995). A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design. *Bulletin of the seismological society of America*, 85(3), 937-942.
- Chávez-García, F. J., Cuenca, J., & Lermo, J. (1996). Seismic microzonation in Mexico, the examples of Mexico City, Oaxaca and Puebla. *Proceedings of the fifth international conference on seismic zonation (Nice, October 17-19, 1995)*, 699-706.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras* (Cuarta, Vol. 4).
- Comisión Federal de Electricidad. (2008). Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, México.
- Cruz, J., Arredondo, C., & Jaimes, M. (2020). New source duration relationships for Mexican earthquakes: Practical application to stochastic summation methods. *Pure and Applied Geophysics*, 177(10), 4775-4796.
- Cruz-Arguelles, J. D., Jaimes, M. A., & Arredondo-Vélez, C. A. (2020). Simulation of strong ground motions modified by attenuation effects under specific soil conditions: modeling the 2017 Puebla, Mexico (Mw 7.1) earthquake. *Journal of Seismology*, 24(3), 495-509.
- Damy, J. R., & Casales, C. G. (1985). Soil stresses under a polygonal area uniformly loaded. *International conference on soil mechanics and foundation engineering*. 11, 733-735.

- Das, B. M., & Luo, Z. (2016). *Principles of soil dynamics*. Cengage Learning.
- Díaz-Rodríguez, J. A., & López-Molina, J. A. (2008). Strain thresholds in soil dynamics. *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering*, 12-17.
- Dyke, P. P. G., & Dyke, P. P. (2001). *An introduction to Laplace transforms and Fourier series*. Springer.
- Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of earthquake engineering*. Wiley New York.
- ERN Ingenieros Consultores. (2010). *Actualización del Atlas de Riesgos del Estado de Oaxaca en los Fenómenos Geológicos e Hidrometeorológicos* (inf. téc.). Instituto Estatal de Protección Civil. http://www.proteccionciviloaxaca.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=353
- Fredlund, D. G. (2000). The 1999 RM Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 963-986.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Giraldo, R., Mateu, J., & Delicado, P. (2012). geofd: Un paquete R para predicción geoestadística de datos funcionales. *Revista Colombiana de Estadística*, 35(3).
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press on Demand.
- Harmsen, S. C. (2001). Mean and modal in the deaggregation of probabilistic ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(6), 1537-1552.
- Hartzell, S. H. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophysical Research Letters*, 5(1), 1-4.

- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D., Phillips, C. A., & Park, D. (2020). *DEEPSOIL V7.0, User Manual* (inf. téc.). Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hernandez, B., Shapiro, N. M., Singh, S. K., Pacheco, J. F., Cotton, F., Campillo, M., Iglesias, A., Cruz, V., Gómez, J. M., & Alcántara, L. (2001). Rupture history of September 30, 1999 intraplate earthquake of Oaxaca, Mexico (Mw= 7.5) from inversion of strong-motion data. *Geophysical research letters*, 28(2), 363-366.
- Hernández Sánchez, R. I. (2016). *Prospección de aguas subterráneas en los valles centrales de Oaxaca a partir de los métodos geofísicos de gravimetría, magnetometría y resistividad eléctrica*. (Tesis de maestría) Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca.
- Imai, T., & Tonouchi, K. (1982). Correlation of N-value with S-wave velocity: Proc. of 2nd Europ. *Sympo. on Penetration Testing*, 67, 72.
- Imai, T., & Yoshimura, Y. (1975). The relation of mechanical properties of soils to P and S-wave velocities for ground in Japan. *Technical note OYO Corporation*.
- Imai, T., Yoshimura, K., Uemura, T., Yasuoka, H., & Kosuge, K. (1990). ⁶³Cu NMR Study of Spin Dynamics in La₂ x (Sr, Ba) xCuO_y (0.04 x 0.16, 3.99 y 4.03). *Journal of the Physical Society of Japan*, 59(11), 3846-3849.
- Imai, T. (1977). P and S wave velocities of the ground in Japan. *Proc. 9th ICSMFE*, 2, 257-260.
- Imai, T., & Tonoughi, K. (2021). Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus. *Penetration Testing*, 67-72.

- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R., & Syahbana, A. J. (2020). Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, *36*(1_suppl). <https://doi.org/10.1177/8755293020951206>
- Juárez Badillo, E. (2002). *Mecanica de suelos II* (Vol. 2). Editorial Limusa.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1973). *Mecánica de suelos*.
- Kanai, K. (1966). Conf. on Cone Penetrometer The Ministry of Public Works and Settlement (Ankara, Turkey)(presented by Y Sakai, 1968).
- Kohrs-Sansorny, C., Courboux, F., Bour, M., & Deschamps, A. (2005). A two-stage method for ground-motion simulation using stochastic summation of small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *95*(4), 1387-1400.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1972). *Mecánica de suelos*. (inf. téc.).
- Lathi, B. P., & Green, R. A. (1998). *Signal processing and linear systems*. Oxford University Press New York.
- Lazcano, S. (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal., 8.
- Léon, J. L. (1976). Información general acerca del subsuelo de 16 ciudades de México- Oaxaca, Oax. Memoria de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos Tomo II.
- Lermo Samaniego & Chávez García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America*, *83*(5), 1574-1594.
- Luna Barraza, C. (2012). *Estimación de los efectos de sitio en los Valles Centrales del estado de Oaxaca*. (Tesis de maestría) Instituto

- Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca.
- Martínez-González, J. A., Lermo-Samaniego, J. F., Sánchez-Sesma, F. J., Ángulo-Carrillo, J., Valle-Orozco, R., Ordoñez-Alfaro, J., & Pérez-Rocha, L. E. (2012). Effects of the Subsidence on the Changes of Dominant Periods of Soils within Mexico City Valley. *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*.
- MathWorks. (2016). Mapping Toolbox™ User's Guide R 2016a, 890.
- Mendoza, M. L., Samaniego, J. L., & Nolasco, L. A. (s.f.). Información Geológica, Geotécnica y Geofísica.
- Morales, J. (2003). *Estudio de las características físicas del subsuelo de la Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oax y su área conurbada (1976-2002)*. (Tesis de maestría) Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- Ohsaki, Y., & Iwasaki, R. (1973). On dynamic shear moduli and Poisson's ratios of soil deposits. *Soils and Foundations*, 13(4), 61-73.
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 6(2), 167-187.
- Ordaz, M., & Reyes, C. (1999). Earthquake hazard in Mexico City: Observations versus computations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(5), 1379-1383.
- Ordaz, M., Arboleda, J., & Singh, S. K. (1995). A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), 1635-1647.
- Osorio Flores, L. (2007). *Caracterización de parámetros sísmicos en el lago de Texcoco*.
- Osorio Flores, L. (2013). *Microzonificación sísmica de la zona del ex lago de Texcoco* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México.

- Pérez. (2002). *Zonificación sísmica en la Ciudad de Oaxaca*. (Tesis de maestría) Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- Pérez, M., Cruz, M., Uribe, A., & Bravo, H. (1999). *Curvas de isoperiodo para la ciudad de Oaxaca* (inf. téc.). Instituto Tecnológico de Oaxaca. Oaxaca de Juárez, Oax.
- Pérez López, A. (2018). *Efectos de Sitio en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca* (inf. téc.). (Proyecto de Residencia) Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- Ph, L., Kasser, M., Pagarete, J., Ruegg, J. C., Ortlieb, L., Guerrero, J., Duch, N., Roldan, J., Castellanos, F., & Montano, T. (1988). Mediciones geodésicas de largas distancias: Aplicación al estudio del movimiento de placas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, 27(3).
- Raptakis, D., Chávez-García, F. J., Makra, K., & Pitilakis, K. (2000). Site effects at Euroseistest—I. Determination of the valley structure and confrontation of observations with 1D analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(1), 1-22.
- Reinoso, E., Ordaz, M., Sánchez, F., & Singh, S. (1990). UN METODO PARA CALCULO APROXIMADO DE ESPECTROS DE RESPUESTA SISMICA Y ALGUNAS APLICACIONES. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (38), 39-56.
- Rossa, O., & Auvinet, G. (1992). Stresses induced by surficial and deep loading in elastic medium. *Journal of geotechnical engineering*, 118(8), 1241-1246.
- Samaniego, L., & Chávez García, F. J. (1992). Site effect evaluation using microtremor measurements: A review in three cities in Mexico and results of a new technique. *Memoria*, 144-155.
- Samaniego, L., & Chávez García, F. (1995). Efectos de sitio en la ciudad de Oaxaca. Resultados con registros de temblores y mediciones de microtremores. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (50), 1-13.

- Samaniego, L., & Chávez García, F. J. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the seismological society of America*, *84*(5), 1350-1364.
- Santiago Bustamante, E. J., & Zamora García, G. (2018). *Reporte sobre la realización de los polinomios de los perfiles gravimétricos A-E* (inf. téc.).
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1981). Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes. *ASCE national convention (MO)*, 481-544.
- Singh, S. K., Ordaz, M., Alcántara, L., Shapiro, N., Kostoglodov, V., Pacheco, J. F., Alcocer, S., Gutiérrez, C., Quaas, R., & Mikumo, T. (2000). The Oaxaca Earthquake of 30 September 1999 (Mw= 7.5): a normal-faulting event in the subducted Cocos plate. *Seismological Research Letters*, *71*(1), 67-78.
- Singh, S. K., Ordaz, M., Pacheco, J. F., Quaas, R., Alcántara, L., Alcocer, S., Gutiérrez, C., Meli, R., & Ovando, E. (1999). A preliminary report on the Tehuacan, Mexico earthquake of June 15, 1999 (Mw= 7.0). *Seismological Research Letters*, *70*(5), 489-504.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Tonatiuh Dominguez, R., Rodríguez-Lozoya, H. E., Sandoval, M. C., Sanchez, E. S., Meléndez, A. A., Rodríguez- Leyva, H. E., & Amelia Campos, R. (2017). Site response in a representative region of Manzanillo, Colima, Mexico, and a comparison between spectra from real records and spectra from normative. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *93*, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.013>
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of geotechnical engineering*, *117*(1), 89-107.

- Zeevaert, L. (1986). Consolidation in the intergranular viscosity of highly compressible soils. En *Consolidation of soils: testing and evaluation*. ASTM International.
- Zeevaert, L. (1991). Seismoil dynamics of foundations in Mexico City earthquake, September 19, 1985. *Journal of geotechnical engineering*, 117(3), 376-428.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., & Somerville, P. G. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913.

Capítulo A

Cuadros anexos

A.1. Matriz

La base de datos original se compone de 126 sondeos donde cada uno cuenta con una profundidad distinta. Se propuso una estratificación a cada 0.5 metros para los primeros 20 metros de profundidad después de los 21m hasta los 186 metros ya no siguen un orden de 0.5. El primer renglón (amarillo) de la base de datos se refiere a las 54 profundidades asociadas, la primera columna (azul) se refiere a los 126 sondeos, podemos observar que en la primera profundidad 0.5 metros encontramos materiales en los 126 sondeos, esto se debe a que nos encontramos en la superficie, a partir de 1 metro no todos los sondeos cuentan con materiales, para fines de calculo de frecuencias no es necesario conocer la estratificación por sondeo, es por eso que se reduce el número de celdas lo cuál nos indica que ya no es posible conocer la ubicación de un material a una profundidad de un sondeo dado.

	A	B	C	D	E	F	G
1	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
2	11	5	5	5	5	4	4
3	4	8	4	4	8	4	8
4	11	8	8	5	4	4	4
5	8	4	4	4	4	4	4
6	8	5	2	2	2	2	2
7	11	5	5	5	2	2	2
8	11	5	5	2	2	2	2
9	4	5	5	5	2	2	2
10	11	5	2	2	2	2	2
11	11	5	5	2	2	2	2
12	11	5	2	2	2	2	2
13	11	5	5	5	2	2	2
14	11	5	5	2	2	2	2
15	11	5	2	2	2	2	2
16	11	5	5	5	8	6	4
17	11	10	10	10	4	4	4
18	11	10	10	10	9	9	9
19	11	5	5	5	5	5	8
20	11	8	8	8	8	8	8
21	11	1	1	8	11	11	4
22	11	4	4	4	4	4	4
23	5	4	4	4	4	4	4
24	5	10	4	4	4	4	8
25	5	8	10	4	4	8	8
26	5	8	8	8	8	8	7
27	5	8	8	8	8	11	11
28	5	8	8	8	8	11	4
29	5	8	8	8	5	7	6
30	5	8	8	4	11	4	8
31	5	4	4	4	4	4	8
32	5	8	3	3	3	6	4
33	5	8	4	4	4	8	8
34	10	10	10	8	8	10	5
35	10	8	8	8	8	4	4
36	4	10	10	10	10	4	8
37	8	5	4	4	4	5	4
38	8	4	4	11	4	4	4
39	4	4	4	4	10	8	8
40	4	10	8	8	11	4	4
41	10	8	10	10	4	8	9
42	8	4	4	4	8	8	9
43	8	8	10	10	4	4	9
44	4	4	11	4	8	11	9

	A	B	C	D	E	F	G
45	8	4	4	4	4	9	9
46	8	4	4	8	4	9	9
47	8	4	8	11	9	9	9
48	4	8	8	4	9	9	9
49	8	4	8	11	9	9	9
50	8	9	9	9	9	9	9
51	10	9	9	9	9	9	9
52	8	9	9	9	9	9	9
53	10	9	9	9	9	9	9
54	10	9	9	9	9	9	9
55	4	9	9	9	9	9	9
56	8	9	9	9	9	9	9
57	10	9	9	9	9	9	9
58	10	9	9	9	9	9	9
59	4	9	9	9	9	9	9
60	8	9	9	9	9	9	9
61	8	9	9	9	9	9	9
62	4	9	9	9	9	9	9
63	4	9	9	9	9	9	9
64	4	9	9	9	11	9	9
65	8	9	9	9	11	11	9
66	8	9	9	9	9	9	9
67	9	9	9	9	9	9	9
68	9	9	9	9	9	9	9
69	9	9	9	9	9	9	9
70	9	9	9	9	11	9	9
71	9	9	9	9	9	9	10
72	9	9	9	9	9	9	10
73	9	9	9	11	9	9	10
74	9	9	9	9	9	9	10
75	9	9	9	9	9	9	10
76	9	9	9	9	9	10	10
77	9	9	9	9	9	10	10
78	9	9	9	9	9	10	10
79	9	9	9	9	9	10	10
80	9	9	9	9	9	10	10
81	9	9	9	9	10	10	10
82	9	9	9	9	10	10	10
83	9	9	9	9	10	10	2
84	9	9	9	9	10	10	10
85	9	9	9	10	10	10	10
86	9	10	10	10	10	10	10
87	9	10	10	10	10	10	10
88	9	10	10	10	10	2	10

	A	B	C	D	E	F	G
89	9	10	10	10	10	10	10
90	9	10	10	10	10	10	10
91	9	10	10	10	10	10	10
92	9	10	10	10	10	10	10
93	9	10	10	10	2	10	10
94	9	10	10	10	10	10	10
95	9	10	10	10	10	10	10
96	9	10	10	10	10	10	
97	9	10	10	2	10	10	
98	9	10	10	10	10	10	
99	9	10	10	10	10	10	
100	9	10	10	10	10	10	
101	9	10	10	10	10		
102	9	10	10	10	10		
103	10	10	10	10	10		
104	10	10	10	10	10		
105	10	10	10	10	10		
106	10	10	10	10			
107	10	10	10	10			
108	10	10	10	10			
109	10	10	10	10			
110	10	10	10				
111	10						
112	10						
113	10						
114	10						
115	10						
116	10						
117	10						
118	10						
119	10						
120	10						
121	10						
122	10						
123	10						
124	10						
125	10						
126	10						
127	10						

	H	I	J	K	L	M	N
1	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
2	4	8	5	5	5	5	8
3	5	5	5	5	5	5	5
4	1	5	11	2	2	2	2
5	5	11	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2
11	2	2	2	2	2	2	2
12	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	2	5	5	1
14	2	2	2	5	8	4	4
15	2	2	10	8	6	4	4
16	5	5	8	6	8	8	8
17	4	8	10	8	4	4	4
18	11	10	8	5	3	3	3
19	8	8	4	8	5	8	4
20	8	11	8	2	9	8	4
21	4	4	11	2	9	11	8
22	4	11	4	2	9	1	9
23	4	8	6	2	9	9	9
24	8	11	9	2	9	9	9
25	8	8	4	2	9	9	9
26	8	4	5	2	9	9	9
27	4	6	11	2	9	9	9
28	6	11	11	2	9	9	9
29	8	9	4	2	9	11	9
30	9	4	1	5	9	9	9
31	4	5	8	8	9	9	9
32	11	4	9	6	9	9	9
33	5	8	9	8	9	9	11
34	4	4	9	11	9	9	9
35	8	4	9	2	9	9	9
36	4	11	9	2	9	9	9
37	4	4	9	4	9	9	9
38	8	9	9	8	9	9	9
39	4	9	9	8	9	9	9
40	9	11	9	6	9	9	9
41	9	9	9	8	9	9	9
42	9	9	9	4	9	9	9
43	9	9	9	11	9	9	9
44	9	9	9	8	2	9	9

	H	I	J	K	L	M	N
45	9	9	9	4	10	9	2
46	9	9	9	6	2	9	2
47	9	9	11	4	2	2	2
48	9	9	9	11	10	2	2
49	9	9	9	11	10	2	2
50	9	9	11	11	10	2	10
51	9	9	9	1	10	2	10
52	9	9	9	8	10	10	10
53	9	9	9	4	10	10	10
54	9	9	9	9	10	10	10
55	9	9	9	9	10	10	10
56	11	9	9	9	2	10	10
57	9	9	9	9	10	10	2
58	9	9	9	9	10	10	10
59	9	9	10	9	10	2	10
60	11	9	10	9	10	10	10
61	9	9	10	9	10	10	10
62	9	9	10	9	10	10	10
63	9	9	10	9	10	10	10
64	9	9	10	9	10	10	10
65	9	9	10	9	10	10	10
66	9	10	10	9	10	10	10
67	9	10	10	9	10	10	10
68	9	10	10	9	10	10	10
69	9	10	10	9		10	10
70	10	10	10	11		10	
71	10	10	2	9		10	
72	10	10	10	9			
73	10	10	10	9			
74	10	10	10	9			
75	10	10	10	9			
76	10	10	10	9			
77	10	10	10	9			
78	10	2	10	9			
79	10	10	10	10			
80	10	10	10	10			
81	10	10	10	2			
82	2	10	10	10			
83	10	10	10	10			
84	10	10		10			
85	10	10		10			
86	10	10		10			
87	10	10		10			
88	10	10		10			

	H	I	J	K	L	M	N
89	10	10		10			
90	10	10		10			
91	10			2			
92	10			10			
93	10			10			
94	10			10			
95				10			
96				10			
97				10			
98				10			
99				10			
100				10			
101				10			
102				10			
103				10			
104							
105							
106							
107							
108							
109							
110							
111							
112							
113							
114							
115							
116							
117							
118							
119							
120							
121							
122							
123							
124							
125							
126							
127							

	O	P	Q	R	S	T	U
1	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5
2	8	8	8	8	8	8	8
3	5	11	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2	2
8	2	11	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2
11	2	2	6	5	5	10	10
12	2	2	5	5	5	5	5
13	6	6	4	4	4	8	10
14	5	5	8	8	8	8	8
15	6	6	4	4	11	8	8
16	8	8	8	8	11	9	9
17	4	4	4	4	4	9	9
18	8	8	9	9	9	9	9
19	4	11	9	9	9	9	9
20	4	11	9	9	9	9	9
21	4	4	9	9	11	9	9
22	11	9	11	9	9	9	9
23	9	9	9	9	9	9	9
24	9	9	9	9	11	9	9
25	9	9	9	9	9	9	9
26	9	11	9	9	9	9	9
27	9	11	9	9	9	9	9
28	9	9	9	9	9	9	9
29	9	9	9	9	9	9	9
30	9	9	9	9	9	9	9
31	9	9	9	9	9	2	2
32	9	9	9	9	9	2	2
33	9	9	9	9	9	2	2
34	9	9	9	9	9	2	2
35	11	9	9	2	2	2	2
36	9	9	2	2	2	2	2
37	9	9	2	2	2	2	11
38	9	9	2	2	2	2	2
39	9	9	2	2	2	2	2
40	9	9	2	2	2	10	10
41	9	9	2	2	2	10	2
42	9	2	2	2	2	2	2
43	9	2	2	10	2	2	2
44	2	2	10	10	10	10	10

	O	P	Q	R	S	T	U
45	2	2	10	10	10	10	10
46	2	2	10	2	2	10	10
47	2	2	10	2	2	10	10
48	2	2	2	10	10	10	10
49	2	10	10	10	10	10	10
50	10	10	10	10	10	10	10
51	10	10	10	10	10	10	10
52	10	10	10	10	10	10	10
53	10	10	10	10	10	10	10
54	10	2	10	10	10	10	10
55	10	10	10	10	10	10	10
56	2	10	10	10	10		
57	10	10	10	10	10		
58	10	10	10	10	10		
59	10	10	10	10	10		
60	10	10	10				
61	10	10					
62	10	10					
63	10	10					
64	10	10					
65	10	10					
66	10	10					
67	10						
68	10						
69							
70							
71							
72							
73							
74							
75							
76							
77							
78							
79							
80							
81							
82							
83							
84							
85							
86							
87							
88							

	O	P	Q	R	S	T	U
89							
90							
91							
92							
93							
94							
95							
96							
97							
98							
99							
100							
101							
102							
103							
104							
105							
106							
107							
108							
109							
110							
111							
112							
113							
114							
115							
116							
117							
118							
119							
120							
121							
122							
123							
124							
125							
126							
127							

	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
2	11	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2	2	2
10	2	10	10	10	5	5	5
11	10	5	5	5	5	5	5
12	5	10	6	6	10	10	11
13	10	4	4	9	9	8	8
14	8	8	8	8	8	8	8
15	8	9	9	9	9	9	9
16	9	9	9	9	9	9	9
17	9	11	9	9	9	9	9
18	9	11	9	9	9	9	9
19	11	9	9	9	9	9	9
20	9	11	9	9	9	9	9
21	9	9	9	9	9	9	9
22	9	9	9	9	9	9	9
23	11	9	9	9	9	9	9
24	9	9	9	9	9	9	9
25	9	9	2	2	2	2	2
26	9	9	2	2	2	2	2
27	9	9	2	2	2	2	2
28	9	2	2	2	2	2	2
29	9	2	2	2	2	2	2
30	9	2	2	2	2	11	2
31	2	2	2	2	2	2	2
32	2	2	2	2	2	2	2
33	2	2	2	2	2	2	2
34	2	2	2	2	2	2	2
35	2	2	2	2	2	2	2
36	2	2	2	2	2	2	10
37	2	2	10	10	10	10	10
38	2	2	10	10	10	10	10
39	2	2	10	10	10	10	10
40	2	2	10	10	10	10	10
41	2	10	10	10	10	10	10
42	2	10	10	10	10	10	10
43	10	10	10	10	10	10	10
44	10	10	10	10	10	10	10

	V	W	X	Y	Z	AA	AB
45	10	10	10	10	10	10	10
46	10	10	10	10	10	10	10
47	10	11	10	10	10	10	
48	10	10					
49	10	10					
50	10	10					
51	10	10					
52	10	10					
53	10						
54	10						
55							
56							
57							
58							
59							
60							
61							
62							
63							
64							
65							
66							
67							
68							
69							
70							
71							
72							
73							
74							
75							
76							
77							
78							
79							
80							
81							
82							
83							
84							
85							
86							
87							
88							

	V	W	X	Y	Z	AA	AB
89							
90							
91							
92							
93							
94							
95							
96							
97							
98							
99							
100							
101							
102							
103							
104							
105							
106							
107							
108							
109							
110							
111							
112							
113							
114							
115							
116							
117							
118							
119							
120							
121							
122							
123							
124							
125							
126							
127							

	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
1	14.5	15	15.5	16	17	18	19
2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	11	2
9	2	2	2	2	2	2	11
10	5	6	6	11	5	11	11
11	5	5	5	5	4	8	9
12	8	8	8	8	9	9	9
13	11	9	11	9	9	9	9
14	9	9	9	9	9	9	9
15	9	9	9	9	9	9	9
16	9	9	9	9	9	9	9
17	9	9	9	9	9	9	9
18	9	9	9	9	9	9	9
19	9	9	9	9	9	9	2
20	9	9	9	9	9	9	2
21	9	9	9	9	2	2	2
22	9	9	9	2	2	2	2
23	9	2	2	2	2	2	2
24	2	2	2	2	2	2	2
25	2	2	2	2	2	2	2
26	2	2	2	2	2	2	2
27	2	2	2	2	2	2	2
28	2	2	2	2	2	2	2
29	2	2	2	2	2	2	2
30	2	2	2	2	2	2	10
31	2	2	2	2	2	2	10
32	2	2	2	2	10	10	2
33	2	2	2	10	10	10	2
34	2	10	10	10	2	2	2
35	10	10	10	2	10	2	10
36	10	2	2	10	10	10	10
37	2	10	10	10	10	10	10
38	10	10	10	10	10	10	10
39	10	10	10	10	10	10	10
40	10	10	10	10	10	10	10
41	10	10	10	10	10	10	
42	10	10	10	10	10	10	
43	10	10	10	10			
44	10	10	10				

	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
45	10						
46							
47							
48							
49							
50							
51							
52							
53							
54							
55							
56							
57							
58							
59							
60							
61							
62							
63							
64							
65							
66							
67							
68							
69							
70							
71							
72							
73							
74							
75							
76							
77							
78							
79							
80							
81							
82							
83							
84							
85							
86							
87							
88							

	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
89							
90							
91							
92							
93							
94							
95							
96							
97							
98							
99							
100							
101							
102							
103							
104							
105							
106							
107							
108							
109							
110							
111							
112							
113							
114							
115							
116							
117							
118							
119							
120							
121							
122							
123							
124							
125							
126							
127							

	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
1	20	21	22	31	32	35	46
2	2	2	11	2	11	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	11	9
7	2	2	2	2	2	9	9
8	2	2	2	9	9	9	9
9	11	9	9	9	9	9	9
10	9	9	9	9	9	11	11
11	9	9	9	9	9	9	2
12	9	9	9	9	9	9	2
13	9	9	11	9	9	11	11
14	9	9	9	2	2	2	11
15	9	9	9	2	2	2	2
16	9	2	2	2	2	2	2
17	2	2	2	2	2	2	2
18	2	2	2	2	2	2	2
19	2	2	2	2	2	2	2
20	2	2	11	2	2	2	2
21	2	2	2	2	2	2	2
22	2	2	2	2	2	2	2
23	2	2	2	2	2	2	2
24	2	2	2	10	10	2	2
25	2	2	2	2	2	2	2
26	2	2	2	2	2	2	
27	2	10	10	2	2	2	
28	10	2	2	2	2	2	
29	2	2	2	2	2	11	
30	2	2	2	10	11		
31	2	2	2	10	10		
32	2	2	2	10	11		
33	10	10	10	11	11		
34	10	10	10	10			
35	10	10	10				
36	10	10	10				
37	10	10	10				
38	10						
39							
40							
41							
42							
43							
44							

	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
45							
46							
47							
48							
49							
50							
51							
52							
53							
54							
55							
56							
57							
58							
59							
60							
61							
62							
63							
64							
65							
66							
67							
68							
69							
70							
71							
72							
73							
74							
75							
76							
77							
78							
79							
80							
81							
82							
83							
84							
85							
86							
87							
88							

	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
89							
90							
91							
92							
93							
94							
95							
96							
97							
98							
99							
100							
101							
102							
103							
104							
105							
106							
107							
108							
109							
110							
111							
112							
113							
114							
115							
116							
117							
118							
119							
120							
121							
122							
123							
124							
125							
126							
127							

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW
1	49	55	61	75	83	94	95
2	2	2	11	2	11	2	11
3	2	2	2	2	2	11	2
4	2	2	2	11	11	2	2
5	2	2	11	2	11	2	2
6	11	11	11	2	2	2	11
7	9	11	2	2	2	2	2
8	11	11	2	2	2	2	
9	9	2	2	2	2		
10	11	2	2	2	2		
11	2	2	2	11			
12	2	2	2	2			
13	2	2	2				
14	2	2	11				
15	2	2	2				
16	2	2	2				
17	2	2					
18	2	2					
19	2	2					
20	2						
21	2						
22	2						
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							
41							
42							
43							
44							

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW
45							
46							
47							
48							
49							
50							
51							
52							
53							
54							
55							
56							
57							
58							
59							
60							
61							
62							
63							
64							
65							
66							
67							
68							
69							
70							
71							
72							
73							
74							
75							
76							
77							
78							
79							
80							
81							
82							
83							
84							
85							
86							
87							
88							

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW
89							
90							
91							
92							
93							
94							
95							
96							
97							
98							
99							
100							
101							
102							
103							
104							
105							
106							
107							
108							
109							
110							
111							
112							
113							
114							
115							
116							
117							
118							
119							
120							
121							
122							
123							
124							
125							
126							
127							

	AX	AY	AZ	BA	BB
1	111	129	137	146	186
2	2	2	2	2	11
3	2	11	11	11	
4	2	2	2		
5	2	2			
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					

A.2. Distribución de la media y su desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts de los 11 materiales considerados en el cuadro 3.3

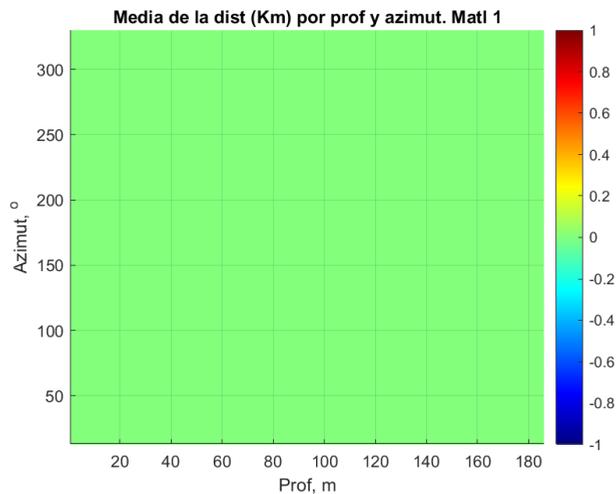


Figura A.1. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 1 considerado en el cuadro 3.3

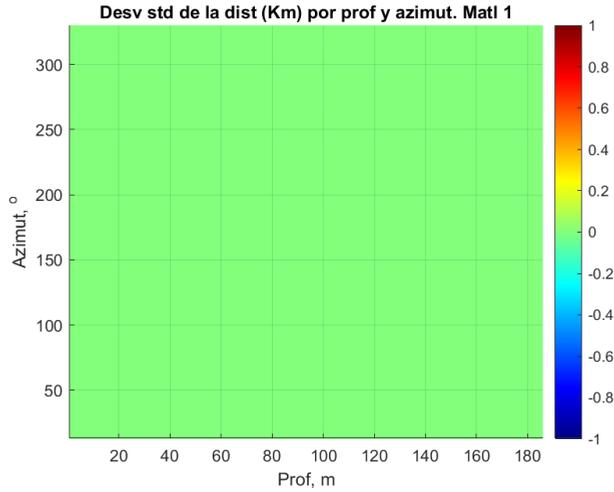


Figura A.2. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 1 considerado en el cuadro 3.3

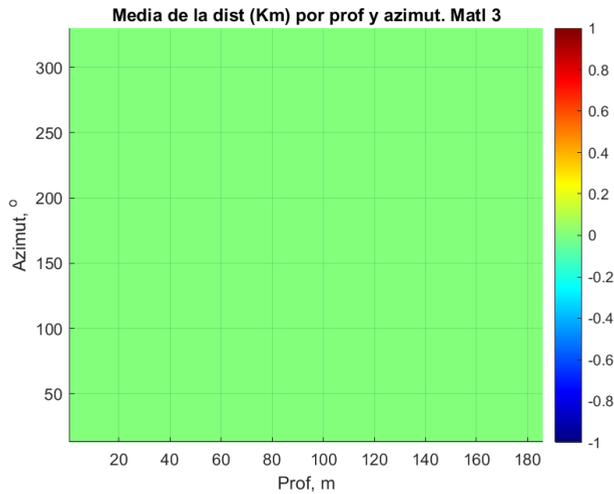


Figura A.3. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 3 considerado en el cuadro 3.3

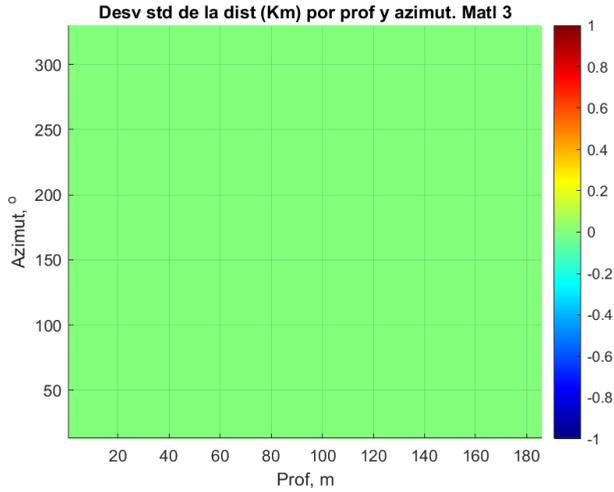


Figura A.4. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 3 considerado en el cuadro 3.3

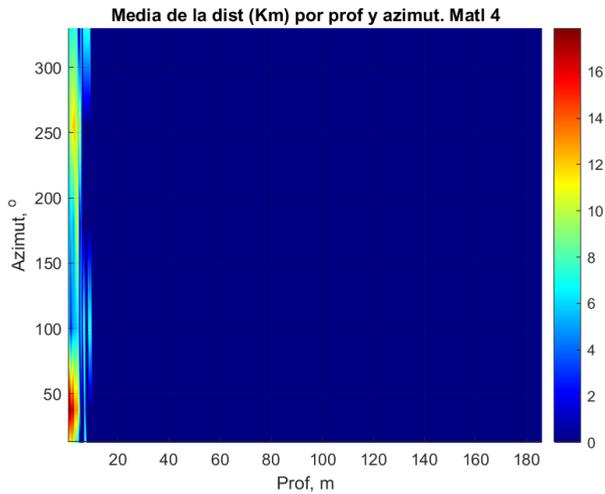


Figura A.5. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 4 considerado en el cuadro 3.3

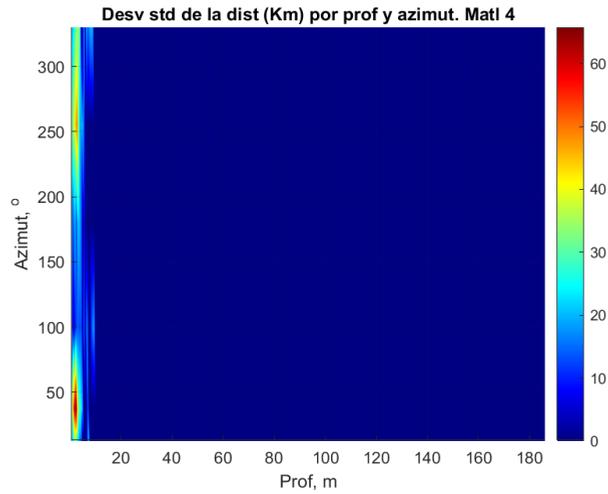


Figura A.6. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 4 considerado en el cuadro 3.3

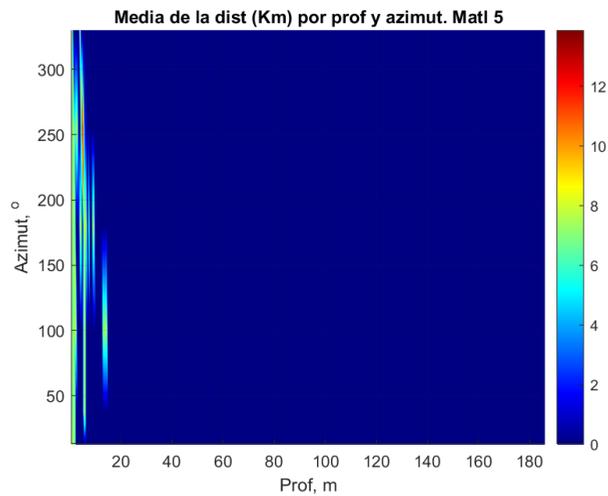


Figura A.7. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 5 considerado en el cuadro 3.3

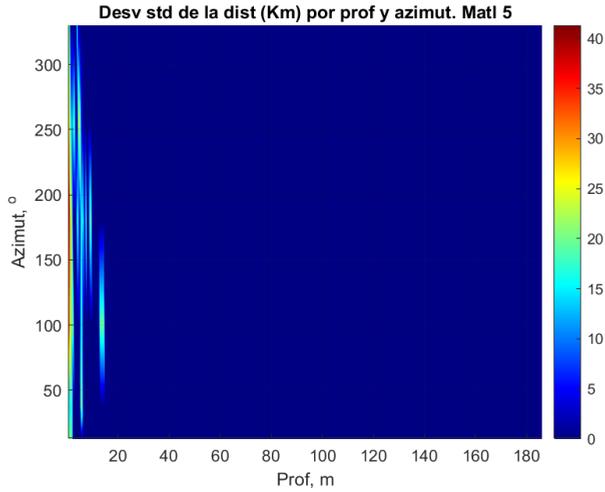


Figura A.8. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 5 considerado en el cuadro 3.3

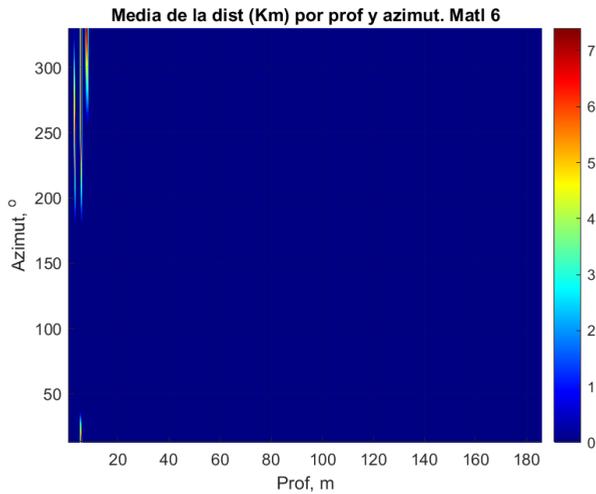


Figura A.9. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 6 considerado en el cuadro 3.3

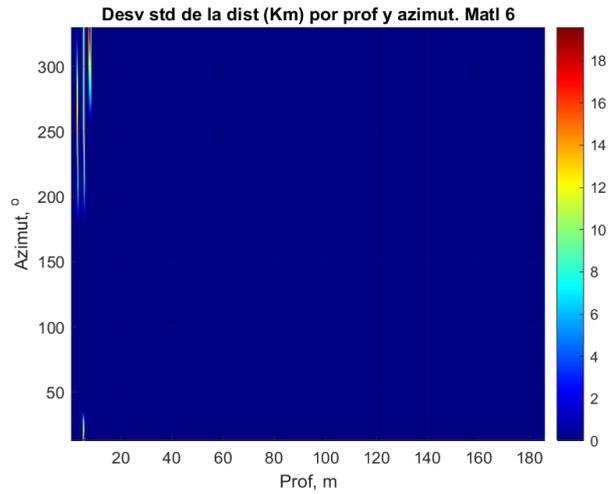


Figura A.10. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 6 considerado en el cuadro 3.3

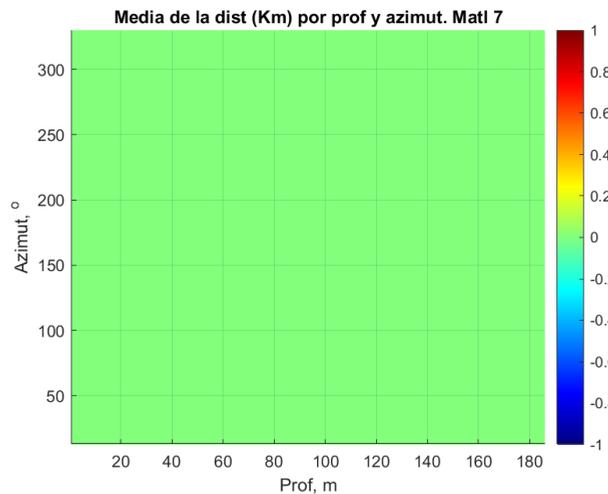


Figura A.11. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 7 considerado en el cuadro 3.3

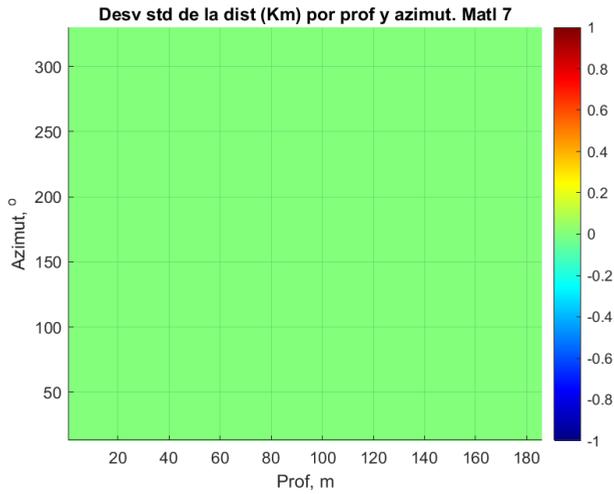


Figura A.12. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 7 considerado en el cuadro 3.3

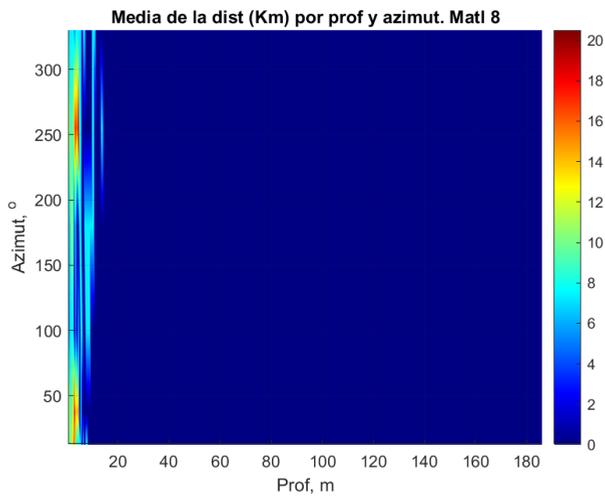


Figura A.13. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 8 considerado en el cuadro 3.3

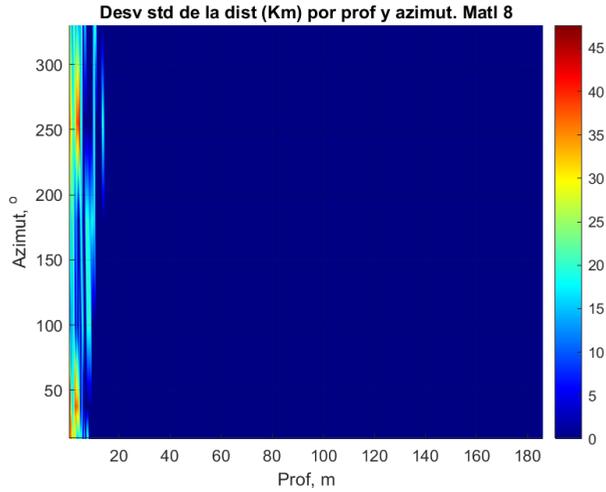


Figura A.14. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 8 considerado en el cuadro 3.3

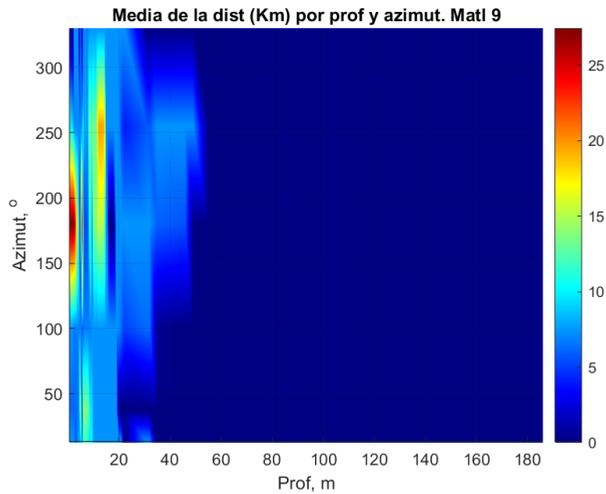


Figura A.15. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 9 considerado en el cuadro 3.3

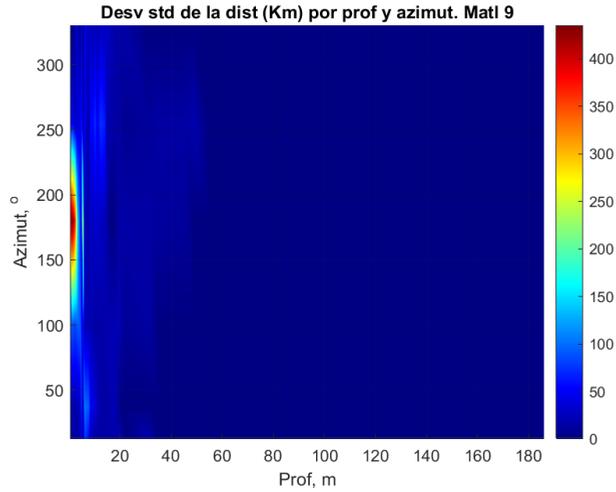


Figura A.16. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 9 considerado en el cuadro 3.3

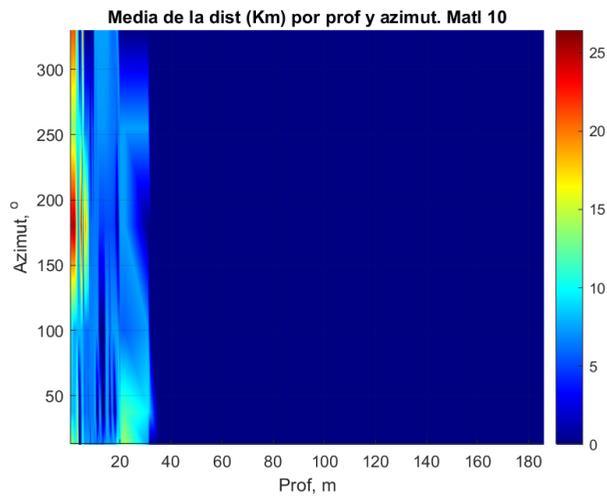


Figura A.17. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 10 considerado en el cuadro 3.3

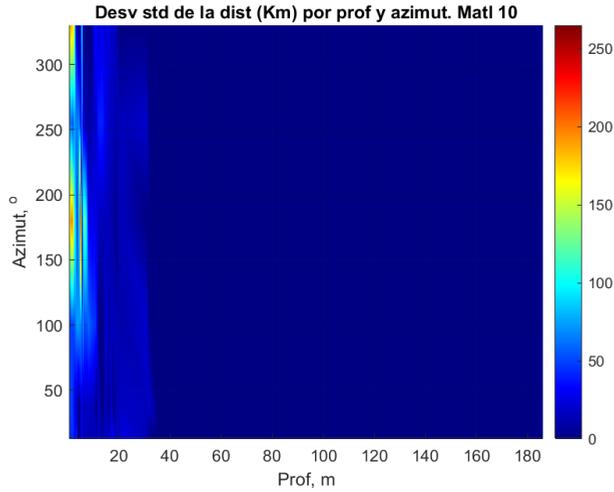


Figura A.18. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 10 considerado en el cuadro 3.3

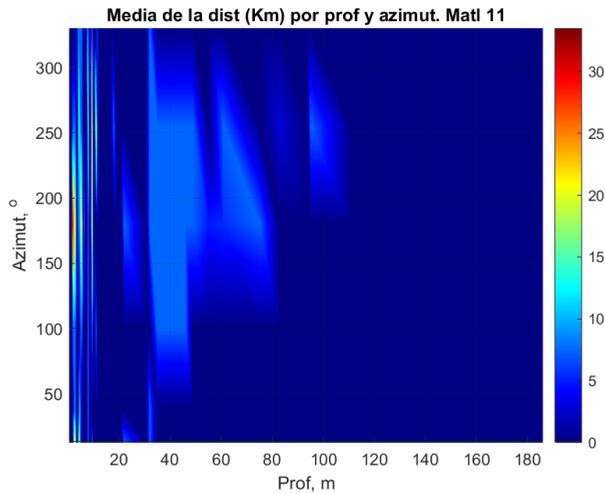


Figura A.19. Distribución de la media de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 11 considerado en el cuadro 3.3

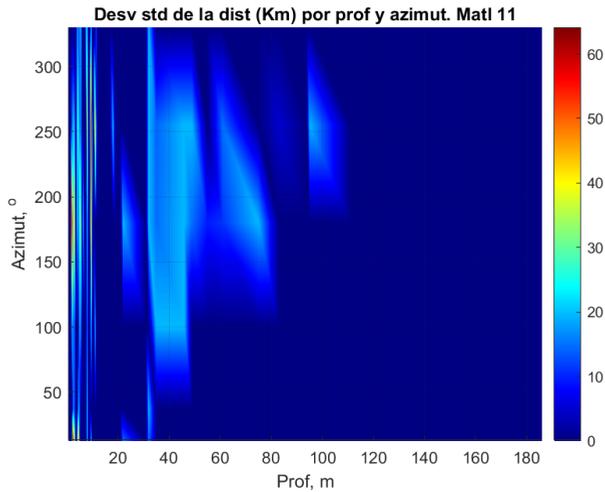


Figura A.20. Distribución de la desviación estándar de frecuencias acumuladas con respecto a distancias y azimuts del material 11 considerado en el cuadro 3.3

A.3. Periodos fundamentales (s) y máximas aceleraciones del terreno (g), así como el periodo estructural con la mayor aceleración absoluta espectral (g) de los sondeos estudiados

Sondeo	LATITUD	LONGITUD	Frecuencia fundamental del suelo (Hz)	Periodo fundamental del suelo (s)	Máxima aceleración del terreno (g)	Periodo estructural con mayor aceleración absoluta (s)	Aceleración absoluta del periodo estructural anterior (g)
STPJ-002	17.0539361	-96.707253	8.1	0.12	0.4	0.12	2.1
STPJ-007	17.05023889	-96.71427222	8.7	0.11	0.43	0.11	2
STPJ-008	17.04975	-96.714361	17.8	0.06	0.2	0.11	0.6
STPJ-011	17.02923333	-96.723825	20.6	0.05	0.2	0.11	0.5
SPFF-001	16.92249444	-96.80909722	1.4	0.73	0.29	0.68	1.5
SPFF-002	16.93011111	-96.80099444	1.2	0.82	0.25	0.73	1
SPFF-004	16.9477389	-96.785986	0.4	2.37	0.14	2.23	0.6
SPFF-005	16.9553639	-96.776219	6.5	0.15	0.33	0.15	1.9
SPFF-006	16.9637	-96.766697	0.4	2.69	0.12	2.37	0.5
SPFF-007	16.9737056	-96.764786	8.4	0.12	0.46	0.11	2.2
SPFF-008	16.9737056	-96.756453	0.5	1.82	0.19	0.42	0.5
SPFF-009	16.9958611	-96.721197	2.2	0.46	0.39	0.42	1.8
SPFF-010	16.9937139	-96.7343	0.9	1.07	0.22	0.93	0.7
SEVR-101	16.84657778	-96.72575833	14.3	0.07	0.26	0.07	1.4
SEVR-102	16.83265278	-96.70303333	44.5	0.02	0.18	0.42	0.5
SEVR-103	16.83039722	-96.69935278	17.4	0.06	0.2	0.11	0.6
SEVR-104	16.8272	-96.69413611	7.8	0.13	0.35	0.13	2
SEVR-105	16.81658611	-96.67681944	29.5	0.03	0.18	0.42	0.5
SEVR-201	16.80923056	-96.753825	6.2	0.16	0.35	0.17	1.9
SEVR-202	16.80620278	-96.73781944	10.9	0.09	0.32	0.09	1.9
SEVR-203	16.80229444	-96.71718056	13.5	0.07	0.28	0.07	1.4
SEVR-204	16.79943333	-96.702075	16.1	0.06	0.22	0.06	0.8
SEVR-205	16.79615556	-96.68479167	20.2	0.05	0.2	0.11	0.6
SEVR-206	16.79258333	-96.66595833	16.2	0.06	0.23	0.06	0.8
SERV-207	16.79163889	-96.66097222	15.2	0.07	0.24	0.07	1

SERV-208	16.78865	-96.64523056	11.5	0.09	0.31	0.09	1.8
SERV-209	16.786125	-96.63193611	10.8	0.09	0.33	0.09	1.8
SERV-210	16.78309167	-96.61594444	13.30	0.08	0.27	0.07	1.1
SERV-211	16.78005556	-96.59998333	18.50	0.05	0.27	0.11	0.6
SEVR-212	16.77684444	-96.58308333	5.70	0.17	0.37	0.17	2.5
SEVR-301	16.75983889	-96.78448611	10.7	0.09	0.37	0.09	1.8
SEVR-302	16.75199167	-96.76776111	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SEVR-303	16.74884444	-96.76105833	33.8	0.03	0.18	0.42	0.5
SEVR-304	16.74760556	-96.75841944	26.3	0.04	0.19	0.42	0.5
SEVR-305	16.73871111	-96.73947222	17.3	0.06	0.21	0.11	0.6
SEVR-306	16.730875	-96.72278611	24	0.04	0.19	0.42	0.5
SEVR-307	16.72427222	-96.70873611	3.7	0.27	0.39	0.29	1.7
SEVR-308	16.72081389	-96.701375	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SEVR-309	16.71636389	-96.71636389	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SEVR-310	16.70910833	-96.67646389	33.2	0.03	0.18	0.42	0.5
SEVR-311	16.69448889	-96.64536389	26.3	0.04	0.19	0.42	0.5
SEVR-402	16.83278611	-96.69880833	2	0.51	0.33	0.5	1.4
SEVR-403	16.82606944	-96.6972	1.7	0.58	0.32	0.6	1.5
SEVR-404	16.81706111	-96.69503889	2	0.51	0.33	0.5	1.4

SEVR-405	16.80231667	-96.69150278	2.5	0.4	0.45	0.42	2.4
SEVR-406	16.78302778	-96.68687778	5.2	0.19	0.33	0.17	1.9
SEVR-407	16.75770833	-96.68080833	1.7	0.58	0.32	0.6	1.5
SEVR-F01	16.92249444	-96.80909722	2.7	0.37	0.48	0.42	1.9
SEVR-F02	16.93011111	-96.80099444	1.1	0.89	0.22	0.88	1
SEVR-F03	16.93845	-96.79409167	0.3	2.93	0.06	2.37	0.3
SEVR-F04	16.94773889	-96.78598611	0.8	1.33	0.18	0.42	0.7
SEVR-F05	16.95536389	-96.77621944	0.9	1.11	0.18	0.93	0.6
SEVR-F06	16.9637	-96.76669722	1.7	0.58	0.29	0.6	1.4
SEVR-F07	16.97370556	-96.76478611	2.8	0.35	0.36	0.35	1.6
SEVR-F08	16.97370556	-96.75645278	4.8	0.21	0.36	0.21	1
SEVR-F09	16.99586111	-96.72119722	0.6	1.55	0.16	0.42	0.5
SEVR-F10	16.99371389	-96.7343	0.6	1.56	0.15	0.42	0.5
SEVR-F11	16.97370546	-96.75645278	0.4	2.24	0.13	2.23	0.7
SERV-F12	16.99586211	-96.72119722	0.4	2.24	0.13	2.23	0.7
SERV-F13	16.99471389	-96.7343	0.5	2.18	0.14	2.23	0.6
SEVR-G01	16.88365833	-96.80099722	0.2	4.2	0.08	0.68	0.68
SEVR-G02	16.89938333	-96.79218333	0.3	3.41	0.06	0.93	0.2
SEVR-G03	16.90033333	-96.78075	0.3	3.41	0.07	0.93	0.2
SEVR-G04	16.90343333	-96.77002778	0.4	2.56	0.1	2.37	0.5
SEVR-G05	16.90676389	-96.75907222	0.6	1.69	0.14	0.42	0.4
SEVR-G06	16.91152778	-96.74930556	0.5	2.1	0.13	2.23	0.6
SEVR-G07	16.91486111	-96.73715833	0.3	3.64	0.07	0.68	0.2
SEVR-H01	17.01634167	-96.70595278	14.7	0.07	0.25	0.07	1.4
SEVR-H02	17.02062778	-96.70095278	4.8	0.21	0.31	0.21	1.5
SEVR-H03	17.02777778	-96.70214167	4.8	0.21	0.32	0.21	1.5
SEVR-H04	17.03254167	-96.705475	4.8	0.21	0.31	0.21	1.5
SEVR-H05	17.04421667	-96.70976389	4.8	0.21	0.32	0.21	1.5
SEVR-H06	17.048975	-96.710475	4.8	0.21	0.32	0.21	1.5
SP03-001	17.0824139	-96.718222	4.3	0.23	0.31	0.25	1.1
SP05-001	17.0635028	-96.709042	4.3	0.21	0.32	0.25	1.2
SP07-001	17.0644528	-96.725164	43.7	0.02	0.18	0.42	0.5
SP09-001	17.064225	-96.702506	8.1	0.12	0.39	0.12	2
SP11-001	17.0537083	-96.709706	3.7	0.27	0.35	0.29	1.5
SP21-001	17.0938583	-96.698958	38.1	0.03	0.18	0.42	0.5
SP23-001	17.0955556	-96.714078	35.8	0.03	0.18	0.42	0.5
SP24-001	17.0946972	-96.716511	23.4	0.04	0.2	0.42	0.5
SP25-001	17.0880028	-96.718831	9.1	0.11	0.51	0.11	3.3
SP29-001	17.07858889	-96.71630556	42.6	0.02	0.18	0.42	0.5
SP30-001	17.0853167	-96.718467	35.2	0.2	0.18	0.42	0.5
SP31-001	17.0785889	-96.716306	8.9	0.11	0.5	0.11	2.8
SP34-001	17.0947833	-96.751472	22.9	0.04	0.2	0.42	0.5

SP36-001	17.0710222	-96.760333	34	0.03	0.2	0.42	0.5
SP38-001	17.0647278	-96.762033	27	0.04	0.18	0.42	0.5
SP39-001	17.0669333	-96.761472	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SP45-001	17.0567917	-96.734761	7.5	0.11	0.35	0.1	2.6
SP46-001	17.0582139	-96.742519	7.9	0.11	0.5	0.11	2.8
SP51-001	17.0685333	-96.720081	11.9	0.08	0.28	0.08	16
SP52-001	17.0604833	-96.724903	29	0.03	0.18	0.42	0.5
SP53-001	17.0585417	-96.720211	22.4	0.04	0.2	0.11	0.5
SP54-001	17.0580806	-96.724894	10.8	0.09	0.3	0.11	1.5
SP56-001	17.0596361	-96.716244	18	0.06	0.19	0.11	0.6
SP57-001	17.0720083	-96.713606	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SP58-001	17.0704917	-96.712694	18	0.06	0.19	0.11	0.6
SP60-001	17.0601	-96.713317	13	0.08	0.24	0.08	0.9
SP61-001	17.0636972	-96.709528	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SP62-001	17.0622056	-96.710089	21	0.05	0.19	0.11	0.5
SP63-001	17.06255	-96.708761	8	0.13	0.3	0.12	1.3
SP64-001	17.0695472	-96.705858	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SP66-001	17.0636972	-96.704614	19	0.05	0.2	0.11	0.6
SP69-001	17.06615	-96.69955	0.4	2.37	0.06	2.23	0.3
SP70-001	17.0691917	-96.675517	18.1	0.06	0.2	0.11	0.6
SP79-001	17.0420778	-96.692578	50	0.02	0.18	0.42	0.5
SP93-001	17.0292417	-96.728606	6.3	0.16	0.35	0.17	1.8