



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

## **ZONACION SISMICA DE LA CIUDAD DE IRAPUATO, GTO**

Tesis  
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**Maestro en ciencias línea terminal Estructuras**

Presenta

**Raúl Gerardo Zavala Sánchez**

Santiago de Querétaro, Querétaro  
Octubre de 2007



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en ciencias terminal Estructuras

## ZONACION SISMICA DE LA CIUDAD DE IRAPUATO, GTO.

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro Ciencias

#### Presenta:

Raúl Gerardo Zavala Sánchez

#### Dirigido por:

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

#### SINODALES

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en I. Abraham Martínez Baini  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Eduardo Rojas González  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en C. José Luis Reyes Araiza  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Gerardo Hernandez Sandoval  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Octubre del 2007  
México



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en ciencias terminal Estructuras

## ZONACION SISMICA DE LA CIUDAD DE IRAPUATO, GTO.

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro Ciencias

**Presenta:**

Raúl Gerardo Zavala Sánchez

**Dirigido por:**

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

### SINODALES

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras  
Presidente

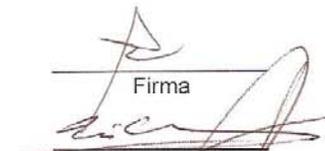
Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Secretario

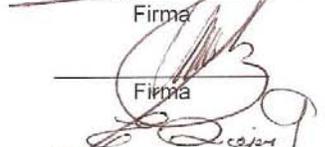
M. en I. Abraham Martínez Bani  
Vocal

Dr. Eduardo Rojas González  
Suplente

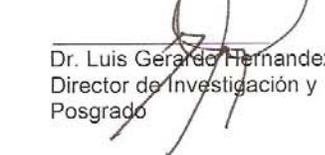
M. en C. José Luis Reyes Araiza  
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Director de la Facultad

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sando  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Octubre del 2007  
México

## RESUMEN

En el caso de las ciudades como Irapuato donde no se dispone de estaciones sismográficas, el uso de la técnica de vibración ambiental permite obtener una carta de microzonación sísmica confiable y con recursos relativamente bajos en un plazo inmediato. Los resultados de la presente investigación proporcionan una carta de microzonación sísmica, que muestra las curvas de isoperíodos para el municipio de Irapuato, obtenidos mediante la técnica de Nakamura (vibración ambiental), con una interpretación sustentada en los datos geológicos del sitio. El procedimiento descrito se comprueba mediante la aplicación del método semiempírico de Zeevaert (obtención teórica de períodos dominantes a partir de la estratigrafía del sitio). Los resultados obtenidos mediante ambos procedimientos son en la mayoría de los casos aproximadamente iguales por lo que se tiene una confiabilidad aceptable en la carta de microzonación sísmica de la ciudad de Irapuato, Gto. Así mismo, se propone un ajuste en los valores del espectro de diseño por sismo del manual de diseño de obras civiles de C.F.E., que el municipio ha adoptado como parte de su reglamentación.

**(Palabras clave:** microzonación sísmica, vibración ambiental, método de Zeevaert, carta de isoperíodos).

## ABSTRACT

In the case of the cities like Irapuato where it does not have seismographic stations, the use of the technique of environmental vibration allows to obtain a chart of reliable seismic microzonation and with relatively low resources in an immediate period. The results of the present investigation provide a chart of seismic microzonation that shows the isoperiod curves for the municipality of Irapuato, obtained by means of the technique of Nakamura (environmental vibration), with an interpretation sustained in the geologic data of the place. The described procedure is proven by means of the application of the semiempíric method of Zeevaert (theoretical obtaining of dominant periods starting from the stratigraphy of the place). In the most of cases the results obtained with both procedures are approximately equal, for this reason chart of seismic microzonation of Irapuato city is a reliable document. Likewise, the proposal is to adjust the seismic design spectrum value of the design manual of civil works of C.F.E., which has been adopted for the municipality as part of its regulation.

**(Words key:** seismic microzonation, environmental vibration, method of Zeevaert, isoperíods chart).

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a **Dios** por entrelazar los conductos para que se pudiera realiza este proyecto.

A la **Universidad Autónoma de Querétaro**.

A la **Asociación de Ingenieros Civiles Estructuristas de Guanajuato A.C.**

Al Dr. **Guadalupe Moisés Arroyo Contreras** por su confianza y por esa particular manera de ver la ciencia.

A mis profesores por sus conocimientos y su paciencia.

## DEDICATORIAS

A mis padres: **Raúl** (q.e.p.d.) y **Magdalena**

A mis hermanos: **Laura Magdalena** y **Juan Carlos**

A mis familiares y amigos

A mi esposa : **Araceli** ; *su apoyo y comprensión:mi soporte*

A mis hijas : **Araceli Monserrat** , **Vania Haidé** y **María Dalia**;  
*su alegría y sonrisa:*

*mi motivación*

# ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
Resumen	I
Abstract.	II
Agradecimientos	III
Dedicatorias	IV
Índice general.	V
Índice de tablas.	VII
Índice de figuras.	VIII
I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Justificación.	3
1.2 Objetivo.	4
1.2.1 Objetivos particulares.	4
II. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS.	5
2.1. Origen y causas de los sismos.	5
2.1.1. Estructura interna de la tierra.	5
2.2. Tectónica de placas.	6
2.3. Sismicidad.	14
2.3.1. Representación de Fourier.	15
2.3.2. Ondas de cuerpo.	16
2.3.3. Ondas superficiales.	17
2.3.4. Modos propios de la tierra.	18
2.3.5. Sismicidad nacional.	20
2.3.6 Sismicidad regional.	21
2.3.7.La sismicidad en el bajío.	21
2.4. Microzonación Sísmica.	24
III. ASPECTOS GEOLÓGICOS	26
3.1. Geomorfología.	26
3.2. Geología regional.	27
3.2.1 Geología de la sierra de Guanajuato.	28
3.2.2 Estratigrafía y estructura de la parte noroccidental del bajío.	33
3.3. Interpretación del subsuelo de la ciudad de Irapuato.	36
IV. METODOLOGÍA PARA LA ZONACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE IRAPUATO.	40
4.1.Conceptos básicos.	40
4.2.Técnica de vibración ambiental.	45
4.3. Método semiempírico de Zeevaert.	49
4.4.Procedimiento.	50
4.4.1. Elección de los sitios.	51
4.4.2. Obtención de la información de los sitios.	51
4.4.3.Medición usando técnica de vibración ambiental.	52
4.4.4.Análisis numérico de la información obtenida	52
4.4.4.1.Datos de vibración ambiental.	52
4.4.4.2.Datos obtenidos de la estratigrafía de pozos.	53
4.5. Obtención de la carta de microzonación sísmica.	53

V. PRESENTACION DE RESULTADOS.	
5.1. Procesamiento de datos.	55
5.2. Carta de isoperíodos para la ciudad de Irapuato, Gto.	60
5.3. Carta de microzonación sísmica y espectros de diseño para la Ciudad de Irapuato, Gto.	61
5.4. Parámetros para la obtención de los espectros de sitio.	63
CONCLUSIONES.	67
LITERATURA CITADA	69
APENDICE	72
A-1 Estratigrafía de pozos.	72
A-2 Pozos y sitios sin estratigrafía.	91
A-3 Pozos y sitios con estratigrafía.	105
A-4 Localización de sitios, Carta geológica, Isoperíodos, Zonación Sísmica y Profundidad basal aproximada.	113

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
4.1	Densidad y velocidad de propagación de ondas P y S.	50
5.1	Datos de pozos de la ciudad de Irapuato.	58
5.2	Ajuste de datos de los espectros del manual de C.F.E.	62
5.3	Sitios con datos de profundidad basal. Peso específico y velocidad de propagación de ondas de cortante.	64

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2.1	Constitución interna de la tierra.	6
2.2	Distribución global de epicentros.	7
2.3	Creación de la corteza oceánica en las crestas y subducción en la trinchera. Bandas de magnetización.	8
2.4	Las principales placas litosféricas.	9
2.5	Sismos a lo largo de la zona donde ocurre la subducción.	10
2.6	Placa de Rivera y boca del golfo de Baja California.	11
2.7	Tectónica de la República Mexicana.	12
2.8	Posibles tipos de fallas transformadas.	13
2.9	Ondas senoidales sumadas para obtener un pulso.	15
2.10	Onda compresional propagándose a lo largo de un resorte con velocidad $v$ .	16
2.11	Onda de cizalla propagándose con velocidad $v$ a lo largo de una cuerda.	17
2.12	Telesismo registrado en sismómetros vertical (Z) y horizontal en dirección Norte-Sur (N) y Este-oeste (E).	18
2.13	Modos propios de la tierra.	19
2.14	Provincias fisiográficas de la República Mexicana.	20
2.15	Sismo génesis intraplaca para el estado de Aguascalientes.	22
2.16	Eventos ocurridos en el eje Neovolcánico.	22
2.17	Epicentros de los sismos de magnitud igual o mayor a 4.0 grados ocurridos en la zona de influencia del Bajío.	24
3.1	Imagen radar del Bajío guanajuatense.	28
3.2	Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato.	30
3.3	Columna litoestratigráfica del subsuelo del Bajío atravesada por un pozo profundo en la ciudad de Salamanca.	35
3.4	Entorno geológico de la ciudad de Irapuato.	37
3.5	Interpretación estratigráfica y estructural del subsuelo de la ciudad de Irapuato.	38
3.6	Interpretación estratigráfica y estructural del subsuelo de la ciudad de Irapuato.	39
5.1 a)	Registro de acelerógrafo.	55
5.1 b)	Procesamiento a programa DEGTRA y transformada de Fourier.	56

5.1 c) Gráficas en Excel.	56
5.1 d) Períodos teóricos según Zeevaert.	57
5.1 e) Superposición de Espectros.	57
5.2 Localización de sitios para medición.	59
5.3 Carta de Isoperíodos.	60
5.4 Microzonación sísmica de la ciudad de Irapuato.	61
5.5 Comparación de Espectros.	63
5.6 Gráfica de la representación teórica de la profundidad basal.	65

## I. INTRODUCCION

La acción devastadora de los temblores de tierra ha ocasionado la destrucción masiva de no pocas edificaciones y provocado la muerte de miles de personas .Es por esto que este tema ha sido uno de los más estudiados dentro del ámbito de la ingeniería estructural.

En la actualidad el diseño sísmico se basa fundamentalmente en el aseguramiento de la resistencia así como en evitar la coincidencia de frecuencias entre la fuente y la estructura. En el primer caso se recurre a la determinación de las fuerzas inerciales que actúan sobre la estructura considerándolas como acciones sobre la misma, en el segundo caso la falla se evitará alejando las frecuencias de vibración entre la fuente y la estructura.

Para cumplir con los postulados anteriores es necesario asegurarse mediante los cálculos de los parámetros mencionados, que las características dinámicas de la estructura satisfacen las exigencias mínimas de algunos códigos o reglamentos aplicables.

Se puede afirmar que en esta época el grado de refinamiento en los procedimientos de diseño sísmico (literatura, códigos y reglamentos) que se practican en la República Mexicana es alto (Ordaz M.,et al, 2003), no así los parámetros básicos (aceleraciones y períodos) con que estos análisis se realizan. Esto se debe fundamentalmente a la falta de investigación aplicada o de campo pues a excepción de algunas ciudades como la de México o Acapulco la mayoría no cuentan con el monitoreo adecuado para registrar los movimientos del terreno y por lo tanto los datos para el desarrollo de los cálculos que sustentan los diseños, son extrapolados o determinados conservadoramente por los reglamentos. Esto implica que no siempre los valores utilizados son los más racionales (Rollán ,2003).

El crecimiento de las ciudades así como la diversidad e importancia de las estructuras que se construyen en la actualidad ha originado la necesidad de contar con un reglamento de construcciones, que regule y establezca los requisitos necesarios para que una construcción sea lo suficiente segura y razonablemente económica.

En la actualidad existen en el país varias ciudades que cuentan con algún tipo de reglamentación sísmica (además de las ya mencionadas). Dicha reglamentación es, en el mejor de los casos, una adaptación de algún reglamento existente y en la mayoría de ellos una simple adopción.

Tal es el caso del municipio de Irapuato, que en el año de 1995 adoptó el capítulo de diseño por sismo del manual de diseño de obras civiles de la C.F.E., como norma técnica del reglamento de construcciones local.

El manual de C.F.E. ubica al municipio de Irapuato en la misma zona sísmica que a la ciudad de México. Sin embargo en el municipio no se tienen reportes de daños significativos o similares al D.F., no obstante la mayoría de los habitantes del municipio sintieron los movimientos ocurridos el día 19 de septiembre de 1985 y el de Colima el 27 de enero de 2003 entre otros. Por lo que, no es recomendable prescindir de un diseño por sismo, sobre todo en el caso de edificaciones de cierta importancia o de gran altura.

Comparativamente se puede aseverar que los valores de los datos que proporciona el manual para realizar el diseño por sismo no son aplicables al municipio de Irapuato ya que en apariencia resultan ser bastante conservadores.

Por lo anterior se puede afirmar que los métodos, requerimientos y procedimientos de cálculo requeridos por el manual de C.F.E., son aplicables al diseño de las construcciones del municipio no así los valores de los parámetros para desarrollar los cálculos que dichos procedimientos requieren, pues estos proporcionan valores poco racionales.

La deficiencia de la información actual estriba en que para valores sensiblemente iguales del periodo se obtienen valores de los parámetros de diseño y en especial de los coeficientes sísmicos muy diferentes , esto se debe a que como lo comenta Ordaz y Veras (2003) los valores para el espectro de un sitio dado se toman las condiciones más críticas o desfavorables por lo que a excepción del punto más crítico de la zona los demás quedan sobrediseñados.

Es decir que la problemática que se tiene es que el municipio de Irapuato no cuenta con una zonificación sísmica propia acorde a las características de los suelos de la localidad.

Las nuevas tendencias en el diseño sísmico y que serán la exigencia de los reglamentos futuros (propuesta para la nueva edición del manual de diseño sísmico de C.F.E.) requieren la construcción de espectros específicos para el sitio, (Mena, Pérez y Aviles 2006), cuestión en la que el valor del período dominante del suelo es básico para la determinación de dicho espectro.

### **1.1 Justificación**

De lo mencionado anteriormente surge la necesidad de contar con una carta de microzonación sísmica basada en la determinación de los isoperíodos del suelo que permita a los ingenieros civiles estructuristas del municipio de Irapuato, un grado de refinamiento no sólo en los procedimientos de cálculo sino en los parámetros de diseño empleados, inclusive para la determinación de los espectros de sitio.

Mediante el uso de técnicas de vibración ambiental calibrada con métodos semiempíricos y con los datos geológicos de que se dispone es posible elaborar una carta de isoperíodos y microzonación sísmica para el municipio de Irapuato en un tiempo inmediato. Y de no usarse la técnica de vibración ambiental calibrada con métodos semiempíricos y con los datos geológicos de que se

dispone no se podrá elaborar una carta de isoperíodos y microzonación sísmica para el municipio de Irapuato en un tiempo inmediato.

## **1.2 Objetivo general**

Por tanto el objetivo de esta investigación es elaborar una carta de isoperíodos y de microzonación sísmica para el municipio de Irapuato, mediante la repetición de la técnica de vibración ambiental calibrada con métodos teóricos y apoyada en la interpretación y conocimiento de la geología local.

La realización de este trabajo requiere por tanto de una experiencia y sensibilidad que sea respaldada por un nivel académico suficiente, que garantice una interpretación adecuada de los resultados obtenidos.

### **1.2.1 Metodología.**

Para lograr lo anterior se fija el siguiente procedimiento:

1.- Recopilar la información necesaria que sirva para definir el estado actual del conocimiento y determinación de los conceptos involucrados, tales como: Sismología, Tectónica de placas, Isoperíodos, Vibración ambiental.

2.- Obtener la información Geológica necesaria para la adecuada comprensión e interpretación de los resultados obtenidos.

3.- Aplicar la metodología para la obtención de los períodos naturales del suelo por vibración ambiental y su comprobación por medio del método semiempírico de Zeevaert.

4.- A partir de la interpretación de los datos obtenidos con el desarrollo de los puntos anteriores obtener las cartas de isoperíodos y de microzonación sísmica, así como efectuar un ajuste a los espectros de diseño sísmico del manual de obras civiles de C.F.E. acorde a la zonificación obtenida y a la historia de eventos que se han presentado en la ciudad de Irapuato.

## II. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS

El objetivo de este capítulo es recopilar los conceptos teóricos y técnicos necesarios para el desarrollo de la presente investigación.

### 2.1 Origen y causas de los sismos

Se define sismo (el griego *seiein*: movimiento) o terremoto (del latín *terraemótus*) como movimientos producidos en la corteza terrestre debido a una liberación súbita de energía en su interior.

Por tanto a fin de entender mejor el fenómeno mencionado es conveniente analizar las estructuras geológicas desde el punto de vista de los requerimientos sísmicos.

#### 2.1.1. Estructura interna de la tierra

Aunque no se sabe exactamente cómo está constituido el interior de la Tierra; sin embargo, se conocen varias de las características principales de la estructura interna de la Tierra gracias al estudio de las ondas sísmicas que la atraviesan.

La figura 2.1 muestra cómo está constituido internamente el planeta tierra. La capa exterior se llama *corteza* y es de dos tipos: la corteza *oceánica*, que compone el fondo de los mares, es basáltica y tiene espesores promedio de 5 a 7 Km.; la corteza continental que forma los continentes es primordialmente granítica y tiene un grosor promedio de 30 a 40 Km.,

Bajo la corteza se encuentra el manto, que llega hasta los 2 870 Km. de profundidad. El cambio corteza/manto se conoce como discontinuidad de Mohorovicic o Moho, en honor del científico yugoslavo que la descubrió en 1909. El manto se divide en manto superior que va de la base de la corteza hasta los 700 Km. de profundidad, y manto inferior; está compuesto por rocas parecidas al olivino y la peridotita, que son silicatos y óxidos de magnesio de hierro. La parte del manto situada entre los 100 y 200 Km. de profundidad se encuentra cercana al punto de fusión; es conocida como Astenósfera (del griego *asthenos*: sin fuerza).

Desde la base del manto, separado de éste por la discontinuidad de Gutenberg, hasta los 5 150 Km. de profundidad, se encuentra el núcleo externo. Éste se supone compuesto de hierro-níquel y se sabe que es líquido porque no transmite las ondas de cizalla.

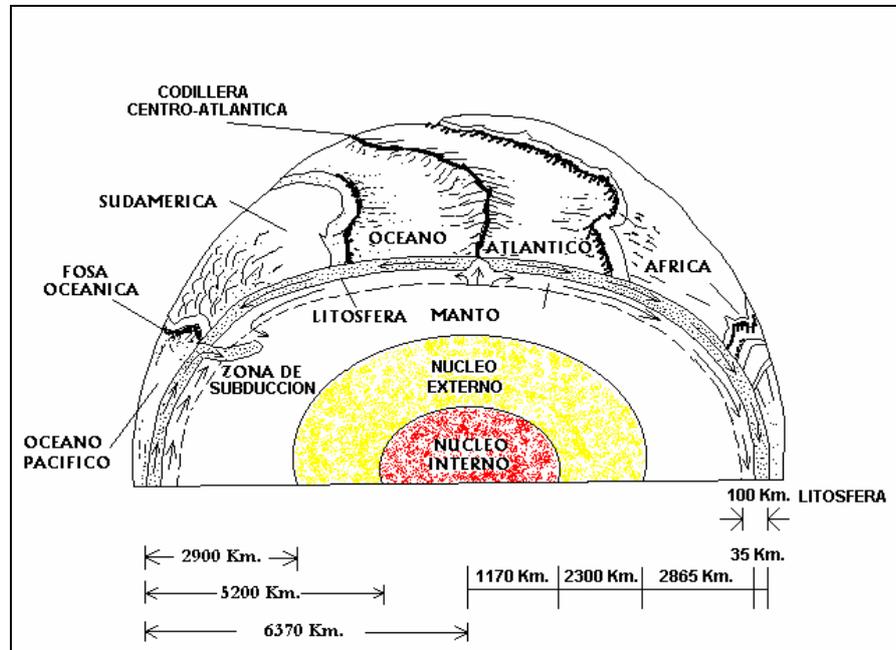


Figura 2.1. Constitución interna de la Tierra.

Es posible que sean corrientes del material de este manto líquido las que producen el campo magnético terrestre. Debajo del núcleo externo, separado de éste por la discontinuidad de Lehman, y en el centro de la Tierra (hasta los 6 371 Km. de profundidad) se encuentra el *núcleo interno*, que es sólido a pesar de tener temperaturas del orden de los 4 000° C, y se cree que está constituido por compuestos de hierro.

## 2.2. Tectónica de placas.

En la actualidad la teoría más aceptada para explicar el origen y causas de los sismos es la tectónica de placas, la cuál se explica a continuación.

La actividad sísmica no está distribuida uniformemente en la superficie; como puede verse en la figura 2.2 que muestra la sismicidad global, los sismos se encuentran concentrados a lo largo de líneas o bandas.

Si se moviera África y Sudamérica de manera que coincidieran con la línea indicada por la sismicidad en el Atlántico sur, sus costas calzarían casi perfectamente. Este ajuste de las costas ocurre también en otros lugares de la Tierra. Los estudios hechos en estas costas revelan continuidad de formaciones geológicas y también dan la razón al parentesco de especies animales y vegetales de un continente a otro.

Estas características pueden ser explicadas mediante la teoría de la *tectónica de placas*, que se describe a continuación, en forma muy breve, y desde el punto de vista de la sismología.

En 1910, el meteorólogo austriaco Alfred Wegener propuso la teoría de la "deriva continental", según la cual los actuales continentes habían formado, en épocas pasadas, un solo continente llamado "Pangea".

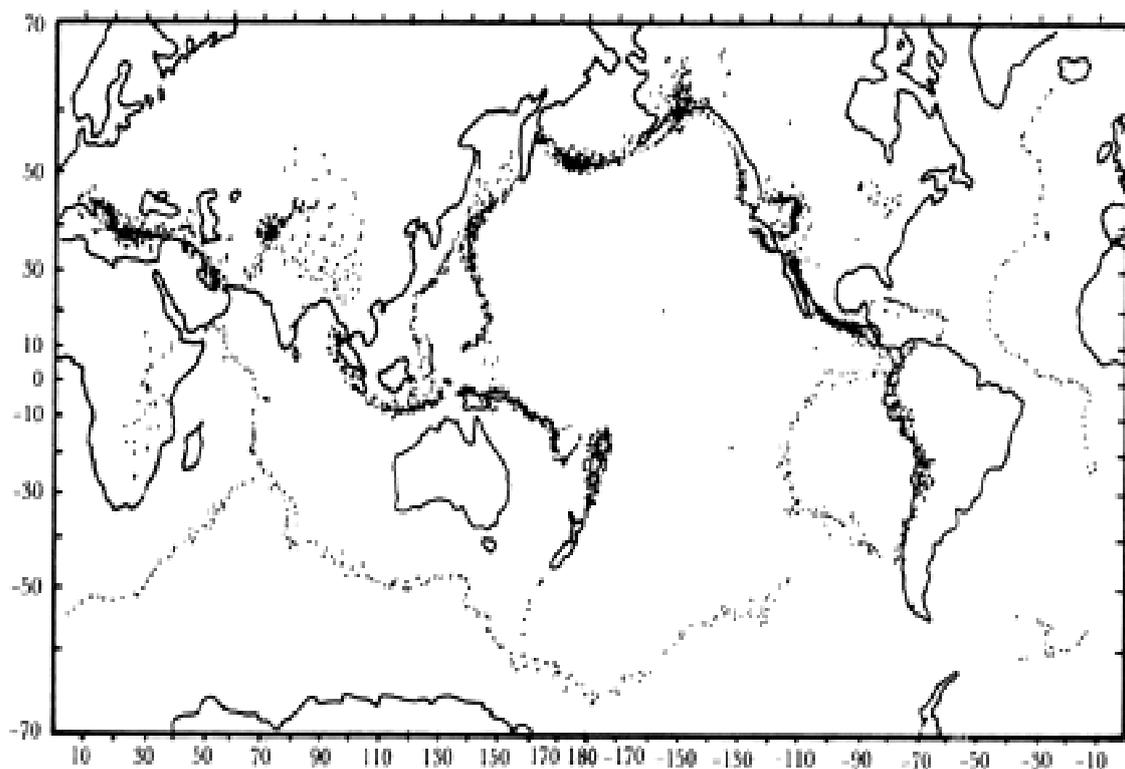


Figura 2.2. Distribución global de epicentros.

En los años sesenta se propuso una teoría que explica razonablemente todas las observaciones. Esta dice que los 100 Km. más superficiales de la Tierra, que

comprenden la corteza (continental y oceánica) y parte del manto superior, forman una capa denominada Litosfera (del griego lithos = piedra), mostrada en la figura 2.3., dividida en placas que se mueven como los trozos rígidos de un cascarón esférico, unos respecto a otros. Este movimiento relativo es la causa principal de la formación de montañas, valles, cadenas volcánicas, etc., y es un proceso conocido como tectonismo.

La figura 2.4. muestra las placas más importantes, y las flechas indican sus movimientos relativos, que pueden ser divergentes, convergentes o transcurrentes. Las velocidades y las direcciones de interacción entre las placas cambian, en general, de punto a punto; cada placa se mueve como si girara alrededor de un punto de la Tierra

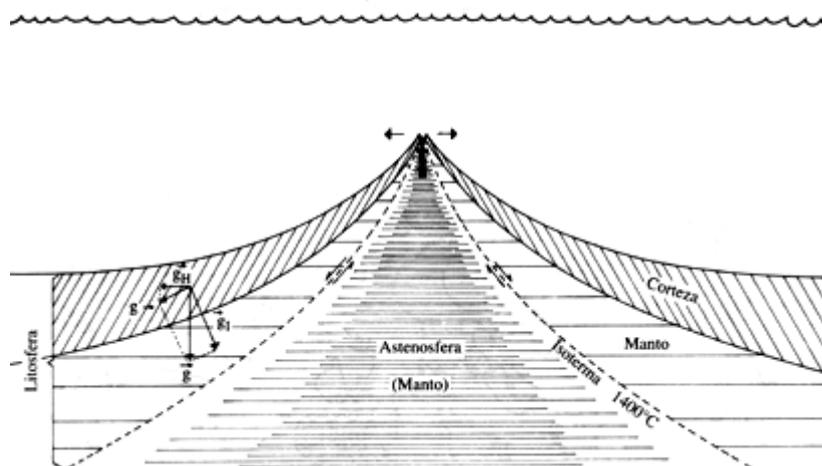


Figura 2.3. Creación de la corteza oceánica en las crestas y subducción en la trinchera. Bandas de magnetización.

A continuación se ve cómo son estos movimientos y cuáles son sus consecuencias desde los puntos de vista sísmico y tectónico.

México, incluyendo su mar territorial, está repartido entre cuatro placas (Figura 2.5 ): dos grandes, la de Norteamérica, que va desde México hasta el Ártico, y la del Pacífico, que, además de parte de México, incluye parte de Estados Unidos y casi todo el Pacífico del norte; una mediana, la placa de Cocos que ocupa parte del océano Pacífico, frente a las costas de México y Centroamérica, y se extiende al sureste hasta



**Las fosas.** Como la Tierra no está creciendo, el hecho de que se esté creando una nueva corteza implica que la corteza antigua debe estar siendo destruida de alguna manera.

La corteza antigua está siendo continuamente consumida en las llamadas *fosas* o *trincheras oceánicas*, donde el fondo del mar se introduce bajo un continente (Figura 2.3) o bajo otra placa oceánica, regresando al manto. Este proceso es conocido con el nombre de *subducción*.



Figura 2.5. Fosas o trincheras oceánicas

Existe generalmente una gran cantidad de sismos a lo largo de la zona donde ocurre la subducción.

Los mecanismos de los grandes sismos que ocurren en la frontera entre la placa subducida y la subducente son por lo general de mecanismo primordialmente reverso, de compresión; correspondiente a los movimientos relativos de las placas involucradas.

En México existe una trinchera oceánica que se extiende desde la boca del Golfo de California hasta el extremo sur del país, en Chiapas, a lo largo de la costa del Pacífico, y se continúa por Centro y Sudamérica hasta la Tierra del Fuego. Esta trinchera es llamada "Trinchera mesoamericana".

En la boca del Golfo, la placa de Rivera (Figura 2.6) es subducida bajo la de Norteamérica con un echado (ángulo de inclinación o *buzamiento*) de unos 9°.

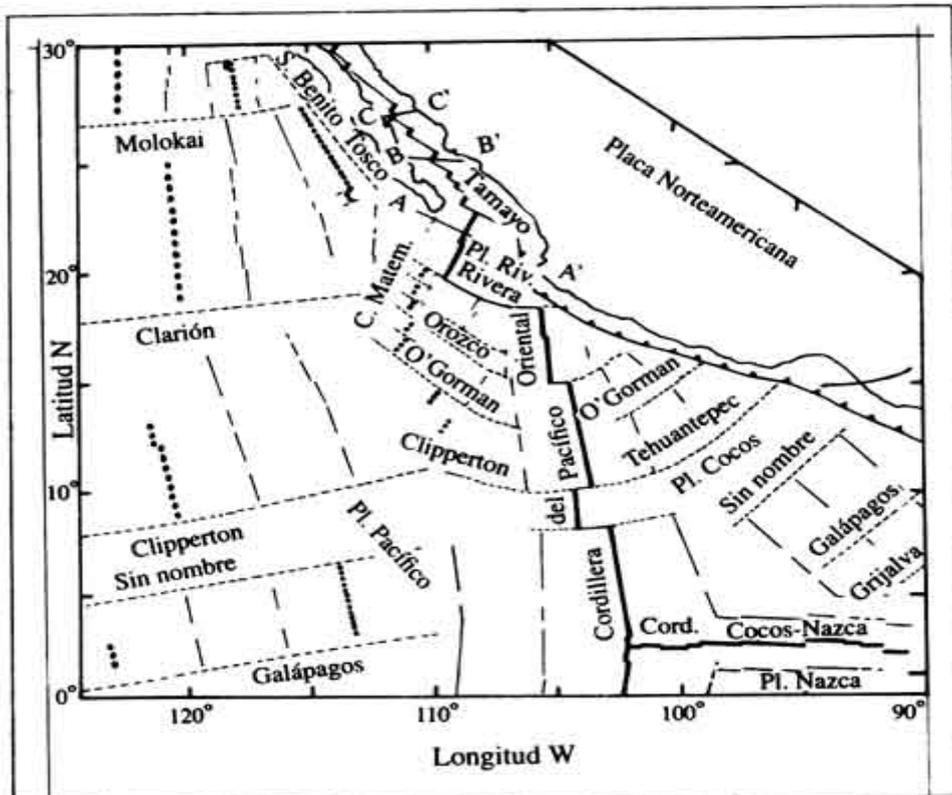


Figura 2.6. Placa de Rivera y boca del golfo de Baja California.

Desde Colima hasta Panamá, la placa subducida es la de Cocos (Figura 2.7). La mayor parte de los sismos destructivos que ocurren en México se producen en esta trinchera.

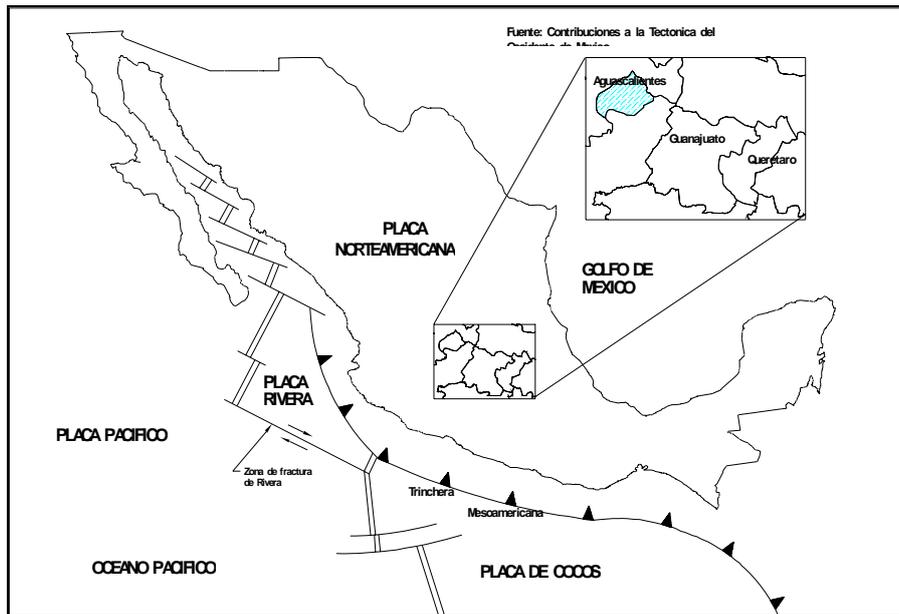


Figura 2.7. Tectónica de la República Mexicana.

La dorsal de Tehuantepec alcanza unos 200 m de altura sobre el fondo oceánico, en apariencia asísmica, que forma parte de la placa de Cocos (Figura 2.7) y está siendo subducida en la trinchera mesoamericana, más o menos a la altura de la ciudad de Tehuantepec. Aparentemente esta dorsal corresponde a un antiguo sistema de fallas transformadas. Al noreste de Tehuantepec se ha encontrado una zona de baja sismicidad que separa a los sismos más someros, que tienen mecanismos reversos.

**Las fallas transformadas.** Cuando el movimiento relativo entre dos placas es tal que se mueven en la misma dirección pero con sentidos diferentes, el contacto entre ellas se produce a lo largo de fallas transcurrentes. Dos ejemplos de fallas transcurrentes muy extensas son la falla de San Andrés, en California, Estados Unidos, y la Alpina, en Nueva Zelanda.

Una falla transcurrente que une zonas de subducción o dispersión se llama falla transformada. Este tipo de fallas se ilustra en la figura 2.8. En México existe un sistema de fallas transformadas que van desde la boca del golfo de California hasta el valle de Mexicali (Figura 2.5), uniendo zonas de dispersión y presentando sismicidad, cuyos mecanismos de falla son primordialmente transcurrentes. Este sistema de fallas,

continuación del sistema de fallas de San Andrés, es el que ha dado lugar a la creación del golfo de California, debido al movimiento de la península de Baja California y el sur de California (pertenecientes a la placa del Pacífico) rumbo al noroeste, en relación con el continente (perteneciente a la placa de Norteamérica).

No todo el movimiento entre las placas del Pacífico y de Norteamérica se produce a través de las fallas transformadas del golfo y valle de Mexicali. Aparentemente, parte de este movimiento se está llevando a cabo a través de fallas que atraviesan la parte norte de la península, donde se encuentran las sierras de San Pedro Mártir.

Estas fallas forman un sistema del cual las más importantes son las fallas Agua Blanca (la mejor definida), San Miguel (la más activa actualmente), Ojos Negros, Tres Hermanos, Vallecitos, y otras.

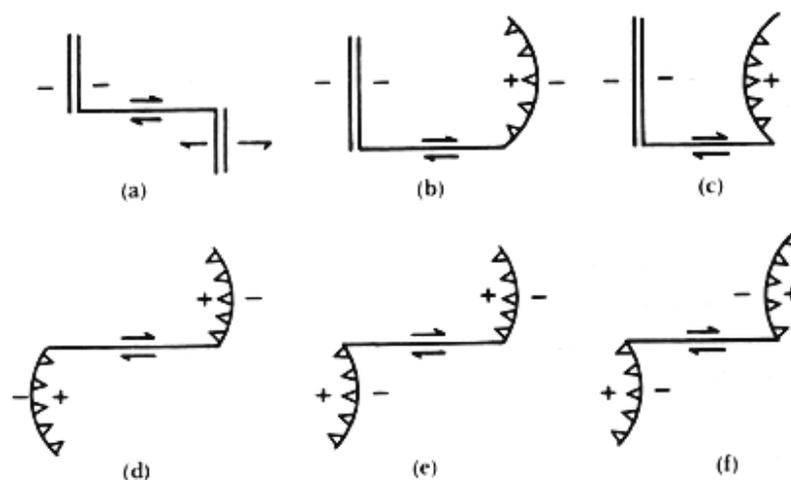


Figura 2.8. Posibles tipos de fallas transformadas. Las rayas paralelas representan crestas y los círculos dentados zonas de subducción, los dientes indican la dirección de subducción de la placa adyacente.

Algunas fallas, de este último sistema, continúan aparentemente mar adentro y a lo largo de la costa hacia el norte, otras atraviesan por tierra y se continúan en el sistema de Rose Canyon en California.

Otras fallas (o sistemas de fallas) transformadas de México son: la falla de Tamayo (Figura 2.6), que separa parte de la placa de Rivera de la de Norteamérica; la falla de Rivera, que separa la placa de Rivera de la del Pacífico; algunas fallas pequeñas y la de Orozco, que unen desplazamientos de la cresta del Pacífico oriental y separan la placa de Cocos de la del Pacífico (Figura 2.7). Otra falla transformada que no está, actualmente, bien definida, es la que posiblemente separe las placas de Rivera y Cocos (Figura 2.6). La zona de fallas de Orozco constituyó probablemente, la frontera entre las placas de Rivera y Cocos.

Rozando el extremo sur de Chiapas, en Guatemala, se encuentra el sistema de fallas Chixoy-Polochic y Motagua (Figura 2.7), a través del cual se mueven transcurrentemente las placas de Cocos y del Caribe. Estas fallas han sido fuente de varios sismos muy destructivos que han afectado poblaciones de México.

**Puntos triples.** Existen lugares donde están en contacto tres placas, según se muestra en las figuras 2.5 y 2.7; estos lugares son llamados puntos triples. Estos tienden a desplazarse ("viajar") lentamente a lo largo de la frontera entre las placas, cambiando la forma de interacción entre ellas.

En México existen puntos triples en los extremos de la trinchera; al noroeste, los asociados con la placa de Rivera: Rivera-Pacífico-Norteamérica, Rivera-Pacífico-Cocos y Rivera-Norteamérica-Cocos; al sureste: Norteamérica-Cocos-Caribe. Aparentemente los sismos que ocurren cerca de los puntos triples son, generalmente, más complejos que los generados lejos de ellos, aunque hay excepciones, por ejemplo, en lugares donde existen posibles complicaciones tectónicas, como el área de Ometepec-Pinotepa Nacional en Oaxaca.

### **2.3. Sismicidad.**

Puede aseverarse que un sismo es la transmisión del desplazamiento entre placas tectónicas que se transmite por medio de ondas.

Una deformación que viaja a través de un medio elástico se llama *onda elástica*; y cuando el medio a través del cual se desplaza es la Tierra, se llama *onda sísmica*.

Al conjunto de todos los puntos en el espacio que son alcanzados simultáneamente por una onda se le llama *frente de onda*.

La onda sísmica deforma el terreno a través del cual pasa, lo cual indica que puede hacer trabajo, y por lo tanto, corresponde a energía elástica que se desplaza

**Ondas senoidales.** Las ondas más sencillas son las senoidales (aquéllas cuyos valores varían en el tiempo y/o en el espacio como senos o cosenos trigonométricos), como las que se muestran en las tres primeras trazas de la figura 2.9. Cada una se caracteriza por su frecuencia  $f$  (el número de veces que el movimiento se repite en cierto tiempo), expresada en Hertz (ciclos/segundo, abreviado Hz), o por su periodo  $T = 1 / f$  (el tiempo que tarda en repetirse), expresado en segundos, su amplitud  $A$  (el máximo valor que puede tomar), expresada en unidades de longitud (usualmente micras o centímetros) y su fase (qué valor tiene la onda, es decir, en qué punto de su ciclo está, para un tiempo o lugar de referencia). Si una onda senoidal viaja con una velocidad  $V$ , al cabo de un periodo habrá recorrido una distancia  $\lambda = V \times T$ , llamada su *longitud de onda*.

### 2.3.1. Representación de Fourier.

Si se suman las tres ondas senoidales de la figura 2.9 , se obtiene la traza situada bajo ellas, la cual es menos regular que éstas y presenta un máximo donde los valores de las trazas componentes se suman (interferencia constructiva) y valores menores donde se anulan (interferencia destructiva).

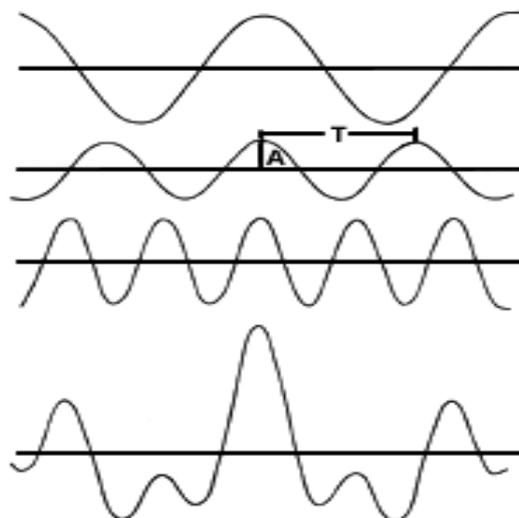


Figura 2.9. Ondas senoidales sumadas para obtener un pulso.

De esta manera se puede construir una onda de cualquier forma, mediante la suma (a veces infinita) de ondas senoidales con diferentes amplitudes y frecuencias (teorema de Fourier). La amplitud de cada onda senoidal componente nos indica qué tanto de ella contiene la onda sísmica en cuestión. Se llama *espectro* de la señal sísmica al conjunto de sus componentes senoidales.

Se dice que una onda sísmica es de alta o baja frecuencia (o de periodo corto o largo) según predominen en su espectro unas u otras componentes.

### 2.3.2. Ondas de cuerpo

La teoría de la elasticidad dice que son posibles dos tipos de ondas elásticas que viajan a través de la Tierra, y que son conocidas como *ondas de cuerpo* u *ondas internas*, las cuales pueden ser *compresionales* o de *cizalla*.

**Ondas P.** Las ondas compresionales son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. (Figura 2.10).

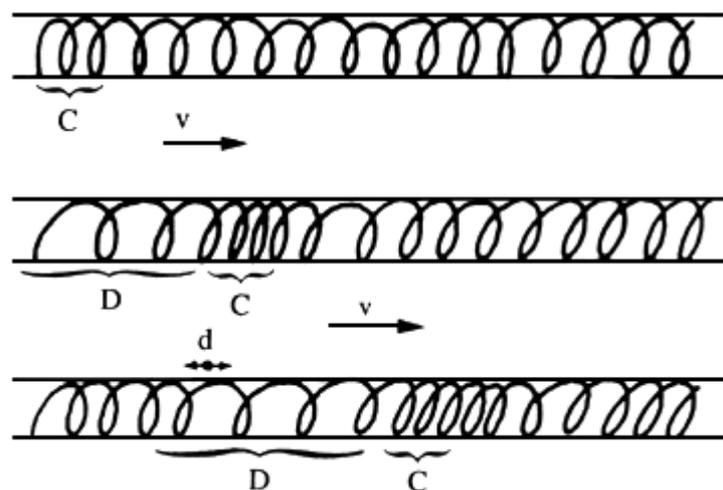


Figura 2.10. Onda compresional propagándose a lo largo de un resorte con velocidad  $v$ .

C indica compresión y D indica dilatación. El desplazamiento de las partículas del resorte se produce en las direcciones indicadas por  $d$ .

Ésta es la más veloz de todas las ondas sísmicas y, por lo tanto, es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y en ser registrada en los sismogramas, por

lo que se llamó onda Primera o Primaria y de allí el nombre de P (en inglés se asocia también con push que significa empujón o empujar).

**Ondas S.** Las ondas de corte o de cizalla, llamadas *ondas S*, son aquéllas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, por lo que están asociadas con deformaciones del terreno de tipo de cizalla. Se pueden visualizar si se hace una analogía con las ondas que viajan por una cuerda tensa (Figura 2.11).

### 2.3.3. Ondas superficiales.

Además de las ondas que viajan a través del terreno, existen otras que lo hacen por la superficie.

**Ondas de Rayleigh.** Éstas, denotadas usualmente por R, o LR cuando son de periodo muy largo (Figura 2.12), se deben a la interacción entre las ondas P y las SV, y el movimiento de cada partícula de la superficie del terreno al paso de la onda se da en forma de elipse retrógrada, según se muestra en la figura 2.12 a .



Figura 2.11. Onda de cizalla propagándose con velocidad  $v$  a lo largo de una cuerda. El desplazamiento de las partículas de la cuerda se da en las direcciones indicadas por  $d$ .

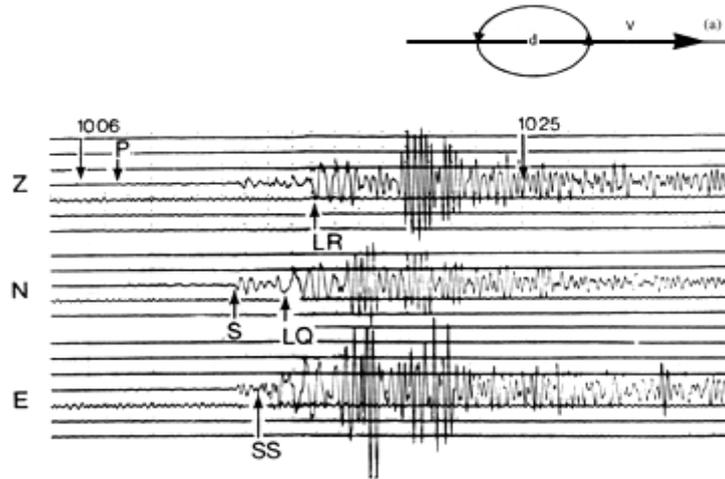


Figura 2.12. Telesismo registrado en sismómetros vertical (Z) y horizontal en dirección Norte-Sur (N) y Este-Oeste (E). En (a)  $d$  indica cómo es el desplazamiento de una partícula de la superficie de la Tierra al paso de una onda Rayleigh con velocidad.

**Ondas de Love.** (En inglés Love waves) son las denotadas usualmente por L, o G o LQ si son de periodo muy largo. Se comportan de manera muy parecida a la descrita para las ondas de Rayleigh, .Producen movimientos horizontales.

### 2.3.4. Modos propios de la tierra

La Tierra (al igual que cualquier objeto) puede vibrar sólo de modos determinados, y toda vibración será una combinación de éstos. La figura 2.13 muestra algunos de los modos de la Tierra. Cuando ocurre un sismo, excita algunos de estos modos, y se puede expresar cualquier onda sísmica como una combinación de ellos. Sin embargo, para periodos muy largos es posible distinguir los modos individuales, y su estudio ha sido de gran valor para inferir varios datos acerca de la estructura del interior de la Tierra.

**Peligro potencial sísmico.** La probabilidad de ocurrencia de un sismo de determinada magnitud, en un tiempo dado, se llama riesgo de sismo; y es distinto del riesgo sísmico.

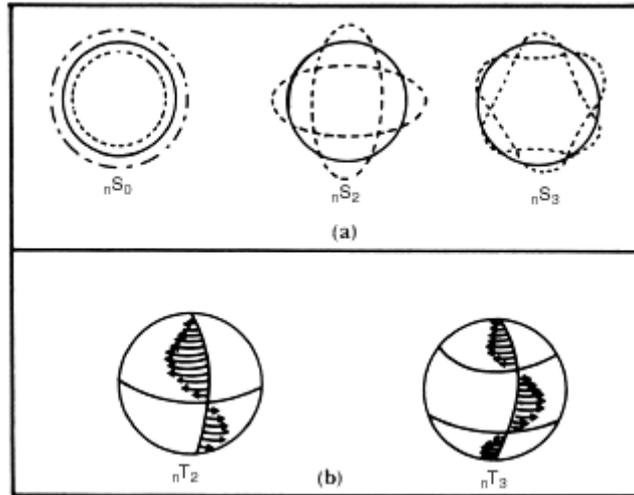


Figura 2.13. Modos propios de la Tierra. (a) Modos volumétricos: modo fundamental ( $nS_0$ ) y los dos primeros modos superiores. (b) Primeros dos modos de cizalla.

**Riesgo sísmico.** Se llama riesgo sísmico a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un plazo dado, de un sismo que cause, en un lugar determinado, cierto efecto definido como pérdidas o daños determinados.

En el riesgo influyen el peligro potencial sísmico, los posibles efectos locales de amplificación, directividad, etc., la vulnerabilidad de las construcciones (e instituciones) y las pérdidas posibles (en vidas y bienes).

El riesgo sísmico depende fuertemente de la cantidad y tipo de asentamientos humanos localizados en el lugar.

**Zonificación.** Determinar en un país o una región las zonas de alto y bajo riesgo sísmico según las condiciones locales (cercanía a fallas activas, peligro sísmico en ellas, efectos de la estructura local del suelo, etc.) que afectarían a una construcción tipo (lo que permite definir el riesgo a partir de una aceleración, en general horizontal, llamada aceleración de diseño), se llama zonificación, y es de gran utilidad para la elaboración y aplicación de códigos de construcción.

Cuando la zonificación se hace con gran detalle, se llama *microzonificación*.

### 2.3.5. Sismicidad nacional.

En México se tienen muy pocos datos acerca de los sismos que ocurrieron antes de 1910, cuando se fundó el Servicio Sismológico Nacional. Relaciones en documentos antiguos y en las *Crónicas de Indias* permiten conocer algunos datos de sismos que se remontan hasta el siglo XV.

México está ubicado en la región norte del continente americano. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 14° 32' 27" y 32° 43' 06" latitud norte, y entre los 86° 42' 36" y 118° 27' 24" longitud oeste. Para el caso de la República Mexicana, la actividad sísmica se produce principalmente por la interacción de las placas tectónicas de Cocos, de Rivera, de Norteamérica y del Pacífico (Figura 2.7.).

En México se registra una actividad sísmica importante sobre todo en la costa del Océano Pacífico. La regionalización que hace el instituto de investigaciones eléctricas y que se muestra en el manual de diseño de obras civiles de la C.F.E. ubica a la mayoría del territorio de México como zona de actividad sísmica importante.



Figura 2.14. Provincias fisiográficas de la República Mexicana.

### **2.3.6. Sismicidad regional.**

Existen cuatro zonas sísmicas importantes conocidas al interior de la placa continental de posible repercusión para el área de estudio, que son las estructuras geológicas denominadas Graben de Acambay, Semigraben de Aljibes, el fracturamiento de Pedro Escobedo y en menor grado el Graben del Mezquital (Figura 2.16). De acuerdo a algunos autores, estas formaciones están asociadas a la evolución del Eje Neovolcánico.

Lermo et.al (1996) mencionan la detección de ocho temblores de magnitud alta (entre 4.1 y 6.9) en el Eje Neovolcánico, lo que denota una actividad importante en algunas zonas de esta provincia. También se menciona que la zona del Semigraben de Aljibes, en los días 3 y 5 de Junio de 1996 ocurrieron dos sismos fuertes (magnitud de coda de 4.2 y 4.3 respectivamente), los cuales fueron localizados a 14 Km. al oeste de la presa de Zimapán, muy cercanos al pueblo de Bellavista, Qro. Los temblores fueron sentidos por la población de Cadereyta, Qro. y tuvieron una intensidad de V grados en la escala de Mercalli modificada, habiéndose determinado que muy probablemente esta actividad sísmica esté relacionada con las fallas normales septentrionales que conforman el Semigraben de Aljibes, sin descartar que los movimientos se hallan debido a la acción de llenado del embalse de la presa de Zimapán. Algunos eventos de los que se tiene conocimiento, ocurridos a lo largo del Eje Neovolcánico en los últimos años se muestran en la Figura 2.16.

### **2.3.7. La Sismicidad en El Bajío**

Como ya ha sido mencionado, esta parte del Bajío marca el límite o la transición entre la Mesa Central y el Cinturón Volcánico Mexicano. Este último se caracteriza sísmicamente por registrar mayormente eventos de pequeña magnitud que se originan por la actividad de las numerosas fallas que también lo caracterizan. Esos pequeños sismos en general se caracterizan por ocurrir en *enjambres sísmicos*, es decir, en series o secuencias que suelen durar días o semanas.

Aunque poco frecuentes, el Cinturón Volcánico Mexicano no ha estado exento de eventos telúricos mayores (de magnitudes de 7.0 grados o más). Históricamente esos sismos han causado daños considerables a las poblaciones cercanas a los epicentros, y se han sentido fuertemente en la región de El Bajío.

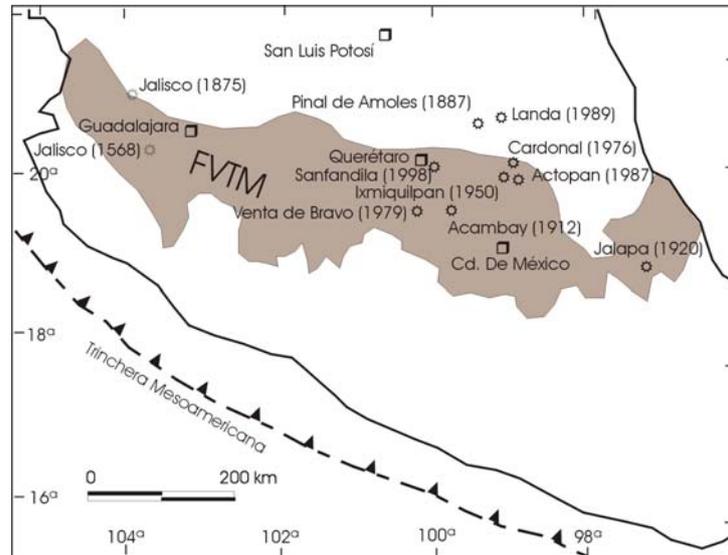


Figura 2.15. Sismo génesis intraplaca para el estado de Aguascalientes

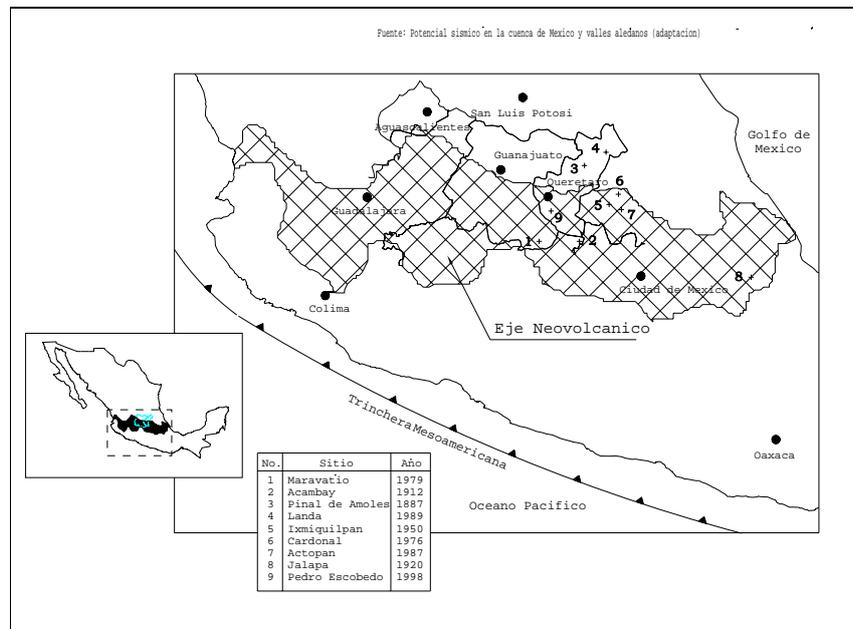


Figura 2.16. Eventos ocurridos en el Eje Neovolcánico.

En esta región llega a sentirse también la sismicidad que se origina en la costa pacífica, por el fenómeno de subducción de las placas litosféricas. Es sensible especialmente a los grandes sismos que ocurren en la zona Jalisco-Colima. Sin embargo la información al respecto no ha reportado daños importantes en ciudades como Irapuato, Silao, León y San Francisco del Rincón-Purísima del Rincón.

Aunque el siglo XIX está marcado por la ausencia de registros instrumentados de la sismicidad, las referencias hemerográficas dan cuenta que en esa época en El Bajío se sintieron dos grandes sismos: el 19 de junio de 1858 con epicentro en Pátzcuaro; y el 11 de noviembre de 1874 cuyo epicentro se infiere en las cercanías de la ciudad de Guanajuato. El primero, que causó muertes y fuertes daños materiales en Pátzcuaro, fue fuertemente sentido en León, donde provocó conmoción y pánico. Sin embargo no se reportaron daños en otras ciudades del Bajío, a pesar de que sus efectos alcanzaron la Ciudad de México y se sintieron hasta en poblaciones del estado de Hidalgo. Suárez y García (1996) detallan grandes sismos que fueron sentidos o afectaron la región del Bajío durante los siglos XVIII, XIX y principios del XX, antes de los registros instrumentados de la sismicidad.

Entre 1912 y el final del siglo pasado, después que se ha instrumentado el registro de la sismicidad, se conocen cerca de 100 sismos ocurridos en la zona de influencia del Bajío. Los de mayor magnitud ocurrieron el 18 de junio de 1932 (7.8 grados) y el 15 de abril de 1941 (7.7 grados) y fueron sentidos fuertemente en la región. La Figura 2.17 recapitula la sismicidad registrada en esta parte del país, durante ese periodo de tiempo.

Finalmente, de acuerdo a la regionalización sísmica del país (Zúñiga et al., 1997), El Bajío pertenece a una región de riesgo sísmico de intermedio a bajo, en donde la aceleración máxima del terreno esperada para un periodo de retorno de 500 años, es menor a 100 cms/seg<sup>2</sup>.

## 2.4 Microzonación sísmica.

Han habido varios intentos para proporcionar datos más confiables para varios municipios de México donde se pueden consultar valores del espectro para la localidad, como lo muestra Trigos (1988).

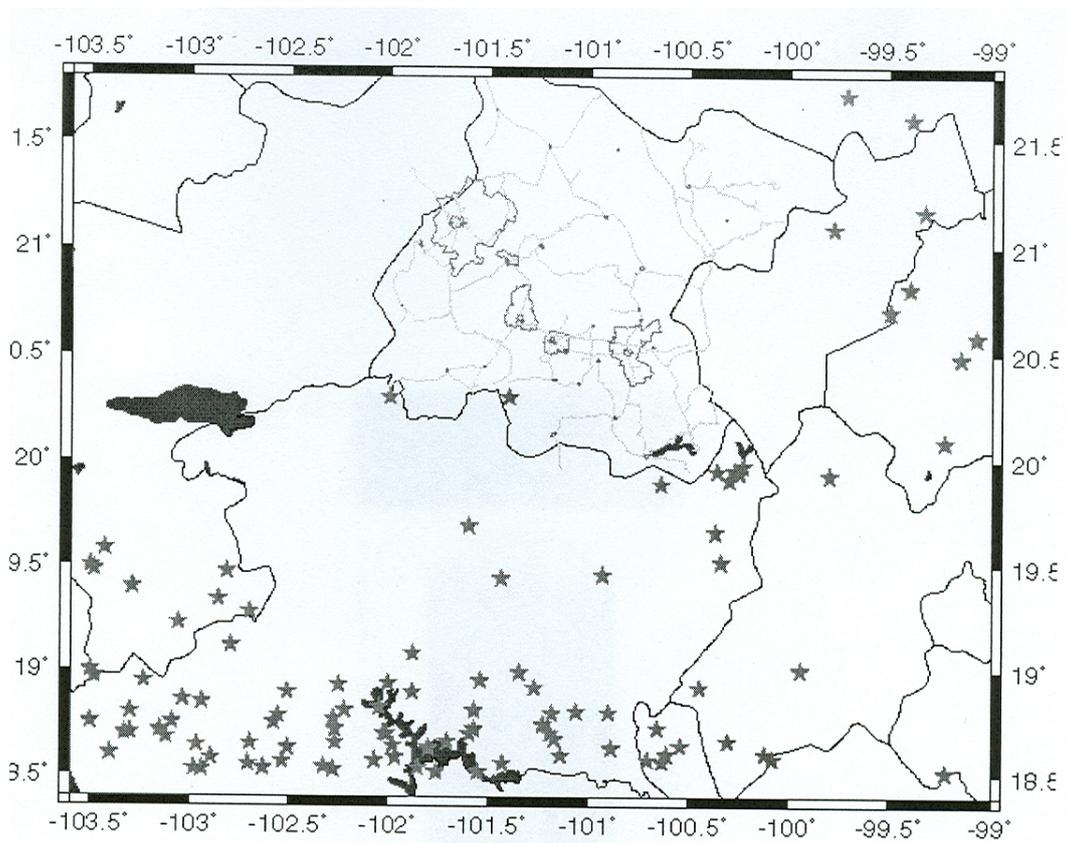


Figura 2.17. Epicentros de los sismos de magnitud igual o mayor a 4.0 grados ocurridos en la zona de influencia del Bajío.

Uno de los datos importantes en el análisis por sismo lo constituye el período dominante del suelo (Aviles y Pérez-Rocha 2003). Este hecho ha llevado a la comunidad científica ha desarrollar metodologías para la determinación de los períodos del subsuelo. El otro parámetro son las aceleraciones del terreno.

Los reglamentos de construcción proporcionan valores de estos parámetros para bastas extensiones geográficas como se muestra en el manual de diseño de obras civiles de C.F.E. diseño por sismo, perdiendo de vista las condiciones locales del

sitio. El hecho de tener una regionalización tan basta implica tomar los valores que están más del lado de la seguridad por lo que en la mayoría de los casos los análisis efectuados con estos valores serán sumamente conservadores (Veras y Huerta 2003).

Conocer los efectos de sitio resulta indispensable para un análisis confiable, pues las condiciones locales pueden variar grandemente de un punto a otro. Aún más la respuesta de la estructura y la importancia de ésta, requerirían un análisis específico (Ordaz y Veras, 2003).

El uso de las leyes de atenuación para determinar los datos del espectro completo parece ser el único recurso disponible en virtud del poco o nulo monitoreo realizado en el municipio de Irapuato. Sin embargo, la propuesta para la nueva edición del manual de diseño por sismo de C.F.E. se basa en la obtención de una aceleración específica para el sitio e importancia de la estructura que es función del período dominante del suelo en el sitio, entre otras variables.

No existen reportes en el municipio de Irapuato de daños ocurridos por los sismos que se han sentido en la ciudad a excepción del sismo ocurrido en Colima, que fue sentido en la ciudad de Irapuato, donde protección civil recibió reportes de daños en algunas edificaciones. Dichos daños se reportan como mínimos y las construcciones en su mayoría presentaban un proyecto y construcción deficientes.

Sin embargo la probabilidad de ocurrencia de un sismo existe en la región del Bajío, como lo muestra la figura 2.17. Resulta por tanto importante para la realización de un diseño razonable y confiable contar con una carta de isoperíodos o microregionalización sísmica para la ciudad de Irapuato.

La metodología que mejores resultados ha proporcionado es la técnica de Nakamura (1989) y que ha sido empleada por varios investigadores para obtener la microzonación sísmica de varios sitios (Arroyo et.al 2003, Vega y Lermo 2003, Vázquez et. al. 2003).

### III. ASPECTOS GEOLÓGICOS

La importancia del conocimiento geológico, para la adecuada interpretación y correlación de los datos obtenidos en campo hace necesario tener al menos un conocimiento básico de los principales conceptos y estructuras geológicas.

Debe existir una relación entre la distribución de los valores de los períodos del suelo y las propiedades geológicas de los suelos. Por este motivo se recopila la información acerca de la estratigrafía y las propiedades sobre todo dinámicas que esta tenga; ya que la interpretación de los resultados se apoya en dichas propiedades.

#### 3.1 Geomorfología

A manera regional, en el municipio destacan las siguientes alturas:

- Al oriente, las estribaciones de la Sierra Codornices, donde sobresalen: El Picachito la Cruz (1960 m.s.n.m), la Mesa El Rucio (1945 m.s.n.m) y El Pinto (2280). En esta parte del municipio las elevaciones sobre el nivel medio del mar van desde los 2250 m.s.n.m en el extremo norte por la comunidad del Garbanzo hasta los 1800 m.s.n.m en los alrededores de la comunidad de Valencianita.
- En el extremo sur del municipio, la orografía es la de una planicie coronada por lomas y lomeríos suaves, entre los que destacan las siguientes: Cerro La Vigilancia (1790msnm), El Divisadero (1750msnm), La Concepción (1740 m.s.n.m), El Brete (1800 m.s.n.m) y El Venado ( 1825 m.s.n.m). En la planicie las elevaciones oscilan entre los 1750 y los 1700 m.s.n.m.
- Al poniente de la mancha urbana la orografía sobresale en el llamado Cerro del Veinte (2340msnm) y el Cerro del Güilote ( 2130 m.s.n.m) en los alrededores de la comunidad de Tamaula originando un drenaje aluvial radial entre los que destacan: El Zapote, La Campana, La Colorada, El Paiste, Las Piedras Lisas, La Tijera, El Sancho y La Iglesia.

- En las inmediaciones de la zona de estudio, específicamente al norte y al centro de los límites municipales, una planicie de inundación donde sobresalen: El Cerro de Arandas, El Cerro Blanco y El Piloncillo, la altura promedio de estas elevaciones varía desde 1883 m.s.n.m. en El Piloncillo hasta 2037 m.s.n.m. en el Arandas.

### **3.2 Geología regional.**

El Bajío es un rasgo característico de la fisiografía de la parte central de México. Se traduce como una extensa planicie cuya altitud se ubica entre los 1,700 y 1,750 metros sobre el nivel del mar. Representa el límite entre las provincias de la Mesa Central y de la Faja Volcánica Transmexicana.

El Bajío es una de las regiones más emblemáticas del territorio guanajuatense. Las ciudades más importantes del estado se localizan sobre esta gran planicie; Irapuato, Silao, León, San Francisco del Rincón-Purísima del Rincón (o Purísima de Bustos) ocupan su parte más noroccidental (Figura 3.1).

La parte noroccidental de El Bajío tiene los siguientes límites naturales: al NE, la súbita emersión de la Sierra de Guanajuato que alcanza altitudes cercanas a los 3,000 metros; al SW, la emersión no menos súbita de una orografía de altitud más moderada, más plana, que desde la ciudad de León hasta Purísima del Rincón se manifiesta en forma de *mesas*, con algunos puntos que culminan a más de 2,000 metros. Estos límites son, en ambos casos, claramente tectónicos.

La Sierra de Guanajuato es un rasgo orográfico que se extiende a lo largo de más de 80 kilómetros sobre la terminación meridional de la Mesa Central, desde las inmediaciones de Lagos de Moreno, Jal. al NW, hasta los alrededores de la ciudad de Guanajuato, Gto. al SE; sus límites naturales son: la depresión de Lagos de Moreno al NW, la planicie del Bajío guanajuatense al

SW y el *graben* de la Saucedá al SE. Hacia el NE su límite es difícil de precisar por la presencia de otros elementos orográficos.

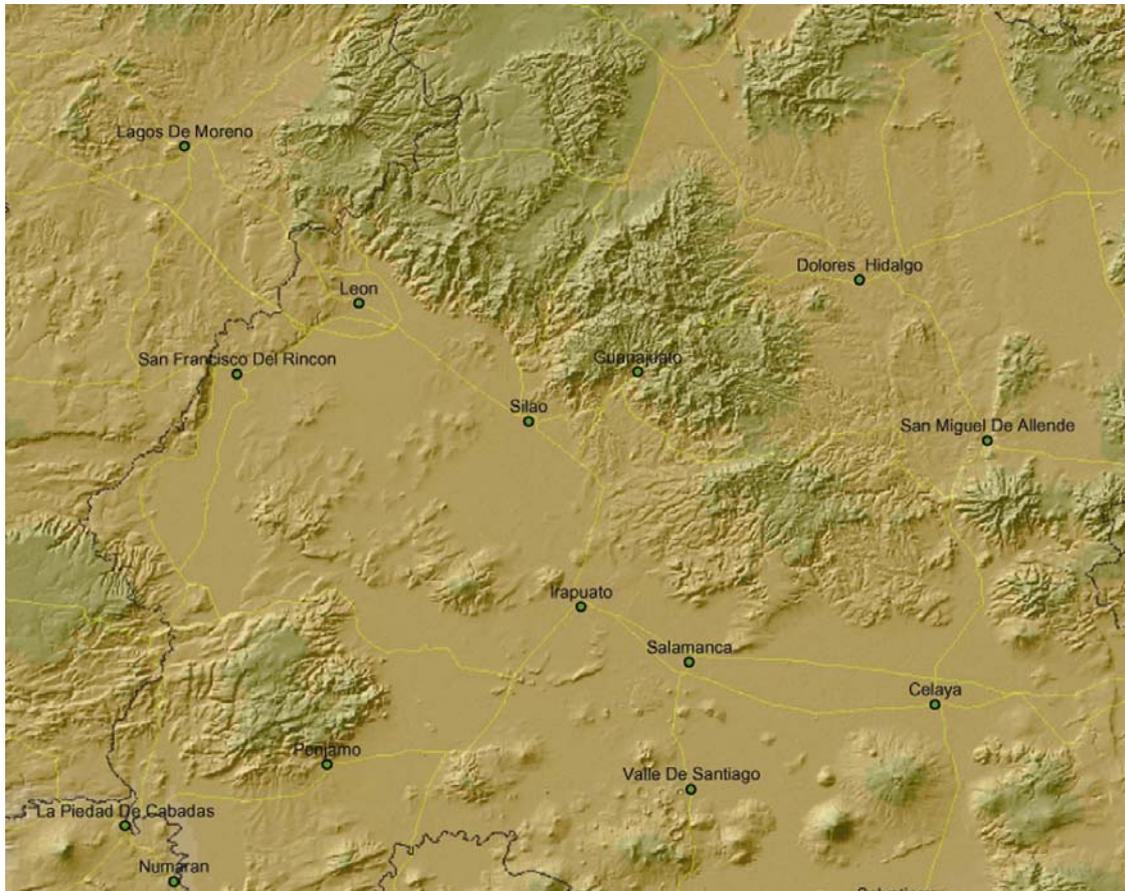


Figura 3.1. Imagen radar del Bajío guanajuatense.

### 3.2.1 Geología de la Sierra de Guanajuato

La Sierra de Guanajuato es una entidad geológica donde convergen terrenos de diversos tipos y diferentes edades. Encierra mineralizaciones importantes, como en el Distrito Minero de Guanajuato, que antaño dieron fama al país más allá de sus fronteras.

La Sierra de Guanajuato está constituida por rocas que pueden agruparse en dos conjuntos litoestratigráficos claramente definidos: uno

inferior, de origen marino y edad mesozoica, que representa su *basamento*; otro superior, de origen continental y de edad cenozoica, que representa su *cubierta*. Entre ambos, separándolos en el tiempo, aparece un cuerpo granítico de edad paleógena (Figura 3.2).

**El Basamento.** Las formaciones que representan el *basamento* constituyen el armazón estructural de la Sierra. Son ellas las que la caracterizan estratigráficamente, y pertenecen a dos secuencias de rocas distintas: una de origen magmático; otra de origen volcanosedimentario. Ambas son de edad mesozoica (Jurásico superior-Cretácico inferior, respectivamente) y representan ambientes geológicos diferentes.

La secuencia magmática está representada por cuerpos alóctonos de rocas ultramáficas (Piroxenita San Juan de Otates), tonalitas (Tonalita Cerro Pelón) y por una formación compuesta de material diorítico y tonalítico que encajona enjambres de filones (diques) de composición diabásica (Complejo Filoniano Santa Ana). Esta secuencia representa los productos magmáticos de un arco insular oceánico de origen pacífico, de edad Jurásico superior-Cretácico inferior (Arco Mágmatco de Guanajuato), acrecionado al continente norteamericano en el Cretácico medio.

La secuencia volcanosedimentaria por su parte, que constituye el autóctono, está representada por una formación (Formación Arperos) que incluye derrames submarinos de lavas de composición basáltico-andesítica en estructuras almohadilladas (pillow lavas), y sedimentos marinos diversos como calizas, calizas arcillosas, areniscas, lutitas y otros materiales clásticos y piroclásticos. La Formación Arperos ha sido interpretada como los sedimentos de una cuenca intraoceánica de edad Cretácico inferior (Cuenca de Arperos), de origen pacífico, acrecionada también durante el Cretácico medio al continente norteamericano.

Las formaciones del *basamento* han sido sometidas a esfuerzos tectónicos compresivos en diversas épocas geológicas. Como ha sido mencionado, han sido acrecionadas al continente norteamericano en el

Cretácico medio (orogenia Oregoniana). Al final del Cretácico sufrieron los efectos de la orogenia Laramide. Esos fenómenos orogénicos produjeron en ellas una intensa deformación (plegamientos y cizallamientos). Les imprimieron también un ligero metamorfismo regional de bajo grado (*esquistos verdes*) que conjuntamente con algunos fenómenos de alteración (sepentinización por ejemplo), les impusieron una coloración verdosa muy penetrativa (*rocas verdes*).

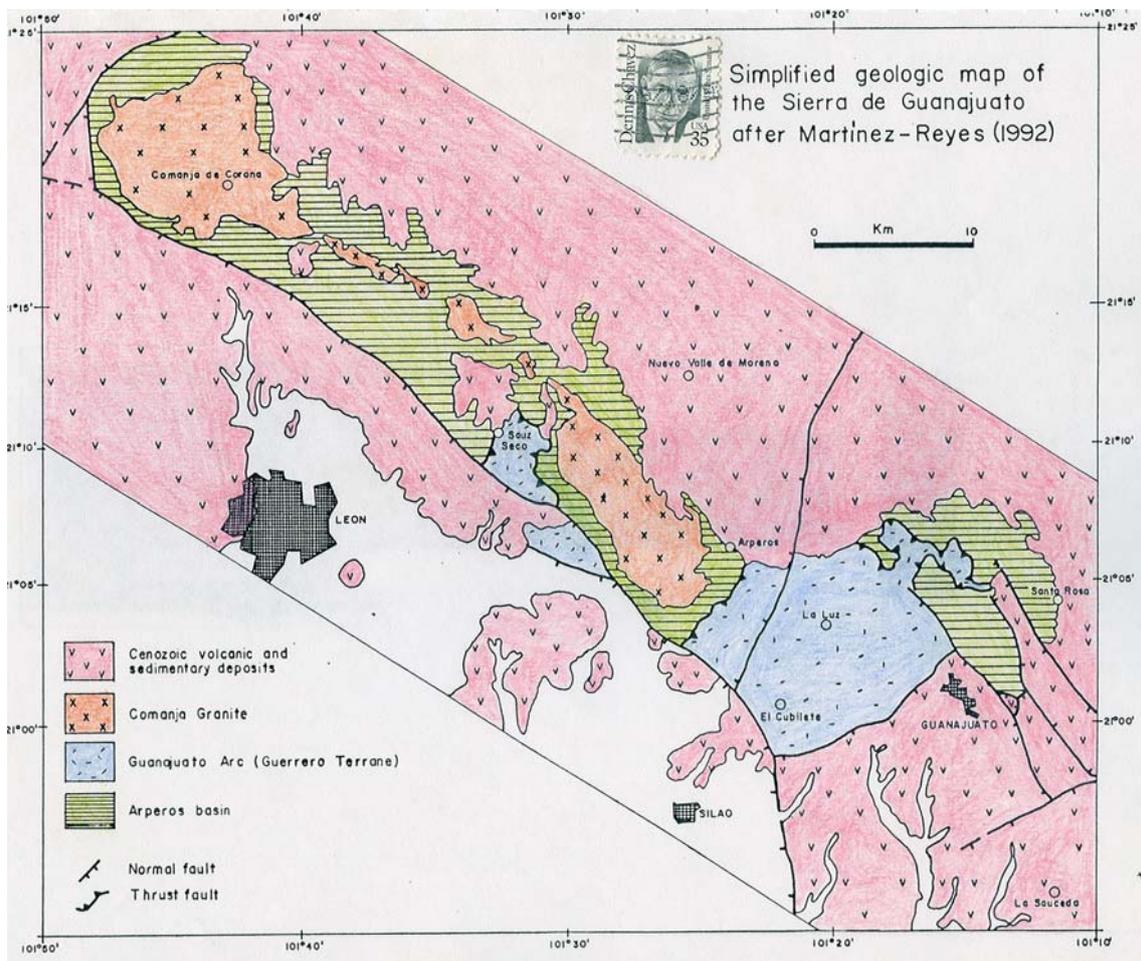


Figura 3.2. Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato

**El Granito.** El cuerpo granítico es un intrusivo de grandes dimensiones (dimensiones batolíticas) que afecta al *basamento*, pero no a la *cubierta*. Aflora a favor de la orientación estructural de la Sierra (NW-SE) a lo largo de unos 50

kilómetros. Su composición petrográfica es poco variable (cuarzo + plagioclasa + micas + otros ferromagnesianos) y no muestra metamorfismo regional ni deformación importante. Desarrolla sin embargo una importante aureola de metamorfismo de contacto (metamorfismo térmico). La edad absoluta que le ha sido calculada por métodos isotópicos está entre 55 y 49 Ma (millones de años), la que corresponde al Paleógeno temprano (Eoceno).

**La Cubierta.** Diversas formaciones representan la *cubierta* cenozoica de la Sierra de Guanajuato. Algunas son de alcance muy local y otras de alcance más regional. Todas son de naturaleza volcánica y clástica y de origen continental. Excluyendo el área del Distrito Minero de Guanajuato donde se ha establecido localmente una estratigrafía muy detallada, las formaciones cenozoicas de la Sierra se pueden agrupar en una sucesión litoestratigráfica que incluye, desde la más inferior (antigua) a la más superior (joven), las siguientes unidades:

**Conglomerados.** Esta unidad forma la base de la secuencia terciaria, directamente sobre las formaciones mesozoicas del *basamento*. Se distribuye preferencialmente sobre el flanco de la Sierra que mira al Bajío. Es un conglomerado compuesto de clastos (fragmentos) poco redondeados de diversas tallas provenientes de las rocas del *basamento*. Es de color rojo, compacto, fuertemente cementado por carbonatos y óxidos de Fe. En la literatura geológica se le conoce como Conglomerado Rojo de Guanajuato definido en el Distrito Minero de Guanajuato.

**Andesitas.** Estas rocas aparecen en afloramientos pequeños, muy aislados: en Bernalejo, al norponiente de la Sierra y en el arroyo El Gigante, al N del cerro El Cubilete. Descansan directamente sobre el granito o sobre las formaciones del *basamento*. Se trata de lavas de textura porfídica, con abundantes cristales de plagioclasa, augita y hornablenda. Se pueden correlacionar con la Andesita El Cedro del Distrito Minero de Guanajuato de edad oligocénica (30 Ma).

**Riolitas.** Estas rocas afloran especialmente hacia la mitad suroriental de la Sierra. Son lavas en estructuras fluidales que forman campos de domos, como en la Sierra El Ocote al ENE de Nuevo Valle de Moreno. En el Distrito Minero de Guanajuato se les ha definido como Riolita Chichíndaro, también del Oligoceno.

**Tobas e Ignimbritas.** Son rocas ampliamente distribuidas en la región. En la Sierra de Guanajuato aparecen mayormente sobre su mitad noroccidental. Se trata de espesos y extensos derrames subhorizontales de lavas y productos piroclásticos, de composición riolítica, atribuidos al paroxismo volcánico oligocénico que dio origen a la Sierra Madre Occidental.

**Gabro.** En el entorno de la comunidad de Arperos, hacia el centro-suroriente de la Sierra, aflora un cuerpo hipabisal de composición gabroica (labradorita + piroxenos + olivino + otros ferromagnesianos). Su edad absoluta no ha sido conocida, pero es posterior a las tobas e Ignimbritas de la unidad anterior, a las que intrusióna.

**Gravas y arenas.** Sobre las estribaciones surorientales del flanco surponiente de la Sierra, aflora una formación clástica, poco consolidada, constituida por gravas, arenas y limos areno-arcillosos. Vestigios de estos mismos materiales aparecen en otros puntos de la Sierra, debajo de los derrames basáltico-andesíticos que forman la cúspide de los cerros El Cubilete, Los Gigantes y la *mesa* Moreno, entre otros. Por su posición estratigráfica se les atribuye una edad miocénica tardía.

**Basaltos.** Aparecen en dos formaciones. Al norponiente de la ciudad de León aflora una serie de derrames de lava y materiales piroclásticos (tezontle) de composición basáltica, que en su conjunto estructuran el cerro Las Dos Aguas. Este cerro corresponde a una estructura volcánica de edad aún no definida.

Por otra parte, en diversos puntos de la Sierra afloran rocas volcánicas también de composición basáltica. Son derrames de lavas de origen fisural que

forman numerosas y pequeñas *mesas*, como las de Moreno y Santiago, así como las cimas de los cerros La Giganta y El Cubilete. El análisis isotópico de las lavas del cerro El Cubilete le asignan a esos basaltos una edad del Mioceno (12 Ma).

Contrariamente a las formaciones mesozoicas plegadas y cizalladas del *basamento*, las formaciones que representa la *cubierta* de la Sierra de Guanajuato no han sufrido más deformación tectónica que un intenso fallamiento. Este fallamiento es el responsable, entre otros, de la emersión de la Sierra a través de un sistema de fallas de orientación NW-SE conocido como Sistema de Fallas del Bajío y, consecuentemente, de la individualización del Bajío como fosa o depresión tectónica.

Además de las fallas de orientación NW-SE como las fallas del sistema del Bajío, en la región también está presente otro sistema de fallas casi ortogonal al anterior, de orientación NE-SW.

### **3.2.2. Estratigrafía y estructura de la parte noroccidental del Bajío**

Geológicamente El Bajío es una fosa tectónica rellena de materiales sedimentarios clásticos, volcánicos y volcanoclásticos que se han venido acumulando en las épocas geológicas más recientes. Esos materiales cubren un substratum irregular constituido por diversas formaciones, tales como las formaciones mesozoicas y cenozoicas que afloran en el entorno.

Los procesos tectónicos continuos a que ha estado sometida la corteza terrestre en esta parte del país durante el Cenozoico, especialmente durante el Neógeno y el Cuaternario, han desarrollado en la región un estilo estructural de pilares (*horsts*) y fosas (*grabens*). Son los responsables del origen del Bajío como cuenca o fosa tectónica, y de la configuración irregular de lo que hoy constituye su substratum. Desde su origen esta fosa ha venido siendo rellena por materiales diversos, que han venido acumulándose paulatinamente hasta formar la gran planicie regular que existe actualmente.

Los procesos más recientes de esta tectónica de distensión, ha favorecido el levantamiento de bloques en el interior de la gran planicie que es El Bajío, afectando los materiales que han colmado la fosa. Esto ha permitido, en algunos puntos, la observación directa de algunas formaciones que constituyen el subsuelo.

Al S de León, en los cerros al W del rancho San Cristóbal, así como en los lomeríos que aparecen al N de Irapuato, se da el caso de estos afloramientos. En esos sitios afloran las secuencias sedimentarias propias del subsuelo del Bajío. Están representadas generalmente por formaciones constituidas por sedimentos clásticos y volcánicoclásticos (materiales aluviales como gravas, arenas, limos y arcillas en diversas proporciones) medianamente consolidados y burdamente estratificados, en posición subhorizontal. Una de estas formaciones, muy característica en la región, es una formación de calizas lacustres que ha sido y/o es utilizada como materia prima en la fabricación de cal y cemento.

La edad de esas secuencias es proporcionada por su posición estratigráfica: en ambos casos subyacen a derrames de lavas basálticas de probable edad miocénica. En otros sitios subyacen a un volcanismo del Plioceno.

La interpretación del subsuelo en El Bajío se establece a partir de la información directa que proporcionan los afloramientos existentes. Se complementa con la información indirecta que proporcionan las perforaciones de pozos profundos o los métodos de prospección de la Geofísica.

En la ciudad de Salamanca la Comisión Federal de Electricidad ha perforado un pozo hasta 700 metros de profundidad. La columna litoestratigráfica atravesada proporciona una idea general de las formaciones ocultas en el subsuelo del Bajío (Figura 3.3). En Salamanca el subsuelo está representado por un relleno poco consolidado de material lacustre, volcánico y aluvial que alcanza los 300 metros de espesor, encima de un substratum

consolidado representado por formaciones volcánicas (ignimbritas y basaltos) y sedimentarias (arenas).

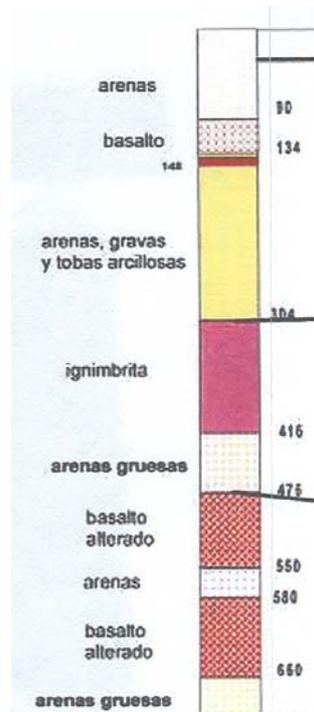


Figura 3.3. Columna litoestratigráfica del subsuelo del Bajío atravesada por un pozo profundo en la ciudad de Salamanca

El substratum y parte del relleno es afectado, como se ha dicho, por fallas diversas; no así los depósitos más recientes. Sin embargo es bien conocido que en las últimas décadas en diversos puntos del Bajío se han venido presentando fenómenos de subsidencia que se manifiestan por el fallamiento y agrietamiento de esos terrenos no consolidados, fenómenos que han dañado severamente la estructura urbana en diversas ciudades. El origen de estos fenómenos generalmente es atribuido a una sobreexplotación y consecuente agotamiento de los acuíferos de la región. Su relación con las manifestaciones de la actividad tectónica actual ha sido poco investigada.

### **3.3. Interpretación del subsuelo de la Ciudad de Irapuato**

La ciudad de Irapuato se localiza hacia la parte suroriental de la región de estudio. Con una altitud entre 1730 y 1740 metros sobre el nivel del mar, su conglomerado urbano se asienta sobre una superficie muy plana. Este sin embargo comienza a escalar altitudes más elevadas topográficamente con desniveles más importantes, como es el caso de San Antonio de Ayala sobre las faldas orientales del Cerro Arandas y Villas de Irapuato sobre la terminación meridional del mismo cerro.

El entorno geológico de la ciudad está representado por dos formaciones: un grueso paquete de lavas basálticas que se materializa en el Cerro Arandas que se localiza inmediatamente al oeste; y una secuencia de sedimentos lacustres que se localiza al Norte, en el denominado Cerro Blanco. En este último sitio los sedimentos subyacen a derrames de lavas de composición basáltica (Figura 3.4).

El Cerro Arandas corresponde a una estructura volcánica del Plioceno. Pertenece al campo volcánico Michoacán-Guanajuato que tiene su origen en la actividad del Cinturón Volcánico Mexicano.

En el Cerro Blanco la secuencia lacustre está representada por sedimentos poco consolidados en estratos horizontales, constituidos por depósitos de arenas, gravas, limos, arcillas, materiales volcanoclásticos y niveles de conglomerados. En los lomeríos que se localizan más al Norte de este punto, esta secuencia incluye calizas. A estas formaciones características de la estratigrafía del subsuelo del Bajío se le ha asignado una edad del Mioceno.

En el Cerro Blanco como en otros puntos de la región, la secuencia lacustre está coronada por lavas de composición basáltica. Este volcanismo de origen fisural es diferente al volcanismo del Cerro Arandas. Parece equivalente al volcanismo de la misma composición reportado en la Sierra de Guanajuato.

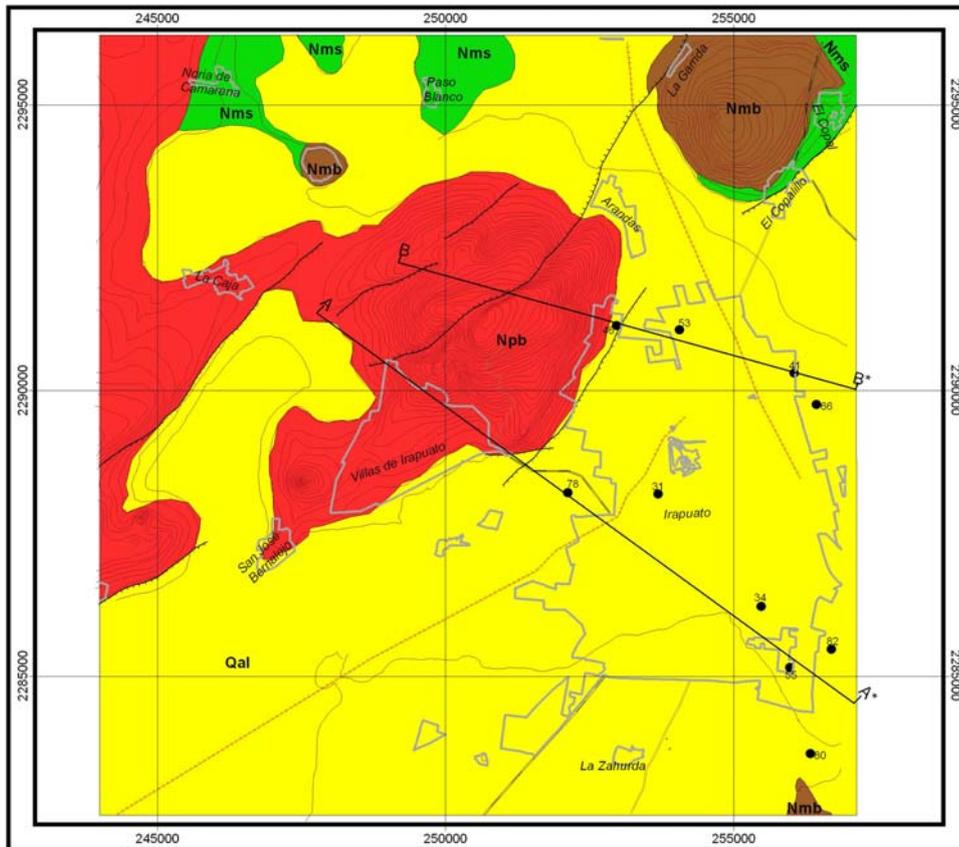


Figura 3.4. Entorno geológico de la ciudad de Irapuato  
 explicación: Nms: sedimentos fluvio-lacustres del Mioceno; Nmb: derrames basálticos del Mioceno; Npb: lavas basálticas del Plioceno; Qal: material aluvial.

Estructuralmente el entorno de la ciudad de Irapuato es afectado por fallas que tienen su origen en los fenómenos tectónicos distensivos más recientes. Son fallas de orientación NE-SW que afectan las lavas basálticas del Cerro Arandas. El límite suroriental de ese cerro materializa también una de ellas.

Para la interpretación del subsuelo de la ciudad de Irapuato se ha utilizado la información litológica de algunos pozos perforados en diversos

puntos de la zona urbana. La profundidad alcanzada es entre 300 y 400 metros.

La información extraída muestra que la ciudad de Irapuato está asentada sobre materiales aluviales y lacustres, con un espesor que en algunas zonas puede alcanzar más de 300 metros de espesor (Figuras 3.5 y 3.6). Estos materiales poco consolidados están representados por gravas, arenas, limos, arcillas mezclados en diversas proporciones, así como por horizontes volcánoclasticos. En algunos sectores de la ciudad algunos pozos han atravesado los niveles calcáreos (calizas) de la secuencia lacustre.

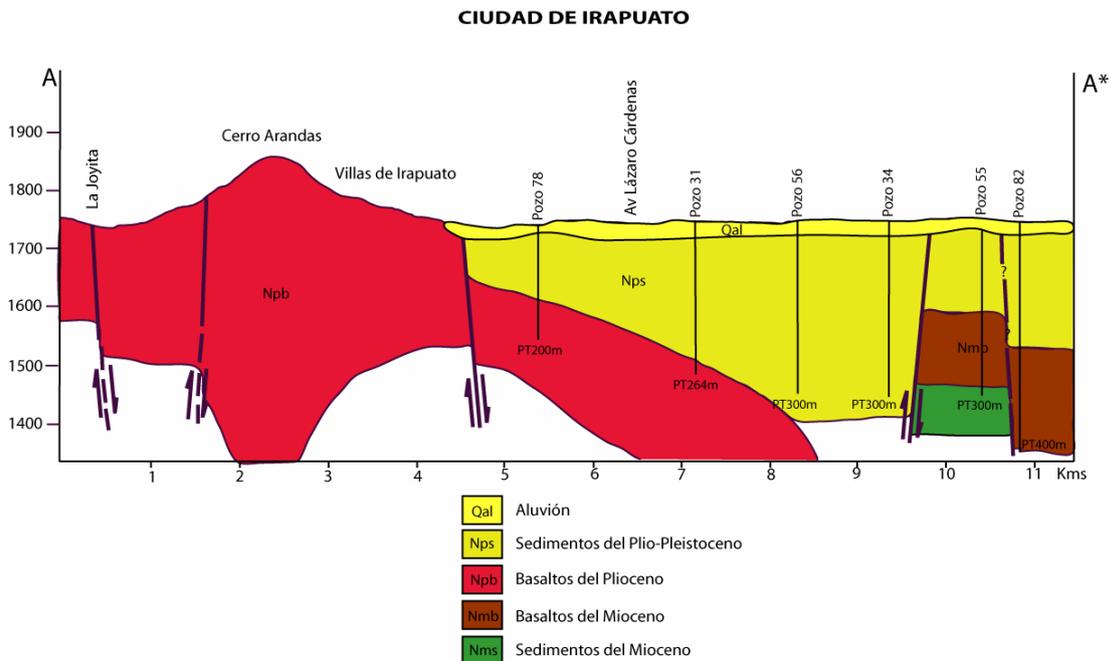


Figura 3.5. Interpretación estratigráfica y estructural del subsuelo de la ciudad de Irapuato

Los depósitos de materiales aluviales, sedimentos lacustres y horizontes volcánoclasticos descansan sobre un substratum de materiales consolidados representados por basaltos e ignimbritas de composición riolítica. La configuración de este substratum es un poco irregular debido a la presencia de fallas que reflejan el estilo estructural de fosas y pilares tectónicos.

En la ciudad han aparecido fenómenos de agrietamiento y fallamiento de los terrenos no consolidados que afectan a la estructura urbana. En otros puntos del Bajío y del país fenómenos similares han sido atribuidos a la sobre-explotación de los mantos acuíferos. En algunos casos podrían estar gobernados por las irregularidades del substratum.

En el caso de la ciudad de Irapuato ninguna hipótesis al respecto ha podido plantearse, en virtud de la escasa información obtenida de su subsuelo y de las fallas y agrietamientos que la afectan. Este aspecto además está fuera de los objetivos de este trabajo.

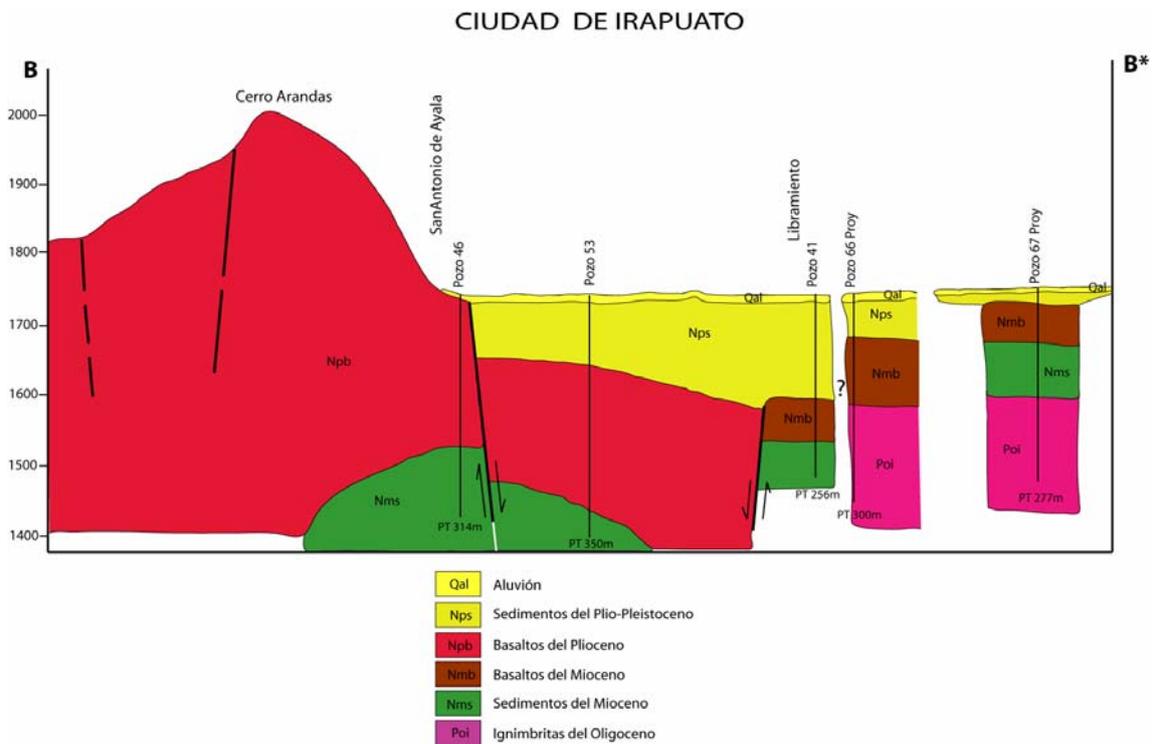


Figura 3.6. Interpretaci3n estratigr3fica y estructural del subsuelo de la ciudad de Irapuato

## IV. ZONACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE IRAPUATO

La preocupación por obtener los espectros de sitio ha llevado a varios de los investigadores en el tema a desarrollar una serie de modelos y metodologías para su definición. Se describen a continuación algunos de los modelos más usados

### 4.1 Conceptos básicos

**Efectos de sitio.** Para las estimaciones de peligro sísmico en terreno firme se utilizan leyes de atenuación que han sido derivadas usando datos registrados en sitios de terreno firme. Sin embargo, muchos de los sitios en que se construyen obras civiles no pueden considerarse de terreno firme, por lo que es necesario incluir las modificaciones que sobre las ondas sísmicas producen los depósitos de suelo locales. Estas modificaciones, que se conocen como efectos de sitio, consisten, en términos generales, en cambios en el contenido de frecuencia de los movimientos del suelo esperados, que usualmente implican amplificaciones, a veces considerables, en ciertas zonas del espectro (Aviles 2003).

Existen varias técnicas para estimar efectos de sitio en terreno blando, que podrían clasificarse en dos tipos: teóricas y experimentales. Dentro de las técnicas teóricas se encuentran los procedimientos de modelado del suelo a partir del conocimiento de sus características mecánicas. Dentro de las técnicas experimentales se incluyen los procedimientos de análisis de registros de vibración ambiental o de registros de temblores fuertes obtenidos en el terreno estudiado.

**Modelado a partir de datos geotécnicos.** Una de las principales técnicas utilizadas por los ingenieros geotécnicos para conocer la amplificación dinámica del suelo consiste en modelarlo suponiendo que está formado por estratos caracterizados por su espesor, densidad, coeficiente de amortiguamiento y velocidad de onda de corte. Usualmente se supone que los estratos se extienden infinitamente en sus dimensiones horizontales, por lo que

se trata de un modelo unidimensional (sólo es relevante la dimensión vertical); es común suponer que estos estratos de suelo se encuentran sometidos a la acción de una onda SH que se propaga verticalmente.

El espesor y la densidad de los estratos pueden conocerse a partir de sondeos geotécnicos y de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras obtenidas en dichos sondeos. Por otro lado las velocidades de ondas de corte de los estratos pueden obtenerse mediante correlaciones entre los parámetros obtenidos de las pruebas geotécnicas y dichas velocidades (Ovando y Romo, 1991; Ohta y Goto, 1976), o mediante pruebas dinámicas realizadas para tal fin.

Un resultado común obtenido del análisis de un modelo geotécnico del suelo es su función de transferencia, la cual representa la respuesta dinámica del terreno, como función de la frecuencia, hasta la profundidad explorada en el sondeo geotécnico. En vista de que sólo se mide la amplificación hasta la profundidad explorada, ésto es una de las principales limitaciones del método, ya que comúnmente los sondeos geotécnicos se realizan hasta profundidades de 15 m, y en el mejor de los casos hasta 30 ó 50 m. Por otro lado, los modelos geotécnicos unidimensionales, como los usados hasta ahora en la práctica profesional, no siempre son capaces de reproducir la respuesta del suelo, independientemente de que la profundidad de exploración sea suficiente. En muchos casos esto se debe a la influencia de efectos de heterogeneidad lateral en el terreno, producida por la disposición y configuración de los materiales (Aviles 2003).

**Modelado a partir de datos geofísicos.** Los estudios geofísicos reportan velocidades de ondas P y S y con base en ciertos principios, estiman el peso volumétrico de los materiales, así como los parámetros geodinámicos E (módulo de Young), G (módulo de Cortante) y  $\nu$  (módulo de Poisson). Los modelos para analizar el suelo empleando datos geofísicos son idénticos a los usados con datos geotécnicos.

A diferencia de un estudio geotécnico, que reporta datos en puntos discretos del terreno, un estudio geofísico reporta datos para un perfil transversal a lo largo o ancho del terreno estudiado, por medio de los llamados tendidos de refracción, lo cual permite visualizar la variación de las características dinámicas del terreno en forma continua. Un tendido consiste en la colocación de geófonos (sensores de velocidad de alta frecuencia) a lo largo de una línea sobre la superficie del terreno y espaciados uniformemente. Los resultados de pruebas geofísicas también muestran la variación de las propiedades de los estratos con la profundidad, aunque muchas veces no es posible definir con precisión el límite inferior del último estrato registrado. De la misma forma, no es posible conocer en forma detallada la variación de las características de los estratos más superficiales del terreno, lo cual sí es posible mediante sondeos geotécnicos.

Una ventaja del estudio geofísico consiste en que es posible identificar fracturas o fallas en toda la extensión del terreno (Aviles ,2003).

***Análisis de vibración ambiental.*** Una técnica muy usada en los últimos años en la práctica de la ingeniería en México ha sido la evaluación de efectos de sitio por medio del análisis de registros de vibración ambiental de una sola estación. Este análisis consiste básicamente en la determinación de cocientes espectrales entre los componentes horizontales del movimiento del suelo y el componente vertical. Esta idea, utilizada originalmente por Nakamura (1989), ha sido usada en la microzonificación y evaluación de efectos de sitio en varias ciudades de la República Mexicana (Lermo et al., 1991; Chávez-García et al., 1994; Gutiérrez et al., 1996; entre otros). De estos estudios, unos han comparado el alcance y las limitaciones de la técnica contra lo que resulta de análisis de acelerogramas (Lermo et al., 1991; Chávez-García et al., 1994;Gutiérrez et al., 1996), encontrándose que para una misma ciudad, algunos puntos arrojan resultados similares a los de movimiento fuerte y otros no; otros estudios, sólo se han limitado a establecer el periodo predominante del suelo a partir de vibración ambiental y clasificar sísmicamente de acuerdo con dicho periodo la zona en estudio (Ferrer y Ramírez,2001; Vera et al., 2001; Chávez, 1999; Ramírez y Martín del Campo, 1999). En la mayoría de estos

últimos estudios no se exploran, o resultan muy limitadas, las posibles correlaciones de los resultados con los obtenidos a partir de movimientos fuertes, ni se mencionan los aspectos relacionados con la amplitud del suelo en las ubicaciones estudiadas.

Investigadores de México y otras partes del mundo han evaluado su aplicabilidad y han indicado las limitaciones que han encontrado en el método (Gutiérrez y Singh, 1992; Lachet y Bard, 1994; Finn, 1991; Bard et al., 1997).

En seguida se discuten algunas de las ventajas y desventajas de la técnica en su aplicación para fines de estimación de efectos de sitio.

Los cocientes espectrales de los componentes horizontales al vertical tienen, en teoría, un máximo en la frecuencia predominante del terreno. Generalmente, para esta frecuencia la curva muestra un pico bien definido por valle-cresta-valle. Estos picos son más definidos en terrenos formados por depósitos blandos como los depósitos arcillosos de la Ciudad de México, y en terrenos con depósitos aluviales uniformes como las arenas de la zona de barra de Acapulco mientras que son más anchos en terrenos firmes o intermedios, o compuestos de materiales heterogéneos.

Se ha observado que el hecho de que los picos estén o no bien definidos depende también del tipo de sensores utilizados para registrar la vibración ambiental, observándose que, en general, los sensores de velocidad arrojan picos mejor definidos que los sensores de aceleración.

La precisión en la identificación de la frecuencia predominante del suelo mediante esta técnica es indiscutible.

Sin embargo, no puede decirse lo mismo de la amplitud relativa obtenida de dichos cocientes. En algunas ciudades del país donde se ha aplicado la técnica con fines de microzonificación, se muestra que para una misma ciudad los valores de amplificaciones han sido satisfactorios para algunas ubicaciones comparado con los valores obtenidos de mediciones de

movimiento fuerte (Lermo et al., 1991; Lermo y Chávez-García, 1994b), mientras que para otras ubicaciones las diferencias son muy importantes y los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura son poco confiables (Gutiérrez y Singh, 1992).

Existen casos en que la identificación de la frecuencia predominante mediante los picos de amplitud máxima no es posible o resulta difícil, ya sea porque las curvas no definen prominentemente tales picos, o porque el terreno resulta relativamente firme y la energía proveniente de las fuentes de ruido no son suficientes para excitar la masa de suelo circundante. Por otro lado, cuando existen efectos laterales en el terreno se pueden presentar curvas con amplitudes importantes en una banda de frecuencia relativamente ancha, lo cual dificulta la identificación de la frecuencia fundamental.

En general, cuanto mayor sea el contraste entre los depósitos de suelo y el semiespacio o estrato profundo resistente, se tendrá una mejor definición en los picos de las curvas de cocientes espectrales y se podrán identificar más fácilmente las frecuencias predominantes.

No obstante, el uso de estudios de vibración ambiental resulta económico, los resultados se obtienen con relativa facilidad y rapidez, y aventaja, desde el punto de vista de la caracterización de la respuesta sísmica, a otros procedimientos, sobre todo en los sitios donde no se cuenta con información acelerográfica (Aviles, 2003).

**Análisis de acelerogramas.** Sin duda, una de las técnicas de estimación de efectos de sitio mejor aprovechadas en la ciudad de México y otras ciudades del país ha sido el análisis espectral de acelerogramas registrados. Dicho análisis consiste en determinar el cociente espectral de amplitudes de Fourier entre un sitio instrumentado en terreno blando y un sitio instrumentado en terreno firme, el cual se toma como referencia. De esta forma, conociendo las características del movimiento en el sitio de referencia, se puede inferir el movimiento en los sitios de terreno blando por medio de los cocientes

empíricos obtenidos para los temblores disponibles (Singh et al, 1988; Reinoso, 1991; Pérez Rocha et al., 2000).

En ocasiones puede contarse con la instrumentación de sitios tanto en la superficie del suelo como en pozos ubicados a cierta profundidad, y los efectos de sitio se pueden estimar realizando cocientes espectrales entre el registro de superficie y el registro de pozo. Con este análisis se pueden identificar las características del movimiento de la superficie relativo a la base de los depósitos de suelo, es decir, su función de transferencia para los tipos de temblores registrados; sin embargo, esta función no es única y depende de varios factores, entre ellos, las características propias del temblor (mecanismo de falla, contenido de frecuencias, directividad), y aunque la función puede presentar una tendencia general, la dispersión suele ser significativa (Lázares, 2003).

De aquí que, si bien los efectos de sitio obtenidos por medio del análisis de registros de temblores fuertes son confiables, el número de registros debe ser suficiente para muestrear en forma representativa las características de todos los sismos que pueden afectar al sitio en estudio.

Esta técnica no es aplicable cuando no se tienen registros de acelerogramas.

Para el caso de la ciudad de Irapuato, dadas las condiciones que se tienen (falta de registros acelerográficos) y en base a experiencias de otros investigadores (ver inciso II.3) se estima conveniente el uso de técnica de vibración ambiental con una comparación de resultados, por medio de la obtención de los períodos dominantes del suelo por el método teórico (semiempírico) de Leonardo Zeevaert.

#### **4.2. Técnica de vibración ambiental**

El método de Nakamura (1989) se basa en la relación entre los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical de registro de

microsisimos en superficie. Este método ha sido ampliamente difundido en los últimos años y utilizado por la fiabilidad de sus resultados, aunada a su rapidez y economía de ejecución.

El método propuesto por Nakamura para estimar la respuesta empírica de las capas superficiales de suelo supone que el ruido de los microtemblores está compuesto por varios tipos de ondas. En este método se pretende eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que las componentes horizontal y vertical del registro son similares en la base rocosa.

Dichos registros son amplificados por las capas de suelo blando que yacen sobre el substrato rocoso. Se considera además que las componentes horizontales se amplifican debido a multi-reflexiones de la onda S, en tanto que los microtemblores verticales lo hacen por multi-reflexiones de la onda P. La velocidad de propagación de la onda P es generalmente mayor que 100 m/s, y los movimientos con frecuencias de aproximadamente 10 Hz o menos pueden no amplificarse, debido a la multi-reflexión en las capas superficiales de varias decenas de metros de espesor.

Por otra parte, el efecto de la onda Rayleigh aparece resaltado en el movimiento vertical, su efecto puede conocerse usando la componente vertical, haciendo la relación entre la superficie y el substrato. Normalmente el efecto de la onda Rayleigh es cercano a uno, cuando la relación anterior es aproximadamente uno.

En la medida en que la relación aumenta, el efecto de las ondas Rayleigh puede volverse crítico. La propuesta de Nakamura pretende eliminar este efecto.

Generalmente la función de transferencia de estratos superficiales se define de la siguiente forma:

$$S_t = \frac{S_{hs}}{S_{hb}} \quad (4.1)$$

Donde  $S_{hs}$  y  $S_{hb}$  son los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del movimiento en la superficie y del movimiento incidente en el basamento rocoso, respectivamente.

Sin embargo, el espectro de la componente horizontal en la superficie  $S_{hs}$ , está afectado fácilmente por las ondas superficiales, ya que en la mayoría de los casos el ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh; probablemente  $S_{hs}$  se encuentra afectado por estas. El efecto de las ondas Rayleigh debe ser incluido en el espectro de la componente vertical del movimiento en la superficie  $S_{vs}$ , pero no en el espectro de la componente vertical del movimiento en el basamento rocoso  $S_{vb}$ .

Asumiendo que el movimiento vertical no se amplifica por las capas superficiales,  $E_s$  representa el efecto de las ondas Rayleigh en el movimiento vertical:

$$E_s = \frac{S_{vs}}{S_{vb}} \quad (4.2)$$

Si no existiera onda Rayleigh entonces,  $E_s = 1$ . Si se aumenta el efecto de la onda Rayleigh,  $E_s$  se hace mayor que la unidad.

Asumiendo que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes vertical y horizontal, se considera que la relación  $S_{tt} = S_t / E_s$  es una función de transferencia más fiable, después de eliminar el efecto de las ondas Rayleigh, y llamando:

$$S_{tt} = \frac{R_s}{R_b} \quad (4.3)$$

Donde:

$$R_s = \frac{S_{hs}}{S_{vs}} \quad (4.4)$$

y

$$R_b = \frac{S_{hb}}{R_{vb}} \quad (4.5)$$

$R_s$  y  $R_b$  fueron obtenidas dividiendo el espectro horizontal entre el espectro vertical, para los microtemblores en superficie y en el basamento.

Esto implica que para el basamento la propagación es la misma en todas las direcciones.

$$R_b \cong 1 \quad (4.6)$$

y por tanto:

$$S_{tt} \cong R_s \quad (4.7)$$

Esto significa que la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada a partir, únicamente, del movimiento en superficie. De tal manera, el movimiento vertical en la superficie retiene las características del movimiento horizontal en el substrato, sustituyendo el último; pero  $R_s$  se vuelve cercano a uno en el rango de las frecuencias donde la onda Rayleigh prevalece, y esto no es notorio en la función de transferencia estimada. Hasta este punto se asume que  $R_s$  incluye dicho efecto con lo cual se elimina el efecto de la onda Rayleigh.

Sin embargo, es de aclarar que la exactitud de la estimación decae cuando existe un ruido coincidente con la frecuencia predominante de la función de transferencia estimada.

$R_b$  puede estar libre del efecto de las ondas Rayleigh y tener exclusivamente las características de un punto dado. Consecuentemente,  $S_{tt}$  puede estimarse más confiablemente multiplicando por  $1/R_b$ , como un término de la compensación cuando se suministra la información del basamento.

Según Nakamura (1989), el método del cociente espectral permitiría obtener la función de transferencia completa del suelo (período y amplificación). Sin embargo, algunas investigaciones teóricas y trabajos experimentales (Lachet y Bard, 1994) han demostrado que no es así, sino que el método únicamente permite de manera confiable la determinación del período dominante del suelo, como se mencionó anteriormente.

### 4.3. Método semiempírico de Zeevaert.

El modelo que propone Zeevaert, basado en la propagación de las ondas de cortante, se ajusta a la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$T = 4 \cdot \sum_i \frac{H_i}{V_i} \quad \text{y} \quad V_i = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} \quad (4.8)$$

Donde

$H_i$  : Es el espesor del estrato  $i$ ,

$V_i$  : La velocidad de las ondas de cortante del estrato  $i$

$G_i$  : Módulo dinámico de cortante del estrato  $i$

$\rho_i$  : La densidad del material del estrato  $i$ .

Como puede apreciarse el método semiempírico de Zeevaert requiere del conocimiento de las propiedades de los estratos que conforman el suelo, como son el módulo dinámico de cortante y la densidad, para poder aplicar la ecuación anterior.

Existen valores de la densidad y velocidad de cortante para algunos tipos de suelo, como muestra la tabla 4.1.

La dificultad del modelo consiste en que es necesario conocer la estratigrafía, así como la densidad del material, lo cuál es posible por medio de pruebas de laboratorio. Para evitar hacer sondeos y pruebas de laboratorio es conveniente recurrir al conocimiento de la estratigrafía por medio de pozos para abastecimiento de agua.

La otra dificultad está en que los valores índice proporcionados por la tabla no están completos.

Tabla 4.1 Densidad y velocidad de propagación de ondas *P* y *S* (Clark ,1966; y Heiland ,1940)

MATERIAL	P Velocidad (m/sec)	S Velocidad (m/sec)	Densidad (gm/cc)		
Granito	3,962	6,096	2,134	3,353	2.67
Gabro	6,553		3,444		2.98
Basalto	5,608		3,048		3.00
Dunita	7,986		4,084		3.28
Arenisca	2,438	4,267	914	3,048	2.45
Caliza	3,048	6,096	2,743	3,200	2.65
Lutita	1,829	3,962	1,067	2,286	2.35
Sal	4,389	6,492	-		2.20
Yeso	2,134	3,658	1,097		2.30
Pizarra	3,658	4,450	2,865		2.80
Marmol	5,791		3,505		2.75
Cuarcita	6,050		-		2.85
Esquisto	4,542		2,896		2.80
Roca metamorfica	4,724	5,578	-		2.65
Aluvion	503	1,981	-		1.54
Arcilla	1,128	2,499	579		1.40
Suelo	152	762	91	549	1.1-2.0
Material arenoso (glaciar)	396		-		1.5-2.0
Arena	1,402		457		1.93
Agua	1,463		0		1.00
Hielo	3,353		-		0.90
Aire	341		0		-
Acero	6,096		3,048		7.70
Hierro	5,791		3,200		7.85
Aluminio	6,553		2,987		2.70
Concreto	3,566		2,164		2.7-3.0
Hule	1,036		27		1.15
Plastico	2,347		1,524		-
Celulosa	3,597		1,707		-

#### 4.4. Procedimiento

El concepto fundamental para la determinación de la microzonación sísmica de la ciudad de Irapuato, es el período dominante del suelo en cada sitio y para su determinación se siguió el procedimiento siguiente:

- 1.- Elección de los sitios.
- 2.- Obtención de la información de los sitios
  - 2.1.- Localización
  - 2.2.- Estratigrafía
  - 2.3.- Plano geológico del municipio
- 3.- Medición usando técnica de vibración ambiental.
- 4.- Análisis numérico de la información obtenida.
  - 4.1. Vibración ambiental (Técnica de Nakamura).
  - 4.2. Períodos obtenidos en base a estratigrafía de pozos (Método de Zeevaert).
- 5.- Obtención de la carta de microzonación sísmica.
- 6.- Ajuste a los espectros de diseño por sismo del manual de diseño de obras civiles de C.F.E.

#### **4.4.1. Elección de los sitios.**

Como se mencionó en el inciso 4.3 es conveniente que en los puntos donde se efectúan las mediciones se tenga conocida la estratigrafía.

Para este fin se eligió como puntos de medición los puntos donde se ubican pozos de abastecimiento de agua potable. Éstos tienen la ventaja, además de estar perfectamente localizados por el organismo operador del agua (JAPAMI).

Cabe aclarar que no fue posible obtener la estratigrafía de todos los pozos dentro de la ciudad.

#### **4.4.2. Obtención de la información de los sitios.**

La información de los sitios que pudo ser recabada, consistió en un plano del municipio en formato de CAD, con la localización en coordenadas UTM de la mayoría de los pozos con que opera el organismo dentro de la

mancha urbana, así como datos de estratigrafía de 14 pozos localizados en diferentes puntos de la ciudad.

El mapa geológico fue adquirido al INEGI y su interpretación fue asesorada por el Dr. Juventino Martínez.

#### **4.4.3. Medición usando técnica de vibración ambiental.**

Para emitir la señal se usó el acelerógrafo GSR 18 de Terra Technology y una computadora portátil con el programa *All View* instalado (necesario para registrar analíticamente y gráficamente la señal) propiedad de la Universidad Autónoma de Querétaro, siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Tres mediciones como mínimo de un minuto cada una.
- Localizar y referenciar el punto.
- Evitar la Interferencia de ruido

#### **4.4.4. Análisis numérico de la información obtenida.**

Una vez obtenida la información se procesa numéricamente

##### **4.4.4.1. Datos de vibración ambiental.**

Los datos originales se encuentran en un formato poco práctico para su interpretación, por lo que es conveniente efectuar un proceso numérico que requiere de varios pasos y programas:

- Se trasladan los datos obtenidos del programa original *All View*, al programa *DEGTRA*, que fue desarrollado por Mario Ordaz y Carlos Montoya basándose en el modelo de Nakamura. Este programa realiza la parametrización de las componentes horizontales N-S y E-W con respecto a la componente vertical del movimiento, así como la suavización de los espectros a partir de una línea base, para finalmente obtener los espectros de Fourier.

- Los espectros de Fourier se importan a un programa procesador de gráficos para facilitar su lectura. En este caso se utilizó el procesador de gráficos del programa *Excel*.
- Se toma la lectura de la frecuencia correspondiente a la mayor amplitud. Esto se hace para cada registro (tres en el mismo sitio). De ser diferentes debe elegirse aquella que sea más coincidente (menor diferencia entre ellas). En el caso de las mediciones obtenidas para la ciudad de Irapuato, se optó por tomar la medida intermedia entre las tres. Sin embargo el criterio para la selección también obedeció a la interpretación de la carta geológica donde se puede observar la variación del espesor de los diferentes estratos.
- Se calcula el inverso de la frecuencia para obtener el período dominante del sitio.

#### **4.4.4.2 Datos obtenidos de la estratigrafía de pozos.**

Para efectuar la calibración de los resultados obtenidos con vibración ambiental, se recurre al método de Zeevaert, que para una interpretación más efectiva, también los resultados numéricos se grafican en el mismo programa que se utiliza para vibración ambiental. El proceso es el siguiente:

- Se tabulan los datos de la estratigrafía de los pozos con la ayuda de una hoja de cálculo del programa *SURFER*.
- Con la ayuda del programa *HASCOR* desarrollado igualmente por Ordaz y Montoya se evalúan los períodos dominantes de los diferentes estratos y su respectiva transformación en frecuencias.
- Los resultados así obtenidos se pueden graficar en *EXCEL*.

Nota. El uso de la paquetería se puede consultar en el anexo 3

#### **4.5. Obtención de la carta de microzonificación sísmica.**

Con los resultados de los valores de períodos dominantes del sitio, obtenidos de vibración ambiental se grafica en un paquete para topografía

(*LAND, SURFER* etc.) las curvas de “nivel”, que en realidad representan curvas de isoperíodos.

- Se tabulan en una hoja de cálculo las coordenadas de los sitios monitoreados, tomando como coordenada en las elevaciones los valores de los períodos dominantes del sitio. En este caso se usó el Programa *SURFER*.
- Se importa al archivo donde se tiene el plano de la ciudad.
- Se sobreponen los dibujos, teniendo cuidado de que no estén desfasados. Para este caso fue necesario escalar el plano geológico.

La carta de microzonación sísmica y la carta de isoperíodos para la ciudad de Irapuato se encuentran en el capítulo V.

#### **4.6. Ajuste a los espectros de diseño por sismo del manual de diseño de obras civiles de C.F.E.**

Para el ajuste a los valores de los parámetros que definen los espectros sísmicos correspondientes a las zonas que se obtienen de la microzonación y dado que no se dispone de datos obtenidos de sismos reales, se decide comparar las dos últimas ediciones del manual de obras civiles de C.F.E.

Se grafican los espectros para tener una visualización mejor de las diferencias entre los diferentes espectros.

Los resultados se discuten en el siguiente capítulo.

## V. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Procesamiento de datos.

Se realizó la medición en 45 sitios de los cuales se conoce la estratigrafía en 15 de ellos. En cada sitio se efectuaron tres mediciones de las cuales se seleccionó el valor intermedio (no el promedio) previa comparación con el mapa geológico como se mencionó en el capítulo IV.

Se muestran los resultados del proceso para obtener el período dominante del suelo del pozo número 8 colonia las Rosas (figura 5.1) .Para el resto de los pozos se procedió de la misma manera.

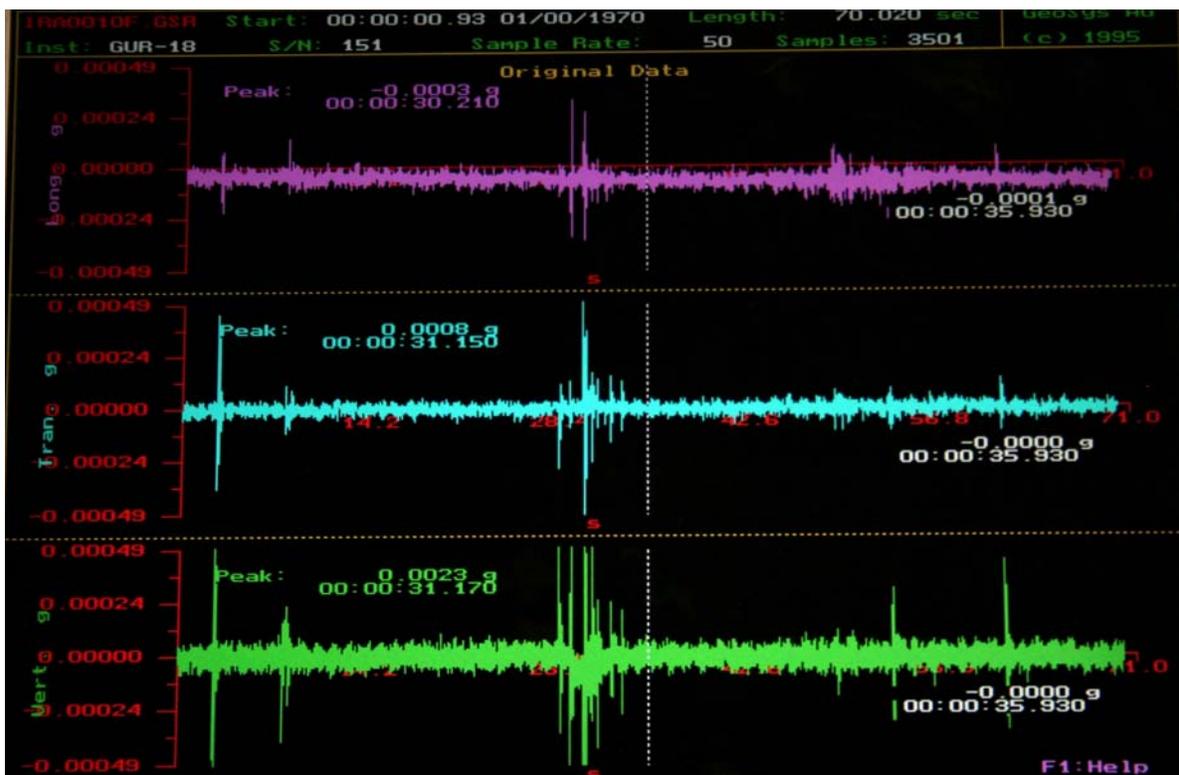


Figura 5.1. a) Registro de acelerógrafo

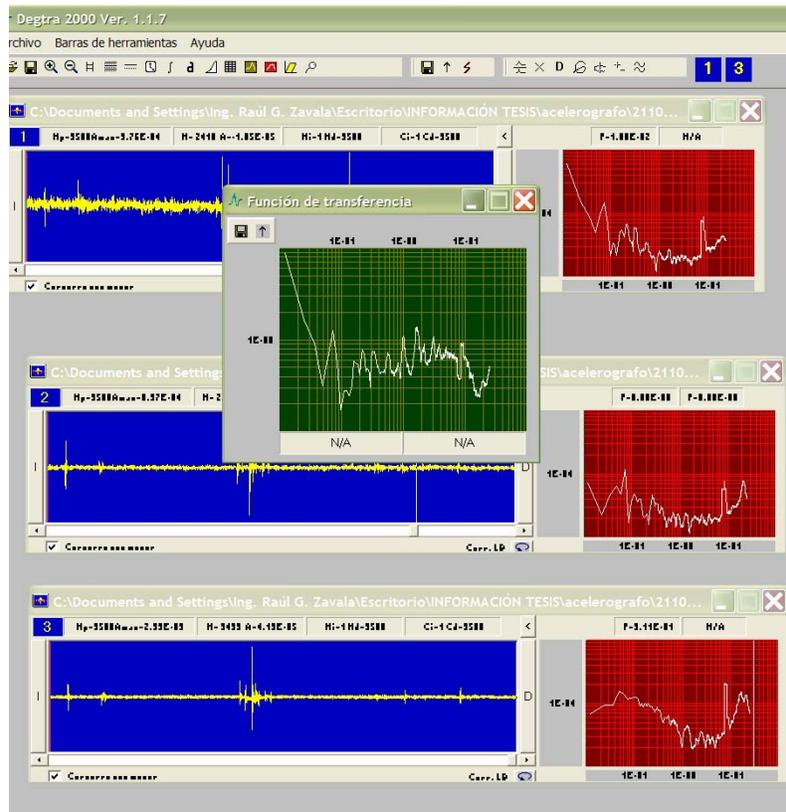


Figura 5.1. b) Procesamiento a programa DEGTRA y transformada de Fourier

**Fraccionamiento Las Rosas Pozo No. 8**

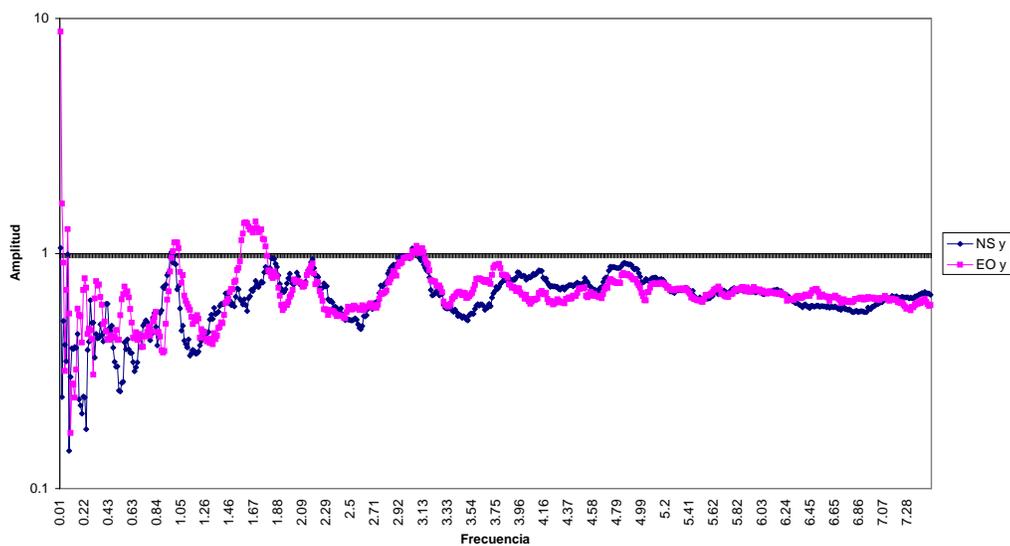


Figura 5.1. c) Gráficas en Excel

Fraccionamiento Las Rosas Pozo No. 8

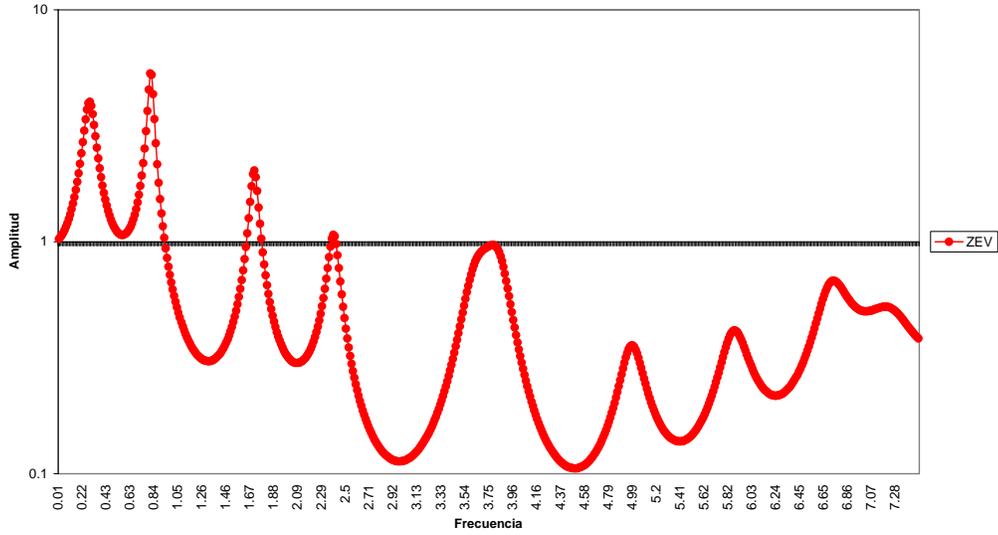


Figura 5.1. d) Períodos teóricos según Zeevaert

Fraccionamiento Las Rosas Pozo No. 8

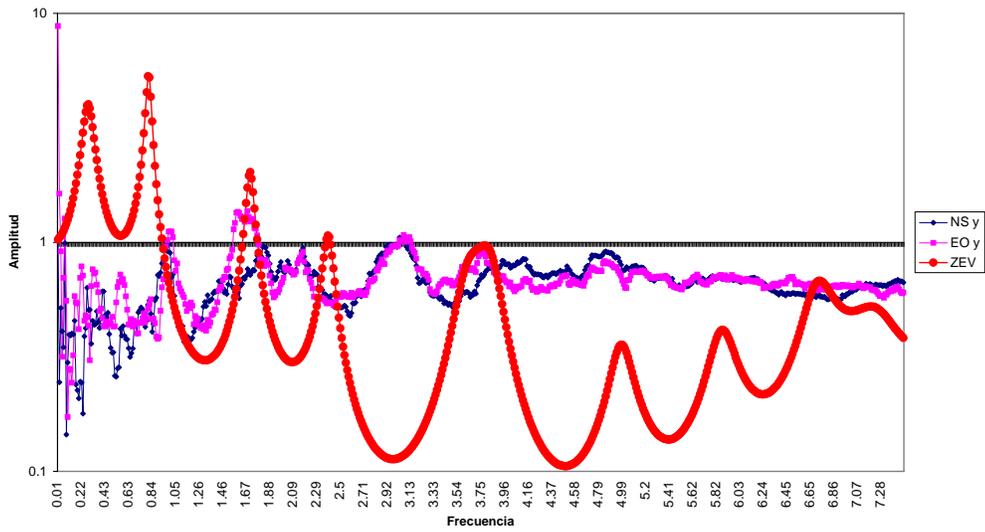


Figura 5.1. e) Sobreposición de espectros

En la tabla 5.1 se muestran los datos de los sitios seleccionados. En dicha tabla se puede observar los pozos en los que se tienen registros de la estratigrafía y en la carta: localización de sitios para medición (figura 5.2) se puede observar gráficamente tanto la posición de los sitios en los que se conoce la estratigrafía como en los que no. En todos los sitios se efectuaron mediciones de vibración ambiental.

Tabla 5.1 Datos de pozos de la ciudad de Irapuato (proporcionados por el organismo operador JAPAMI).

No. de pozo	Ubicación	Coordenadas		Resultados de lecturas de Frecuencias			Frec. selecc.	Periodo	Pozos con Estratigrafía
		X	Y						
1	La bola del Agua	255544.6151	2287141.022	2.4	2.05	2.32	2.32	0.43103448	No
3	El Convento	255554.3061	2287664.854	1.07	1.39	2	1.39	0.71942446	No
7	Av. Infiernillo y C.F.E. Col. C.F.E.	255496.7312	2290188.274	1.65	1.79		1.65	0.60606061	No
8	Colonia las Rosas	254831.3294	2290059.825	1.68	1.31		1.68	0.5952381	Si
10	Col. Los Eucaliptos	255156.1937	2289719.794	1.2	1.07	2.23	1.2	0.83333333	No
13	Fracc. Los Presidentes	253845.9014	2287068.505	1.53	1.46		1.46	0.68493151	No
14	Calle Zacatecas	253102.4685	2287520.805	1.03	1.2	0.803	1.03	0.97087379	No
28	C.Girón y M.Mendivil fracc.Cd. Deport.	252385.3947	2290029.133	1.27	4.65	3.17	4.65	0.21505376	No
31	Prol. Col. La Moderna	254184.5174	2288265.799	3.03	5.61	1.27	1.27	0.78740157	Si
34	Col. Irapuato	255579.9597	2286300.612	4.69	5.7	1.31	1.31	0.76335878	Si
38	Col. Lázaro Cárdenas	257733.0466	2287990.022	1.09	1.15	2.69	1.15	0.86956522	No
41	Col. C.F.E.	255919.2737	2290473.896	2.1	2.7	1.34	1.34	0.74626866	Si
44	Villas de Irapuato	248783.1591	2289252.486	8.65	3.32	8.3	8.3	0.12048193	No
45	Rafael Abascal	252756.1364	2287043.086	1.28	2.62	2.1	2.1	0.47619048	No
46	Col. Los Cobos	252915.0846	2291128.535	4.03	2.53	4.08	4.03	0.24813896	Si
47	Fracc. Alamos	253519.1227	2285538.861	2.14	1.62	1.73	1.73	0.57803468	No
50	Villas de Irapuato	249273.527	2288847.172	3.77	5.18	5.88	5.18	0.19305019	No
55	Col. Las Carmelitas	255910.6266	2285222.124	2.57	1.35	3.21	2.57	0.38910506	Si
56	Plazuela Hidalgo	255547.7699	2287977.11	2.16	1.43		1.43	0.6993007	Si
59	Fracc. Las Palmas	254515.2607	2286847.428	2.01	1.05		1.05	0.95238095	No
60	Colonia San Pedro	253204.89	2288040.376	3.76	3.15	3.74	3.74	0.26737968	No
61	Calle San Juan	256160.9942	2286679.239	2.37	9.15	7.09	7.09	0.14104372	No
63	Fracc. Las aguilas	252756.7788	2286423.79	1.17	1.32	1.67	1.32	0.75757576	No
66	Hacienda del Carrizal	256343.3736	2289981.879	1.05	3.05	2.19	1.05	0.95238095	Si
68	Bld.Manuel Morín	252403.1005	2288077.343	4.41	2.23	1.81	2.23	0.44843049	No
70	Bld. Arandas Fracc. Las Plazas	254070.9965	2290616.832	1.12	1.31	1.46	1.31	0.76335878	No
75	Colonia las Américas	254278.8406	2291610.016	2.85	1.89	4.02	2.85	0.35087719	No
78	Quinta Villas	252162.8565	2288326.976	2.5	1.67	1	1.67	0.5988024	Si
79	Alameda y jard. De Sn Antonio	253211.2743	2292329.509	5.33	5.24	6.84	5.33	0.18761726	No
80	Quintas Sn. Joaquin	256335.6878	2283610.656	3.19	3.73	3.19	3.19	0.31347962	Si
82	Fracc. Colón 3a. Sección	256472.4369	2285615.766	3.27	0.89	0.8	0.89	1.12359551	Si
83	Fracc. Las Heras	252915.6726	2288838.951	3.52	3.71	4.64	3.71	0.26954178	Si
84	Col. Tabachines	253910.312	2289927.695	4.56	1.42	1.85	1.85	0.54054054	Si
S.1	Poz Floresta	256367.6162	2284632.067	0.87	0.98	1.46	0.98	1.02040816	No
S.2	Hacienda la virgen(Inst.anteriores de feria)	256993.6395	2285770.226	3.05	2.27	1.88	1.88	0.53191489	No
S.3	Pozo Valle del sol	255545.6715	2285895.758	2.24	1.8	2.25	2.25	0.44444444	No
S.4	Fracc. El Zapote Av. Unión	251463.8592	2285930.979	4.13	1.38	1.02	1.38	0.72463768	No
S.5	Puente de Guadalupe	256311.4131	2287121.714	0.74	2.06	0.83	0.83	1.20481928	No
S.6	Lomas de Española	252433.0679	2290602.838	4.99	3.97	2.59	3.97	0.25188917	No
S.7	Paseo de la fund. Y Mirador del valle Villas	250329.3744	2289653.788	18.2	16.7	13.1	16.7	0.05988024	No
S.8	Centro Expositor	256679.1774	2292785.295	1.39	0.72		1.39	0.71942446	No
S.9	Colonia Juárez	254317.9234	2291282.985	1.9	3.14	2.65	2.65	0.37735849	No
S.10	Hotel Posada de Belén	257962.7749	2286765.487	1.12	2.49	1.1	1.12	0.89285714	No
S.11	Esc. Niños Héroes	255250.5232	2289177.976	1.98			1.98	0.50505051	Si
S.12	Colonia Los Fresnos	252786.1845	2285872.725	5.82	5.74	4.47	1.16	0.86206897	Si

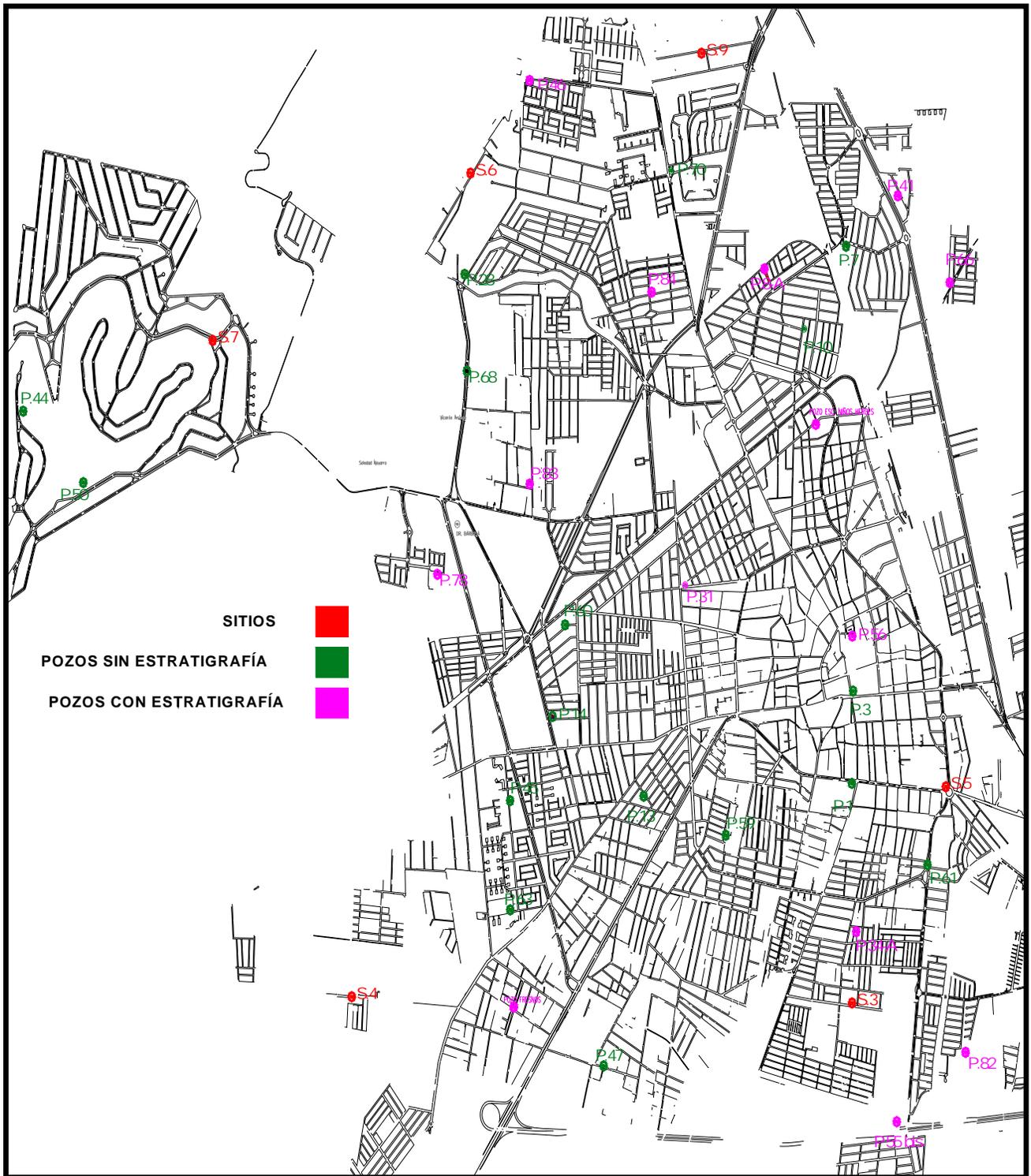


Figura 5.2. Localización de sitios para medición

## 5.2. Carta de isoperíodos para la ciudad de Irapuato, Gto.

Los resultados de la interpretación de los datos obtenidos, (períodos y coordenadas de los sitios) se muestran en la tabla 5.1. La graficación de estos valores origina la carta de isoperíodos de la ciudad de Irapuato, Gto. (figura 5.3). En ésta se observa la distribución de los isoperíodos sobre el plano del municipio. La variación de los valores obtenidos va desde 0.1 s hasta 1 s se grafican en intervalos de 0.1 s.

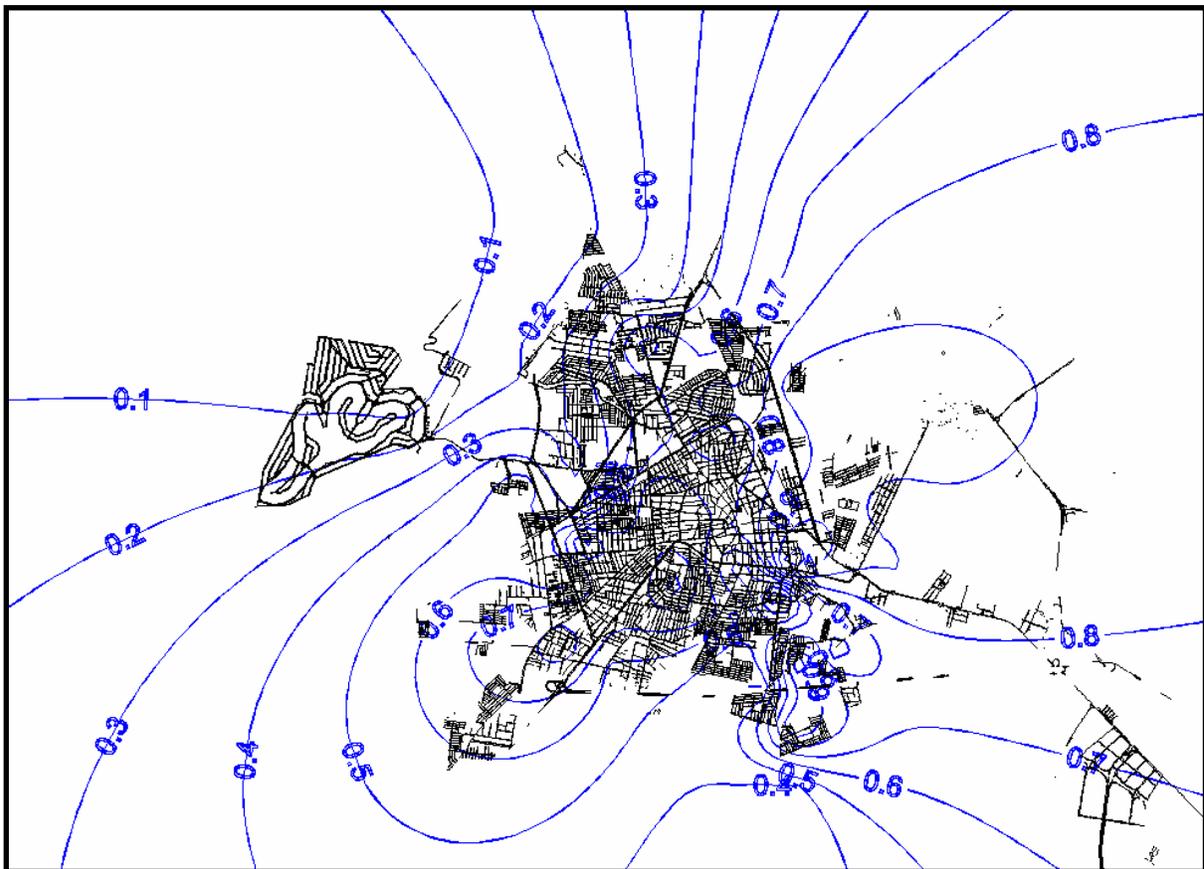


Figura 5.3. Carta de Isoperíodos

### 5.3. Carta de microzonación sísmica y espectros de diseño para la ciudad de Irapuato, Gto.

En la carta 5.4 aparece la microzonación sísmica del municipio, para su determinación se tomó como base el criterio para obtener la zonación que se hace en el reglamento del D.F. (Ordaz 2003 aspectos generales del diseño por sismo conferencia magistral), donde se considera como suelo tipo I al que presenta periodos menores a 0.5 s y suelo tipo II a los de período mayor o igual de 0.5 s y hasta 1 s.

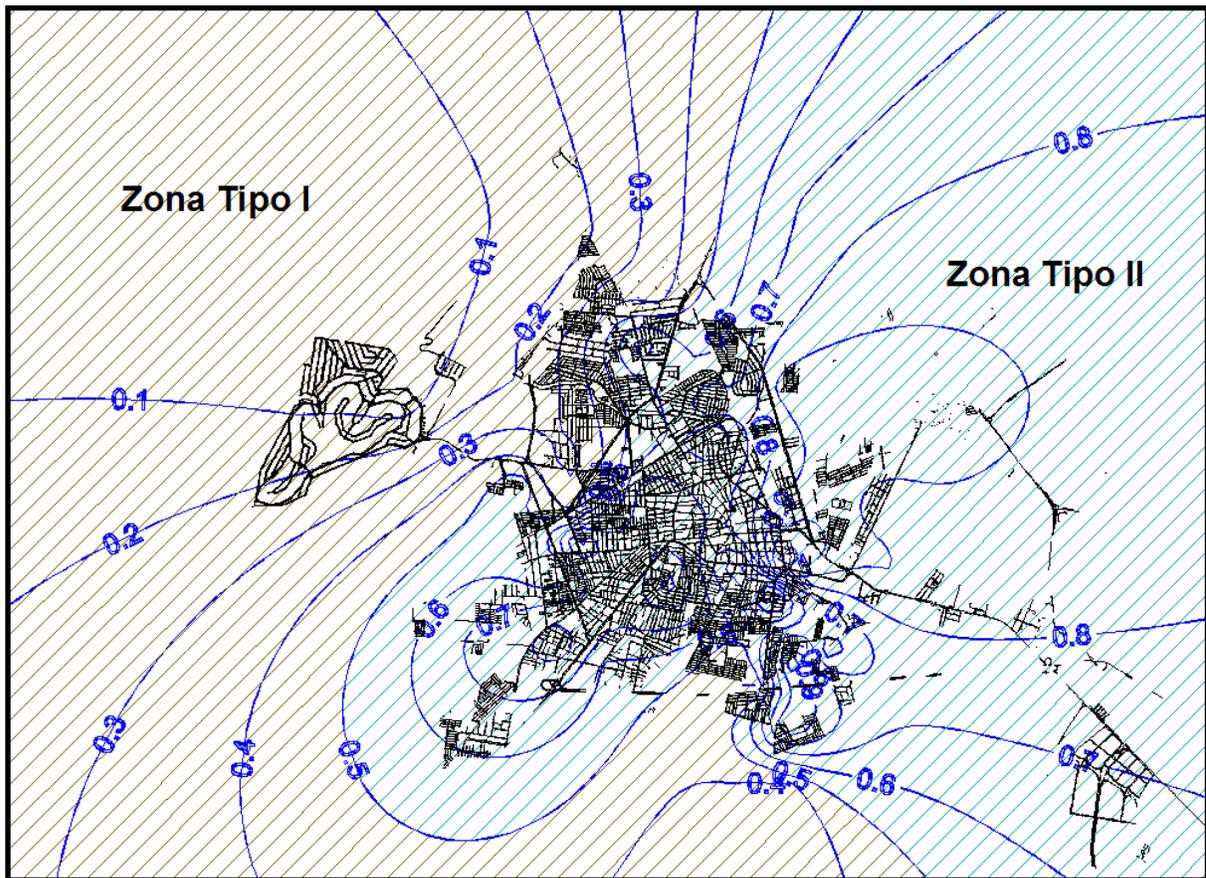


Figura 5.4. Microzonación sísmica de la ciudad de Irapuato

Como se mencionó en el capítulo 1 los valores del espectro se consideran altos por las causas ya expuestas en el mismo capítulo, por lo que se recomienda realizar una adaptación a los valores del espectro que aparece en la edición anterior del mismo manual de C.F.E. para suelos tipo I y II . Los valores propuestos para los espectros mencionados se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Ajuste de datos de los espectros del manual de C.F.E.

Zona	$c$	$a_0$	$T_a$	$T_b$	$r$
I	0.14	0.04	0.2	0.6	1 / 2
II	0.2	0.08	0.3	1.5	2 / 3

La adaptación que se hace, es un ajuste en los valores de los períodos que definen la meseta del espectro, esto con la finalidad que exista congruencia con las especificaciones y fórmulas del manual de C.F.E.1993.

El manual de diseño de obras civiles de C.F.E. de 1993, incrementó los valores del espectro para suelos tipo II y los redujo para el tipo I con respecto a la edición anterior, por lo que se propone un ajuste de la siguiente manera: para suelos tipo I usar los valores de la edición de 1993 y para los suelos tipo II usar los valores de la edición anterior.

Con lo anterior las ordenadas espectrales se ajustan a 0.14 como mínimo y 0.2 como máximo. La comparación de los espectros se aprecian en la figura 5.5.

#### 5.4. Parámetros para la obtención de los espectros de sitio.

Las tendencias futuras del diseño por sismo apuntan hacia la obtención de los espectros de sitio.

Este criterio toma en cuenta no sólo los parámetros del lugar dónde se construirá la estructura sino también las características de ésta, así como su importancia.

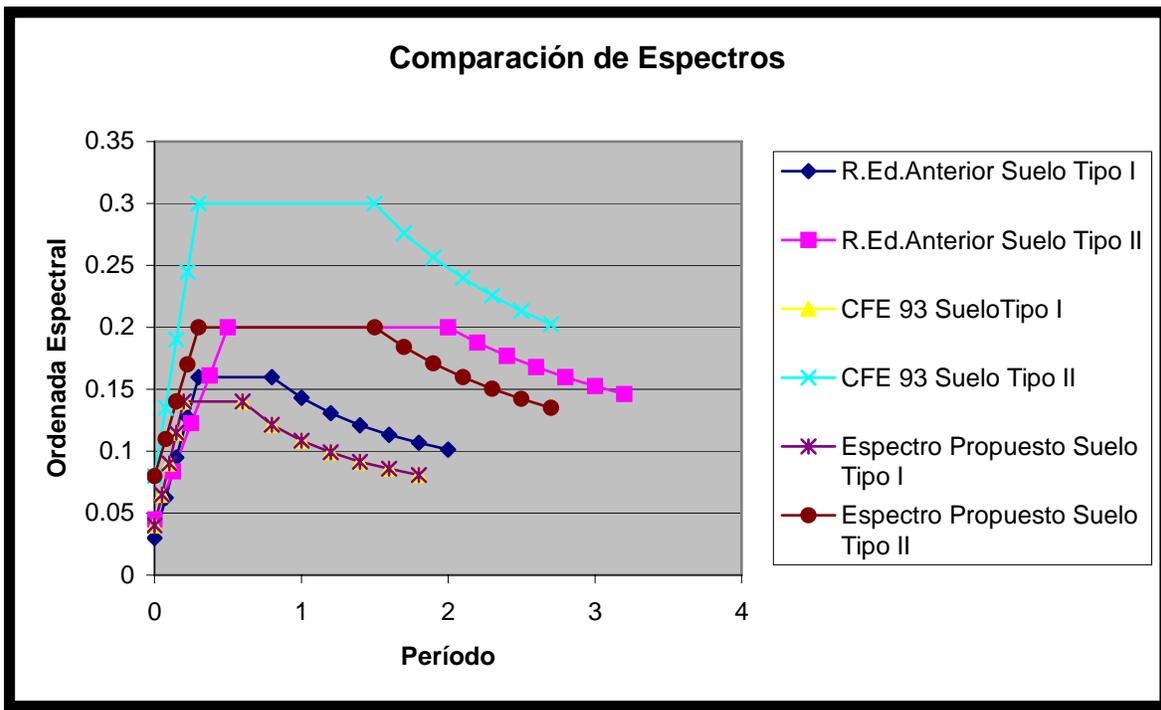


Figura 5.5 Comparación de Espectros

Cuando la importancia de la estructura imponga la necesidad de efectuar pruebas y mediciones específicas para el sitio los valores obtenidos serán los que rijan el diseño. Sin embargo cuando se desee efectuar un análisis en base a los espectros de sitio y no sea factible realizar pruebas de campo, se podrán utilizar los parámetros mencionados en el inciso 5.2.

Otro importante parámetro requerido es la profundidad que tiene el estrato sólido. Hasta ahora en el municipio de Irapuato no se han efectuado estudios destinados específicamente para tal fin; sin embargo con los datos de la estratigrafía de los pozos que se tienen fue posible obtener una representación teórica muy aproximada del relieve del basamento. Este dato y el período del suelo son necesarios para la determinación del espectro del sitio. Para este propósito pueden ser útiles los datos de la tabla 5.3

La gráfica del relieve aproximado del basamento se muestra en la carta de la profundidad basal aproximada figura 5.6. Dicha gráfica se obtuvo con los valores de las profundidades y clasificación geológica para los pozos con estratigrafía dados en la tabla 5.3 y el programa *surfer*.

Tabla 5.3 Sitios con datos de profundidad basal, peso específico y velocidad de propagación de ondas de cortante

No. de pozo	Ubicación	Coordenadas		Profundidad Z (m)	Peso Especifico $\gamma_s$	V. de Propagación Vs
		X	Y			
8	Colonia las Rosas	254831.3294	2290059.825	181	2.17	---
31	Prol. Col. La Moderna	254184.5174	2288265.799	238	---	---
34	Col. Irapuato	255579.9597	2286300.612	162	2.17	---
41	Col. C.F.E.	255919.2737	2290473.896	150	1.40	579
46	Col. Los Cobos	252915.0846	2291128.535	38	1.93	457
55	Col. Las Carmelitas	255910.6266	2285222.124	34	1.93	457
56	Plazuela Hidalgo	255547.7699	2287977.11	228	1.40	579
66	Hacienda del Carrizal	256343.3736	2289981.879	62	1.93	457
78	Quinta Villas	252162.8565	2288326.976	124	1.40	579
80	Quintas Sn. Joaquin	256335.6878	2283610.656	42	1.93	457
82	Fracc. Colón 3a. Sección	256472.4369	2285615.766	220	1.40	579
83	Fracc. Las Heras	252915.6726	2288838.951	138	1.93	457
84	Col. Tabachines	253910.312	2289927.695	160	---	---
S.11	Esc. Niños Héroes	255250.5232	2289177.976	152	---	---
S.12	Colonia Los Fresnos	252786.1845	2285872.725	226	---	---

La localización de los pozos tiene una dispersión adecuada en toda la ciudad como puede apreciarse en la figura 5.2 ,sin embargo debe recalcar que esta carta del basamento es teórica y útil para fines de diseño sísmico.

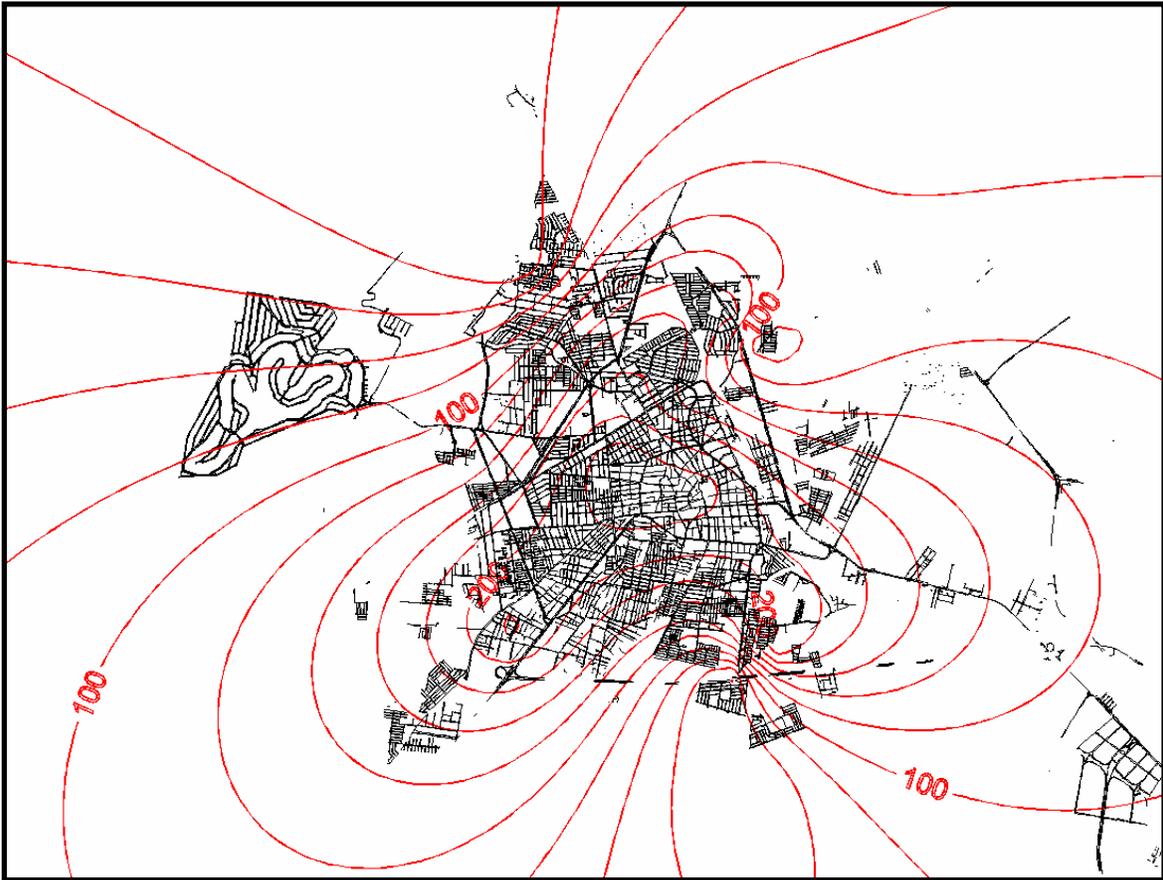


Figura 5.6  
Gráfica de la representación teórica de la profundidad basal

En el apéndice A-2 y A-3 se pueden consultar las gráficas con el período dominante del suelo y la estratigrafía para cada pozo de los 15 en que se tiene la estratigrafía, en el apéndice A-4 se localizan las gráficas a una escala más conveniente de las cartas obtenidas: Localización de sitios, Carta Geológica, Isoperíodos, Zonación sísmica y Profundidad basal aproximada.

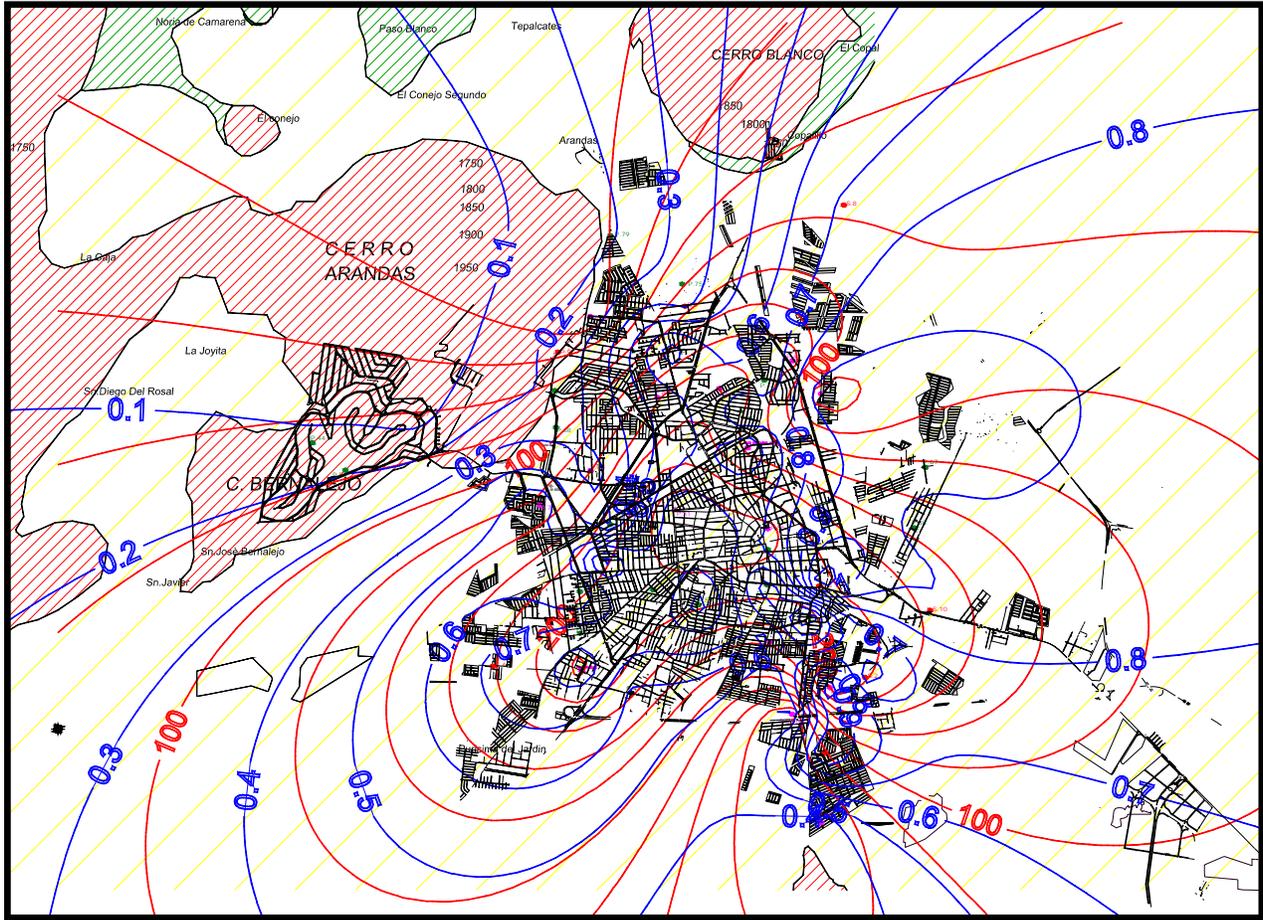


Figura 5.7  
 Carta de Microzonación Sísmica, Geología y Basamento

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos por el método de vibración ambiental previamente calibrados con las técnicas semiempíricas de Zeevaert, la interpretación de la geología local así como el relieve del basamento somero fue posible la elaboración de las cartas de isoperíodos y de microzonación sísmica de la ciudad de Irapuato en un tiempo relativamente inmediato.

La calibración efectuada por medio del método semiempírico de Leonardo Zeevaert ofreció en la mayoría de los casos, resultados aproximadamente coincidentes con los resultados obtenidos por vibración ambiental.

Es recomendable ampliar la zonación de la ciudad a todo el municipio.

El manual de diseño de obras civiles de C.F.E. es aplicable en la Ciudad de Irapuato para las zonas con períodos menores a 0.5s que corresponden a suelos tipo I de dicho manual, así como a las zonas con períodos mayores o iguales a 0.5 y hasta 1.0 que corresponden a terrenos tipo II.

La carta de zonación sísmica, las curvas de iso-periodos y los espectros de diseño del manual de la CFE, adoptados para la Ciudad de Irapuato, tratados en este trabajo de investigación, proporcionan un sustento en la determinación del espectro de sitio y, en general, un soporte para el diseño sísmico de las construcciones en la cd. de Irapuato. Por otro lado, los resultados de este trabajo podrán servir de base para las actualizaciones futuras de la normatividad local. Se recomienda continuar realizando estudios del subsuelo y de la respuesta del terreno in situ, ante eventos sísmicos reales.

Como era de esperarse existe una gran coincidencia entre las curvas del basamento somero con las curvas de isoperíodos, como puede observarse en los resultados de esta investigación.

## LITERATURA CITADA

Consejo de Recursos Minerales, 1997, Carta Geologico-Minera Guanajuato F14-7, escala 1:250 000, primera edición.

Martínez-Reyes, Juventino, 1992, Mapa Geológico de la Sierra de Guanajuato con Resumen de la Geología de la Sierra de Guanajuato: Univ. Nal. Autón. de México, Instituto de Geología, Serie Cartas Geológicas y Mineras, No. 8.

Perea Tiziano y Esteva Luis 2003, "Análisis de la componente vertical de registros sísmicos en México", Artículo I-04, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Aguirre Jorge 2003, "Caracterización de los parámetros de los sismos de subducción Mexicanos para la predicción de movimientos fuertes del terreno", Artículo I-06, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Magaña Roberto, Mateos Santiago y Romo Miguel 2003, "Estudio comparativo de sismos sintéticos compatibles con espectros de respuesta y de diseño con sismos reales", Artículo I-09, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Luzón Francisco, Sánchez Francisco, Pérez Alfonso y Ramírez Leonardo 2003, "Simulación de la respuesta sísmica de cuencas sedimentarias con variación vertical de la velocidad de propagación de ondas P y SV", Artículo I-13, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Chavacán Marcos y Lermo Javier 2003, "Sismicidad reciente al sur de la cuenca de México, sierra del chichinautzin", Artículo I-19, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Veras Leonardo y Huerta Benjamín 2003, “Experiencias usando resultados de análisis de vibración ambiental para el calculo de espectros de sitio”, Artículo II-07, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Trujillo Guadalupe, Williams Francisco, Lermo Javier, Torres Gilbert y Leyva Regino 2003, “Microzonificación sísmica de la zona conurbana Veracruz-Boca del río”, Artículo II-09, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Daniel Vega y Lermo Javier 2003, “Revisión de estudios de efectos de sitio realizados para diferenciar zonas urbanas de México”, Artículo II-10, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Abeki Norio, Mazaki Kazuaki, Balderas Isaac, Medrano Rodolfo, Martínez Samuel, Amador Pablo y Gil Alejandro 2003, “A report on the refraction tests ground microtremors observations on the ground to estimate seismic characteristics in Tehuacan city”, Artículo II-11, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Vazquez Ricardo, Aguirre Jorge, Mijares Horacio, Garduño Víctor y Arreygue Eleazar 2003, “Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan”, Artículo II-12, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Arroyo Moisés, Pérez Hugo, Rojas Eduardo, Herrera William, Zermeño Mario, Zúñiga Ramón, Martinez Juventino y Arzate Jorge 2003, “Zonificación sísmica de las poblaciones mas importantes en el valle de Aguascalientes, Ags.”, Artículo II-13, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Avilés Javier 2003, "Comentarios a las nuevas disposiciones reglamentarias para interacción dinámica suelo-estructura" (conferencia magistral), XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Ordaz Mario 2003, "Aspectos generales del diseño por sismo" (conferencia magistral), XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Gómez Alejandro 2003, "Presentación de un modelo matemático para el cálculo del periodo fundamental de vibración en suelos estratificados con capacidad de predecir efectos de amplificación o atenuación dinámica" (conferencia magistral), XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Mena Ulises, Pérez Eduardo y Aviles Javier 2006 "Espectros de diseño sísmico para el territorio Mexicano", Artículo 2-29, XV Congreso Nacional de ingeniería estructural, Puerto Vallarta, México.

Nakamura Yutaka 2000, "clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications"

CFE, Comisión Federal de Electricidad, 1993, "Manual de diseño de obras civiles, diseño por sismo", Instituto de investigaciones eléctricas.

Zeevaert Leonerdo 1980, "Interacción suelo-estructura de cimentación", Editorial Limusa, México.

Colindres Selva Rafael 1993, "Dinámica de suelos y estructuras", Editorial Limusa, México.

## APENDICE

### A-1 Estratigrafía de pozos.

Nombre: fraccionamiento las rosas

Pozo No 8

Localización: X: 254831.3294

Y: 2290059.8249

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELOS	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	Arcilla	B-A
0	9	Arena Arcillosa	9
9	30	Arena fina a media	21
30	66	Gravas fina de tipo ácido con aparentes intercalaciones de depósitos la custres arcillosos en la base	36
66	81	arcilla arenosa	15
81	99	Gravilla tipo ácida	18
99	168	Gavas ácidas y Gravillas con intercalaciones de derrames ácidos en la base	69
168	174	Gravas gruesas y boleos ácidos	6
174	181	derrames básicos fracturados (basaltos andesíticos) con diferentes grados de fracturamientos	7
181	232	Basaltos andesíticos sanos	51
232	261	derrames básicos fracturados (basaltos andesíticos) con diferentes grados de fracturamientos	29
261	300	Arcilla arenosa	39

Nombre: V. Fuentes Col. Moderna

Pozo No 31

Localización: X: 254184.5174

Y: 2288265.7989

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLAS	B-A
0	4	Arcillas	4
4	10	Limo y arcillas con escasas gravas	6
10	24	Gravillas empacadas en arenas y limos	14
24	42	Conglomerado	18
42	60	Limo y arcillas con escasas gravas	18
60	78	Boleos inestables	18
78	100	Conglomerado	22
100	128	Boleos inestables	28
128	138	Conglomerado	10
138	174	Boleos inestables	36
174	196	Conglomerado	22
196	238	Toba híbrida de tipo riolítico	42
238	264	Basalto de tipo vesicular	26

Nombre: Calle Mora Col. Irapuato  
 Localización: X: 255579.9597 Y: 2286300.6123

Pozo No 34

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	18	Sedimentos limo arenosos	18
18	69	conglomerado con matriz limoarenosa cementado	51
69	132	Gravas compactadas en sedimentos areno-limosos. (puede construir un conglomerado)	63
132	162	Conglomerado con cementante arcillo arenoso.	30
162	240	Basalto principalmente fracturado	78
240	258	Basalto vesículas fracturado	18
258	300	Basalto masivo parcialmente fracturado	42

Nombre: Malpaso Col. CFE  
 Localización: X: 255919.2737

Y: 2290473.8955

Pozo No 41

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	2	Arcilla-suelo	2
2	6	Arcilla-arena	4
6	10	Arcilla-grava	4
10	18	arcilla	8
18	38	arena	20
38	42	arena gruesa	4
42	48	arena fina	6
48	50	arena de grano fino o medio	2
50	56	arena de grano medio	6
56	58	Grava y arena en arcilla	2
58	60	Grava y arena en arcilla	2
60	62	Grava y arena en arcilla	2
62	64	Arena y arcilla	2
64	88	Grava y arena en arcilla	24
88	96	Arena y Grava	8
96	104	Arena y arcilla	8
104	106	Arena y Arcilla poca grava	2
106	108	Arena y arcilla	2
108	116	Roca ígnea extrusiva (toba)	8
116	118	Roca ígnea extrusiva (toba)	2
118	120	Arcilla	2
120	126	Arcilla y arena	6
126	128	Arcilla	2
128	130	Arcilla y Grava	2
130	138	Arcilla	8
138	140	Arcilla, arena y grava	2
140	148	Arcilla, arena y grava	8
148	150	Arcilla, arena y grava	2
150	152	Basalto	2
152	164	Basalto	2
164	168	Basalto	4
168	176	Basalto	8
176	204	Basalto	28
204	206	Aglomerado volcánico tezontle	2

206	212	Grava y arena	6
212	218	Arcilla y arena	6
218	222	Arenas y arcillas	4
222	230	Arenas	8
230	236	Arenas gruesas	6
236	256	Grava y arena en arcilla	20

Nombre: Colonia los Cobos  
 Localización: X: 252915.0846

Y. 2291128.5354

Pozo No 46

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	2	Arcilla Negra (suelo)	2
2	6	Basalto	4
6	8	Basalto alterado	2
8	12	Basalto	4
12	14	Basalto alterado	2
14	20	Arena volcánica color verde olivo y café	6
20	28	Arena volcánica color verde olivo	8
28	30	Arena volcánica color verde olivo y café claro	2
30	38	Arena volcánica color verde olivo y rojo	8
38	48	Basalto	10
48	60	Basalto alterado	12
60	66	Basalto	6
66	70	Basalto alterado	4
70	74	Basalto	4
74	78	Basalto alterado	4
78	84	Toba de color negro y café claro	6
84	88	Toba de color café oscuro	4
88	90	Arena volcánica negra	2
90	96	Toba y arena volcánica de color café	6
96	100	Arena volcánica negra	4
100	102	Basalto	2
102	110	Basalto alterado	8
110	116	Basalto	6
116	120	Basalto alterado	4
120	124	Basalto	4
124	128	Basalto alterado	4
128	138	Basalto	10
138	144	Basalto alterado	6
144	148	Basalto	4

148	152	Basalto alterado	4
152	158	Basalto	6
158	166	Basalto alterado con tezontle	8
166	216	Basalto alterado	50
216	228	Gravas y arenas	12
228	236	Gravas, arenas y arcillas	8
236	248	Arenas, arcillas y poca grava	12
248	258	Gravas , arena y arcillas	10
258	268	Gravas y arenas	10
268	272	Gravas y poca arena	4
272	294	Gravas y arenas	22
294	298	Gravas	4
298	300	Gravas y arenas	2
300	308	Arena gruesa media y fina y poca grava	8
308	314	Gravas, arena gruesa, media y fina.	6

Nombre: Carmelitas Nuevo  
 Localización: X: 255910.6266

Y: 2285222.1238

Pozo No 55

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLAS	B-A
0	8	Boleos	8
8	18	Colada de Basaltos	10
18	34	Conglomerados	16
34	50	Basaltos	16
50	70	Conglomerados	20
70	86	Basaltos	16
86	158	Conglomerado con matriz silícica	72
158	174	Basalto parcialmente fracturado	16
174	214	Basalto de tipo masivo sano	40
214	228	Basalto fracturado	14
228	280	Basalto de tipo masivo sano	52
280	300	Toba híbrida arcillo arenosa	20

Nombre: Plazuela Hidalgo  
 Localización: X: 255547.7699

Y: 2287977.1095

Pozo No 56

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPELOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	8	Gravas	8
8	16	Arcillas	8
16	20	Gravas y arcilla	4
20	24	Arcilla	4
24	30	Arcilla y grava	6
30	36	Grava y arcilla	6
36	38	Grava gruesa	2
38	42	Arena y grava	4
42	44	Arena y arcilla	2
44	46	Grava empaca en arcilla	2
46	66	Arcillas y arenas	20
66	92	Gravas empacadas en arcilla y arena	26
92	106	Arcillas con poca grava	14
106	110	Arcillas y arenas con poca grava	4
110	114	Arcilla, arena y grava	4
114	120	Grava, arena y arcilla	6
120	128	Arcillas, arena y grava	8
128	134	Grava, arena y arcillas	6
134	142	Arcilla, arena y grava	8
142	150	Grava, arena y arcilla	8
150	152	Arcilla, arena y grava	2
152	156	Grava, arena y arcilla	4
156	166	Grava y arena	10
166	168	Grava con poca arena	2
168	172	Grava	4
172	178	Gravas con poca arena	6
178	182	Grava y arena	4
182	196	Arcilla, arena y grava	14
196	198	Grava y arena	2
198	200	Grava	2
200	204	Grava gruesa	4

204	206	Grava, gruesa y arena	2
206	222	Grava gruesa	16
222	226	Arcilla, arena y grava	4
226	228	Grava y arena	2
228	242	Roca ígnea intrusiva	14
242	248	Arcilla con poca arena	6
248	300	Arcilla	52

Nombre: Fracc. Hacienda Del Carrizal  
 Localización: X: 256343.3736

Y: 2289981.8788

Pozo No 66

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	8	Sedimentos limo arcillosos	8
8	20	Gravillas empacadas en arenas y arcillas	12
20	32	Arenas de grano medio a fino	12
32	50	Gravas con matriz arcillosa y cementante silicio. (conglomerado)	18
50	58	Arenas con grano medio con gravillas	8
58	62	Conglomerado	4
62	162	Basalto vesicular parcialmente fracturado	100
162	210	Toba riólica parcialmente fracturada	48
210	300	Roca ignea extrusiva intermedia a basica	90

Nombre: Quinta las villas  
 Localización: X: 252162.8565

Y: 2288326.9762

Pozo No 78

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPELOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	6	Sedimentos limo-arcillosos con escasas gravas	6
6	124	Conglomerado compuesto por clásticos de origen ígneo con cementante silícico	118
124	160	Roca ígnea extrusiva de composición básica	36

Nombre: Quinta # San Joaquín CD. De Irapuato

Pozo No 80

Localización: X: 226335.6878

Y: 2283610.6555

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLAS	B-A
0	2	Tierra vegetal	2
2	27	Sedimentos arcillosos con gravillas	25
27	42	conglomerado	15
42	47	Basalto vesicular	5
47	100	Gravas empacadas en sed. Areno limosos	53
100	175	Basalto masivo parcialmente fracturado	75
175	200	Sedimentos lacustres terciarios	25
200	211	Ignimbrita ácida	11

Nombre: Fracc. Colon, 3a Sección

Pozo No 82

Localización: X: 256472.4369

Y: 2285615,7662

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPELOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	2	Covertura vegetal	2
2	20	Gravillas empacadas en arenas y arcillas	18
20	52	Gravas con matriz arenolimososa y cementante silicico, constituye un conglomerante	32
52	84	Gravillas con arenas de grano medio	32
84	144	Conglomerado con cementate silicico	60
144	180	Arcillas y arenas con escasas gravas	36
180	204	Conglomerado con cementate silicico	24
204	220	Arcillas y arenas con escasas gravas	16
220	225	Basalto fracturado	5
225	230	Basalto vesicular	5
230	234	Basalto fracturado	4
234	250	Basalto vesicular	16
250	267	Basalto masivo	17
267	288	Basalto masivo parcialmente fracturado	21
288	306	Basalto fracturado	18
306	328	Basalto vesicular	22
328	350	Basalto fracturado	22

Nombre: Col. Las Heras  
 Localización: X: 252915.6726

Y: 2288838.9511

Pozo No 83

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	4	Cobertura vegetal	4
4	8	Arcillas	4
8	10	Gravas empacadas en sedimentos arcillosos	2
10	16	Arena con arcilla y escasas gravas	6
16	32	Conglomerado con matriz arcillosa	16
32	80	Arcillas y arenas con escasas gravas	48
80	90	conglomerado con cementante solicio	10
90	116	Toba riolítica parcialmente fracturada	26
116	138	conglomerado con matriz arcillo limosa	22
138	182	Basalto vesicular parcialmente fracturado	44
182	300	conglomerado terciario arcilloso	118

Nombre: Tabachines

Pozo No 84

Localización X: 253910.3249

Y: 2289927.6972

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPEJOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLAS	B-A
0	8	Arcillas	8
8	56	Conglomerado con matriz limoarcillosa	48
56	106	Conglomerado con matriz arenolimoso	50
106	110	Toba híbrida arcillo-arenosa	4
110	140	Toba riolítica de tipo vesicular	30
140	160	Toba riolítica de tipo vesicular	20
160	350	No se recuperaron muestras litológica	190

Nombre: Niños Héroes  
 Localización: X: 255250.5232

Y: 2289187.8226

Pozo No

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPEJOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	22	Toba	22
22	50	Conglomerado	28
50	66	Material areno-arcilloso	16
66	78	Material arcilloso	12
78	86	Material areno-arcilloso	8
86	94	Material arcilloso	8
94	96	Material areno-arcilloso	2
96	104	Toba litica	8
104	112	Toba	8
112	118	Toba litica	6
118	124	Toba	6
124	129	Toba litica	5
129	134	Toba	5
134	142	Toba litica	8
142	152	Toba	10
152	175	Basalto fracturado	23
175	200	Basalto alterado	25
200	214	Basalto fracturado	14
214	230	Basalto	16
230	253	Basalto fracturado	23
253	290	Toba litica	37
290	300	Conglomerado	10
300	310	Toba litica	10
310	350	Conglomerado	40

Nombre: Colonia Los Fresnos

Pozo No

Localización: X: 252786.1845

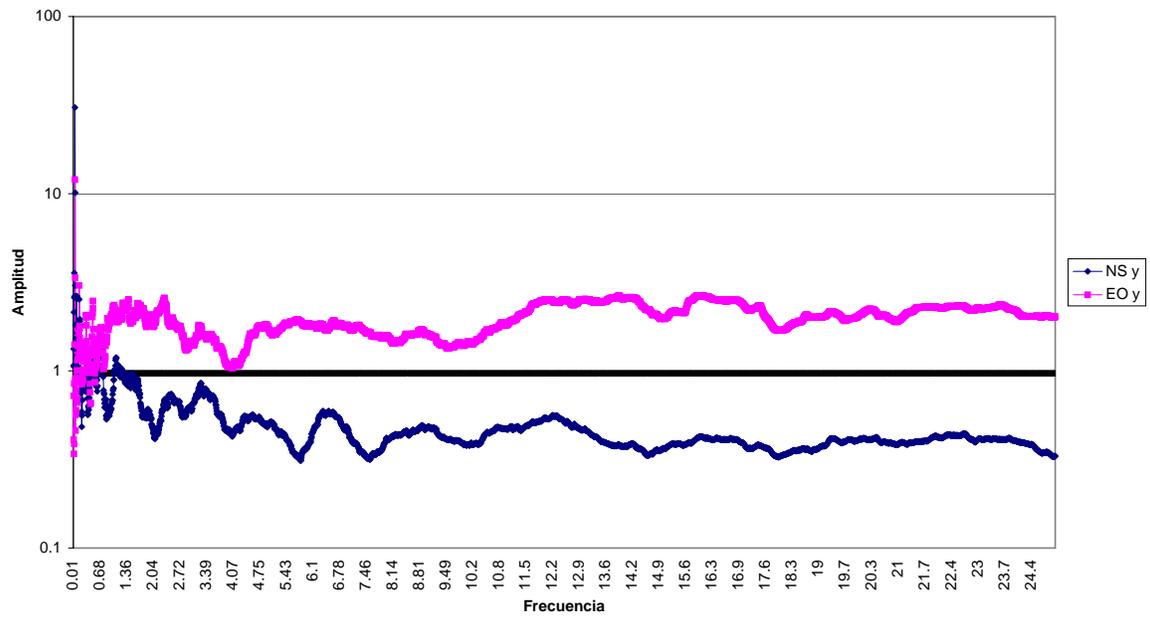
Y: 2285872.7246

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPEJOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	1	Tierra vegetal	1
1	16	Conglomerado	15
16	18	Toba litica	2
18	20	Conglomerado	2
20	26	Toba litica	6
26	32	Conglomerado	6
32	42	Material arenarcilloso	10
42	46	Gravas	4
46	50	Material arenarcilloso	4
50	56	Toba litica	6
56	60	Material arenarcilloso	4
60	62	Toba litica	2
62	64	Material arenarcilloso	2
64	70	Toba litica	6
70	76	Conglomerado	6
76	98	Toba litica	22
98	118	Conglomerado	20
118	128	Toba litica	10
128	134	Gravas gravillas	6
134	138	Toba litica	4
138	146	Material arenarcilloso	8
146	148	Material arenarcilloso	2
148	152	Toba litica	4
152	154	Toba	2
154	156	Toba litica	2
156	158	Toba	2
158	160	Material arenarcilloso	2
160	172	Toba litica	12
172	182	Conglomerado	10
182	226	Toba litica	44
226	242	Basalto alterado	16

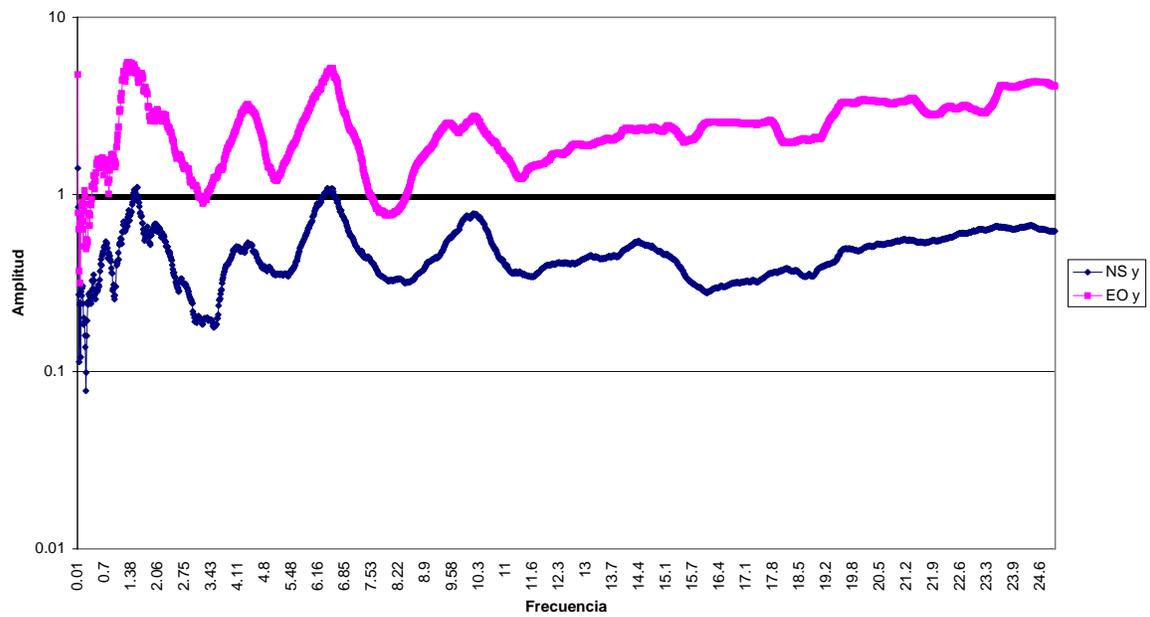
242	246	Basalto	4
246	248	Aglomerado	2
248	260	Basalto	12
260	272	Basalto fracturado	12
272	278	Toba litica	6
278	280	Basalto fracturado	2
280	300	Brecha	20

## A-2 Pozos y sitios sin estratigrafía.

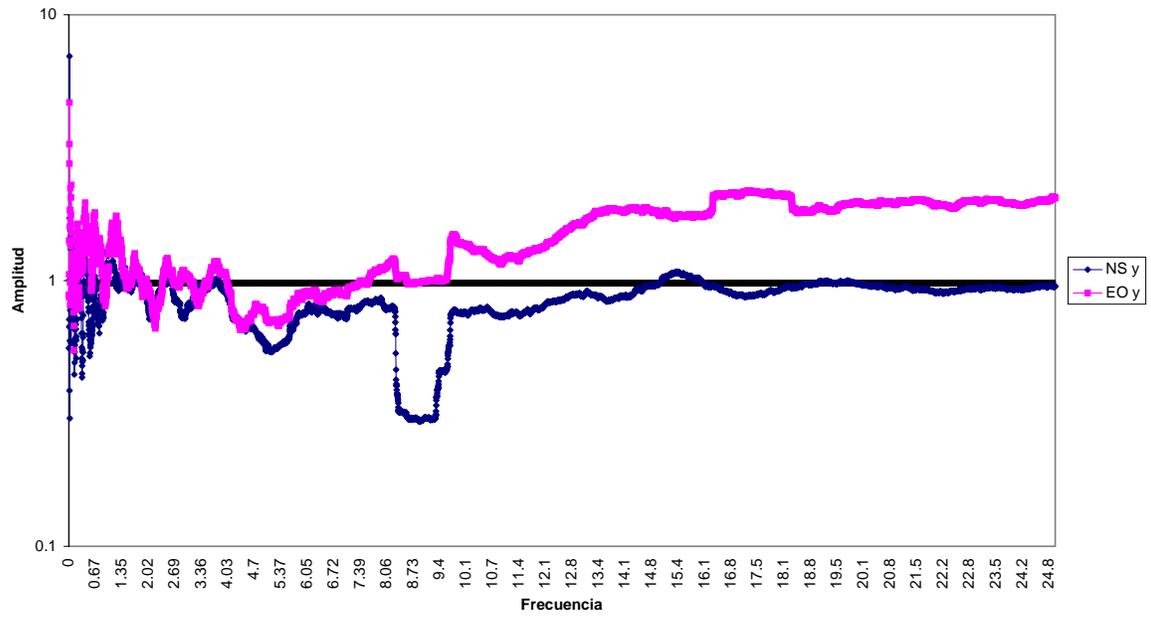
### Bola del Agua Pozo No. 1



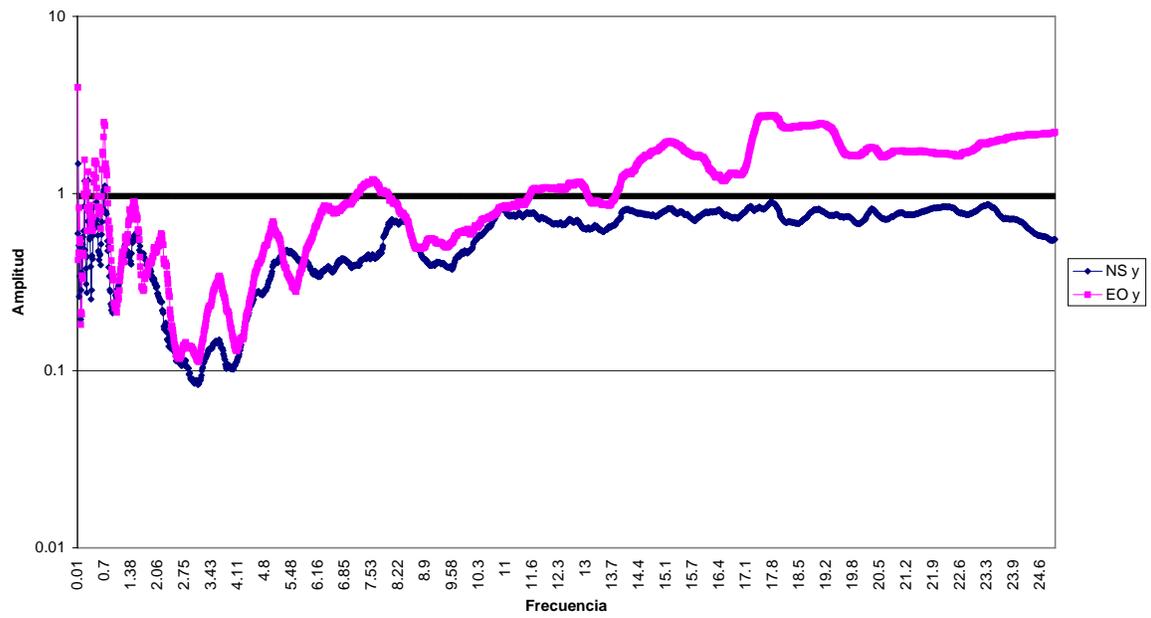
### El Convento Pozo No. 3



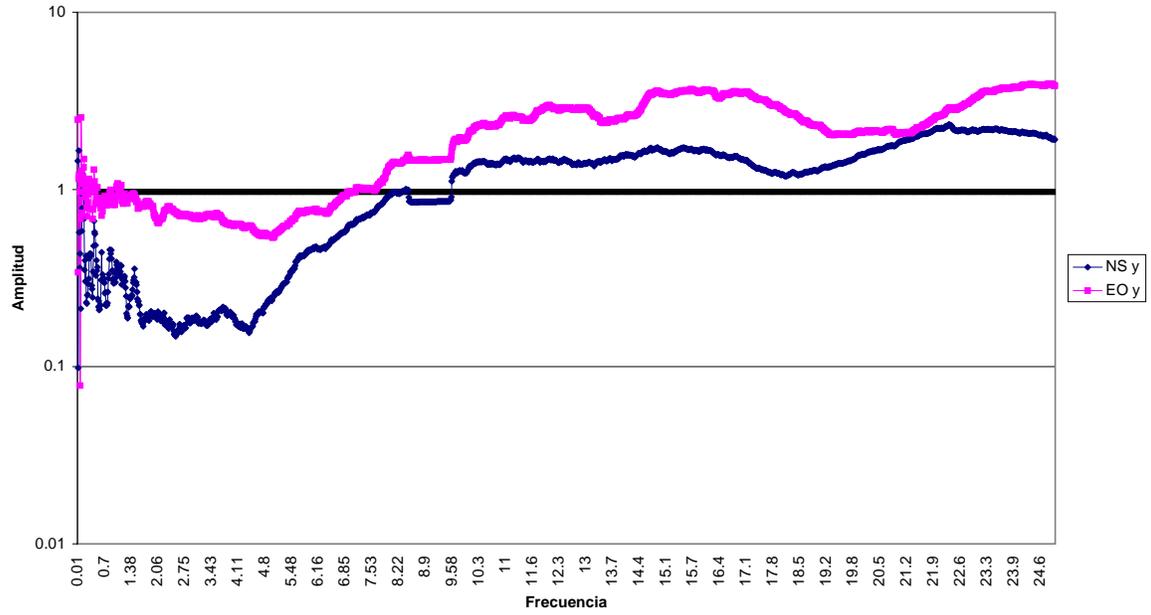
### Los Eucaliptos Pozo No. 10



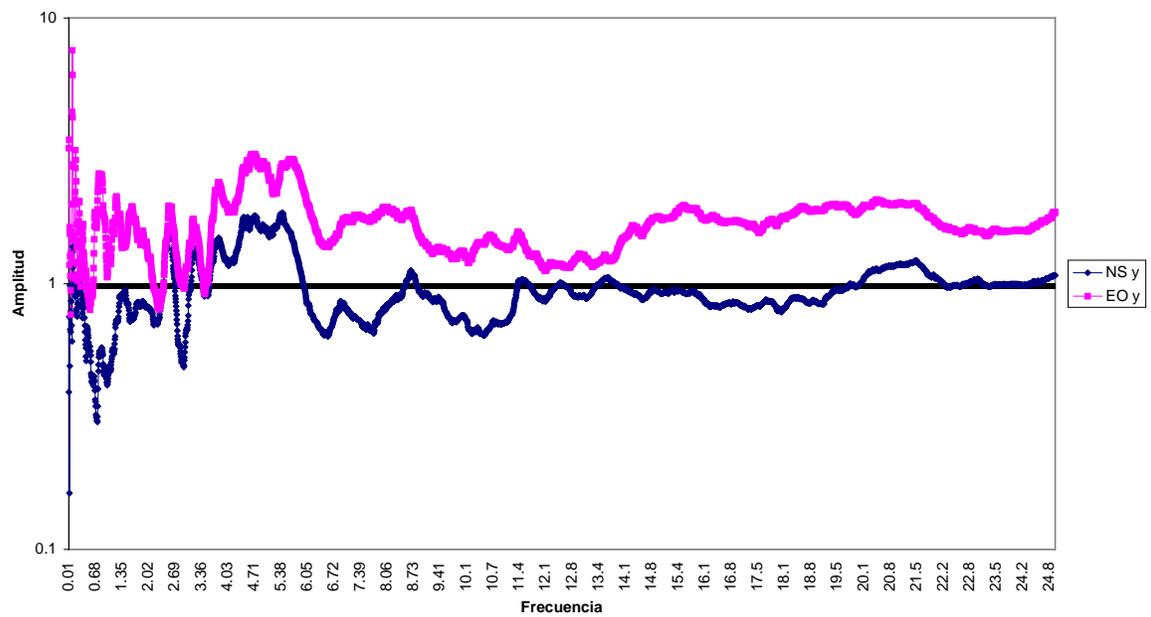
### Los Presidentes Pozo No. 13



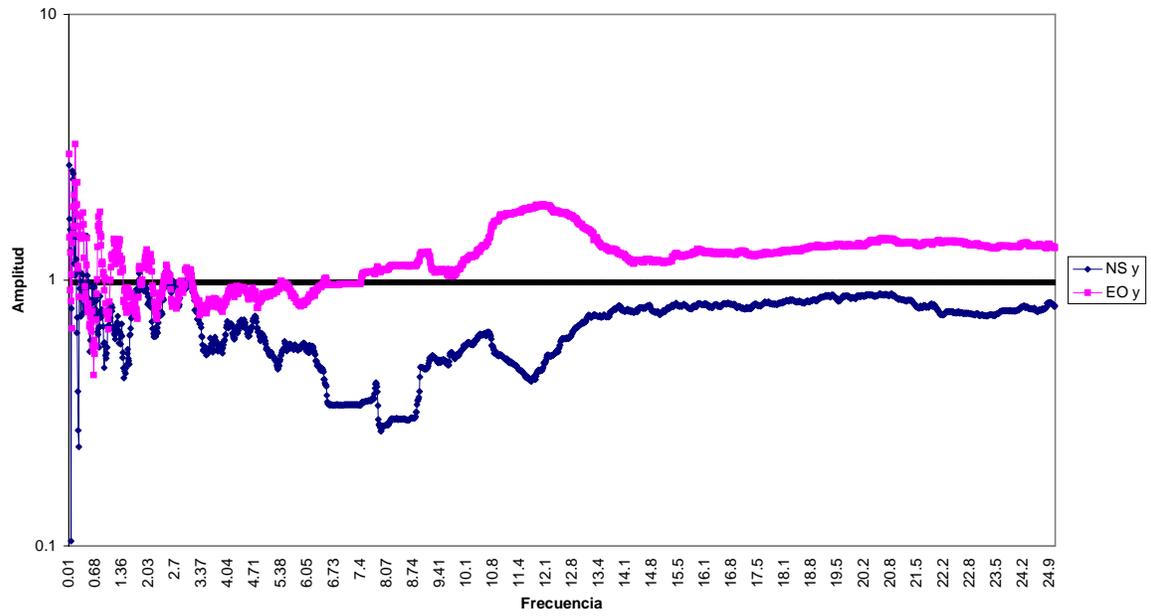
**Calle Zacatecas Pozo No. 14**



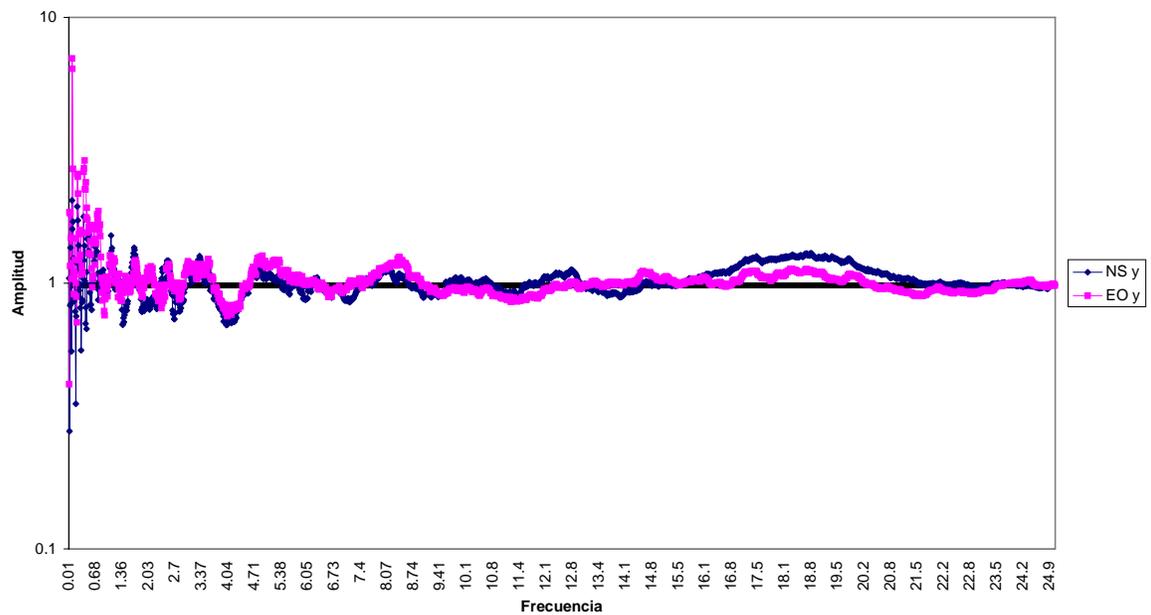
**C.Girón y M.Mendivil fracc.Cd. Deport. Pozo No. 28**



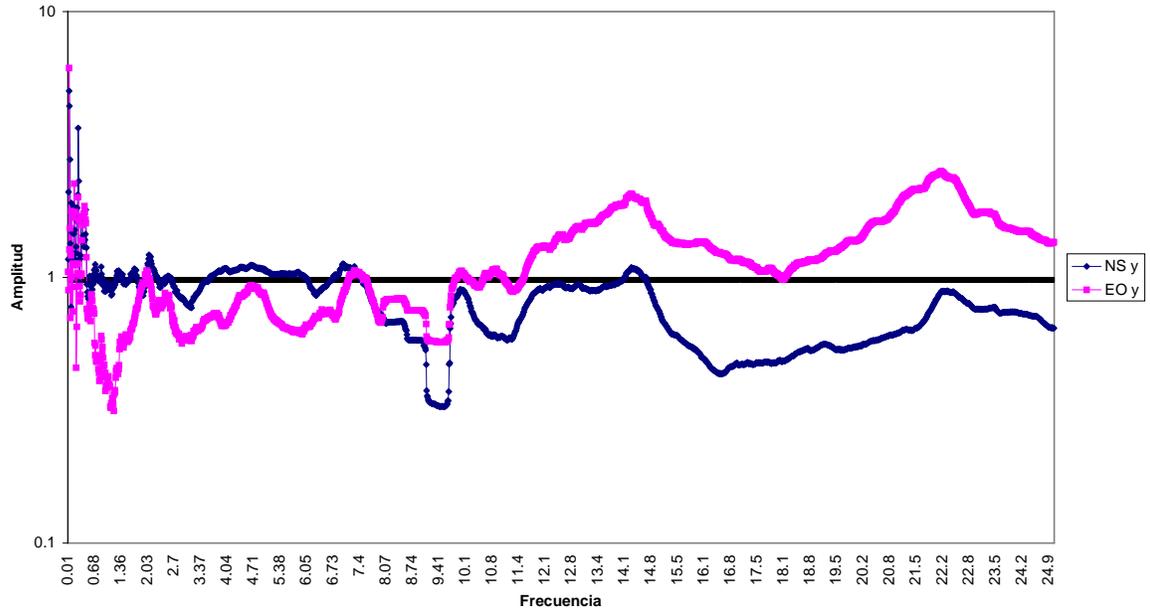
### Col. Lázaro Cárdenas Pozo No 38



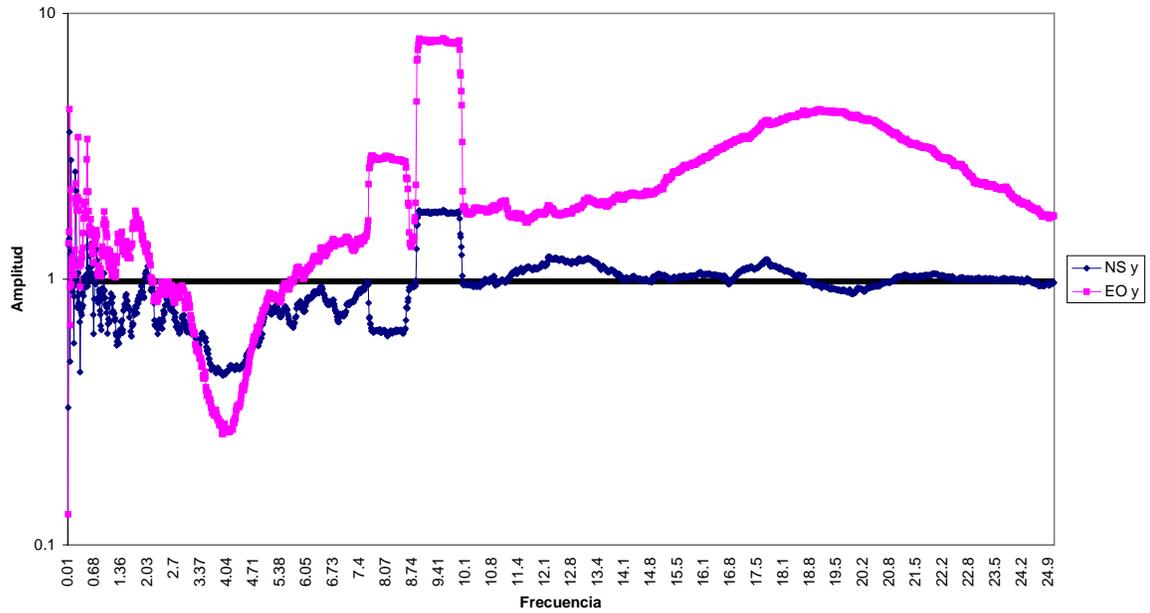
### Villas de Irapuato Pozo No. 44



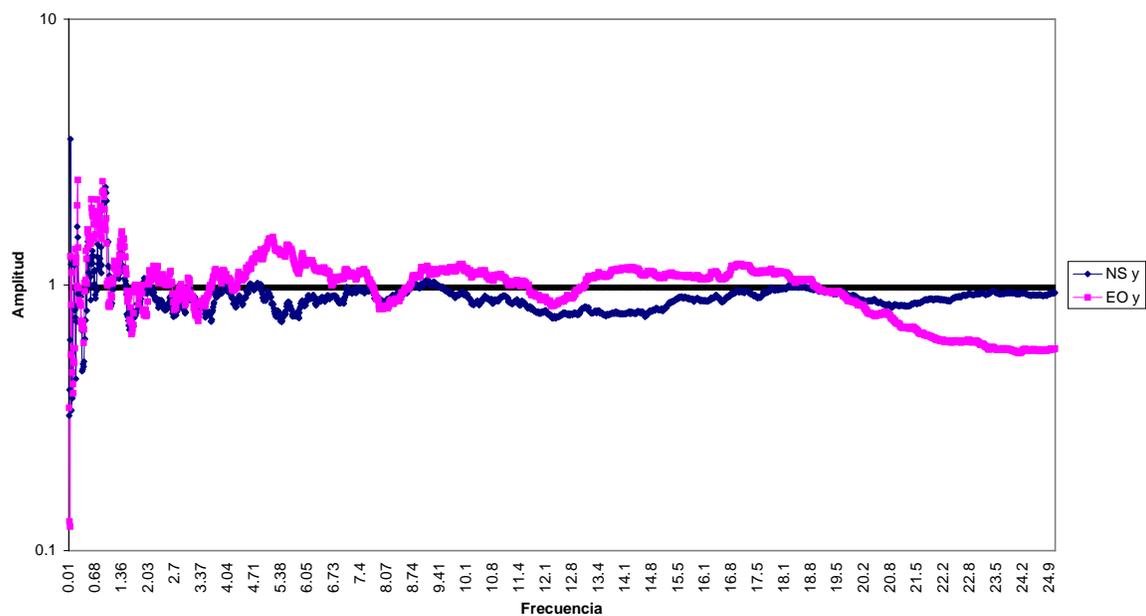
Rafael Abascal Pozo No. 45



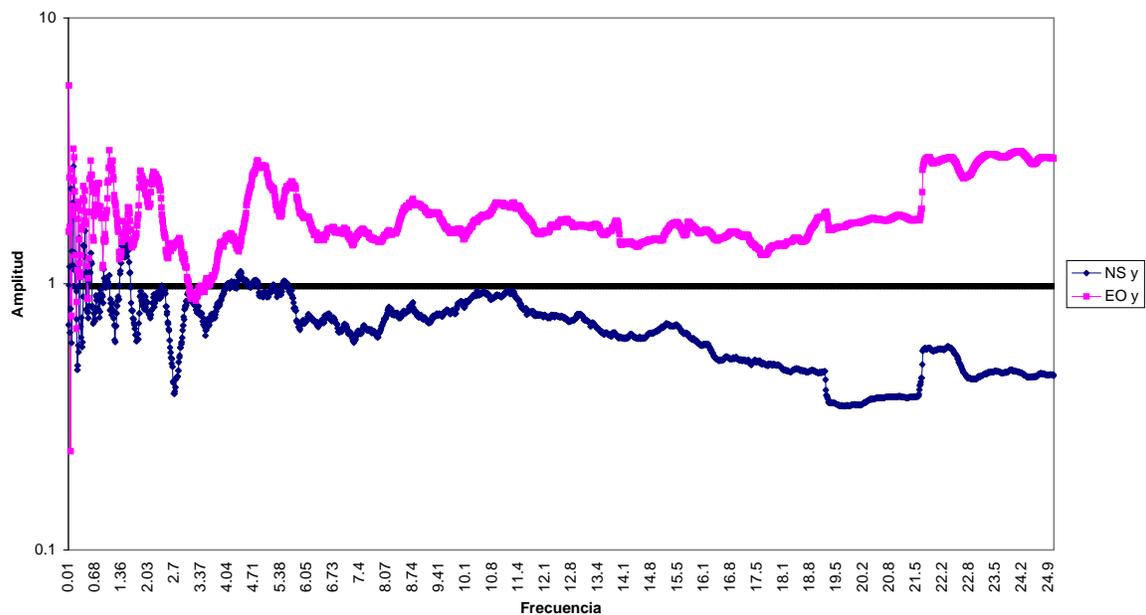
Fracc. Alamos Pozo No. 47



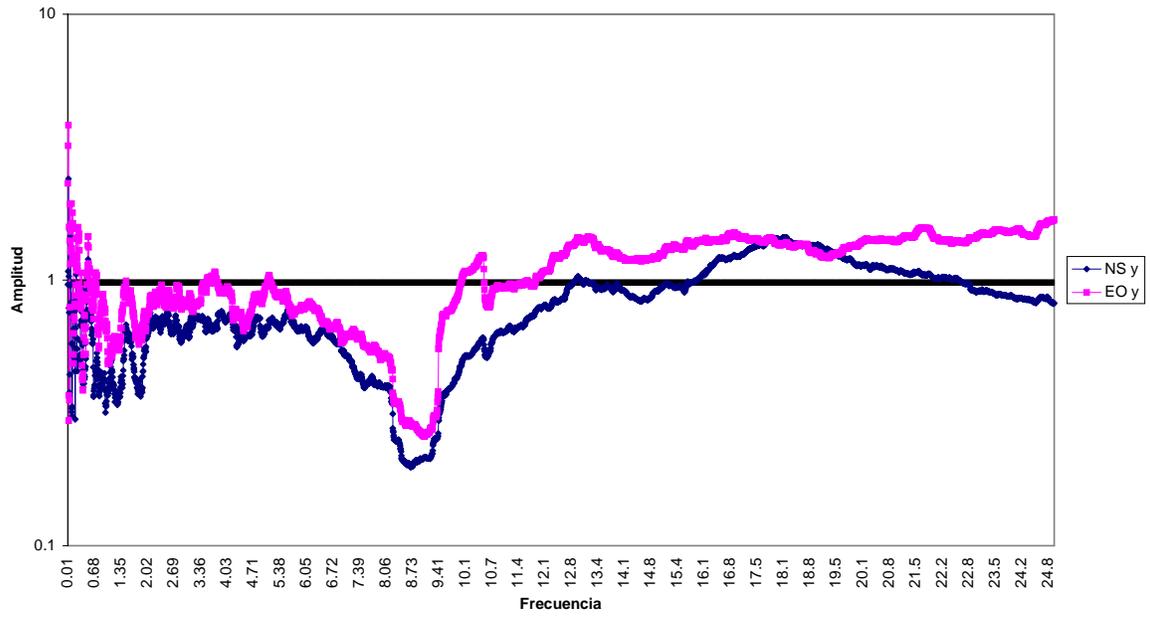
### Villas de Irapuato Pozo No. 50



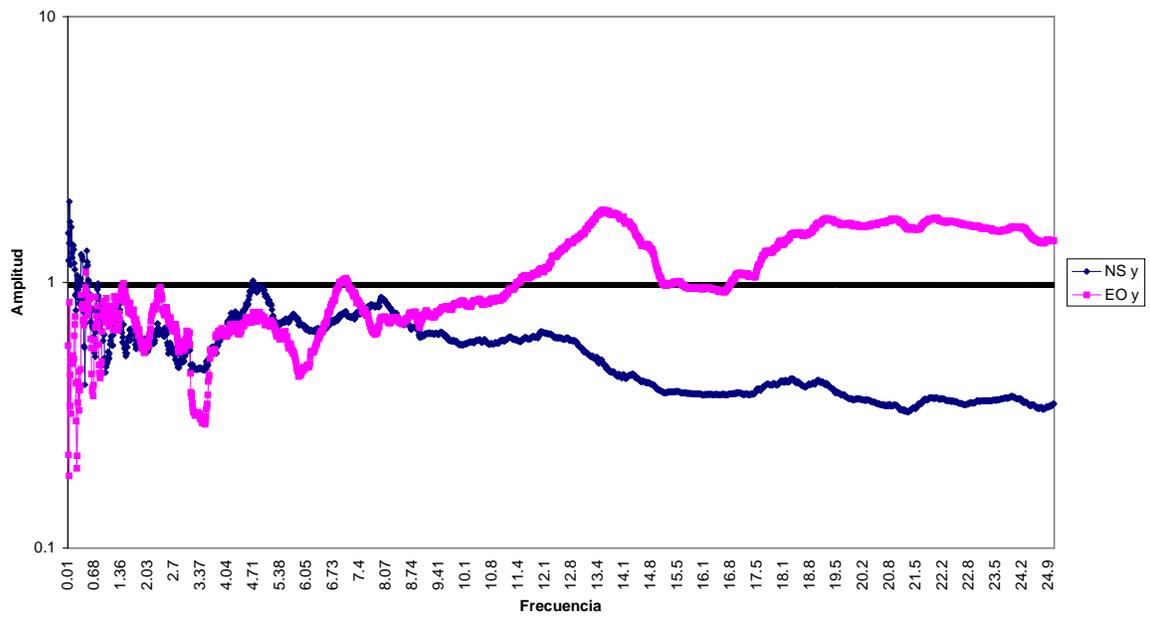
### Fracc. Las Palmas Pozo No. 59



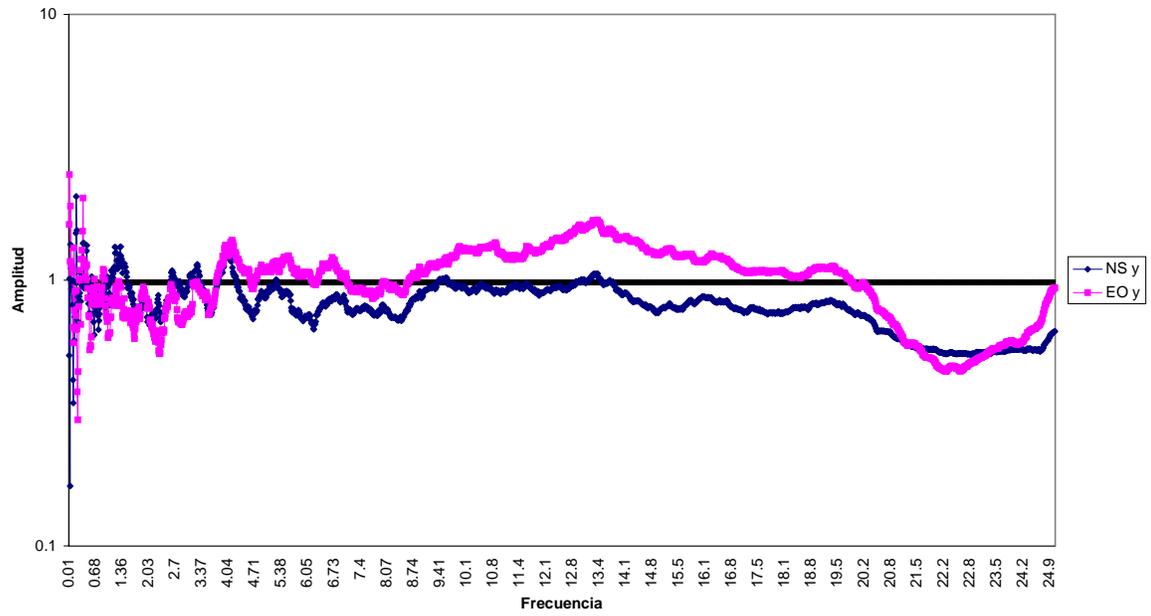
### Colonia San Pedro Pozo No. 60



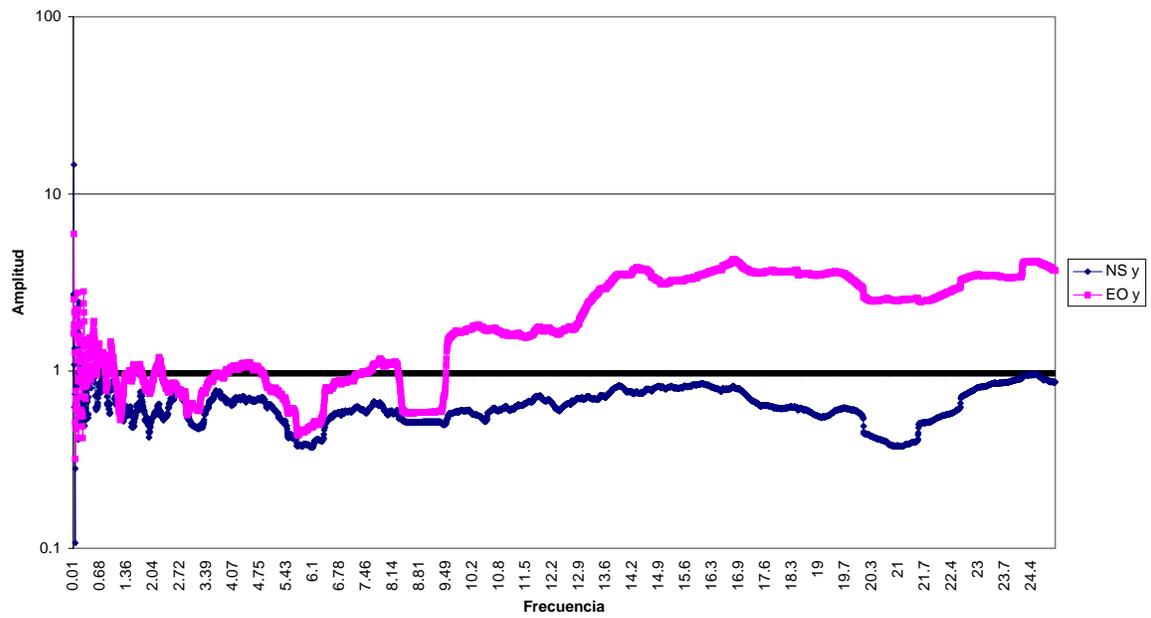
### Calle San Juan Pozo No. 61



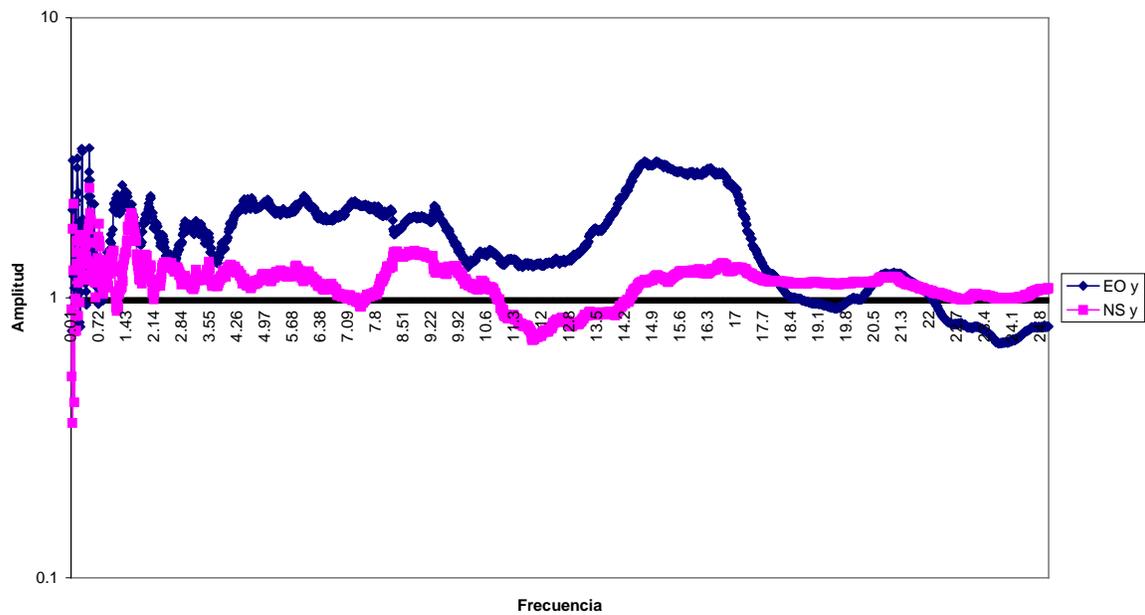
### Fracc. Las aguilas Pozo No. 63



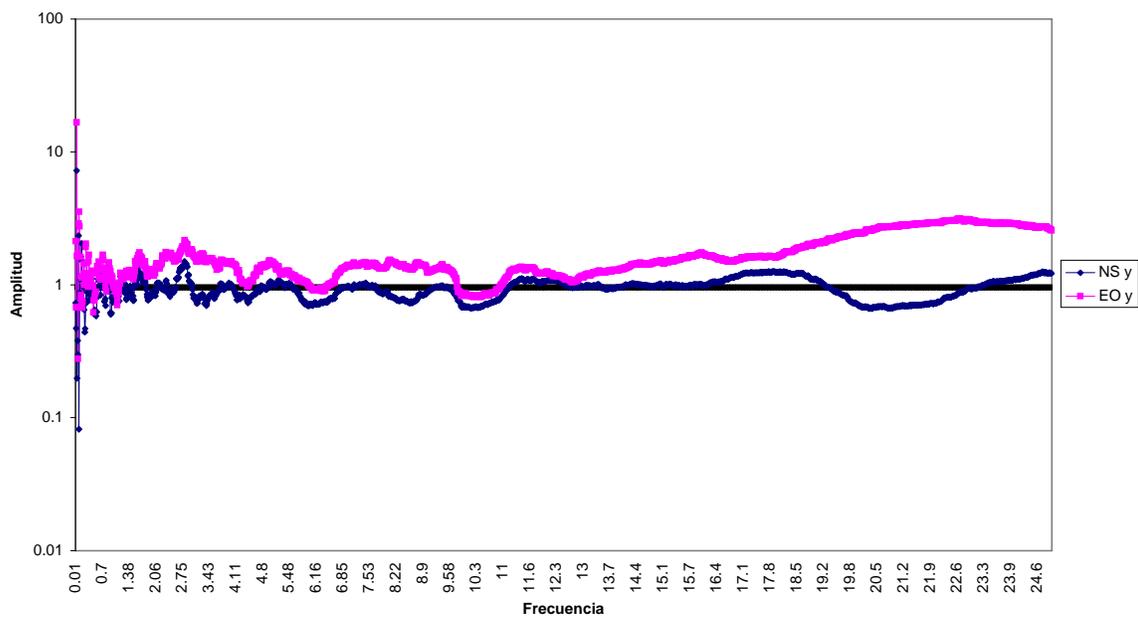
### Blvd.Manuel Morín Pozo No. 68



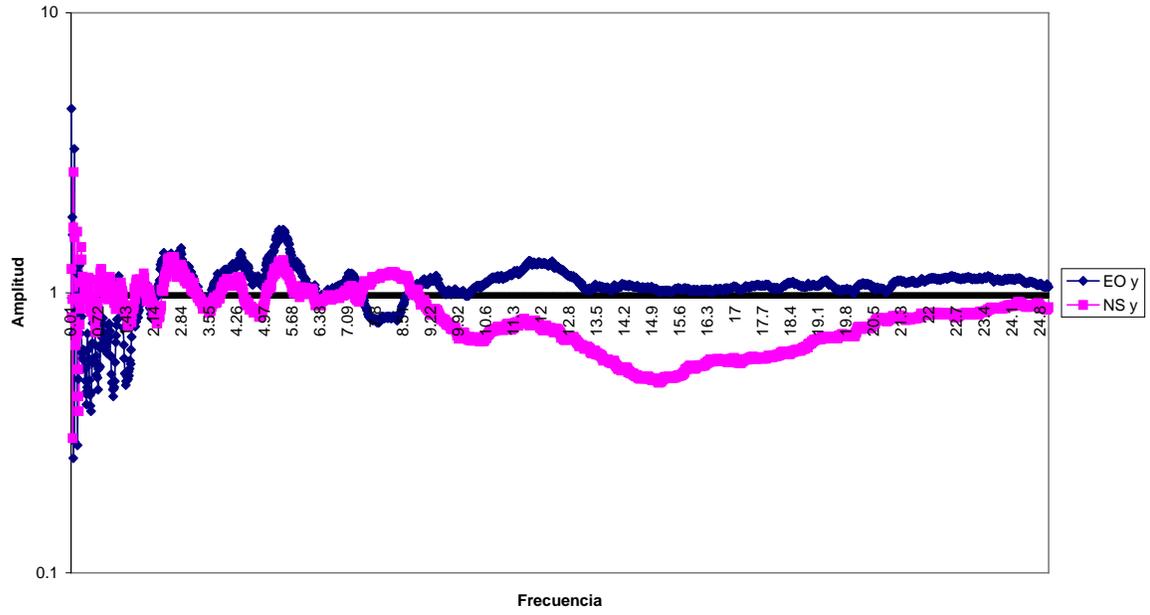
**Bldv. Arandas Fracc. Las Plazas Pozo No. 70**



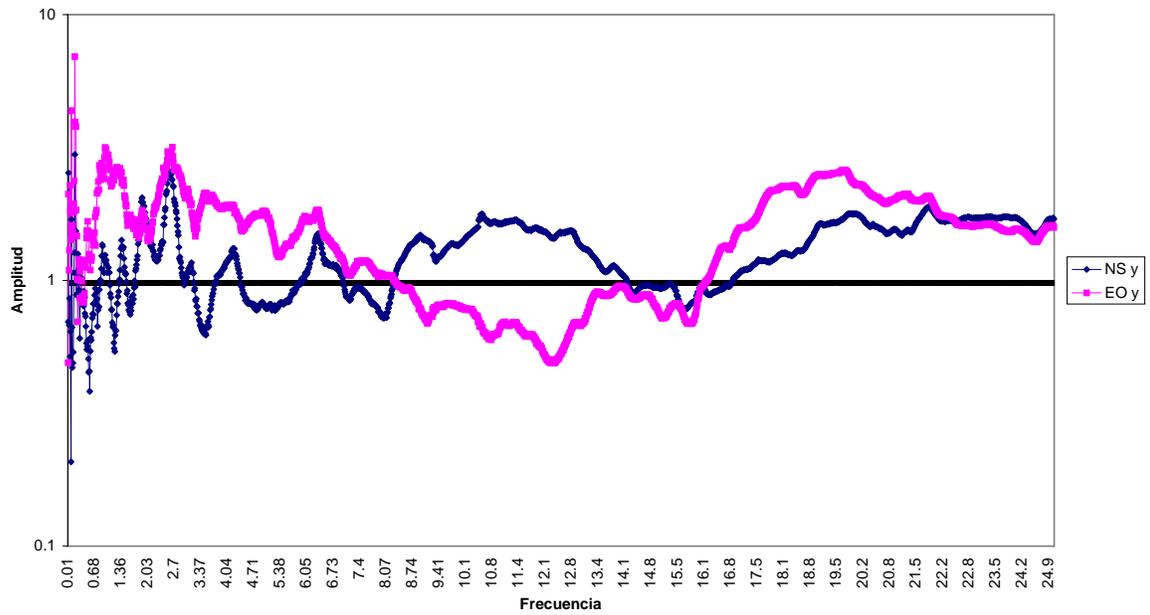
**Colonia las Américas Pozo No. 75**



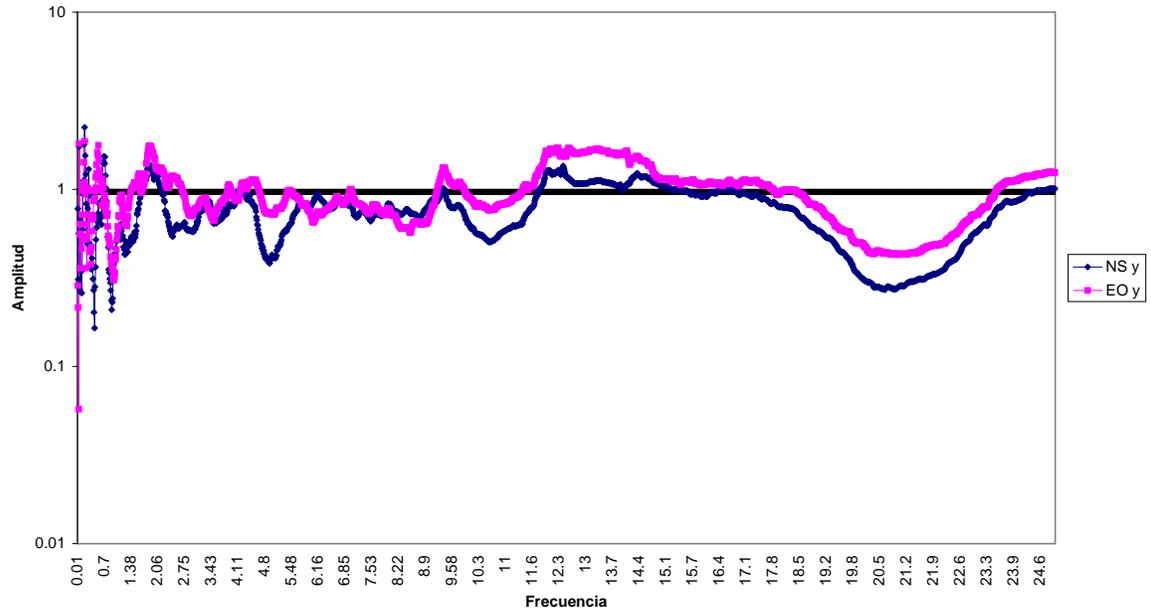
Alameda y jard. De Sn Antonio Pozo No. 79



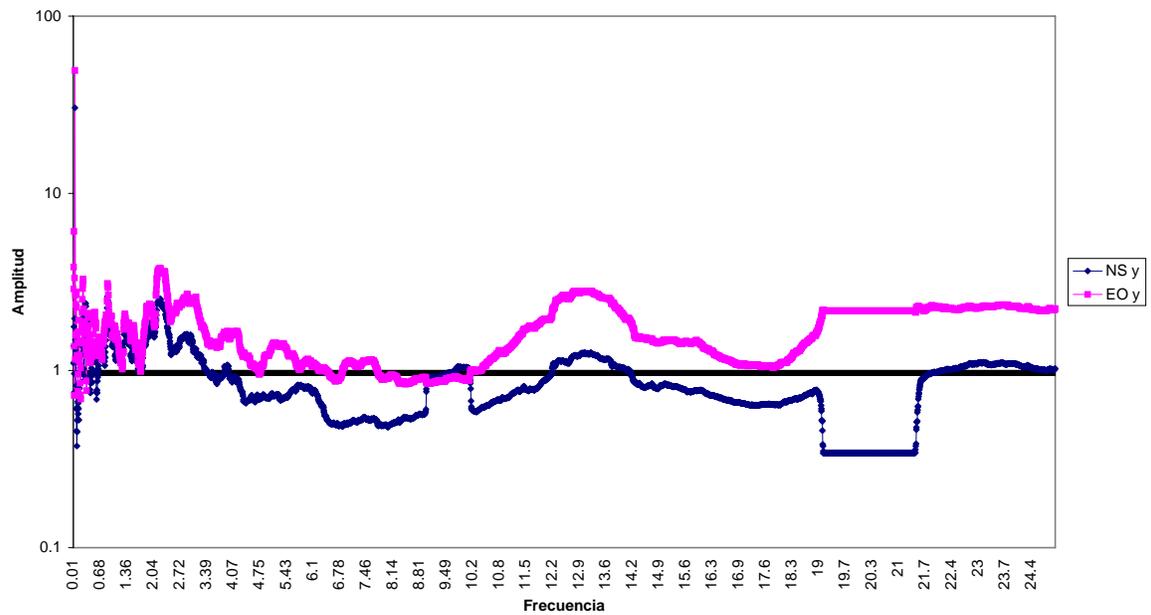
La Floresta Pozo Sn1



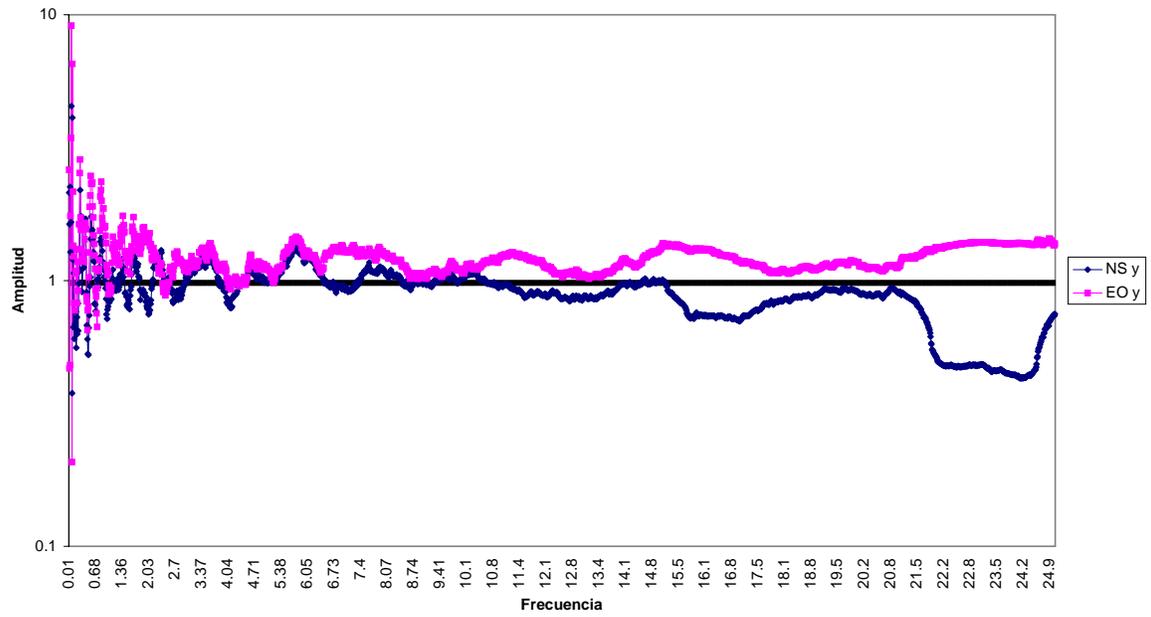
### Hacienda la virgen(Inst.anterires de feria) Pozo Sn2



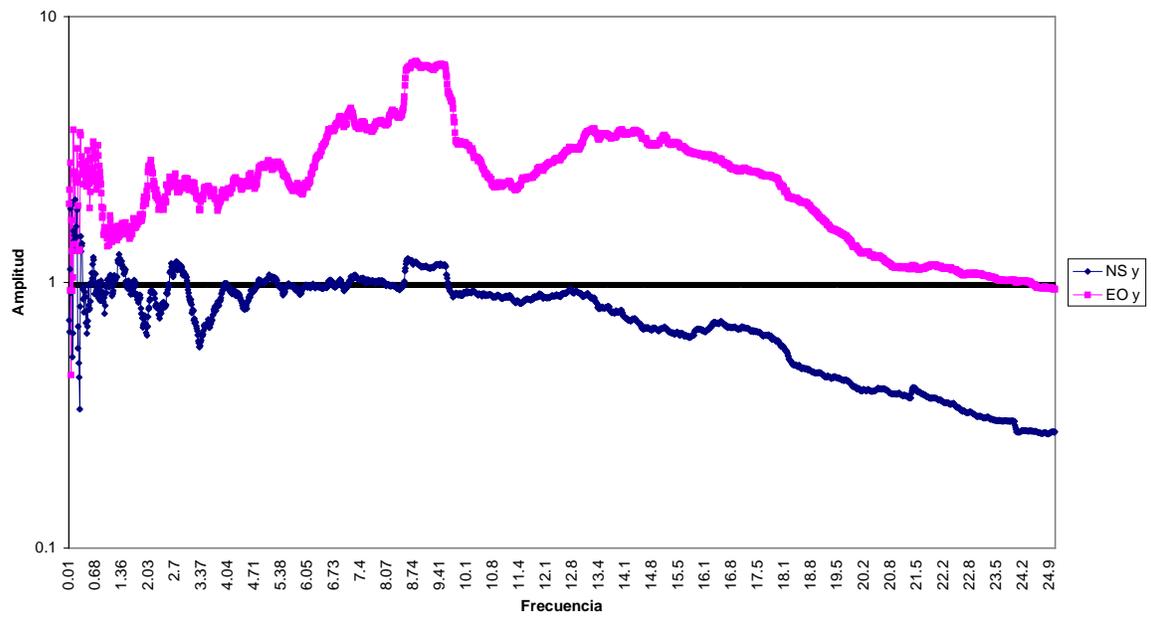
### Valle del sol Pozo Sn3



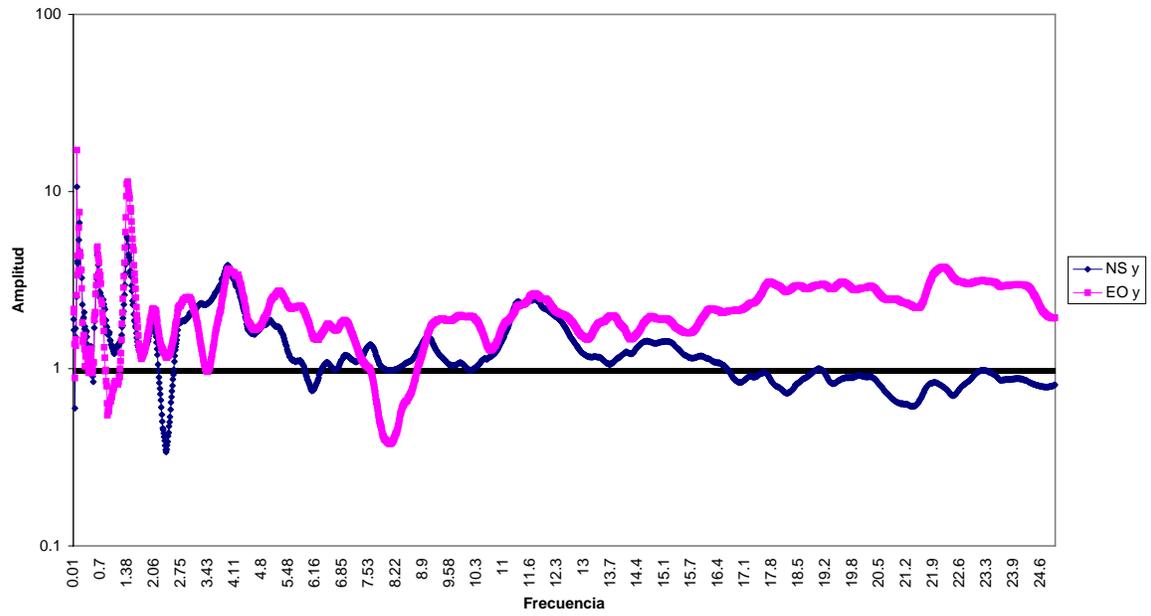
### Fracc. El Zapote Av. Unión Pozo Sn4



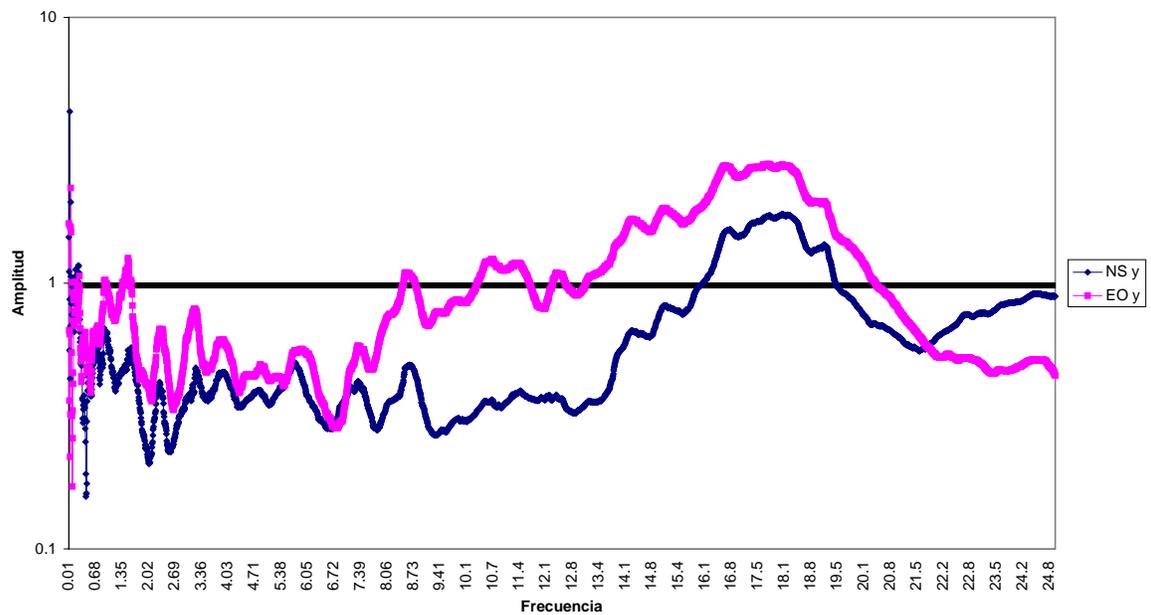
### Puente de Guadalupe Pozo Sn5



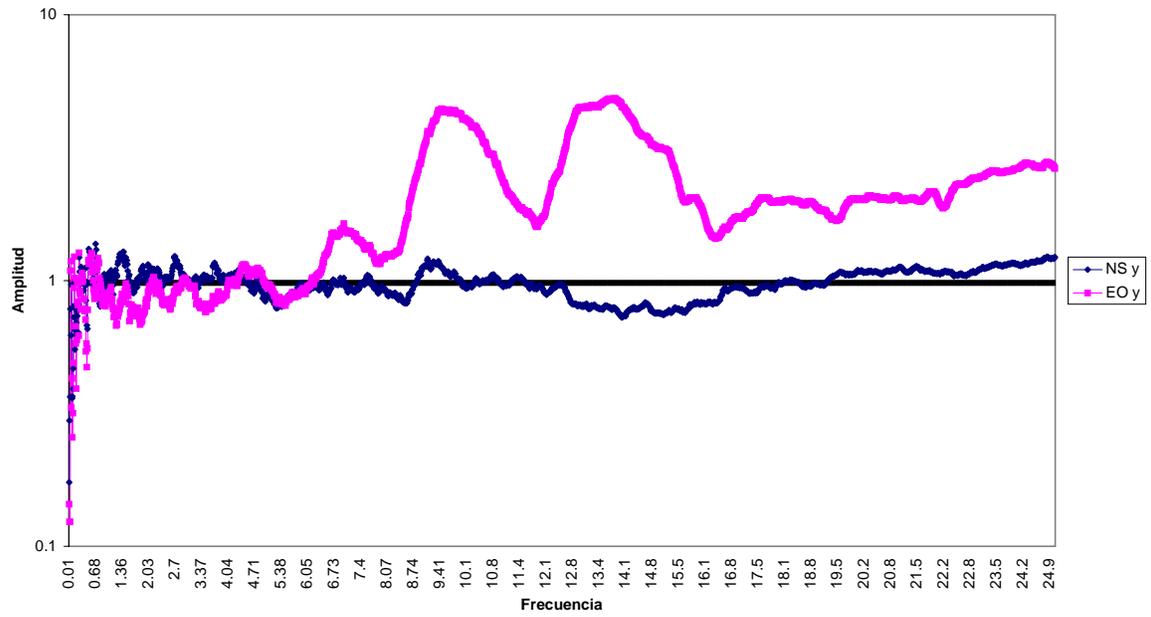
### Lomas de Españita Pozo Sn6



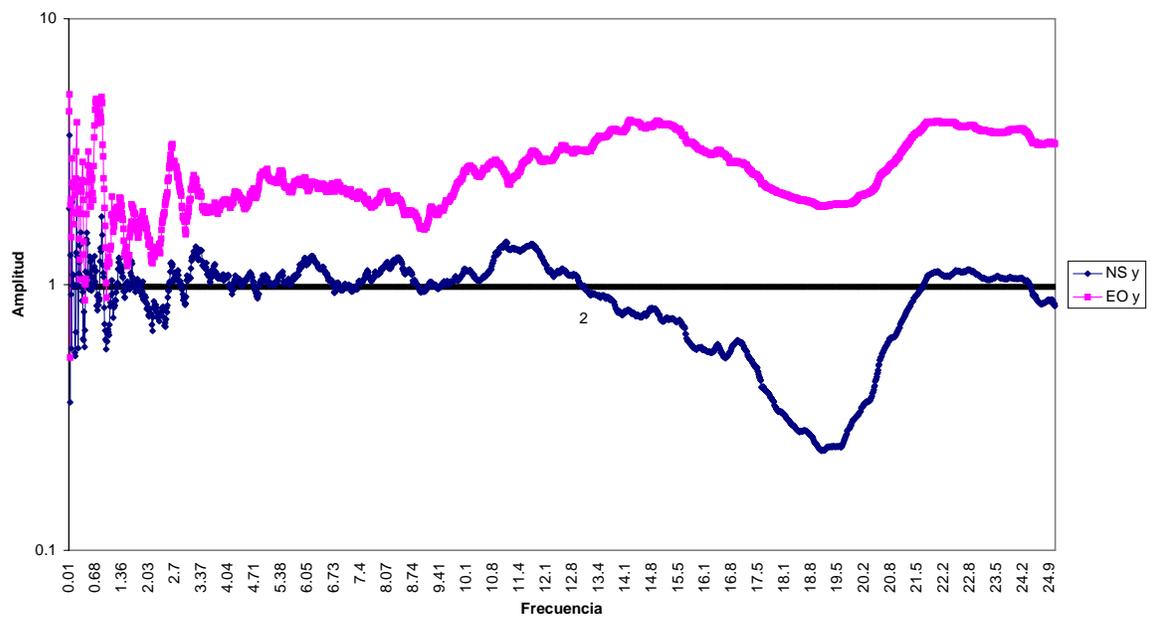
### Paseo de la fund. Y Mirador del valle Villas Pozo Sn7



### Centro Expositor Pozo Sn8

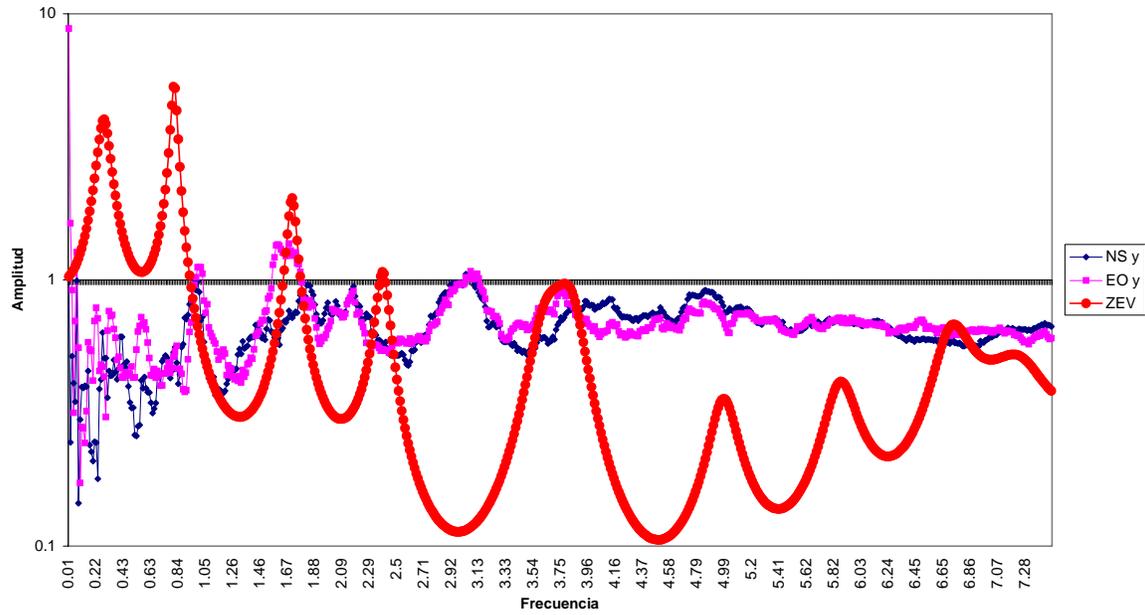


### Colonia Juárez Pozo Sn9

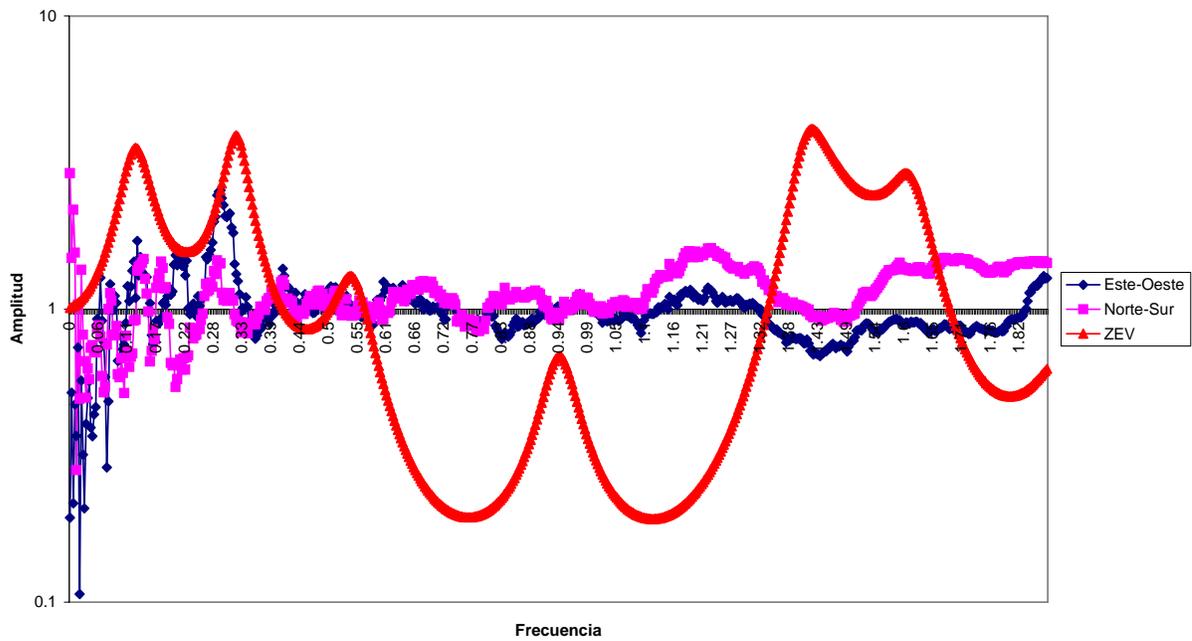


### A-3 Pozos y sitios con estratigrafía.

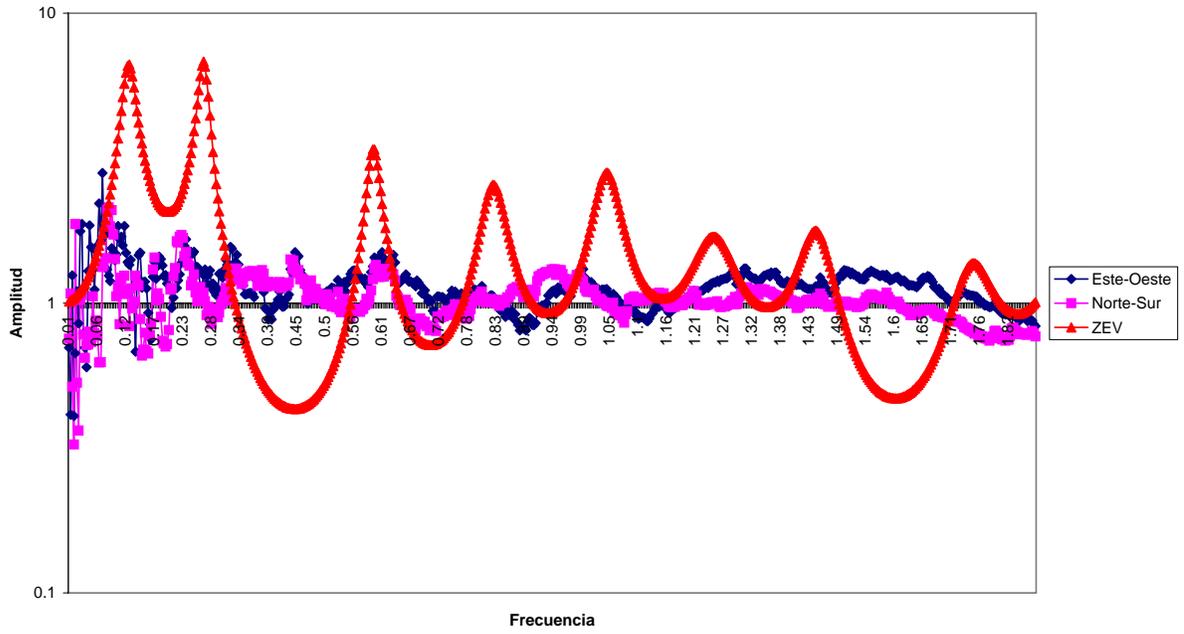
#### Fraccionamiento Las Rosas Pozo No. 8



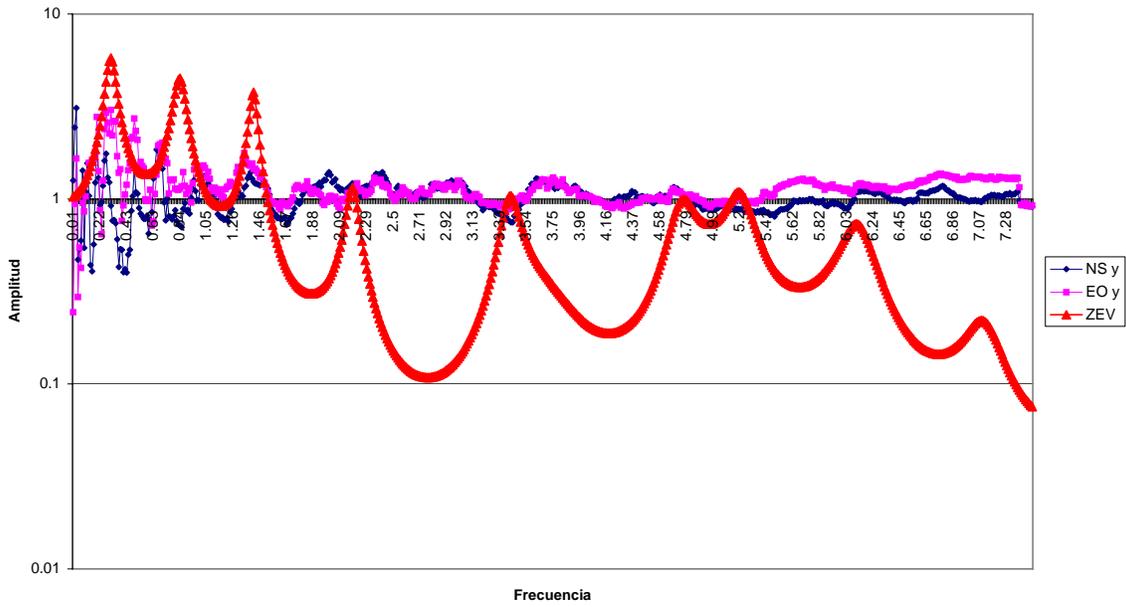
#### V. Fuentes Col. Moderna Pozo No. 31



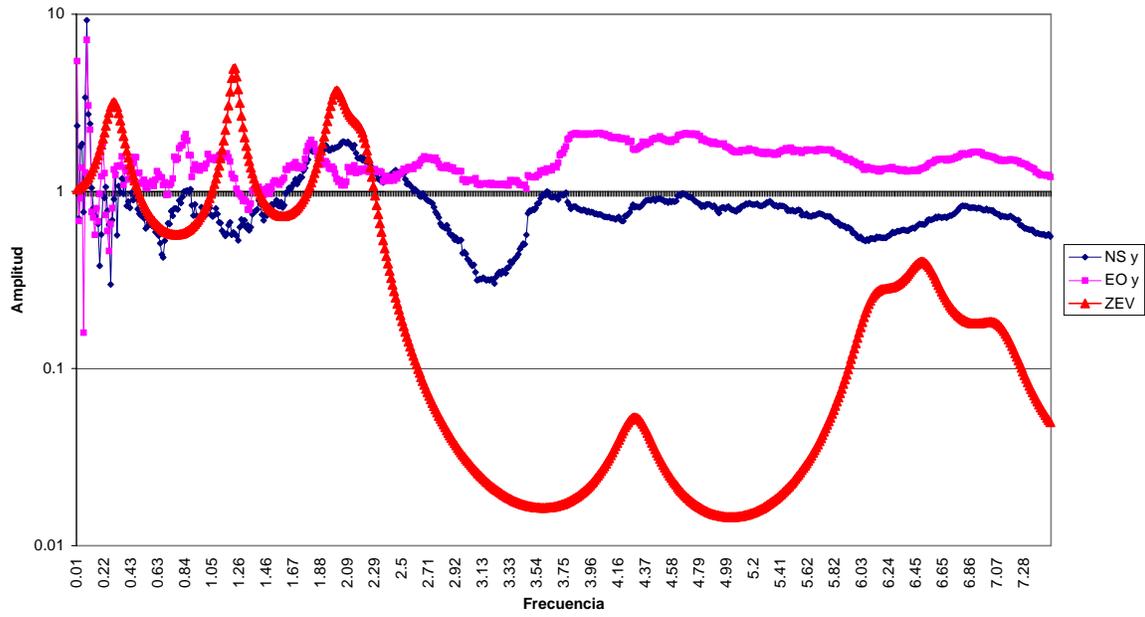
**Calle Mora Col. Irapuato Pozo No. 34**



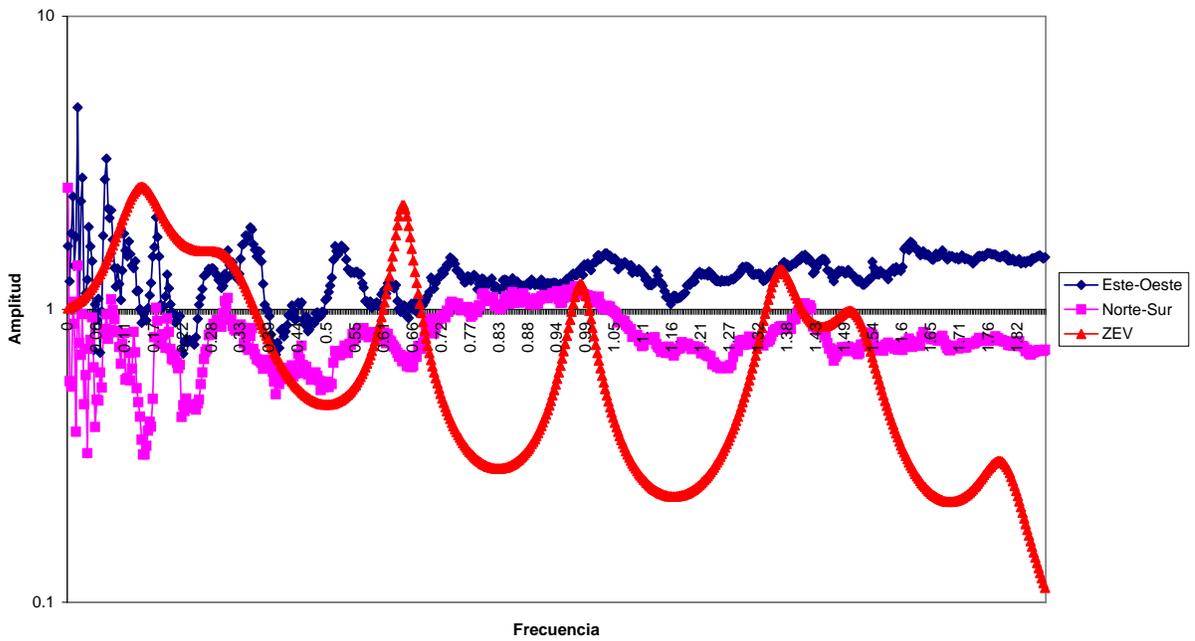
**Malpaso Col. CFE Pozo No. 41**



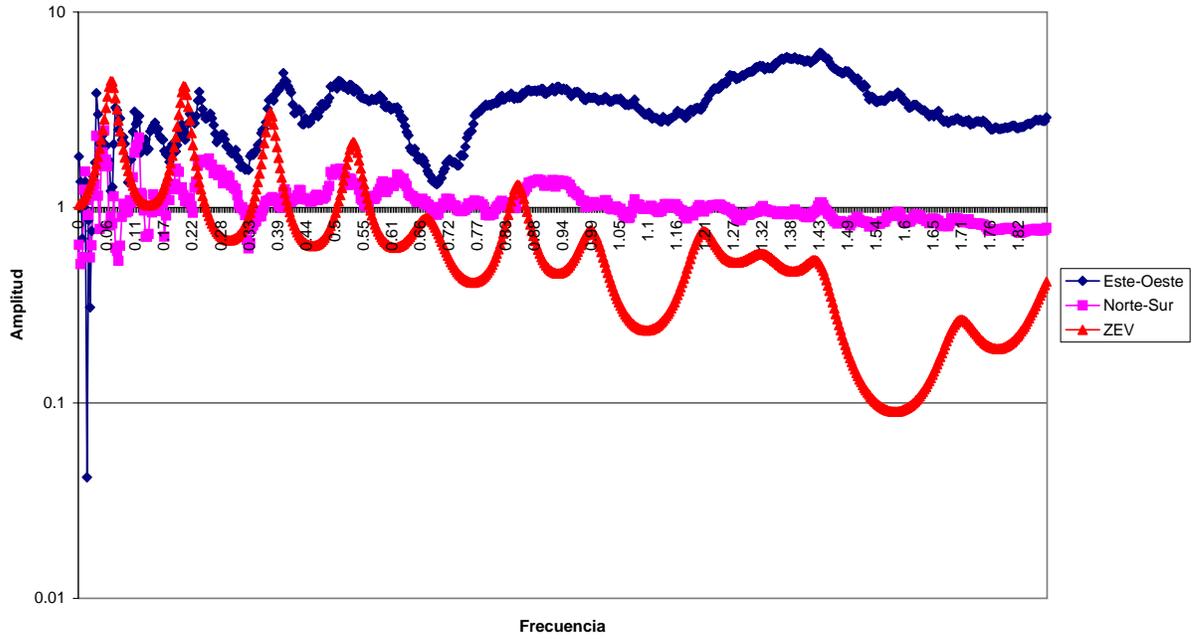
### Colonia los Cobos Pozo No. 46



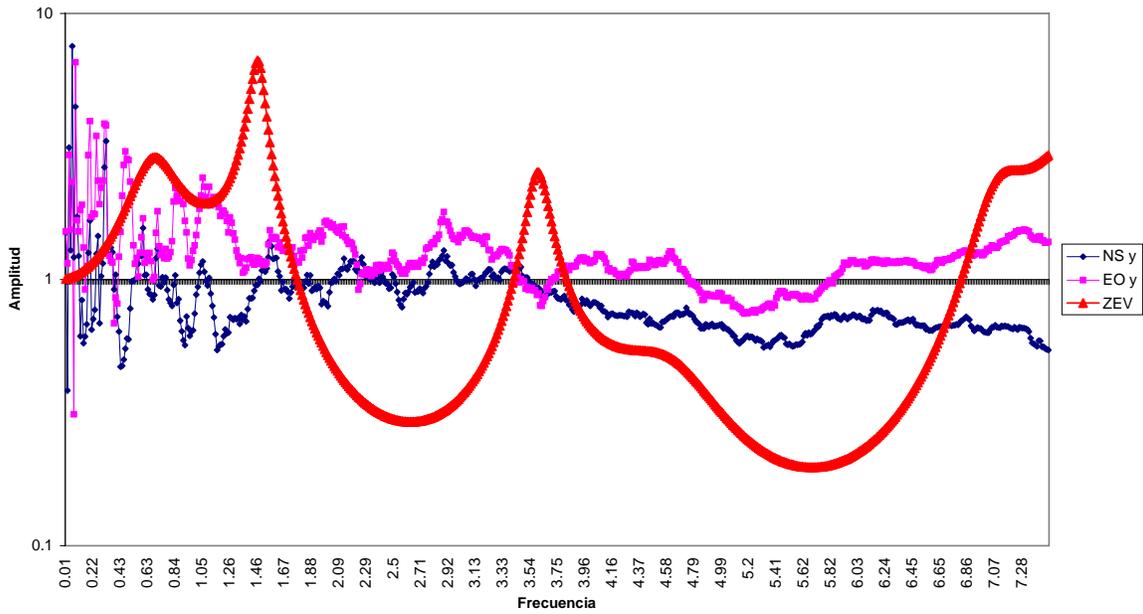
### Carmelitas Nuevo Pozo No. 55



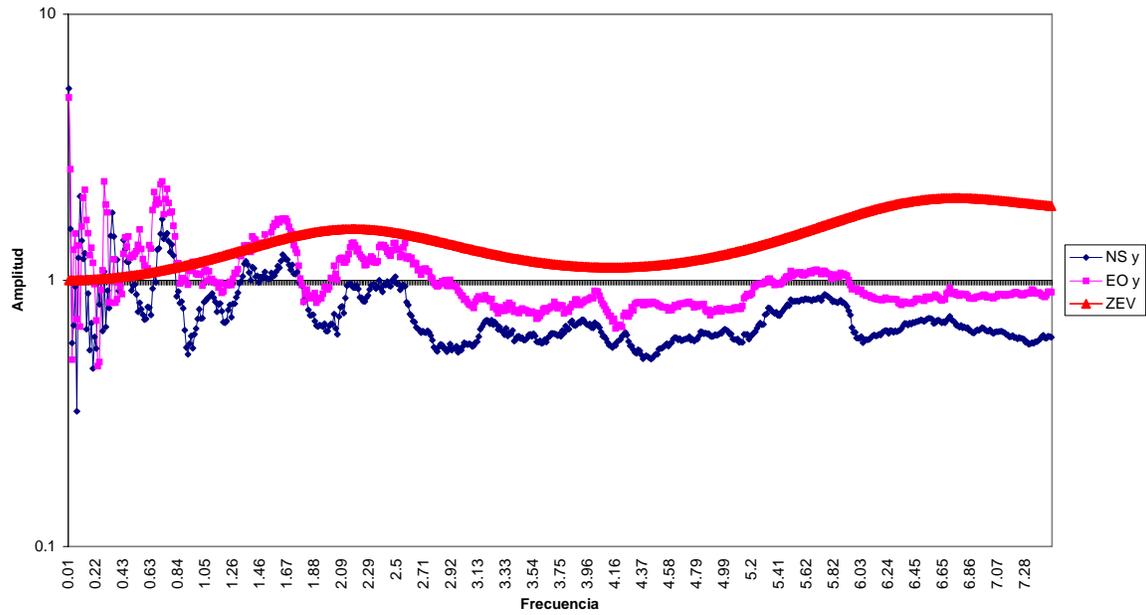
Plazuela Hidalgo Pozo No. 56



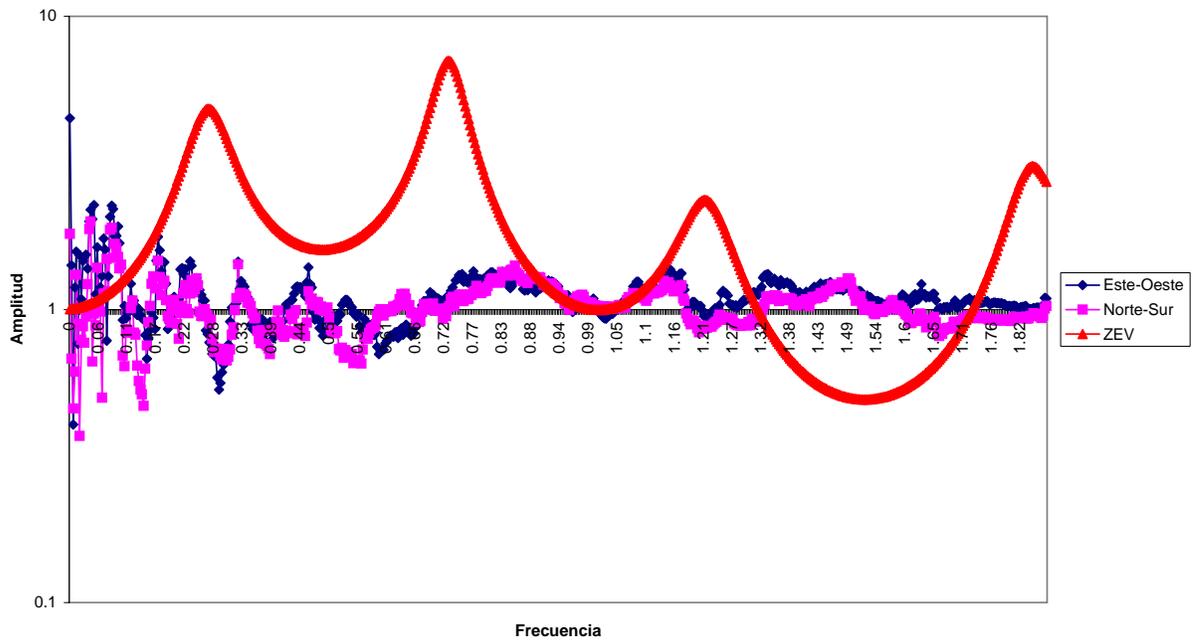
Fracc. Hacienda Del Carrizal Pozo No. 66



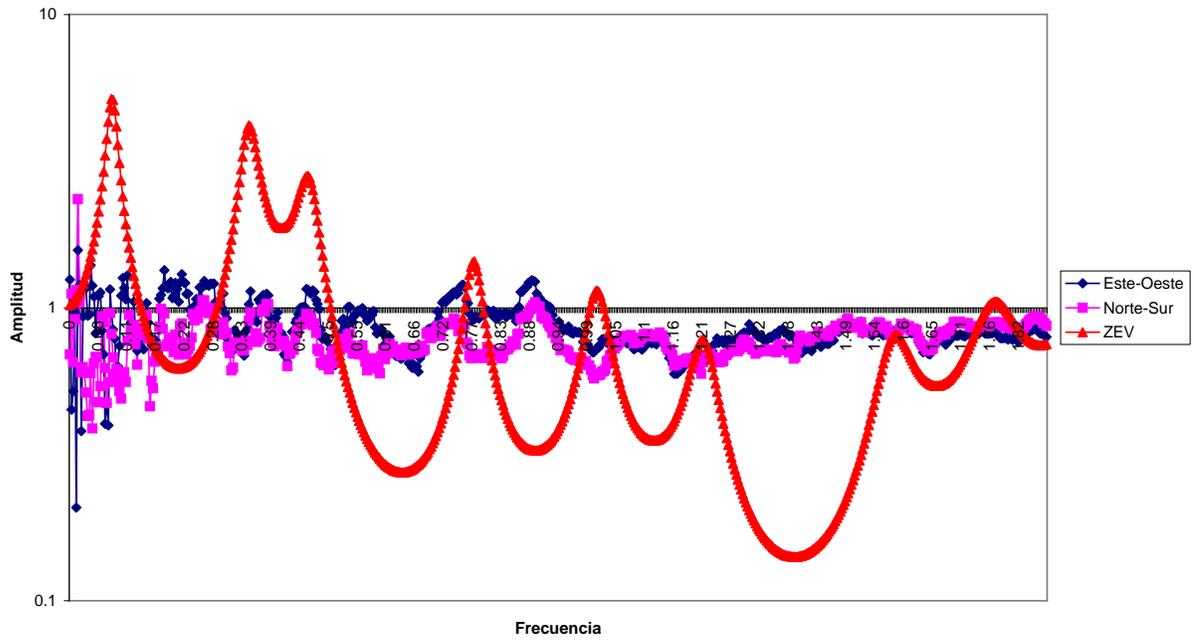
Quinta las villas Pozo No. 78



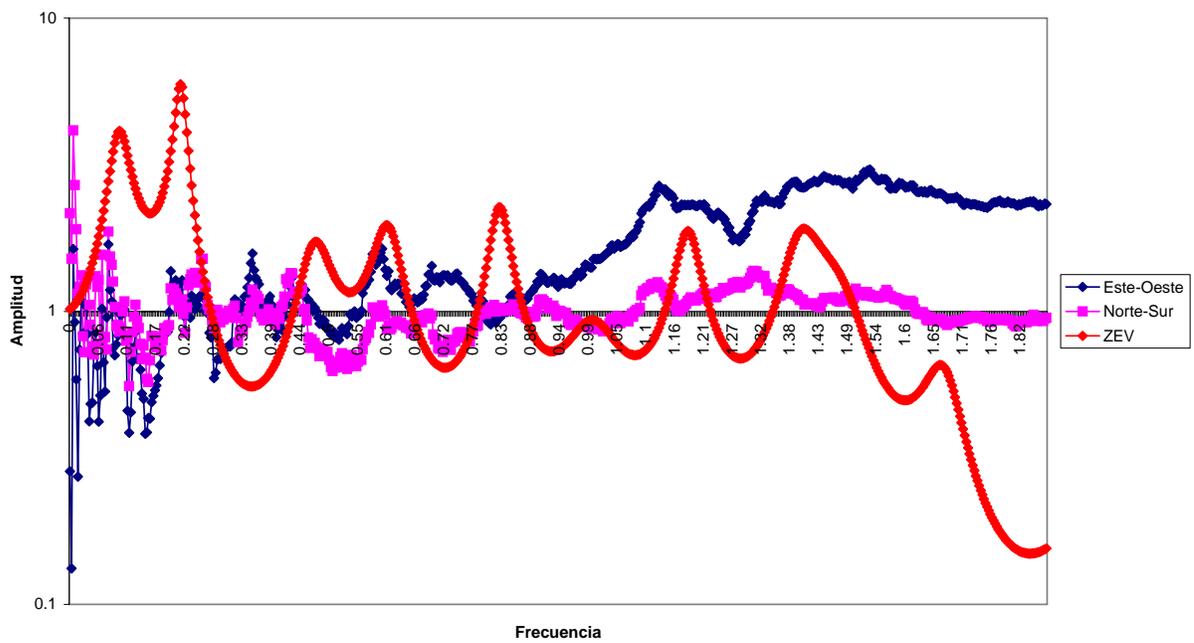
Quinta # San Joaquín CD. De Irapuato Pozo No. 80



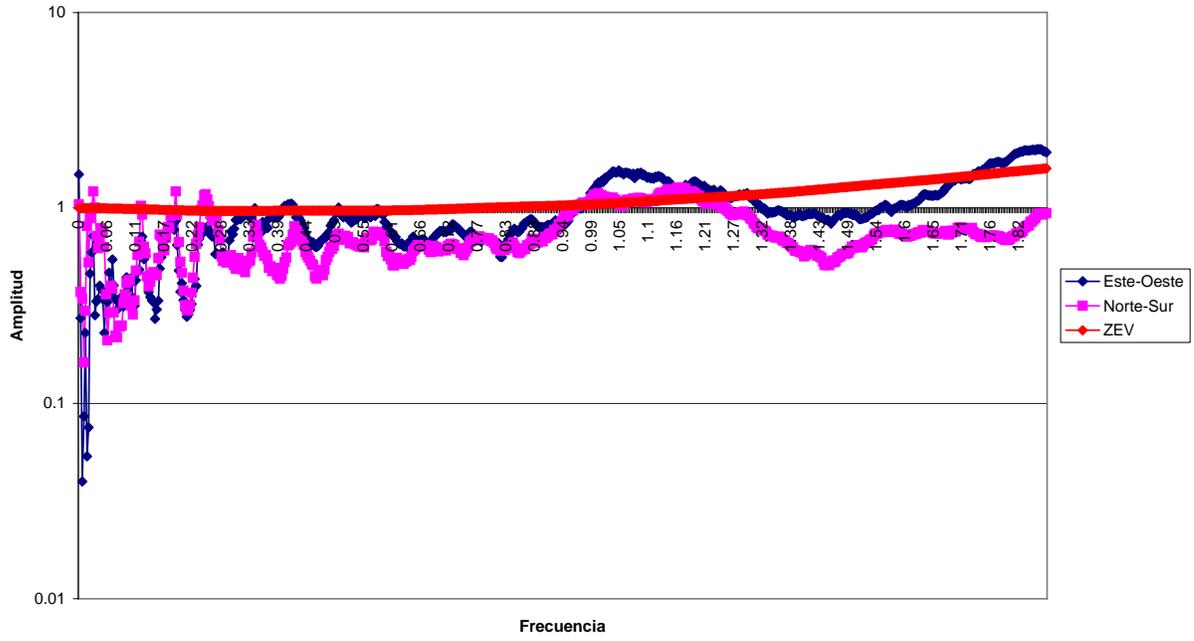
Fracc. Colon, 3a Sección Pozo No. 82



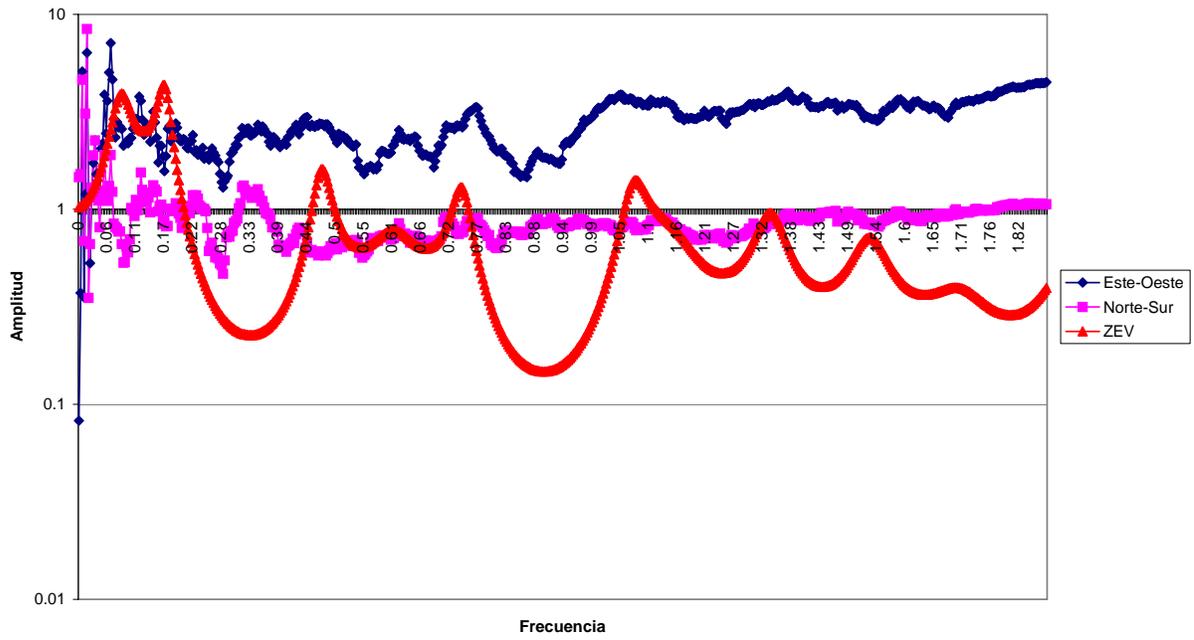
Col. Las Heras Pozo No. 83



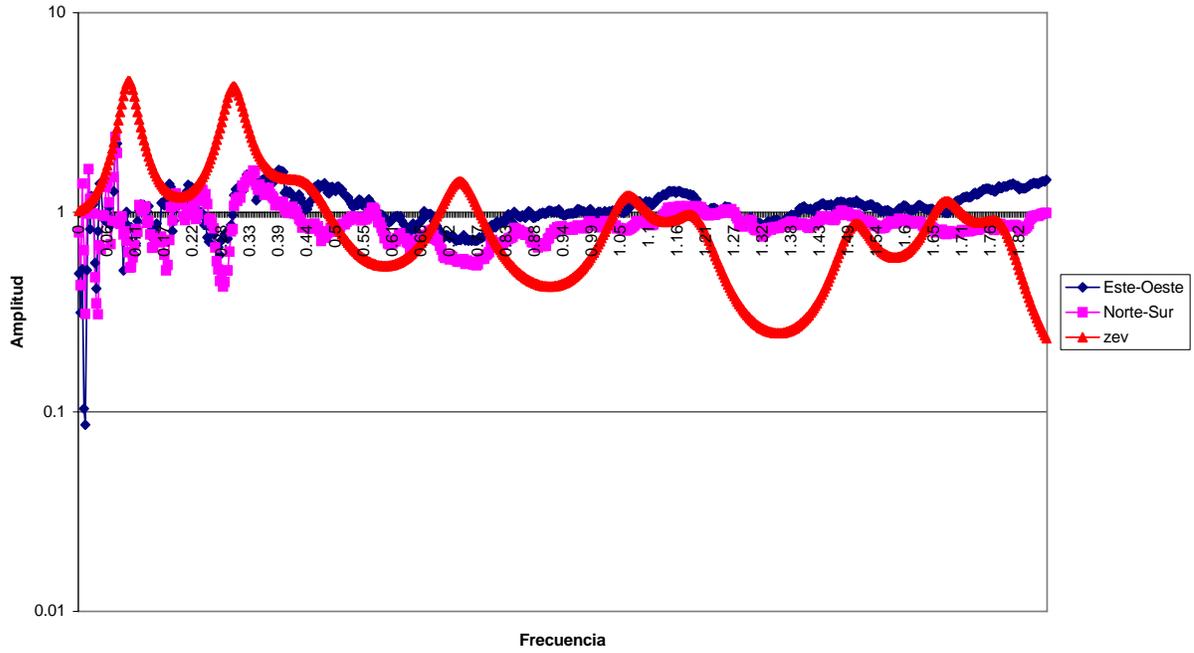
### Tabachines Pozo No. 84



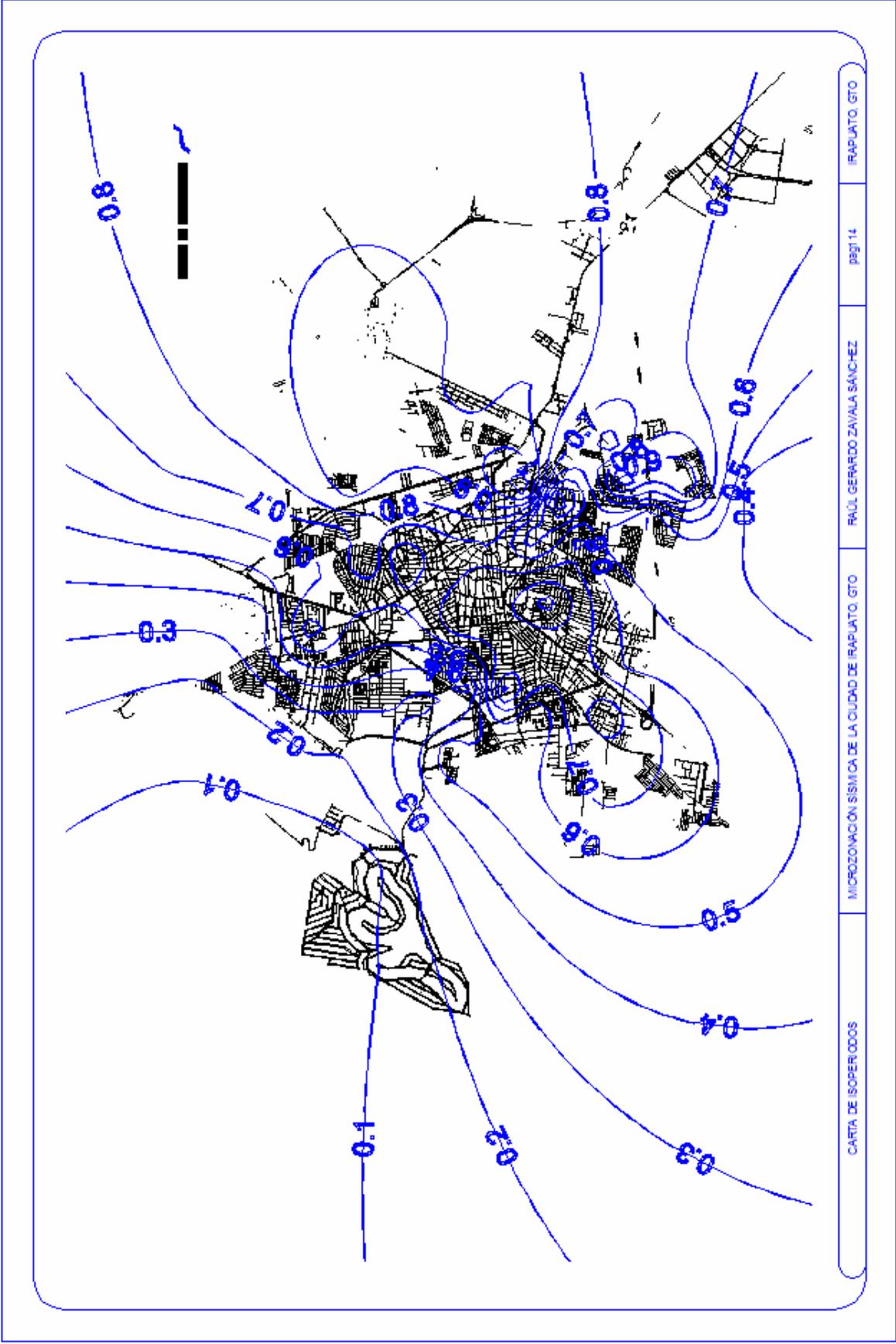
### Niños Héroes Pozo SN 11

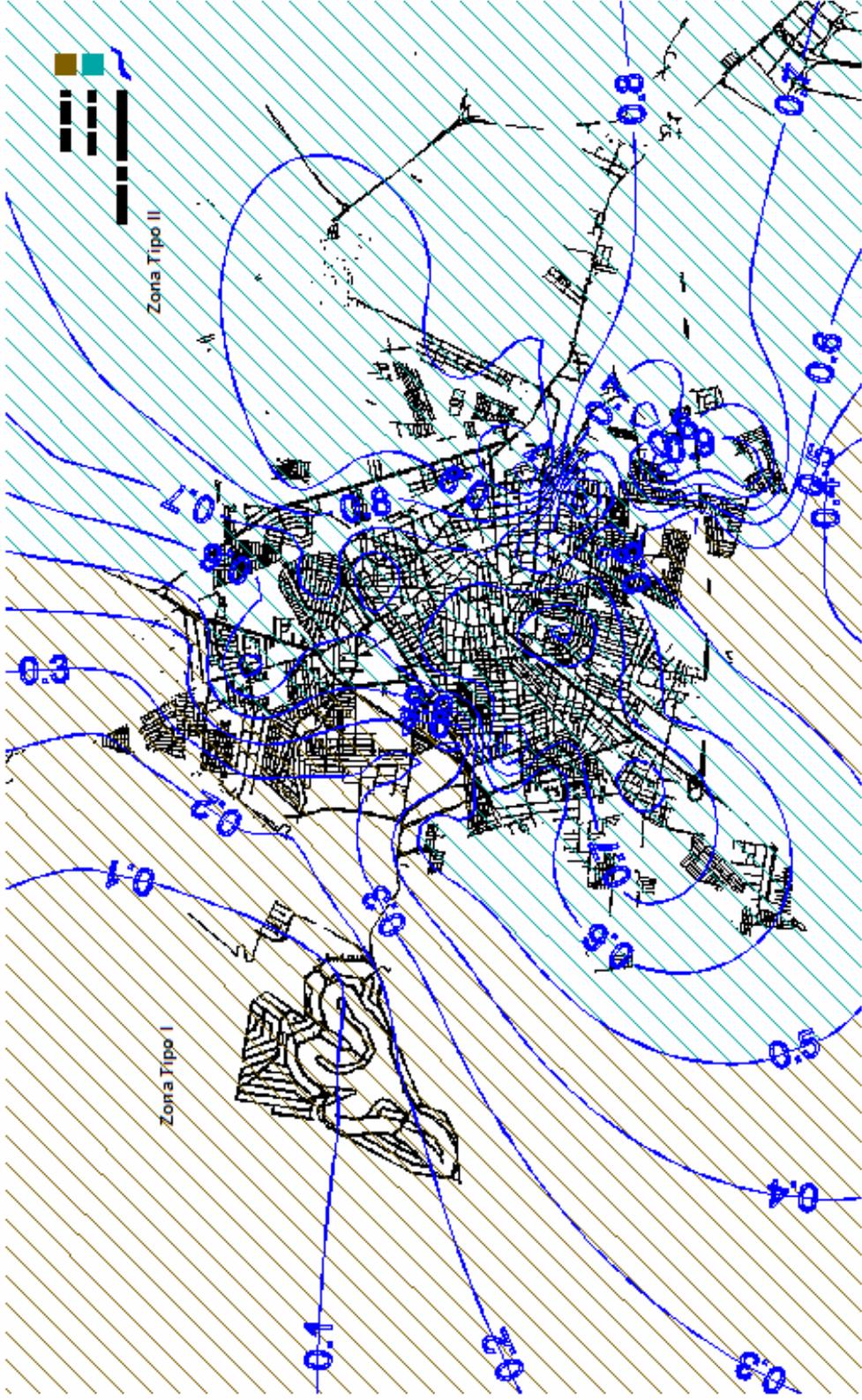


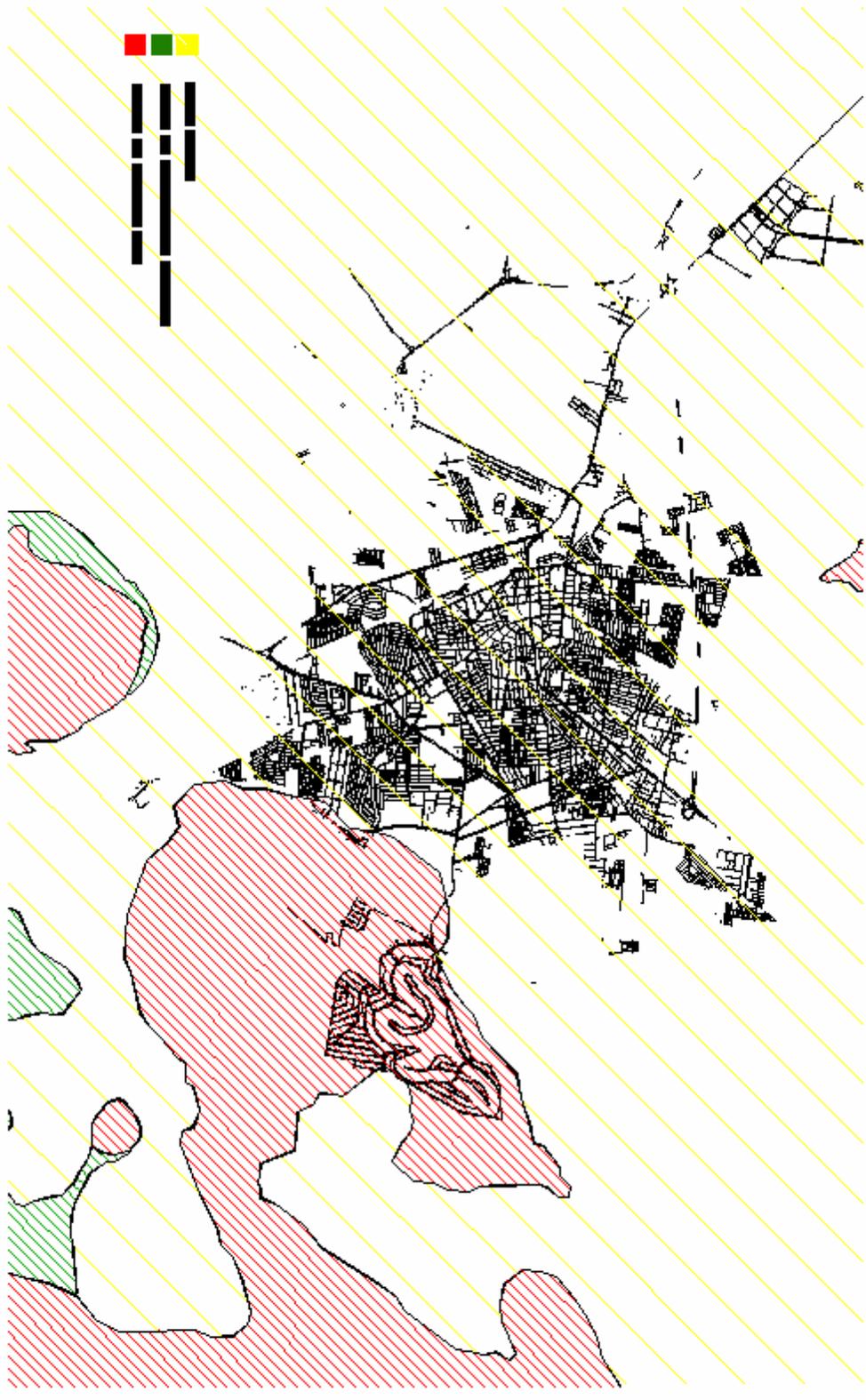
### Colonia Los Frenos Pozo SN 12

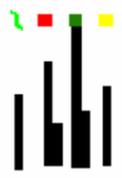
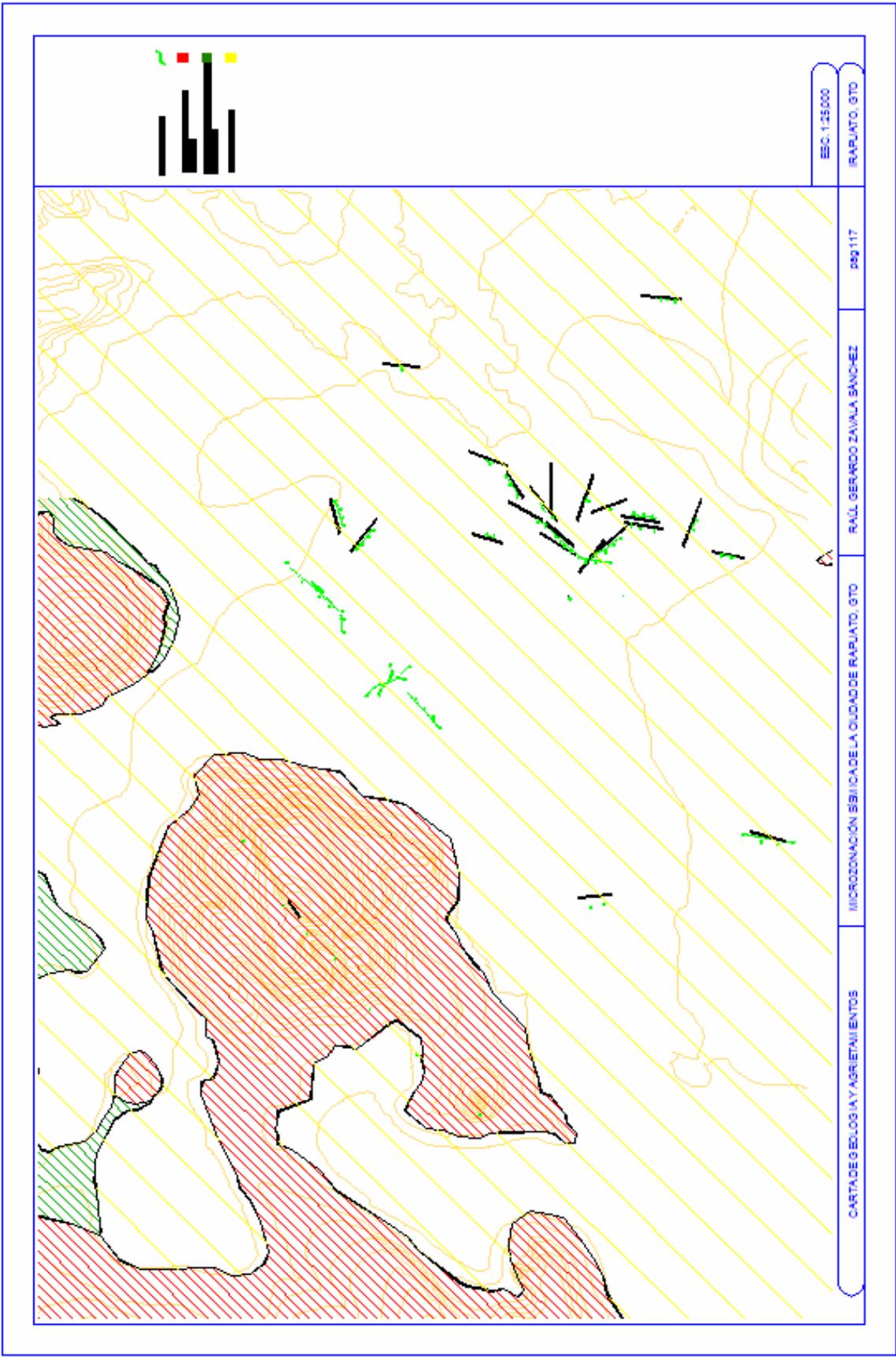












ESC. 1:25000  
RAPUATO, GTO

093117

RAÚL GERARDO ZAVALA SÁNCHEZ

MICROZONACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE RAPUATO, GTO

CARTA DE GEOLOGIA Y ASIENTOS