



Tesis para la obtención del grado de
Master en
Ingeniería Estructural y Sísmica

**INCORPORACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO A LOS ESPECTROS
DE PELIGRO UNIFORME APLICABLES EN LA CIUDAD DE
MAZATLÁN, SINALOA MÉXICO.**

Elaborado por

Autor de tesis: Ing. Héctor Enrique Rodríguez Lozoya.

Tutor de Tesis: Dr. Armando Aguilar Meléndez

Managua Nicaragua enero 2024



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Agradecimientos:

A mi familia, al Dr. Armando Aguilar y A todos los que me motivaron a seguir en este proyecto de vida.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

RESUMEN

Una forma representativa de estimar el peligro sísmico en un asentamiento, es mediante estudios de peligro sísmico. Hay métodos para determinar el Peligro Sísmico, dichos métodos son el determinístico y el Probabilístico. Este estudio utilizó el método probabilístico (PSHA). Sinaloa, ubicado en la región tectónica del Golfo de California, dicha región se localiza en el cinturón de fuego, aquí se ubica Mazatlán Sinaloa, donde las condiciones del suelo son complejas.

Las normativas sugieren el uso de acciones sísmicas regionales, estas acciones ignoran el efecto de sitio. El presente estudio, es un estudio en el cual las acciones sísmicas son de carácter local y además tendrán la contribución del efecto del sitio que es lo que no se ha atendido adecuadamente por las normativas antes mencionadas. Dichas acciones sísmicas fueron representadas mediante el espectro de diseño propuesto por MOC-CFE-2015 que originalmente se define sobre suelo rocoso, aquí fueron estimados los efectos de sitio en catorce sitios distribuidos en la costa mazatleca, estos efectos de sitio fueron incorporados a los espectros de diseño obtenidos en roca. El periodo de retorno considerado fue de 475 años es decir una tasa de excedencia del 10% en 50 años.

De los resultados pudo ser estimado, que la diferencia entre las ordenadas espectrales considerando suelo rocoso y suelos sobre roca es arriba del 15%, lo anterior confirma que diseñar sin considerar los efectos de sitio puede ser del lado de la inseguridad.

Palabras claves: MOC-2015, CFE-2015, Espectros de diseño, Efectos de Sitio, Mazatlán, Sinaloa



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

ABSTRACT

A representative way to estimate the seismic hazard in a settlement is through seismic hazard studies. There are methods to determine the Seismic Hazard of a place, these methods are deterministic and probabilistic. This study used the probabilistic method (PSHA). Sinaloa, located in the tectonic region of the Gulf of California, this region is located in the ring of fire, here is located Mazatlán Sinaloa, where the soil conditions are complex.

Regulations suggest the use of regional seismic actions, these actions ignore the site effect. The present study is a study in which the seismic actions are of a local nature and will also have the contribution of the effect of the site, which is what has not been adequately addressed by the aforementioned regulations. These seismic actions were represented by the design spectrum proposed by MOC-CFE-2015 that is originally defined on rock, here the site effects were estimated at fourteen sites distributed on the Mazatlán coast, these site effects were incorporated into the design spectra obtained in rock. The return period considered was 475 years, i.e. an exceedance rate of 10% in 50 years.

From the results it could be estimated that the difference between the spectral ordinates considering rock and soils on rock is above 15%, which confirms that designing without considering site effects can be on the side of insecurity.

Key words: MOC-2015, CFE-2015, design spectrum, site effects, Mazatlán, Sinaloa



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

INDICE GENERAL

CAPITULO 1. INTRODUCCION	10
1.1 ANTECEDENTES.....	13
1.2. PLANTEAMIENTO SITUACIONAL	14
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.4. OBJETIVOS.....	15
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
1.5. JUSTIFICACION.....	16
CAPITULO II: MARCO TEORICO.....	17
2.1 CONCEPTOS DEL RIESGO SISMICO	17
2.2 FUENTES SISMICAS.....	21
2.2.1 GEOMETRIA DE LA FUENTE SISMICA.....	21
2.2.2 SISMICIDAD DE LA FUENTE SISMICA.....	23
2.2.3 MODELO DE GUTENBERG-RITCHER	24
2.3 LEYES DE ATENUACION.....	27
2.4 EVALUACION PROBABILISTICA DEL PELIGRO SISMICO	28
2.5 REGISTROS SISMICOS.....	30
2.6 ACELEROGRAMAS ARTIFICIALES	31
2.7 EL SUELO EN EL SITIO EN ESTUDIO.....	35
2.7.1 EFECTOS DE SITIO.	36
2.7.1.2 METODO LINEAL EQUIVALENTE.	37
2.8 FORMA ESPECTRAL SEGÚN CFE-2015	40
CAPITULO 3. DISEÑO METODOLOGICO	41
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	41
3.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	41
3.3 CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
3.4 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO TECTÓNICO Y GEOTÉCNICO DE LOS SITIOS EN ESTUDIO.	42
3.4.1 ENTORNO TECTÓNICO	42



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

3.4.2 ENTORNO GEOTÉCNICO.....	44
3.4.3 CATEGORÍAS DE ESTUDIO	45
3.5 POBLACIÓN Y MUESTRA	49
3.5.1. POBLACION	49
3.5.2 MUESTRA.....	49
3.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	53
3.7 PROCEDIMIENTO.	58
CAPITULO 4. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS PRINCIPALES HALLAZGOS	60
4.1 FUENTES SÍSMICAS UTILIZADAS.....	60
4.1.2 FUENTES SÍSMICAS Y PARÁMETROS DE SISMICIDAD.	63
4.1.3 LEYES DE ATENUACIÓN.	65
CAPITULO 5. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO EN LA CIUDAD DE MAZATLÁN SINALOA SIN CONSIDERAR LOS EFECTOS DE SITIO. 67	
5.1 RESULTADOS PARA SUELO ROCOSO	67
CAPITULO 6. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO EN LA CIUDAD DE MAZATLÁN SINALOA CONSIDERANDO LOS EFECTOS DE SITIO. .. 76	
6.1 REGISTRO SÍSMICO EN ROCA Y PROPIEDADES DEL SUELO EN CADA SITIO EN ESTUDIO.....	77
6.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL PELIGRO SÍSMICO EN CADA SITIO EN ESTUDIO (CON EFECTOS DE SITIO).....	80
CAPITULO 7: PROPUESTA DE SOLUCION	85
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES.....	86
CAPITULO XI: RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS.....	88
APENDICE A.....	97
APENDICE B.....	109
B1. Breve descripción del programa CRISIS2015.....	110



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Distintas formas de definir la distancia fuente-sitio.	199
Tabla 2 Ubicación geográfica de cada sitio	466
Tabla 3 MZ1 (Rodríguez Lozoya (2021))	50
Tabla 4 MZ2 (Sand Storm Gam(2021)).....	51
Tabla 5 MZ3 (Lazcano Diaz (2018)).	51
Tabla 6 MZ4 (Sand Storm Gam(2020)).....	51
Tabla 7 Resumen de métodos aplicados en cada sitio para definir la velocidad de onda de corte.	522
Tabla 8 Parámetros de fuentes sísmicas que se rigen según el modelo G-R (CFE-2015).....	63
Tabla 9 Parámetros sísmicos para fuentes que se rigen según el modelo del temblor característico (CFE-2015).	65
Tabla 10 Leyes de Atenuación y sus parámetros.....	66
Tabla 11 Ordenadas espectrales obtenidas en cada sitio.	844
Tabla 12 MZ5 (Lazcano Díaz (2020)), * en Apéndice.	988
Tabla 13 MZ6 (Propia, Cociente espectral), *en Apéndice.....	988
Tabla 14 MZ7 (Zamudio Zavala (2016)), *en Apéndice.....	999
Tabla 15 MZ8 (Aguilar Valdez (2023)), *en Apéndice.	999
Tabla 16 MZ9 (Subterra (2022)), *en Apéndice.....	100
Tabla 17 MZ10 (Propia, Cociente espectral), *en Apéndice.....	100
Tabla 18 MZ11 (Propia Cociente espectral), *en Apéndice.....	100
Tabla 19 MZ12 (Rodríguez Lozoya (2021)), *en Apéndice	101
Tabla 20 MZ13 (Rodríguez Lozoya (2023), *en Apéndice.....	101
Tabla 21 MZ14 (Zamudio Zavala (2019), *en Apéndice	101



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distintas formas de definir la distancia fuente-sitio (Kramer, S.L.,1996).	18
Figura 2 Formas geométricas utilizadas para representar la fuente sísmica.	22
Figura 3 Función de intensidad constante y amplitud unitaria	34
Figura 4 Acelerogramas Artificial obtenido con seismoartif.....	35
Figura 5 Curvas de degradación del módulo de corte y Amortiguamiento con la velocidad de onda de corte (Seed and Idriss(1971)).	39
Figura 6 Ejemplo de la forma espectral según CFE-2015	40
Figura 7 Entorno tectónico de la zona de estudio, sistema de fallas del golfo de California(Línea Naranja).....	43
Figura 8 Entorno tectónico en zona de estudio, Fallas cercanas (Línea roja) y sitios de estudio. 43	
Figura 9 Geología del Municipio de Mazatlán Sinaloa (INEGI,2010).	44
Figura 10 Edificaciones en el sitio MZ1	47
Figura 11 Edificación en el sitio MZ3	47
Figura 12 Edificación en el sitio MZ4	48
Figura 13 Edificación en el sitio MZ9	48
Figura 14 Acelerógrafo Etna 2 Kinematics	53
Figura 15 Registrando Vibración Ambiental.....	54
Figura 16 Función de transferencia en un sitio.	55
Figura 17 Equipo para realizar perfiles de refracción sísmica.....	56
Figura 18 Trabajo de campo para realizar perfiles de refracción sísmica	57
Figura 19 Perfil de refracción sísmica en un sitio.....	58
Figura 20 Geometría de fuentes corticales CFE-2015.....	61
Figura 21 Geometría de fuentes de subducción (magnitudes moderadas) CFE-2015.....	61
Figura 22 Geometría de fuentes de profundidad intermedia (CFE-2015)	62
Figura 23 Geometría de fuentes de subducción (magnitudes altas) CFE-2015.....	62
Figura 24 Localización de sitios en estudio.....	69
Figura 25 Fuentes utilizadas	70
Figura 26 Ley de atenuación utilizada.	71
Figura 27 Resultados del análisis de riesgo sísmico en el sitio MZ1	72
Figura 28 Resultados del análisis del riesgo sísmico en el sitio MZ5	72
Figura 29 Resultados del análisis de riesgo sísmico en el sitio MZ14	73
Figura 30 Resultados del análisis de riesgo sísmico mediante el espectro de diseño en sitio MZ1	74
Figura 31 Resultados del análisis de riesgo sísmico mediante el espectro de diseño en sitio MZ5	74
Figura 32 Resultados del análisis de riesgo sísmico mediante el espectro de diseño en sitio MZ14	75
Figura 33 Registro sísmico artificial.....	77



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 34 Perfil de onda de corte (Vs) en sitio MZ10	78
Figura 35 Curvas de degradación del módulo de corte y Amortiguamiento con la deformación angular (Seed and Idriss (1971))......	79
Figura 36 Registro sísmico con efectos de sitio en MZ1	80
Figura 37 Registro sísmico con efectos de sitio en MZ5.....	802
Figura 38 Registro sísmico con efectos de sitio en MZ14.....	802
Figura 39 Comparativa espectral en sitio MZ1 Crisis2015 vs CFE-2015	823
Figura 40 Comparativa espectral en sitio MZ5 Crisis2015 vs CFE-2015.....	823
Figura 41 Comparativa espectral en sitio MZ14 Crisis2015 vs CFE-2015	834
Figura 42 Edificaciones en sitio MZ5.....	1023
Figura 43 Edificaciones en sitio MZ8.....	1034
Figura 44 Edificaciones en sitio MZ10.....	1045
Figura 45 Edificaciones en sitio MZ11.....	1056
Figura 46 Edificaciones en sitio MZ12.....	1067
Figura 47 Edificaciones en sitio MZ13.....	1078
Figura 48 Edificaciones en sitio MZ14.....	1089
Figura 49 Mapas y Sitios, *en Apendice	1111
Figura 50 Polígonos y mallas, *en Apendice.....	1122
Figura 51 Mapa con delimitación correcta del área (izq.) y mapa con delimitación incorrecta del área (der.),*en Apendice	1133
Figura 52 Fuentes Sísmicas, geometría y parámetros,* en Apendice	1133
Figura 53 Fuentes sísmicas y graficas de sismicidad,* en Apendice	1144
Figura 54 Fuentes sísmicas y Leyes de atenuación,* en Apendice.	1155
Figura 55 Parámetros espectrales,*en Apendice	1166
Figura 56 Parámetros globales,*en Apendice.....	1177
Figura 57 Mapas de peligro sísmico(a), Curvas de peligro sísmico(b) y espectros de peligro uniforme(c),*en Apendice	1188
Figura 58 Método de análisis ,perfil de suelo y señal sísmica a propagar,*en Apendice.....	1199
Figura 59 Perfil de suelo y propiedades de los estratos,*en Apendice.....	12020
Figura 60 Señal sísmica a propagar,*en Apendice	1211
Figura 61 Detalles del análisis,*en Apendice	1222
Figura 62 Respuesta en superficie o en alguna capa intermedia del perfil de suelo,*en Apendice	1233



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Los sismos o terremotos producen vibraciones súbitas o bruscas del suelo, estos pueden ser generados de distintas maneras, ello depende de su fuente de origen. Por ejemplo, los sismos pueden ser de origen natural como los provocados por la interacción dinámica de las placas tectónicas, los de origen artificial son los provocados por una gran explosión o evento similar. Ocasionalmente, algunos sismos de origen tectónico causan daños a las estructuras civiles. Dicho daño puede deberse a efectos asociados a los sismos como son, por ejemplo, la amplificación dinámica del suelo, la licuación, así como el deslizamiento de taludes. En el presente trabajo los sismos considerados como la acción sobre las estructuras, son sismos de origen tectónico.

Las placas tectónicas que componen la litosfera, tienen un comportamiento dinámico, este comportamiento produce desplazamientos relativos e interacción entre dichas placas, lo que genera energía, cuando dicha energía supera la resistencia de los materiales que componen las placas mencionadas, se produce liberación súbita de energía, esto, se trasmite en formas de ondas que son las encargadas de propagar dicha energía, este proceso puede repetirse después de cierto tiempo, lo anterior fue la base que permitió establecer la conocida teoría del rebote elástico propuesta por Reid en 1906.

Desde el punto de vista de la ingeniería sísmica, los llamados análisis de peligro sísmico son la forma más representativa de estimar el nivel de peligro al que estará expuesto un asentamiento humano, mediante dichos análisis puede ser estimado con que probabilidad un evento sísmico de alguna intensidad, puede ocurrir en una región en particular en un periodo específico de tiempo.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

También con este tipo de análisis se puede estimar la frecuencia media anual en que una intensidad sísmica puede ser excedida. Actualmente existen dos métodos para determinar el Peligro Sísmico de un lugar de interés, estos son el método determinístico y el método Probabilístico.

En este estudio será empleado el método de análisis de peligro sísmico probabilístico (PSHA), este viene a complementar al método determinístico ya que este último, no considera la variabilidad y comportamiento aleatorio de los eventos sísmicos, así como tampoco las incertidumbres de dicho fenómeno. El PSHA, aplica la metodología propuesta por Cornell (1968), la cual se desarrolla mediante la representación adecuada de la actividad sísmica de la zona en estudio y la elección de alguna relación entre la amplitud del movimiento del suelo o de la respuesta estructural, alguna medida del sismo (magnitud o intensidad) y la distancia entre el foco y la distancia de interés, todas estas consideraciones aplicando teoría de probabilidades.

Los países cuya tasa de actividad sísmica es de moderada a alta, entre los cuales está México, son los que actualmente están realizando estudios de peligro sísmico como el que se planea desarrollar en este proyecto de tesis. En México las fuentes generadoras de su actividad sísmica son la placa Pacífico, la del Caribe, la de Rivera, la de Cocos y la placa de Norteamérica, geográficamente México tiene dos regiones tectónicas sísmicamente activas, al noroeste la conocida zona de transcurrencia del Golfo de California, varias investigaciones sobre la sismicidad generada en esta provincia tectónica han sido desarrolladas (Rodríguez Lozoya (2008,2010), López Pineda et al,(2005) ,la otra región es la llamada región de la trinchera mesoamericana donde han ocurrido los sismos que más catástrofes han ocasionado en este país (Domínguez R. et al (2019), Yagi et al,(2004)) ,esta zona es de las llamadas zonas de subducción donde la interacción de las placas tectónicas es de choque y buzamiento.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

El estado de Sinaloa, está ubicado en la región tectónica del Golfo de California, y este a su vez este localizado en el llamado cinturón de fuego hacen que este estado sea de los clasificados como de peligro sísmico de moderado a alto. En Sinaloa existen ciudades de gran impacto social y cultural una estas ciudades es Mazatlán, con el aumento turístico en esta ciudad surge la necesidad de ampliar la infraestructura hotelera y dichas obras deben ser proyectadas apoyándose en información que sea representativa de las condiciones ingenieriles locales, ya que las condiciones del suelo en la ciudad de Mazatlán son complejas, es decir el suelo es muy variable a distancias cortas. Para la región no es desconocido que, en el año de 1932, en el mes de octubre ocurrió un sismo de magnitud próxima a Mw 7.8 (SSN) que sacudió la ciudad causando daños severos, por la época, la falta de equipo no permitió registrar dicho evento, pero este antecedente es un refuerzo para realizar investigaciones como la que aquí se presenta.

Los estudios de peligro sísmico en México, la mayoría de ellos se han realizado en el centro y sur de nuestro país. Por otro lado, en la zona noroeste, en la cual se localiza el sitio propuesto para este estudio, las normativas sugieren el uso de acciones sísmicas regionales además de ignorar o considerar de manera general en dichas acciones el efecto dinámico del suelo. El estudio que aquí se pretende realizar no está limitado a lo que se menciona respecto a las normativas locales en este caso el Reglamento de Construcción del municipio de Mazatlán Sinaloa (2006), en esta normativa se sugiere que para considerar el efecto del sismo sobre las estructuras locales ,los diseños se apoyen en normativas que fueron desarrolladas para sitios que se localizan a cientos de kilómetros de distancia ,por lo anterior, en este estudio se tiene como objetivo principal definir las acciones sísmicas para el diseño de las estructuras locales considerando las propiedades locales del suelo



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

O lo que es lo mismo, serán definidas acciones sísmicas de diseño que tendrán la contribución del efecto del sitio, que como ya fue mencionado, es lo que no se ha sido atendido adecuadamente por las normativas actuales.

1.1 ANTECEDENTES

Los estudios de peligro sísmico tienen por objetivo principal representar la sismicidad, así como sus incertidumbres en un sitio o región. En nuestro país se han desarrollado diferentes estudios de peligro sísmico en la mayoría de dichos estudios se ha considerado como zona de estudio todo el territorio nacional, uno de los primeros estudios de peligro sísmico en los cuales ya se consideraron medidas de intensidad asociadas a un periodo de retorno, fue desarrollado por Esteva (1970), posteriormente Ordaz et. al (2004), desarrollaron un programa computacional denominado PSM04, el cual permitía consultar información sísmica para cualquier sitio dentro de nuestro país esta información sísmica ya se asociaba a un periodo de retorno previamente definido.

Desde 1993 la Comisión Federal de Electricidad (CFE,1993) ha desarrollo investigación y aportes en el campo de la ingeniería estructural, para ello a propuesto software de apoyo con el cual ha sido posible definir los llamados espectros de diseño ,recientemente la CFE , desarrolló un software de diseño sísmico denominado PRODISIS, el cual al igual que PSM04, permite consultar la información deseada dentro de cualquier región o zona geográfica dentro del territorio nacional, una limitante o inconveniente de dicho paquete computacional es que sus resultados se definen para un periodo de retorno fijo ,es decir el usuario no puede modificar este parámetro. En 2013, Leonardo et. al (2013), publicaron una versión actualizada del PSM04, ahora denominado PSM12, a diferencia de su versión anterior, esta nueva versión fue realizada para ser una aplicación en la



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

web, la cual puede ser consultada de manera online, sin necesidad de instalar el programa en el ordenador. Por otro lado, la versión más reciente del programa computacional PRODISIS que fue desarrollado por CFE en 2015 (CFE, 2015), es una versión actualizada de PRODISIS, ahora en dicho programa pueden consultarse los espectros de peligro uniforme para cualquier sitio de México, en esta nueva versión es posible modificar el periodo de retorno para así generar espectros de diseño, por lo anterior dicho programa actualmente es de los más empleados para los estudios de peligro sísmico en nuestro país. La parte débil de la versión más actual del PRODISIS es lo relativo a los llamados sismogramas sintéticos, ya que en sus manuales de apoyo no se explica en que teorías o herramientas se apoyan dichos sismogramas sintéticos.

1.2. PLANTEAMIENTO SITUACIONAL

¿Es el sismo una acción que ha demostrado ser la causa de varios desastres naturales a través del tiempo?, el sismo no es solo la causa de los desastres si no que esto depende también de otros factores como son: el suelo y la estructura propiamente, a su vez por lo mencionado surgen las siguientes cuestiones, ¿cómo la acción sísmica es afectada por las propiedades del suelo? y, ¿cómo este efecto puede dañar la estructura? .Por lo anterior, estudiar el riesgo sísmico de un cierto lugar, implica estudiar el entorno tectónico, sus antecedentes de sismicidad y las características del suelo en dicho sitio, en este proyecto de investigación, el sitio de estudio es la ciudad de Mazatlán Sinaloa en México, esta ciudad en los últimos cuatro años ha tenido un gran desarrollo en infraestructura hotelera, han sido construidos varios edificios de altura considerable, la localización geográfica de esta ciudad es cercana a la llamada trinchera mesoamericana además de estar sobre la franja sísmica mundial conocida como el cinturón de fuego. Lo anterior además de



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

la naturaleza del suelo hace de este sitio, un sitio de estudio muy interesante desde el punto de vista del riesgo sísmico.

Cabe mencionar que para llevar a cabo esta investigación se cuenta con información de campo fundamental para alcanzar el objetivo de lo que aquí se plantea, dicha información comprende estudios de vibración ambiental, así como estudios de ondas superficiales (perfiles de velocidad de onda de corte) en distintos puntos de esta ciudad y varios estudios geotécnicos.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Mazatlán en los últimos cinco años ha tenido un gran auge económico apareciendo zonas hoteleras en casi toda la costa de este municipio sinaloense, por lo anterior es necesario contar con las normas locales de construcción actualizadas. La presente investigación permitirá llevar a cabo cambios a la normativa de construcción local, y con ello los diseños estructurales de las edificaciones serán más óptimos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Incorporar los efectos de sitio a los espectros de peligro uniforme aplicables en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Realizar análisis probabilístico de peligro sísmico para la ciudad de Mazatlán, Sinaloa.

Analizar la influencia de los efectos sitio en la acción sísmica (espectros de peligro uniforme).



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Estimar los efectos de sitio mediante registros de vibración ambiental en el sitio.

Estimar los factores de amplificación dinámica mediante el análisis de modelos unidimensionales del suelo, considerando las propiedades dinámicas de las capas de suelo que componen a los modelos unidimensionales ya mencionados.

Definir el peligro sísmico en el sitio mediante la curva de peligro sísmico y el espectro peligro uniforme.

1.5. JUSTIFICACION

Es ampliamente conocido que la costa occidental de la República Mexicana, es una de las zonas con alta tasa de actividad sísmica; por lo anterior es fundamental conocer el comportamiento del fenómeno sísmico, así como su potencial daño sobre las estructuras civiles, lo que contribuye en gran medida en la planeación de las futuras ciudades y de las obras de infraestructura.

Sinaloa así como la ciudad de Mazatlán se localizan en la costa occidental de la República Mexicana, el estudio que se plantea realizar para la ciudad de Mazatlán, será una muy buena aportación, ya que como ya fue mencionado esta ciudad se ha convertido en un centro turístico muy concurrido y por lo mismo aquí el desarrollo en infraestructura hotelera está creciendo a un ritmo acelerado ,prueba de lo anterior es la aparición de altos y amplios edificios así como obras hidráulicas importantes ,dichas obras deben ser proyectadas apoyándose en información que sea representativa de las condiciones ingenieriles locales, ya que la costumbre al diseñar estructuras es apoyarse en las especificaciones constructivas que rigen el diseño en la ciudad de México, puede ser mencionado que el apoyarse en las especificaciones constructivas mencionadas tiene sus ventajas y desventajas y esto puede redundar en diseños más costosos , ya que las condiciones



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

del suelo en la ciudad de Mazatlán difieren mucho de las condiciones de suelo de la ciudad de México.

Por otro lado, la mayoría de los diseños en la ciudad de Mazatlán se realizan considerando que el suelo es rígido, cosa que en lo general no es cierto, ya que el suelo en dicha ciudad es muy variable desde el punto de vista de comportamiento sísmico, de ahí la importancia de incorporar de los efectos locales del suelo en las acciones sísmicas de diseño ,lo anterior permitirá realizar diseños sismoresistentes más fiables; ya que el efecto de sitio es algo que a la fecha las normativas locales no han considerado de una forma explícita ,en este estudio será el objetivo principal.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 CONCEPTOS DEL RIESGO SISMICO

El riesgo sísmico de algún sitio de interés, se estima a partir de establecer el nivel de peligro sísmico, la vulnerabilidad de sus construcciones y en algunas ocasiones el aspecto económico, en esta parte de la investigación se explicará lo relativo al análisis del peligro sísmico, precisamente el riesgo sísmico resulta de considerar fundamentalmente como ya fue mencionado, tres conceptos, que ya fueron mencionados, dichos conceptos son el peligro sísmico, la vulnerabilidad y el costo. El peligro sísmico se define en función de algún parámetro sísmico producido por algún evento sísmico de una magnitud dada en un sitio bien definido, en ingeniería sísmica este parámetro es conocido como intensidad sísmica en el sitio de interés, dicha intensidad puede ser en aceleración, velocidad o desplazamiento, normalmente se toma como medida de intensidad la aceleración o bien la pseudo aceleración en el sitio.

El suelo en el sitio juega un rol muy importante, y este aspecto en conjunto con variables como la distancia y la magnitud sísmica son considerados mediante el empleo de las llamadas ecuaciones

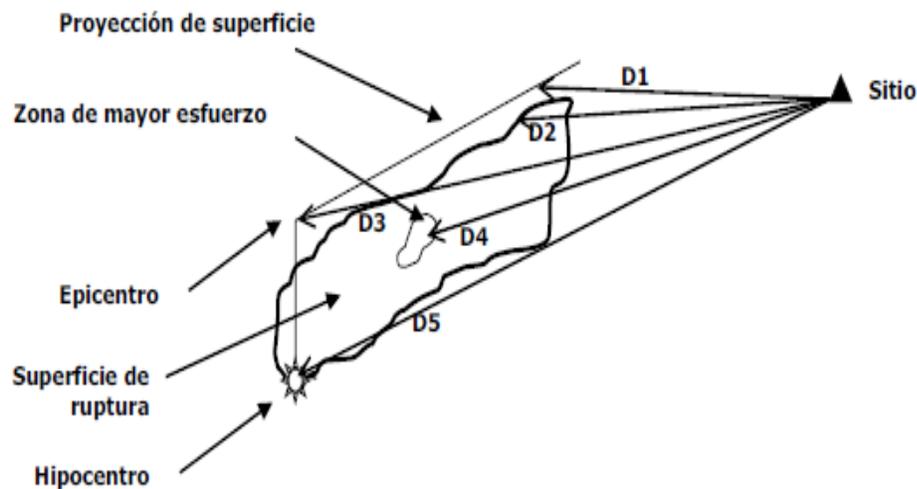


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

o leyes de atenuación ,estas ecuaciones sirven de apoyo para estimar las intensidades sísmicas en un sitio, ya se mencionó que dichas leyes incluyen ,a la distancia de la fuente sísmica al sitio, el mecanismo focal de ruptura y la magnitud sísmica, además algunas consideran el mecanismo de ruptura, así como le tipo de suelo. La distancia sitio-fuente puede ser definida de distintas maneras en Kramer S.L. (1996) se proponen varias formas de definir dicha distancia, la figura 1 ilustra como se puede definir este parámetro.

Figura 1

Distintas formas de definir la distancia fuente-sitio (Kramer, S.L.,1996).





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Las distancias fuente-sitio ilustradas en la figura 1 se concentran en la tabla 1:

Tabla 1

Distintas formas de definir la distancia fuente-sitio.

<i>Abreviación</i>	<i>definición</i>
D1	Distancia sitio proyección en la superficie del plano de falla.
D2	Distancia a la superficie de la falla
D3	Distancia epicentral
D4	Distancia centroide-sitio
D5	Distancia Hipocentral

Para cuantificar el peligro sísmico de un sitio cualesquiera, actualmente esto se hace de dos maneras o formas, una forma está basada en el enfoque determinístico y la otra, la forma probabilística. Aplicando la forma determinista puede ser estimado el máximo valor que podría alcanzar alguna variable tomada para que represente la respuesta del suelo en algún sitio, como ya fue mencionado, dicho parámetro en ingeniería civil normalmente es la aceleración, pudiendo ser también la velocidad o el desplazamiento, todo a partir de registros sísmicos históricos obtenidos en la zona o sitio de estudio. Es decir, este método se basa en el máximo valor histórico de un parámetro ingenieril registrado en la zona o sitio de estudio (Quinde & Reinoso, 2016). Una limitación de un análisis determinístico del peligro sísmico, es que este no considera las incertidumbres en los parámetros de algún sismo que pueda ocurrir durante la de vida útil de alguna estructura civil. Por otro lado, para estimar el peligro sísmico, también se emplea un análisis



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

probabilístico, en este análisis se utiliza como base la probabilidad de ocurrencia de los sismos posibles o por ocurrir, así como de los sismos ya ocurridos en el lugar de estudio. Este tipo de análisis considera varios parámetros como son, la magnitud, distancia, y la aceleración, entre otros, dichos parámetros permiten obtener información útil para estimar la probabilidad de ocurrencia de un sismo durante cierto tiempo de exposición, normalmente este tiempo de exposición es la vida útil de alguna edificación o estructura que según el caso puede ser de 50, 100 o 200 años o más o menos.

Con un análisis probabilístico de peligro sísmico se obtienen resultados muy importantes para el diseño estructural, normalmente, estos resultados son expresados mediante las curvas de peligro sísmico y los espectros de peligro uniforme, mismos que pueden ser anexados a las normativas de diseño y construcción con el objetivo de realizar diseños más óptimos y seguros.

Un concepto de actualidad involucrado en el análisis probabilístico de peligro sísmico es el concepto conocido como la disgregación del peligro sísmico (McGuire, 1995), La disgregación del peligro sísmico consiste en identificar y combinar valores de las variables que se necesitan en las leyes de atenuación como son: la magnitud, la distancia fuente-sitio de interés, que son las que contribuyen en la estimación del peligro sísmico en un sitio o región específico. Otro concepto de aplicación actual en este tipo de análisis es el efecto de sitio del suelo que, en palabras sencillas, no es más que como las condiciones del tipo de suelo en algún sitio podrán afectar la señal sísmica y está a las estructuras circundantes.

En esta tesis para estimar el peligro sísmico en los sitios se utilizó un enfoque de análisis probabilístico, será necesario conocer lo más ampliamente posible el sitio de estudio, así como su historia sísmica, como también las leyes de atenuación de las ondas sísmicas existentes o



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

compatibles para la zona o sitio en estudio, como ya fue mencionado en este estudio seguiremos la metodología propuesta por Cornell (1968), metodología muy utilizada en el campo científico para el desarrollo del análisis probabilístico en los sitios de interés, esta considera las fuentes sísmicas circundantes al sitio en estudio ,y las leyes de atenuación disponibles entre otras cosas ,a continuación se describen tanto las fuentes sísmicas como todos los conceptos utilizados en este tipo de análisis.

2.2 FUENTES SISMICAS

Parte fundamental en los análisis de peligro sísmico son las fuentes sísmicas y sus parámetros como son: la geometría (en el plano y profundidad) y su sismicidad, estos parámetros por su naturaleza pueden presentar incertidumbres, mismas que debe ser consideradas al momento de realizar el análisis de peligro sísmico. A continuación, se describe como se caracteriza la fuente sísmica; inicialmente se describe como se define su geometría, después su sismicidad y por ultimo las leyes de atenuación que se les puede asignar.

2.2.1 GEOMETRIA DE LA FUENTE SISMICA

Parámetro muy importante a tomar en cuenta al definir la fuente sísmica, es su geometría, ya que este es fundamental para definir la distancia fuente-sitio. Para definir la geometría de la fuente son fundamentales definir la distribución de su sismicidad, así como las profundidades de los distintos sismos que componen dicha sismicidad, también para ello es importante el ambiente tectónico de la fuente en definición.

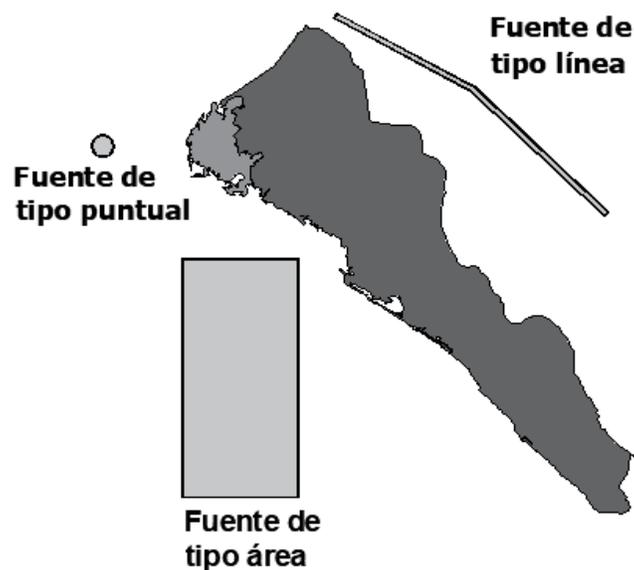


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

En Kramer S.L. (1996) la geometría de la fuente sísmica se define como fuentes puntuales, áreas o polígonos, por ejemplo, fuentes de sismos de naturaleza volcánica puede considerada como fuente puntual, zonas de sismicidad distribuida pueden ser consideradas como fuentes área (polígonos), sismicidad siguiendo patrones lineales pueden ser consideradas como fuentes lineales. Puede haber zonas sísmicas donde la sismicidad no siga ningún patrón como los mencionados en este caso juega un papel muy importante la experiencia y conocimiento de quien este desarrollando el estudio. La figura 2, ilustra las distintas geometrías que se utilizan para definir las fuentes sísmicas.

Figura 2

Formas geométricas utilizadas para representar la fuente sísmica.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Por lo general, el mecanismo de ruptura no se considera al momento de definir la geometría de la fuente, más bien algunas veces, este aspecto se considera en la llamada ley de atenuación de la fuente sísmica, otro parámetro de fuente como lo es la profundidad raramente es considerada al definir las formas geométricas utilizadas para definir la fuente sísmica. Ya definida la fuente sísmica se asume la misma probabilidad de ocurrencia para todo sismo dentro de dicha fuente.

2.2.2 SISMICIDAD DE LA FUENTE SISMICA.

Una vez definida la geometría de las fuentes sísmicas, un segundo paso es analizar su sismicidad, esto se hace utilizando un catálogo sísmico, este juega un papel fundamental para la definición de la sismicidad en cada fuente, ya que contiene la historia sísmica de dicha fuente o fuentes, así como los parámetros sísmicos de cada evento ocurrido en la zona de interés, la información de los catálogos sísmicos comprende datos instrumentales actuales e históricos. El catálogo a utilizar en la definición de la sismicidad de las fuentes debe ser lo más completo posible. Una vez definida la sismicidad en la fuente o fuentes, mediante análisis estadísticos de la misma, es posible definir el modelo de recurrencia que mejor se adapte al comportamiento de dicha sismicidad, con dichos modelos es posible establecer la relación frecuencia -magnitud de la sismicidad en la fuente, con los modelos de recurrencia sísmica, es posible estimar el periodo de tiempo de ocurrencia entre sismos de una cierta magnitud. Actualmente en los estudios de peligro sísmico se utilizan los siguientes modelos de recurrencia sísmica, dichos modelos son: el Modelo de Gutenberg y Richter, modelo Gutenberg y Richter modificado y Modelo del temblor característico, dichos modelos pueden ser revisados en Kramer S.L. (1996), para este estudio será utilizado el modelo de Gutenberg y Richter, el cual se describe a continuación.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

2.2.3 MODELO DE GUTENBERG-RITCHER

Este modelo de recurrencia permite estimar la tasa de actividad sísmica en algún ambiente tectónico, como ya fue mencionado, el modelo de recurrencia utilizado en este trabajo es el de Gutenberg y Richter (1944), este modelo relaciona la magnitud de los sismos con su frecuencia de ocurrencia, este modelo se expresa mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Log } (N) = a - b * m \quad (1)$$

Donde:

N = Es el número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a una cierta magnitud m .

m = Magnitud sísmica

b = Coeficiente representa la proporción de sismos de menor magnitud respecto a la cantidad de sismos mayores.

a = Coeficiente que depende de la actividad sísmica.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

La ecuación (2) puede expresarse de la manera siguiente:

$$N(m) = 10^{(a-b*m)} \quad (2)$$

O bien: $\ln(N(m)) = \alpha - \beta * m$ donde: $\alpha = a * \ln(10)$, $\beta = b * \ln(10)$

Y finalmente: $N(m) = e^{(\alpha-\beta*m)}$ (3)

Como comentario adicional puede ser mencionado que del modelo de recurrencia ya descrito surgió la llamada relación de Gutenberg-Richter doblemente truncada (Esteva, 1976). Esta relación se construye considerando límites de magnitudes, un límite inferior que define la magnitud de completitud del catálogo y un límite superior que es la máxima magnitud esperada en la zona de análisis.

Finalmente, sobre la sismicidad de las fuentes sísmicas utilizadas en este estudio puede ser mencionado que se supone que esta es del tipo sismicidad Poissoniana o bien que la ocurrencia de un sismo no tiene efecto alguno en el número de sismos futuros (Aguiar, 2010), es decir es una sismicidad sin memoria. De acuerdo con Kramer S.L. (1996), el proceso de Poisson tiene las siguientes características principales:



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

- 1) Los eventos sísmicos son independientes espacialmente: esto quiere decir que la ocurrencia de un sismo en un sitio específico, es independiente del lugar en el cual algún sismo haya ocurrido en el pasado, lo anterior implica una distribución espacial aleatoria dentro de la fuente.
- 2) Los eventos son independientes temporalmente: La ocurrencia de un sismo es independiente del número de veces que el evento se ha presentado en el pasado. Lo que implica como ya fue mencionado que los eventos sísmicos no tienen memoria en el tiempo, ni en el espacio.
- 3) Para fines prácticos se considera que la probabilidad es nula para el caso de que dos eventos sísmicos ocurran al mismo tiempo y en el mismo lugar, lo anterior puede ser entendido que, para intervalos de tiempo muy cortos, dos o más sismos no pueden ocurrir exactamente en el mismo lugar.

La función de probabilidad del modelo de Poisson se describe mediante la siguiente expresión:

$$P(n > M) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (4)$$

Donde $P(n > M)$, es la probabilidad de que en determinada región ocurran “n” sismos con magnitud mayor que M , ‘ t ’ es el lapso de tiempo de interés, λ es la tasa de excedencia de sismos con magnitud mayor o igual a M .



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Sí en la expresión (4), 'n' se iguala a cero se obtiene lo siguiente:

$$P(0) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

La cual representa la probabilidad de que no ocurran sismos con magnitud mayor a M en la zona y dado un intervalo de tiempo t. Por lo que la probabilidad de que si ocurran se contempla con la siguiente expresión:

$$P(n) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

2.3 LEYES DE ATENUACION.

Las leyes de atenuación o ecuaciones de predicción del movimiento del suelo conocidas también como funciones o leyes GMPE, por su traducción al inglés, son aquellas con las que se predice la disminución del movimiento producido por un sismo de magnitud M, a una distancia R, del sitio de estudio. Estas leyes describen el movimiento sísmico relacionando su magnitud con la distancia, es común que en regiones donde no se cuenta con la instrumentación e información sísmica suficiente para desarrollar este tipo de estudios, se han utilizadas leyes de atenuación publicadas en la literatura y que hayan sido creadas para regiones con características similares al área de interés, estas regiones son llamadas zonas tectónicamente compatibles. Actualmente existen una gran variedad de leyes o modelos de atenuación, estos se basan generalmente en datos de sísmicos históricos. Para obtener los modelos o leyes de atenuación se realizan análisis de regresión, es decir análisis estadísticos con los datos que estén disponibles. En la literatura pueden ser



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

encontrados varios ejemplos de modelos o leyes de atenuación dentro de estos se pueden mencionar las de Boore & Atkinson (2008), Abrahamson & Silva (2008); Campbell & Bozorgnia (2008), Idriss (2008) entre otras.

La gran mayoría de las leyes de atenuación dan resultados del parámetro sísmico en estudio considerando que la respuesta es en roca, sin embargo, también hay leyes de atenuación que consideran la respuesta en algún tipo de suelo así como el tipo de falla (Abrahamson & Silva (2008), Sadigh et al. (1977) entre otras). Actualmente existen leyes de atenuación que además de considerar los parámetros o condiciones mencionadas, consideran el amortiguamiento del suelo en su respuesta, es decir algunas leyes de atenuación permiten variar el amortiguamiento del suelo además del tipo de suelo y así como la falla sísmica; como ejemplos de estas se pueden citar a Akkar and Bommer(2007) y Cauzzi and Faccioli (2008) entre otras.

Como ya se mencionó, las leyes de atenuación se obtienen estadísticamente y por lo mismo sus resultados tienen cierto valor de incertidumbre, ya que estas se ajustan de manera estadística a una serie de datos sísmicos, por lo que se entiende que las estimaciones resultantes cuando se utilizan estas leyes son valores de atenuaciones promedio, por lo anterior la precisión de ellas está directamente relacionada con la cantidad de datos que se obtengan. En Kramer S.L. (1996), se sugiere que las leyes de atención sean actualizadas en función de la ocurrencia sísmica de la zona de interés.

2.4 EVALUACION PROBABILISTICA DEL PELIGRO SISMICO

Una vez definidas cada una de las características de las fuentes sísmicas, como son su geometría, su sismicidad y las leyes de atenuación del movimiento, es posible evaluar el peligro sísmico en



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

algún sitio, en el supuesto de que todo resultado del análisis es sobre roca basal, para ello puede ser aplicada la función de probabilidades propuesta por Esteva (1968) y Cornell (1968), de la cual resulta la tasa de excedencia $\nu(a)$ para un cierto valor de intensidad:

$$\nu(a) = \sum_{i=1}^N \int_{M_0}^{M_{ui}} -\frac{d\lambda_i(M)}{dM} \Pr(A > a | M, R_j) dM \quad (7)$$

En la expresión anterior se consideran solo las fuentes que aportan sismicidad a la zona o sitio en estudio y la integración se realiza desde M_0 hasta M_{ui} , $\lambda_i(M)$ es la tasa de excedencia de magnitudes de la i -ésima fuente y $\Pr(A > a | M, R_j) dM$ es la probabilidad de que la intensidad N exceda un cierto valor n , dada la magnitud y distancia del sismo, esto es:

$$\Pr(A > a | M, R_j) = \Phi \left[\frac{E(\ln a | M, R_j) - \ln a}{\sigma_{\ln a}} \right] \quad (8)$$

Donde: Φ es la función normal estándar y $\sigma_{\ln a}$ la desviación estándar del parámetro utilizado.

Como ya fue explicado con ecuaciones, el peligro sísmico puede ser expresado en términos de la tasa de excedencia de alguna variable sísmica previamente definida, es decir la tasa de excedencia indica con qué frecuencia es excedida la intensidad sísmica de la variable que represente dicha intensidad en cierto intervalo de tiempo. Por ejemplo, se puede decir que la aceleración en algún sitio sea $a=250$ gales y que su tasa de excedencia sea $\nu(a) = 0.05/\text{año}$, entonces eso significa que dicha intensidad será excedida en 0.05 veces por año o una vez cada 20 años.

El objetivo de este estudio es definir los espectros de diseño para cada sitio en estudio considerando los efectos de sitio en sus ordenadas, por lo mismo a continuación se describen brevemente los aspectos considerados al estimar los efectos de sitio, estimar el efecto de sitio básicamente consiste



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

en tres pasos, uno definir el perfil de suelo en el sitio en estudio ,segundo ,definir el sismo a propagar en dicho perfil de suelo en esta parte dicho sismo se supone aplicado en la base de dicho depósito de suelo ,por último se obtiene el registro sísmico en superficie el cual permite definir la función de transferencia del suelo ,su periodo fundamental y su factor de amplificación dinámica. El concepto de efecto de sitio se explica en forma muy extensa y completa en Kramer S.L. (1996). A continuación, se describen cada uno de los componentes que participan en el análisis del efecto de sitio, iniciando con el registro sísmico supuesto obtenido en roca, seguido del perfil de suelo con sus estratos bien definidos, y finalizando con el sismo obtenido en la superficie del depósito de suelo, cada uno de los procesos aquí mencionados se sustentan en una amplia teoría matemática la cual será descrita en cada uno de los casos.

2.5 REGISTROS SISMICOS

Para estimar la respuesta dinámica ante carga sísmica de los depósitos de suelos constituidos por una o varias capas ,donde cada una de las capas puede ser de distinto tipo de suelo, es necesario tener registros sísmicos preferentemente locales de no ser posible estos pueden ser registros compatibles tectónicamente con el suelo en el sitio en estudio y en el caso extremo de que no se puedan obtener registros sísmicos con las condiciones mencionadas, pueden ser utilizados acelerogramas o sismogramas artificiales ,estos sismogramas artificiales pueden ser obtenidos utilizando software especializados que para ello existen por ejemplo seismomatch(Hancock et al. 2006), RASCAL(Silva y Lee 1987), Powerspec (Mertens y Preumont 1997) entre otros ,en este estudio para este aspecto será utilizado el software Seismosignal,una vez definido el registro a utilizar en el análisis, este registro se propaga verticalmente(ondas SH) por las distintas capas del



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

perfil de suelo en estudio y hasta que este sale a superficie, ya sea como registro sísmico o bien como espectro de respuesta, las respuesta puede ser obtenida en alguna capa intermedia si así se requiere ,se debe ser cuidadoso en definir la componente del sismos a propagar las componentes verticales no deben ser utilizadas para estos estudios ,de preferencia deben ser utilizados, sismos que hayan sido registrados en sitios firmes preferentemente sitios en roca sana ,no deben utilizarse señales sísmicas registradas en sitios de suelos blandos a menos de que dichos registros sean previamente deconvolucionados, es decir sometidos a un proceso numérico donde les sean removidos los efecto de sitio producto del suelo en la estación de registro.

En este estudio serán empleados acelerogramas artificiales para obtener la respuesta en los distintos depósitos de suelos estudiados ya que en la zona de estudio si bien existen registros sísmicos, estos son considerados como registros de sismos débiles ya que sus amplitudes son bajas como para excitar adecuadamente el medio en que se propaguen.

2.6 ACELEROGRAMAS ARTIFICIALES

Los métodos de análisis dinámico de estructuras utilizados en el diseño sismorresistente de edificaciones y principalmente el método dinámico no lineal, también conocido como método paso a paso, requiere de registros sísmicos preferentemente localizados lo más cercano posible al sitio donde se desplantará la estructura en diseño, así el registro utilizado reflejará más apropiadamente los procesos de su fuente sísmica y las condiciones del suelo en el sitio de estudio, esto último es una situación ideal , y lo más común en estos casos y debido a la escasas de registros en los sitios de interés o en su entorno, es utilizar registros reales de sismos obtenidos en entornos sismo-tectónicos similares al del sitio de interés, de no conseguir lo anterior ,también pueden ser



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

usados los llamados acelerogramas artificiales o bien registros sísmicos artificiales . Para obtener un acelerogramas artificial existen varios métodos, mencionaremos dos de los más utilizados como son los métodos numéricos (métodos de ajuste espectral) y los métodos que se basan en el modelo de falla finita (Castro R.,2005) que también es un método numérico, pero este involucra varios parámetros sísmicos, entre estos las dimensiones de su plano de falla y la forma de ruptura del sismo real. Cada método tiene sus limitaciones, a continuación, se describen algunos de los métodos aquí mencionados:

Los métodos numéricos como su nombre lo dicen se basan en procesos matemáticos con los cuales es posible generar sismogramas, como fue ya mencionado estos métodos tienen sus limitantes, por mencionar alguna, el contenido frecuencial del sismograma sintético resulta muy distinto al del sismo real que se pretende reproducir ; en el mejor de los casos se consiguen amplitudes muy semejantes pero la forma de onda dista mucho de las del sismograma real objetivo ,una limitante más y muy fuerte de estos métodos, es que no consideran las condiciones del suelo ni los mecanismos de ruptura , la gran mayoría de las metodologías actuales empleadas para generar sismogramas artificiales se basan en el ajuste espectral , este consiste en tomar un espectro de diseño o de respuesta y tomar sismos reales y mediante procesos iterativos hacer coincidir en lo posible el espectro del sismo real con el espectros llamado espectro objetivo ,el proceso termina cuando se consigue un buen ajuste entre el espectro objetivo y el espectro del sismo real, en la mayoría de los casos el ingeniero toma la serie de tiempo obtenida de ese ajuste espectral y utiliza dicho registro o serie de tiempo como sismo de entrada en su análisis, algo que es muy recomendable hacer es revisar el contenido frecuencial de dicho registro y hacer una comparativa con el correspondiente al sismo real usado en el proceso. Como ejemplo de software que utilizan



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

la metodología aquí descrita y que se basa en un ajuste espectral para generar sismogramas artificiales podemos mencionar el programa SIMQKE (Gasparini y Vanmarcke (1979)) entre otros. Otros métodos más actuales que se utilizan en la generación de sismogramas artificiales se basan en el empleo de ondículas(wavelets) para realizar el ajuste espectral (Flores-López F. A. y Ayes-Zamudio J. C. (2018)).

De los métodos que se basan en el concepto de la falla sísmica mencionaremos el propuesto por Hartzell (1978) este hace uso del concepto de función de Green empírica que son registros de eventos pequeños que puede ser una réplica evitando así el cálculo teórico de las funciones de Green. En este método se reemplaza el cálculo teórico de las funciones de Green por registros de eventos pequeños que son usados como funciones de Green empíricas. Este método es muy utilizado en la práctica y es fundamental seleccionar las funciones de Green empíricas ya que de estas dependerá el éxito o fracaso de generar la señal sintética.

En este trabajo como ya fue mencionado, para generar los acelerogramas artificiales necesarios se utilizará un software especializado, este software es Seismoartif, como la mayoría de los softwares especializados, este software para generar la señal sintética usa el método de ajuste espectral. Este programa calcula una función de densidad espectral, de inicio se usa un espectro de respuesta como espectro de referencia, con la función de densidad espectral se obtienen las amplitudes de señales sinusoidales con ángulos de fase aleatorios de distribución uniforme entre 0 y 2π . Algunas de las funciones de densidad espectral también llamada función envolvente utilizadas en este programa se mencionan a continuación: Función de intensidad constante de duración definida y de intensidad o amplitud unitaria, Función intensidad trapezoidal, Función de intensidad exponencial, una mejor descripción de la metodología utilizada para obtener las señales sintéticas empleado el software

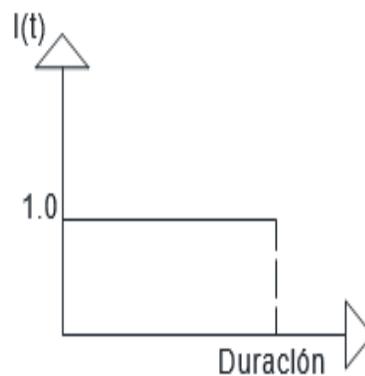


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

aquí mencionado puede consultarse la página <https://seismosoft.com/>. A continuación, se muestra una de las funciones de densidad espectral utilizada por *seismoartif*.

Figura 3

Función de intensidad constante y amplitud unitaria

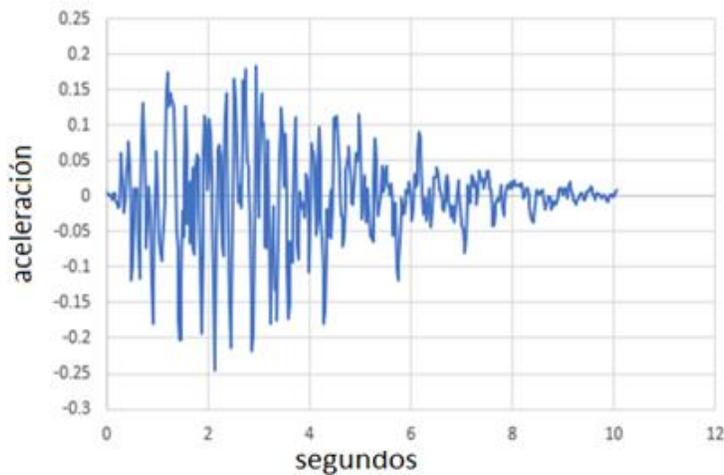


Una vez realizado el proceso para obtener el acelerogramas artificial, se puede observar la traza sísmica obtenida y los parámetros estadísticos de la misma pueden ser definidos. A continuación, en la figura 4 se muestra un sismograma sintético obtenido utilizando *seismoartif*.



Figura 4

Acelerogramas Artificial obtenido con seismoartif



2.7 EL SUELO EN EL SITIO EN ESTUDIO

Una de las tareas más importantes en este tipo de estudio es definir o caracterizar el suelo en el sitio, lo anterior implica desarrollar bastante trabajo de campo que tiene como resultado la obtención de datos que caracterizaran al suelo en el sitio, mismos que requieren un posterior procesado numérico. Esta parte del estudio tiene por resultado definir el perfil estratigráfico en el sitio y sus propiedades geométricas, físicas y dinámicas.

El perfil de suelo puede ser definido geoméricamente mediante pruebas de campo mismas que darán el aspecto geométrico de las capas del suelo y su disposición ,las pruebas más comunes para lograr esta etapa es mediante calicatas y el empleo de algunas metodologías que permitan definir la profundidad del suelo así como su capacidad de carga ,dentro de dichas pruebas una de las más



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

utilizadas es la prueba de penetración estándar también conocida como prueba SPT ,para definir las propiedades dinámicas de las capas del suelo también existen varias metodologías ,en este estudio fueron utilizadas las técnicas geofísicas conocidas como la refracción sísmica y su variante conocida como técnica MASW ,parte de definir el suelo en el sitio es definir su periodo fundamental ,este fue obtenido mediante la llamada técnica del cociente espectral (Nakamura,1989).

Una vez definida la señal sísmica a propagar, así como ya haber caracterizado el tipo de suelo en el sitio, lo que sigue es realizar el proceso numérico cuyo resultado es estimar el efecto de sitio.

2.7.1 EFECTOS DE SITIO.

Hasta aquí lo relativo al concepto de efectos de sitio no ha sido considerado, es decir la teoría y ecuaciones expuestas consideran que toda respuesta así obtenida será sobre superficie rocosa o roca firme, sabemos que en raras ocasiones los suelos donde se desplantan las estructuras civiles es roca pura, más bien en general las estructuras se desplantan en algún suelo con algunas propiedades mecánicas y geométricas que distan mucho de lo que es la roca, por lo mencionado es muy importante considerar el tipo de suelo en los proyectos ingenieriles ya que se ha demostrado que la naturaleza del suelo juega un rol muy importante en la respuesta del mismo suelo y de las estructuras ante algún tipo de carga de naturaleza dinámica, al efecto del suelo sobre las cargas dinámicas se le conoce como efecto de sitio. El efecto de sitio puede manifestarse de dos formas, una es que el suelo amplifique la acción sísmica y otra que la deamplifique, que se de una u otra forma el efecto de sitio, dependerá de las características propias del suelo en la zona de



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

estudio, al ocurrir dicho efecto la señal sísmica manifiesta un cambio en su amplitud, así como en su contenido frecuencial y su duración, como ya se mencionó el efecto de sitio dependerá de las propiedades y de la geometría estratigráfica del suelo.

para evaluar los efectos de sitio existen varios métodos, algunos sustentados en procesos matemáticos muy elaborados y otros cuyo respaldo teórico y numérico a la fecha han dado resultados aceptables incluso existen métodos llamados empíricos, algunos de los métodos aquí mencionados se basan en análisis de respuesta del suelo en el dominio del tiempo (Método No Lineales) y algunos otros en el dominio de la frecuencia (Método Lineal Equivalente). El método para evaluar la respuesta de sitio en este estudio será el método conocido como el método lineal equivalente a continuación se describe dicho método.

2.7.1.2 METODO LINEAL EQUIVALENTE.

Este método es un método iterativo y es considerado un análisis lineal, para obtener la respuesta dinámica de alguna columna estratigráfica del suelo ,este realiza sus procesos numéricos utilizando el dominio de la frecuencia ,resolver este tipo de problemas en dicho dominio resulta más económico computacionalmente que si el proceso se desarrollara en el dominio del tiempo ,el algoritmo del método fue implementado en forma original en el ampliamente conocido software Shake91 (Idriss & Sun, 1992). El método lineal equivalente realiza la propagación vertical de ondas de cortante, su fundamento se basa en que las propiedades dinámicas de cada una de las capas o estratos del suelo, específicamente el módulo de rigidez y el amortiguamiento se modifican ante algún nivel de deformación angular, este nivel de deformación angular algunas veces llamada deformación inicial es del orden del 0.65 de la deformación angular máxima de cada capa o estrato



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

(Seed and Idriss, 1969) este proceso se repite y en cada una de las iteraciones las propiedades del suelo son actualizadas ,el proceso termina hasta que después de cierto número de iteraciones las capas del suelo en análisis ya no cambien de una iteración a otra.

Para obtener la deformación angular efectiva se utiliza la siguiente expresión:

$$\gamma_{eff} = R_{\gamma}\gamma_{max} \quad (9)$$

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

En las expresiones siguientes M es la magnitud del sismo, y el factor R_{γ} depende de dicha magnitud γ_{max} la deformación angular máxima y γ_{eff} la deformación angular efectiva.

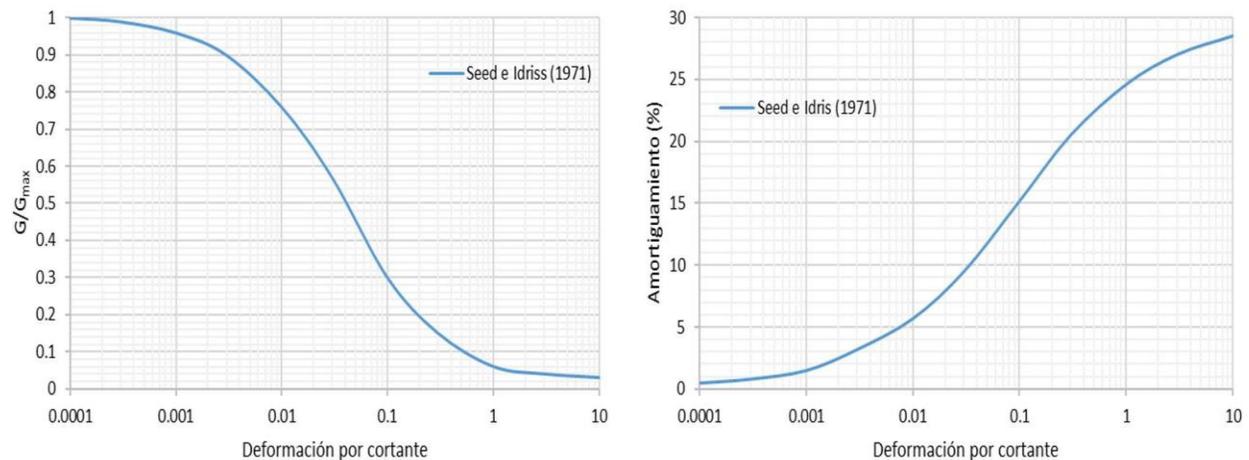
A continuación, se muestran dos curvas llamadas curvas de degradación amortiguamiento y módulo de corte((Seed e Idriss (1971)), que ilustran el comportamiento del módulo de corte y el amortiguamiento del suelo al variar la deformación angular , este tipo de curvas pueden encontrarse en la literatura (Kramer S.L. (1986)), existen este tipo de curvas para los distintos tipos de suelos (arenas ,gravas y arcillas) ,estás también tienen sus limitaciones ya que el suelo en el que se puede utilizar debe estar geotécnicamente bien definidos ya que estas no pueden ser aplicadas confiablemente si el suelo en estudio es un suelo mixto. Varios investigadores han propuesto este tipo de curvas para distintos tipos de suelos, Algunos modelos usados en la práctica son, Kishida et al. (2009a) Seed and Idriss (1970,1971), Darendeli (2001),Vucetic and Dobry (1991) entre otros.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 5

Curvas de degradación del módulo de corte y Amortiguamiento con la velocidad de onda de corte (Seed and Idriss(1971)).



Cabe mencionar que este método es ampliamente aplicado en el campo de la ingeniería estructural y sísmica, más tiene sus limitaciones mismas que deben ser consideradas al aplicar dicho método a algún problema específico, lo que si debe quedar muy claro es que para análisis de respuesta dinámica del suelo donde los sismos utilizados sean de magnitudes de altas a extraordinarias dicho método no se recomienda, en esos casos es mejor y más preciso realizar un estudio de análisis no lineal donde la solución es obtenida el método de integración Newmark (1959), ya que en este tipo de análisis el suelo puede presentar un comportamiento no lineal aun a niveles bajos de la deformación angular, este tipo de análisis tiene su respaldo teórico en la dinámica estructural (Chopra,2012).



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

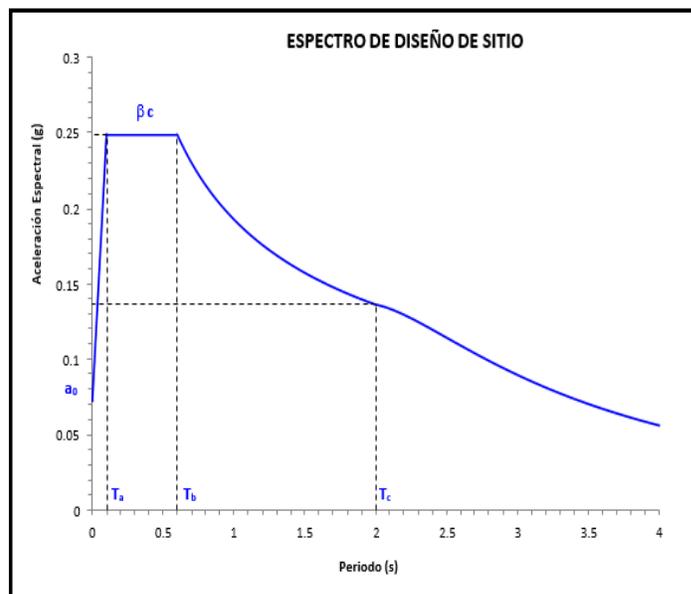
Algunas de las herramientas computacionales que permiten realizar este tipo de análisis no lineales esta DeepSoil (Hashash, et al, 2002), CharSoil (streeeter et al, 1974)) entre otros.

2.8 FORMA ESPECTRAL SEGÚN CFE-2015

Como ya fue mencionado ,el objetivo principal en esta investigación es definir los efectos de sitio y adicionar dichos efectos a la forma espectral de la normativa CFE-2015, a continuación, se muestra un ejemplo de la forma espectral según CFE-2015, para detalles de cómo es la construcción de dicha forma espectral, se recomienda ver el capítulo 3 (Diseño por Sismo de MOC-2015) de dicha normativa, en dicha referencia también son descritos los parámetros que definen la mencionada forma espectral.

Figura 6

Ejemplo de la forma espectral según CFE-2015





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

CAPITULO 3. DISEÑO METODOLOGICO

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo analítico-cuantitativo. Se describirán las características dinámicas del suelo y sus efectos sobre las ordenadas espectrales propuestas en CFE-2015.

3.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación es del tipo analítico cuantitativa, ya que el objetivo principal del estudio es definir variables que pueden representar el peligro sísmico de un lugar con un suelo de características bien definidas, en este caso la variable a definir será la aceleración en el sitio en unidades físicas, dicho valor estará sujeto a su vez a varios parámetros como son la magnitud sísmica, la distancia epicentral y por supuesto el tipo de suelo en el sitio. Para estimar el valor de la aceleración en el sitio será utilizado el método de análisis probabilístico el cual se fundamenta en realizar análisis estadísticos para finalmente definir el valor de la variable en estudio, aquí una variable fundamental será la física del suelo que en una primera parte el suelo es considerado suelo rocoso y en una segunda parte el suelo es considerado como suelo sobre roca.

Todo lo anterior se resume a mencionar que el objetivo de esta tesis es estimar la respuesta sísmica de un sitio para ello, es necesario aplicar distintas metodologías numéricas, resaltando una de ellas conocida como método lineal equivalente que ya fue mencionada y descrita en el capítulo dos, y otra metodología a aplicar será la técnica de división espectral o método de Nakamura.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

3.3 CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

La zona geográfica para llevar a cabo esta invitación comprende la zona costera de la ciudad de Mazatlán Sinaloa, en dicha zona se definieron catorce sitios en los cuales se pretende estimar la aceleración sísmica en función de las propiedades dinámicas del suelo en cada sitio. La figura 7 muestra la ubicación de los catorce sitios sobre la zona costera de la ciudad de Mazatlán Sinaloa. A continuación, se ilustra el entorno físico donde se desarrolla esta investigación, este será descrito en sus aspectos tectónicos y geotécnicos

3.4 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO TECTÓNICO Y GEOTÉCNICO DE LOS SITIOS EN ESTUDIO.

3.4.1 ENTORNO TECTÓNICO

Es importante describir el entorno tectónico de la ciudad de Mazatlán ya este nos indica la distribución espacial de fallas tectónicas en el sitio o región de estudio (a lo que también se le puede llamar el peligro sísmico), las figuras 7 y 8 ilustran el entorno tectónico de la ciudad de Mazatlán Sinaloa, es posible en dichas imágenes observar las fallas que circundan a la ciudad, al Oeste en la zona del Golfo de California está el sistema de fallas del Golfo de California ,en esta zona han ocurrido sismos de magnitudes que van de moderadas a altas (Rodríguez Lozoya(2205) ,(2004) ,en la parte Este de la ciudad está un conjunto de fallas cercanas ,en dichas fallas la sismicidad es prácticamente nula (SSN).



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

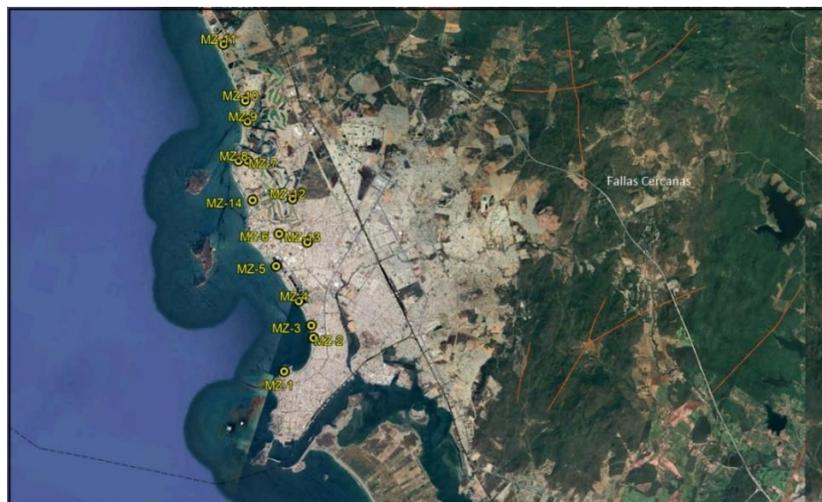
Figura 7

Entorno tectónico de la zona de estudio, sistema de fallas del Golfo de California (Línea Naranja)



Figura 8

Entorno tectónico en zona de estudio, Fallas cercanas (Línea roja) y sitios de estudio





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

3.4.2 ENTORNO GEOTÉCNICO

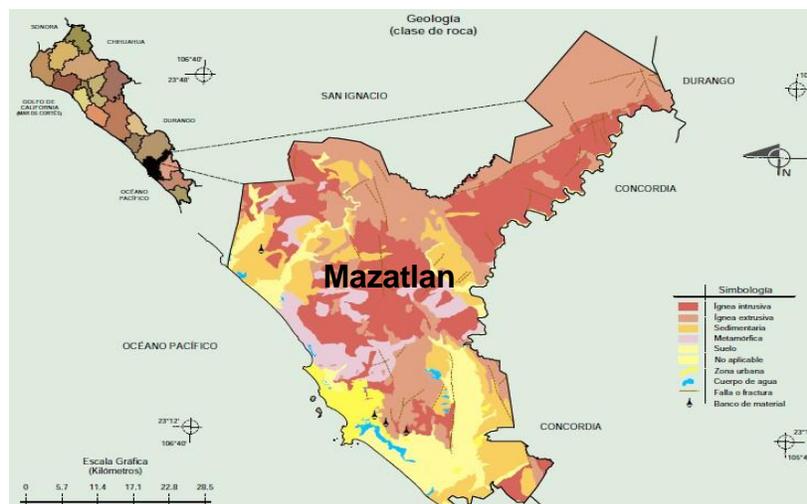
La parte que considera la geotecnia en la zona de estudio será descrita mediante sus condiciones geológicas, este aspecto se describe de manera general en el siguiente párrafo.

Las zonas urbanas sea han desarrollado sobre suelos y rocas sedimentarias del cuaternario, rocas extrusivas del Terciario e intrusivas del Cretácico y rocas metamórficas, en llanura costera con lomerío y piso rocoso cementado; sobre áreas donde originalmente había suelos denominados Phaeozem, Luvisol y Regosol; tienen clima cálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad y semiseco muy cálido y cálido, y el desarrollo de la ciudad está creciendo sobre terrenos previamente ocupados por agricultura y selva (INEGI,2010).

La figura 9 ilustra de manera amplia las unidades geológicas que existen en la zona de estudio y ya fueron descritas.

Figura 9

Geología del Municipio de Mazatlán Sinaloa (INEGI,2010).





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Como puede ser observado el entorno geotécnico fue descrito en función de las unidades geológicas en la zona de estudio, una parte de este estudio describirá de manera específica las condiciones geotécnicas resultantes de estudios de mecánica de suelos los cuáles fueron realizados en cada uno de los catorce sitios de estudio.

Debe ser mencionado que las condiciones geotécnicas del suelo en un sitio son parte medular para los llamados estudios de efectos de sitio, mismos que son fundamentales para estimar las potenciales amplificaciones sísmicas que pueden ocurrir en un sitio, y lo que a su vez puede dar idea de los posibles daños que pudieran ocurrir en las construcciones.

3.4.3 CATEGORÍAS DE ESTUDIO

Como ya fue mencionado en este estudio se pretende estimar la aceleración sísmica en catorce sitios localizados sobre la zona costera de la Ciudad de Mazatlán Sinaloa , la tabla 2 contiene los catorce sitios en estudio; para poder realizar dicha estimación es necesario definir previamente algunos parámetros, estos son: propiedades estratigráficas, velocidades de onda de corte, aceleración en roca, amplificación dinámica, periodo fundamental del suelo y amplificación dinámica todas las variables anteriores permitirás estimar la respuesta sísmica del suelo en el sitio. Debe ser mencionado que para definir la variable aquí señalada se requiere de bastante trabajo de campo y el uso de equipos e instrumentos especializados, en los textos siguientes describe como fue obtenida cada una de las variables aquí mencionadas.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Tabla 2

Ubicación geográfica de cada sitio

SITIO	COORDENADAS
MZ1	23.2070, -106.4281
MZ2	23.2195, -106.4222
MZ3	23.22315, -106.424
MZ4	23.2292, -106.4308
MZ5	23.2374, -106.4418
MZ6	23.2472, -106.4443
MZ7	23.2657, -106.4619
MZ8	23.2648, -106.4650
MZ9	23.2772, -106.4662
MZ10	23.2833, -106.4693
MZ11	23.2976, -106.4823
MZ12	23.2588, -106.4437
MZ13	23.2481, -106.4340
MZ14	23.2547, -106.4563

Como información adicional a continuación, se presentan las figuras 10,11,12 y 13, en ellas se muestran varias estructuras existentes en algunos de los puntos en estudio, lo anterior ilustrara lo útiles que son para esta región, estudios como en el que esta investigación fue desarrollada. En el apéndice contiene varias imágenes que complementan a las aquí mostradas.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 10

Edificaciones en el sitio MZ1



Figura 11

Edificación en el sitio MZ3





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

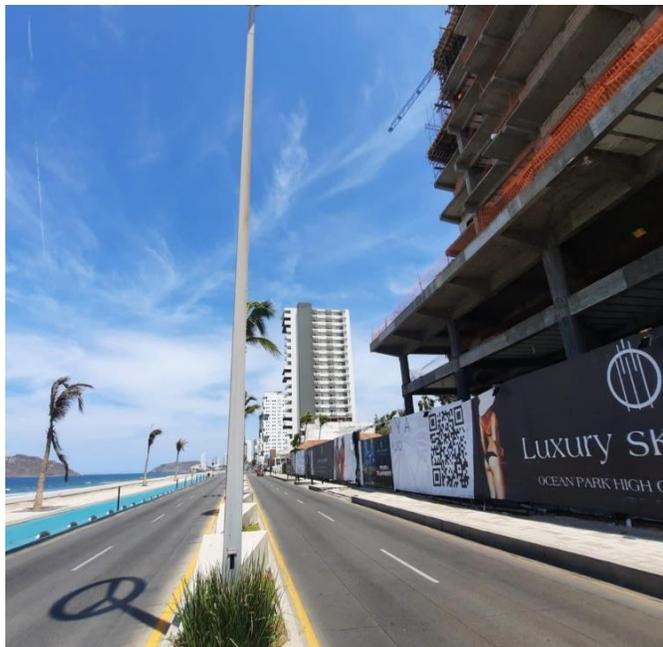
Figura 12

Edificación en el sitio MZ4



Figura 13

Edificación en el sitio MZ9





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Varias edificaciones como las mostradas en la figuras anteriores están en construcción y otras más en proyecto ,desde el punto de vista ingenieril este tipo de edificaciones deben ser diseñas aplicando las normativas de construcción vigentes, de ahí la importancia de realizar estudios de ingeniería como el de la presente investigación , mismos que llevan a la actualización de dichas normativas, ya que alguna datan de varios años y no han sido actualizadas ,esta investigación tiene como objetivo aportar información que ayude en al aspecto de normas de ingeniera civil en la ciudad de Mazatlán Sinaloa México.

3.5 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.5.1. POBLACION

La zona geográfica en estudio corresponde al municipio de Mazatlán Sinaloa, concretamente su zona costera fue descrita en la figura 8, dicha figura muestra la ubicación geográfica de la ciudad de Mazatlán Sinaloa, ciudad con bastante auge en construcción de edificación de altura moderada, esto inicio en el año de 2017.

3.5.2 MUESTRA

Las muestras son cada uno de los catorce sitios en estudio, estos están distribuidos como ya fue mencionado sobre la franja costera de la ciudad, donde en cada uno de estos catorce sitios se estimará su respuesta sísmica.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Una vez descrito la ubicación de los sitios en estudio, es decir las muestras en este estudio, a continuación, se describen en cada uno de ellos en función de las condiciones de su tipo de suelo, dichas condiciones se definen a partir de estudios geofísicos con los que fue posible obtener los perfiles de ondas de corte en dichos sitios, así como perfiles geotécnicos conocidos como perfiles SPT por el nombre de la prueba de exploración con que dichos perfiles son obtenidos. Dicha información de campo es fundamental cuando se trata de estimar los efectos de sitio en alguna investigación ingenieril.

A continuación, cada uno de los sitios en estudio es caracterizado mediante su estratigrafía y su velocidad de onda de corte. Por ser bastante información esta fue concentrada en varias tablas. A continuación, se muestran las características del suelo en cuatro sitios, esto en las tablas 3,4,5 y 6; estas presentan la información ya mencionada, en el encabezado se indica el sitio respectivo y entre paréntesis la empresa que realizo el trabajo de campo en cada caso, el resto de tablas que contienen la misma información, pero para el resto de los sitios estudiados, pueden ser consultadas en el apéndice.

Tabla 3

MZI (Rodríguez Lozoya (2021))

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
8.00	195.0	1800.00
22.00	678.0	1900.00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Tabla 4

MZ2 (Sand Storm Gam(2021))

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL. (KG/M3)
3.00	195.0	1800.00
4.00	400.0	1800.00
2.00	500.0	1800.00
6.00	630.0	1800.00
4.00	700.0	1850.00
4.00	820.0	1850.00

Tabla 5

MZ3 (Lazcano Diaz (2018)).

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL. (KG/M3)
5.00	185.0	1800.00
4.00	430.0	1900.00
21.00	680.0	1900.00

Tabla 6

MZ4 (Sand Storm Gam(2020))

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL. (KG/M3)
5.00	267.0	1800.00
5.00	335.0	1800.00
3.00	445.0	1850.00
12.00	650.0	1850.00

Un resumen de toda la información mostrada en las tablas anteriores, se concentra en la tabla 7, además en



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

esta tabla se indica el método aplicado para definir la velocidad de onda de cortante, se indica su valor promedio, así como el periodo fundamental en cada sitio en estudio.

Tabla 7

Resumen de métodos aplicados en cada sitio para definir la velocidad de onda de corte

SITIO	COORDENADAS	METODO APLICADO	VS(PROM)	Ts
MZ1	23.2070, -106.4281	COCIENTE ESPECTRAL	582	0.21
MZ2	23.2195, -106.4222	MASW	721	0.13
MZ3	23.22315, -106.424	MASW, REMI	701	0.17
MZ4	23.2292, -106.4308	MASW	558	0.18
MZ5	23.2374, -106.4418	MASW, REMI	459	0.22
MZ6	23.2472, -106.4443	COCIENTE ESPECTRAL	495	0.24
MZ7	23.2657, -106.4619	MASW	593	0.13
MZ8	23.2648, -106.4650	MASW	442	0.24
MZ9	23.2772, -106.4662	MASW	732	0.17
MZ10	23.2833, -106.4693	COCIENTE ESPECTRAL	392	0.31
MZ11	23.2976, -106.4823	COCIENTE ESPECTRAL	763	0.16
MZ12	23.2588, -106.4437	MASW	201	0.22
MZ13	23.2481, -106.4340	MASW, REFRACCION	923	0.13
MZ14	23.2547, -106.4563	MASW	710	0.17



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

3.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Para caracterizar el suelo en cada sitio fueron realizadas varias campañas de trabajo de campo, con el objetivo de obtener la información necesaria para poder caracterizar las propiedades de cada capa de suelo, en dichas campañas se realizaron mediciones de vibración ambiental en cada sitio, se obtuvieron perfiles de refracción sísmica, obtener la información mencionada no es nada barato ya que implica utilizar equipo y software especializado. A continuación, se ilustra y describe el equipo que fue utilizado en los trabajos de campo.

El equipo para obtener la vibración ambiental fue un acelerógrafo Etna 2 marca Kinometrics

Figura 14

Acelerógrafo Etna 2 Kinometrics





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Con dicho equipo fueron realizadas todas las mediciones necesarias para la presente investigación, las imágenes siguientes muestran el personal registrando vibración ambiental.

Figura 15

Registrando Vibración Ambiental.



Los registros de vibración ambiental se procesaron y fue posible determinar el período fundamental del sitio, el método utilizado, llamado de cocientes espectrales fue propuesto por Nakamura en 1989. Este método, se desarrolla en el dominio de la frecuencia, utiliza el cociente de los espectros en sus componentes vertical y horizontal del movimiento en la superficie. Esta técnica supone que la vibración es producto de fuentes en el campo cercano, como por ejemplo el tráfico en las cercanías del aparato medidor, descartando cualquier contribución de fuentes

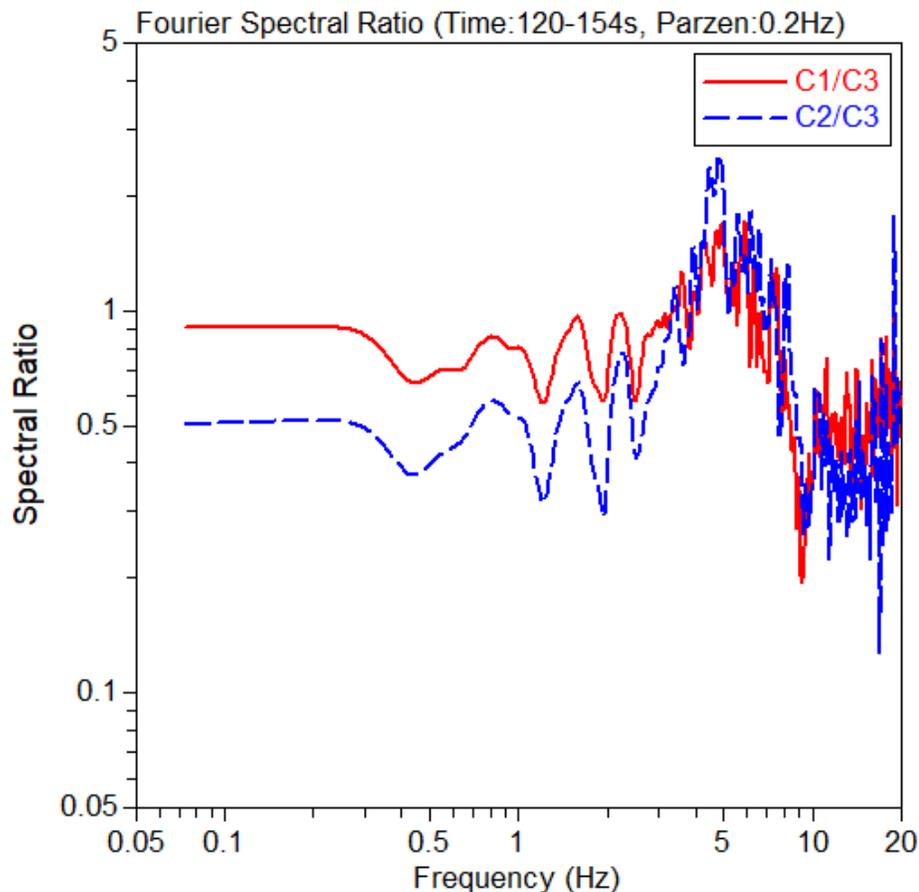


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

profundas. La técnica de Nakamura tiene su fundamento en que la componente vertical del ruido sísmico ambiental no contiene los efectos de la respuesta del suelo (amplificación). Las imágenes siguientes muestran gráficamente una función de transferencia mediante la cual es posible definir el periodo de vibración de suelo en su periodo fundamental, así como su factor de amplificación dinámica.

Figura 16

Función de transferencia en un sitio.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Del estudio de ondas superficiales (MASW) realizado en el sitio es posible determinar las características de propagación de ondas, con profundidades de investigación constantes, para lograr un mejor y mayor conocimiento de las propiedades de los diferentes estratos que servirán para complementar la información de superficie y el subsuelo, las cuales serán utilizadas como información complementaria del estudio de caracterización geotécnico del sitio. El equipo utilizado es marca PASI (Italia), sismógrafo Modelo 16S24-U es la versión ultraligera serie 16S-N. Los perfiles de refracción sísmica utilizados en esta investigación se obtuvieron con el equipo que se ilustra en la imagen siguiente:

Figura 17

Equipo para realizar perfiles de refracción sísmica





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

El trabajo de campo para obtener uno de los perfiles de refracción, muestra en las imágenes siguientes:

Figura 18

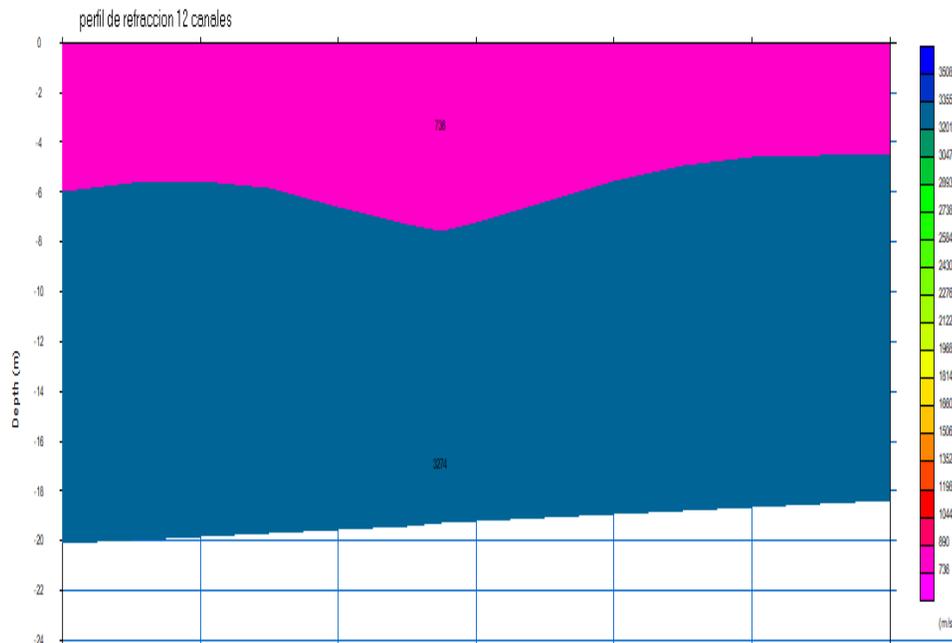
Trabajo de campo para realizar perfiles de refracción sísmica.





Figura 19

Perfil de refracción sísmica en un sitio



3.7 PROCEDIMIENTO.

Para realizar un estudio de peligro sísmico como el que aquí se plantea, es primordial establecer el antecedente sísmico del sitio o región de interés, esto se representa mediante la sismicidad de las fuentes sísmicas en el entorno del sitio en estudio, una vez definido el sitio de estudio así como sus fuentes sísmicas, sigue la obtención de la base de datos , en este caso llamado catálogo sísmico, parte fundamental en este tipo de investigaciones, es ampliamente recomendable contar con catálogo sísmico lo más completo posible, lo que permitirá realizar un análisis a partir de datos



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

homogéneos y depurados; el paso siguiente comprende definir las llamadas funciones de atenuación que representan la disipación de la energía del sismo con la distancia. La información ya descrita será utilizada como insumo en el software CRISIS 2015(Ordaz et, al (2008)), el cual emplea el método probabilístico para realizar el análisis. Finalmente, son obtenidos los resultados mismos que son presentados mediante mapas de peligro sísmico el cual considera cuatro rangos, riesgo muy alto, riesgo alto, riesgo medio y riesgo bajo, además nos presenta curvas de peligro sísmico y espectros de peligro uniforme para algún periodo de retorno previamente definido.

La parte ultima de este estudio es estimar los efectos del suelo en el sitio de estudio ,una técnica actual para estimar dichos efectos, utiliza el procesado de mediciones de ruido sísmico ambiental (Nakamura (1989)), esta es una de las técnicas más populares para estimar efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, esta usa mediciones de ruido sísmico para evitar el usar registro de sismos reales ya que el utilizar registros de temblores moderados o fuertes nos puede llevar un mayor tiempo de espera para poder realizar la evaluación del efecto de sitio. Por lo anterior, una buena alternativa es utilizar razones espectrales registros de vibración ambiental o de temblores débiles (por ejemplo, King y Tucker, 1984; Singh et al., 1988; Lermo y Chávez-García, 1993; 1994a, esta técnica fue aplicada a la parte intensa de las ondas-S en registros de movimientos débiles por Lermo y Chávez-García (1993).

Puede ser mencionado adicionalmente que la ventaja principal de la técnica de Nakamura es que elimina la necesidad de una estación de referencia. Esto es muy usual cuando la estación de referencia falla o presenta efectos debido a condiciones topográficas, o bien cuando el registro obtenido por las estaciones en sitios de suelo blando es diferente. Una vez definidos los efectos de sitio, estos serán incorporan a los espectros de peligro uniforme obtenidos en las primeras etapas



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

de este estudio que como ya mencionamos, dichos espectros son obtenidos con la hipótesis de son obtenidos a nivel de la roca basal , este último proceso será realizado de dos formas una que presenta el código Crisis2015 y otra mediante el uso de los llamados modelos unidimensionales que se basan en el principio establecido por Thomson (1950) y N. A. Haskell (1953) para propagar verticalmente las ondas SH un medio compuesto por una o más capas de suelo con propiedades dinámicas bien definidas.

CAPITULO 4. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS PRINCIPALES HALLAZGOS

4.1 FUENTES SÍSMICAS UTILIZADAS.

En este capítulo será estimado el peligro sísmico de los puntos o sitios ya descritos mismos que se ubican en la geografía de la ciudad de Mazatlán Sinaloa, en este análisis los resultados o respuestas son consideradas en suelo rocoso. El proceso de estimar el peligro sísmico en un sitio considera las fuentes sísmicas, las llamadas leyes de atenuación y en su caso los efectos de sitio. A qui iniciaremos describiendo las fuentes sísmicas, las fuentes sísmicas utilizadas en esta investigación son las que se proponen en la normativa (CFE-2015) dicha información fue realizada para utilizarse en estudios que impliquen el riesgo sísmico en algún sitio de la República Mexicana, existen fuentes sísmicas definidas para sismicidad cortical, de subducción de magnitudes moderadas y altas, así como para sismicidad de profundidad intermedia. La geometría de cada fuente y su ubicación geográfica se ilustran en las siguientes figuras:



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 20

Geometría de fuentes corticales CFE-2015

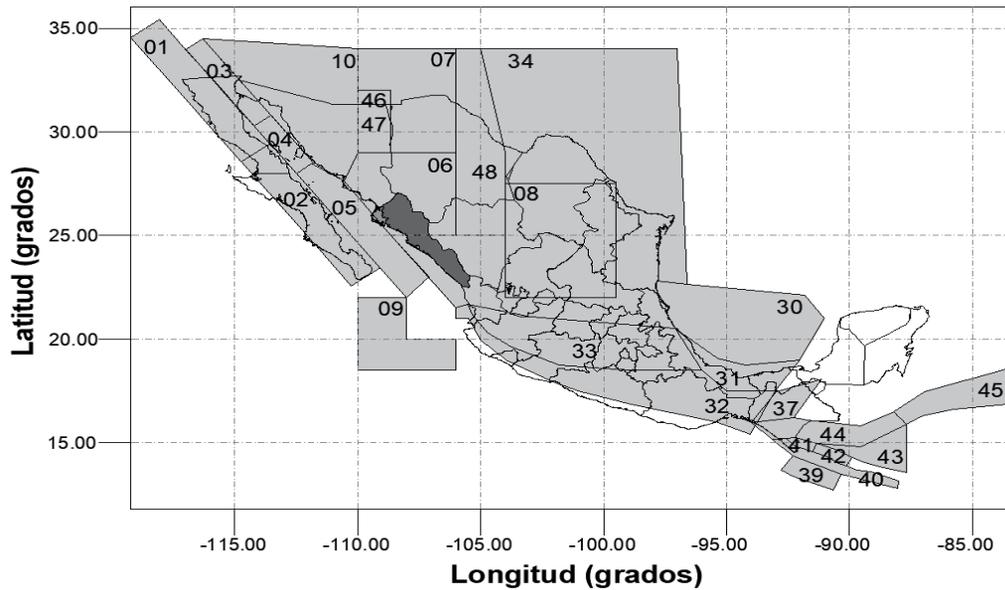
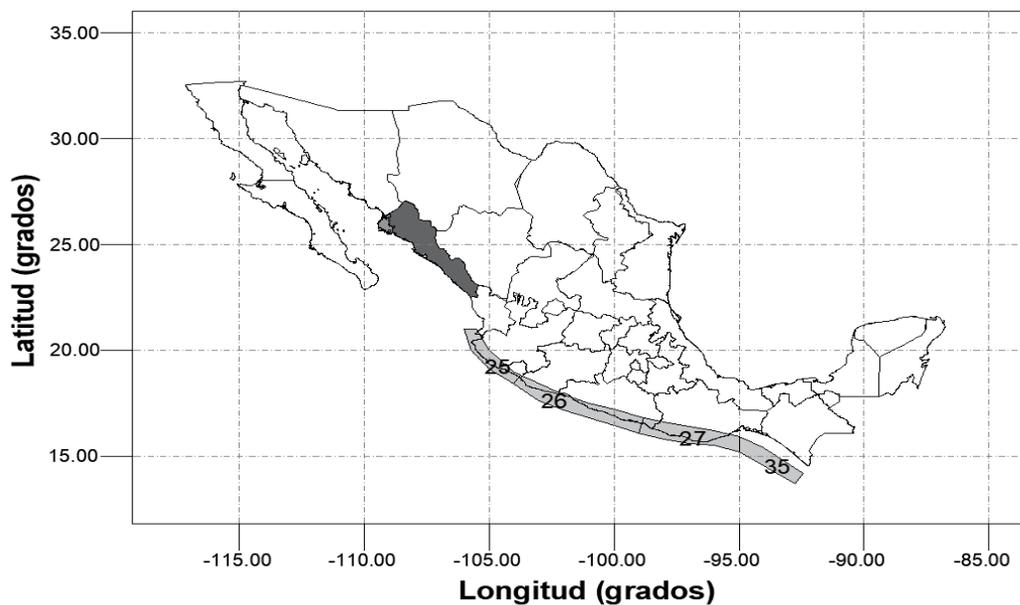


Figura 21

Geometría de fuentes de subducción (magnitudes moderadas) CFE-2015.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 22

Geometría de fuentes de profundidad intermedia (CFE-2015)

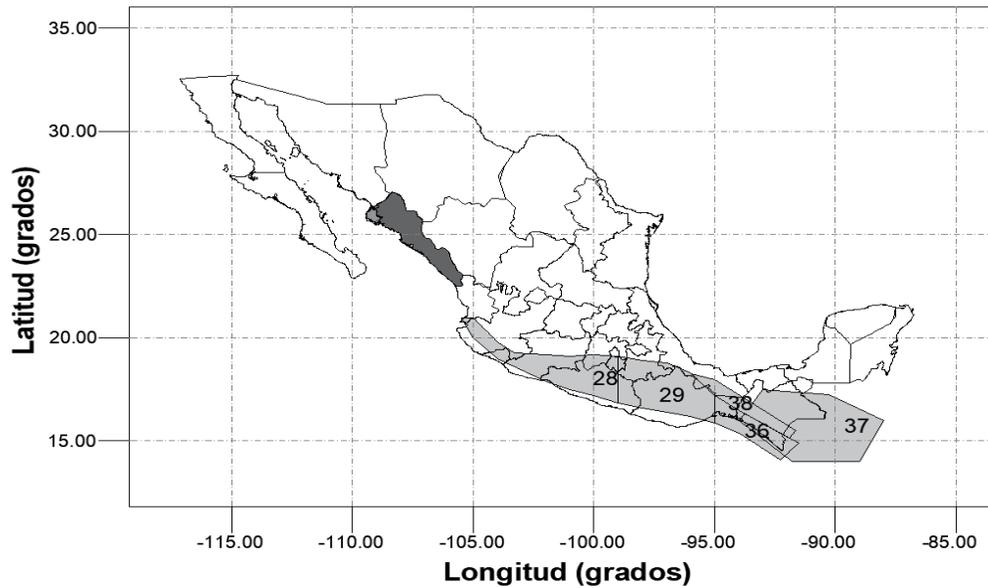
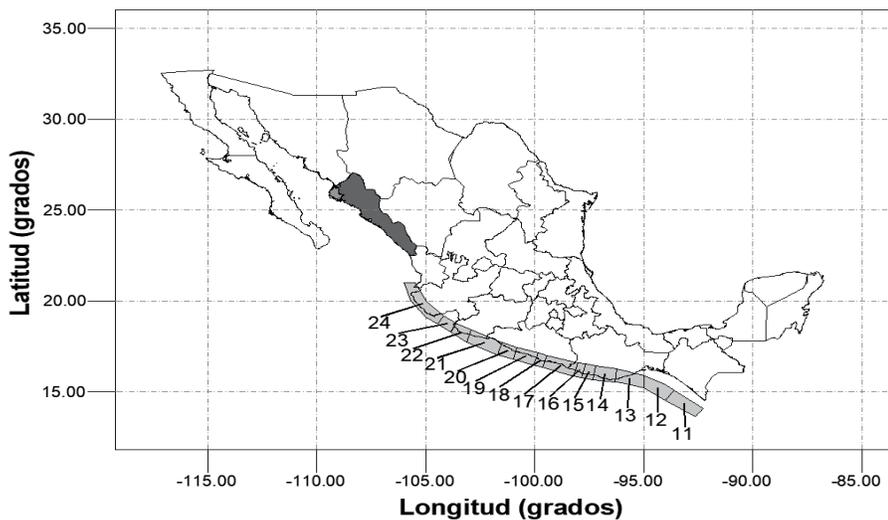


Figura 23

Geometría de fuentes de subducción (magnitudes altas) CFE-2015.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

4.1.2 FUENTES SÍSMICAS Y PARÁMETROS DE SISMICIDAD.

El obtener o definir los parámetros sísmicos de cada fuente sísmica implica al llamado catálogo sísmico el cual es la base para definir los parámetros de la sismicidad de cada fuente sísmica. En el presente estudio, esta etapa será utilizados los parámetros sísmicos que, para el caso, se publican en la normativa ya mencionada (CFE (2015)) en su manual de diseño por sismo. Dichas fuentes sísmicas, se rigen por dos modelos de sismicidad, dichos modelos son: el modelo de Gutenberg & Richter (G-R), el cual caracteriza a las fuentes superficiales (figura 20), de profundidad intermedia (figura 22) y de subducción para sismos con magnitudes moderadas (figura 21). El modelo del Temblor característico se utiliza para representar a las fuentes de subducción para sismos grandes (figura 23), ya que, la ocurrencia de los mismos no se representa apropiadamente por el modelo de G- R.

Las tablas 8 y 9, concentran los parámetros sísmicos de las fuentes establecidas en el manual de CFE-2015, utilizadas para este tipo de estudios, según el criterio o modelo de ley de ocurrencia sísmica utilizado que puede ser el modelo G-R o el modelo del temblor característico.

Tabla 8

Parámetros de fuentes sísmicas que se rigen según el modelo G-R (CFE-2015)

No.	Nombre	M₀	λ₀ (1/año)	E(β)	c(β)	E(M_U)	D(M_U)
01	Baja California Intraplaca Norte	4.50	1.700	1.980	0.097	6.80	0.00
02	Baja California Intraplaca Sur	4.50	1.210	0.933	0.036	5.80	0.00
03	Baja California Interplaca Norte	4.50	2.510	1.782	0.093	7.70	0.30
04	Baja California Interplaca Centro	4.50	0.726	1.637	0.168	7.40	0.40



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

05	Baja California Interplaca Sur	4.50	2.090	1.674	0.082	7.20	0.60
06	Sierra Madre Occidental	4.50	0.122	2.880	0.030	5.60	0.00
07	Cuencas y Sierras	4.50	0.150	2.880	0.030	5.60	0.00
08	Cuenca de Burgos	4.50	0.199	2.880	0.030	5.60	0.00
09	Interfaz Pacífico – Rivera	4.50	3.410	1.736	0.088	7.20	0.00
10	Sismicidad Difusa 02	4.50	0.175	2.880	0.030	5.60	0.00
25	Jalisco Nuevo	4.50	2.010	2.000	0.110	7.00	0.00
26	Guerrero – Michoacán Nuevo	4.50	4.790	2.000	0.077	7.00	0.00
27	Oaxaca Nuevo	4.50	6.720	2.000	0.063	7.00	0.00
28	Prof. Interm. Oeste Nueva	4.00	6.450	2.078	0.040	8.10	0.20
29	Prof. Interm. Centro Nueva	4.00	9.060	2.120	0.040	8.10	0.20
30	Golfo	4.00	0.125	1.842	0.350	6.20	0.00
31	Petrolera	4.00	0.571	2.050	0.160	6.80	0.00
32	Intraplaca	4.50	0.500	1.889	0.124	6.50	0.30
33	Eje Volcánico	4.50	0.677	2.000	0.160	7.60	0.00
34	Sismicidad Difusa 01	4.50	0.658	2.880	0.030	5.60	0.00
35	Chiapas Nuevo – Modificada	4.50	8.000	2.000	0.037	7.00	0.00
36	Prof. Int. Este Nueva – Modificada	4.50	2.600	1.761	0.087	7.80	0.20
37	Chiapas Volcán – Modificada	4.50	0.283	2.005	0.119	7.00	0.20
38	Profundos Chiapas – Modificada	4.50	2.600	2.207	0.093	7.50	0.30
39	G1 – Corteza – Modificada	4.50	4.290	2.118	0.000	7.50	0.20
40	G2 – S2 – Corteza – Modificada	4.50	1.810	2.372	0.000	6.30	0.20
41	G3 – Corteza – Modificada	4.50	0.214	1.543	0.000	6.70	0.30
42	G4 – Corteza	4.50	0.617	1.658	0.000	7.00	0.30
43	G5 – S5 – H1 – Corteza	4.50	0.977	2.026	0.000	6.80	0.20
44	G6 – Corteza – Modificada	4.50	1.700	1.888	0.000	7.80	0.20
45	G7 – Corteza	4.50	0.912	1.796	0.000	7.80	0.20
47	Bavispe GR	4.00	0.500	2.000	0.000	7.40	0.00
48	Chihuahua Oriental	4.50	0.112	2.880	0.030	6.40	0.00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Tabla 9

Parámetros sísmicos para fuentes que se rigen según el modelo del temblor característico (CFE-2015).

Numero	Nombre	Media (T) (años)	σ_M	M_0	M_U
11	Subducción Chiapas	23	0.27	7.00	8.40
12	Subducción brecha de Tehuantepec	70	0.27	7.00	8.40
13	Subducción Oaxaca Este	262	0.27	7.00	8.40
14	Subducción Oaxaca 01	32	0.27	7.00	8.40
15	Subducción Oaxaca 02	63	0.27	7.00	8.40
16	Subducción Oaxaca Oeste	84	0.27	7.00	8.40
17	Subducción Ometepec	23	0.27	7.00	8.40
18	Subducción San Marcos	82	0.27	7.00	8.40
19	Subducción Guerrero	35	0.27	7.00	8.40
20	Subducción Petatlán	48	0.27	7.00	8.40
21	Subducción Michoacán	22	0.27	7.00	8.40
22	Subducción Colima 01	46	0.27	7.00	8.40
23	Subducción Brecha de Colima	64	0.27	7.00	8.40
24	Subducción Jalisco	17	0.27	7.00	8.40
46	Bavispe TC	500	3.00	7.40	7.60

La estimación de riesgo sísmico considerando suelo rocoso, inicialmente fue realizado considerando varias fuentes circundantes a la zona de estudio, fue aplicado el criterio de desagregación para así definir cuales fuentes aportaban información para estimar el riesgo sísmico en los sitios en estudio, iniciamos con treinta y dos fuentes para terminar solo con aquellas que aportaban información en lo ya mencionado, al final solo fueron utilizada aquellas fuentes que más información aportaron ,las fuentes así definidas se nombran Baja California Interplaca Sur y Sismicidad Difusa 01.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

4.1.3 LEYES DE ATENUACIÓN.

Otro concepto que es fundamental en este tipo de estudios, son las leyes de atenuación, en capítulos anteriores ya fue definido que es una ley o función de atenuación. La tabla siguiente concentra las leyes de atenuación que la normativa (CFE (2015)) propone según el tipo de fuente sísmica y su sismicidad.

Tabla 10

Leyes de Atenuación y sus parámetros

Autor	Amplitud	Rango de periodos estructurales (seg)	Rango de distancia (km)	Rango de magnitudes (Mw)	Distancia a la fuente(km)	Región tectónica
Abrahamson and Silva (1987)	cm/seg ²	0.01 – 5.00	0.1 – 200	4.0 – 7.5	Distancia más cercana al área de ruptura	Corticales
Arroyo et. al (2010)	cm/seg ²	0.00 – 5.00	16 – 400	5.0 – 8.5	Distancia más cercana al área de ruptura	Subducción interplaca
Atkinson and Boore (2006)	cm/seg ²	0.01 – 5.00	1 – 1000	3.50 – 8.00	Distancia más cercana al área de ruptura	Corticales

El tipo de fuentes definidas para aplicar en este estudio fue mediante el criterio de desagregación, dichas fuentes son consideradas de sismicidad cortical por lo que se les asigno la ley de atenuación de Abrahamson and Silva (1987) lo cual está indicado en CFE-2015, dicha ley de atenuación considera magnitudes de Mw entre 4.0-7.5, distancias de 0.1 a 200 kms y periodos estructurales de 0.01 a 5 segundos.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

CAPITULO 5. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO EN LA CIUDAD DE MAZATLÁN SINALOA SIN CONSIDERAR LOS EFECTOS DE SITIO.

5.1 RESULTADOS PARA SUELO ROCOSO

Ahora, en esta parte del estudio corresponde a presentar los resultados obtenidos en cada uno de los sitios estudiados, dichos resultados fueron obtenidos a partir del espectro de diseño y la curva de peligro sísmico. Cabe recordar que dichos resultados son considerando la respuesta sobre suelo rocoso.

Una vez definido lo anterior, se realizó el procesado con el objetivo de estimar el riesgo sísmico en los sitios ya multicitados. Cabe mencionar que el resultado de los análisis de riesgo sísmico se expresa mediante el llamado espectro de peligro uniforme y la curva de riesgo sísmico para cada periodo estructural previamente definido.

Los análisis y resultados aquí presentados fueron realizados con el software denominado CRISIS2015 (Ordaz et al 1990), en el Anexo se presenta una breve descripción de como este software realiza estos análisis y la forma en que presenta los resultados. Una vez realizado los cálculos para estimar el análisis del peligro en los sitios ya descritos; se obtienen los resultados, en esta etapa, dichos resultados son obtenidos despreciando los efectos de sitio.

Como ya se mencionó ,Inicialmente fue realizado un análisis del peligro sísmico considerando treinta y dos fuentes , se hicieron varios análisis y se revisaban los resultados, fue un proceso iterativo, si los resultados de un análisis a otro se mantenían es decir se obtenían el mismo espectro de diseño y la curva de peligro sísmico, en el siguiente análisis no se consideraban las fuentes más alejadas del sitio es decir se disminuía el número de fuentes, si los resultados no cambiaban se quitaban otras fuentes y se realizaba de nuevo otro análisis al final fue observado que las fuentes



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

que más aportaban a los resultados del sitio en estudio, eran las fuentes denominadas Sismicidad Difusa 01 y la fuente Baja California Interplaca Sur y solo con esas fuentes se decidió realizar los análisis definitivos.

Con el proceso ya descrito se obtuvieron en cada análisis los resultados y estos fueron expresados mediante el espectro de diseño al 5% de amortiguamiento del crítico, así como con la curva de peligro sísmico en cada uno de los sitios, por ser el espectro de diseño una herramienta fundamental en el análisis y diseño sismorresistente se decidió que para representar el peligro sísmico en cada sitio fuera usado solo el espectro de diseño ,el cual fue definido utilizando las tasas de excedencia siguientes del 10 % para un tiempo de exposición de 50 años ,este tiempo de exposición se define comúnmente mediante la vida útil de la estructura. La tasa de excedencia mencionada corresponde a un periodo de retorno (T_r) de 475 años, es común en las normativas que como espectro de diseño para estructuras no esenciales sea utilizado el espectro de un $T_r = 475$ años, cuando se trata de diseñar alguna estructura esencial este espectro sea afectado por un factor de 1.5, para obtener el espectro con el cual será diseñada dicha estructura esencial. Adicionalmente en esta parte de resultados será presentadas las formas espectrales que utiliza CFE-2015 en su normativa dichas formas espectrales se presentan como un adicional ya que mediante el empleo de CRISIS2015 se define la aceleración en roca en cada sitio en estudio y los mismo ofrece la normativa CFE 2015 mediante su software de apoyo PRODISIS ,esta parte de análisis tiene un aspecto interesante ya que podrá ser observado que esta normativa para proponer el espectro regional en todos los casos usa un periodo constante de 2304.15 años mediante el cual define el llamado espectro transparente y que de manera directa dicha herramienta no dará el espectro transparente para algún periodo de



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

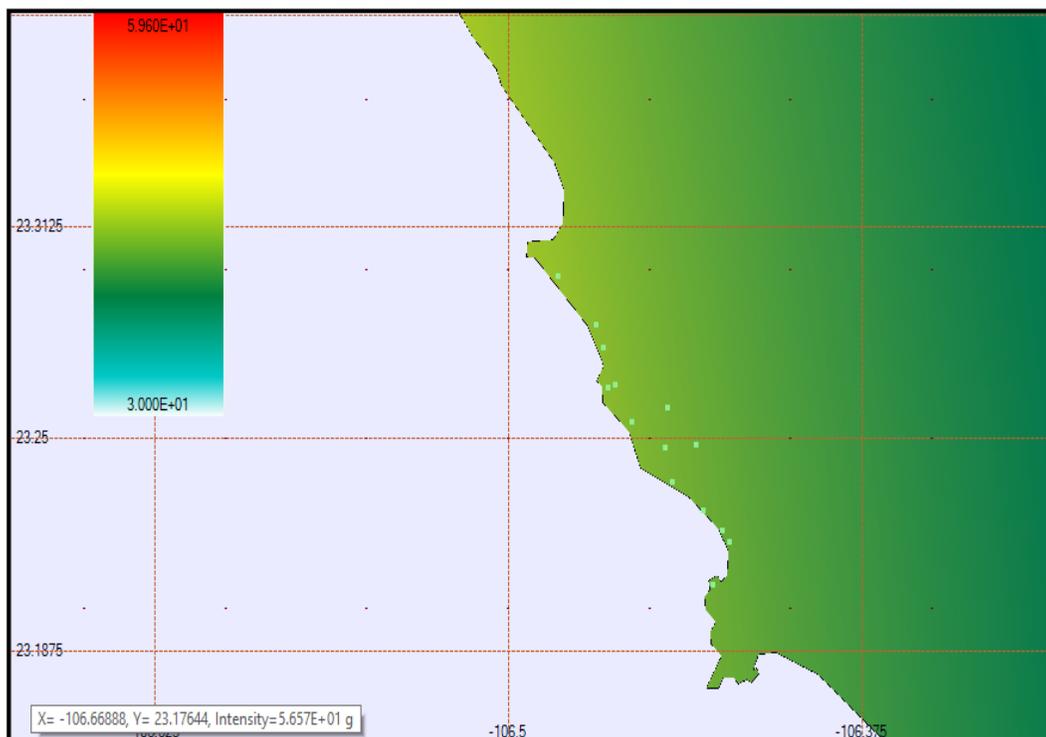
retorno distinto al aquí mencionado (2304.15) ,lo anterior será mostrado gráficamente.

A continuación, al final se obtuvieron los resultados para los catorce sitios estudiados, pero por cuestiones de espacio aquí solo se presentan los resultados para tres sitios (MZ1, MZ5 y MZ14) el resto de los resultados obtenidos para los demás sitios se presentan en el anexo de este documento.

La figura 24 indica los sitios estudiados. Las fuentes utilizadas y las leyes de atenuación se muestran en la figura 5.6 y 5.7 respectivamente. Todo fue realizado en CRISIS-2015.

Figura 24

Localización de sitios en estudio.

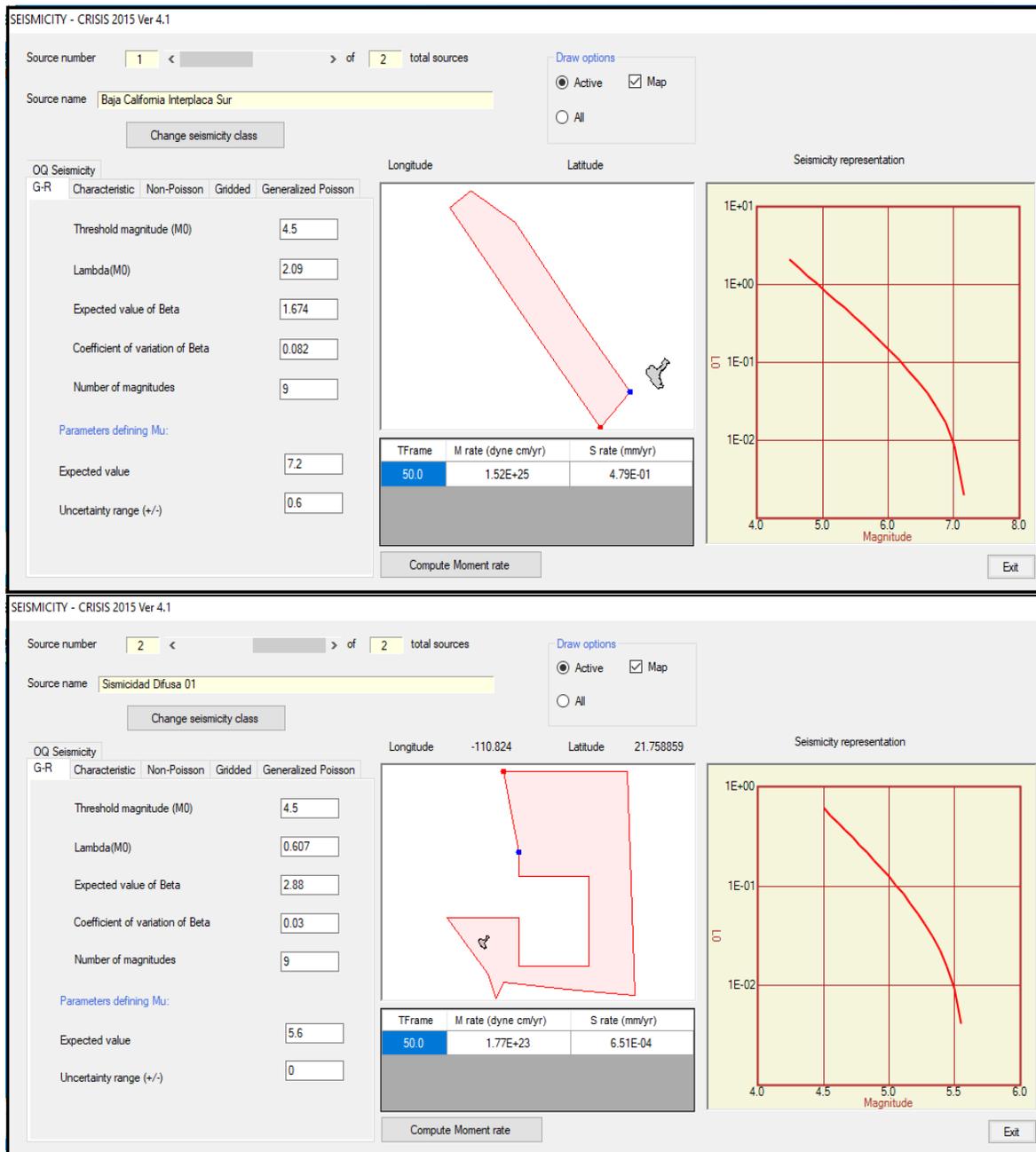




UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 25

Fuentes utilizadas

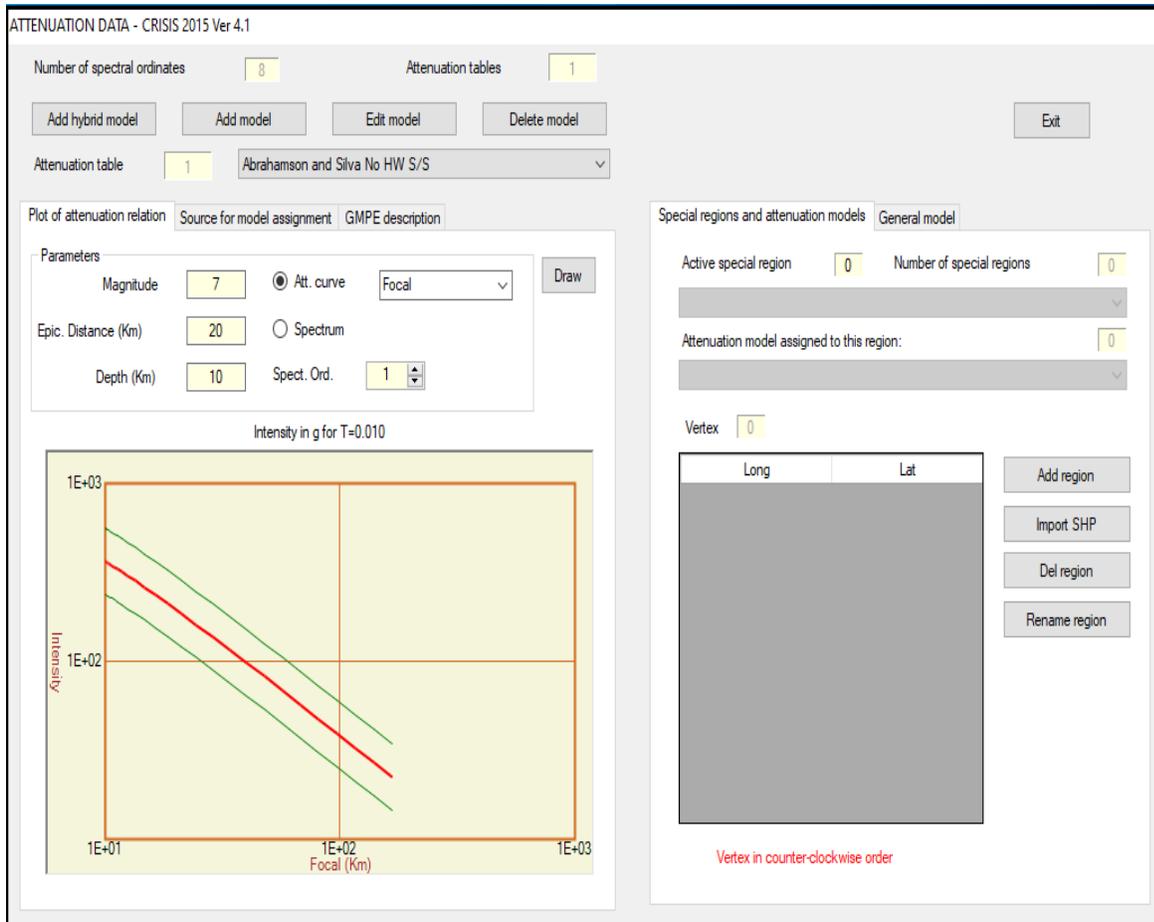




UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 26

Ley de atenuación utilizada.



Como ya fue mencionado serán presentados solos los resultados para tres sitios de los catorce estudiados, dichos resultados son mediante el espectro de peligro uniforme considerando el 5% de amortiguamiento y mediante la curva de peligro sísmicos obtenida para cada periodo estructural. las figuras siguientes contienen lo mencionado.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 27

Resultados del análisis de riesgo sísmico en el sitio MZ1

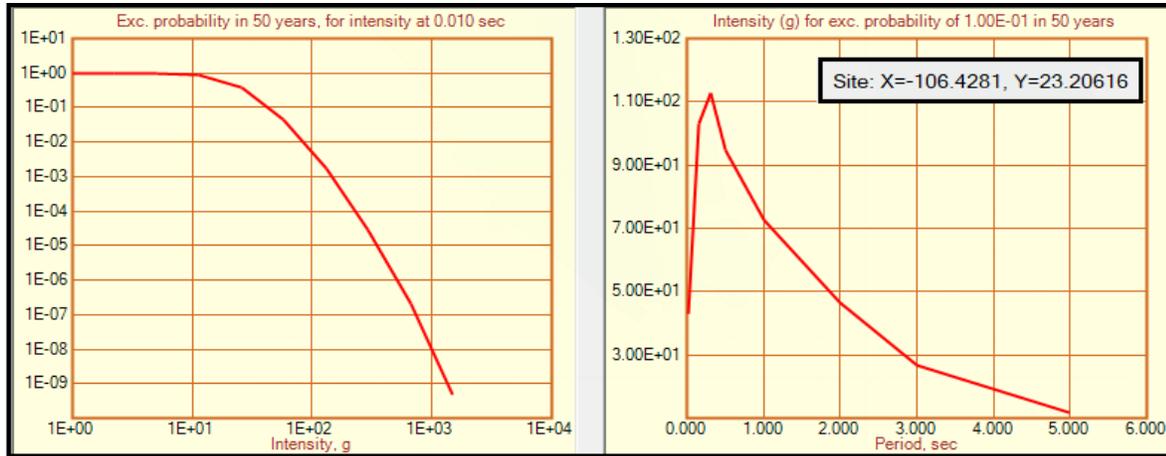
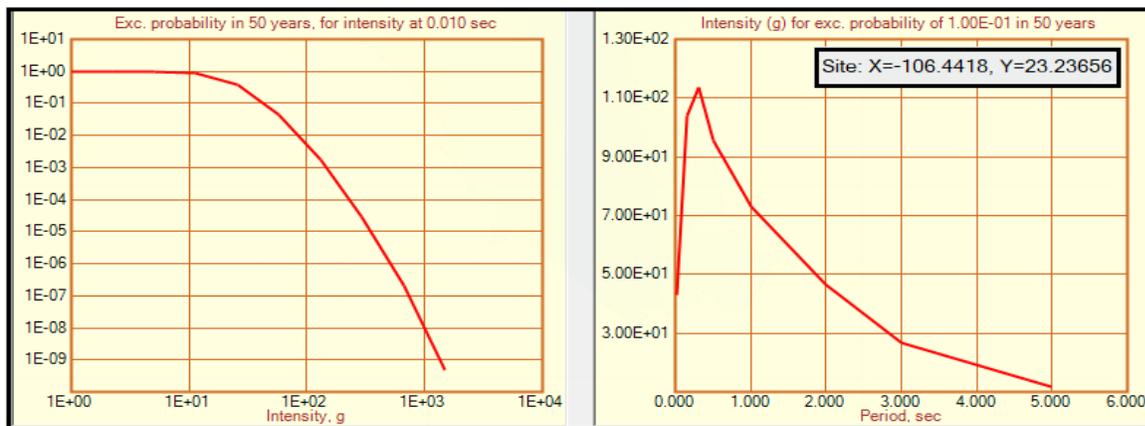


Figura 28

Resultados del análisis del riesgo sísmico en el sitio MZ5

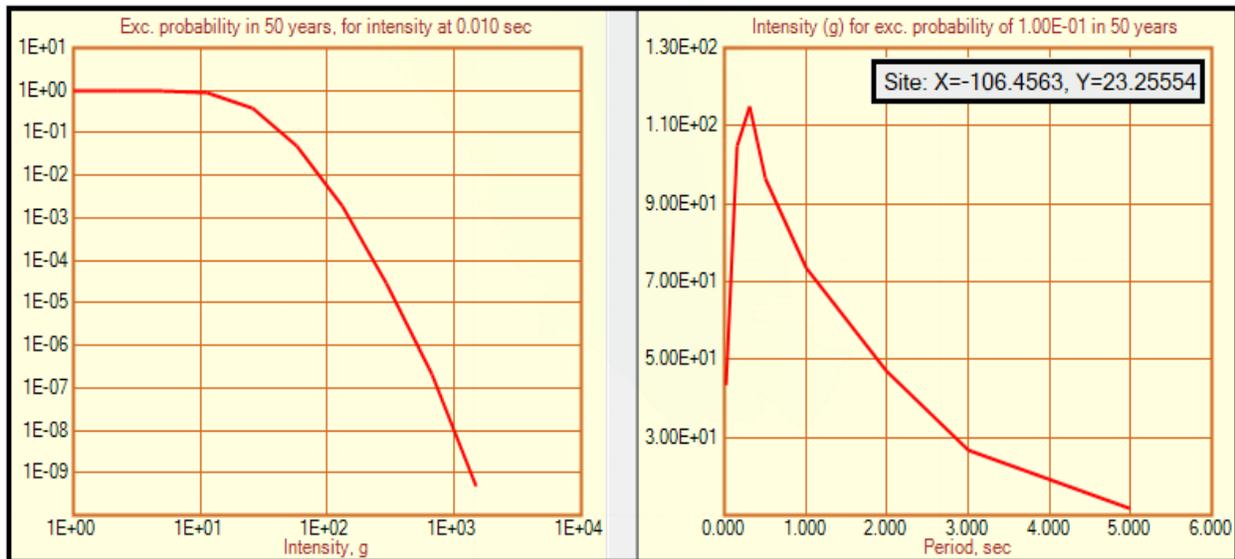




**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 29

Resultados del análisis de riesgo sísmico en el sitio MZ14



Una vez mostrados los resultados del peligro sísmico en roca obtenidos en CRISIS2015 para cada sitio en estudio, a continuación, se muestran las formas espectrales según CFE-2015, obtenidas para tres de los sitios estudiados (MZ1, MZ5 y MZ14), el resto de dichas formas espectrales pueden ser revisadas en el anexo del presente documento. La escala vertical es %g y el horizontal periodo en segundos.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 30

Resultados del análisis de riesgo sísmico mediante el espectro de diseño en sitio MZ1

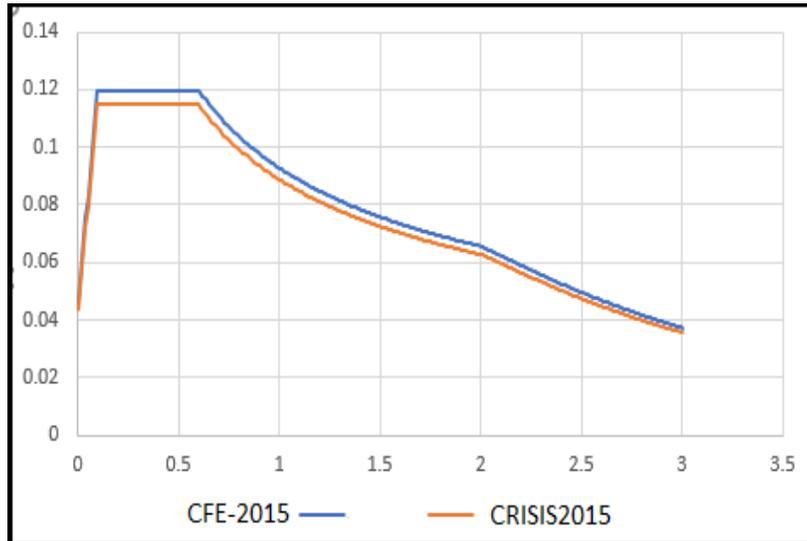
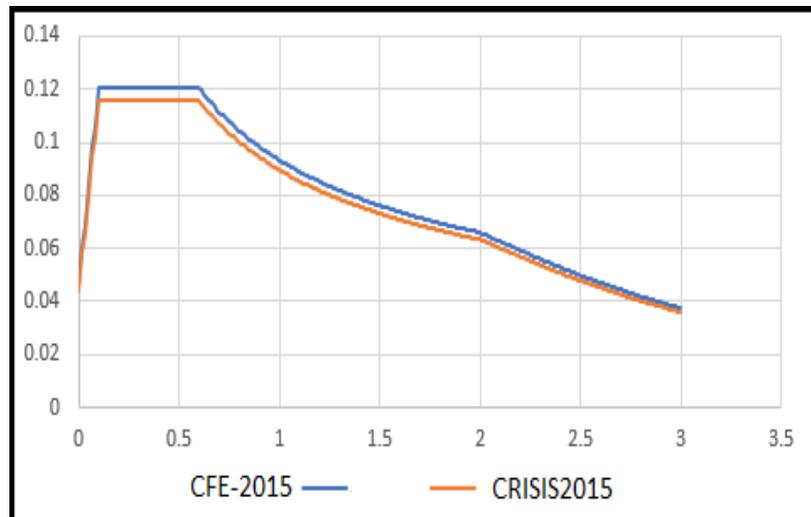


Figura 31

Resultados del análisis de riesgo sísmico mediante el espectro de diseño en sitio MZ5

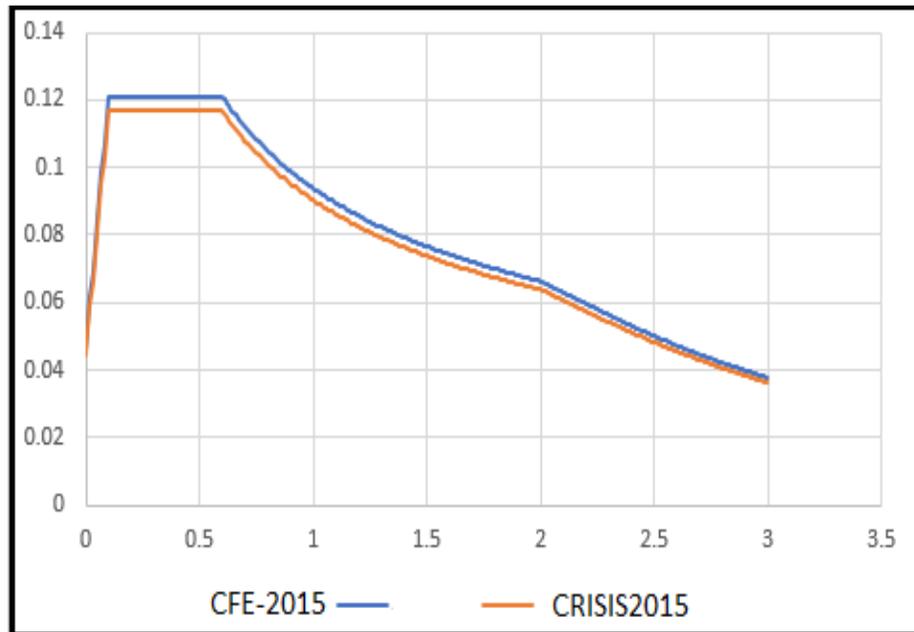




UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 32

Resultados del análisis de riesgo sísmico mediante el espectro de diseño en sitio MZ14



Puede ser observado que las formas espectrales obtenidas con los resultados obtenidos con PRODIDIS y CRISIS2015 son muy aproximadas entre sí, pero en todos los casos la forma espectral obtenida con CRISIS2015 es de amplitud menor a la de la forma espectral definida con la información obtenida con PRODIDIS.

De los resultados obtenidos, puede ser observado que los resultados del análisis del peligro sísmico considerando el suelo rocoso no presenta entre cada sitio diferencias notables, esto es debido a que los sitios en estudio están muy cercanos entre sí y además de que no se está considerando el efecto del suelo en el sitio, que es la parte de este estudio que será realizado en el siguiente capítulo.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

CAPITULO 6. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO EN LA CIUDAD DE MAZATLÁN SINALOA CONSIDERANDO LOS EFECTOS DE SITIO.

Una vez estudiado el análisis probabilístico en los sitios ya mencionados sin considerar los efectos de sitio, en esta sección dicho análisis será realizado con la hipótesis de que el suelo en dichos sitios no es rocoso, si no suelo de ciertas características físicas y dinámicas bien definidas. En esta parte de la investigación es necesario definir una señal sísmica, el perfil estratigráfico del suelo, así como establecer propiedades de deformación angular respecto al módulo de corte y el amortiguamiento para cada capa de suelo (Seed and Idriss, 1969), lo anterior para cada uno de los sitios en estudio, todo lo anterior permitirá definir el efecto de sitio o la influencia del suelo en su respuesta a la acción sísmica.

Para obtener la respuesta sísmica en cada sitio será utilizado el método lineal equivalente, dicho método ya fue descrito en la sección 2.7.1.2, el proceso numérico será realizado con el software Deepsoil (Hashash,2020).Para obtener la respuesta sísmica en la superficie de un perfil de suelo ,se realiza un análisis de propagación de ondas, en este caso las ondas son del registro sísmico utilizado ,se supone que dicho registro sísmico carece de efectos de sitio lo que es equivalente a decir que este se obtuvo en alguna estación sísmica colocado sobre suelo rocoso, las ondas sísmicas inician su propagación desde la base del suelo hasta salir a la superficie en donde será obtenido el registro pero ya afectado por la columna de suelo, dicho efecto puede aumentar las propiedades de dicho registro (frecuencia y amplitud) en el caso de que el registro aumente su amplitud a esta respuesta se le llama efecto de convolución ,en el caso contrario ,es decir en que el registro disminuye sus propiedades dicho proceso es conocido como deconvolucion ,ambos casos se desarrollan en el dominio de la frecuencia.



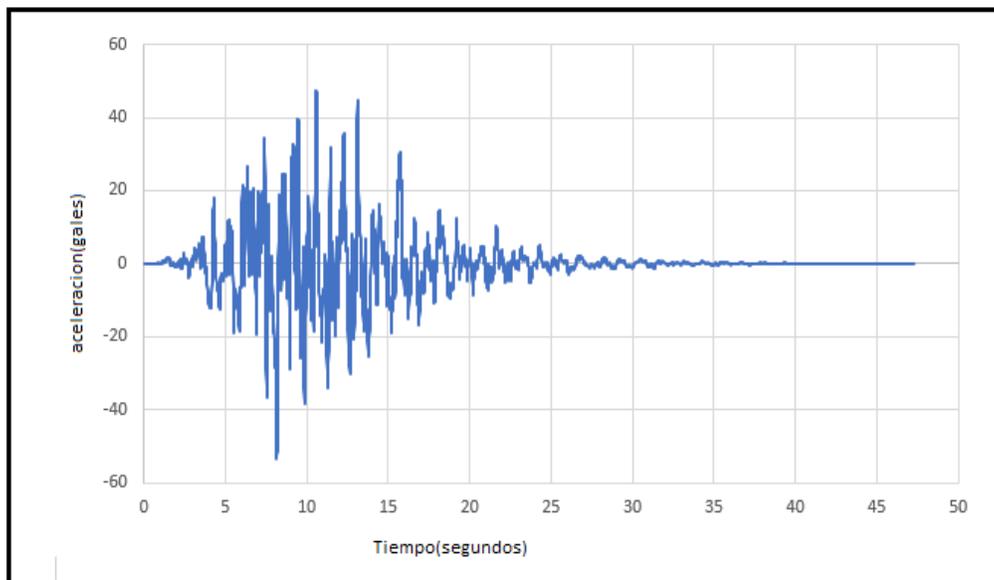
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

6.1 REGISTRO SÍSMICO EN ROCA Y PROPIEDADES DEL SUELO EN CADA SITIO EN ESTUDIO.

En esta sección será definidas las señales sísmicas, mismas que serán propagadas en el suelo de cada uno de los catorce sitios en estudio, dichas señales serán obtenidas mediante el software seismoartif ,y como ya fue definido en la primera parte de esta investigación que prácticamente los resultados en suelo rocoso fueron muy similares en los catorce sitios ,la señal sísmica definida artificialmente será utilizada como señal a propagar en las columnas de suelos definidas en cada uno de los catorce sitios en estudio. La señal sísmica resultante del procesado numérico se ilustra en la figura siguiente.

Figura 33

Registro sísmico artificial





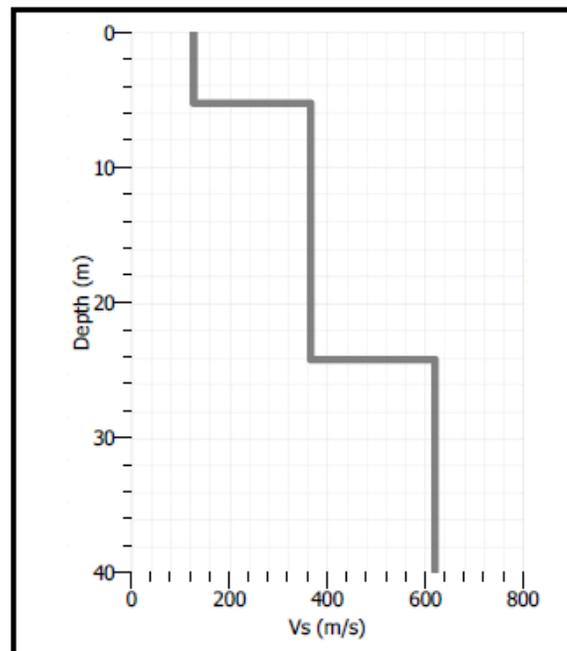
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

La señal sísmica definida tiene una aceleración máxima de 53.48 gales y una duración de 40 segundos.

Una vez definida la señal sísmica se procede a definir los modelos de suelo, en la sección 3.6 fueron descritas las características estratigráficas de los suelos en los catorce sitios en estudio, como ilustración se ilustra el perfil de suelo en el sitio MZ10.

Figura 34

Perfil de onda de corte (V_s) en sitio MZ10



Para considerar la variación de las propiedades dinámicas de las capas de suelo con la deformación, se utilizarán las llamadas curvas de degradación, que para ellos proponen varios autores, las figuras 5 y 35 muestran las propuestas por ((Seed e Idriss (1971)), existen este tipo de curvas para distintos

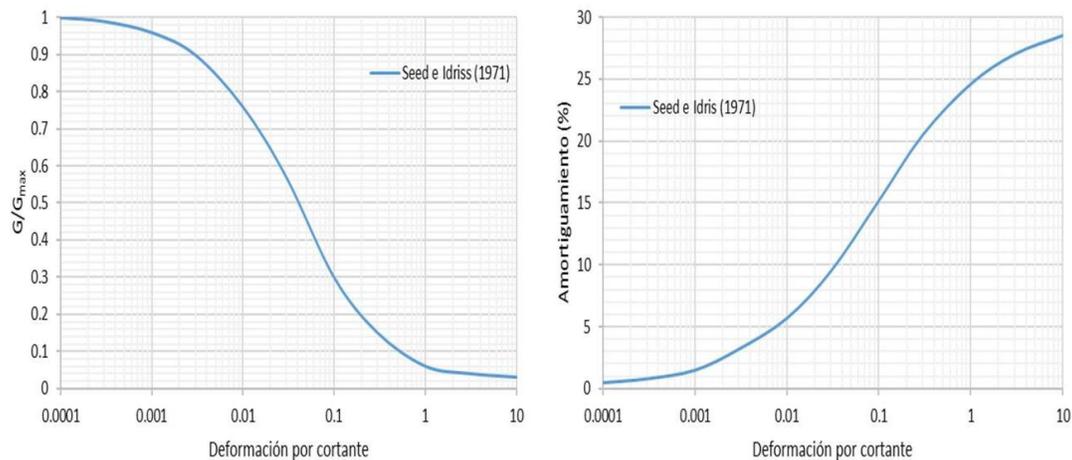


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

tipos de suelos (arenas, gravas y arcillas), estas curvas tienen sus limitaciones ya que estas no pueden ser aplicadas confiablemente si el suelo en estudio es un suelo mixto.

Figura 35

Curvas de degradación del módulo de corte y Amortiguamiento con la deformación angular (Seed and Idriss (1971)).



Una vez definidas las señales sísmicas, así como las propiedades dinámicas del suelo se realiza el proceso numérico cuyo resultado será el registro sísmico obtenido en la superficie del suelo, dicho registro ya estará afectado por el suelo en el sitio. Cabe mencionar que el resultado puede ser la señal en superficie en aceleración, velocidad o desplazamiento; incluso la respuesta puede ser el espectro de respuesta en superficie. Todo el procesado de propagación de ondas será realizado como ya fue mencionado utilizando el software Deepsoil (Hashash,2020) que usa el método lineal equivalente.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

6.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL PELIGRO SÍSMICO EN CADA SITIO EN ESTUDIO (CON EFECTOS DE SITIO).

Fueron realizados los análisis de propagación en todos los sitios en estudio, el resultado fue la señal sísmica en superficie afectada por el sitio, la figura 36, 37 y 38 muestran las señales sísmicas obtenidas en los sitios MZ1, MZ5 y MZ14, señales similares obtenidas en el resto de los sitios en estudio.

Figura 36

Registro sísmico con efectos de sitio en MZ1

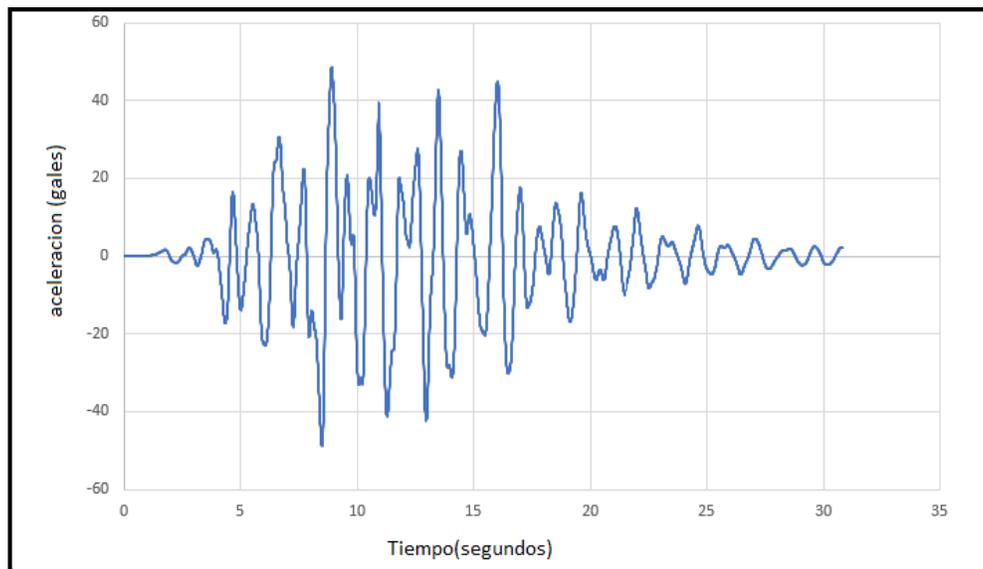




Figura 37

Registro sísmico con efectos de sitio en MZ5

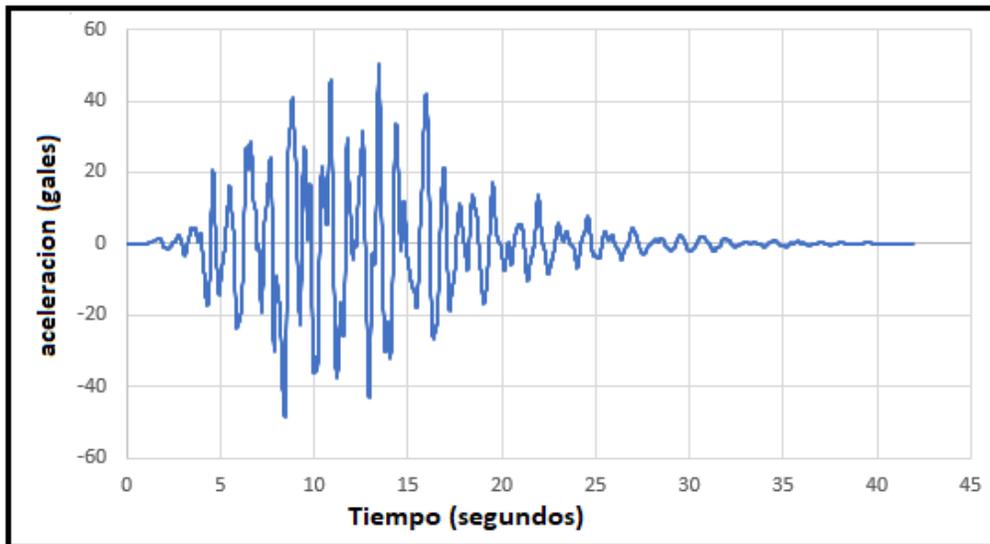
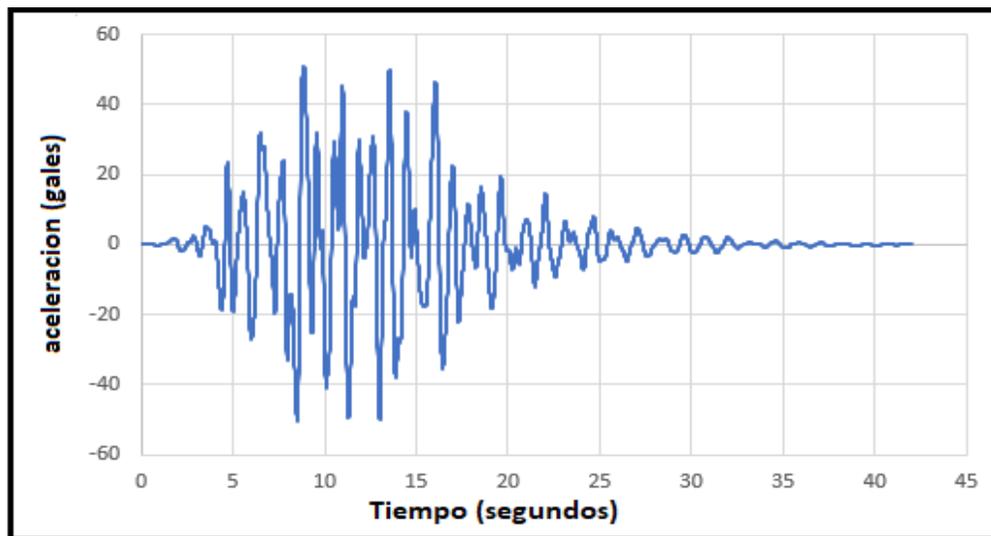


Figura 38

Registro sísmico con efectos de sitio en MZ14





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 37

Comparativa espectral en sitio MZ1 Crisis2015 vs CFE-2015

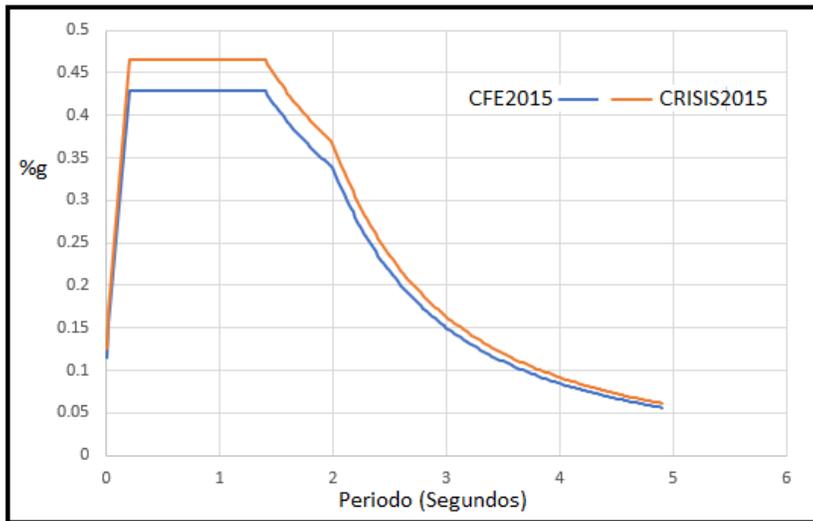


Figura 40

Comparativa espectral en sitio MZ5 Crisis2015 vs CFE-2015.

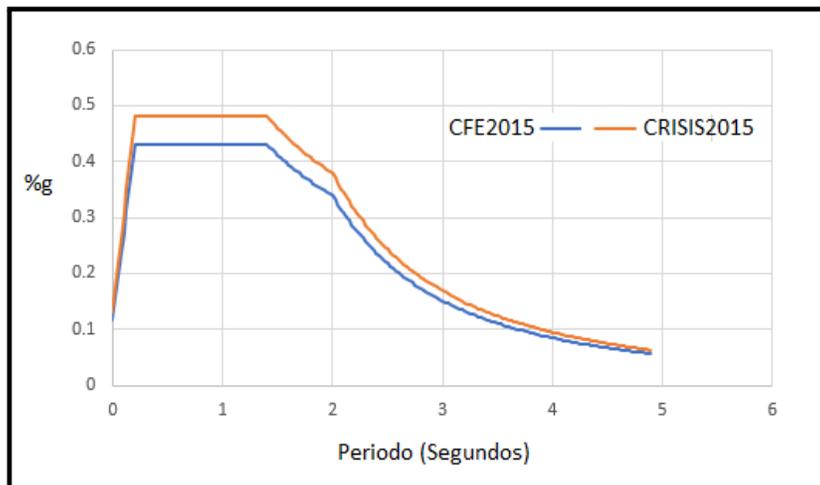
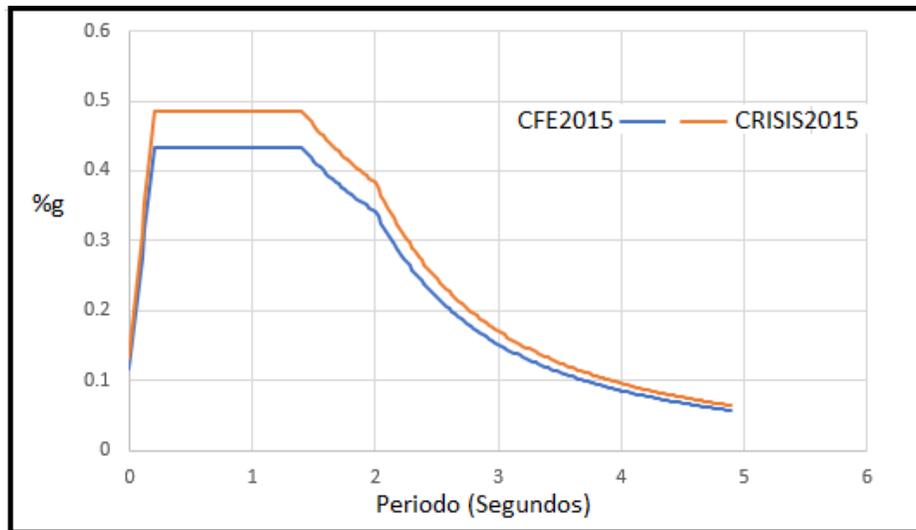




Figura 41

Comparativa espectral en sitio MZ14 Crisis2015 vs CFE-2015



Del análisis de las formas espectrales obtenidas con PRODISIS y CRISIS2015 puede observarse que la amplitud espectral en la mayoría de los casos fue superior la obtenida a partir de la información obtenida con CRISIS2015, las amplitudes espectrales obtenidas para los catorce sitios analizados se concentran en la tabla 11.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Tabla 11

Ordenadas espectrales obtenidas en cada sitio.

SITIO	CFE-2015(%g)	CRISIS2015(%g)
MZ1	0.430	0.460
MZ2	0.120	0.150
MZ3	0.420	0.470
MZ4	0.430	0.460
MZ5	0.430	0.480
MZ6	0.430	0.450
MZ7	0.430	0.460
MZ8	0.410	0.430
MZ9	0.120	0.130
MZ10	0.380	0.430
MZ11	0.122	0.128
MZ12	0.540	0.580
MZ13	0.129	0.138
MZ14	0.430	0.480

De la tabla 11, se puede observar que el sitio que más amplifica es el denominado MZ12 resulta muy lógico ya que el estudio de mecánica de suelos, así como la refracción sísmica del sitio reportan capacidad de carga muy baja y velocidades de ondas de corte promedio del orden a los 201 m/s respectivamente, lo anterior es característica de suelos blandos. Por otro lado, el sitio que menos amplificó es el llamado MZ2 para el cual el estudio de mecánica de suelos reportó alta capacidad de carga y el estudio geofísico ondas de corte de 721 m/s características de suelos firmes o muy densos



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

CAPITULO 7: PROPUESTA DE SOLUCION

Ahora, en esta parte del estudio corresponde analizar los resultados obtenidos en cada uno de los sitios estudiados, dichos resultados fueron obtenidos a partir del espectro de diseño y la curva de peligro sísmico. Aquí serán analizados los resultados obtenidos considerando ambos casos estudiados, es decir suponiendo en el primer caso que el suelo es considerando rocoso y en un segundo caso este se considera suelo sobre roca. Cabe recordar que tanto MOC-CFE-2015 y CRISIS2015 son dos herramientas de diseño estructural, de categoría altamente reconocida. Como ya se mencionó Inicialmente fue realizado un análisis del peligro sísmico considerando treinta y dos fuentes sísmicas, se hicieron varios análisis y se revisaban los resultados, fue un proceso iterativo, para cuantificar la aportación de cada fuente a los resultados aquí obtenidos, al final fue observado que las fuentes que aportaban a los resultados del sitio en estudio eran las fuentes denominadas Sismicidad Difusa 01 y la fuente Baja California Interplaca Sur y solo con esas fuentes se decidió realizar los análisis definitivos.

En los análisis fue considerado unas tasas de excedencia del 10 % para un tiempo de exposición de 50 años, este tiempo de exposición se define comúnmente mediante la vida útil de la estructura. La tasa de excedencia mencionada corresponde a un periodo de retorno (T_r) de 475 años, es común en las normativas que como espectro de diseño para estructuras no esenciales sea utilizado el espectro de un $T_r = 475$ años cuando se trata de diseñar alguna estructura esencial este espectro sea afectado por un factor de 1.5, para obtener el espectro con el cual será diseñada dicha estructura esencial.

De los resultados obtenidos en esta parte del estudio se obtuvieron formas espectrales cuyas ordenadas son muy cercanas numéricamente variando entre si apenas en promedio un 4.0% en promedio, es decir que para el caso de análisis suponiendo suelo rocoso ambas herramientas dan resultados muy semejantes cuantitativamente hablando.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

En el caso del estudio de suelo sobre roca las ordenadas espectrales obtenidas con CRISIS2015 resultaron más altas, lo anterior puede ser considerado desde dos puntos de vista, por un lado, diseñar con el espectro de diseño definido por CRISIS2015 será más seguro, pero ligeramente más antieconómico, aquí la decisión de con qué espectro diseñar quedará en manos del ingeniero estructurista.

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES

Del estudio realizado podemos concluir lo siguiente:

Al diseñar cualquiera estructura se deben emplear herramientas de reconocida categoría, este estudio demuestra que para la república mexicana MOC-CFE-2015 a través de Prodisis su software de respaldo, y el software de análisis del riesgo sísmico CRISIS2015 pueden ser utilizadas de manera confiable para estimar los parámetros que definen los espectros de diseño sismorresistente. Al definir que espectro utilizar para el diseño de estructuras desplantadas sobre suelo dicho suelo debe ser caracterizado lo más fiable posible ya que de ello depende fuertemente la seguridad de la estructura por diseño, ya que en este estudio pudo ser estimado que la diferencia entre las ordenadas espectrales considerando suelo rocoso y suelos sobre rocas dicha amplitud puede amplificarse arriba de 11% ,lo anterior puede representar diseñar de lado de la inseguridad si las características del suelo en el sitio no son consideradas ,dicho porcentaje es para la zona aquí estudiada pudiendo variar para otras regiones.

CAPITULO XI: RECOMENDACIONES

Es ampliamente recomendable que, para estimar las amplificaciones del suelo, con las que se obtienen resultados parámetros para construir los espectros de diseño sísmico, se realicen trabajos de campo cuyo objetivo sea caracterizar lo mejor posible el suelo en estudio y evitar utilizar información que venga en la



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

literatura o manuales de diseño ,además que dicho trabajo de campo ser realice con equipos bien calibrados, otra recomendación que se puede mencionar por los resultados aquí obtenidos, es que en algún caso preliminar de análisis, el espectro de diseño obtenido en el sitio MZ12 puede ser utilizado de manera confiable.

Los espectros de diseño aquí definidos pueden ser considerados como base, para obtener sismogramas artificiales para ser utilizados en esta región del país, lo anterior para cuando se tenga la necesidad de realizar algún análisis dinámico paso a paso.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

REFERENCIAS

- Abrahamson, N.A. & Silva, W.J. (2008) Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 241, 67-97.
- Aguiar, R (2010). Peligrosidad Sísmica del Ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas, con aisladores de base FPS. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, (15) 1, 85-119.
- 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, 769-785.
- Atkinson G., Atkinson G., Atkinson G., & Boore D. (2006). Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6), 2181-2205.
- Akkar S, Bommer JJ (2007a) Prediction of elastic displacement response spectra at multiple damping levels in Europe and the Middle East. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36, 1275-1301.
- Boore D. (2006). Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6), 2181-2205.
- Boore, D.M. & Atkinson, G.M. (2008) Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01s and 10.0s. *Earthquake Spectra*, 241, 99-138.
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y.(2008). NGA ground motion model for the geometric mean



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

- horizontal component of PGA, PGV, PGD, and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s, *Earthquake Spectra*, 24, 139–171
- Castro R. (2005). Stochastic Modeling of the 30 September 1999 Mw 7.5 Earthquake, Oaxaca, Mexico, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 2259-2271
- Cauzzi, C. & Faccioli, E. (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records, *J. Seismol.*, 12(4), 453–475
- Comisión Federal de Electricidad (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo, *Instituto de Investigaciones Eléctricas*, México.
- Comisión Federal de Electricidad (2008). Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo, *Instituto de Investigaciones Eléctricas*, México.
- Comisión Federal de Electricidad (2008), Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo, *Instituto de Investigaciones Eléctricas*, México.
- Cornell, C.A., (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- Chopra, A. K. (2012). Dynamics of structures (Theory and Applications to Earthquake Engineering). Cuarta edición. Prentice Hall. 940.
- Darendeli, M.B. (2001). Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, [Ph.D. Dissertation], University of Texas at Austin, 362 .
- Dominguez R., Tonatihu et al. (2019). Source parameters, focal mechanisms and stress tensor inversion from moderate earthquakes and its relationship with subduction Zone. *Geofís. Intl.* 58(2), 127-137.
- Esteva, L. (1968). Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico, [Tesis doctoral no



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

publicada], *Universidad Nacional Autónoma de México*, México.

Esteva, L. (1970). Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería. *Institute of Engineering*, Series-246, UNAM, México

Esteva, L. (1976). Seismicity , en C. Lomnitz y E. Rosenblueth (eds.), *Seismic Risk and Engineering Decisions*, Ámsterdam, Elsevier.

Etna 2. Acelerógrafo. (s.f.)

https://kinometrics.com/post_products/etna-2/

Flores-López F. A. & Ayes-Zamudio J. C. (2018). Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de wavelets, orientados a aplicaciones geotécnico estructurales. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 98, 1-24.

Gasparini D A, Vanmarcke E.H. SIMQKE (1976) Users manual and Documentation. *Dept. of Civil Eng. Massachusetts Institute of Technology*,

Gutenberg, B., & Richter, C. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4): 185-188.

Hartzell, S. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, 5,1-4

Hashash, Y. M. A., Park, D., Chin, T. C., & Phillips, C. (2002). DEEPSOIL (Version 5.0):
University of Illinois at Urbana-Champaign.

Haskell, N.A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the seismological Society of America*. 43(1), 17-34

Idriss, I.M. & Sun, J.I. (1992). Shake91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits. User's Guide, *Center for*



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Geotechnical Modeling, Civil Engineering Department, UC Davis

- Idriss, I. M. (2008). An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 217-242
- INEGI (2010). Compendio de Información Geográfica Municipal 2010, *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
- King JL, Tucker BE (1984) Observed variations of earthquake motion across a sediment-filled valley. *Bull Seismol Soc Am*, 74(1),137–151
- Kishida, T., Boulanger, R. W., Abrahamson, N. A., Driller, M. W., & Wehling, T. M. (2009a). Site effects at the Sacramento-San Joaquin Delta, *Earthquake Spectra*, 25(2), 301-322.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Leonardo S.M. et. al (2012). PSM2012: Aplicación web para la difusión y consulta de datos de peligro sísmico. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, 98.
- Lermo, J and F J Chavez-Garcia (1994a). ¿Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am*, 84, 1350-1364
- Lermo, J. & F J Chávez-García (1993), Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574-1594.
- López-Pineda, L. & C. J. Rebollar (2005). Source characteristics of Loreto Earthquake of 12 March 2003(Mw 6.2) that occurred in the transform fault in the middle of the Gulf of California, Mexico, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 95, 419–430.
- McGuire RK (1995). Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *Bulletin of the Seismic Society of America*, 85, 1275-1284.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

- Mertens P G, Preumont A, (1997). Improved Generation and Application of Artificial Time Histories and PSD Functions, SMIRT 14 – K21/7
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Report Railway Tech. Research Institute*, 30(1), 25-33.
- Newmark N.M. (1959). A Method of Computation for Structural Dynamics. Engineering Mechanics Division. California, *J. Geophys. Res.*, 113, 1-18.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J. (2004). Peligro Sísmico en México, Programa de cómputo, *Instituto de Ingeniería UNAM*.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J. (2008). CRISIS2007. Program for computing seismic hazard. *Instituto de Ingeniería UNAM*.
- Ordaz, M., Martinelli F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti C., & D'Amico V. (2015). CRISIS2015, Ver.4.1. Program for computing seismic Hazard, *Instituto de Ingeniería, UNAM*.
- Quinde, P., & Reinoso, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería Sísmica*. 94,1-26.
- Reglamento de Construcción del Municipio de Mazatlán Sinaloa (2006).
- Reid, H. F. (1906). La mecánica del terremoto, El terremoto de California del 18 de abril de 1906; *Informe de la Comisión de Investigación del Estado*, 2, *Carnegie Institución de Washington, Washington, DC* 1910
- Rodriguez-Lozoya, H. E., L. Quintanar, R. Ortega, C. J. Rebollar, & Y. Yagi (2008). Rupture process of four mediumsized earthquakes that occurred in the Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, 113



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

- Rodriguez-Lozoya, H. E. et al. (2010) Source parameters of the July 30, 2006 (Mw 5.5) Gulf of California earthquake and a comparison with other moderate earthquakes in the region. *Geofís. Intl.* 49(3),119-129.
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, & R. Youngs (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seism. Res. Lett.* 68, 180–189
- Seed, H.B., Lee, K.L. & Idriss, I.M. (1969) Analysis of Sheffield Dam Failure. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 95, 1453-1490.
- Seed H B & I M Idriss (1970). Soil moduli and damping factors for dynamics response analysis, *Report Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, USA.*
- Seed, H.B. & Idriss, I.M. (1971) Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 97, 1249-1273.
- Seismosoft (2016). SeismoMatch 2016 – A computer program for spectrum matching of earthquake records,
- Seismosoft (2016). SeismoArtific 2016 – A computer program for spectrum matching of earthquake records,
- Silva, W J, & K Lee (1987). WES RASCAL Code for Synthesizing Earthquake Ground Motions, en: State of the Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, *Department of the, US Army Corps of Engineers.*
- Singh, S.K., Mena, E. & Castro, R.R., (1988). Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Mexico City from strong motion data, *Bull. seism. Soc. Am.*, 88(2), 451–477.

Sismógrafo PASI modelo 16S24P(s.f.)

<https://www.pasisrl.it/c/es/>

SSN. (2021). Catálogo de sismos, Servicio Sismológico Nacional. Servicio Sismológico Nacional.

Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Richart, F. E. (1974). CharSoil, characteristics method applied to soils. *100(3)*, 247-263

Thomson W. (1950). Transmission of elastic waves through stratified solid. *Journal of applied physics*. 21. 89-93

Vucetic, M. & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, ASCE 117: 1, 89-107

Yagi, Yuji et al. (2004). Source Rupture Process of the Tecomán, Colima, Mexico Earthquake of 22 January 2003, Determined by Joint Inversion of Teleseismic Body-Wave and Near-Source Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(5).

Rodríguez Lozoya, (2023). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ1

Sand Storm Gam (2021). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa. MZ2

Lazcano Diaz, (2018). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ3

Sand Storm Gam (2020). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ4

Lazcano Diaz (2010). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ5

Rodríguez Lozoya, (2023). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ6



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Zamudio Zavala P. (2016). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ7

Aguilar V. (2023). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ8

Castañeda de la R. (2022). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ9

Rodríguez Lozoya, (2023). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ10

Rodríguez Lozoya, (2023). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ11

Rodríguez Lozoya, (2023). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ12

Rodríguez Lozoya, (2023). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ13

Zamudio Zavala P. (2019). Proyecto particular, Mazatlán Sinaloa.MZ14



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

APENDICE A

TABLAS E IMAGENES



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Tabla 12 MZ5

(Lazcano Díaz (2020)) .

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
1.00	143.0	1840.00
2.00	215.0	1890.00
2.60	128.0	1820.00
1.80	253.0	1880.00
4.50	613.0	2000.00
4.00	333.0	1900.00
9.00	1049.0	2300.00

Tabla 13 MZ6

(Propia, Cociente espectral)

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
8.50	200.0	1800.00
10.00	400.0	1900.00
11.00	800.0	1950.00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Tabla 14

MZ7 (Zamudio Zavala (2016)).

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
1.00	175.0	1390.0
1.00	261.0	1390.0
1.00	311.0	1390.0
1.00	276.0	1390.0
1.00	288.0	1390.0
1.00	361.0	1394.0
1.00	506.0	1373.0
1.00	346.0	1393.0
1.00	384.0	1345.0
1.00	551.0	1348.0
1.00	475.0	1377.0
1.00	552.0	1375.0
1.00	530.0	1368.0
1.00	605.0	1377.0
1.00	628.0	1397.0
1.00	650.0	1422.0
1.00	670.0	1452.0
1.00	690.0	1481.0
1.00	710.0	1521.0
1.00	730.0	1570.0

Tabla 15

MZ8 (Aguilar Valdez (2023)).

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
6.00	190.0	1480.00
4.00	260.0	1580.00
4.00	325.0	1830.00
3.00	410.0	1830.00
5.00	450.0	1830.00
5.00	550.0	1950.00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Tabla 16

MZ9 (Subterra (2022)).

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
2.06	230.0	1800.00
8.31	340.0	1900.00
19.70	750.0	1950.00

Tabla 17

MZ10 (Propia, Cociente espectral).

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
6.00	110.0	1700.00
18.00	339.0	1900.00
6.00	615.0	1950.00

Tabla 18

MZ11 (Propia Cociente espectral).

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
4.00	280.0	1400.00
6.00	384.0	1500.00
20.00	780.0	1800.00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Tabla 19

MZ12 (Rodríguez Lozoya (2021))0.

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
1.00	126.0	1790.00
1.00	119.00	1800.00
2.00	142.00	1800.00
1.00	149.00	1800.00
2.00	199.00	1900.00
4.00	210.00	1900.00

Tabla 20

*MZ13 (Rodríguez Lozoya (2023), *en Apéndice*

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
8.00	387.0	1900.00
22.00	892.0	2200.00

Tabla 21

*MZ14 (Zamudio Zavala (2019), *en Apéndice*

ESPEJOR(M)	VS(M/S)	PESO VOL.(KG/M3)
3.00	120.0	1470.00
4.00	227.0	1600.00
4.00	350.0	1800.00
19.00	900.00	2000.00



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 42

Edificaciones en sitio MZ5





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 43

Edificaciones en sitio MZ8





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 44

Edificaciones en sitio MZ10.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 45

Edificaciones en sitio MZ11.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 46

Edificaciones en sitio MZ12.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 47

Edificaciones en sitio MZ13.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Figura 48

Edificaciones en sitio MZ14





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

APENDICE B

EJEMPLOS CON CRISIS2015 Y DEEPSOIL V7



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

B1. Breve descripción del programa CRISIS2015.

Actualmente existen programas computacionales que permiten realizar el cálculo o estimación de la peligrosidad sísmica para alguna región de interés, una de estas herramientas es CRISIS2015, este software es considerado alta confiabilidad además de ser software de OPEN SOURCE, en el presente trabajo fue utilizado esta herramienta computacional en su versión 4.1.A

A continuación, se describe e ilustra un proceso realizado para un análisis del peligro sísmico realizado en CRISIS2015. Este análisis es un ejemplo su intención es ilustrar como realiza sus análisis este software.

La lista siguiente indica la secuencia empleada por CRISIS2015 en sus análisis, aunque no es una regla a seguir si es de utilidad seguir dicho orden

- 1.-Geografía del sitio o zona de estudio.
- 2.-Geometría de las fuentes sísmicas y su sismicidad.
- 3.- Leyes de predicción del movimiento o leyes de atenuación.
- 4.- Resultados (Curvas de Peligro sísmico y Espectros de Diseño).

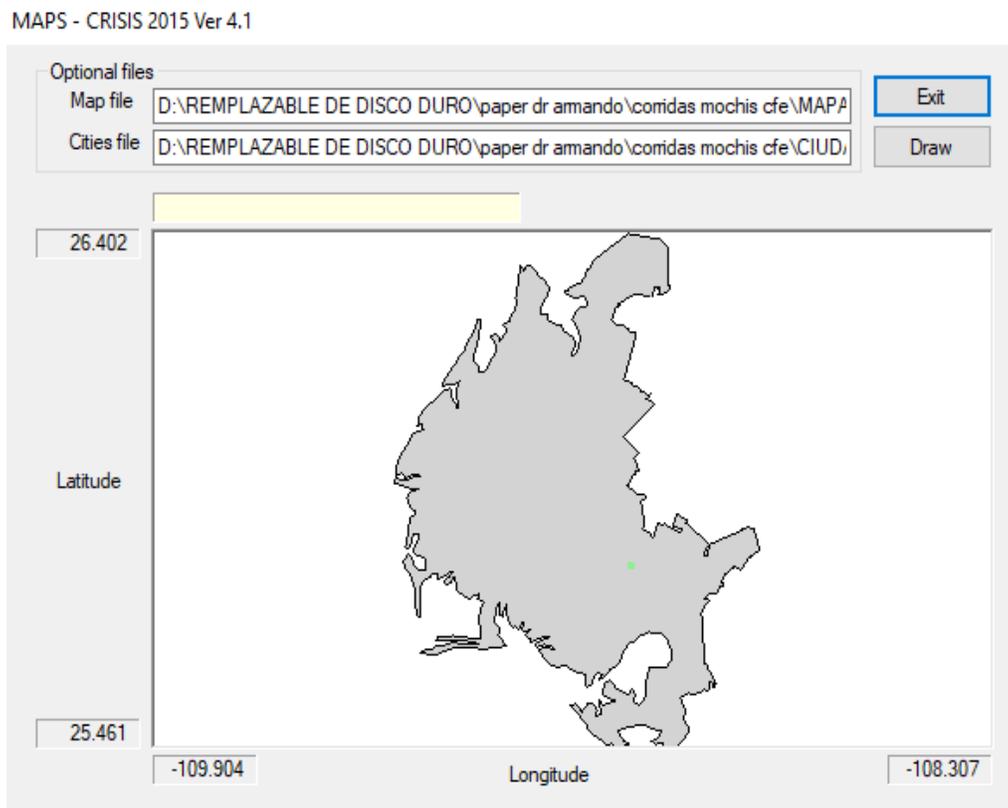


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Inicialmente CRISIS2015 requiere de un mapa con los sitios (Ciudades) donde se desee realizar un análisis el peligro sísmico, es decir la geografía de la zona de estudio.

Figura 49

Mapas y Sitios.



Los mapas y ciudades en un estudio de peligro sísmico, sirven solo como ayudas gráficas, ambos archivos facilitan la interpretación de los resultados.

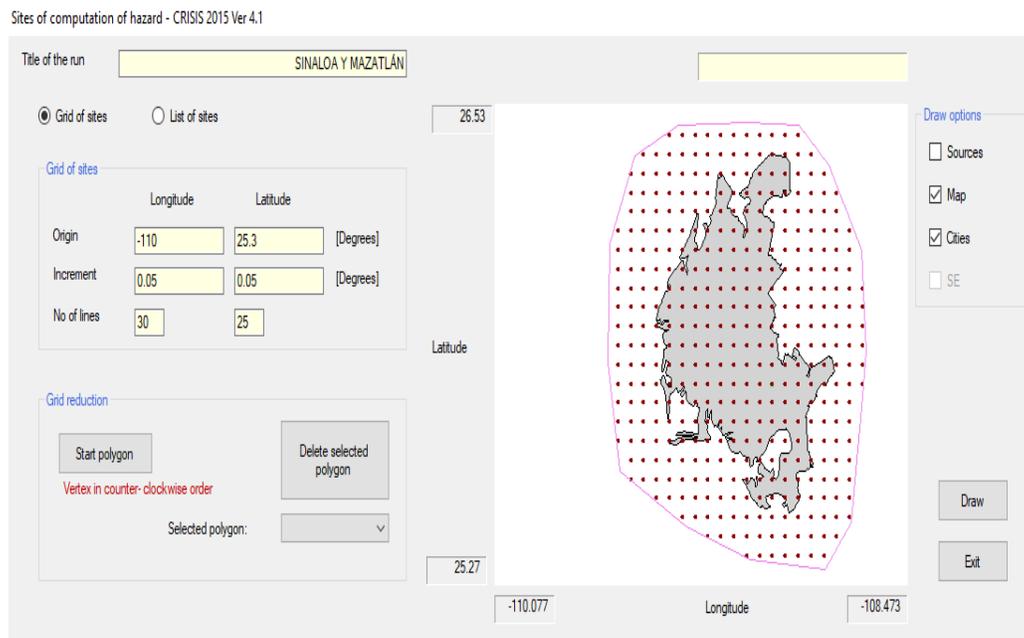


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Ya definida la geografía de la zona de estudio con el fin de hacer optimo el proceso computacional, CRISIS2015 permite hacer un polígono y en este una malla, misma que define los puntos donde se calcularan las respuestas del análisis dicha malla sirve de apoyo al software para realizar las interpolaciones necesarias.

Figura 50

Polígonos y mallas



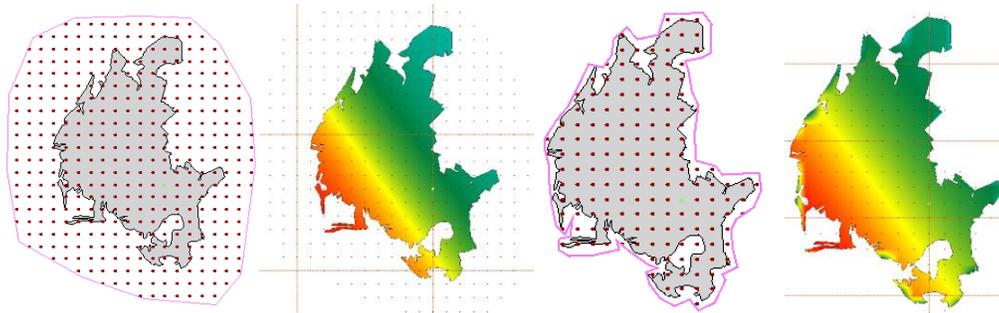
En este punto o etapa del análisis, se selecciona la densidad de la malla y se delimita el área dentro de la cual se requiere el cálculo. Es importante hacer un correcto uso en ambas opciones, ya que un mallado muy pequeño produciría tiempos excesivos en el cálculo sin llegar a obtener mejores resultados y una mala delimitación del área podría producir resultados erróneos, como se muestra en las figuras 4.7 la parte derecha muestra una incorrecta delimitación y la parte izquierda una correcta delimitación de la zona en estudio.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 51

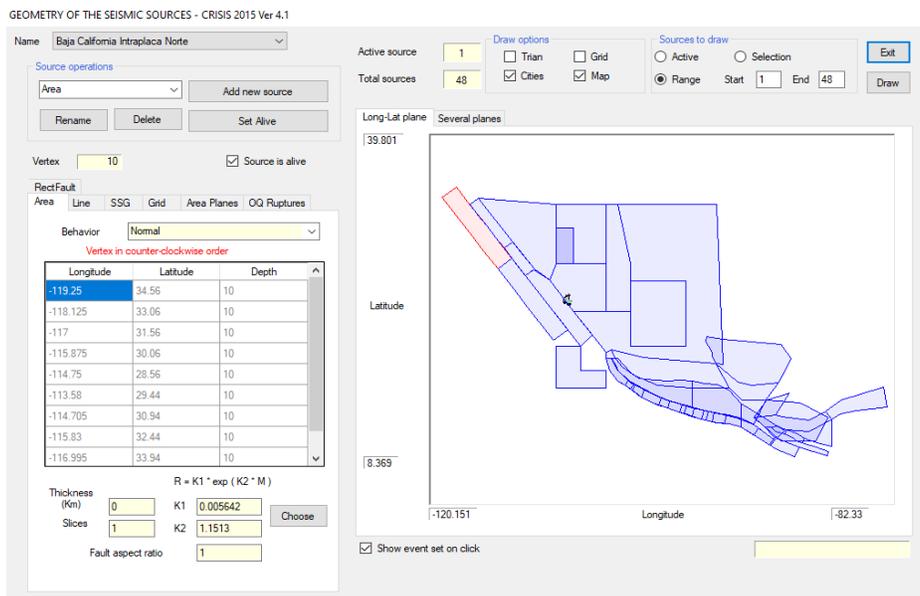
Mapa con delimitación correcta del área (izq.) y mapa con delimitación incorrecta del área (der.)



La siguiente etapa consiste en definir las fuentes sísmicas su geometría y sismicidad Como ilustración, la figura siguiente muestra la geometría y parámetros de una de las fuentes sísmicas utilizadas por CRISIS2015 en sus análisis (fuente en color rojo).

Figura 52

Fuentes Sísmicas, geometría y parámetros.



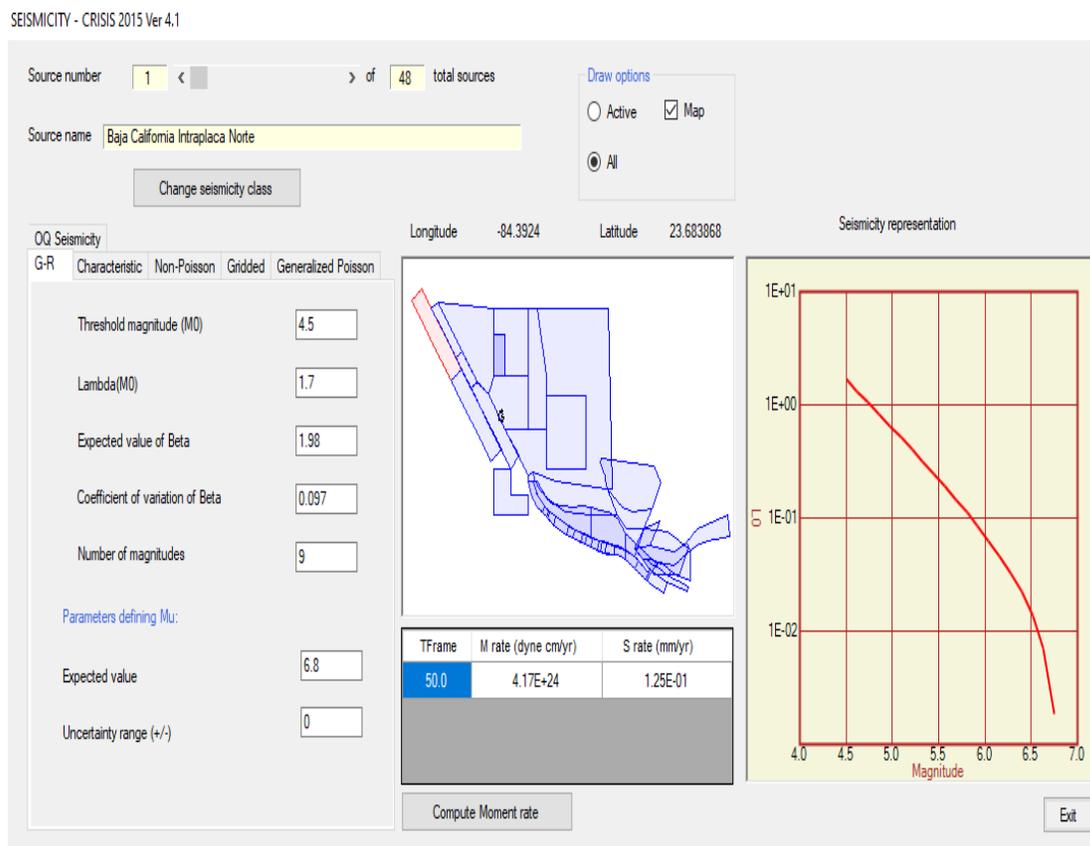


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

Una vez definida la geometría de las fuentes sísmicas se le asignan sus parámetros sísmicos, dichos parámetros ya fueron mencionados en capítulos anteriores. La figura 4.9 muestra cómo deben ser introducidos los parámetros sísmicos en cada fuente, además de mostrar las fuentes sísmicas consideradas en el análisis presenta una gráfica en la cual se representa la sismicidad de dicha fuente.

Figura 53

Fuentes sísmicas y graficas de sismicidad



Una vez que se tienen cargadas las fuentes sísmicas, la geometría y su sismicidad, se les puede asignar un modelo de recurrencia sísmica, los utilizados en CRISIS2015 son, el modelo de recurrencia conocido como modelo truncado de Gutenberg & Richter y así como el modelo del temblor característico. El análisis requiere de leyes de atenuación para cada una de las fuentes, cabe aclarar que una fuente puede tener más

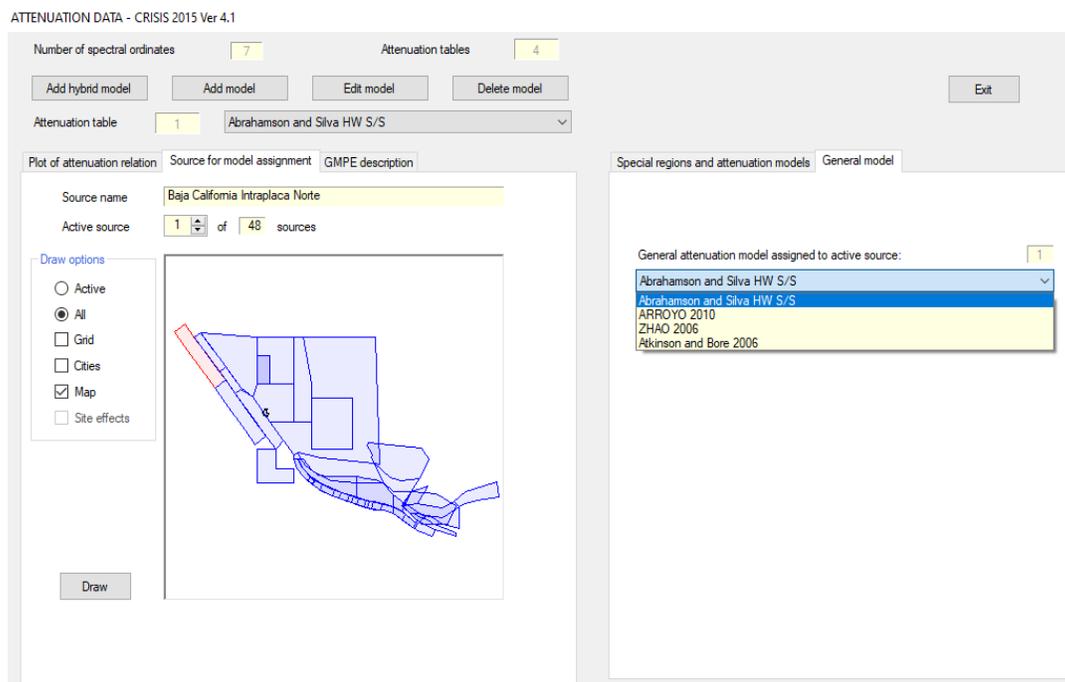


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

de una ley de atenuación asignada incluso existe la posibilidad de realizar leyes de atenuación llamadas "hibridas", reciben este nombre debido a que pueden manejarse más de una ley de atenuación a la vez en un mismo análisis. Las leyes de atenuación pueden ser obtenidas de la biblioteca propia de CRISIS2015 la figura 4.10 ilustra esta etapa. Como ya fue mencionado anteriormente algunas leyes de atenuación consideran el mecanismo de ruptura, el tipo de zona sísmica, así como el tipo de suelo en el sitio de análisis.

Figura 54

Fuentes sísmicas y Leyes de atenuación.



En CRISIS2015 es necesario definir los periodos estructurales, así como las ordenadas espectrales a utilizar en el análisis, dichas variables son de utilidad para obtener la respuesta del análisis mediante el espectro de diseño, normalmente este espectro puede ser obtenido al 5% de amortiguamiento crítico y en ordenadas espectrales en pseudoaceleracion, dichas ordenadas pueden ser definidas en gales (cm/seg²) o bien en porcentajes de aceleración. La figura 4.11 muestra cómo es que deben ser introducidos los parámetros



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**

mencionados, puede ser observado que este espectro puede ser graficado en distintas formas geométricas, la opción más común para presentar el espectro de diseño es en una gráfica tipo "Linear" que significa que ambas escalas, la horizontal y la vertical serán graficados en forma lineal.

Figura 55

Parámetros espectrales

INTENSITIES FOR EACH SPECTRAL ORDINATE - CRISIS 2015 Ver 4.1

Spectral ordinates	
Total number of spectral ordinates	7
Actual spectral ordinate	1
Structural period of actual spectral ordinate	0.01
Lower limit of intensity level	1
Upper limit of intensity level	1500
Spacing	
<input checked="" type="radio"/> Log	<input type="radio"/> Linear
<input type="radio"/> PEER	<input type="radio"/> Large PEER
General values	
Units	g
Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed	10

Exit

Finalmente, para realizar el análisis es necesario definir los parámetros globales, aquí se seleccionan la distancia máxima de integración, el tamaño mínimo del triángulo que la forma geométrica de la fuente puede permitir y lo que a la vez define la relación de la distancia mínima de la fuente al sitio y el tamaño del triángulo, así como el periodo de retorno para el cual se realizará el análisis, para edificaciones comunes dicho periodo de retorno puede ser de 500 años, aunque estrictamente es de 475 años si la tasa de excedencia es del 10 por ciento para la vida útil de la edificación que normalmente se toma como de 50 años si la edificación es de las llamadas no esenciales. En CRISIS2015 la vida útil de la edificación también es llamado tiempo de exposición.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Figura 56

Parámetros globales

GLOBAL PARAMETERS - CRISIS 2015 Ver 4.1

Integration parameters

Maximum integration distance km

Minimum triangle size km

Minimum Distance/Triangle Size ratio

CAV filter

Time frame	Map return period (years)	PE in 50 years
50	100	3.93E-01
	250	1.81E-01
	500	9.52E-02
	1000	4.88E-02
	2500	1.98E-02

Exit

Finalmente, ya realizado el análisis, es posible visualizar los resultados, este software como ya fue mencionado, cuenta con tres diferentes tipos de salida grafica de resultados, además de las salidas gráficas, es posible obtener los mismos archivos de resultados, en forma de archivos de texto en algún formato que el usuario desee, estos resultados son mapas de peligro sísmico, espectros de peligro uniforme y la muy útil curva de peligro sísmico. Los mapas de peligro sísmico sirven para diferenciar los sitios geográficos más críticos, es decir, aquellos lugares donde se espera se tengan intensidades sísmicas mayores, sin embargo, se limita a mostrar a la vez, los valores para un solo valor de los periodos estructurales contemplados en el análisis, lo anterior es el porqué, resultan útiles tanto el espectro de diseño como la curva de peligro sísmico ambos complementan los resultados obtenidos en un análisis realizado en el software aquí explicado. La figura 4.13 ilustra las salidas graficas mencionadas. Recordando este análisis ficticio no

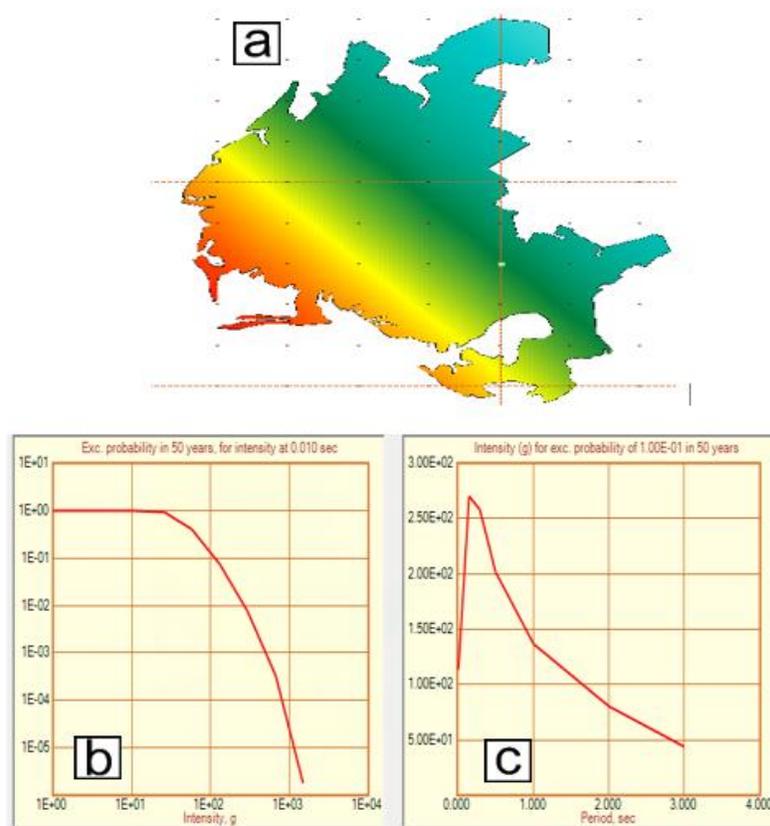


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

fueron considerados los efectos de sitio.

Figura 57

Mapas de peligro sísmico(a), Curvas de peligro sísmico(b) y espectros de peligro uniforme(c)





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

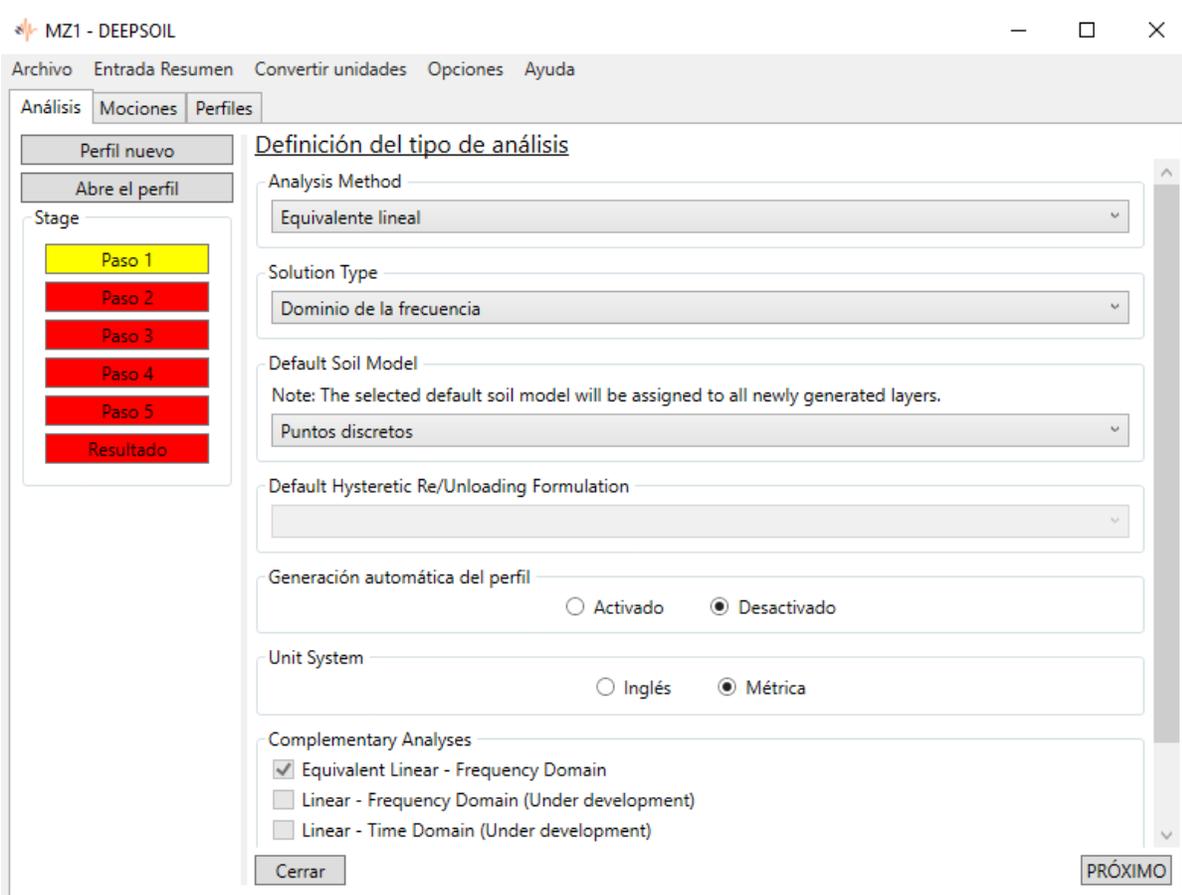
B2. Breve descripción del programa **DEEPSOIL**.

A continuación, se ilustra el procedimiento para estimar la respuesta sísmica de un sitio utilizando este potente software **Deepsoil**, se presenta por cada paso una figura en secuencia del mencionado proceso.

En esta parte se escoge el método de análisis, el perfil de suelo y la señal sísmica a propagar

Figura 58

Método de análisis, perfil de suelo y señal sísmica a propagar



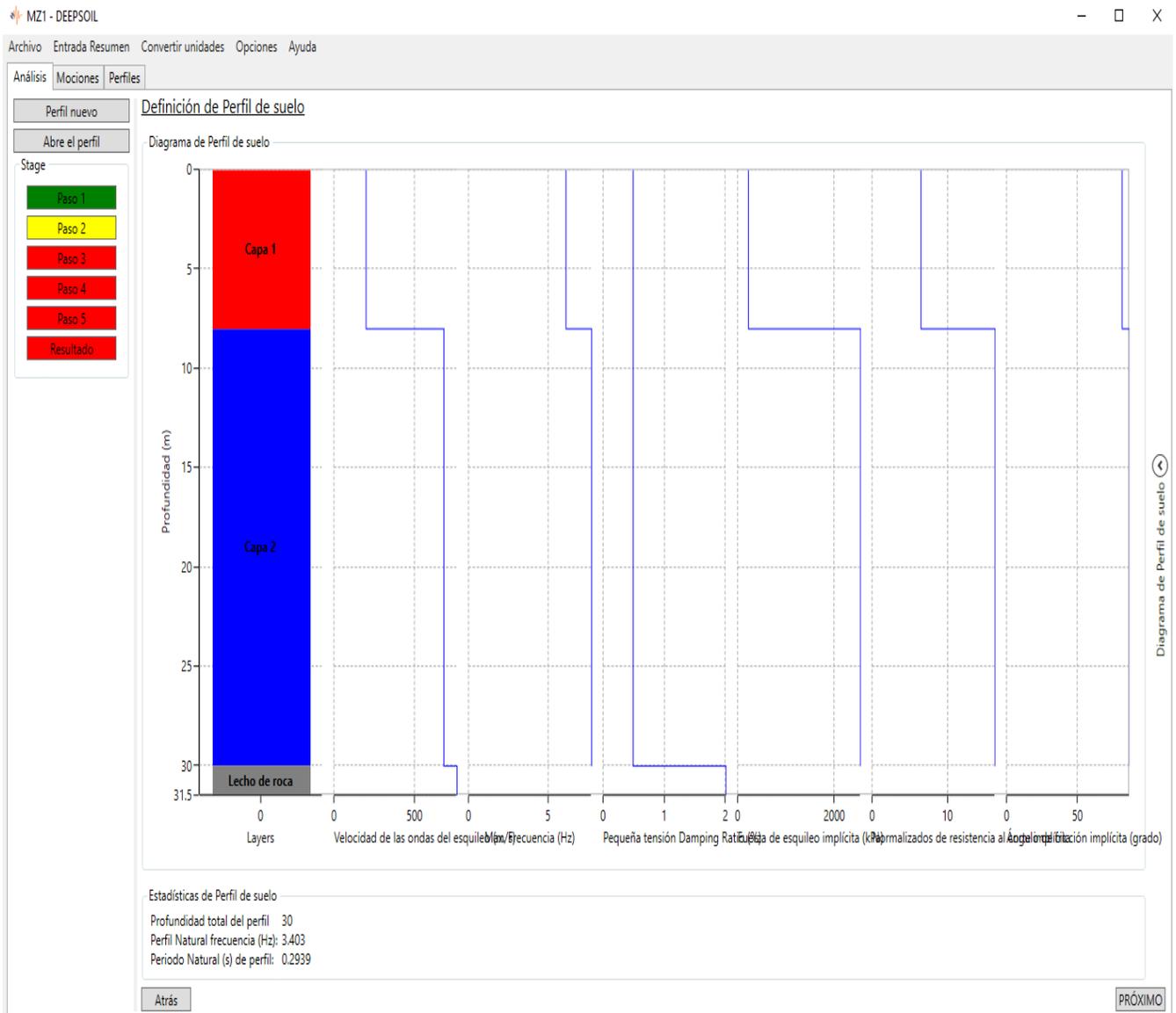


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Esta figura muestra el perfil de suelo definido previamente y las propiedades de cada estrato y su frecuencia dominante.

Figura 59

Perfil de suelo y propiedades de los estratos



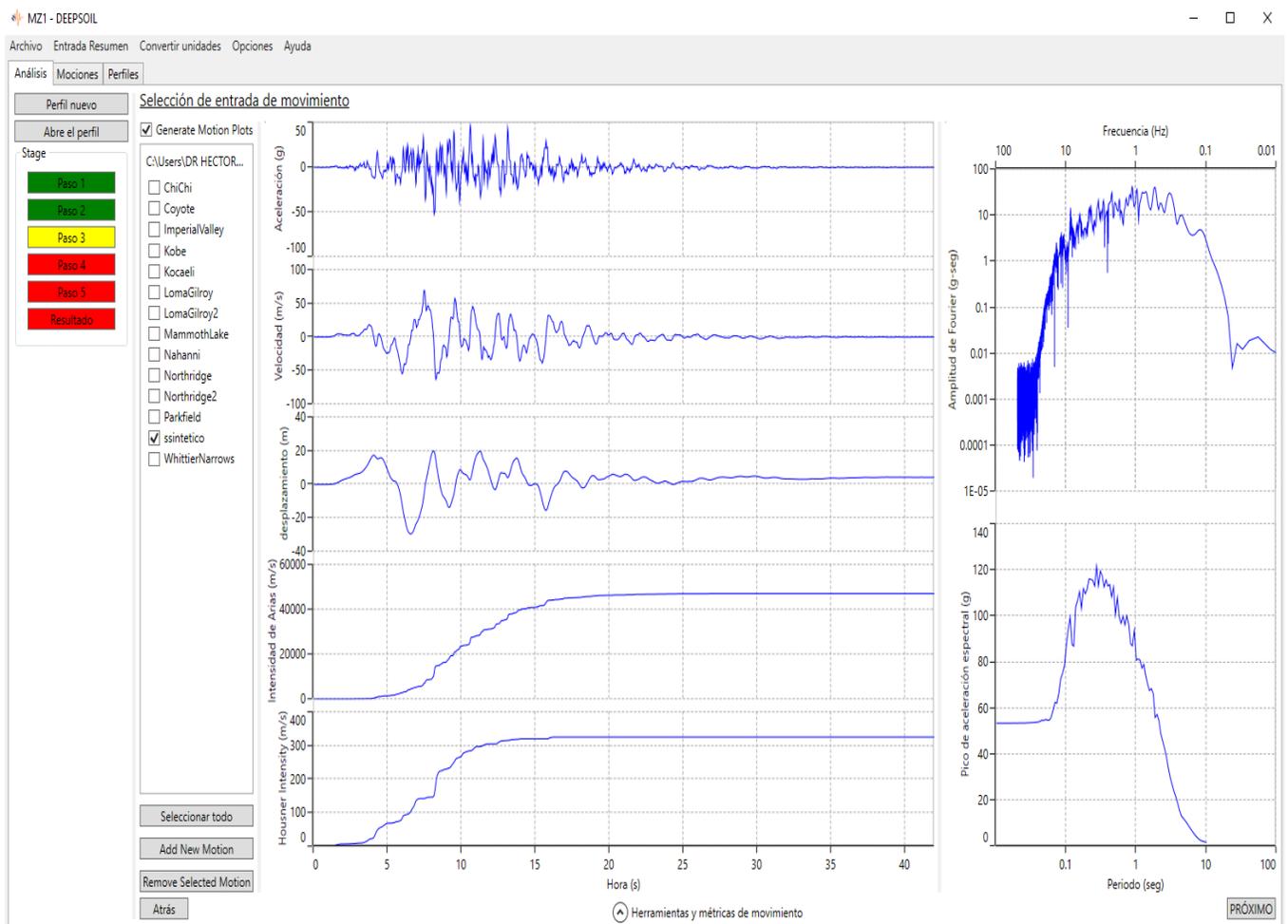


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

La imagen siguiente muestra la señal sísmica a propagar, así como su espectro de Fourier y de respuesta para el 5% de amortiguamiento.

Figura 60

Señal sísmica a propagar





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Una vez que se introduce cada etapa del análisis el programa muestra esta ventana donde muestra detalles numéricos del análisis a desarrollar.

Figura 61

Detalles del análisis

The screenshot shows the 'Determinación del análisis' window in the MZI - DEEPSOIL software. The interface includes a menu bar (Archivo, Entrada Resumen, Convertir unidades, Opciones, Ayuda) and a toolbar (Análisis, Mociones, Perfiles). A 'Stage' panel on the left lists steps from 'Paso 1' to 'Resultado'. The main area is divided into several sections:

- Domínio de la frecuencia:** 'Número de iteraciones' is set to 15. The 'Definición de tensión de esqueleto eficaz' section shows the formula $SSR = \frac{M-1}{10}$ and 'Relación de tensión esqueleto eficaz (SSR): 0.65'.
- Formulación del módulo de cizallamiento complejo:** Three options are available: 'Frecuencia independiente (recomendado)' with $G^* = G(1+2i\xi)$, 'Dependiente de la frecuencia (uso con precaución)' with $G^* = G(1-2i\xi^2 + 2i\xi\sqrt{1-\xi^2})$, and 'Simplificado' with $G^* = G(1-i\xi^2 + 2i\xi)$.
- Domínio del tiempo:** 'Control de paso' is set to 'Flexible'. 'Incremento de la tensión máxima (%)' is 0 and 'Número de sub-incrementos' is 1. Under 'Esquema de integración', 'Implícito: Newmark Beta Method ($\beta=0.25, \gamma=0.5$)' is selected. 'Método de interpolación de la historia del tiempo' is set to 'Lineal en el dominio de tiempo'.
- Output Settings:** 'Capas' is set to 'Surface Only' for 'Profile 1'. A table shows output settings for layers 1 and 2.
- Animación del desplazamiento:** 'Output displacement animation' is checked, with a warning that it will slow down the analysis.

Buttons for 'Atrás' and 'Analizar' are located at the bottom of the window.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

Finalmente, una vez realizado el procesado numérico, la respuesta es obtenida esta es mediante la señal sísmica de respuesta ya sea en superficie o en alguna capa intermedia del perfil del suelo

Figura 62

Respuesta en superficie o en alguna capa intermedia del perfil de suelo

