



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“CÁLCULO DEL RIESGO SÍSMICO Y DEFINICIÓN  
DEL ESPECTRO DE DISEÑO EN COLIMA Y  
LÁZARO CÁRDENAS”**

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
P R E S E N T A:  
**R A M Ó N R O S A S O L A S C U A G A**

DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. REGINALDO HERNÁNDEZ ROMERO

MÉXICO, D.F.

2005

m 342529



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/137/04

Señor  
RAMÓN ROSAS OLASCUAGA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. REGINALDO HERNÁNDEZ ROMERO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"CÁLCULO DEL RIESGO SÍSMICO Y DEFINICIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO EN COLIMA Y LÁZARO CÁRDENAS"**

- INTRODUCCIÓN
- I. INGENIERÍA SÍSMICA
  - II. LA SISMICIDAD DE MÉXICO
  - III. CONCEPTOS UTILIZADOS EN INGENIERÍA SÍSMICA
  - IV. SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL
  - V. LEYES DE ATENUACIÓN
  - VI. EVALUACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO A PARTIR DE MÉTODOS NUMÉRICOS COMPUTARIZADOS
- CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÉ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 18 de Enero del 2005.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/gar.

Autoriza a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Ramón ROSAS

OLASCUAGA

FECHA: 31-03-2005

FIRMA:

## **AGRADECIMIENTOS:**

### **A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNAM.**

Me parece casi increíble que después de tanto tiempo todo se termine así como empezó tan súbitamente, casi no puedo creer que este redactando las últimas líneas de mi tesis que en realidad serán las primeras que aparecerán en ella, después de tantas cosas pude llegar al final del camino, así como cada etapa de la vida pasa y cambia, se termina mi estancia en esta honorable institución, gracias a mi universidad, a mi amada Facultad por haberme permitido forjarme en sus aulas, además de llevar a cabo uno de mis más grandes sueños, él formarme primeramente como individuo, como persona y finalmente como ingeniero.

Pocas cosas en la vida cuestan tanto trabajo y del mismo modo se disfrutan, al final tanto esfuerzo tiene su recompensa y que mejor recompensa que él haber pertenecido por todo este tiempo a esta honorable institución, por ser el vehículo que me permitió él forjarme como profesionista, gracias por haber sido parte integral de mi formación pero sobre todo gracias por haberme dado la oportunidad de ser parte de esta noble institución.

### **AL PROF. M.I. REGINALDO JOSE HERNANDEZ ROMERO.**

Por haberme brindado su ayuda como amigo y director de tesis, por haber tenido tanta paciencia y dedicación, por todo el entusiasmo que brindo en la realización de el presente trabajo, además de proporcionarme todos los medios a su alcance para llevar a cabo la presente tesis, gracias Maestro por tu ayuda.

### **A LA MEMORIA DE TELESFORA ROSAS CUAUTLA (†)**

Gracias por haberme enseñado tanto en estos años, por brindarme esa mano amiga, por todos y cada uno de los consejos que me diste, pero sobre todo por ayudarme a ver la vida de distinta forma, a luchar con valor y vencer las dificultades sin claudicar jamás, por ayudarme a forjar un carácter, por enseñarme desde pequeño que la única manera de lograr las cosas es con trabajo constante, con dedicación esforzándose cada día sin perder la calma, con amor a lo que vas a hacer. Mil gracias por todo, sé que no hay manera de pagarte todo lo que me brindaste mil gracias, solo me hubiera gustado compartir este momento contigo.

### **A MI PADRINO EL SR. FRANCISCO GONZALES JULIAN.**

Gracias por todo lo que has hecho por nosotros, por todo tu apoyo en tantas situaciones, gracias por enseñarme a luchar con tenacidad y valor a pesar de las dificultades, por todos y cada uno de tus consejos, por mostrarte como un padre forjando a sus hijos, creo que no hay manera de expresarte toda mi gratitud por todo lo que me has dado, de ti he aprendido a tener un carácter a no buscar pretextos para no hacer las cosas mas bien al contrario llevarlas a cabo de la mejor manera, por llevar siempre la iniciativa de cumplir nuestros sueños no importando lo que esto nos cueste, por ser un ejemplo para mis hermanos y para mi. Dios te bendiga y te guarde muchos años más.

### **A MIS PADRES, MARCIAL Y LILIA:**

Gracias por haber creído en mi a pesar de todos los obstáculos, por el apoyo y la comprensión mas aun por la paciencia para conmigo, pues a pesar de todo ustedes fueron el pilar de mi fortaleza y mi más grande apoyo para lograr mis sueños, gracias por haber soportado todos los malos momentos que les he hecho pasar y soportar mi mal carácter, por la falta de atención para con mi familia, gracias por confiar en mi, por haber tenido la paciencia suficiente para esperar que no fracasara en el intento, por haberme dado una carrera, un ejemplo, una forma de vida, por que al final de todo no lo hubiera logrado sin su apoyo incondicional.

Mil gracias de veras que no tengo manera de decirles que les agradezco tanto y los quiero mucho, verdaderamente soy afortunado por contar con ustedes y con mi familia que ha sido la fuente de toda mi fortaleza.

#### **A MI HERMANO ARCADIO:**

Por escucharme con atención y comprenderme, aunque muchas veces he estado equivocado tu me has enseñado ha pensar con claridad, como las cosas deben tomar su cauce, por esa paciencia que has tenido conmigo todos esos años, por tu apoyo incondicional cada ves que lo he necesitado, por confiar en mi a pesar de mis fracasos, por no dejarme caer muchas veces, gracias por ser mas que mi hermano mi amigo, un amigo verdadero, además de ayudarme a ver la vida tal como es aceptándola y viviéndola intensamente, con la mejor de las actitudes, gracias hermano por que gente como tu es casi imposible tenerla cerca de uno, se que soy afortunado por contar contigo y con mi familia.

#### **A MIS HERMANAS NORMA Y LILIANA:**

Por soportar tantas veces mi mal humor, por confiar en que haria las cosas a pesar de todo, por haber sido en algunos momentos mi fuente de fortaleza para seguir adelante, por escucharme con atención cuando lo necesite y por tratar de entenderme, pero sobre todo por que son parte integral de mi familia, estoy orgulloso de ustedes.

#### **A MI PRIMO, ING. RODOLFO GARCIA ROSAS:**

Por enseñarme a conquistar mis sueños, por hacerme ver que la sola idea de lograr las cosas no basta para llevarlas a cabo, por esa fortaleza que te caracteriza y que en cierto sentido me influyo de manera determinante, por mostrarme como se lucha por lo que se quiere, confiando en nuestros propios recursos y capacidades personales, por haber estado conmigo en esos momentos de flaqueza y debilidad, por ser amigo para apoyarme y no dejarme solo, por el tiempo en que convivimos, gracias hermano por ser mi amigo.

#### **A MI AMIGO PEDRO ALEJANDRO MENA MANRIQUEZ:**

Gracias por brindar esa mano amiga en esos momentos de crisis, verdaderamente se puede contar con muy poca gente como tú, que se brinde como tú lo haces solo por el gusto de ser amigo, por compartir tu visión de las cosas, por ser incondicional, pero sobre todo por ser autentico y verdadero amigo como pocos lo son.

#### **A MIS AMIGOS**

Por haber estado conmigo en esos momentos en que nos hace falta un apoyo, en esos momentos en que solo podemos hablar con las personas en que confiamos, por tantas y tantas cosas que compartimos en su momento, por haberme aportado algo de cada uno de ellos, por la convivencia, por confiar en mi cuando lo necesite, por evitar que hiciera mal las cosas, por todo el tiempo en que me escucharon o me dieron un consejo, en fin por tantas y tantas cosas que no terminaría de mencionar aquí, pero al menos me gustaría mencionar sus nombres de mis grandes amigos.

NAYELI BLANCO PULIDO, PATRICIA WONG MUÑOZ, GABRIELA RAVELO CERVANTES, JEANETTE FLORES PIÑA, ELIZABETH PASTRANA LICEA, ALETHYA L. GARCIA QUINTANA, FANY ESCOBAR MELO, MARIA OLIVA LIRA CASTILLO, LUZ MARIA PIÑA MEJIA.

JESÚS HERNÁNDEZ VENTURA, SERGIO LOPEZ VEGA, GONZALO VILLANUEVA GALINDO, SERGIO ESCUTIA GARCIA, FRANCISCO JAVIER OCAMPO, OSCAR CRISANTOS REYES, JOSE LUIS HERNANDEZ GOMEZ, JUAN JOSE DE LA ROSA CORNEJO, OSWALDO ZAVALA REYES, EVERARDO LOPEZ SARMIENTO.

## **INDICE:**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1. -INGENIERIA SÍSMICA.**

##### **1.1. -GENERALIDADES DE INGENIERÍA SÍSMICA.**

###### **1.1.1. - SISMO.**

###### **1.1.2. - EPICENTROS, SU INTENSIDAD Y MAGNITUD.**

###### **1.1.3. - ESCALA DE INTENSIDAD.**

###### **1.1.4. - SISMOLOGIA Y TECTÓNICA DE PLACAS.**

#### **2. – LA SISMICIDAD DE MÉXICO.**

##### **2.1. - ANTECEDENTES.**

###### **2.1.1. - LA SISMICIDAD EN MÉXICO.**

###### **2.1.2. - SÍSMOS HISTÓRICOS SENTIDOS FUERTEMENTE EN LA CIUDAD DE MÉXICO.**

###### **2.1.3. - REGIONES SÍSMICAS EN MÉXICO.**

#### **3. - CONCEPTOS UTILIZADOS EN INGENIERIA SÍSMICA.**

##### **3.1. – MICROREGIONALIZACIÓN.**

##### **3.2. - COMPACIDAD RELATIVA.**

##### **3.3. - COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUBSUELO ARCILLOSO.**

##### **3.4. - LICUACIÓN ESPONTÁNEA.**

###### **3.4.1. - LICUACIÓN DE LOS SUELOS.**

##### **3.5. - GEOLOGÍA REGIONAL DE LÁZARO CÁRDENAS Y COLIMA**

#### **4. -SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL.**

#### **5. -LEYES DE ATENUACIÓN.**

##### **5.1. -FILOSOFIA DE LAS LEYES DE ATENUACIÓN.**

##### **5.2. -LEYES DE ATENUACIÓN DE LA ACELERACIÓN.**

##### **5.3. -PELIGRO SÍSMICO.**

##### **5.4. -RELACIÓN DE RECURRENCIA.**

#### **6. -EVALUACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO A PARTIR DE MÉTODOS NUMÉRICOS COMPUTARIZADOS.**

##### **6.1. -PROGRAMACIÓN**

##### **6.2. -CÁLCULO DEL RIESGO SÍSMICO EN COLIMA Y LÁZARO CÁRDENAS.**

##### **6.3. -CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PARA COLIMA Y LÁZARO CÁRDENAS.**

##### **6.4. -ESPECTRO DE DISEÑO DE LOS COMPONENTES VERTICAL, TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL Y SUS PROMEDIOS.**

### **CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

### **ANEXO A**

### **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

## INTRODUCCIÓN.

La ingeniería surge como una de las más antiguas actividades del hombre, la ingeniería es la actividad humana que sobre una base científica sólida (matemáticas, física y química) busca que los materiales y las fuerzas de la naturaleza, se tornen útiles a la humanidad. Se tiene la necesidad de modificar el entorno, con esto se altera su ciclo normal y su estructura debido al incremento de la población, trayendo consigo una mayor demanda de servicios al mismo tiempo se requieren de mas ciudades, o el crecimiento de las que ya existen, de manera inherente debemos tratar de comprender los fenómenos meteorológicos y tectónicos denominados fenómenos físicos, entre ellos encontramos a los sismos, heladas, tormentas, tifones, huracanes, etc. Puesto que estos fenómenos afectan directamente su desarrollo, evolución y hasta en ocasiones han terminado con estas.

Debido a esto surge la necesidad de estudiar el comportamiento de estos fenómenos físicos, basándonos en hechos que hayan sido registrados para analizarlos y al mismo tiempo desarrollar teorías, al analizarlos podremos hacer simulaciones o experimentos en condiciones controladas, que es el procedimiento general para resolver un problema, se denomina procedimiento de diseño el cual abarca las actividades y eventos que se programan y ocurren respectivamente entre el reconocimiento del problema en cuestión.

Dentro de los campos de acción de la Ingeniería civil, encontramos una rama relativamente nueva en un campo poco explorado pero con mucho que aportar en un futuro no muy lejano, esta es la denominada Ingeniería sísmica, encontramos en ella una metodología en la cual se obtienen los registros de eventos sísmicos, esto nos da información como lo es la energía sísmica generada, así como también la magnitud e intensidad y por medio de ellos podemos conocer sus efectos, estos registros se obtienen por medio de dispositivos especiales acelerografos que generan los llamados acelerogramas, posteriormente por medio de simuladores se generan los llamados espectros de diseño o de respuesta, estos dependen de su ubicación (donde se genera) su recorrido y disipación (a que distancia llegan los efectos), del medio que atraviesa ( la composición y arreglo de los materiales en el suelo, siendo estos el medio en que se moverán y viajaran las ondas), además también dependiendo del programa que se utilice para hacer la manipulación respectiva de los datos, se decir podemos simular cambios a estos tipos de espectros dependiendo el fenómeno que se estudie en ese momento.

Los sismos representan unos de los mas graves peligros naturales para la vida en este planeta; a través del tiempo han causado la destrucción de incontables ciudades y poblaciones casi en todos los continentes, es posible afirmar, de entre todos los peligros naturales, estos son los menos entendidos, antiguamente se les consideraba como algo sobrenatural, los riesgos impuestos por los sismos son únicos en muchos aspectos y, consecuentemente, la adecuada planeación conducente a reducir los riesgos de sismos requieren de un enfoque especial desde el punto de vista de la ingeniería, una característica importante del fenómeno sísmico es que el riesgo a la vida esta asociado casi completamente a estructuras construidas por el hombre. Exceptuando los deslizamientos del suelo provocados por sismos, los efectos sísmicos que causan numerosas pérdidas de vida son derrumbes de puentes, edificios, presas y otras obras realizadas por el hombre, esto nos ha conducido a hacer especial énfasis en lo que respecta a la predicción de sismos, siendo uno de los objetivos primarios de la ingeniería sísmica.

En el presente trabajo trataremos de abordar el tema que es el cálculo del riesgo sísmico y para esto nos auxiliaremos de la mecánica de suelos, en bases de datos sísmicos, en acelerogramas, así como de simuladores electrónicos, de esta manera analizaremos el riesgo sísmico en lugares previamente establecidos ( Colima y Lázaro Cárdenas), del mismo modo nos apoyaremos en sus características geológicas, destacando que en programa MATLAB podemos utilizar simuladores por medio del manejo de algunas funciones y ecuaciones, esto nos da una gama mas amplia para el análisis de dichos fenómenos, abordaremos aspectos como la naturaleza del movimiento del suelo, así como también la medida de este movimiento en sus componentes ( vertical, transversal y longitudinal) puesto que la magnitud es distinta en cada una de ellas.

Por medio del análisis del riesgo sísmico trataremos de "predecir" en que lugar seria más probable un mayor evento sísmico, ayudándonos de las ecuaciones de recurrencia y funciones de probabilidad. Es interesante mencionar que actualmente se cuenta con una gran base de datos y registros sísmicos, cuando se inicio la ingeniería sísmica solo se contaba con bases pobres y sin ningún tipo de especificación o característica que nos diera alguna referencia en particular, hoy día contamos con espectros y acelerogramas más certeros y confiables podemos particularizar el comportamiento de cada evento sísmico, del mismo modo permite manejar correlaciones que dependan de los datos en cuestión así como del tipo de suelo, así mismo abordamos conceptos como lo son su ocurrencia, teniendo la particularidad de que solo se tomara como referencia, puesto que aun cuando los datos tomados sean reales y actuales es aventurado el asegurar la ocurrencia de un sismo así como de su magnitud, intensidad y duración.

Podremos decir que los sismos son generados aleatoriamente, sus magnitudes son tan variadas, así como su duración, pueden presentarse 2 eventos de la misma magnitud pero de diferente duración, existe una gran brecha en donde se generan los sismos, además la composición y variabilidad en los estratos es otro factor por analizar, por ejemplo la velocidad de las ondas en materiales arenosos es muy grande mientras que en la roca es por demás pequeña, así son muchos los factores por considerar en este fascinante tema.

Considero que dentro de algunos años se disminuirán con seguridad nuestras incertidumbres, aun en lo que se refiere a los movimientos de los sismos y a sus manifestaciones, sin embargo es poco probable que se produzca un cambio tal en la naturaleza de nuestro conocimiento que nos revele de la necesidad de tratar abiertamente con variables aleatorias. Cualquier intento racional en diseño sísmico debe apoyarse en una descripción probabilística de las variables que intervienen, podemos mencionar entre estas a las características de futuros sismos y estas entrañan con mucho las mayores incertidumbres, si los datos cuantitativos fueran abundantes podríamos emplear métodos estadísticos tradicionales para describir las distribuciones de probabilidad de las características de los movimientos futuros del terreno, pero este no es el caso cuando se estudia una región del mundo donde no han ocurrido sismos durante un periodo de observación. La escasez de datos obliga a usar regresiones lineales o curvas de ajuste logarítmico, la finalidad de cualquier actividad que se le lleva a cabo es optimizar los resultados, por tanto el objeto del cálculo del riesgo sísmico en ingeniería es determinar la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno con bases obtenidas de la zona de análisis, así como el estudio del tipo de suelo, cuestiones hidráulicas, morfología y geología regional, etc, del mismos modo con las bases podemos generar acelegoramas sintéticos por medio de simuladores, con el fin de analizar que es lo que sucede con cada una de sus componentes.

## 1. - INGENIERIA SÍSMICA

### 1.1. -GENERALIDADES DE INGENIERÍA SÍSMICA

#### 1.1.1. - SISMO

Los sismos son perturbaciones súbitas en el interior de la tierra que dan origen a vibraciones o movimientos del suelo; la causa principal y responsable de la mayoría de los sismos (grandes y pequeños) es la ruptura y fracturamiento de las rocas en las capas más exteriores de la tierra. Como resultado de un proceso gradual de acumulación de energía debido a los fenómenos geológicos que deforman la superficie de la tierra, dando lugar a las grandes cadenas montañosas.

En el interior de la tierra ocurre un fracturamiento súbito cuando la energía acumulada excede la resistencia de las rocas. Al ocurrir la ruptura, se propagan (en el interior de la tierra) una serie de ondas sísmicas que al llegar a la superficie sentimos como un temblor. Generalmente, los sismos ocurren en zonas de debilidad de la corteza terrestre que llamamos fallas geológicas. Existen también sismos menos frecuentes causados por la actividad volcánica en el interior de la tierra, y temblores artificiales ocasionados por la detonación de explosivos. El sitio donde se inicia la ruptura se llama foco y su proyección en la superficie de la tierra, epicentro (Figura.1)

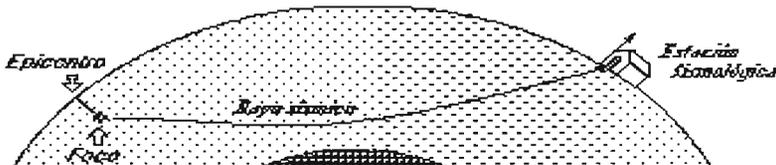


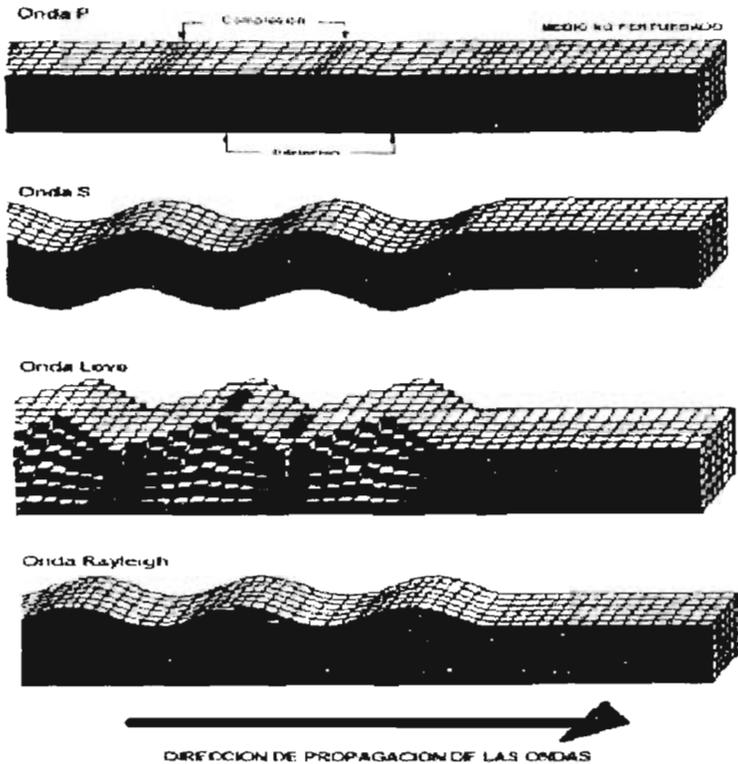
Figura 1.

El fenómeno sísmico es similar al hecho de arrojar un objeto a un estanque de agua, la energía liberada por el choque de dicho objeto con la superficie del agua se manifiesta como un frente de ondas, en este caso circular, que se aleja en forma concéntrica del punto donde cayó el objeto. En forma similar, las ondas sísmicas se alejan del foco propagándose por el interior de la tierra, produciendo vibraciones en la superficie.

#### Tipos de ondas:

Ondas de cuerpo o internas: se propagan en todas las direcciones a través de la roca. Estas ondas se dividen en dos, las P, primarias o de dilatación y las S, secundarias o de cortante. Las ondas P encogen y estiran la roca (similar a un acordeón) y las ondas S deforman la superficie por desplazamientos verticales u horizontales. Las ondas P son más rápidas que las S y de menor amplitud. Esta característica se usa para medir la distancia epicentral a la estación.

Ondas superficiales: se deben a refracciones y reflexiones de las de cuerpo y se dividen en las Love y las Rayleigh.

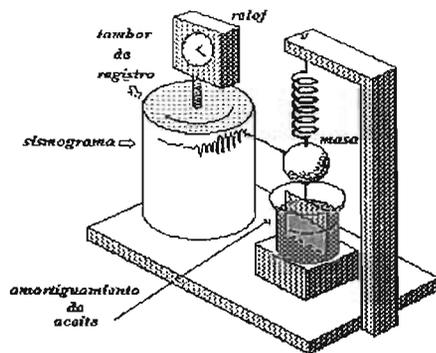


**Figura 2.** Diagrama ilustrando la forma del movimiento de los cuatro tipos de ondas sísmicas.

### ¿Cómo se registran los sismos?

La vibración de la tierra debido a la ocurrencia de un temblor se observa experimentalmente con el auxilio de sismógrafos: instrumentos sumamente sensibles a los movimientos de la superficie de la tierra. Los primeros sismógrafos fueron construidos a finales del siglo XIX, empleando un sistema puramente mecánico.

En la actualidad, estos se han modificado y perfeccionado, los sismógrafos registran el movimiento del suelo causado por el paso una onda sísmica. Para obtener este registro se utiliza el principio de la inercia, sujetando una masa a un resorte de rigidez conocida y con digitalizador que registra el movimiento de la masa (Figura 3)



**Figura 3. Principio básico de operación y registro de un sismógrafo que mide el desplazamiento vertical del terreno.**

Normalmente, el desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo es tan pequeño que es necesario amplificarlo para poder medirlo. Inicialmente, la amplificación se hacía mecánicamente, por medio de palancas; en la actualidad se lleva a cabo electrónicamente y los instrumentos modernos amplifican el movimiento del terreno centenas de miles de veces. Una vez amplificado el movimiento del suelo, éste se registra en papel o en una cinta magnética.

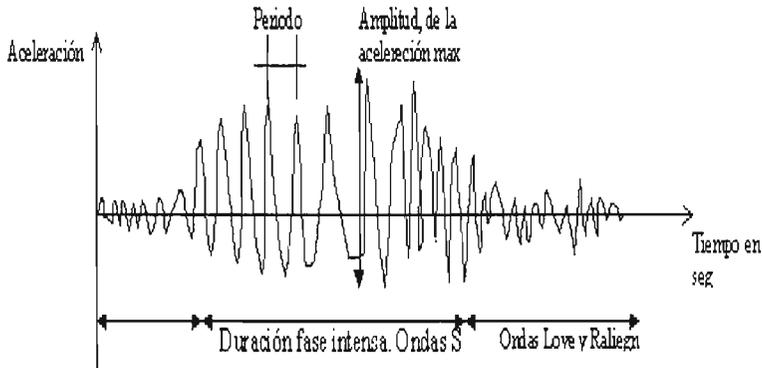
El registro obtenido en esta forma se llama sismograma. Además, los sismógrafos cuentan con un preciso control de tiempo que se inscribe directamente sobre los sismogramas para identificar exactamente el tiempo de llegada de las diferentes ondas sísmicas que arriban a una estación sismológica.

El diseño y construcción de los sismógrafos se ha perfeccionado notablemente; en la actualidad existen redes sísmicas de detección, transmisión y registro de temblores que envían las señales detectadas por medio de radio, microondas o satélite a grandes distancias. Este tipo de redes permite estudiar la sismicidad de una amplia zona o de una región de difícil acceso.

Sismógrafos de banda ancha hacen posible obtener un registro digital del movimiento con un gran intervalo de frecuencia ya que fueron diseñados para detectar un amplio rango de frecuencias (frecuencia normal de oscilación del aparato) con la misma respuesta. Al acelerograma se le aplica la transformada de Fourier nos da el espectro de respuesta.

Un espectro de diseño es la envolvente de varios espectros de respuesta.

Acelerógrafos: miden la aceleración del terreno en tres direcciones ortogonales, (Figura 4)



**Figura 4. Registro de un acelerógrafo.**

El contenido de la frecuencia o periodo del registro determina la forma propia de oscilar el suelo.

El espectro de aceleraciones proporciona una medida directa de la fuerza de la fuerza de inercia máxima que se induce en el sistema al multiplicar la ordenada espectral por la masa.  $F = m SA$ .

Donde:  $F$  = Fuerza de inercia máxima,  $m$  = Masa (kg),  $SA$  = Ordenada espectral ( $cm / s^2$ )

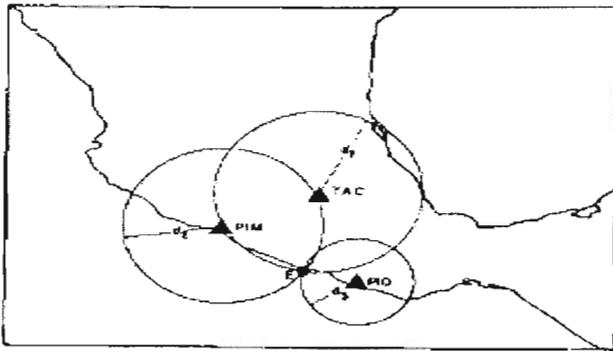
Se pueden obtener tres distintos espectros de aceleración correspondientes a acelerogramas de sismos característicos diferentes.

- a) Cuando se tiene un sismo de mediana intensidad registrado muy cerca del epicentro; las ordenadas espectrales son muy grandes solo para sistemas con periodos cortos y al aumentar el periodo del sistema, la respuesta disminuye rápidamente.
- b) Para terremotos de gran magnitud registrados a una distancia moderada se tienen ordenadas altas en un intervalo grande de periodos.
- c) Mientras que para un sismo registrado a gran distancia en terreno blando, las ordenadas mayores corresponden a periodos grandes

Cuando frecuencia del sistema es muy inferior o muy superior a la de excitación, el desplazamiento máximo de la masa del que dependen las fuerzas que se inducen en el sistema, no excede al estático; pero a medida que las 2 frecuencias se van aproximando entre sí ( cuando su relación matemática tiende a uno) hay una amplificación cada vez mayor del movimiento del terreno y el desplazamiento en la masa llega a ser varias veces superior al del terreno y se inducen al sistema fuerzas muy grandes, de hecho, cuando la relación de frecuencia es igual a uno, el desplazamiento del sistema llega al infinito si el amortiguamiento es nulo y se tiene el fenómeno llamado de "resonancia".

### 1.1.2. - EPICENTROS, INTENSIDAD Y MAGNITUD

Como las ondas sísmicas viajan a diferentes velocidades, las diferencias de tiempo de arribo entre las ondas **P** y **S** registradas en una estación sísmológica están en función directa de su distancia al sitio donde ha ocurrido el temblor. Por ejemplo, para distancias regionales la diferencia en segundos entre el tiempo de arribo de las ondas **P** ( $t_p$ ) y las ondas **S** ( $t_s$ ) multiplicada por ocho, nos da la distancia aproximada al epicentro en kilómetros [distancia  $\sim 8 \times (t_s - t_p)$ ]. Sin embargo, es obvio que los datos de una sola estación no basta para determinar el epicentro del sismo, puesto que la diferencia ( $t_s - t_p$ ) nos da la distancia, pero no la dirección; es necesario contar con un mínimo de tres estaciones sísmológicas que registren el temblor para poder estimar la ubicación del epicentro.



**Figura 5.**

Conociendo la distancia ( $d$ ) de una estación sísmológica al epicentro, ésta puede representarse como un círculo de radio  $d$  con centro en dicha estación. Si contamos con observaciones al menos en tres estaciones, el punto de intersección ( $E$ ) de los círculos corresponde al epicentro. En la figura se representa el ejemplo de un sismo en las costas de Guerrero, localizado mediante registros de las estaciones: Tacubaya, D.F. (TAC); Presa Infiernillo, Mich. (PIM); y Pinoterpa Nacional, Oax. (PIO).

En términos generales, la localización es relativamente simple: basta ubicar las estaciones sísmológicas en un mapa y trazar para, para cada una de ellas, un círculo cuyo radio sea igual a la distancia de la estación al epicentro que se ha calculado con base en las diferencias de llegada de las ondas **P** y **S**.

El punto o región donde se intersecan los círculos trazados es el epicentro (Figura 5)

En la práctica, el procedimiento para localizar epicentros en los observatorios sísmológicos es más complicado, pues debe tomarse en consideración la estructura interna y la esfericidad de la tierra. Las localizaciones epicentrales se hacen rutinariamente por medio de una computadora, aunque el principio general es el mismo ya descrito.

### **1.1.3. - Escalas de intensidad**

Los primeros intentos que se hicieron para catalogar y cuantificar los temblores se basaron en su poder destructivo, haciendo estudios descriptivos de los daños ocasionados por ellos.

La intensidad es la severidad de la sacudida sísmica que se experimenta en un sitio dado. Se refiere a los efectos que causa en el hombre en sus construcciones y en general en el sitio. La intensidad disminuye con la distancia epicentral y está en relación directa con la magnitud para una misma distancia epicentral, se puede ver que mientras la magnitud es única para un sismo, la intensidad es variable con la distancia.

Aunque la escala de intensidades es subjetiva a los daños que produzca, se podría concluir que ella nos da una idea de la aceleración del terreno en un punto determinado para un sismo determinado, ya que los daños, dependen tanto de la estructura como de la aceleración del terreno. Por esto existen escalas instrumentales de intensidad en las cuales se mide la aceleración del terreno en un punto determinado; sin embargo debido a que en todos los sitios se cuenta con acelerógrafos (aparatos que registran la aceleración del terreno) se recurre a escalas cualitativas que tienen en cuenta los efectos que causa en las construcciones, daños, la violencia con que es sentido y los cambios producidos en la superficie del terreno.

Conclusión: las escalas de intensidades reflejan la aceleración del terreno en un punto determinado debido a un sismo.

Una de las escalas de intensidad más conocida es la escala Mercalli. Esta escala mide la intensidad por los daños sufridos en las estructuras y en el suelo, por lo tanto es una escala subjetiva ya que depende de la persona que hace la evaluación. La escala mide de I a XII y depende del tipo de construcción y de la densidad de la población. Por ejemplo en esta escala, hasta VI no se han presentado daños estructurales y daños menores y en X constituye una destrucción generalizada.

Actualmente existen varias escalas de intensidad usadas en el mundo. En México, la más frecuentemente utilizada es la Escala de Intensidades de Mercalli Modificada (MM), que fue abreviada por Charles Richter en 1956, tomando como base la escala original de Mercalli. Para indicar la intensidad se ha convenido el uso de números romanos. La intensidad de grado II (MM) en esta escala corresponde a temblores sentidos únicamente en circunstancias especialmente favorables pero que generalmente pararían desapercibidos.

La intensidad máxima de XII implica que hubo destrucción total, se observaron objetos que fueron arrojados al aire y se pudo apreciar el movimiento ondulatorio del suelo a simple vista. En la tabla 1 se reproduce la Escala de Intensidades Modificadas de Mercalli, la tabla respectiva se presenta en el anexo A

#### **La escala de magnitud**

Muy pronto se hizo evidente que la intensidad, si bien es útil para describir los efectos de un terremoto, no es un parámetro apropiado para describir la cuantía o magnitud de un sismo al ocurrir un fracturamiento en el interior de la tierra. ¿Cómo podemos discriminar entre temblores grandes y pequeños?

Con la magnitud se pretende cuantificar la energía liberada por el temblor y su potencial destructivo (existen diferentes escalas de magnitud, siendo una de las más usadas la de Richter), las escalas no tienen límite superior pero el terremoto está limitado por la resistencia de las rocas de la litosfera.

Fue en 1931 cuando el sismólogo japonés Wadati observó, al comparar los sismogramas de diferentes temblores, que la amplitud máxima de las ondas sísmicas registradas parecía proporcional a la dimensión del sismo.

Este concepto fue posteriormente desarrollado en 1935 por Charles Richter quien, estableciendo analogías con la medida de brillantez de las estrellas en astronomía, empleó por primera vez el término magnitud para catalogar los temblores.

La escala original de Richter tomaba las amplitudes máximas de ondas superficiales de sismos ocurridos a distancias cortas para calcular lo que él denominó magnitud local o magnitud  $M_L$ .

Posteriormente, el uso de la escala original de magnitudes de Richter se extendió para calcular magnitudes a grandes distancias, utilizando las amplitudes máximas de ondas P ( $m_b$ ) o de ondas superficiales ( $M_S$ ). El sismo del 19 de septiembre por ejemplo, tuvo un valor de magnitud de 8.1 en la escala  $M_S$ .

La selección de la escala de magnitud más adecuada depende de la magnitud del sismo y de la distancia a la cual se encuentren las estaciones sismológicas. Para evitar confusiones, sin embargo, la información de magnitud ofrecida al público se da generalmente sin especificar que tipo de escala se utilizó.

Algunas veces se crean situaciones confusas, pues se reportan diversos valores de magnitud para un mismo sismo. Esto resulta porque muchas veces  $M_L$ ,  $m_b$  y  $M_S$  no tienen valores idénticos para un mismo sismo.

#### **1.1.4. - SISMOLOGIA Y TECTONICA DE PLACAS**

La ciencia que estudia los aspectos relacionados con la ocurrencia de temblores de tierra, terremotos o sismos se denomina *sismología*.

Esta es una ciencia joven, puesto que gran parte de sus métodos e instrumentos de observación fueron desarrollados a lo largo del siglo XX. A pesar de esto, la sismología ha logrado avances notables. Quizá una de sus más valiosas contribuciones al entendimiento de nuestro planeta lo constituya su aportación a la llamada *Tectónica de Placas*.

Para esbozar esta teoría consideremos en primer lugar la estructura interna de la Tierra. En la Figura 6 podemos ver esquemáticamente su constitución. El núcleo terrestre está compuesto en gran parte por elementos metálicos como el de hierro y el níquel, el manto terrestre tiene una composición a base de silicatos abundantes en potasio, sodio y calcio.

El cascarón más externo de la Tierra, el cual comprende la corteza y parte del manto, con un espesor de aproximadamente 100 km, parece comportarse como un cuerpo rígido "flotando" en el resto del manto en donde pueden presentarse movimientos como si se tratara de un fluido. Esta conducta semejante a la de un fluido tiene sentido solamente en tiempos geológicos, es decir, en tiempos del orden de millones de años.



Figura 6.

El cascarón exterior llamado litosfera no es continuo sobre la superficie de la Tierra. Si no que está formado por diferentes "placas", que hacen contacto unas con otras, como los gajos de una pelota de fútbol. Las placas sufren movimientos relativos, debidos a fuerzas de origen aún no completamente conocido, aplicadas a lo largo de las mismas. Como la superficie del planeta esta cubierta por las placas, el movimiento relativo entre ellas solo se logra si en algunos de los márgenes de las mismas se está creando nueva litosfera mientras que en otros márgenes algunas de ellas "cabalgan" o se enciman sobre otras; un proceso al que se conoce actualmente como *subducción*. (Figura 7)

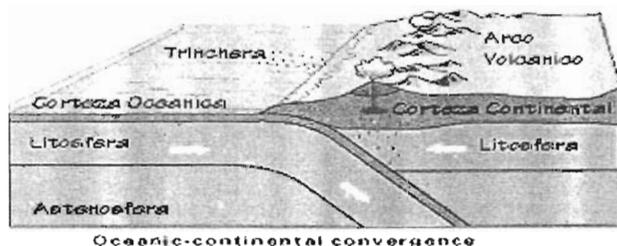


Figura 7.

Debido a estos movimientos los continentes han variado su posición relativa a través del tiempo geológico y se cree que en un tiempo estuvieron todos reunidos en un gran continente llamado *Pangea*. Esto explica el ajuste que existe entre, por ejemplo, las costas de Sudamérica y África.

La Figura 8 nos muestra la distribución geográfica de estas placas. Las zonas de creación de nueva litosfera se presentan como cordilleras submarinas y las zonas de subducción forman a menudo trincheras submarinas de gran profundidad. Podemos también notar que las diferentes placas no coinciden con los continentes y los océanos, sino que pueden tener corteza continental y oceánica.



**Figura 8.**

No se sabe con certeza qué causa los esfuerzos que producen los movimientos de las placas, pero se cree que éstos son producidos por transferencia convectiva de calor, término que significa que el calor es llevado de un lugar a otro por el movimiento mismo del medio.

Podemos pensar dos cosas de la información anterior. La primera es que si bien los sismos son generados por la ruptura en el plano de falla, las ondas así creadas se propagan a través de la tierra porque para los tiempos involucrados en la propagación de las ondas (del orden de varios segundos) esta se comporta como un cuerpo elástico. La segunda concierne, al comportamiento mecánico de las rocas. Cuando una roca es sometida a una fuerza pequeña por un tiempo corto de tiempo, la roca se deforma; pero al cesar la fuerza, recupera su forma original

Cuando la fuerza a que se somete el material es mayor que su resistencia, este se rompe o falla a lo largo de un plano que es el llamado plano de falla. Si existe un plano de falla preexistente, una nueva ruptura tenderá a presentarse en el mismo lugar porque este es un plano debilitado por rupturas anteriores.

De la misma manera, si tenemos dos placas en contacto, la resistencia al movimiento entre ellas se da a causa de la fricción entre las caras; sin embargo la fuerza de fricción entre ellas es mucho menor que la que sería necesaria para romper nuevas rocas, de manera que las fuerzas acumuladas tenderán a fallar a lo largo del mismo plano.

## 2. - LA SISMICIDAD DE MÉXICO

### Tectónica de México y las principales familias de sismos

Los grandes temblores en México (Ms 7.0) a lo largo de la costa del Pacífico, son causados por la subducción de las placas oceánicas de Cocos y de Rivera bajo la placa de Norteamérica y por ello son conocidos como sismos de subducción. La placa de Rivera, que es relativamente pequeña, se desplaza bajo el Estado de Jalisco con velocidad relativa de 2.5 cm / año frente a la costa de Manzanillo. Algunos trabajos recientes sugieren que esta velocidad podría alcanzar 5 cm / año (Kostoglodov y Bandy, 1994). La frontera entre las placas de Rivera y de Norteamérica es algo incierta, pero se estima que intersecta la costa de México cerca de Manzanillo (19.1° N, 104.3° W). Por otra parte, la velocidad relativa de la placa de Cocos con respecto al continente varía desde unos 5 cm / año cerca de Manzanillo hasta 7 cm / año en Chiapas. En la Figura 9 se muestran las zonas en donde se generan estos sismos.



**Figura 9. Zonas generadoras de sismos de subducción.**

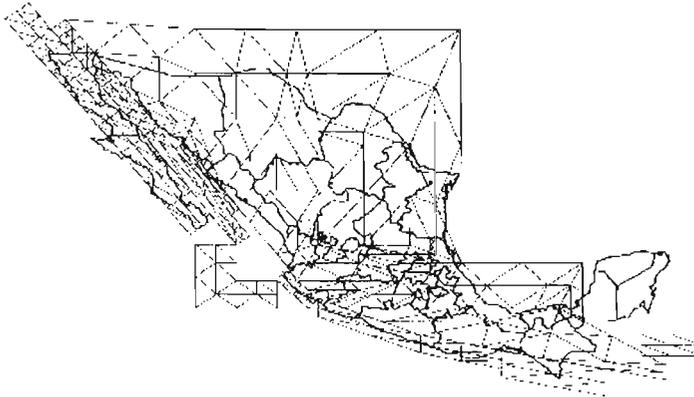
Los grandes temblores también ocurren en el continente con profundidades de 60 km. En este caso los temblores presentan un mecanismo de fallamiento normal que refleja el rompimiento de la litosfera oceánica subducida (Singh *et al.*, 1985b). Si bien este tipo de eventos es poco frecuente, se sabe que pueden causar grandes daños. En la figura 10 se muestran las zonas consideradas para la ocurrencia de este tipo de sismos.



**Figura 10. Zonas generadoras de sismos profundos.**

Aún menos frecuentes son los temblores que ocurren dentro de la placa continental (Ms 7). Dependiendo de su ubicación, tales eventos pueden generar daños considerables en los asentamientos humanos. Dos ejemplos son: el temblor de Jalapa del 3 de enero de 1920 (Ms 6.4) y el de Acambay del 19 de noviembre de 1912 (Ms 7.0) En la figura 11 se indican las zonas en donde ocurren este tipo de sismos.

Existe también lo que podría llamarse sismicidad de fondo, consistente en temblores con M 5.5, cuyo origen no puede asociarse a ninguna estructura geológica en particular. La ocurrencia de estos eventos también se considera, y las zonas donde se generan se muestran en la misma figura 11.



**Figura 11. Zonas generadoras de sismos superficiales.**

En México, el Eje Neovolcánico no es paralelo a la trinchera. Esto es algo anormal en comparación con otras zonas de subducción en el mundo y es muy probable que se deba a la morfología de la placa de Cocos.

Gracias a los esfuerzos de varios investigadores ha habido un avance significativo en el conocimiento de la morfología de la placa subducida bajo el continente. Los resultados indican una subducción con un ángulo de  $45^\circ$  en Jalisco, casi horizontal en Guerrero, con un ángulo de  $12^\circ$  en Oaxaca y de  $45^\circ$  en Chiapas.

El contorno de los 80 a 120 km. de profundidad de la zona de Benioff aproximadamente coincide con la línea de los volcanes.

Existe una evidencia, aunque no definitiva, que la placa continental entre la costa grande de Guerrero y el Valle de México está en un estado de esfuerzo tensional, contrariamente a lo esperado (Singh y Pardo, 1993)

El territorio mexicano se encuentra dividido entre cinco placas tectónicas. El movimiento relativo entre estas placas ocasiona uno de los peligros sísmicos y volcánicos más altos del mundo.

## 2.1. - ANTECEDENTES

La red sísmica operada por el SSN se consolidó entre los años de 1910 y 1923. Esta red, una de las más avanzadas en el mundo, permitió localizar sismos en toda la república con magnitudes mayores o iguales a 6.0. Una magnitud mucho menor a la permitida por la red sísmica mundial, que podía registrar sismos en cualquier parte del mundo siempre y cuando su magnitud fuese mayor a 6.8.

La mayoría de los equipos instalados envían sus datos por telemetría a la estación central, localizada en el Instituto de Geofísica de la UNAM, para su análisis y evaluación y así elaborar diariamente los reportes de la sismicidad nacional. Se funda el Servicio Sismológico Nacional (SSN) el 5 de Septiembre de 1910, a partir de 1992, con soporte presupuestal de la Secretaría de Gobernación y de la UNAM, se inició la modernización de la Red Sismológica Nacional.

En un principio se planeó instalar entre 30 y 40 nuevos Observatorios Sismológicos para extender la cobertura y mejorar la calidad de la instrumentación sísmológica, ampliando las perspectivas de las investigaciones en el país. Las limitaciones presupuestales redujeron este número a 20 (Figura 12)

A fines de 1992 se iniciaron los trabajos de instalación. Cada observatorio cuenta con un sismógrafo y un acelerógrafo de alta sensibilidad controlados por una computadora. La transmisión de los datos se hace vía satélite, Internet o teléfono. Los sensores seleccionados permiten cubrir un rango amplio de frecuencias útiles para estudios de sismología e ingeniería civil por lo que son conocidos como instrumentos de banda ancha.

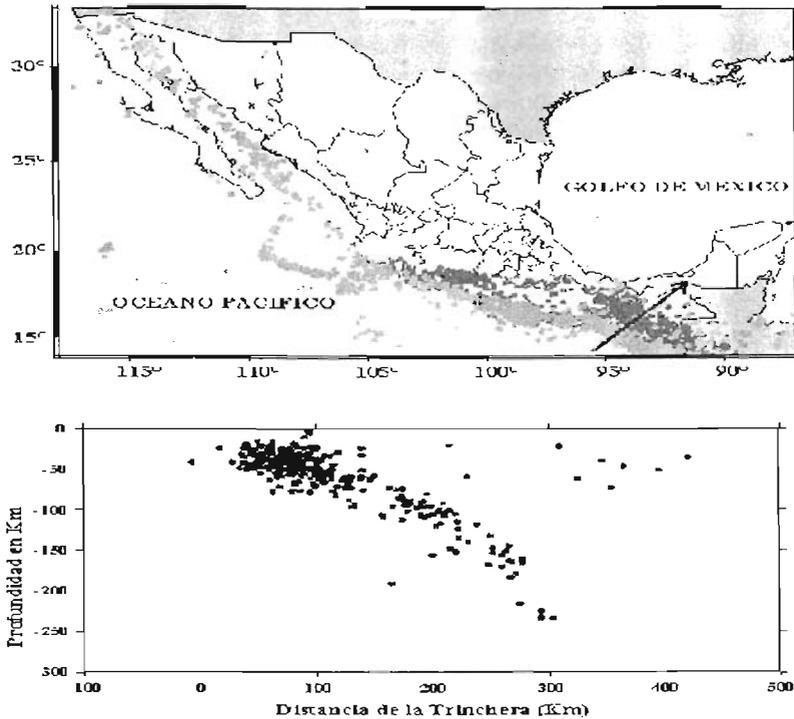
Además, los instrumentos son capaces de registrar, sin distorsión o saturación, un amplio rango de señales sísmicas, desde sismos pequeños hasta de gran magnitud.



Figura 12. Red Sísmica de estaciones de banda ancha.

### 2.1.1. - La sismicidad en México

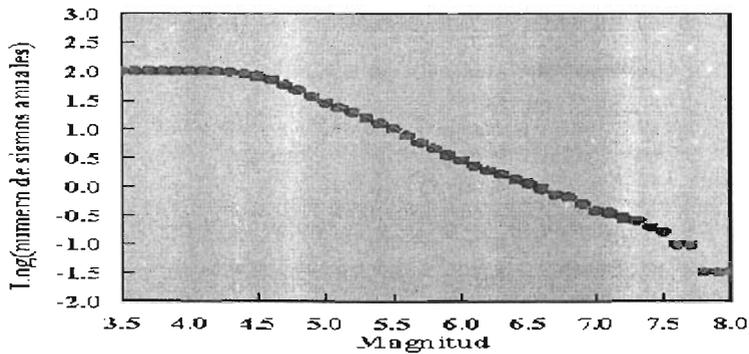
En la Figura 13 se muestran los sismos con magnitudes mayores o iguales a 4.5 localizados en la República Mexicana entre 1964 y 1995. Los puntos grises representan sismos superficiales (profundidades menores a 50 km), mientras que los negros representan sismos con profundidades mayores a 50 km.



**Figura 13. Sismicidad de México entre 1964 y 1995, con Magnitud > 4.5.**

La mayoría de los sismos localizados se concentran a lo largo de las fronteras entre las placas tectónicas, sin embargo, pueden notarse unos pocos sismos al interior del continente, en regiones alejadas de estas fronteras tectónicas, principalmente a lo largo de la faja volcánica, donde se concentra la mayor población de México.

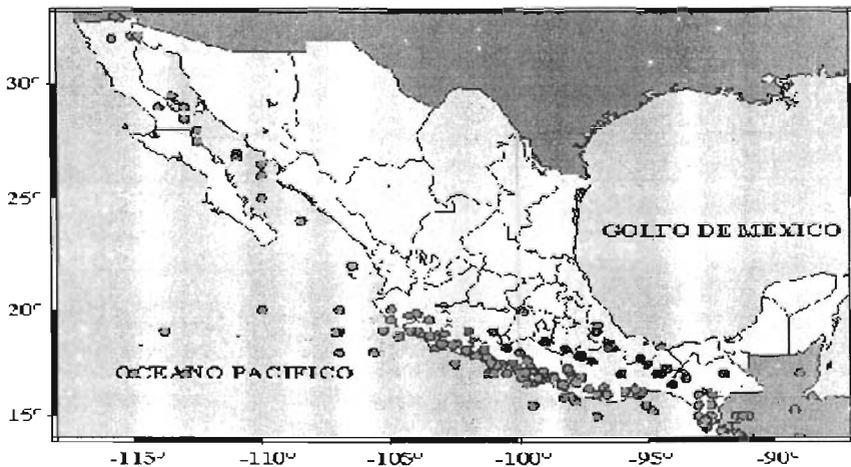
La Figura 14 se muestra una gráfica de la distribución de sismos con la magnitud para un catálogo compilado entre 1964 y 1995. Esta gráfica nos permite encontrar valores promedio de la sismicidad en la República durante este periodo. Por ejemplo, se obtiene un valor de 100 sismos al año con magnitudes mayores o iguales a 4.5, 3 sismos al año con magnitudes iguales o mayores a 6.0 y un sismo de magnitud igual o mayor a 7.5 cada 5 años. Aunque estos son solo valores promedio para todo el país, permite estimar el peligro sísmico asociado.



**Figura 14.** Logaritmo del número de sismos anuales vs. Magnitud.

El mayor peligro lo presentan los sismos que ocurren a lo largo de las costas del Pacífico, entre las ciudades de Puerto Vallarta y Tapachula. No solo se producen sismos con mayor frecuencia, sino también los mayores sismos registrados en México tienen su ocurrencia entre estas dos poblaciones (Figura 15)

Estos sismos, que por su cercanía a las costas representan un grave peligro a las poblaciones costeras, también afectan al Valle de México, como se ha constatado durante los grandes sismos de 1911, 1957, 1979 y 1985. Esta influencia de los sismos costeros sobre la ciudad de México, que se encuentra a más de 200 km de la costa, se debe a las condiciones del suelo sobre el que se desarrolló la ciudad.



**Figura 15.** Los grandes sismos del siglo ( $M > 6.5$ )

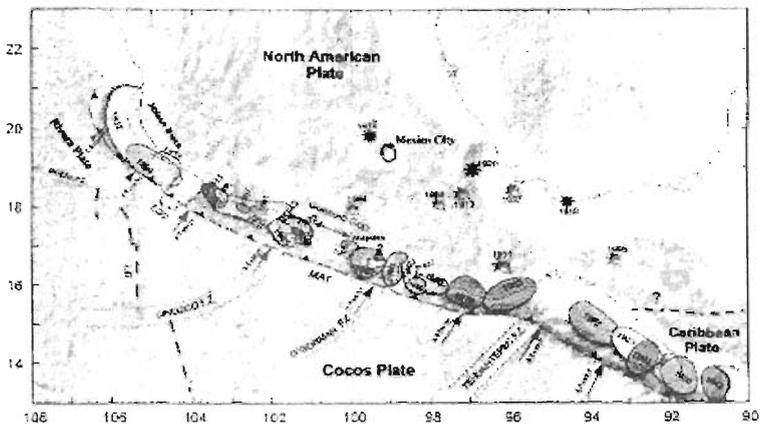
En la Figura 15 se muestran las zonas de ruptura de algunos de los sismos más significativos que han ocurrido durante el pasado siglo. Estos se localizan frente a las costas del Océano Pacífico y son producto de la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental.

Los eventos ocurren a lo largo de la falla o interfase entre dichas placas denominada Fosa Mesoamericana. La falla se extiende desde Puerto Vallarta en Jalisco, hasta el sur de Costa Rica en Centroamérica. Las zonas de ruptura de los grandes sismos llegan a alcanzar hasta 200 km como en el caso del mayor sismo registrado por instrumentos durante el pasado siglo, el sismo de 1932 frente a las costas de Jalisco.

Otros sismos de apreciable tamaño son los sismos de Michoacán de 1985 y el de Oaxaca de 1965. La mayor parte de esta zona de falla se ha roto por un gran sismo. Se notan varias brechas en la figura, dos pequeños segmentos, uno frente a las costas de Colima-Michoacán, y otro frente al istmo de Tehuantepec, de los cuales no se tiene información histórica de la ocurrencia de un gran sismo en el pasado.

Es posible que estas zonas sean asísmicas, esto es, la energía elástica acumulada no se libera a través de grandes sismos. El otro segmento importante que se enfatiza en la figura es la brecha de Guerrero.

En este segmento si tenemos conocimiento de sismos ocurridos en el pasado, entre 1909 y 1911 se produjeron varios sismos con magnitudes mayores a 7.5, que pudieron haber fracturado este segmento de la falla, sin embargo la escasa información con que se cuenta no permite definir las zonas de ruptura de este segmento



**Figura 16. Zonas de ruptura de los grandes sismos de este siglo.**

Este tipo de estudios permite definir las zonas liberadas de energía elástica, las regiones de mayor peligro sísmico, y la ubicación de los sismos que con mayor probabilidad ocurrirán en un futuro.

Otro peligro para las grandes ciudades asentadas a lo largo de la faja volcánica son los sismos que ocurren a profundidades mayores a 50 km. Estos sismos se localizan dentro de las placas oceánicas que subducen bajo el continente.

En la figura 16 se muestran los sismos importantes que han ocurrido durante el siglo pasado, dentro del continente y a profundidades someras (estrellas negras). La magnitud de estos sismos rara vez llega a superar la magnitud 7.0, y su ocurrencia es mucho más esporádica que los sismos de la costa.

Sin embargo, debido a lo superficial de la fuente y la cercanía de las grandes poblaciones, estos sismos representan uno de los mayores peligros de México.

En situación especial se encuentran las ciudades industriales de Tijuana, Tecate, Mexicali y otras de Baja California, que se ubican sobre la frontera de placas entre el Pacífico y Norte América. Estas ciudades comparten peligros similares a las ciudades de Los Ángeles y San Francisco en los Estados Unidos (Figura 16)

### **2.1.2. - Sismos históricos sentidos fuertemente en la ciudad de México**

La mayor parte de los sismos que son sentidos con gran intensidad en la ciudad de México se originan en la zona de subducción del Pacífico mexicano. Como mencionamos anteriormente, estos terremotos relativamente lejanos, son sentidos en la ciudad como un movimiento oscilatorio horizontal del período largo.

Si consideramos que sólo en lo que va de este siglo han ocurrido en la costa de México treinta y cuatro temblores de magnitud mayor que siete ( $M_s > 7.0$ ), nos damos una idea de la cantidad de grandes sismos históricos que han azotado a la ciudad.

Los reportes históricos de los grandes terremotos sentidos en la ciudad de México mencionan, invariablemente, que las oscilaciones duran de tres a cuatro minutos. Hay muchos, casos si embargo, en los que se mencionan duraciones de hasta media hora para sismos del siglo XVII y nos da una idea de que el sismo fue sentido muy larga e intensamente.

Los daños reportados en la ciudad de México como resultado de un gran terremoto incluyen con frecuencia referencias a grietas y zanjas poco profundas que se abren en las calles y la destrucción de viviendas de pobre calidad. Hay algunos casos, sin embargo en que se reportan daños graves en edificios coloniales y en las cúpulas y torres de las iglesias.

Una de las observaciones que salta a la vista al leer los reportes de sismos históricos es que los mayores daños y las más altas intensidades en la capital son siempre observados en las inmediaciones del centro de la ciudad, en la zona que ocupaba el antiguo lago del Valle de México; las entonces poblaciones vecinas de Coyoacán, Tlalpan e Ixtapalapa, por ejemplo, rara vez muestran intensidades mayores de V o VI. Este mismo patrón de intensidades se ha observado en los sismos destructores de este siglo. De entre la gran cantidad de sismos registrados en la historia de la ciudad de México.

### 2.1.3. -Regiones Sísmicas en México.

La República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas. Esto se realizó con fines de diseño antisísmico. Para realizar esta división (Figura 17) se utilizaron los catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios de siglo, grandes sismos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en este siglo. Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo.

La zona **A** es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

La zona **D** es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Las otras dos zonas (**B y C**) son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

Aunque la Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, debido a las condiciones del subsuelo del valle de México, pueden esperarse altas aceleraciones. El mapa aparece en la figura 17 [CFE, 1995]

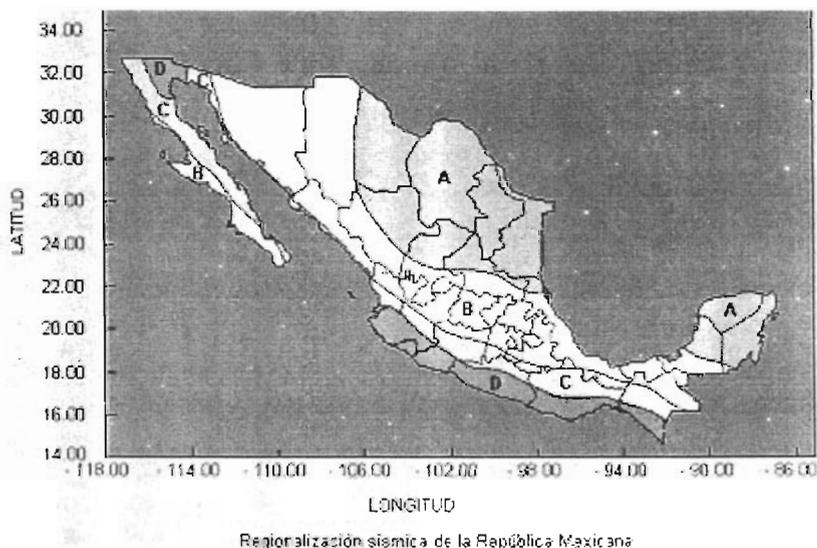


Figura 17. Regiones Sísmicas en México.

### 3. -CONCEPTOS UTILIZADOS EN INGENIERÍA SÍSMICA

#### 3.1. - MICROREGIONALIZACIÓN.

##### ¿Que es la micro regionalización?

La manera más elemental de introducir la influencia de la geología local detallada consiste en elevar o bajar localmente las intensidades de un mapa de sismicidad regional en función de los materiales superficiales, lo cual no es recomendable para no aplicar un método tan sencillo de micro regionalización.

1. -No solamente la clasificación geológica, sino la consistencia del material superficial deben jugar un papel.
2. -El espesor de la formación y en algunos casos las características de los estratos subyacentes son igualmente importantes.
3. -La adición o sustracción de un termino constante a la intensidad regional implica un comportamiento lineal del terreno, lo que es una hipótesis raras veces sostenible en materiales blandos o sueltos cuando se sujeta a fuertes sacudidas.
4. - La influencia de las características del suelo abarca mas allá de un simple cambio de intensidad, con frecuencia se refleja en la aparición de periodos que prevalecen localmente y alarguen las duraciones de estos movimientos.

Además en la ausencia de información detallada sobre la geología y propiedades mecánicas del suelo de la región, el criterio elemental proporcionara una guía para la micro regionalización

En el estudio de la sismicidad, la información disponible puede agruparse como sigue.

1. - Semejanza con otros fenómenos físicos
2. - Detalles geotécnicos
3. - Datos estadísticos sobre las coordenadas espaciotemporales de los focos sísmicos y energías liberadas por los mismos en todo el planeta durante un periodo en que tenemos información.
4. - Información cualitativa respecto a las mismas variables que en el grupo anterior, retrocediendo a épocas históricas y geológicas, en partes de la tierra.
5. - Teorías y observaciones sobre la transmisión de las ondas sísmicas.
6. - Mapas geológicos y datos sobre las propiedades dinámicas de las formaciones de roca y suelo.
7. - Datos estadísticos sobre las intensidades y registros de sismos

Los primeros 4 grupos de datos bastan para construir mapas de sismicidad local, es decir aseveraciones respecto a las probabilidades de que se originen sismos de magnitudes dadas en proporciones determinadas de la corteza terrestre.

Los últimos tres grupos de datos permiten tratar mapas de sismicidad local si se incluyen muchos detalles obtenidos de infamación geológica a estos mapas se les conoce como micro regionalización.

Una vez ubicada la microregionalización podemos conocer su compacidad relativa que esta en función de los materiales que componen el suelo, así como su comportamiento dinámico si es un suelo arcilloso, si un suelo esta densificado resistirá la licuación la densificación es el reacomodo de las partículas, en un suelo granular seco se presenta la densificación que son asentamientos en función de la relación de vacíos.

En fenómeno de la licuación puede presentarse en arenas, limos no cohesivos y en gravas, siendo más común que se presente en las arenas, la licuación se presenta en suelos que no han sido densificados.

### 3.2. - COMPACIDAD RELATIVA.

La relación de vacíos o porosidad de cualquier suelo usualmente no proporcionan de sí una indicación directa de su comportamiento cuando se carga o cuando se excava. De los suelos gruesos que tengan la misma relación de vacíos, uno puede estar muy compacto mientras que el otro puede estar suelto, por lo tanto, la compacidad relativa de un material grueso es más importante que la sola relación de vacíos, la compacidad puede expresarse numéricamente por la compacidad relativa  $D_r$  que se define como.

$$D_r = (e_{m\grave{a}x} - e / e_{m\grave{a}x} - e_{m\grave{i}n}) \times 100\%$$

En la que  $e_{m\grave{a}x}$  es la relación de vacíos del estado más suelto;  $e$  es la relación de vacíos real, por lo tanto  $D_r = 1.0$  para los suelos muy compactos y  $0.0$  para los suelos muy sueltos. En la practica, la compacidad relativa de los suelos granulares usualmente se juzga de manera indirecta mediante pruebas de penetración o de carga porque la medida directa de la relación de vacíos en el campo no resulta practica, sin embargo si se conoce  $e$ , pueden determinarse los valores de  $e_{m\grave{a}x}$  y  $e_{m\grave{i}n}$ , en el laboratorio.

El estado más suelto generalmente puede obtenerse permitiendo que el material pulverizado y seco caiga en un recipiente desde un embudo sostenido de manera que la caída libre sea aproximadamente de 1.3 cm, si el material es limoso, puede lograrse que quede más suelto permitiéndole que se asiente el agua.

El estado más denso puede obtenerse generalmente apretando el suelo dentro de un recipiente por medio de una combinación de presión estática y vibración o, en algunas ocasiones "haciendo llover" la arena desde una altura que permita que el impacto de los granos al caer compacte la capa superficial. El valor de  $D_r$  no siempre se puede determinar definitivamente, y debe acompañarse de descripciones de la manera que se empleo para determinar los  $e_{m\grave{i}n}$  y  $e_{m\grave{a}x}$ , esto debido a que los procedimientos estándar de la ASTM describen varios medios de producir  $e_{m\grave{i}n}$  ya que distintos procedimientos conducen a diferentes relaciones de vacíos en los diversos materiales. En los suelos que contienen cantidades apreciables de limo o arcilla la compacidad relativa pierde su significado, por que los valores de  $e_{m\grave{a}x}$  y  $e_{m\grave{i}n}$  no tienen sentido definido.

### 3.3. - COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL SUBSUELO ARCILLOSO.

Con los resultados preliminares de un estudio reciente en el que se efectuaron ensayos cíclicos triaxiales y de columna resonante pudieron explicarse por lo menos parcialmente, las altas amplificaciones que se observaron en los depósitos arcillosos en diferentes sitios de la ciudad de México.

En efecto se registro una respuesta esencialmente elástica de algunas muestras representativas de arcilla de la ciudad, hasta deformaciones angulares de aproximadamente 0.1%, este comportamiento, aunado a los bajos amortiguamientos medidos (4 a 8 %) colaboro a las magnificaciones altas que ocurrieron durante el sismo de 1985.

En los ensayos realizados la arcilla acusó un comportamiento inelástico para deformaciones mayores a 0.4%, lo que genero deformaciones permanentes, aun cuando el módulo de cortante casi se mantuvo sin cambio con el numero de ciclos, y por otra parte, conforme crecen los esfuerzos cortantes sostenido y cíclico y el numero de ciclos, y por otra, en la medida de la resistencia cortante del suelo es menor.

Un resultado relevante de este estudio experimental fue que para igual esfuerzo total (suma del sostenido mas el cíclico) la deformación plástica aumenta conforme es mayor el esfuerzo sostenido respecto al esfuerzo cíclico.

Esta respuesta dinámica de la arcilla es consistente con el comportamiento de los edificios, tanto en cimentación superficial, como en cajón y pilotes de fricción, que ejercían esfuerzos estáticos altos previamente al sismo, al combinarse una baja resistencia al corte de la arcilla de la ciudad y esfuerzos cortantes cíclicos adimensionales que indujeron deformaciones permanentes, mismas que se manifestaron en asentamientos y desplomes de esos inmuebles

### ARENAS Y LIMOS ORGANICOS.

Las características de corte de las arenas y de los limos orgánicos a menos que el suelo sea excepcionalmente suelto puede expresarse con la ecuación:

$$S = (p - U_w) \tan \Phi = p' \tan \Phi.$$

Donde:

$S$  = Esfuerzo de resistencia al cortante ( $\text{kg} / \text{cm}^2$ ),  $p'$  = Presión efectiva ( $\text{kg} / \text{cm}^2$ ),  
 $U_w$  = Presión del agua en los poros ( $\text{kg} / \text{cm}^2$ ),  $\Phi$  = Ángulo de fricción interna (grados),  
 $p$  = Presión tensión normal rasante ( $\text{kg} / \text{cm}^2$ ).

Los depósitos naturales de arena y limo pueden encontrarse en cualquier estado intermedio comprendido entre el suelto y el denso dependiendo principalmente de la compacidad relativa, el valor de  $\Phi$  varia entre extremos bastante amplios, la distribución granulométrica y la forma de los granos también influye en el valor de  $\Phi$ .

Las arenas y limos son materialmente de un alto potencial de licuación.

La resistencia de las arenas disminuye drásticamente a medida que aumenta el número de ciclos representativo de la duración de la etapa de movimiento fuerte de un sismo, el porcentaje de limos es una variable significativa, ya que a mayor contenido de limo es menor la resistencia cíclica, por otra parte, la plasticidad de los suelos finos puede cambiar significativamente la resistencia.

### 3.4. - LICUACIÓN ESPONTANEA.

En algunas localidades se han encontrado arenas finas que son tan sueltas que una pequeña alteración, como un choque débil, causan una importante disminución de volumen a presión constante  $p$ , si esta disminución se produce debajo del nivel freático, va precedida de un aumento temporal de  $U$  w a un valor casi igual a  $p$ , con lo cual  $P = p - U w$  se torna casi cero y la arena fluye como un líquido viscoso.

Este fenómeno se conoce como licuación espontánea y ha ocurrido tanto en terraplenes artificiales de arena suelta como en depósitos naturales. La experiencia indica que la licuación espontánea más común ocurre en las arenas finas limosas, este hecho combinado con el comportamiento observado de las arenas fluidas, sugiere que el agregado formado por los granos de arena posee una estructura meta estable, es decir que la estructura es estable solamente por que existe alguna influencia estabilizante suplementaria.

Un depósito de arena limpia bajo agua es estable, aun cuando sea suelto, por que los granos ruedan a posiciones estables, si un depósito artificial de arena húmeda se coloca por encima del nivel freático, el agente que interfiere esta formado por las películas de humedad, las que producen la cohesión aparente suficiente para impedir que los granos rueden hasta las posiciones estables, experimentos indican que la densidad relativa de la arena fluida es mucho menor, que aquella que corresponde a la relación de vacíos crítica.

La arena limpia que se deposita bajo agua, aun cuando esta suelta, tiene una estructura estable, pero en cambio si está sedimenta juntamente con limo, puede desarrollar una estructura meta estable.

Las depresiones entre los granos de arena en la superficie del sedimento se llenan parcialmente de limo suelto, que impide a los granos de arena alcanzar posiciones estables, la subsecuente consolidación bajo una presión estática, sin deformación lateral, es resistida por la fricción en los puntos de contacto entre los granos de arena. No obstante si se produce un deslizamiento en los puntos de contacto debido a un choque con una intensidad que exceda cierto valor límite, la estructura meta estable se derrumbara y la licuación se producirá, la rotura resultante aparece como progresiva, empezando en un punto y prosiguiendo como una reacción en cadena.

El fenómeno de licuación de arenas se presenta causando una disminución rápida de la resistencia al esfuerzo cortante hasta valores nulos o prácticamente nulos, por un aumento igualmente rápido de la presión neutral, ocurre cuando un suelo queda sujeto a una sollicitación brusca de tipo dinámico (impacto, sismo, etc). Lo que ahora sucede es que la estructura granular del material sufre un derrumbe instantáneo que afecta masas grandes del suelo, por lo que el agua se ve obligada a tomar bruscamente presiones adicionales muy por encima de la hidrostática, que reducen la presión efectiva a cero; el conjunto se comporta realmente como una suspensión densa y este comportamiento da nombre al fenómeno.

En una arena depositada en la naturaleza, el peligro de la licuación disminuye según sea más compacto y nunca se ha reportado una falla en mantos en los que la compacidad relativa fuese mayor del 50%.

Los suelos no coherentes están compuestos de granos redondeados cuyas formas varían desde la angular a la muy redonda, las partículas están en contacto en unos cuantos puntos solamente, en los cuales los esfuerzos son extremadamente amplios, si se aumenta el esfuerzo cortante, las partículas se deformarán más o menos elásticamente, en cada partícula, se producen aplastamientos locales en los puntos de contacto de más altos esfuerzos, tanto la distorsión como el aplastamiento producen ligeras traslaciones y rotaciones de los granos, aumentando el tamaño de los poros y reduciendo el de otros. La suma de todos los pequeños movimientos de cada partícula es la deformación de la masa.

Si el esfuerzo cortante se aumenta aun más, dos reacciones adicionales se hacen evidentes, las partículas tienden a rodar más sobre otras, el segundo mecanismo es el deslizamiento de un grano sobre otro, en la mayoría de los suelos sin cohesión la humedad no influye directamente en estos mecanismos, por que los intensos esfuerzos que se producen en los puntos de contacto entre los granos desplazan las moléculas de agua. El movimiento de los granos acompaña a la deformación y se hace mayor en el momento en el que se produce la falla por esfuerzo cortante. Al flujo de agua acompaña con frecuencia un alto esfuerzo neutro debido a las diferencias de carga a que se hace referencia la ley de Darcy.

$$(q = K i A.)$$

La ley de Darcy establece que la velocidad del flujo es proporcional al gradiente hidráulico.

$$V = k i$$

Donde:

v = velocidad del flujo, k = constante de flujo o coeficiente de permeabilidad, i = gradiente hidráulico.

$$i = \Delta H / \Delta L$$

$\Delta H$  = diferencia de cargas de presión en un trayecto de flujo de longitud  $\Delta L$ , por tanto la cantidad de flujo esta dada por  $q = Av = K i A$

Donde:

q = cantidad de flujo en una unidad de tiempo, A = área a través de la cual se verifica el flujo.

Si como resultado de esto la presión efectiva se hace cero, el suelo perderá toda su resistencia y se volverá movediza, en estas condiciones es como un fluido pesado; no resistirá esfuerzos y, si no esta confinado fluirá. La condición de estado movedizo es más probable que se produzca en las arenas finas y limos no cohesivos que en otros suelos, por que en ellos solo se produce una pequeña cantidad de filtraciones con una gran diferencia de carga.

### **ESFUERZO PRODUCIDO POR UN CAMBIO DE VOLUMEN.**

Cuando un suelo sin cohesión es sometido a una fuerza cortante su volumen cambia en la distribución del agua en los poros.

El esfuerzo cortante en un suelo cohesivo saturado (arcilla) es más complejo que en la arena o en la grava, igual que el suelo no cohesivo, la arcilla esta formada por partículas separadas que tienen que deslizarse o rotar para que se produzca el esfuerzo cortante, sin embargo hay muchas diferencias significativas:

El suelo es relativamente compresible por lo tanto, la carga que se aplica a la arcilla saturada es soportada inicialmente por el esfuerzo neutro y no se transmite a la estructura del suelo.

La permeabilidad de las arcillas es tan baja que el esfuerzo neutro producido por la carga se disipa muy lentamente; por consiguiente pueden pasar meses y hasta décadas antes que la estructura del suelo sienta los efectos del aumento del esfuerzo. Hay fuerzas importantes que se desarrollan entre las partículas de arcilla por sus mutuas atracciones o repulsiones.

### **3.4.1. -Licuación de los suelos.**

#### **La licuación de flujo y la movilidad cíclica**

El término de la licuación se ha utilizado realmente para describir un número de fenómenos relacionados. Porque los fenómenos pueden tener efectos similares, puede ser difícil distinguir entre ellos. Los mecanismos que los causan, sin embargo, son diferentes. Estos fenómenos se pueden dividir en dos categorías principales: licuación de flujo y movilidad cíclica.

#### **La licuación de flujo**

La licuación de flujo es un fenómeno en el cual el equilibrio estático es destruido por las cargas estáticas o dinámicas en un depósito de suelo con una fuerza residual baja. La fuerza residual es la fuerza de un suelo que se ha licuado.

La carga estática, por ejemplo, se puede aplicar por los edificios nuevos en una pendiente que ejercen fuerzas adicionales en el suelo debajo de las cimentaciones. Los terremotos, arruinando la composición del suelo, y el hincado de una pila son ejemplos de las cargas dinámicas que podrían accionar la licuación de flujo. Una vez que esta es detonada, la fuerza de un suelo susceptible a la licuación de flujo deberá ser un poco más grande de lo que soportan las tensiones estáticas que actuaban en el suelo antes de la falla.

Las fallas causadas por la licuación de flujo son caracterizadas a menudo por los movimientos grandes y rápidos que pueden producir el tipo de efectos desastrosos experimentados por los edificios de apartamento en donde literalmente fueron arrancados desde sus cimientos y presentaron un daño total al colapsarse, las fallas de flujo, pueden implicar el flujo de volúmenes considerables del material, que experimenta los movimientos muy grandes que son conducidos realmente por tensiones estáticas, la fuerza necesaria para accionar la licuación de flujo puede, en algunos casos, ser muy pequeña.

#### **La movilidad cíclica**

La movilidad cíclica es un fenómeno que se presenta en la licuación, accionado por la carga cíclica, ocurre en depósitos de suelo con tensiones de cortante estáticas más bajas que la fuerza del suelo. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se incrementan debido a las tensiones estáticas y dinámicas que existen durante un terremoto.

La separación lateral, es un resultado común de la movilidad cíclica, puede ocurrir al inclinarse suavemente la tierra plana cerca de los ríos y de los lagos.

En la tierra plana, la presión de poro del agua causada por la licuación es alta, y esto hace que el agua de los poros fluya rápidamente a la superficie de tierra. Este flujo puede ocurrir durante y después de un terremoto. El agua que fluye de los poros rápidamente es bastante, puede llevar consigo partículas de arena a través de las grietas hasta la superficie, donde se depositan en la forma de volcanes de la arena o de ebulliciones de la arena. Estas características se pueden observar a menudo en los sitios que han sido afectados por la licuación.

### **3.5. - GEOLOGÍA REGIONAL EN LÁZARO CÁRDENAS Y COLIMA.**

#### **LÁZARO CÁRDENAS**

El puerto industrial se encuentra ubicado en el delta del Río Balsas, el delta forma una estrecha llanura costera y se localiza en la zona más baja de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del sur.

En términos generales, el delta tiene forma triangular, con 13 km. de base, 9 km de altura y superficie aproximada de 60 km<sup>2</sup>.

Los rasgos fisiográficos más importantes del delta son.

- a) Limite irregular entre las formaciones predeltáicas y los sedimentos del delta.
- b) Extensas llanuras de inundación, canales y niveles naturales del río.
- c) Abundancia de meandros abandonados e islas que han modificado su extensión.
- d) Lagunas, esteros y manglares.
- e) Abanicos aluviales.
- f) Pequeños ríos y arroyos que no desembocan al océano.
- g) Dos llanuras angostas no deltaicas que muestran pequeñas elevaciones correspondientes a antiguas líneas de costa.

Las formaciones geológicas de la microregión, de acuerdo con su origen, pueden dividirse básicamente en cinco

1. -Roca.-Se encuentran rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En la Sierra Madre del sur hay rocas andesíticas, granodioritas y calizas en abundancia.
2. - Manto de materiales cohesivos semiitificados que subyacen a todos los materiales de depósito. Se halla generalmente a profundidades mayores de 30 m y se pueden clasificar como lutitas, por su edad y resistencia, tiene su origen probablemente en el pleistoceno o final del terciario.
3. -Conglomerados no cementados (predeltaicos probablemente del plioceno o pleistoceno). Pueden clasificarse como gravas arcillosas desde el punto de vista de la mecánica de suelos. La matriz arcillosa ocupa el 20 al 30 % del volumen. Sobreyacen a las rocas en la zona de lomeríos comprendida entre la planicie costera y la Sierra Madre del sur.

4. -Depósitos no deltaicos aluviales. Conforman la mayor parte de la planicie costera. Están constituidos por suelos residuales de tipo de arcilla de mediana plasticidad, limos, arenas medias, y gruesas, gravas y cantos rodados, producto de deposito aluvial, también existen depósitos lacustres formados por causas antiguos y esteros, en estos depósitos pueden ser hallarse lentes de suelos altamente orgánicos (turbas)

Se encuentran a elevaciones de 2 a 10 msnm, depositados en forma de capas alternadas y erráticas de arena, grava, grava arena y arcillas. Superficialmente existen generalmente arcillas que pueden ser desde muy plásticas hasta medianamente plásticas, con diferentes contenidos de materia orgánica, encontrándose inclusive turbas.

5. -Depósitos litorales recientes, son depósitos de arena media a fina. Existen desde sueltos hasta compactos. Su compactación aumenta en general con la profundidad. Estos depósitos se localizaron en la zona sur de la siderúrgica y en la isla de en medio.

Estos de positos cuando están en estado suelto bajo nivel freático, tienen posibilidad de licuación con temblores. El nivel freático varía entre cero y siete metros sobre el nivel del mar, dependiendo, principalmente de los niveles en el río y en segundo término de la precipitación pluvial.

#### **SISMICIDAD.**

La delta del río Balsas se localiza dentro de la zona de alta sismicidad, asociada a la subducción de la placa del Océano Pacifico bajo el continente Americano. Desde el punto de vista de temblores someros, la sismicidad en México es la más alta de todo el Hemisferio Occidental (Gutenberg y Richter, 1954), y afecta principalmente los estados costeros de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

#### **COLIMA**

Las rocas expuestas en territorio colimense están representadas por rocas volcano sedimentarias del Cretácico Inferior y Medio, sedimentarias del Cretácico Medio Superior, volcánicas del Terciario y Cuaternario y Plutónicas del Mesozoico y Cenozoico.

También se han reportado rocas metamórficas están consideradas como las más antiguas y las sobreyacen rocas volcano sedimentarias del Cretácico Medio.

Las rocas más antiguas que afloran en la entidad se consideran tentativamente del Paleozoico, se describen petrográficamente como gneises de biotita y muscovita facies albita-epidota intrusionadas por migmatitas.

Los afloramientos de gneises y esquistos son conspicuos; están expuestos unos al noroeste de Manzanillo a una distancia de 25 km. Sobreyacen discordantemente a estas rocas metamórficas, una sucesión cretácica de tobas andeísticas y calizas recristalizadas.

Las formaciones geológicas de la microregión, de acuerdo con su origen, pueden dividirse básicamente en siete, en orden descendente.

1. -Aluvión, formado por gravas arenas, depósitos de talud, limos, arcilla y aluviones que en algunas localidades están semiconsolidados por una matriz calcárea, el material detrítico más grueso, es el que se encuentra en las laderas de las montañas; hacia los valles y zona costera disminuye la granulometría hasta convertirse en gravas, arenas, limos y arcillas.

El material de las playas de la zona costera de Colima consiste de arenas finas de cuarzo, fierro, titanio y zircón, que corresponden aun medio ambiente litoral. Son arenas ferrotitaníferas de color negro debido al contenido de fierro magnético.

2. -Formación Atenquique. La cual esta conformada litológicamente por derrames riodacíticos y andesíticos, esta conformada por depósitos volcánicos y sedimentarios con estratificación burda que comprende lahares andesítico -basáltico, cenizas, brechas de explosión y depósitos de avalancha provenientes de las erupciones pliocuaternarias de los volcanes de Fuego y el Nevado de Colima.

3. -Formación Colima. Los productos piroclásticos del volcán Colima en el Plioceno abarcan una superficie de 675 km<sup>2</sup>, del territorio colimense.

Estos materiales consisten litológicamente consisten de conglomerados y brechas volcánicas, areniscas, areniscas tobaceas, cenizas y derrames ígneos basálticos que descansan en discordancia erosional sobre la formación Cerro de la Vieja.

Dicha formación esta cubierta por depósitos y derrames andesíticos basálticos de la formación Atenquique.

4. -Terciario volcánico. Dividido en Terciario Medio Volcánico y Terciario Superior Volcánico. Terciario medio Volcánico, esta constituida por traquitas, tobas y brechas andesíticas, andesitas y tobas dacíticas; raras veces estratificadas.

Terciario superior Volcánico, esta conformado por rocas dacíticas, andesitas, brechas andesíticas, tobas dacíticas, latitas y cuarzolitas.

5. - Rocas ígneas Intrusivas. Estas masas de rocas son de composición diorítica, monzonítica y tonalítica originadas durante el último evento magmático del Terciario Inferior, aflora en forma de troncos, diques y diquestratos.

6. - Batolito De Tomatlan. Este batolito es de composición granítica y granodiotica con diferenciación magmática de monzonita a diorita.

7. -Formación Cerro De La Vieja. Se encuentra constituida por cuatro unidades.

- a) Conglomerados calcáreos con matriz limolítica
- b) Conglomerados calcáreos con matriz de lodo calcáreo
- c) Limolitas
- d) Areniscas

#### 4. - SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL

##### Red Sismológica Nacional

Actualmente, el Servicio Sismológico Nacional, cuenta con cerca de 50 equipos para el registro de temblores, organizado en diferentes subredes:

Red de Banda Ancha

Red del Valle de México

Red Sismológica Nacional (Red Convencional)

##### Red de Banda Ancha

La Red Sismológica de Banda Ancha está configurada para monitorear la sismicidad en las regiones de mayor potencial sísmico dentro de la República Mexicana.

Las estaciones se localizan, en su mayoría, a lo largo de las costas del Océano Pacífico y de Veracruz, así como en el eje neovolcánico (Figura 18). La red consiste actualmente de 18 estaciones en operación y se planea instalar 3 estaciones adicionales en un futuro próximo (Tabla 2, ANEXO A)



**Figura 18.** Descripción: Ubicación de las estaciones de la red de Banda Ancha. Los círculos grises indican las estaciones actualmente en operación y los círculos blancos las estaciones previstas en un futuro próximo.

##### Red Sismológica Nacional

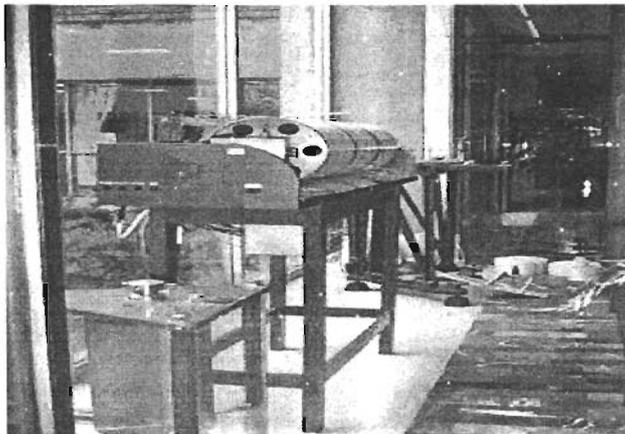
Esta red está formada por 15 estaciones telemétricas distribuidas dentro del territorio nacional (Figura 19) que envían su señal en tiempo real directamente a la Estación Central localizada en el IGF de la UNAM.



**Figura 19.**

La mayoría de los equipos utilizados son sensores verticales de periodo corto (1 seg.) y algunos de periodo largo. La transmisión de los datos se realiza en tiempo real a través de la red de microondas de TELECOMM y llegan al SSN a través de líneas telefónicas privadas.

Además de la red telemétrica, el SSN cuenta actualmente con 7 estaciones que operan en forma autónoma grabando "in situ" las señales sísmicas sobre papel (Figura 20) La adquisición y procesamiento de los datos sísmicos se realizan mediante las computadoras personales de tipo PC.



**Figura 20.**

## 5. - PELIGROSIDAD Y ZONIFICACIÓN SÍSMICA

### 5.1. -LEYES DE ATENUACIÓN

#### Atenuación de las ondas sísmicas

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión, hasta ahora supuesto en terreno firme, si en la *i*-ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada. A las expresiones que relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad se les conoce como *leyes de atenuación*. Usualmente, la posición relativa fuente-sitio se especifica mediante la distancia focal, es decir, la distancia entre el foco sísmico y el sitio. Las leyes de atenuación pueden adoptar muy diversas formas. En este estudio se utilizan diversas leyes de atenuación dependiendo del tipo de sismo.

Dadas la magnitud y la distancia epicentral, la intensidad sísmica no está exenta de incertidumbre por lo que no puede considerarse determinista. Suele suponerse que, dadas la magnitud y la distancia, la intensidad  $S_a$  es una variable aleatoria distribuida log normalmente con mediana dada por la ley de atenuación y desviación típica del logaritmo natural igual a  $\ln S_a$ .

Para efectos de las presentes bases técnicas se pueden utilizar cuatro leyes de atenuación diferentes dependiendo de las trayectorias que recorren las ondas en su camino de la fuente al sitio.

Se utilizan leyes de atenuación espectrales que toman en cuenta el hecho de que la atenuación es diferente para ondas de diferentes frecuencias, por lo que se tienen parámetros de atenuación diferentes para cada periodo de vibración considerado. Estas leyes se describen a continuación.

1. Temblores costeros. Se utiliza, para la aceleración máxima del terreno provocada por temblores generados en la costa sur del Pacífico, la ley de atenuación de Ordaz *et al.* (1989). Esta ley fue construida a partir de numerosos registros de aceleración obtenidos por la Red Acelerográfica de Guerrero, que incluyen los del gran temblor del 19 de septiembre de 1985. La relación entre la aceleración máxima del terreno y las ordenadas del espectro de respuesta a otros periodos se obtiene del modelo teórico de fuente y trayecto reportado por Singh *et al.* (1989)
2. Temblores de profundidad intermedia. Se emplea en este caso el modelo de atenuación descrito por Rosenblueth *et al.* (1988). Se trata de un modelo teórico fuente-trayecto, con parámetros ajustados para reproducir los pocos registros de aceleración disponibles para este tipo de sismos.
3. Temblores superficiales. Para modelar la atenuación de los temblores superficiales, tanto los que ocurren en el Eje Neovolcánico como los que se presentan en la parte noroeste del país, se utilizan leyes de atenuación construidas con datos registrados en California.

4. Temblores costeros afectando la zona firme del Valle de México. Se sabe que aun el terreno firme del Valle de México está afectado por amplificaciones debidas, casi seguramente, a la constitución del subsuelo profundo de la cuenca. Esto hace que no exista propiamente "terreno firme" en el DF, por lo que es necesario modelar la atenuación de las ondas de una manera específica. Para ello se utilizan las leyes de atenuación de Reyes (1997), construidas con datos registrados exclusivamente en la estación Ciudad Universitaria de la Ciudad de México durante la ocurrencia de temblores costeros.

La fuente de mayor incertidumbre en los estudios de peligrosidad sísmica es la determinación de la ecuación de atenuación que se va a utilizar. *La ecuación o ley de atenuación es una expresión semiempírica que relaciona Magnitud-Distancia-Intensidad Sísmica*; entendiéndose por estas últimas palabras a la aceleración, velocidad, desplazamiento e intensidad propiamente dicha de eventos sísmicos; estas relaciones se obtienen de los datos que existen sobre los parámetros mencionados.

En general, los procedimientos utilizados para obtener las leyes de atenuación, consisten en ajustar curvas a los datos de movimientos sísmicos ocurridos en diferentes regiones, por lo que las expresiones así obtenidas reflejan las características geotectónicas de la región para la cual fueron obtenidas. Mal se haría con importar leyes de atenuación derivadas de otras regiones para realizar estudios de peligrosidad sísmica.

#### **Filosofía de las leyes de atenuación.**

La filosofía de las leyes de atenuación se puede sintetizar en dos aspectos, que son:

- A una misma distancia, R se espera tener la misma intensidad sísmica (aceleración, velocidad, desplazamiento e intensidad propiamente dicha)
- La intensidad sísmica disminuye conforme la distancia aumenta y viceversa.

Ahora, comparemos que ha sucedido en la realidad; al respecto veamos que pasó con el sismo de San Fernando del 09-02-71, uno de los eventos mejor documentados, a una distancia promedio aproximada de 42 km. del epicentro se registraron aceleraciones horizontales máximas del suelo que variaron entre 58 y 245 galios. Es decir no se tuvo la misma intensidad sísmica a igual distancia; existen varios casos similares al descrito.

Lo expuesto tiene como finalidad mostrar la incertidumbre que conlleva el uso de una ley de atenuación a pesar de que ésta fuera obtenida de registros instrumentales. Para contrarrestar esto se acostumbra incluir en las fórmulas un término que corresponde a la desviación estándar  $\sigma$ , el mismo que se calcula suponiendo que los logaritmos naturales de los cocientes de las intensidades sísmicas predichas a las registradas instrumentalmente tienen una distribución Log normal.

#### **Relación entre Intensidad y Aceleración.**

La forma de la ecuación que permite el paso de intensidades a aceleraciones es la indicada en la ecuación (1)

$$\text{Log } A = \sigma \bar{I}MM + \gamma \quad (1)$$

Donde: A = Aceleración máxima del suelo,  $\sigma$  = desviación estándar,  $\bar{I}MM$  = Intensidad en la escala MM ( Mercalli),  $\gamma$  = Tasa de ocurrencia anual.

Algunos valores de  $\sigma$  y  $\gamma$  se indican en la tabla 3 y han sido obtenidos de estudios de aproximación lineal con los datos de Intensidades y aceleraciones máximas del suelo.

AUTOR	$\sigma$	$\gamma$
Trifunac y Brady <sup>(54)</sup>	0.300	-0.014
Bolt <sup>(34)</sup>	0.313	0.340
Murphy, O' Brien <sup>(55)</sup>	0.250	0.250
Lomnitz <sup>(56)</sup>	0.333	-0.500
Saragoni <sup>(57)</sup>	0.345	-0.222

**Tabla 3. Valores de  $\sigma$  y  $\gamma$**

Evidentemente, que es más compleja la relación entre la  $I_{MM}$  y la Aceleración máxima del suelo  $A$ , pero las relaciones indicadas en la tabla 3, han sido utilizadas en la determinación de leyes de atenuación para la aceleración máxima del suelo. Manteniendo el esquema indicado en la ecuación (1) los valores de  $\sigma$  y  $\gamma$  sería conveniente que se obtengan en función del tipo de suelo.

## 5.2. -Leyes de atenuación de la aceleración.

En la tabla 4 se indican algunas de las leyes de atenuación que han sido utilizadas en estudios de peligrosidad sísmica en diferentes regiones del mundo.

REGIÓN	LEY DE ATENUACIÓN	AUTOR
Chile-Argentina	$\ln A_{\max} = 8.54 + 0.57M - 1.73 \ln (R+60)$	Saragoni <sup>(8)</sup>
Perú	$\ln A_{\max} = 8.18 + 0.68M - 1.63 \ln (R+60)$	Saragoni <sup>(8)</sup>
Perú	$\ln A_{\max} = 4.23 + 0.8M - \ln (R+25)$	Casaverde <sup>(36)</sup>
	$\ln A_{\max} = 6.35 + 0.99M - 1.76 \ln (R+40) \pm 0.6$	Aguiar <sup>(17)</sup>
Ecuador	$\ln A_{\max} = 3.75 + 0.47M - 0.57 \ln (R+10) \pm 0.67$	Grases <sup>(27)</sup>
	$\ln A_{\max} = 6.98 + 0.5M - 1.25 \ln (R+25)$	Donovan <sup>(28)</sup>
Venezuela- Transcurrentes	$\ln A_{\max} = 0.14 I_{MM} + 0.24M - 0.68 \log R + \beta$	Goula <sup>(29)</sup>
USA-Transcurrentes	$\beta = 0.60$ Costa Occidental USA	
USA-Japón-Europa	$\beta = 0.69$ Japón	
	$\beta = 0.88$ Europa	

**Tabla 4. Leyes de atenuación de la aceleración máxima de suelo.**

Las leyes de atenuación de la forma indicada en la tabla 4, reportan la aceleración máxima, en galios, para un determinado evento de magnitud  $M$  y a una distancia hipocentral  $R$ .

En forma similar existen relaciones para determinar la velocidad máxima del suelo. Ahora, se pretende incorporar el contenido de frecuencias y la duración del evento sísmico, razón por la cual se está trabajando con el Espectro de Amplitudes de Fourier **EAF** en la determinación de las leyes de atenuación.

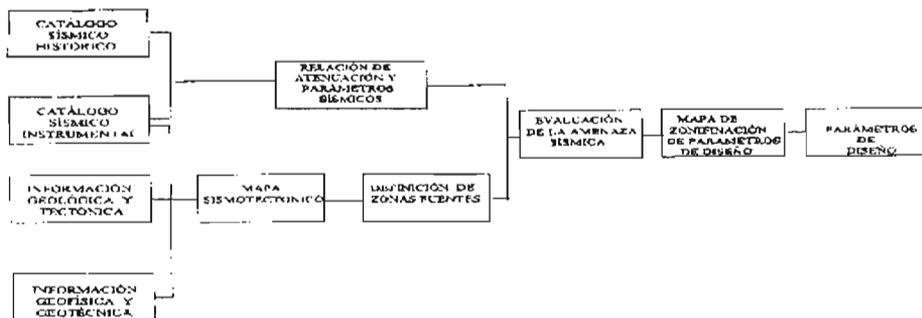
### 5.3. -PELIGRO SÍSMICO.

Se define como *Peligrosidad Sísmica*, la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo y dentro de una región determinada, movimientos del suelo cuyos parámetros: aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad son cuantificados. Para la evaluación se deben analizar los fenómenos que se producen desde el hipocentro hasta el sitio de interés.

Para el diseño sísmico de estructuras, fundamentalmente se necesita conocer cual es la aceleración máxima del suelo que se espera en la zona que se va a implantar el proyecto durante la vida útil de la estructura. Si adicionalmente, se pueden establecer los otros parámetros indicados en el párrafo anterior u otros adicionales como el tiempo y contenido de frecuencias, que de alguna forma se están incorporando en los estudios de peligrosidad sísmica.

#### Procedimiento de cálculo.

En la Figura 21, se presentan procedimiento que se siguen para la evaluación de la Peligrosidad sísmica a nivel regional, tendientes a la obtención de parámetros para el diseño sísmo resistente, expresados en términos probabilísticos



**Figura 21. Procedimiento del caculo de la Peligrosidad Sísmica.**

La información sísmica histórica, de eventos que se registraron en el período 1500 - 1900 es muy importante, por que son cuatro siglos de datos, razón por la cual es fundamental su estudio. Lamentablemente, los sismos históricos no han sido estudiados con el detenimiento del caso, primero porque es una tarea que demanda mucho tiempo y segundo por lo difícil que resulta el conseguir la información.

Las crónicas de los sismos históricos en algunos casos son muy exageradas y tienden a sobredimensionar el daño ocasionado.

Por otra parte, en la mayor parte de países, el catálogo sísmico instrumental tiene amplia información a partir de los años 1960 y 1970, por la implementación de un mayor número de estaciones sismográficas.

En el período 1900-1960 la información es escasa, no porque no hayan ocurrido sismos sino porque no existía suficiente instrumentación sísmica.

En consecuencia, antes de empezar un trabajo de peligrosidad sísmica lo primero que se debe hacer es un estudio de completitud de la información sísmica, se puede utilizar para el efecto, el procedimiento propuesto por Steep, quien describe un procedimiento basado en la varianza como parámetro estadístico en los cuales la tasa de ocurrencia de los sismos es estable para distintos niveles de magnitud.

La información tectónica, geológica, geofísica y geotécnica es un complemento a la información sísmica instrumental para poder definir un mapa sismo tectónico de la región en estudio.

En la elaboración del mapa sismo tectónico del Ecuador se utilizaron, a más de la información tradicional, imágenes de satélite LANSAT, mosaicos de radar de apertura sintética SAR, se interpretó alrededor de 400 fotografías aéreas.

Todo ello para la detección y limitación de las fallas geológicas. Con el mapa sismo tectónico se procede a la definición de *zonas fuentes* o *áreas fuentes que son aquellas regiones en las cuales existe una homogeneidad de los focos de los sismos registrados*. Estas zonas de unidad sísmica están asociadas a un sistema de fallas.

No es conveniente considerar fuentes puntuales sino fuentes con una actividad sísmica difusa que abarcan una gran área, debido a la complejidad de la tectónica, al incompleto conocimiento de las zonas de falla y a un eventual desconocimiento de accidentes tectónicos sin expresión superficial.

Algunos investigadores determinan las áreas fuentes en base al *flujo tectónico* definido como la cantidad de energía disipada por unidad de área y por unidad de tiempo.

#### 5.4. -Relación de recurrencia

Para la evaluación de la peligrosidad sísmica en cada una de las áreas fuentes es necesario calcular:

La relación de recurrencia de la actividad sísmica, propuesta independientemente por Ishimoto-Ida en 1939 y Richter - Gutenberg en 1944. La misma que tiene la siguiente forma:

$$\text{Log } N(M) = a - b M \quad (2)$$

Siendo  $N(M)$  el número de sismos anuales de magnitud mayor o igual que  $M$ . Las constantes  $a$  y  $b$  definen la sísmicidad del área.

A la ecuación (3) se le conoce como ley de Richter, la misma que puede escribirse también de la siguiente forma:

$$\gamma = \alpha \exp. - \beta M \quad (3)$$

Donde  $\gamma$  es la tasa de ocurrencia anual de eventos de magnitud mayor o igual que  $M$

La relación que existe entre las variables  $a$ ,  $b$  y  $\beta$  son las siguientes:

$$a = \log \alpha \quad (4)$$

$$\beta = b / \log e = b \ln 10 \quad (5)$$

Tanto los parámetros  $a$ ,  $b$  como,  $\alpha$  y  $\beta$  se obtienen de un ajuste de mínimos cuadrados.

La pendiente  $b$  indica que tan rápido o lento se mueve una zona de falla.

Por otro lado cabe destacar que en la búsqueda de datos encontramos distintos valores de magnitudes de sismos así como también una amplia gama de bases de datos, con los datos encontrados se llevaron a cabo ensayos previos del cálculo de las constantes llegando a la conclusión de que existen bases de datos amplias que al ser manipuladas arrojaban valores parecidos que al manejar bases mas pequeñas, lo significativo es que la magnitud es la que rige el comportamiento de las ecuaciones, es decir podemos utilizar cualquier base de datos del lugar en cuestión solo si consideramos las que presenten las mayores magnitudes del registro sísmico, así no importaba tanto el tamaño de la base de datos las constantes se pueden calcular con bases de datos pequeñas.

En otras palabras es más significativo el tamaño del sismo en cuestión, además de que con bases grandes los coeficientes de calculo tienden a ser pequeños, en conclusión solo los sismos de dimensiones considerables cambiaran los valores de estas constantes y por lo tanto la medida de la dispersión variara según sea el rango y magnitud ingresada a las formulas de regresión lineal y los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ .

Una vez organizados los valores por magnitud y número de sismos, se calculo la aceleración, velocidad y distancia de las ondas sísmicas para esto utilizamos las expresiones de Esteva.

Cabe reiterar que dichos factores solo son validos para el sismo en cuestión debido a que las componentes del movimiento son diferentes a pesar de que su duración y magnitud son las mismas, para el cálculo de la energía sísmica, aceleración, velocidad y distancia utilizamos las siguientes expresiones

$$\text{Energía sísmica} \quad 10^{(11.8 + 1.5 M_o)} \quad (6)$$

$$\text{Aceleración} \quad a = (1230 * \exp. (0.8 * M_o)) / (R + 25)^{-2} \quad (7)$$

$$\text{Velocidad} \quad v = 15 \exp. M_o (R + 0.17 \exp. 0.59 * M_o)^{-1.7} \quad (8)$$

$$\text{Distancia} \quad d = (5 * v^2) / a \quad (9)$$

Donde la aceleración esta en  $\text{cm} / \text{s}^2$ , velocidad en  $\text{cm} / \text{s}$ , distancia en  $\text{cm}$ ,  $R$  es la distancia focal en  $\text{km}$ , y  $M_o$  es la magnitud del sismo.

Por otro lado tenemos que estas expresiones son validas solo para roca firme, por lo que podemos calcular la distancia a la superficie para obtener la aceleración real, aunque esto queda fuera del alcance a este trabajo, en el análisis de comportamiento sísmico en un lugar determinado solo lo tomaremos como referencia para tratar de entender que es lo que sucede en torno a esto y en el mejor de los casos determinar su posible riesgo sísmico.

Para esto tomaremos un radio de 100 kilómetros alrededor del punto analizado, es decir tomamos primeramente los datos de la base de sismos fuertes en Colima y Lázaro Cárdenas.

Consideraremos solo la mayor de sus tres componentes en la base de datos puesto que el mayor riesgo estaría representado por esta cantidad de energía liberada, las consecuencias de estos fenómenos varían de forma indeterminada puesto que son muchos los factores como son los tipos de capas que atraviesan las ondas así como la dirección de sus componentes, profundidad del origen de la liberación de energía, tipo de falla, etc.

## **6. -CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PARA COLIMA Y LÁZARO CÁRDENAS.**

### **6.1. -EVALUACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO A PARTIR DE MÉTODOS NUMÉRICOS COMPUTARIZADOS.**

Un espectro de diseño es la envolvente de los espectros de respuesta de los sismos registrados, durante un periodo de tiempo, en una estación acelerográfica. Considerando la posibilidad de que se presenten nuevamente dichos eventos en un determinado periodo de retorno.

#### **FUNDAMENTOS DEL SHAKE.**

El cálculo de los espectros de respuesta se realiza mediante el procedimiento programado en el programa SHAKE cuya teoría y fundamentos se explican a continuación.

La teoría del programa SHAKE considera una respuesta asociada a la programación vertical de ondas S ("Shear") en un sistema viscoso- elástico lineal.

Se toma el registro del movimiento del suelo partiendo de una base de roca, así como el movimiento manifestado en roca, aquí es donde se presenta un cambio posible en manifestaciones exteriores (movimiento) de amplitudes en roca, dependientes de la distancia de la zona de liberación de energía, del mismo modo se presenta un movimiento modificado en roca, esto nos da como resultado un movimiento del suelo modificado y a la vez un movimiento modificado en base de roca.

El procedimiento analítico envuelve tres situaciones fundamentales:

1. - Determinar características del movimiento sísmico y desarrollarlo en la roca del sitio a tratar, seleccionando un acelerograma con dichas características.

La aceleración máxima, periodo predominante y duración efectiva serán los parámetros más importantes en un movimiento sísmico y las relaciones empíricas de estos parámetros y la distancia del sitio en cuestión, a la falla que causo el sismo servirá para correlacionarlo con tablas donde observando la magnitud del movimiento se obtiene el alcance.

2. - Comprobar la determinación de las propiedades dinámicas del depósito de suelo. Observar las relaciones proporcionales entre el módulo dinámico de la onda S y los radios del suelo húmedo o mojado así como las funciones estáticas y de esfuerzo del suelo correspondientes al depósito de suelo en cuestión, ya que existen variaciones para cada tipo de suelo.

3. - Computar la respuesta del depósito del suelo a la de las rocas basales, apoyado en un sistema de análisis unidimensional de propagación de onda.

El sistema permite obtener dichas respuestas en cualesquiera de sus regiones, además de poder reutilizarse para otros depósitos de suelo, porque puede incorporar comportamientos no lineales de suelo directamente ligados a porcentaje de humedad de suelo.

En resumen, el programa SHAKE computa la respuesta de un sistema homogéneo, de capas visco-elásticas horizontales de extensión infinita, sujeto a un movimiento ondulatorio vertical distorsionante.

El programa se basa en la ecuación de onda adaptada para usarse a funciones transitorias a través del algoritmo de la transformada rápida de Fourier. La no linealidad debida al módulo distorsionante y a la humedad, es de poca importancia contra la linealidad equivalente de las propiedades del suelo.

El análisis comprende:

- a) El sistema de suelo se extiende indefinidamente en la dirección horizontal
- b) Cada capa en el sistema es completamente definida por un modulo distorsionante, densidad, espesor, y radio critico de humedad; independiente de la frecuencia.
- c) Las respuestas del sistema son causadas por la propagación hacia arriba de las ondas distorsionantes debajo de la línea de la roca.
- d) Las ondas distorsionantes se tienen así como valores de aceleraciones espaciados equitativamente. La repetición cíclica de la historia de aceleraciones se encuentra implícita en la solución.

El procedimiento se puede abreviar de la siguiente manera:

- a) Lee el movimiento de entrada, encuentra la aceleración máxima, escala los valores de mayor a menor y computariza el periodo predominante.
- b) Lee la información del depósito del suelo y obtiene el periodo fundamental de éste.
- c) Obtiene los esfuerzos y distorsiones a la mitad de cada uno de los estratos y obtiene nuevos valores para el modulo del esfuerzo y humedad, con cierto porcentaje especificados por capa de la distorsión máxima.
- d) Computariza los movimientos de las capas superiores y medias.
- e) Imprime y grafica a los movimientos desarrollados en cada capa.
- f) Grafica el espectro de Fourier para los movimientos.
- g) Obtiene, imprime y grafica la función de amplificación entre dos capas o estratos.
- h) Incrementa o decrementa el intervalo de tiempo sin cambiar el periodo predominante o la duración del registro.
- i) Cambia el nivel de aceleración y el periodo predominante del movimiento para computarizar este movimiento.
- j) Obtiene, imprime y grafica la historia de esfuerzos o distorsiones entre cada capa.

Para obtener los espectros de repuesta es necesario contar con los registros de los sismos en formato estándar, los cuales pueden obtenerse de la base de datos de sismos fuertes.

Los archivos de entrada corresponden a los formados durante la ejecución del programa SHAKE. En estos archivos los resultados son agrupados en dos columnas, la primera corresponde a la frecuencia, en Hz, y la segunda a las aceleraciones espectrales.

El programa ESPECTRO fue desarrollado para mostrar graficados los espectros de respuesta evaluados con el SHAKE. Este programa mediante un filtro codificado define el espectro de diseño correspondiente a la envolvente de los espectros de respuesta previamente evaluados. También en el programa se codificaron las instrucciones para dibujar los espectros de diseño propuestos por la Comisión Federal De Electricidad (CFE)

ESPECTRO es un programa formado por varios módulos, la comprensión de estos es uno de los objetivos primordiales de este trabajo, ya que facilitara la elaboración de nuevos códigos en MATLAB. El procedimiento que se sigue para explicarlos es el siguiente:

- a) Se Define el objetivo del modulo y su funcionamiento técnico y se proporciona el manual de usuario.
- b) Se secciona el código fuente del modulo y se detallan las instrucciones y ciclos dentro del programa con el fin de ofrecer la metodología para programar en la plataforma MATLAB.

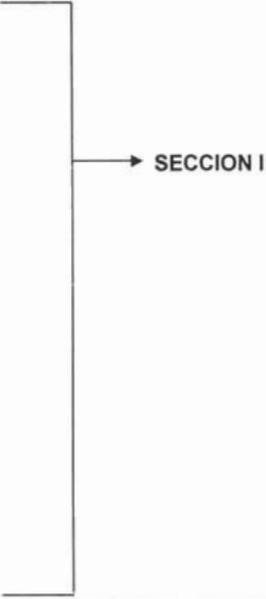
El código fuente de estos programas, se puede observar en el apartado a continuación.

## 6.2. -PROGRAMACIÓN

### MÓDULO UNIÓN. M

Para entender esto observemos la siguiente lista de decodificación que corresponde al módulo UNIÓN. M, que se definirá paso a paso.

```
1. %% autor RRO %%
2.
3. clear;
4.
5. %% FORMALIZA CANTIDAD DE ARCHIVOS POR ABRIR
6. prompt = {'¿CUANTOS ARCHIVOS SE ABRIRAN?..'};
7. titulin = 'ESPECTROS';
8. lines = [[1],[20]];
9. def = {'(# V.SAL)'};
10. answer = inputdlg(prompt,titulin,lines,def);
11. assignin('base','imfile',answer{1});
12.
13. iter=[ str2num(imfile)];
14.
15. close;
16.
17. for n=1:iter
18. N=(n);
19. %% COMODINES DE ARCHIVO Y MATRICES DE DATOS
20. X=['V',num2str(N),'.SAL'];
21. Y=['fi',num2str(N)];
22. Z=['a',num2str(N)];
23.
24. y=fopen(X);
25. tline1 = fgetl(y);
26. Z=fscanf(y,'%g %g',[2 126]);
```



```

27. Z=Z';
28. fclose(y);
29. close;

30. %GUARDA CADA UNO DE LOS ARCHIVOS V.SAL LEIDOS
31. % Y LOS NOMBRA F#
32. nom=['F' num2str(N)];
33. save(nom,'Z','-ASCII')
34. end

35.
36. for p=1:iter
37. x=['F',num2str(p)];
38.
39. fia=fopen(x);
40. a=fscanf(fia,'%f %f',[2 inf]);
41. a=a'
42.
43. subplot(2,1,1);
44. lisp=semilogx(a(:,1),a(:,2));
45.
46. A=rand;
47. B=rand;
48. C=rand;
49. %%%
50. set(gca,'Color',[1 1 1]);
51. set(gca,'XGrid','on');
52. set(gca,'YGrid','on');
53. title('ESPECTROS OBTENIDOS POR SHAKE');
54. xlabel([' Periodo (s)'])
55. ylabel([' a(cm/s/s) '])
56.
57. %%%
58. % axis([0,1000,0,1000]);
59.
60. set(lisp,'LineWidth',[1.2],'Color',[A .3 C]);
61. fclose(fia);
62. hold on;
63.
64. end

65.
66.
67. %% # DE ARCHIVOS POR ABRIR
68. nombra=iter;
69. %% CHEQUEO DE # DE ESPECTROS POR ABRIR
70. if nombra>126
71. error('Fuera de rango');
72. break;
73. end
74.
75. ao=.86;
76. C=.86;
77. c=C;
78. t1=10;

```



```

79. t2= 83333;
80. t3=.25;
81. r=2/3
82. to=0;
83. %% CICLO DE SEÑALES DEL SHAKE
84.
85. subplot(2,1,2);
86. for p=1:nombra
87.
88. x=['F',num2str(p)];
89.
90. fia=open(x);
91. h=fscanf(fia,'%f %f',[2 inf]);
92. h=h';
93. lisp=semilogx(h(:,1),h(:,2));
94. set (lisp,'LineWidth',[1],'Color',[0 0 .2]);
95. fclose(fia);
96. hold on;
97. end
98.
99. %% CICLO DE ESPECTRO ZONA D
100. for y=t3:.001:t2
101. a3=C*(y/t2)^r;
102. semilogx(y,a3,'r');
103. hold on;
104. end
105.
106. for m=t2:.001:t1
107. a2=C;
108. semilogx(m,a2,'r');
109. hold on;
110. end

```

En el código observamos después de la mayoría de las instrucciones un punto y coma (;) utilizada para que nada aparezca en la pantalla mientras se este ejecutando el modulo en cuestión.

El lenguaje de programación como se puede notar no es complicado; pero requiere tiempo de lectura y observación. Para facilitar la comprensión se explicara tomando algunas de sus secciones, desde las más básicas hasta las de ejecución interna.

En la sección 1 se designan variables como: **prompt**, **titulin**, **lines** y **def** que definen los letreros que aparecen en la pantalla durante la ejecución del modulo. La variable **lines** se utiliza para designar el espacio o renglón a utilizar, que en el modulo es de una columna con veinte unidades de espacio.

El argumento **answer** llama a todas las variables en cuestión a trabajar. La instrucción **assignin** nos ayuda a almacenar la información dentro del renglón antes dicho.

Por ultimo tenemos **iter**, que es una variable que transforma datos capturados como alfanuméricos a datos numéricos, mediante la instrucción **str2num** (stream to number). La variable **imfile** es el valor a convertir.

El proceso siguiente es leer los datos que arroja el programa SHAKE, el cual consta de dos secciones.

La sección 1 inicia con un ciclo **for** que nos define el numero de veces que se ejecutara dicho ciclo, en el cual **iter** es la variable que define el numero de archivos a leer. Por conveniencia se realiza una igualdad de variables, **N** igual a **n**, para no confundir a los contadores de otras secciones o ciclos.

A la variable **X** se le asigna el nombre del archivo a abrir, en donde se concatenan el carácter "V", con el numero **N** transformado a alfanumérico y con los caracteres ".SAL", Definiéndose así el nombre del archivo **V1.SAL** (Linea de codificación 20)

A las variables **X** y **Y** se les asigna un nombre del archivo que combina caracteres en rojo con transformaciones de datos alfanuméricos a numéricos; buscaran el primer archivo **V1.SAL**, una vez abierto éste con la instrucción del renglón número 25, se saltara el titulo de Frec. (Seg.) y **Sa** (**G**)

En el renglón número 27 encontramos:  $Z = Z'$ , esta igualación se realiza para comprobación del programador, es decir para observar el valor que acarrea en la ejecución del código y guardaria con cierta variable para posteriormente asegurarse del cálculo.

En el renglón 24 se define la abertura del archivo **X** mediante la instrucción **fopen**, mientras que en el renglón 26 se define la lectura de 2 columnas con 126 valores del archivo **Y** mediante la instrucción **fscanf**. Una vez terminada la lectura de los 126 datos se cierra el archivo **Y** mediante la instrucción **fclose**. El renglón número 24 da de alta a la variable **Y**, siendo ahora destinada a abrir todos los archivos **V#. SAL**, anteriormente fue usada para crear archivos **F#**, que serán borrados al final del programa.

En la sección II se guardan en archivos independientes los datos leídos en la sección 1.

El nombre del nuevo archivo es **N1** y se define mediante la asignación a la variable **nom** la concatenación del carácter "F" con el número **N** transformado a alfanumérico con la instrucción **num2str**. Los 126 valores (**Z**) se guardan en el archivo **nom** en código **ASCII** mediante la instrucción **save**.

Es importante recordar que los ciclos **for** se detienen al finalizar las iteraciones mediante la instrucción **end**.

Para la graficación de los espectros de respuesta se define el ciclo mostrado en la tabla de decodificación. En el que se involucra nuevamente la variable **iter** que representa el número de archivos a graficar. En la instrucción descrita en el renglón 40 se nombra como **X** al archivo **F1** en la primera iteración, formado por la concatenación del carácter "F" y el número **N** en formato alfanumérico. Se da la instrucción para abrir el archivo **X** con la instrucción **fopen** y reasignándolo con el nombre de **fia**.

Del archivo recientemente abierto se leen los datos acomodados en dos columnas y se almacenan en el vector **A** mediante la instrucción **fscanf** (renglón 43).

La instrucción del renglón 46 nos indica que el lugar de esta grafica es el primero ya que serán dos (subplot (**2, 1,1**), (dos graficas, una columna, primer posición)) las que se calcularán. La graficación es bidimensional, pero para graficar en escala logarítmica a los valores de las abscisas se usa la instrucción **semilogx**, renglón 47.

En este renglón podemos ver las instrucciones **a(:,1)** y **a(:,2)**, se refieren a las coordenadas, recordando que tenemos una matriz de dos columnas por n renglones (mediante la instrucción **inf** del renglón 43 obligamos a ir hasta el final de la matriz, es decir leer todos sus datos). Por lo tanto **a(:,1)** son las coordenadas en el eje x y **a(:,2)** las coordenadas en el eje y.

Las instrucciones en los renglones 49,50 y 51 tiene algo en común, **rand** que es la función en MATLAB para random ( números aleatorios), por lo tanto tenemos tres diferentes valores aleatorios **A, B** y **C**, para usarlos cuando se mande a graficar, con cierto color y que al repetirse el ciclo se grafique la nueva señal de diferente color. Los renglones 53, 54, 55, 56,57 y 58, se refieren a formatos de la grafica como titulo, color, textos de los ejes y cuadrícula de la grafica.

Finalmente tenemos la graficación de dicho archivo en el renglón 63, con cierto grosor de línea y color con base en el valor **A** y **C**.

Se puede observar el renombramiento de la variable **iter** por **nombra**, se comienza un ciclo **if** en el renglón 74, para revisar si el numero de archivos es mayor a 126, si se cumple arroja un letrero de error, con el texto rojo del renglón 5.

Los ciclos **if** también se cierran con la instrucción **end**.

Del renglón 79 al 86 se proporcionan datos del espectro de diseño para la zona D del RCDF. En el renglón 89, se dice que se emplazara la segunda gráfica, debajo de la primera descrita anteriormente, el proceso de graficación es similar pero se fija el color para poder observar el espectro de un color y las señales de otro.

## **MÓDULO PORCENTAJE M.**

El objetivo del módulo PORCENTAJE consiste en proponer un espectro de diseño sobre cualquiera de los archivos de salida proporcionados por SHAKE. Anteriormente se trazaba a mano alzada el espectro de diseño (cuando se tenían capturados los datos de salida en una hoja de cálculo), en MATLAB se puede hacer esto también, como se explicara en la siguiente decodificación correspondiente a al programa

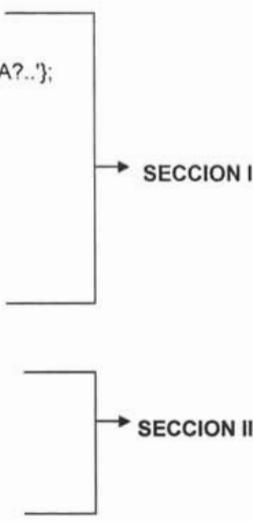
### **PORCENTAJE M.**

El programa consiste en tomar como datos a las columnas de frecuencia y aceleración de cualquiera de los archivos de salida, una vez escogido el archivo el programa realiza una serie de búsquedas estadísticas como encontrar valores máximos y mínimos de las columnas en cuestión, ordenar los valores ascendentemente, fijar ciertos valores, etc.

```

1. %% GENERADOR DE ESPECTRO
2. clear;
3.
4.
5. prompt = {'¿DE LOS 126 ARCHIVOS CON CUAL SE TRABAJARA?..'};
6. titulin = 'ESPECTROS';
7. lines = [[1],[20]];
8. def = {'(# de V.SAL)'};
9. answer = inputdlg(prompt,titulin,lines,def);
10. assignin('base','imfile',answer{1});
11.
12. iter=[ str2num(imfile)];
13. X=['V',num2str(iter),'.SAL'];
14.
15. close;
16.
17. y=fopen(X)
18. tline1 = fgetl(y)
19. a=fscanf(y,'%g %g',[2 126]);
20. a=a';
21. fclose(y);
22.
23. x = a(:,1);
24. y = a(:,2);
25.
26. % MAX Y MIN DE XS
27. maxi=max(x);
28. mini=min(y);
29.
30. dif=maxi-mini;
31. %MAX DE YS
32. YAX=max(y);
33.
34. %ORDENAMIENTO DE XS Y YS
35. ORDx=sort(x);
36. ORDy=sort(y);
37. MEDIA=mean(y);
38. M=ORDy(117);
39.
40. y1=y*.8;
41. y2=y*1.2;
42. legend('Info. original','Limites',2);
43. semilogx(x,y,'-b',x,y1,':r',x,y2,':r');
44. grid on;
45. hold on;
46.
47. ao=.006;
48. C=M;
49. c=C;
50. t1=maxi;

```


  
**SECCION I**
  
  
**SECCION II**

```

51. % t2=maxi/9;
52. t2=ORDx(50);
53. t3=mini;
54. r=2/3;
55. to=0;
56. %% CICLO DE ESPECTRO
57. for v=t3:.01:t2
58. a3=c*(v/t2)^r;
59. semilogx(v,a3,'-m');
60. hold on;
61. end
62.
63. for m=t2:.01:t1
64. a2=c;
65. semilogx(m,a2,'-m');
66. xlabel('frequency [Hz]');
67. ylabel('Sa [m/s^2]');
68. title(x);
69.
70. hold on;
71. end
72.
73. %polytool(x,y);
74.
75.
76. for n=t1:.030;
77. a1=a0+((abs(c-a0)/t1)*n);
78. semilogx(n,a1,'-m');
79. xlabel('T');
80. ylabel('ordenada espectral');
81. hold on;
82. end
83.
84. hold on;
85. end

```

En el siguiente código de programación observamos al principio de la instrucción **clear**, que nos sirve para barrer el espacio de trabajo y no confundir datos de corridas previas.

La primera sección de esta parte del código realiza la elaboración de la ventana donde se preguntará el archivo con el que se trabajará. Se indican títulos y letreros como podemos ver en los renglones 5,6 y 8, además de su formato, **lines = [[1], [20]]**, recordando que significa una columna y 20 caracteres correspondientemente. Algunas versiones de MATLAB requieren una coma entre columna y carácter.

Enseguida al igual que en el programa UNIÓN M, se realizara el llamado de dichos letreros a una ventana con cierto espacio para escribir. Después podemos ver la variable **iter**, que realiza el intercambio de valor alfanumérico a numérico, para que en la siguiente línea se inserte en un letrero quedando de la siguiente manera: V (# de archivo).SAL.

El objeto de dicho cambio se muestra en la sección II, consiste en que una vez armado lo anterior se vaya a la carpeta, donde tenemos tanto el programa como los archivos de salida y busque dicho archivo, lo abra capture los datos y los almacene en una matriz, que después se descompone como podemos observar en los renglones 23 y 24.

En esta parte del código se crean valores importantes. Las dos primeras variables que se crean son **maxi** y **mini**, que buscaran el valor máximo y mínimo de la columna **x**, es decir de la columna de frecuencias. La siguiente variable es **dif**, que como se puede ver es la resta de los valores pasados. De la misma manera la variable **YAX** buscara el valor de la columna **y** correspondiente a las aceleraciones.

Después los renglones 35 y 36 se reordenan las columnas en orden ascendente, a continuación la variable **MEDIA** obtiene la media de la columna y mediante la instrucción **mean**. La letra **M**, registra el valor en la posición 117 de los datos ordenados de la columna **y** (aceleraciones) En los renglones 40 y 41 se multiplica la columna sin ordenar de las aceleraciones, por el 80% y 120%, con el fin de brindar una zona de límites cuando se grafique. En el renglón 54 y 59, se brindan datos para la elaboración del espectro de diseño, tales como ordenadas espectrales exponentes de las formulas del RCDF y valores iniciales.

Después observamos dos ciclos **for**, que corresponden a dos partes del espectro. La instrucción **hold on** al final nos ayuda a mantener la imagen indefinidamente. Esta parte del código se observa a la instrucción **polytool(x,y)**, si se libera esta del signo %, se trabajara con dicho programa instalado en **MATLAB** por default, ayudándonos con polinomios a descifrar mejor a la señal.

El objetivo principal del manejo de estos programas es el estudiar el comportamiento de los acelerogramas y la comparación del espectro generado por los mismos contra el propuesto por la CFE.

### 6.3. -Cálculo del Riesgo Sísmico en Colima y Lázaro Cárdenas.

Con las bases de datos de las estaciones locales de monitoreo correspondientes a la comisión Federal de Electricidad, se tomaron los valores mayores de sus componentes, para elaborar los cálculos correspondientes al riesgo sísmico con las ecuaciones de Richter - Gutenberg (1944), la ley de Richter, y las expresiones de Esteva, y la ecuación de energía sísmica.

#### LÁZARO CÁRDENAS.

Con los datos de la tabla numero 3 (Anexo A), se obtienen las constantes **a** y **b**, mediante regresión lineal. Los resultados son:  $a = -0.145639$  y  $b = -0.014593$ . Es importante destacar que la muestra analizada es de 103 años.

$$\text{Log } N = -0.145639 - (-0.014593) * Mb$$

Sobre la base de la ecuación de recurrencia encontrada, se desea averiguar cuantos sismos de magnitud igual 8.5, se presentaran en Lázaro Cárdenas en los próximos 25 años.

$$\text{Log } N = -0.145639 - (-0.014593) * (8.5) = -0.021595513$$

$$N_{25} = 0.9514906$$

La cantidad obtenida es el número de sismos de magnitudes previamente definidas que se esperan en Colima los próximos 25 años, para 103 años, se tendrá:

$$N_{25} = (100/25) * 0.9514906 = 3.8059623$$

En resumen, en los próximos 25 años se espera en Lázaro Cárdenas que no haya sismos de Magnitud  $M_b = 8.5$ , Para 25 años se tendrá 1 sismo, mientras que para 100 años se esperan 4 sismos de la misma magnitud.

Por otro lado también calculamos la aceleración, velocidad, distancia, regresión lineal y energía generada por estos sismos, así como su tasa anual de ocurrencia misma que se muestra en las siguientes figuras.

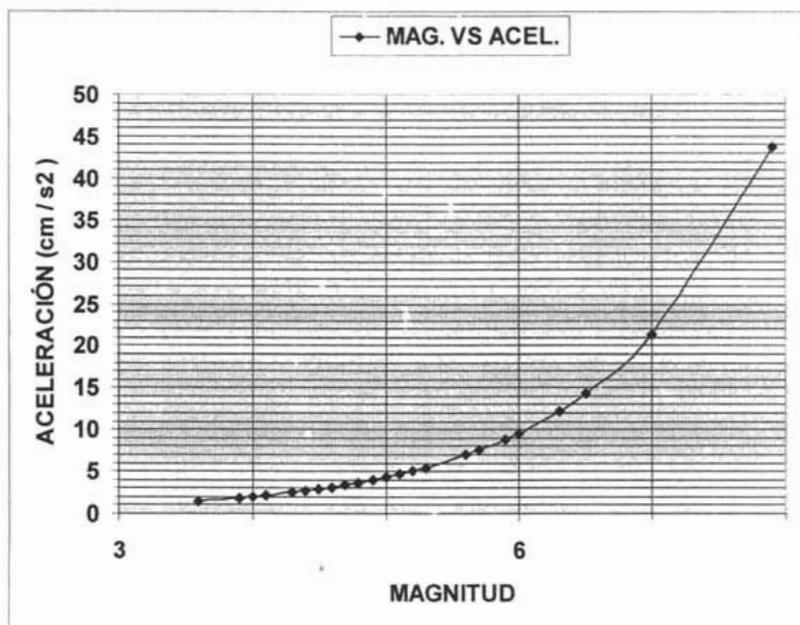


Figura 22. Curva de Magnitud contra Aceleración.

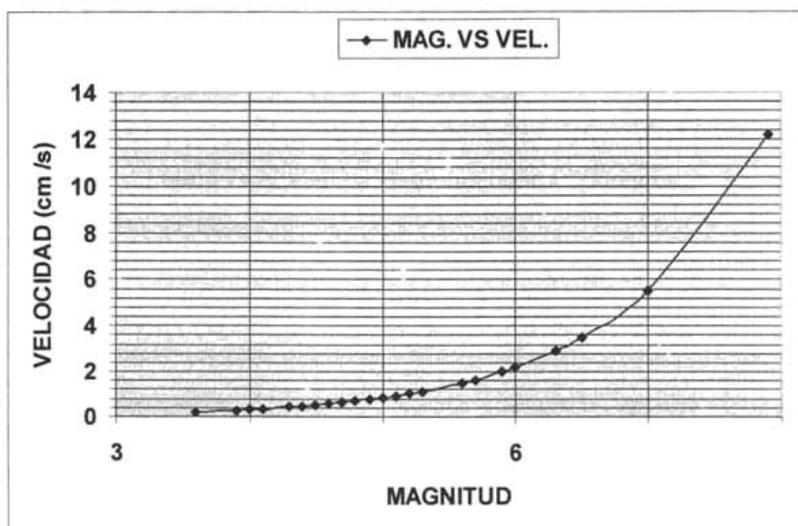


Figura 23. Curva de Magnitud contra Velocidad.

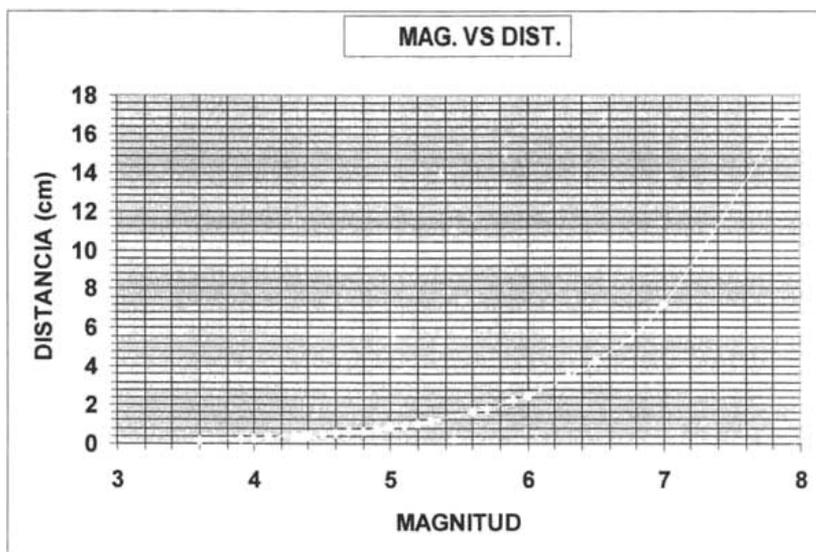


Figura 24. Curva de Magnitud contra Distancia.

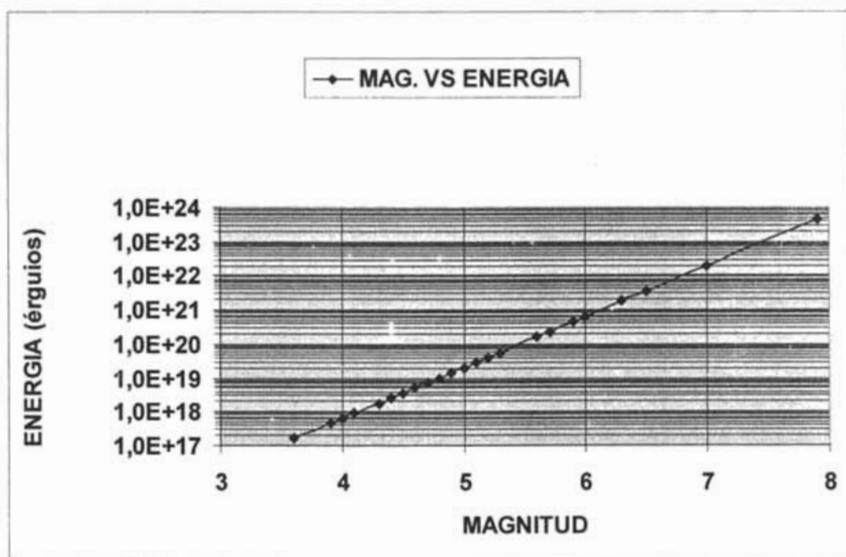


Figura 25. Curva de Comparación de Energía generada por la magnitud de sismos.

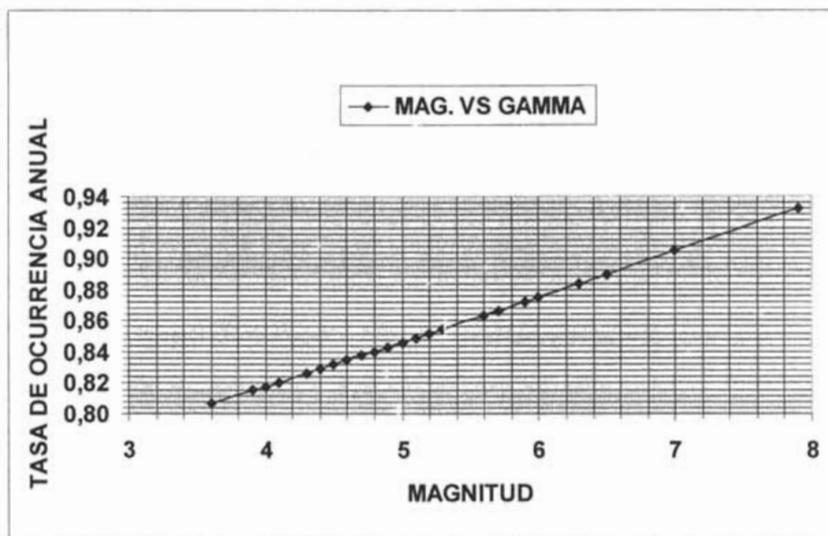


Figura 26. Curva de Tasa de ocurrencia anual generada por la magnitud de sismos.

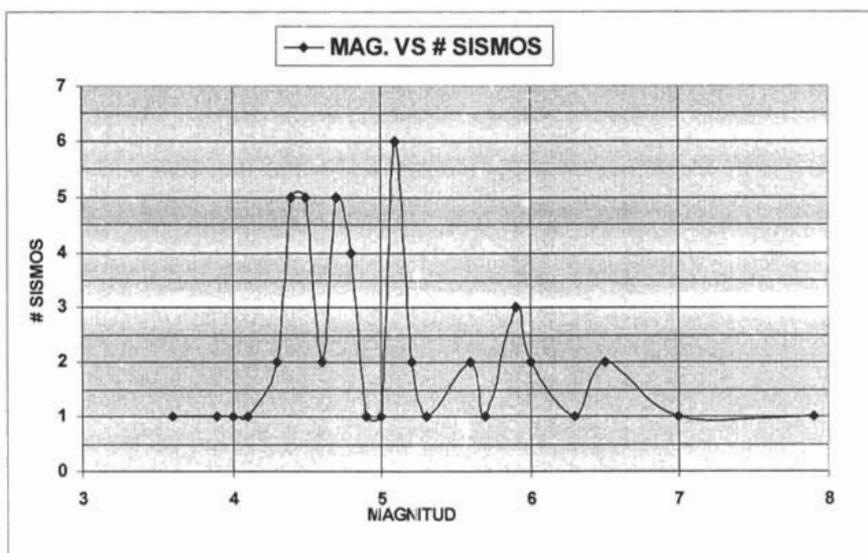


Figura 27. Curva de la Magnitud contra número de sismos.

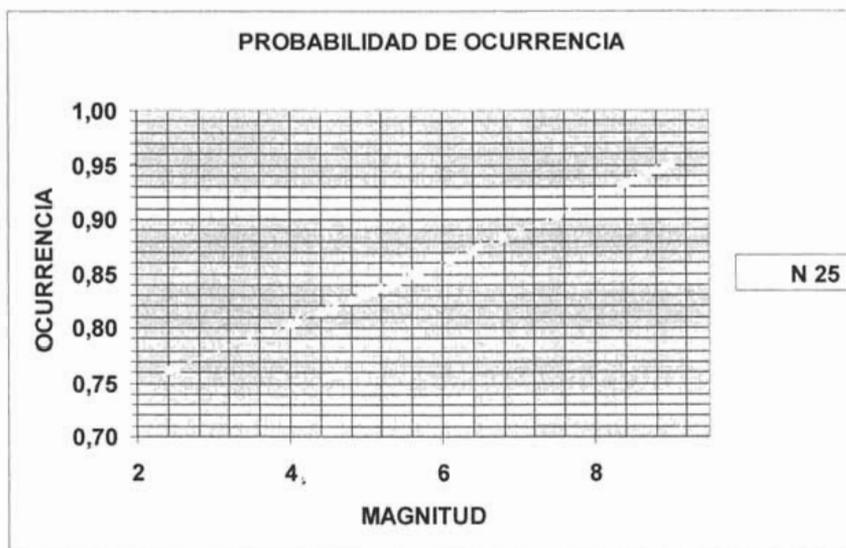


Figura 28. Curva de la Probabilidad de ocurrencia de sismos para 25 años.

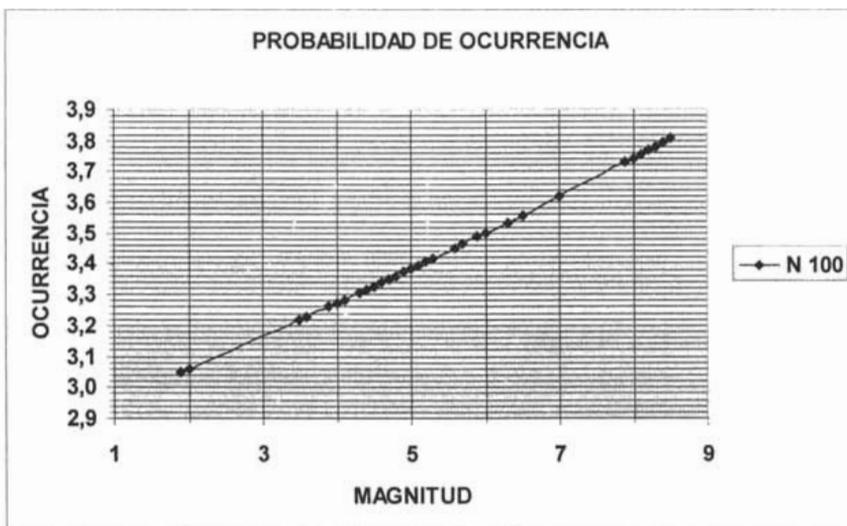


Figura 29. Curva de la Probabilidad de ocurrencia de sismos para 100 años.

#### COLIMA.

Análogamente se llevo a cabo con los datos de la tabla numero 4 (ANEXO A), se obtienen las constantes  $a$  y  $b$ , mediante regresión lineal. Los resultados son:  $a = -0.16662681$  y  $b = 0.01171821$ . Es importante destacar que la muestra analizada es de 103 años.

$$\text{Log } N = -0.16662681 - (0.01171821) * M b$$

En base a la ecuación de recurrencia encontrada, se desea averiguar cuantos sismos de magnitud igual 8.5, se presentaran en Colima en los próximos 25 años.

$$\text{Log } N = -0.16662681 - (0.01171821) * (8.5) = -0.266231595$$

$$N 25 = 0.541711936$$

La cantidad obtenida es el número de sismos de magnitudes previamente definidas que se esperan en Colima los próximos 25 años, para 100 años, se tendrá:

$$N 25 = (100/25) * 0.541711936 = 2.1668478$$

En resumen, en los próximos 25 años se espera en Colima sea muy pequeña la probabilidad de que un sismo de Magnitud  $M b = 8.5$  ocurra, mientras que para 100 años se esperan 2 sismos de la misma magnitud.

Por otro lado también calculamos la aceleración, velocidad, distancia, regresión lineal y energía generada por estos sismos, así como su tasa anual de ocurrencia misma que se muestra en las siguientes figuras.

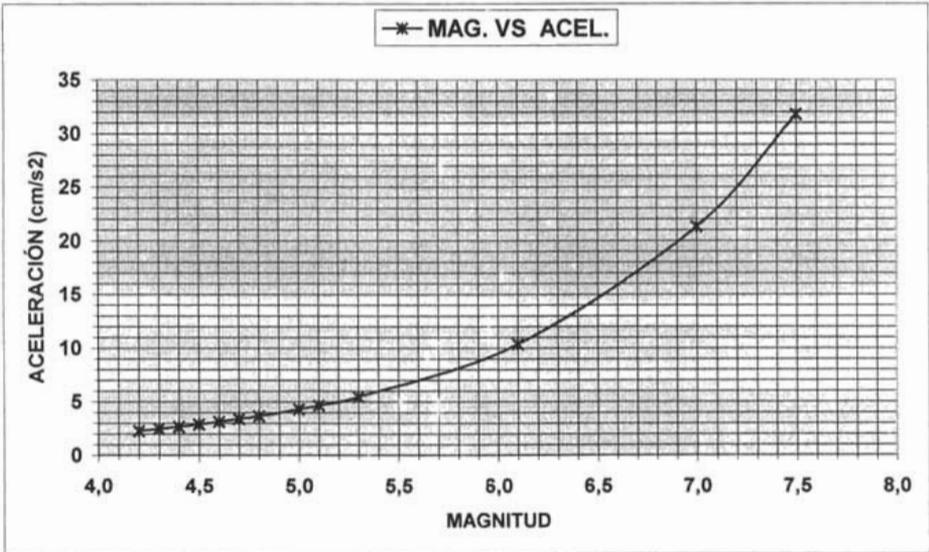


Figura 30. Curva de Magnitud contra Aceleración.

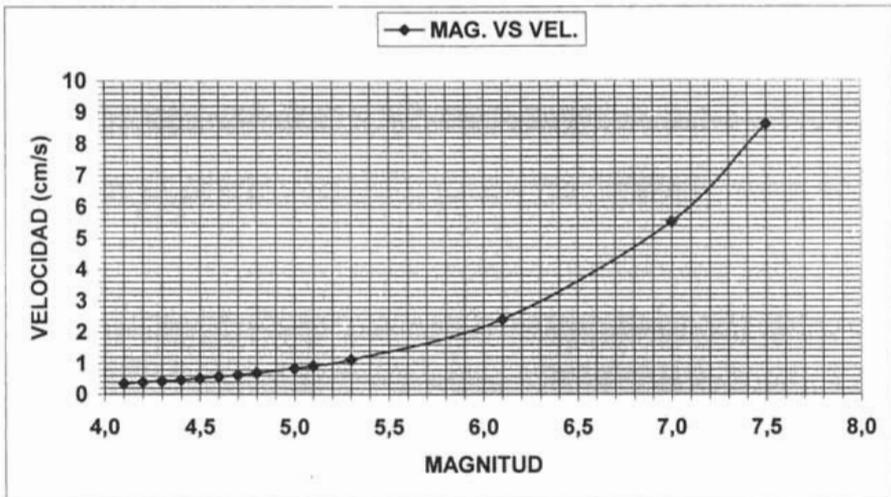


Figura 31. Curva de Magnitud contra Velocidad.

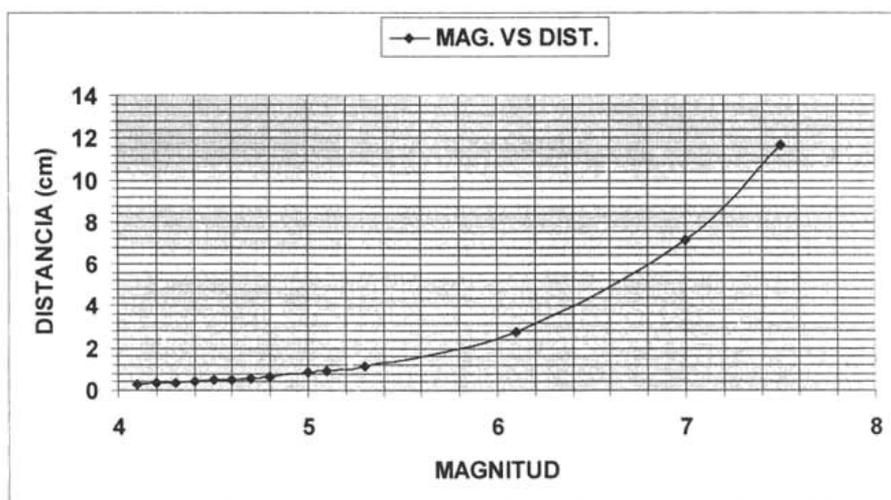


Figura 32. Curva de Magnitud contra Distancia.

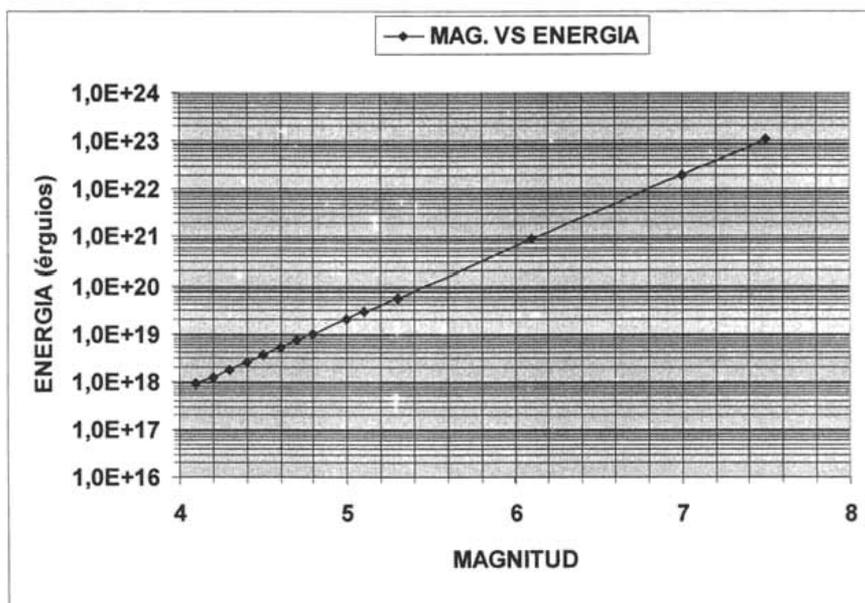


Figura 33. Curva de Comparación de Energía generada por la Magnitud de sismos.

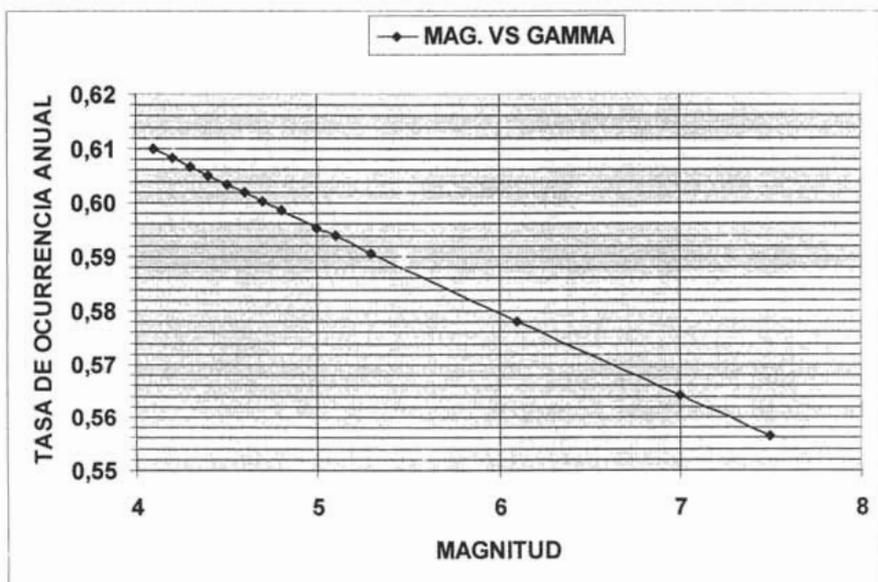


Figura 34. Curva de Tasa de ocurrencia anual generada por la Magnitud de sismos.

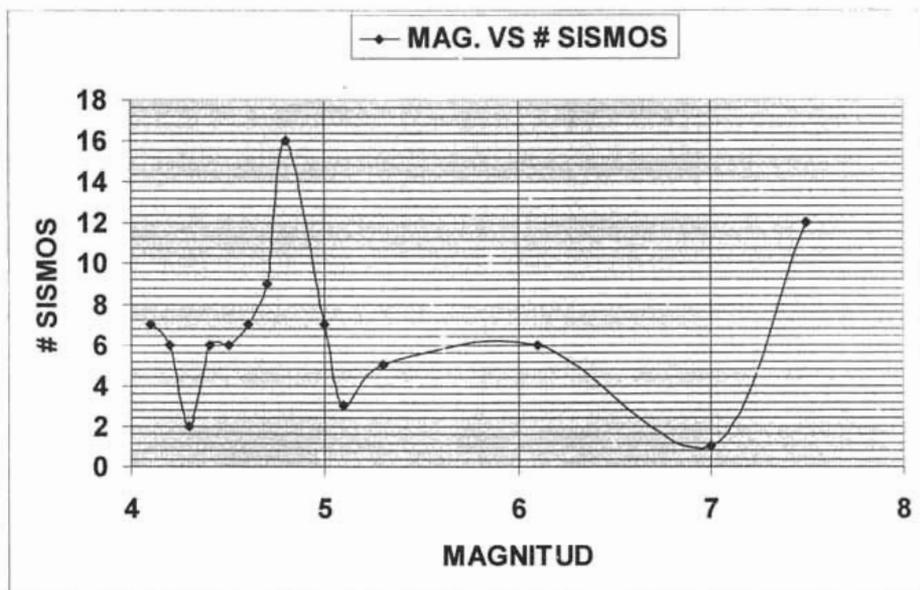


Figura 35. Curva de la Magnitud contra Número de sismos.

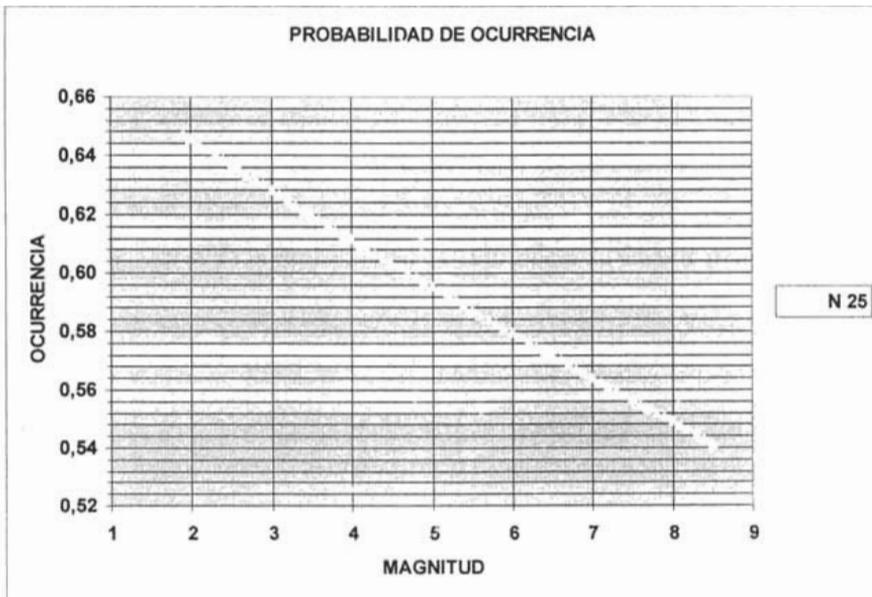


Figura 36. Curva de la Probabilidad de ocurrencia de sismos para 25 años.

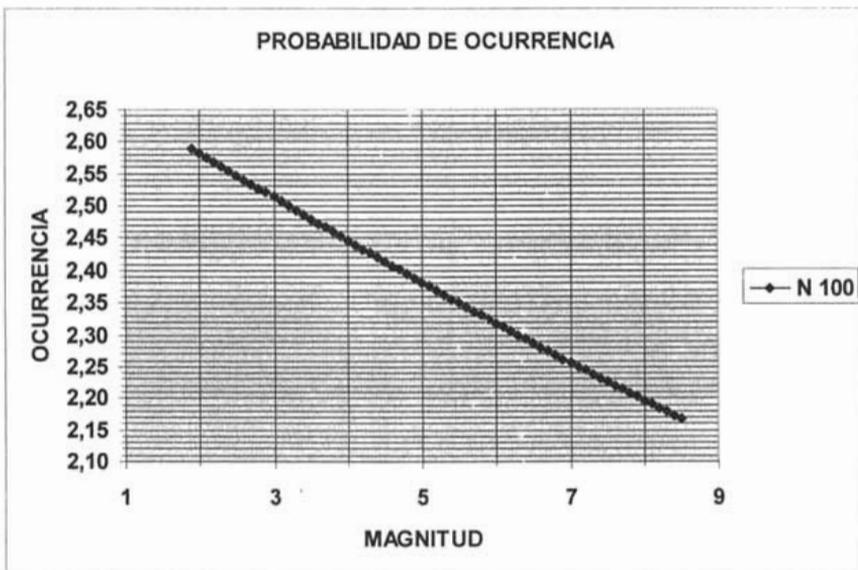


Figura 37. Curva de la Probabilidad de ocurrencia de sismos para 100 años.

### **6.3-CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PARA COLIMA Y LÁZARO CÁRDENAS.**

Una vez que contamos con los programas y la base de datos en el formato de salida componente a componente procedemos a evaluar los componentes vertical, longitudinal y transversal, estas bases de datos fueron tomadas del archivo de la CFE para sismos fuertes y complementadas por bases de datos en la red, así para Lázaro Cárdenas se procesó la información en tres componentes de salida ya que en la base original se encuentran en un solo registro las componentes y es necesario separarlas para analizar su comportamiento, sus archivos constaban de 70 registros que fueron separados, procesados y graficados.

Para Colima tenemos una base de datos de 144 registros, cabe destacar que para Colima los programas de MATLAB se modificaron con base en la extensión del segundo archivo proporcionado.

De este modo se ingresaron los valores para las componentes y sus respectivos promedios por medio del programa UNION M, hacemos notar que se le proporcionaron 35 datos de los registros para evitar saturar las imágenes, mientras que se utilizó el programa PORCENTAJE M se utilizó solo un archivo que nos generaría el promedio tomando como referencia la base de datos en turno.

Como resultado tenemos las gráficas en el siguiente punto, mencionaremos que el entorno de MATLAB tiene múltiples y muy variadas herramientas que pueden ayudarnos a analizar una sola parte de las gráficas generadas, así como el ajuste por medio de un polinomio esto con el fin de particularizar una zona de análisis, del mismo modo nos permite el nombrar las gráficas, así como también modificar los ejes y todas las características de nuestro gráfico, también la impresión de las gráficas, existen muchos comandos y aplicaciones que quedarán fuera del presente trabajo puesto que el objetivo principal es el analizar los espectros.

Para el trabajo en cuestión se importó las imágenes en otro formato en donde se guardaron con la extensión JGP, que son archivos de imágenes esto con el fin de hacer un manejo más sencillo al copiar e importar las imágenes dentro de MATLAB, así podemos ordenarlas y manejarlas de una manera más sencilla al guardarlas con dicha extensión y manipularlas en el mejor orden posible.

Por último mencionaremos que el manejo de estos programas es solo académico y debe manejarse bajo esta circunstancia, es decir que si se puede utilizar para desarrollar ejemplos en clase, podrá servirnos de apoyo al manejarse con fines de enseñanza aprendizaje, si se requiere utilizar en otras aplicaciones no solo hay que modificarlo sino complementarlo, enriquecerlo y del mismo modo utilizar otros programas que puedan incluirse en su desarrollo, de manera que su manejo es solo para fortalecer los conocimientos del alumno en esta área de estudio y al mismo tiempo promover una mayor profundización en este tema de análisis de los espectros de diseño.

#### 6.4. -ESPECTRO DE DISEÑO DE LOS COMPONENTES VERTICAL, TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL.

LAZARO CARDENAS.

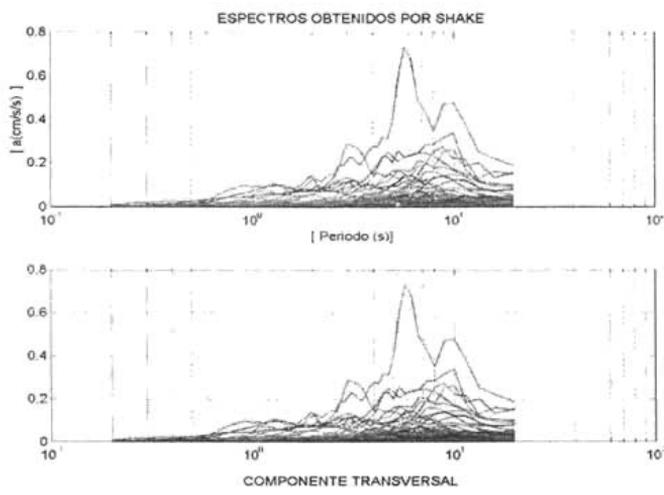


Figura 38. Componente Transversal.

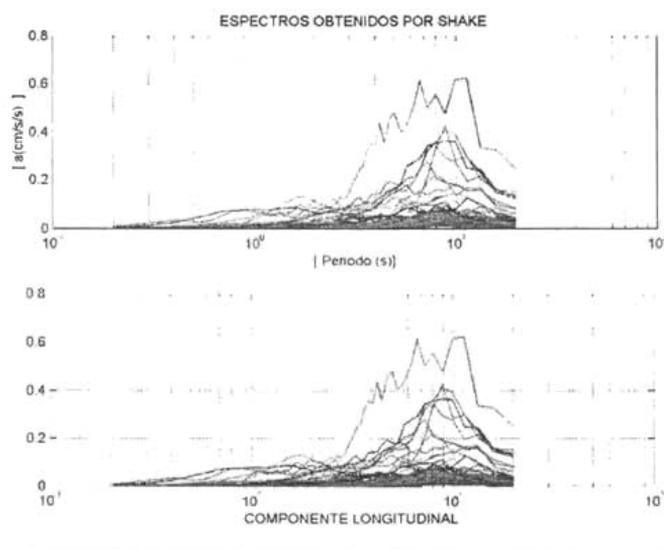
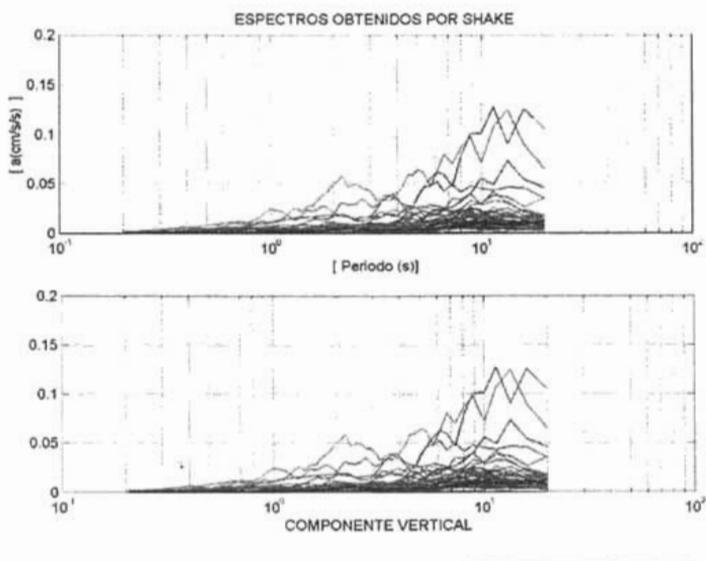
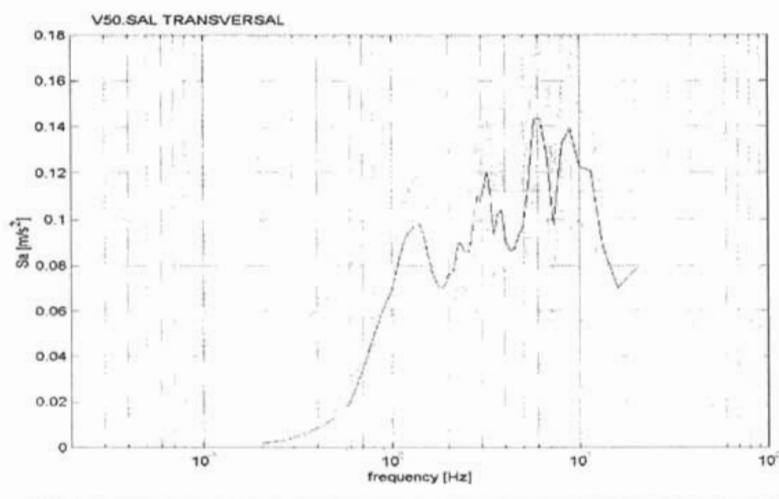


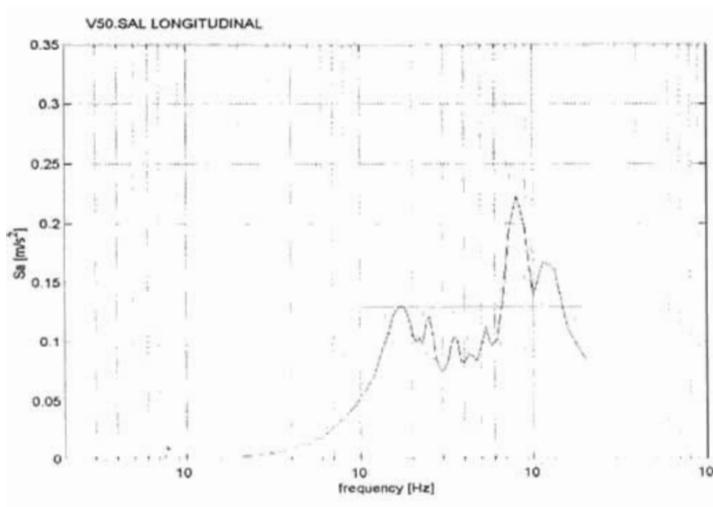
Figura 39. Componente Longitudinal.



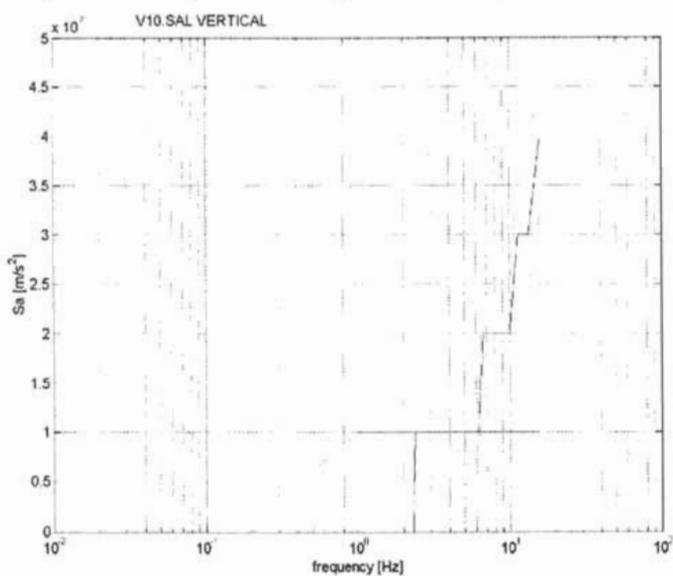
**Figura 40. Componente Vertical.**



**Figura 41. Componente Transversal del registro V50.SAL.**



**Figura 42. Componente Longitudinal del registro V50.SAL**



**Figura 43. Componente Vertical del registro V10.SAL**

COLIMA.

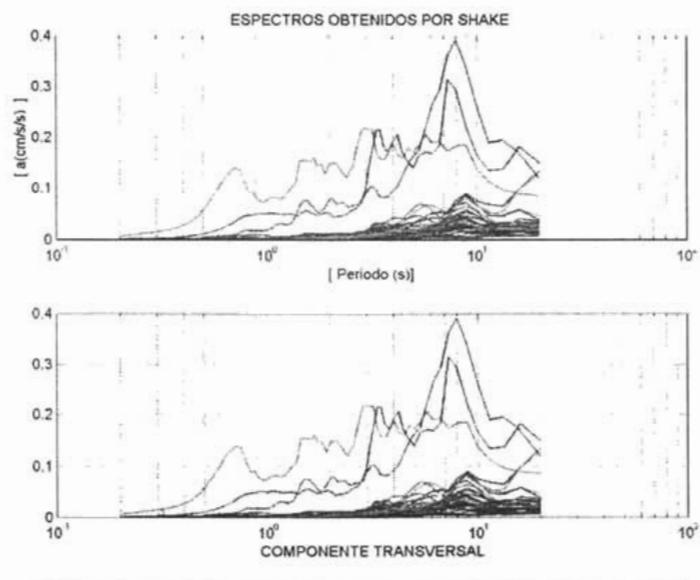


Figura 44. Componente Transversal.

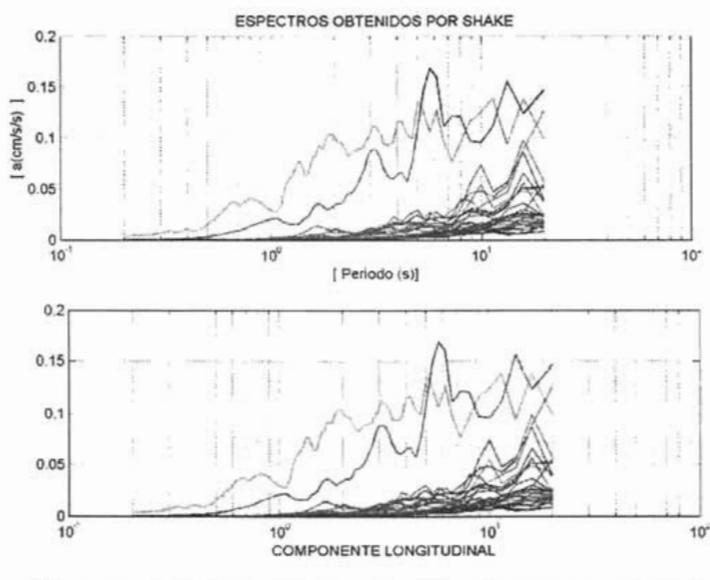
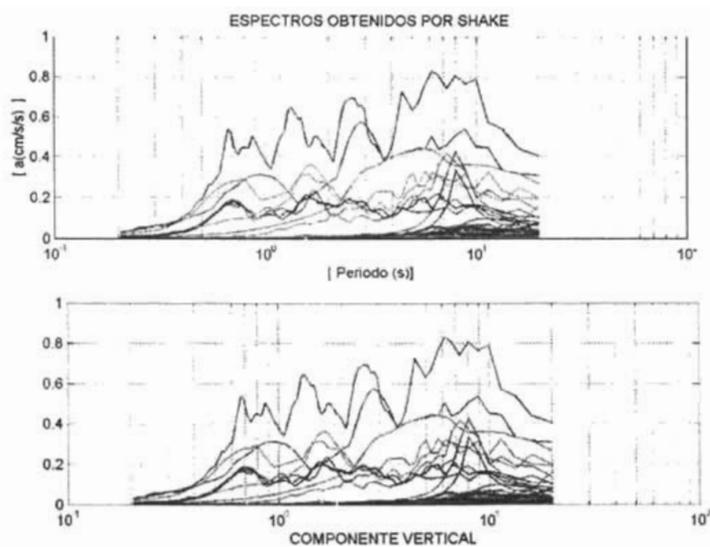
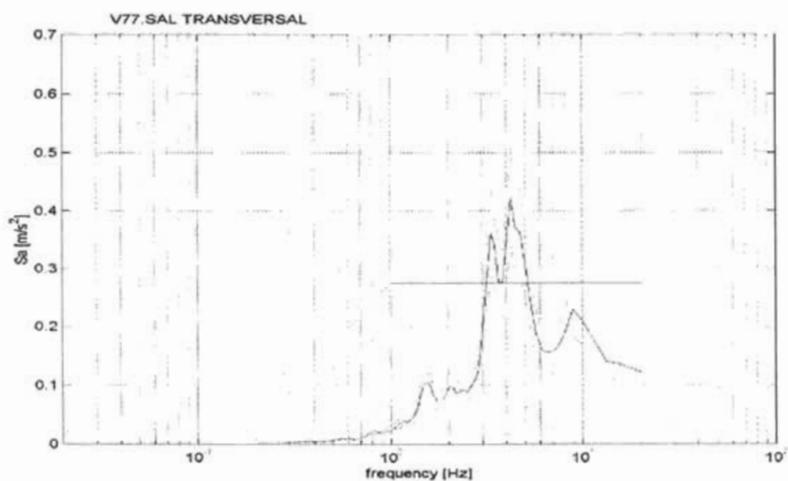


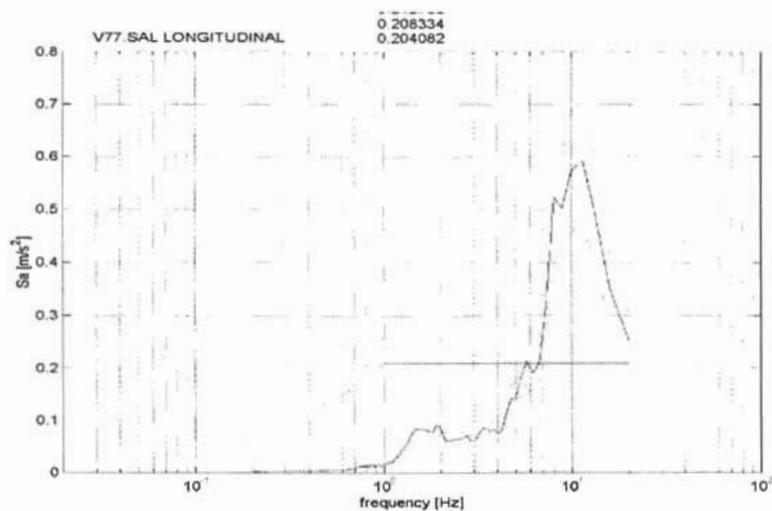
Figura 45. Componente Longitudinal.



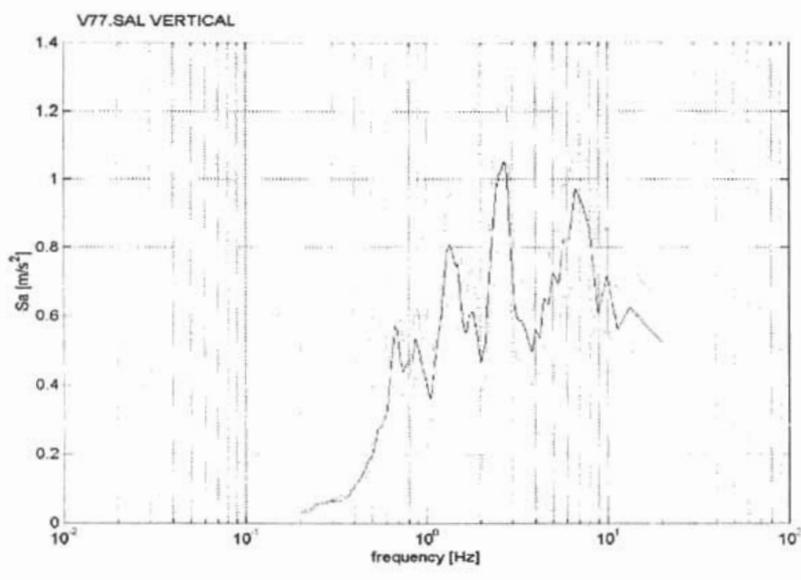
**Figura 46. Componente Vertical.**



**Figura 47. Componente Transversal del registro V77.SAL.**



**Figura 48. Componente Longitudinal del registro V77.SAL.**



**Figura 49. Componente Vertical del registro V77.SAL.**

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

### LÁZARO CÁRDENAS.

Para el riesgo sísmico estimado por medio de expresiones tenemos que en los próximos 25 años se espera en Lázaro Cárdenas se genere un sismo de Magnitud  $M_b = 8.5$ , mientras que para 100 años se esperan 4 sismos de la misma magnitud.

Puntualizando la información de la tabla 3 por ejemplo para un sismo de magnitud de 7, tendríamos una aceleración en roca de  $21.2870 \text{ cm / s}^2$ , mientras que se presenta una velocidad de  $5.520 \text{ cm / s}$ , un desplazamiento de  $7.1576 \text{ cm}$ , desprendiendo una energía de  $1.995 \text{ E}^{22}$  erguños, además de contar con una probabilidad de  $90.47 \%$  de que ocurra en un año. Para otro medio como es la arcilla podemos pensar que esta será mucho mayor dependiendo del material que atravesase, no obstante quizás sea del orden de tres a cinco veces mayor.

Haciendo una comparación con la magnitud de 8.5, tendríamos una aceleración de  $70.6785 \text{ cm / s}^2$ , una velocidad de  $19.9179 \text{ cm / s}$ , y un desplazamiento de  $28.0653 \text{ cm}$ , además de producir una liberación de energía de  $3.5413 \times 10^{24}$ , además de contar con una probabilidad de ocurrencia de  $95.14 \%$  con un peligro sísmico por demás latente.

Del mismo modo en la tabla 3 se muestran los valores que nos pueden ser útiles tanto como referencia o bien para aplicarse en otras cuestiones de la mecánica de suelos, para obtener valores más precisos requeriremos de pruebas, además de la caracterización del sitio así como la determinación de su perfil estratigráfico, de esta manera podemos calcular con menos incertidumbre los parámetros antes involucrados.

En cuanto al análisis de los gráficos desplegados en MATLAB, tenemos que para Lázaro Cárdenas en las tres componentes de los espectros de respuesta presentan ordenadas espectrales de diseño muy inferior a las propuestas por CFE. Para los valores propuestos por el programa UNION. M. Tenemos que las componentes vertical, longitudinal y transversal, así el programa PORCENTAJE .M se genero el promedio para valores particulares de los espectros de respuesta de las mismas componentes tenemos por lo tanto:

1. - La componente vertical presentó un valor de 0.70, en su promedio generado del archivo V50.SAL presenta un valor de 0.15.
2. - La componente longitudinal nos da un valor de 0.60, en su promedio generado del archivo del archivo V50.SAL presentó un valor de 0.13.
3. - Y su componente vertical presentó un valor de 0.13, para el promedio generado del archivo V10.SAL tenemos un valor de 0.10.

Lo anterior nos dice que estas componentes en sus respectivos valores son diferentes a los propuestos por la CFE, lo cual comprueba que estos valores están incluidos en la envolvente para un valor de  $C = 0.86$ , para la zona D y el tipo de suelo C, esto nos muestra que hay un amplio rango de comparación para una base de datos de 70 archivos.

En otras palabras cuando se genero la propuesta de Zona sísmica tomando en cuenta el promedio de los acelerogramas registrados para esta zona, además se trato de generar un espectro sintético para comparar con el que ya existe, tratando si fuese posible de reemplazar al ya establecido, nos damos cuenta de que no se alcanzo nuestro objetivo ya que los valores encontrados son inferiores.

Al particularizar los valores para Lázaro Cárdenas el promedio de esta constante seria de 0.65 aproximadamente, lo cual seria una desventaja puesto que el valor propuesto anteriormente es más amplio y por lo tanto presenta un menor factor de riesgo, en cuanto a los respectivos promedios de sus componentes, también tenemos un valor menor esto por puntualizar el análisis, en otras palabras requeriremos generar uno a uno los valores de espectro de diseño para poder hacer un promedio más confiable, y generar una envolvente nueva con la mayor cantidad de datos posibles, mientras que para un análisis global seguiremos utilizando los valores propuestos por la CFE.

Los depósitos litorales recientes, son depósitos de arena media a fina. Existen desde sueltos hasta compactos. Su compacidad aumenta en general con la profundidad. Por lo que estos de positos cuando están en estado suelto bajo nivel freático, tienen posibilidad de licuación con temblores, la idea principal era la de crear un espectro de diseño que cubriera cualquier eventualidad de este tipo, pero debido a que se requiere programas más específicos y a la base de datos esto no fue posible.

#### **COLIMA.**

Para un mismo periodo de tiempo (25 años) se espera en Colima no se presenten sismos de Magnitud  $M_b = 8.5$  o mejor dicho que la probabilidad que se presente uno sea mínima, mientras que para 100 años se esperan 2 sismos de la misma magnitud.

La información de la tabla 4 para un sismo de magnitud de 7.5, tendríamos una aceleración en roca de  $31.7579 \text{ cm / s}^2$ , para, mientras que se presenta una velocidad de  $8.6156 \text{ cm / s}$ , un desplazamiento de  $11.6866 \text{ cm}$ , desprendiendo una energía de  $11.20 \times 10^{22}$  ergulios, además de contar con una probabilidad de  $55.65 \%$  de que ocurra en un año.

Haciendo una comparación con la magnitud de 8.3, tendríamos una aceleración de  $60.2282 \text{ cm / s}^2$ , una velocidad de  $16.9563 \text{ cm / s}$ , y un desplazamiento de  $23.8691 \text{ cm}$ , además de producir una liberación de energía de  $1.778279 \times 10^{24}$ , además de tener una probabilidad de ocurrencia de  $54.46 \%$  un peligro menor.

Del mismo modo que para Lázaro Cárdenas la tabla desprende valores que nos pueden ser útiles tanto como referencia o bien para aplicarse en otras cuestiones de la mecánica de suelos. Estos datos nos puede servir para desarrollar algún tipo de investigación puesto que su manejo es sencillo, además que se cuentan con valores de sismos en toda la Republica Mexicana, y el mismo modo podemos proceder a aplicarse en cualquier sitio de la falla de subducción de la placa de cocos, que es donde se genera la mayor parte del desprendimiento de energía, y por lo tanto, es más viable el calcular el riesgo sísmico en este tipo de lugares cercanos a la costa o a la placa continental.

1. - La componente transversal presentó un valor de 0.40, en su promedio generado del archivo V77.SAL presenta un valor de 0.40.
2. - La componente longitudinal nos da un valor de 0.16, en su promedio generado del archivo del archivo V77.SAL presentó un valor de 0.20.
3. - Y su componente vertical presentó un valor de 0.80, para el promedio generado del archivo V40.SAL tenemos un valor de 1.0.

Esto nos dice que estas componentes en sus respectivos valores también presentan diferencias con respecto a los propuestos por la CFE, del mismo modo para la zona D y el tipo de suelo C, es una constante con el valor de 0.86, esto nos muestra que hay un amplio rango de comparación para una base de datos de 140 archivos, así del mismo modo la conclusión es la misma, en otras palabras cuando se genero lo propuesta de Zona sísmica se tomo en cuenta el promedio de los acelerogramas registrados para esta zona.

Aun cuando se amplió la base de datos basándonos en una mayor magnitud generada, requeriremos de métodos numéricos que nos depuren la información al mismo tiempo de contar necesariamente con pruebas de mecánica de suelos, para de este modo utilizar otras expresiones y ajustar o acercar aun rango de valores mucho mayor, puesto que cada sismo genera su propia y particular energía, llevando consigo todas sus posibles consecuencias como pueden ser la resonancia, o la licuación de los suelos aun cuando en este estado esta se lleve a cabo, por las características de la geología regional.

Sin embargo nos damos cuenta que al particularizar los valores para Colima se tendría una desventaja puesto que el valor propuesto es más amplio y por lo tanto presenta un factor de riesgo, en cuanto a los respectivos promedios de sus componentes también tenemos valores disparados por lo que es más difícil él puntualizarlos, para puntualizar el análisis requeriríamos que se analizaran uno a uno los archivos de salida, para lo que requeriremos mas datos recientes y en otras palabras requeriremos generar uno a uno los valores de espectro de diseño para poder hacer un promedio pesado, del mismo para un análisis global seguiremos utilizando los valores propuestos por la CFE.

De ambos casos podemos comentar que:

El coeficiente sísmico depende de la zona sísmica que se analice en cuestión, además de la aplicación particular del coeficiente utilizado, en los programas de MATLAB UNION Y PROMEDIO, utilizamos un coeficiente sísmico de 0.86 el cual nos sirvió de referencia para nuestro análisis por las características de la zona sísmica, así se analizaron los valores de las ordenadas espectrales arrojados por las bases de datos, mientras que para otro tipo de aplicaciones como lo es el diseño estructural se tiene un valor de 0.56.

De la misma manera se llevo a cabo un análisis de la distancia, profundidad y directividad de las ondas sísmicas, que fueron registradas y posteriormente moduladas en sus tres ordenadas espectrales con el fin de analizar los efectos de este tipo de ondas.

Por otro lado nuestro análisis se llevo a cabo en roca firme, lo que nos puede ayudar a calcular posteriormente las velocidades reales en un medio como arcilla o cualquier otro, es decir que los datos arrojados nos podrían servir de referencia para hacer ajustes posteriores, dependiendo el epicentro donde se generan y de su magnitud.

Finalmente observamos que en función de donde se generen los sismos, así como de su magnitud e intensidad, su duración y del medio por el cual viaje esta liberación de energía se disipara dependiendo la distancia recorrida, también del mismo modo se presentan valores distintos para sus tres componentes de movimiento, podemos pensar que dependiendo del máximo valor presentado en cualquiera de sus componentes nos generara cierto tipo de movimiento, por ejemplo el sismo del 85 presento una magnitud de 8.3 aprox. Este nos genero un movimiento oscilatorio, sería del mismo modo interesante el llevar a cabo un análisis de cómo podría predecirse el tipo de movimiento que se presentara, solo que esto queda por encima del alcance de este presente trabajo.

El riesgo sísmico es mayor en Lázaro Cárdenas que en Colima y puede calcularse para cualquier región de la Republica Mexicana siguiendo un procedimiento análogo al presentado.

Finalmente se observo que el elaborar una propuesta de un espectro de diseño se requiere de un manejo grande de datos, así como de múltiples ensayos pero sobre todo del estudio profundo detenido de los sismos, así solo se presentaron las componentes como un breve análisis ya que no se logro proponer un valor nuevo, mas bien comprobamos que estos datos se encuentran incluidos en la envolvente de la CFE.

## ANEXO A.

### ESCALA DE INTENSIDADES DE MERCALLI MODIFICADA

Valor de intensidad	Descripción
I	No sentido.
II	Sentido por personas en posición de descanso, en pisos altos o situación favorable.
III	Sentido en el interior. Los objetos suspendidos oscilan. Se perciben vibraciones como si pasara un camión ligero. La duración es apreciable. Puede no ser reconocido como un terremoto.
IV	Los objetos suspendidos oscilan. Hay vibraciones como al paso de un camión pesado o sensación de sacudida como de un balón pesado golpeando las paredes. Los automóviles parados se balancean. Las ventanas, platos y puertas vibran. Los cristales tintinean. Los cacharros de barro se mueven. En este rango (IV), los tabiques y armazones de madera crujen.
V	Sentido al aire libre; se aprecia la dirección. Los que están durmiendo despiertan. Los líquidos se agitan, algunos se derraman. Los objetos pequeños son inestables, desplazado o volcados. Las puertas se balancean, abriéndose y cerrándose. Ventanas y cuadros se mueven. Los péndulos de los relojes se paran, comienzan a andar, cambian de período.
VI	Sentido por todos. Muchos se asustan y salen al exterior. La gente anda inestablemente. Ventanas, platos y objetos de vidrio se rompen. Adornos, libros, etcétera, caen de las estanterías. Los cuadros también caen. Los muebles se mueven o vuelcan. Los revestimientos débiles de las construcciones de tipo D se agrietan. Las campanas pequeñas suenan (iglesias, colegios). Árboles y arbustos son sacudidos visiblemente.
VII	Es difícil mantenerse en pie. Lo perciben los conductores. Edificios tipo D, incluyendo grietas. Las chimeneas débiles se rompen a ras del tejado. Caída de cielos rasos, ladrillos, piedras, tejas, cornisas también antepechos no asegurados y ornamentos de arquitectura. Algunas grietas en edificios tipo C. Olas en estanque, agua enturbiaada con barro. Pequeños corrimientos y hundimientos en arena o montones de grava. Las campanas graves suenan. Canales de cemento para regadío, dañados.
VIII	Conducción de los coches, afectada. Daños en edificios de tipo C; colapso parcial. Algún daño a construcciones de tipo B; nada en edificios de tipo A. Caída de estuco y algunas paredes de mampostería. Giro o caída de chimeneas de fábricas, monumentos, torres, depósitos elevados. La estructura de las casas se mueve sobre los cimientos, si no están bien sujetos. Trozos de pared sueltos, arrancados. Ramas de árboles rotas. Cambios en el caudal o la temperatura de fuentes y pozos. Grietas en suelo húmedo y pendientes fuertes.
IX	IX Pánico general. Construcciones del tipo D destruidas; edificios tipo B con daños importantes. Daño general de cimientos. Armazones arruinadas. Daños serios en embalses. Tuberías subterráneas rotas. Amplias grietas en el suelo. En áreas de aluvión, eyección de arena y barro; aparecen fuentes y cráteres de arena.
X	X La mayoría de las construcciones y estructuras de armazón, destruidas con sus cimientos. Algunos edificios bien contruidos en madera y puentes, destruidos. Daños serios en presas, diques y terraplenes. Grandes corrimientos de tierra. El agua rebasa las orillas de canales, ríos lagos, etc. Arena y barro desplazados horizontalmente en playas y tierras llanas. Carriles torcidos.
XI	XI Carriles muy retorcidos. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio.
XII	XII Daños prácticamente total. Grandes masas de rocas desplazadas. Visuales y líneas de nivel, deformados. Objetos proyectados al aire.

Nota: Tipos de construcción

Construcciones A.	Estructura de acero y hormigón armado, bien diseñados, calculadas para resistir fuerzas laterales. Buena construcción, materiales de primera calidad.
Construcciones B.	Estructura de hormigón armado, no diseñada en detalle para resistir fuerzas laterales, Buena construcción y material.
Construcciones C.	Estructura no tan débiles como para fallar la unión de las esquinas, pero no reforzadas ni diseñadas para resistir fuerzas laterales. Construcciones y materiales corrientes.
Construcciones D.	Construcciones de materiales pobres, tales como adobe; baja calidad de construcción. No resistente a fuerzas horizontales.

**TABLA 1.**

De estas descripciones se puede constatar que las escalas de intensidad representan únicamente una medida del poder destructivo de un temblor o de los efectos que éste tuvo sobre seres humanos y edificaciones en un lugar determinado. Para un sismo es claro que la intensidad puede variar notablemente de un sitio a otro, dependiendo de la distancia al epicentro y de las condiciones geológicas locales. En el caso del sismo del 19 de septiembre, las intensidades variaron dentro del mismo Valle de México desde el grado V en la periferia, alcanzando intensidades de hasta grado IX en el centro de la ciudad, debido a los suelos blandos del antiguo lago.

Es evidente, por tanto, que la intensidad es una medida relativa que nos da una idea e la severidad con que manifestaron los sismos en diversos sitios, pero no cuantifica la energía liberada de la fuente; con éste último fin se desarrolló la escala de magnitud, en la Tabla 2 mostramos una compilación de los sismos históricos que han sido más fuertemente sentidos aquí desde la época precolombina. Para cada uno de ellos ofrecemos un comentario que describe alguna peculiaridad importante del sismo, así como los daños más graves que fueron reportados. En muchos casos, siguiendo la costumbre observada hasta el siglo XIX, nos referimos a los terremotos con el nombre del santoral correspondiente a la fecha en que ocurrían.

**Estaciones de Banda Ancha**

CLAVE	ESTACION	LATITUD (°N)	LONGITUD (° W)	ALTITUD (msnm)	TIPO DE SUELO
CAIG	CAYACO	17.0478	-100.2673	80	Diorita
CJIG	CHAMELA	19.499	-105.043	129	Andesita
COIG	COLIMA	19.181	-103.692	860	Caliza recristalizada
CUIG	POZO CU	19.329	-99.178	2257	Colada de lava
HUIG	HUATULCO	15.7684	96.1082	150	Cuarzomonzita
LPIG	LA PAZ	24.102	-110.308	46	Toba Dacítica
LVIG	LAGUNA VERDE	19.7232	-96.4177	41	Caliza
MAIG	MAZATLAN	23.1883	-106.4244	10	Toba riolítica
MOIG	MORELIA	19.6779	-101.1889	1275	
OXIG	OAXACA	17.0723	-96.7332	1600	
PLIG	IGUALA	18.3923	-99.5023	875	Caliza
PNIG	PINOTEPA	16.3923	-98.1271	350	Diorita
PPIG	POPOCATEPETL	19.067	-98.627	3980	Colada de lava
TEIG	TEPICH	20.2263	-88.2764	69	Caliza
TUIG	TUZANDEPETL	18.0339	-94.4227	100	Domo salino
YAIG	YAUTEPEC	18.8620	-99.0667	1340	Caliza
ZAIG	ZACATECAS	22.769	-102.567	2537	Cuarzo diorita
ZIIG	ZIHUATANEJO	17.6067	-101.465	50	Cuarzomonzonita

**Tabla 2. Estaciones de banda ancha**

MAGNITUD # SISMOS

	Y	X	LOG Y	LOG X	(LOG X)2	(LOG Y)2	LOGXLOGY
1	7.9	1	0.897627	0.00000	0.0000	0.80573	0.00000
2	7.0	1	0.845098	0.00000	0.0000	0.71419	0.00000
3	6.5	2	0.812913	0.30103	0.0906	0.66083	0.24471
4	6.3	1	0.799341	0.00000	0.0000	0.63895	0.00000
5	6.0	2	0.778151	0.30103	0.0906	0.60552	0.23425
6	5.9	3	0.770852	0.47712	0.2276	0.59421	0.36779
7	5.7	1	0.755875	0.00000	0.0000	0.57135	0.00000
8	5.6	2	0.748188	0.30103	0.0906	0.55979	0.22523
9	5.3	1	0.724276	0.00000	0.0000	0.52458	0.00000
10	5.2	2	0.716003	0.30103	0.0906	0.51266	0.21554
11	5.1	6	0.707570	0.77815	0.6055	0.50066	0.55060
12	5	1	0.698970	0.00000	0.0000	0.48856	0.00000
13	4.9	1	0.690196	0.00000	0.0000	0.47637	0.00000
14	4.8	4	0.681241	0.60206	0.3625	0.46409	0.41015
15	4.7	5	0.672098	0.69897	0.4886	0.45172	0.46978
16	4.6	2	0.662758	0.30103	0.0906	0.43925	0.19951
17	4.5	5	0.653213	0.69897	0.4886	0.42669	0.45658
18	4.4	5	0.643453	0.69897	0.4886	0.41403	0.44975
19	4.3	2	0.633468	0.30103	0.0906	0.40128	0.19069
20	4.1	1	0.612784	0.00000	0.0000	0.37550	0.00000
21	4.0	1	0.602060	0.00000	0.0000	0.36248	0.00000
22	3.9	1	0.591065	0.00000	0.0000	0.34936	0.00000
23	3.6	1	0.556303	0.00000	0.0000	0.30947	0.00000
		51	16.253502184	5.76042	3.11441	11.65	4.01457

b = -0.014593

Betta = -0.03360253

a = -0.145639

Alfa = 0.715089869

Acel. (cm/s <sup>2</sup> )	Vel. (cm/s)	Dist (cm)	Reg lin	ENER. SISMICA	Ergulos ( 10 <sup>22</sup> )	γ
43.7347060	12.1609583	16.9074998	-0.0303516	4.46684E+23	4.466835922	0.9324992
21.2879668	5.5203620	7.1576579	-0.0434856	1.99526E+22	1.995262315	0.9047204
14.2697509	3.4920065	4.2727127	-0.0507823	3.54813E+21	0.354813389	0.8896470
12.1598796	2.8989180	3.4555135	-0.0537010	1.77828E+21	0.177827941	0.8836881
9.5653001	2.1868464	2.4998156	-0.0580790	6.30957E+20	0.063095734	0.8748246
8.8298849	1.9894538	2.2412108	-0.0595383	4.46684E+20	0.044668359	0.8718899
7.5243315	1.6450878	1.7983749	-0.0624570	2.23872E+20	0.022387211	0.8660500
6.9458334	1.4953455	1.6096400	-0.0639164	1.58489E+20	0.015848932	0.8631448
5.4637861	1.1214232	1.1508412	-0.0682944	5.62341E+19	0.005623413	0.8544873
5.0437103	1.0184050	1.0281604	-0.0697537	3.98107E+19	0.003981072	0.8516208
4.6559314	0.9246642	0.9181877	-0.0712131	2.81838E+19	0.002818383	0.8487640
4.2979664	0.8393919	0.8196653	-0.0726724	1.99526E+19	0.001995262	0.8459167
3.9675230	0.7618460	0.7314505	-0.0741317	1.41254E+19	0.001412538	0.8430790
3.6624853	0.6913461	0.6525070	-0.0755911	1E+19	0.001000000	0.8402508
3.3809001	0.6272689	0.5818958	-0.0770504	7.07946E+18	0.000707946	0.8374321
3.1209641	0.5690438	0.5187673	-0.0785098	5.01187E+18	0.000501187	0.8346228
2.8810130	0.5161488	0.4623541	-0.0799691	3.54813E+18	0.000354813	0.8318230
2.6595102	0.4681068	0.4119630	-0.0814284	2.51189E+18	0.000251189	0.8290325

2.4550373	0.4244816	0.3669693	-0.0828878	1.77828E+18	0.000177828	0.8262514
2.0920448	0.3489240	0.2909784	-0.0858065	8.91251E+17	8.91251E-05	0.8207172
1.9312008	0.3162967	0.2590191	-0.0872658	6.30957E+17	6.30957E-05	0.8179640
1.7827230	0.2866907	0.2305226	-0.0887251	4.46684E+17	4.46684E-05	0.8152201
1.4023396	0.2133668	0.1623195	-0.0931032	1.58489E+17	1.58489E-05	0.8070433

MAGNITUD	Log N 25	Ocurrencia a N 25	Ocurrencia a N 100
8.5	-0.021595513	0.9514906	3.8059623
8.4	-0.023054853	0.9482987	3.7931947
8.3	-0.024514192	0.9451175	3.7804700
8.2	-0.025973532	0.9419470	3.7677880
8.1	-0.027432871	0.9387871	3.7551485
8.0	-0.028892211	0.9356379	3.7425515
7.9	-0.03035155	0.9324992	3.7299966
7.0	-0.043485606	0.9047204	3.6188817
6.5	-0.050782304	0.8896470	3.5585878
6.3	-0.053700983	0.8836881	3.5347525
6.0	-0.058079002	0.8748246	3.4992985
5.9	-0.059538341	0.8718899	3.4875597
5.7	-0.062457021	0.8660500	3.4642001
5.6	-0.06391636	0.8631448	3.4525791
5.3	-0.068294379	0.8544873	3.4179493
5.2	-0.069753718	0.8516208	3.4064834
5.1	-0.071213058	0.8487640	3.3950559
5	-0.072672397	0.8459167	3.3836668
4.9	-0.074131737	0.8430790	3.3723159
4.8	-0.075591076	0.8402508	3.3610031
4.7	-0.077050416	0.8374321	3.3497282
4.6	-0.078509756	0.8346228	3.3384912
4.5	-0.079969095	0.8318230	3.3272918
4.4	-0.081428435	0.8290325	3.3161301
4.3	-0.082887774	0.8262514	3.3050057
4.1	-0.085806453	0.8207172	3.2828689
4.0	-0.087265793	0.8179640	3.2718561
3.9	-0.088725132	0.8152201	3.2608803
3.6	-0.093103151	0.8070433	3.2281733
3.5	-0.094562491	0.8043360	3.2173440
2.0	-0.116452584	0.7647992	3.0591967
1.9	-0.117911923	0.7622336	3.0489343

**Tabla 3. Cálculos de Lázaro Cárdenas**

MAGNITUD	# SISMOS	Y	X	LOG Y	LOG X	(LOG X)2	(LOG Y)2	LOGXLOGY
1	12	7.50	12	0.875061	1.07918	1.1646	0.76573	0.94435
2	1	7.00	1	0.845098	0.00000	0.0000	0.71419	0.00000
3	6	6.10	6	0.785330	0.77815	0.6055	0.61674	0.61111
4	5	5.30	5	0.724276	0.69897	0.4886	0.52458	0.50625
5	3	5.10	3	0.707570	0.47712	0.2276	0.50066	0.33760

6	5.00	7	0.698970	0.84510	0.7142	0.48856	0.59070
7	4.80	16	0.681241	1.20412	1.4499	0.46409	0.82030
8	4.70	9	0.672098	0.95424	0.9106	0.45172	0.64134
9	4.60	7	0.662758	0.84510	0.7142	0.43925	0.56010
10	4.50	6	0.653213	0.77815	0.6055	0.42669	0.50830
11	4.40	6	0.643453	0.77815	0.6055	0.41403	0.50070
12	4.30	2	0.633468	0.30103	0.0906	0.40128	0.19069
13	4.20	6	0.623249	0.77815	0.6055	0.38844	0.48498
14	4.10	7	0.612784	0.84510	0.7142	0.37550	0.51786
		93	9.818568908	10.36256	5.69604	6.97	7.21427
b =			0.01171821	Beta =		0.026982174	
a =			-0.16662681	Alfa =		0.681354600	

Acel. (cm/s <sup>2</sup> )	Vel. (cm/s)	Dist (cm)	Reg lin	ENER. SISMICA	Erguios ( 10 <sup>22</sup> )	γ
31.7579146	8.6156043	11.6866361	-0.2545134	1.12202E+23	11.22018454	0.5565275
21.2879668	5.5203620	7.1576579	-0.2486543	1.99526E+22	1.995262315	0.5640865
10.3619659	2.4030804	2.7865347	-0.2381079	8.91251E+20	0.089125094	0.5779525
5.4637861	1.1214232	1.1508412	-0.2287333	5.62341E+19	0.005623413	0.5905636
4.6559314	0.9246642	0.9181877	-0.2263897	2.81838E+19	0.002818383	0.5937592
4.2979664	0.8393919	0.8196653	-0.2252179	1.99526E+19	0.001995262	0.5953634
3.6624853	0.6913461	0.6525070	-0.2228742	1.00000E+19	0.001000000	0.5985849
3.3809001	0.6272689	0.5818958	-0.2217024	7.07946E+18	0.000707946	0.6002022
3.1209641	0.5690438	0.5187673	-0.2205306	5.01187E+18	0.000501187	0.6018239
2.8810130	0.5161488	0.4623541	-0.2193587	3.54813E+18	0.000354813	0.6034499
2.6595102	0.4681068	0.4119630	-0.2181869	2.51189E+18	0.000251189	0.6050804
2.4550373	0.4244816	0.3669693	-0.2170151	1.77828E+18	0.000177828	0.6067152
2.2662851	0.3848752	0.3268100	-0.2158433	1.25893E+18	0.000125893	0.6083545
2.0920448	0.3489240	0.2909784	-0.2146715	8.91251E+17	8.91251E-05	0.6099982

MAGNITUD	Log N 25	Ocurrencia a N 25	Ocurrencia a N 100
8.5	-0.266231586	0.5417119	2.1668478
8.4	-0.265059766	0.5431756	2.1727023
8.3	-0.263887945	0.5446432	2.1785726
8.2	-0.262716124	0.5461147	2.1844588
8.1	-0.261544303	0.5475902	2.1903610
8	-0.260372482	0.5490698	2.1962790
7.9	-0.259200661	0.5505533	2.2022130
7.8	-0.25802884	0.5520408	2.2081631
7.7	-0.256857019	0.5535323	2.2141293
7.6	-0.255685198	0.5550279	2.2201115
7.5	-0.254513377	0.5565275	2.2261100
7.4	-0.253341556	0.5580312	2.2321246
7.3	-0.252169735	0.5595389	2.2381555
7.2	-0.250997914	0.5610507	2.2442027
7.1	-0.249826093	0.5625666	2.2502662
7	-0.248654273	0.5640865	2.2563461
6.9	-0.247482452	0.5656106	2.2624424
6.8	-0.246310631	0.5671388	2.2685552
6.7	-0.24513881	0.5686711	2.2746846

6.6	-0.243966989	0.5702076	2.2808305
6.5	-0.242795168	0.5717482	2.2869929
6.4	-0.241623347	0.5732930	2.2931721
6.3	-0.240451526	0.5748420	2.2993679
6.2	-0.239279705	0.5763951	2.3055805
6.1	-0.238107884	0.5779525	2.3118098
6	-0.236936063	0.5795140	2.3180560
5.9	-0.235764242	0.5810798	2.3243191
5.8	-0.234592421	0.5826498	2.3305991
5.7	-0.233420601	0.5842240	2.3368960
5.6	-0.23224878	0.5858025	2.3432100
5.5	-0.231076959	0.5873853	2.3495410
5.4	-0.229905138	0.5889723	2.3558892
5.3	-0.228733317	0.5905636	2.3622544
5.2	-0.227561496	0.5921592	2.3686369
5.1	-0.226389675	0.5937592	2.3750367
5	-0.225217854	0.5953634	2.3814537
4.9	-0.224046033	0.5969720	2.3878880
4.8	-0.222874212	0.5985849	2.3943398
4.7	-0.221702391	0.6002022	2.4008089
4.6	-0.22053057	0.6018239	2.4072956
4.5	-0.219358749	0.6034499	2.4137998
4.4	-0.218186928	0.6050804	2.4203215
4.3	-0.217015108	0.6067152	2.4268609
4.2	-0.215843287	0.6083545	2.4334179
4.1	-0.214671466	0.6099982	2.4399927
4	-0.213499645	0.6116463	2.4465852
3.9	-0.212327824	0.6132989	2.4531955
3.8	-0.211156003	0.6149559	2.4598237
3.7	-0.209984182	0.6166175	2.4664698
3.6	-0.208812361	0.6182835	2.4731339
3.5	-0.20764054	0.6199540	2.4798160
3.4	-0.206468719	0.6216290	2.4865161
3.3	-0.205296898	0.6233086	2.4932343
3.2	-0.204125077	0.6249927	2.4999707
3.1	-0.202953256	0.6266813	2.5067252
3	-0.201781435	0.6283745	2.5134981
2.9	-0.200609615	0.6300723	2.5202892
2.8	-0.199437794	0.6317747	2.5270987
2.7	-0.198265973	0.6334816	2.5339265
2.6	-0.197094152	0.6351932	2.5407728
2.5	-0.195922331	0.6369094	2.5476377
2.4	-0.19475051	0.6386303	2.5545210
2.3	-0.193578689	0.6403557	2.5614230
2.2	-0.192406868	0.6420859	2.5683436
2.1	-0.191235047	0.6438207	2.5752829
2	-0.190063226	0.6455602	2.5822410
1.9	-0.188891405	0.6473045	2.5892178

**Tabla 4. Cálculos de Colima.**

## **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:**

1. - L. Kramer Steven,  
"Geotechnical Earthquake Engineering"  
Prentice Hall International Series An Civil Engineering  
U.S. A., 1996
2. - Rosenblueth E., Newmarck N. M.  
"Fundamentos de Ingeniería Sísmica"  
Editorial DIANA  
México 1978.
3. - Whitlow Roy  
"Fundamentos de Mecánica De Suelos"  
Compañía Editorial Continental S.A. De C.V.  
México, 1998.
4. - Terzaghi Karl  
"Mecánica de Suelos En la Ingeniería Práctica"  
Editorial El Ateneo.  
España, 1975.
5. - Sowers George B., Sowers George F.  
"Introducción a la Mecánica De Suelos y Cimentaciones"  
Editorial Limusa  
México, 1978.
6. - Derbyshire Edward, Dijkstra Tom, Smalley Ian J.,  
"Genesis and Properties Of Collapsible Soils"  
Kluwer academic Publiserrrs  
Netherlands, 1995.
7. - Lambe T. William, Whitman Robert  
"Mecánica De Suelos"  
Editorial Limusa  
México, 1990.
8. - Chang Wai Lan, Scawthorn Charles  
"Earthquake Eingeering Handbook "  
CRC Press  
U.S.A., 2003
9. - Sociedad Mexicana De Mecánica De Suelos A. C.  
"X Reunión Nacional De Mecánica De Suelos"  
Tomo I, Veracruz,  
Veracruz, 1982

10. - Consejo de Recursos Minerales Monografía Geológico-Minera, Del estado de Colima  
Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal  
Subsecretaría de Minas, 1994.

11. -Base Mexicana De Datos De Sismos Fuertes  
CD-ROM Vol. 2  
(Versión Febrero del 2000)

12. - Etter Delores M  
"Solución de Problemas de Ingeniería con MATLAB", Segunda Edición  
Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.  
México, 1997.

13. - Hanselman Duane, Littlefield Bruce  
"Mastering MATLAB 5, A Comprehensive Tutorial And Reference"  
Prentice Hall  
USA, 1998

14. - Dowrick D.J.  
"Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos para Ingenieros y Arquitectos"  
Editorial Limusa 1992  
México, DF.

15. - Meli P. Roberto  
"Diseño Estructural"  
Editorial LIMUSA  
México, DF. 1989

16. -Taylor Donald W.  
"Fundamentos de la Mecánica de Suelos"  
Compañía editorial Continental S.A.  
México, 1948

17. - [www.usbr.org.com](http://www.usbr.org.com)

18. - [www.neic.usgs.gov/neis/epic\\_circ.html](http://www.neic.usgs.gov/neis/epic_circ.html).