



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"ANALISIS DINAMICO DE LA PRESA ING. CARLOS RAMIREZ
ULLOA "EL CARACOL", GRO. CONSIDERANDO LA
COMPONENTE TRANSVERSAL DE LOS SISMOS"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
HECTOR PIEDAD SILVA HUERTA

M.I. REGINALDO HERNANDEZ ROMERO



MEXICO, D. F.

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

NOMBRE: Silva Huerta Hector
Piedad 2004

FECHA: 09/II/04

FIRMA: Hector Silva Huerta?



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/087/03

Señor
HECTOR PIEDAD SILVA HUERTA
Presente

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

**"ANALISIS DINAMICO DE LA PRESA ING. CARLOS RAMIREZ ULLOA "EL CARACOL",
GRO. CONSIDERANDO LA COMPONENTE TRANSVERSAL DE LOS SISMOS"**

- INTRODUCCION
- I ANALISIS DE SISTEMAS VIBRATORIOS
- II ANTECEDENTES SISMICOS DE LA PRESA EL CARACOL
- III GENERALIDADES DE LA PRESA EL CARACOL
- IV ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LA PRESA EL CARACOL
- VI CONCLUSIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 12 Septiembre 2003.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.

AGRADECIMIENTOS:

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO,
POR PERMITIRME SER LO QUE SOY.

*Dedicado a los ausentes.
Hasta aquí es que he llegado,
no tienen idea del peso que me hacen cargar.
Pero nadie es dueño del futuro,
mañana, no sabemos,
todo puede radicalmente cambiar.
¿En la ausencia habré de encontrarlos?*

*En la mucha sabiduría hay mucha molestia
Y el que aumenta el saber, aumenta su tristeza.
ECLÉSIASTÉS.*

INDICE.

INTRODUCCIÓN.	Pág.
I ANÁLISIS DE SISTEMAS VIBRATORIOS.	
I.1 El método de las vibraciones aleatorias	3
I.1.1 Transformada de Fourier.	
I.1.2 Correlaciones.	
I.1.3 Espectro de respuesta.	
I.1.4 Funciones de transferencia.	
I.1.5 Funciones de coherencia.	
I.1.6 Angulo de fase y Tiempo de retardo.	
I.2 Ejemplos de análisis de sistemas vibratorios.	16
I.2.1 Señales	
I.2.2 Electricidad	
I.2.3 Aeronáutica	
I.2.4 Exploración	
I.2.5 Medicina	
I.2.6 Análisis sísmicos de Presas.	
II ANTECEDENTES SÍSMICOS DE LA PRESA EL CARACOL.	
II.1 Origen de los sismos.	31
II.2 Efectos sísmicos sobre presas de tierra y enrocamiento.	33
II.3 Sismicidad Local.	35
II.4 Registro sísmico estadístico.	37
III GENERALIDADES DE LA PRESA EL CARACOL.	
III.1 Ubicación.	47
III.1.1 Geología e hidrología.	
III.2 Descripción de la presa.	51
IV ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO.	
IV.1 Espectro de respuesta.	61
IV.2 Funciones de transferencia.	78
IV.3 Funciones de coherencia.	82
IV.4 Angulo de fase.	86
IV.5 Tiempo de retardo.	89
V CONCLUSIONES.	93
BIBLIOGRAFÍA.	96

INTRODUCCIÓN.

La presa CARLOS RAMÍREZ ULLOA “El caracol”, se ubica en el estado de Guerrero como parte del Sistema Hidroeléctrico Lázaro Cárdenas. Su construcción se debió a la creciente necesidad de energía eléctrica del país, por lo que la central hidroeléctrica genera anualmente 1486.00 GWH.

Desde el inicio de las obras en el año de 1979, la presa se convirtió en una importante fuente de empleos y en la actualidad es parte de la vida de los lugareños, pues el embalse que ahora es un lago artificial se comporta como una nueva vía de comunicaciones, en sus aguas se siembra la mojarra que constituye una fuente de proteína animal para los vecinos. Además, a últimas fechas se ha empezado a desarrollar el gran potencial turístico que por su geografía tiene este lugar.

Cabe señalar que los beneficios derivados de la construcción de la presa no quedan circunscritos a la región aledaña, pues el desarrollo hidroeléctrico incluye obras de infraestructura tales como almacenes e instalaciones en Iguala y la carretera pavimentada de Teloloapan al Caracol. De esta manera toda la población regional se ve beneficiada con la distribución de la derrama directa de la inversión en esta obra que fue equivalente a 430,000 millones de pesos a precios medios de 1987.

Otro beneficio importante es que con la generación media anual de energía de la planta habrá un ahorro de 2.6 millones de barriles de combustóleo que eran consumidos en generación eléctrica al año.

Es entonces por todo lo anterior de suma importancia mantener con niveles de seguridad adecuada este tipo de obras.

Para una estructura de este tipo los movimientos telúricos son la mayor amenaza a su estabilidad y en el caso de la presa en cuestión, el riesgo es muy alto pues la zona en la que se encuentra tiene una alta incidencia sísmica.

Por lo anterior en este trabajo se presenta el análisis dinámico de la presa a partir de la información obtenida de la instrumentación instalada. Cabe señalar que esta información fue recopilada y procesada por la Subgerencia de Comportamiento de Estructuras de la Comisión Federal de Electricidad, sin embargo, por lo extenso de una investigación de este tipo, en este trabajo solo se utiliza la componente transversal de los sismos registrados.

Con la información recopilada y utilizando técnicas de Fourier se lleva a cabo el análisis dinámico de la presa, siendo la aportación particular de este trabajo, el conocimiento del comportamiento de la presa ante sollicitaciones sísmicas, considerando la estructura como un sistema vibratorio.

En el capítulo I se presenta el método de análisis utilizado para encontrar las características de vibración de la presa. Este procedimiento se basa en la teoría de las vibraciones aleatorias y el análisis de Fourier. También en este primer capítulo se presentan algunas de las aplicaciones del método mencionado, esto, para precisar los conceptos a utilizar.

En el capítulo II se analizan los antecedentes sísmicos de la presa. Se presenta primeramente una exposición general de sismología, para pasar a la descripción de los efectos sísmicos sobre presas y enseguida a la presentación del registro sísmico en la presa y las condiciones sísmicas locales.

En el capítulo III se hace una descripción general de la presa, presentando su ubicación, sus instalaciones y las instrumentaciones geotécnica y sísmica.

Con la información recabada en los capítulos II y III y el método presentado en el capítulo I se desarrolla en el capítulo IV el análisis dinámico de la presa, obteniéndose como resultado las características de vibración de la cortina.

Para terminar en el capítulo V se describen las conclusiones que se obtuvieron del análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

I ANÁLISIS DE SISTEMAS VIBRATORIOS.

I.1 EL MÉTODO DE LAS VIBRACIONES ALEATORIAS.

Un proceso aleatorio $x(t)$ es estacionario si sus funciones de densidad de probabilidad son constantes para cualquier desplazamiento en la escala de tiempo. Llamaremos excitación al proceso aleatorio $x(t)$ que arriba a la estructura y respuesta $y(t)$ al proceso aleatorio $x(t)$ una vez que atravesó un medio continuo dado.

La función de autocorrelación de la excitación $x(t)$ describe la dependencia de un valor del proceso para un tiempo t_1 con otro valor del mismo proceso para otro tiempo t_2 , y es estacionario si esta función depende únicamente de $\tau = t_2 - t_1$, en cuyo caso se puede obtener mediante:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad I.1$$

De la función de autocorrelación se obtienen un valor real para cualquier τ de desfaseamiento del proceso, y se presenta un máximo cuando su desplazamiento en el tiempo es nulo $\tau = 0$.

Para el cálculo de la función de autocorrelación de la respuesta $y(t)$ se utiliza una ecuación similar a la anterior.

$$R_y(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t+\tau)dt \quad I.2$$

De igual manera esta ecuación permite calcular la correlación cruzada entre la excitación y la respuesta, simplemente sustituyendo la excitación desplazada en el tiempo $x(t+\tau)$ por la respuesta desplazada en el mismo tiempo $x(t+\tau)$, lográndose la siguiente ecuación:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad I.3$$

De la función de autocorrelación se obtiene un real para cualquier τ de desfaseamiento entre los procesos y presenta un máximo para un desplazamiento en el tiempo τ . Con esta función se puede determinar: el tiempo que la señal necesita para atravesar un medio continuo dado y las trayectorias de propagación de la señal entre otras.

Al aplicar la transformada de Fourier a las funciones de autocorrelación de entrada $R_x(\tau)$ y salida $R_y(\tau)$ se obtiene como resultado la función de densidad espectral. Esta función describe la composición frecuencial del proceso aleatorio y se evalúa mediante la expresión:

$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \quad \text{I.4}$$

La función de densidad espectral cruzada de dos procesos aleatorios se obtiene aplicando la transformada de Fourier a la función de correlación cruzada. El resultado así obtenido es un número complejo:

$$G_{xy}(f) = C_{xy}(f) - jQ_{xy}(f) \quad \text{I.5}$$

donde la parte real $C_{xy}(f)$ es llamada como la función de densidad co-espectral y la parte imaginaria $Q_{xy}(f)$ es llamada función de densidad de cuadratura.

Una vez evaluadas las funciones de densidad espectral y densidad espectral cruzada es posible determinar la función de transferencia, el ángulo de fase y la función de coherencia.

La función de transferencia calculada a partir de una entrada (la excitación) y la salida (la respuesta) se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_x(f)} \quad \text{I.6}$$

Al expresar la función de densidad espectral cruzada en su notación polar nos permite evaluar el ángulo de fase:

$$G_{xy}(f) = |G_{xy}(f)| e^{-j\theta_{xy}(f)} \quad \text{I.7}$$

donde los valores de la magnitud $|G_{xy}(f)|$ y el ángulo $\theta_{xy}(f)$ son calculados a partir de $C_{xy}(f)$ y $Q_{xy}(f)$ mediante las siguientes ecuaciones:

$$|G_{xy}(f)| = \sqrt{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)} \quad \text{I.8}$$

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right] \quad \text{I.9}$$

La función de coherencia, que indica la correlación entre la excitación y la respuesta, es obtenida mediante:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)G_y(f)} \quad \text{I.10}$$

Los valores de la función de coherencia deben ser menores que 1. Si los procesos de entrada y salida son estadísticamente independientes la función de coherencia es igual que cero.

En las estructuras térreas, es bien sabido que las ondas sísmicas arriban a todo lo largo de la cimentación. Para considerar tal efecto se pueden calcular las funciones de transferencia utilizando los sismos registrados en los instrumentos instalados en las laderas.

Un proceso en el cual existen varios arribos de la señal a la estructura se presenta en la figura I.1.

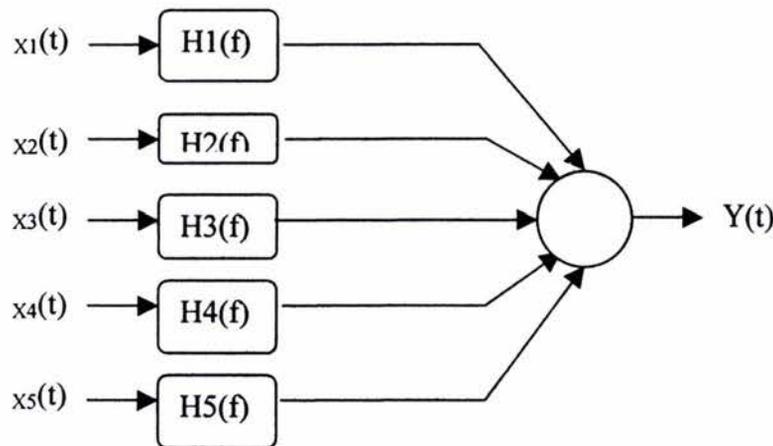


Figura I.1 Esquema de arribo múltiple de señales a una estructura.

En la mayoría de presas se cuenta con dos acelerógrafos instalados uno en cada margen, por lo que las funciones de transferencia para tal situación se pueden evaluar utilizando las siguientes expresiones:

$$H_1(f) = \frac{G_{1y}(f) \left[1 - \frac{G_{12}(f)G_{2y}(f)}{G_{22}(f)G_{1y}(f)} \right]}{G_{11}(f) [1 - \gamma_{12}^2(f)]} \quad \text{I.11}$$

$$H_2(f) = \frac{G_{2y}(f) \left[1 - \frac{G_{21}(f)G_{S_{2y}}(f)}{G_{22}(f)G_{1y}(f)} \right]}{G_{22}(f) [1 - \gamma_{12}^2(f)]} \quad \text{I.12}$$

donde las funciones de densidad espectral G_{1y} , G_{2y} , G_{11} , G_{22} , G_{12} y G_{21} son evaluadas con las ecuaciones I.4 y I.5, y la función de coherencia γ_{12}^2 con la ecuación I.10. A continuación se abunda sobre las herramientas utilizadas en este método.

I.1.1 TRANSFORMADA DE FOURIER.

El campo de aplicaciones de la transformada de Fourier es muy amplio: teoría del sonido, conducción del calor, ondas electromagnéticas, circuitos eléctricos y vibraciones mecánicas, etc. Cuando se busca la solución de una función $f(t)$, haciendo uso de un tipo particular de serie trigonométrica que la representa, ésta se encuentra más fácilmente con su transformada $g(\omega)$, la solución $g(\omega)$ se invierte usando la antitransformada, que generalmente lleva a la solución de los problemas generados.

La transformada de Fourier lleva una función del dominio del tiempo a lo que se llama el dominio de las frecuencias. Esto significa simplemente que se tiene una curva que se desarrolla sobre el tiempo, y se encuentran sus frecuencias. El resultado se llama espectro, el cual es una onda con sus frecuencias básicas.

Una función periódica puede ser descompuesta en sus componentes armónicas, mediante la transformación de la función al dominio de la frecuencia. Por lo que la suma de las componentes armónicas será una función periódica (figura I.2).

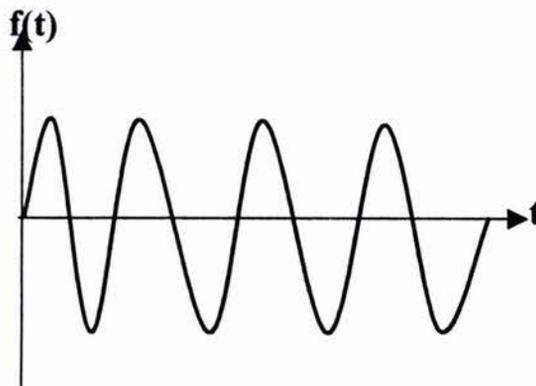


Figura I.2 función periódica.

Si $f(t)$ es una función periódica del tiempo t , con un periodo T , tal como se muestra en la figura III.1, siempre es posible expresar $f(t)$ como una serie infinita de términos trigonométricos de la forma:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + a_2 \cos \frac{4\pi t}{T} \dots + b_1 \text{sen} \frac{2\pi t}{T} + b_2 \text{sen} \frac{4\pi t}{T} + \dots$$

o simplificando la expresión:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} \right] \quad \text{I.13}$$

donde las constantes a_0, a_k y b_k son los coeficientes de Fourier dados por:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos \frac{2\pi nt}{T} dt \quad \text{I.14a}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \text{sen} \frac{2\pi nt}{T} dt \quad \text{I.14b}$$

El término a_0 , independiente de la frecuencia, viene dado por el valor medio de $f(t)$ en el tiempo.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \quad \text{I.14c}$$

- a) Si $f(t) = f(-t)$, la función es par. Presenta simetría respecto del origen y, en su desarrollo en serie, solo están presentes los términos en coseno (el término constante a_0 , es opcional).
- b) Si $f(t) = -f(-t)$, la función es impar y únicamente los términos en seno están presentes (el término constante es opcional).
- c) Si $f(t + T/2) = f(t)$, solo están presentes los armónicos pares.
- d) Si $f(t + T/2) = -f(t)$, solo están presentes los armónicos impares.

Las condiciones matemáticas para la convergencia de las ecuaciones son extremadamente generales y cubren prácticamente toda situación concebible de interés en la ingeniería.

La función periódica $f(t)$ puede escribirse de manera alternativa, pero conviene, en términos de cantidades complejas. De la teoría de señales complejas tenemos las relaciones:

$$\cos(n\omega)t = \frac{1}{2} (e^{in\omega t} + e^{-in\omega t}) \quad \text{I.15}$$

$$\text{sen}(n\omega)t = \frac{1}{2i} (e^{in\omega t} - e^{-in\omega t}) \quad \text{I.16}$$

Sustituyéndolas en la expresión de la serie de Fourier se obtiene:

$$f(t) = a_0 + \sum_1^{\infty} a_n \left(\frac{e^{in\omega t} + e^{-in\omega t}}{2} \right) + \sum_1^{\infty} b_n \left(\frac{e^{in\omega t} - e^{-in\omega t}}{2i} \right)$$

$$f(t) = a_0 + \sum_1^{\infty} \left\{ \frac{(a_n - ib_n)e^{in\omega t}}{2} + \frac{(a_n + ib_n)e^{-in\omega t}}{2} \right\} \quad \text{I.17}$$

Haciendo:

$$C_n = \frac{1}{2} (a_n - ib_n) \quad \text{I.18a}$$

$$C_{-n} = \frac{1}{2} (a_n + ib_n) \quad \text{I.18b}$$

$$C_0 = a_0 \quad \text{I.18c}$$

donde C_{-n} representa el complejo conjugado de C_n , y sustituyendo las expresiones de los coeficientes a_n y b_n dadas por I.14 resulta:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) [\cos(n\omega t) - i \text{sen}(n\omega t)] dt \quad \text{I.19}$$

$$C_{-n} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) [\cos(n\omega t) + i \operatorname{sen}(n\omega t)] dt \quad \text{I.20}$$

o,

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-in\omega t} dt \quad \text{I.21}$$

y,

$$C_{-n} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{in\omega t} dt \quad \text{I.22}$$

Con

$$f(t) = C_0 + \sum_1^{\infty} C_n e^{in\omega t} + \sum_{-\infty}^{-1} C_n e^{in\omega t} \quad \text{I.23}$$

donde los valores de n son negativos en el último término y están incluidos en el sumatorio (sigma). Además, C_0 puede ser introducido en el sumatorio utilizando el valor $n=0$. Entonces:

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega t} \quad \text{I.24}$$

Este resultado muestra que la señal periódica $f(t)$ puede ser también representada matemáticamente por una serie infinita de componentes, de frecuencias positivas y negativas. Las frecuencias negativas tienen un significado matemático y, a veces pueden tener también un sentido físico, puesto que una frecuencia negativa puede ser asociada a una frecuencia positiva puede asociarse a una rotación en el sentido contrario.

La técnica de las series de Fourier puede ampliarse a ondas aperiódicas, como impulsos únicos o transitorios, haciendo $T \rightarrow \infty$. De este modo, virtualmente nunca se producen impulsos adyacentes y el tren de impulsos queda reducido a un único impulso aislado.

Suponiendo que $f(t)$ es inicialmente periódica, tenemos:

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega t} \quad \text{I.25}$$

donde,

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) e^{-in\omega t} dt \quad \text{I.26}$$

en el límite, y para un impulso aislado, tenemos:

$$T \rightarrow \infty \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow d\omega \quad \text{I.27}$$

entonces

$$\frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \rightarrow \frac{d\omega}{2\pi} \quad \text{I.28}$$

Además, el armónico n-ésimo de la serie de Fourier $n\omega \rightarrow nd\omega$ se convierte en un valor genérico que puede ser definido como " ω ". Finalmente, y en el límite, el sumatorio se transforma en integral y tenemos:

$$C_n = \frac{d\omega}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad \text{I.29}$$

y

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \right] e^{i\omega t} \quad \text{I.30}$$

La cantidad entre corchetes, una vez calculada, es función exclusivamente de la frecuencia y se representa como $g(\omega)$, siendo

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad \text{I.31}$$

Se denomina Transformada de Fourier de $f(t)$. Sustituyendo en la expresión anterior de $f(t)$, obtenemos:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{I.32}$$

que se conoce como integral de Fourier o transformada inversa de Fourier. La función del tiempo $f(t)$ representa ahora la expresión de un impulso único o de un transitorio.

I.1.2 CORRELACIONES.

En el estudio de muchos procesos aleatorios que sirven de modelos matemáticos para el ruido, los movimientos sísmicos, etc. , es de interés saber si existe alguna regularidad estadística o correlación en el proceso aleatorio. La posibilidad de obtener tal correlación conduce al empleo de varias técnicas de correlación para el estudio de señales aleatorias.

La función

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_1(t) f_2(t - \tau) dt \quad I.37$$

se conoce como la función de correlación entre las funciones $f_1(t)$ y $f_2(t)$. En forma análoga se define:

$$R_{21}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_2(t) f_1(t - \tau) dt \quad I.38$$

La función de correlación $R_{12}(\tau)$ o $R_{21}(\tau)$ suministra una medida de la similitud o interdependencia entre las funciones $f_1(t)$ y $f_2(t)$ en función del parámetro τ (el desplazamiento de una función respecto a la otra). Si la función de correlación es cero para todo valor de τ , se dice que las dos funciones no están correlacionadas.

La posibilidad de verificar la correlación entre dos variables aleatorias conduce a la noción de función de función de autocorrelación, la cual trata de correlacionar una señal aleatoria $f(t)$ con ella misma pero decalada un tiempo τ , es decir, $f(t - \tau)$. Si $f_1(t)$ y $f_2(t)$ son idénticas, entonces la función de correlación:

$$R_{11}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_1(t) f_1(t - \tau) dt \quad I.39$$

se denomina función de autocorrelación de $f_1(t)$. Siendo válida dicha definición para todos los tipos de señales conocidas, bien sean aleatorias o determinísticas.

I.1.3 ESPECTRO DE RESPUESTA.

Las señales pueden ser descompuestas mediante las técnicas de Fourier en diversos componentes frecuenciales. La gama completa de estas frecuencias representa el espectro de frecuencias de la señal y es de la mayor importancia en distintos ámbitos como las

telecomunicaciones. El conocimiento exacto del espectro es muy útil para la resolución de problemas de transmisión y recepción.

Así pues una señal, puede ser representada, en el “dominio temporal”, en un gráfico que dé su amplitud instantánea en función del tiempo, o en el “dominio frecuencial”, en un gráfico que dé las amplitudes de sus componentes espectrales en función de la frecuencia. Existe una relación directa entre estas dos representaciones que puede ser puesta de manifiesto con la ayuda de las técnicas de Fourier.

El espectro de respuesta es el conjunto de valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento de estructuras de un grado de libertad con comportamiento elástico lineal del mismo amortiguamiento, sujeto al mismo amortiguamiento en su base, y podría definirse como el lugar geométrico de los valores absolutos de las respuestas máximas de un sistema con un grado de libertad no amortiguado o con amortiguamiento viscoso pequeño y con una frecuencia natural que varía de cero a infinito, y sometido a un sismo determinado. Se observa que tiene relación con los valores extremos que ocurren en la respuesta.

Debe señalarse que existen dos tipos de espectros, el espectro discreto y el continuo. A continuación se abunda más acerca del tema.

La serie de Fourier representa un número infinito de componentes frecuenciales que, sumados, dan la función del tiempo $f(t)$. Estos componentes frecuenciales constituyen un espectro discreto. Las amplitudes de cada una de las frecuencias discretas vienen dadas por los coeficientes a_n y b_n . Todos los componentes frecuenciales son armónicos de la frecuencia fundamental, $1/T$, y la gama total de frecuencias es el espectro o el ancho de banda de la señal.

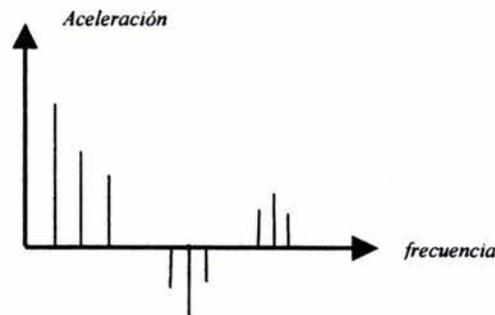


Figura III.2 Espectro discreto.

Aunque el espectro frecuencial puede consistir en un número infinito de frecuencias discretas, sus amplitudes se van haciendo cada vez menores a medida que crece n .

Como se vio anteriormente con la expresión denominada integral de Fourier, la función $f(t)$ representa la expresión de un impulso único o de un transitorio. La

significación de este resultado final es que cualquier transitorio o impulso aislado puede ser representado como la suma de un número infinito de componentes de frecuencia, $g(\omega)$, donde ω es un valor genérico.

Esto conduce a un espectro continuo, en contraposición al espectro discreto de las formas de onda periódicas. En términos físicos, los componentes frecuenciales se hallan muy próximos unos de otros, puesto que el espaciamiento entre ellos es $1/T$, que tiende a cero al tender T a ∞ .

En general, $g(\omega)$ es una función compleja. Su amplitud y fase pueden ser representadas para dar el espectro de frecuencias de la función del tiempo $f(t)$.

Conocidos el espectro de potencia de la excitación, que es la forma como se presenta el sismo, y la función de transferencia, podemos obtener el espectro de respuesta utilizando la ecuación:

$$p_r(W) = |H(W)|^2 p_x(W) \quad \text{I.33}$$

y con esta podemos calcular la variancia de la respuesta N_r , utilizando la expresión:

$$N_r^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H(W)|^2 P_x dW \quad \text{I.34}$$

$$N_r^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H(W)|^2 P_x dW - 0.5W_0 P_x(W_0) \quad \text{I.35}$$

Donde:

$P_x(W)$ Espectro de potencia para los desplazamientos en el nodo j .

$H_j(W)$ Función de transferencia compleja de los desplazamientos en el nodo j , con respecto a las aceleraciones en la base.

$P(W)$ Espectro de potencia de la excitación en la base rígida.

Y con esta podemos obtener el espectro de respuesta con la expresión:

$$S_a(W) = 3N_r \quad \text{I.36}$$

donde 3 es el parámetro de Venmarcke, quien encontró que los picos de una función aleatoria $f(t)$ ocurren en grupos, cuyo tamaño depende de un factor empírico q .

I.1.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

La función de transferencia $H(\omega)$ de un sistema en un estado estable, con características dinámicas es la respuesta del sistema a la entrada de una vibración, midiendo de manera aproximada la respuesta transitoria inicial y final para la alteración del mismo, en cualquier instante, hasta alcanzar nuevamente su equilibrio estático. Usualmente, para considerar el resultado de la entrada de una vibración corta y cerrada en un sistema (teóricamente cero) en un intervalo de tiempo, se elimina la función de transferencia.

Se puede representar la función de vibración mediante una función delta (δ) con la ecuación:

$$x(t) = I\delta(t) \quad \text{I.40}$$

donde I es una constante con parámetros constantes con la dimensión (fuerza) por (tiempo), para el caso cuando $x(t)$ representa una fuerza de vibración o impulso, entonces la ecuación queda:

$$\int_0^{\infty} x(t)dt = I \int_0^{\infty} \delta(t)dt = I \quad \text{en (fuerza) por (tiempo) I.41}$$

Esta terminología cubre el caso general cuando $x(t)$ representa algún parámetro de entrada, sea una fuerza o no, y define la función de transferencia del sistema respondiendo a la entrada de un impulso, de tal manera que en respuesta a éste en un sistema que inicialmente se encuentra inactivo y repentinamente sufre una alteración, ésta lo hará vibrar o moverse, hasta que gradualmente recobre su estado de equilibrio estático durante un periodo de tiempo. La respuesta a la unidad de impulso cuando $t = 0$ está representada por la función de transferencia $h(t)$ (figura I.3). Nótese que cuando $h(t) = 0$ para $t < 0$ entonces $y(t) = 0$ es decir antes de que ocurra la vibración o el impulso.

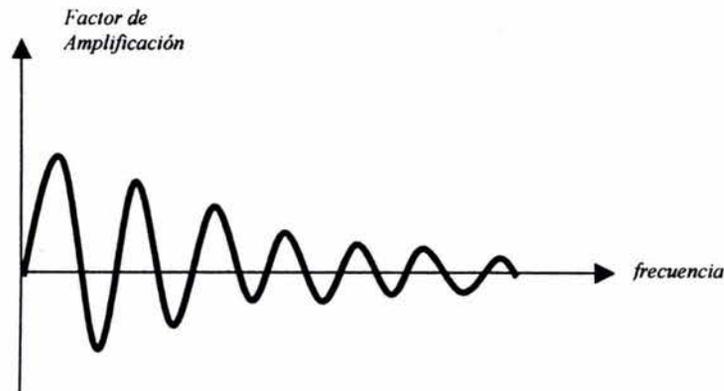


Figura I.3 Función de transferencia.

I.1.5 FUNCIÓN DE COHERENCIA.

El término $\gamma_{xy}^2(f)$ es llamado la función de coherencia. Cuando $\gamma_{xy}^2(f) = 0$, para una frecuencia en particular, $x(t)$ y $y(t)$ son llamadas incoherentes para dicha frecuencia, en cuyo caso no existe una correlación. Entonces $x(t)$ y $y(t)$ son estáticamente independientes cuando $\gamma_{xy}^2(f) \neq 0$ para todas las frecuencias.

Cuando $\gamma_{xy}^2 = 1$, para toda f , entonces $x(t)$ y $y(t)$ se dice que son completamente coherentes (dependientes).

I.1.6 ÁNGULO DE FASE Y TIEMPO DE RETARDO.

La transmisión de ondas sísmicas desde su fuente hasta la estación de registro, puede estudiarse como un proceso de propagación de ondas elásticas de diversos tipos (compresión, cortante, superficiales). Durante este proceso ocurren fenómenos tales como la reflexión, refracción, atenuación, ampliación del frente de onda, etc. La influencia del suelo local tiene lugar al final de dicho proceso. La respuesta sísmica del suelo puede diferir de un punto a otro ubicado en la misma región o de uno ubicado a diferentes profundidades medidas desde la superficie del terreno.

Al fenómeno de modificación de la respuesta dinámica del suelo cuando éste se encuentra en condiciones estables (que no se presente el fenómeno de licuación, que no haya compactación por vibración, pérdida al esfuerzo cortante, etc.), se le llama amplificación o atenuación, esta condición implica modificaciones en la respuesta sísmica bajo determinada condición local del suelo, es decir, puede haber modificación en la amplitud de la respuesta (aceleración, velocidad, desplazamientos, etc.), o modificación en el contenido de frecuencias (respuesta evolutiva en el dominio de la frecuencia).

La disipación de energía durante cada ciclo de carga y descarga de un elemento de suelo se manifiesta de muy diversas maneras, por ejemplo: en la alimentación de energía necesaria para mantener constante la amplitud de vibración forzada, en la amplitud finita de vibración en resonancia, o en el decremento progresivo de la amplitud de vibración simple. Cualquiera de esas manifestaciones del amortiguamiento interno proporciona a su vez una medida de éste y un método para su cuantificación.

El amortiguamiento interno también puede medirse mediante el ángulo de fase α , entre la fuerza y la deformación en vibración forzada. En efecto, durante la vibración forzada de un elemento perfectamente elástico la fuerza actuante y la deformación de respuesta están en fase, es decir ambas alcanzan valores máximos simultáneamente, pues son proporcionales; esto implica que el trabajo realizado es nulo, ya que el vector de velocidad resulta normal al vector de fuerza. Por otra parte, en un sistema viscoso ideal la velocidad de deformación es la que está en fase con la fuerza y, puesto que la vibración

periódica, la deformación y la velocidad están desfasadas $\frac{\pi}{2}$, hay un retraso de $\frac{\pi}{2}$, de la deformación con respecto a la fuerza, por lo que la energía disipada es máxima. En general, si hay tanta disipación como almacenamiento de energía, como en un material viscoelástico, la deformación sufre un retraso entre 0 y $\frac{\pi}{2}$ con respecto a la fuerza, y una componente de la velocidad de deformación tiene la misma dirección que la fuerza.

En resumen, el ángulo de fase ϕ representa la distancia angular que está retrasada la respuesta respecto al desplazamiento. Por lo tanto el tiempo de retardo entre un sistema y una frecuencia f puede establecerse por:

$$\tau = \frac{\phi_{xy}(f)}{2\pi f} \quad \text{I.42}$$

I.2 EJEMPLOS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS VIBRATORIOS

I.2.1 SEÑALES.

Una señal es una tensión o corriente eléctrica que varía con el tiempo y se utiliza para llevar mensajes o información de un punto a otro. Un mensaje se presenta generalmente en forma de palabras o de símbolos codificados y la cantidad de información que contiene es de la mayor importancia en las comunicaciones.

En la práctica, resulta más conveniente manejar la información convirtiéndola en una señal. Ésta es entonces transmitida, mediante un sistema de comunicación, al punto receptor, donde se vuelve a transformar en el mensaje o la información original. La disposición esquemática de un sistema típico de comunicación se muestra en la siguiente figura.

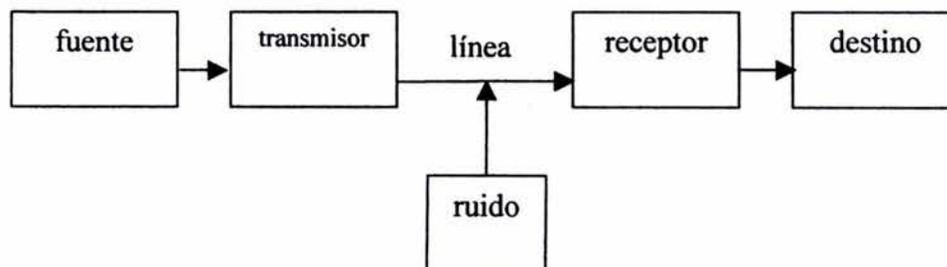


Figura I.4 sistema típico de comunicaciones.

La fuente genera la señal, que es procesada por el transmisor y enviada a lo largo de la línea. En el punto receptor, se extrae el mensaje y se envía a su destino final (sumidero). Durante la transmisión y recepción, se recoge ruido procedente de diversas fuentes, que pueden ser representadas como única fuente de ruido.

Existen dos tipos principales de señales: la analógica, que varía continuamente con el tiempo, y la digital, que es discontinua con él.

En general, las señales analógicas representan la variación de una magnitud física, como una onda sonora, y pueden ser, por tanto, ondas senoidales como una combinación de ellas.

La señal digital consiste básicamente en “impulsos” que tienen lugar en intervalos discretos de tiempo. Los impulsos pueden presentarse simplemente con una periodicidad definida o en grupos codificados, como en telegrafía. Señales típicas son las utilizadas en telegrafía, telefonía, radio, televisión y radar.

RESPUESTA DE UNA RED.

Desde el punto de vista de las comunicaciones, el conocimiento del espectro de frecuencias de las ondas, periódicas y no periódicas, puede ayudar a mostrar de qué manera será afectada la señal al pasar a través de una red que presente una frecuencia característica propia. El resultado global se denomina respuesta de la red.

La relación entre la función de entrada, considerada como una función de la frecuencia, y la respuesta es puramente algebraica y es más fácil de obtener que la relación alternativa entre dicha función de entrada, considerada como una función del tiempo, y la misma respuesta. Para obtener la respuesta de la red a una onda no periódica la técnica de la transformada de Fourier no puede ser aplicada.

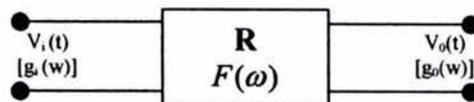


Figura 1.5 diagrama de una red simple.

Sea $F(\omega)$ la función de transferencia de la red mostrada en la figura 1.5 $F(\omega)$ es una función generalmente compleja y está definida por la ecuación:

$$\text{Función de transferencia} = \frac{\text{transformada de la salida}}{\text{transformada de la entrada}} = F(\omega) = |F(\omega)|\phi(\omega) \quad 1.43$$

donde $|F(\omega)|$ es la amplitud de la respuesta y $\phi(\omega)$ el ángulo de fase a través de la red. Ambas cantidades dependen de ω .

Si $V_i(t)$ y $V_o(t)$ son, respectivamente, las funciones de entrada y de salida en función del tiempo y $g_i(\omega)$ y $g_o(\omega)$ sus transformadas de Fourier correspondientes, tenemos:

$$\frac{g_o(\omega)}{g_i(\omega)} = F(\omega) \quad \text{I.44a}$$

o,

$$g_o(\omega) = F(\omega) * g_i(\omega) \quad \text{I.44b}$$

donde

$$g_i(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_i(t) * e^{-i\omega t} dt \quad \text{I.45}$$

La salida, $V_o(t)$, se puede obtener entonces mediante la transformada inversa de Fourier, que da:

$$V_o(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g_o(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{I.46a}$$

o,

$$V_o(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) g_i(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{I.46b}$$

Para el caso de ondas periódicas, la respuesta del filtro se obtiene determinando en primer lugar los componentes frecuenciales de la onda de entrada mediante la descomposición en serie de Fourier. De estos componentes, solo aparecerán en la salida aquellos que deje pasar el filtro. Del conocimiento de la frecuencia de corte, f_c , o de las dos frecuencias de corte, f_{c1} y f_{c2} , se deducen, por simple inspección, qué frecuencias aparecerán en la salida. La respuesta de la red se obtendrá superponiendo las frecuencias de salida.

ANCHO DE BANDA.

El teorema de Fourier establece que una forma de onda cualquiera puede descomponerse en un gran número de señales senoidales y cosenoidales, conocidas como componentes de Fourier. El cambio que experimenta cada una de estas cuando atraviesa un circuito, filtro, amplificador, etc., puede conocerse, y por consiguiente basta sumar las señales senoidales y cosenoidales que se obtienen en la salida para obtener, teóricamente, la señal compleja en la salida del circuito en estudio.

Si se trata de un amplificador que responde a todos los componentes de Fourier presentes en la señal compleja, la salida va a ser simplemente una réplica exacta de la entrada. Pero en general esto no sucede en la práctica ya que unas frecuencias son más amplificadas que otras, y las relaciones de fase (amplitudes relativas de los componentes seno y coseno para una misma frecuencia) también se alteran. Todo esto se traduce en una modificación de la forma de onda que se conoce por distorsión. En general, puede decirse que cuanto mayor sea el margen de frecuencias en que trabaje el amplificador, más difícil es que esté libre de distorsión. Dicho margen se conoce por ancho de banda, y si el armónico más elevado es mf_1 y f_1 es la frecuencia fundamental, el ancho de banda debe ser $(m - 1)f_1$. Una cuestión de sumo interés es la determinación del número de armónicos que debe dejar pasar el amplificador, filtro, etc., para que sea tolerable la calidad de reproducción.

El análisis de Fourier se puede aplicar a ondas repetitivas de forma cualquiera. Pero estas formas de onda no son las únicas a las que puede aplicarse el método. Por ejemplo, consideremos el registro de salida de un micrófono mientras alguien está hablando ante él y que dicha salida se divide en una serie de partes, cada una de las cuales corresponde a un mismo intervalo de tiempo. Entonces, a menos que el locutor sea tartamudo, cada parte diferirá de las otras, tal como se indica en la figura 1.6 en la que se representan dos intervalos sucesivos. Para aplicar el análisis de Fourier en este caso, es preciso suponer que la forma de onda se repite después de un tiempo igual al intervalo elegido. Cuando la señal se repite, se cumplen las condiciones matemáticas para que sea aplicable el análisis de Fourier, y es relativamente sencillo encontrar las amplitudes y fases de todas las ondas de diferentes frecuencias que sumadas reproducen la señal registrada. Exactamente el mismo procedimiento se aplicaría al registro del intervalo dos y para todos los restantes. Así, conociendo todas las componentes de Fourier, determinaríamos la frecuencia inferior y superior entre todas ellas. De este modo habremos determinado la banda de frecuencia que debe tener un amplificador, por ejemplo, que vaya a reproducir correctamente la señal.

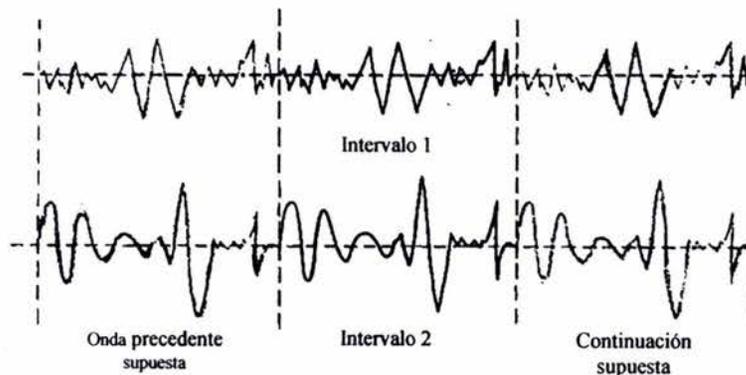


Figura 1.6 modificación de una onda para la aplicación del método de Fourier.

El tipo de modulación empleado determina la anchura de banda que ha de tener el sistema, y esto a su vez especifica el número de equipos diferentes que pueden trabajar dentro de una banda de frecuencias.

El sistema de modulación más sencillo que se emplea para tales fines se denomina modulación de amplitud (AM), en el que se varía la amplitud de la onda de radiofrecuencia, u onda portadora, en función del valor instantáneo de la señal moduladora, palabra, música, etc. Basta conocer lo que sucede cuando se modula la portadora con una señal senoidal o cosenoidal, para que se pueda determinar lo que sucede al modular con una onda compleja, pues ya se ha visto que una señal de este tipo puede descomponerse, empleando el análisis de Fourier, en una serie de componentes. Cada uno de éstos actúa como una onda simple; entonces, para determinar la banda que precisa el sistema bastaría con conocer las frecuencias límite, superior e inferior, de la información a transmitir.

RUIDO E INTERFERENCIA.

El ruido eléctrico puede definirse como una señal indeseable que está siempre presente en un sistema de comunicación. Su presencia tiende a impedir la recepción de la señal útil y normalmente es el principal factor que limita la detección de ésta. De aquí que el estudio del ruido sea una parte importante de los sistemas de comunicación y que sea necesario evaluar su efecto perturbador, pues es él quien en definitiva determina el comportamiento del sistema. Además, la interferencia debida a otras señales perturbadoras, tales como las producidas por estaciones cercanas, puede ser también igualmente importante.

El ruido y la interferencia juegan un papel similar en los sistemas de comunicación, pero son de naturaleza distinta. Normalmente el ruido está constituido por tensiones que se producen de manera aleatoria sin ninguna relación ni de fase ni de frecuencia e incluso a veces de amplitud muy pronunciada. La interferencia, en cambio, es normalmente de tipo regular y periódico. En resumen, las tensiones de ruido son similares a trenes de impulsos, de cuyas ondas algunas tienen crestas pronunciadas distribuidas de manera aleatoria y de forma continua. Cuando dichas tensiones se observan en un osciloscopio, el ruido da una impresión semejante a crestas de descargas, como puede verse en la figura I.7.

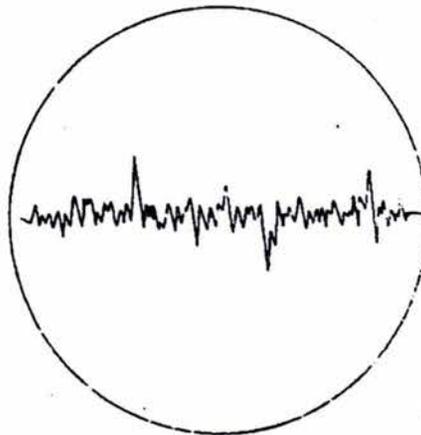


Figura I.7 vista del ruido en el osciloscopio

Las crestas tienen una duración media de un microsegundo, lo cual significa que tienen componentes de alta frecuencia. Las propiedades aleatorias del ruido requieren un estudio estadístico de su comportamiento, pudiéndose obtener algunos conocimientos de las características de frecuencia y de fase empleando las técnicas de la transformada de Fourier.

Existen dos tipos de ruido, el artificial y el natural. Ejemplos de primer tipo son: el producido por las máquinas eléctricas, los chispazos de los sistemas de ignición, conmutadores defectuosos, etc., El efecto del ruido producido por los chispazos se ve claramente sobre la pantalla de un receptor de televisión como un grupo de líneas brillantes que cubren la totalidad de la misma, como se advierte cuando un automóvil pasa delante de una casa donde hay un televisor. Ejemplo de ruido natural es el causado por la radiación cósmica, los fenómenos atmosféricos y los tipos más comunes de ruidos presentes en los circuitos electrónicos.

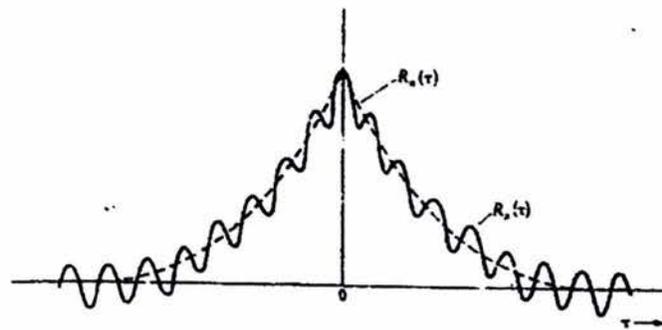
La detección de una señal periódica débil que está inmersa en ruido aleatorio puede realizarse utilizando técnicas de autocorrelación o de correlación mutua. Para valores grandes de τ , la función de autocorrelación de una señal aleatoria con media cero, tiende a cero, mientras que la de una señal periódica es todavía periódica. En la figura I.8.a se pone de manifiesto lo dicho.

Admitiendo que la señal periódica $s(t)$ y la señal de ruido aleatorio $n(t)$ no están correlacionadas, su suma es $x(t) = s(t) + n(t)$ y tenemos, por tanto:

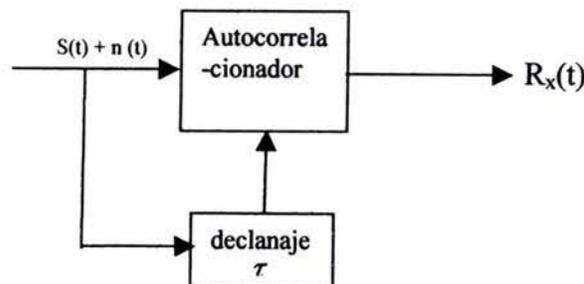
$$R_x(\tau) = R_s(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) + R_n(\tau) \quad \text{I.47a}$$

o

$$R_x(\tau) = R_s(\tau) \quad [\text{pues } R_{sn}(\tau) = R_{ns}(\tau) = R_n(\tau)] \quad \text{I.47b}$$



a)



b)

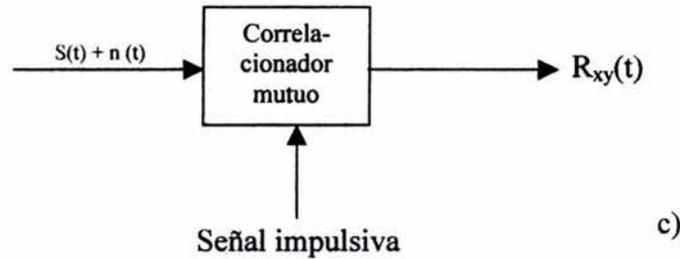


Figura I.8 detección de una señal inmersa en ruido.

La técnica para realizar tales funciones se indica en la figura I.8b. Puesto que la autocorrelación no suministra información acerca de la onda $s(t)$ que representa, ésta podemos obtenerla realizando una correlación mutua. La señal $s(t)$ se correlaciona con una señal impulsiva $y(t)$ cuyo periodo τ_0 es el mismo que el que posee $s(t)$ y de esta forma puede determinarse dicha información si no se conoce, a través de la autocorrelación. De lo anterior, si $n(t)$ e $Y(t)$ no están correlacionadas tenemos:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [s(t) + n(t)] y(t - \tau) dt \quad \text{I.48a}$$

o

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{\tau_0} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} s(t) y(t - \tau) dt \quad [\text{pues } R_{ay}(\tau) = 0] \quad \text{I.48b}$$

donde τ_0 reemplaza a T , ya que el promedio sobre T es el mismo que sobre cualquier otro periodo τ_0 , pues $s(t)$ e $y(t)$ tienen el mismo periodo τ_0 . La técnica es similar al principio de muestreo y puede demostrarse que:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{\tau_0} s(t) \quad \text{I.49}$$

para todos los valores de τ . En la figura I.8c se indica un diagrama de bloques que representa una situación como la descrita anteriormente.

I.2.2 ELECTRICIDAD

CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA.

La aplicación de un campo eléctrico \vec{E} a un conductor, establece en él una corriente eléctrica, cuyo sentido (convencional) es el mismo que el del vector \vec{E} . Entonces, si el sentido del campo eléctrico aplicado permanece constante, el sentido de la corriente

también se mantendrá inalterado; es decir, las cargas se desplazarán continuamente en un mismo sentido del conductor. Una corriente de esta clase recibe el nombre de corriente continua (CC) o corriente directa. La corriente directa es proporcionada, por ejemplo por las pilas o por las baterías o acumuladores de los automóviles.

Pero la corriente eléctrica que suministran las empresas públicas de electricidad en casi todas las ciudades del mundo, no es corriente continua. Cuando conectamos un aparato eléctrico a cualquier toma o contacto de una casa, el campo eléctrico establecido en el conductor cambia periódicamente de sentido. Por consiguiente, las cargas eléctricas en el conductor oscilarán desplazándose unas veces en un sentido y otras en sentido contrario. Entonces la corriente eléctrica que circula (así como el campo), cambia periódicamente de sentido, por lo cual se denomina corriente alterna (CA). La frecuencia de una corriente alterna normalmente es igual a 60 hertz; es decir, en estas corrientes las cargas eléctricas que existen en el conductor, ejecutan 60 oscilaciones completas (60 ciclos) por segundo. Una bobina en rotación dentro de un campo magnético induce una fuerza electro motriz (fem) alterna de una manera muy eficiente, además, el transformador proporciona un método conveniente para transmitir corriente alterna a grandes distancias y con una pérdida de potencia mínima, siendo éstas razones suficientes para el uso predominante de los circuitos de CA.

En todos los circuitos de corriente continua, el voltaje y la corriente adquieren los valores máximo y cero al mismo tiempo y se dice que están en fase. Los efectos de la inductancia y la capacitancia en circuitos de corriente alterna impiden que el voltaje y la corriente alcancen los valores máximos y mínimos al mismo tiempo. Es decir, la corriente y el voltaje en la mayor parte de los circuitos están fuera de fase.

Muchos dispositivos domésticos como lámparas o tostadores se aproximan a una condición de resistencia pura. En tales aparatos, el voltaje instantáneo V y la corriente instantánea i están en fase; o sea, que a variaciones en el voltaje corresponderán variaciones simultáneas en la corriente. Cuando el voltaje es máximo, también la corriente es máxima. Cuando el voltaje es cero, la corriente es cero.

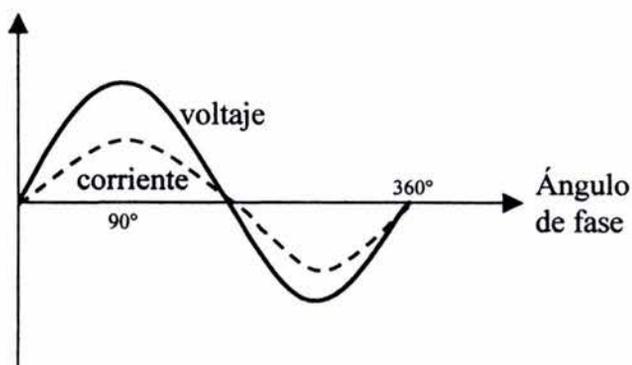


Figura 1.9 ángulo de fase de un circuito de resistencia pura.

La corriente y el voltaje oscilan con la misma frecuencia pero fuera de fase, la excepción se da cuando el circuito está en resonancia o si, como ya se vio, se trata de un circuito de resistencia pura (Fig. 1.9).

El ángulo por el cual la curva del voltaje en un elemento, circuito, o una combinación de elementos, se retrasa de la curva de la corriente se llama ángulo de fase y en términos del tiempo y el periodo se tiene la siguiente expresión:

$$t = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\phi}{2\pi} T = \frac{\phi}{2\pi f} \quad \text{I.50}$$

donde: ϕ es el ángulo de fase, T es el periodo, t es el tiempo

Cuando se considera la relación de fase entre la corriente y el voltaje a través de un inductor puro, como se muestra en la figura 1.10, se ha visto que la presencia de la inductancia en un circuito cuya corriente está variando, da como resultado una fuerza electromotriz que retrasa la corriente al alcanzar su máximo. El voltaje alcanza un máximo en tanto que la corriente es cero.

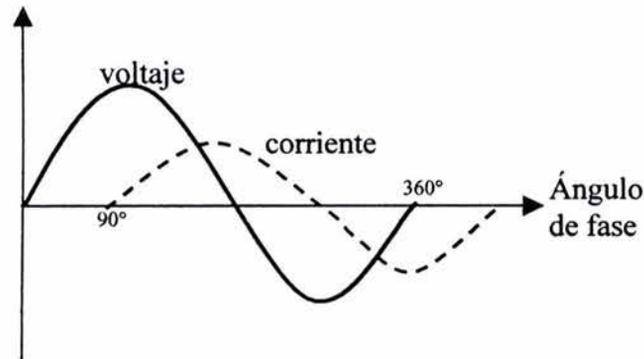


Figura 1.10 ángulo de fase en un inductor puro.

Entonces en un circuito que solo contenga inductancia pura el ángulo de fase es de 90° . En un resistor puro el voltaje y la corriente están en fase pues $\phi = 0$. Para un capacitor puro $\phi = -90^\circ$. El ángulo de fase negativo ocurre cuando el voltaje se retrasa en relación con la corriente.

El efecto de la capacitancia en un circuito de CA es opuesto al de la inductancia. En este caso el voltaje se retrasa a la corriente puesto que el flujo de carga al capacitor es necesario para desarrollar una fem que se oponga. Cuando el voltaje que se aplica es decreciente, fluye la carga del capacitor. La rapidez del flujo de esta carga es máxima cuando el voltaje aplicado es cero (Fig. 1.11).

En un circuito que contenga los tres elementos (capacitores, resistores e inductores) el voltaje eficaz se calcula con los voltajes de cada uno de los elementos:

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad \text{I.51}$$

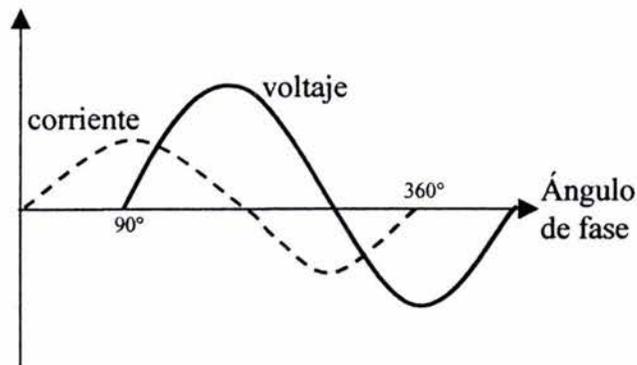


Figura I.11 ángulo de fase en un capacitor puro.

y la relación entre los voltajes se da por medio del ángulo de fase que se calcula de la siguiente forma:

$$\tan \phi = \frac{V_L - V_C}{V_R} \quad 1.52$$

En circuitos de CA no se consume potencia debido a la capacitancia o a la inductancia. La energía solamente se almacena un instante y se libera en otro, dando lugar a que la corriente y el voltaje se encuentren fuera de fase. Siempre que la corriente y el voltaje se encuentren en fase, la potencia P entregada es máxima y está dada por $P = i * V$ donde i es la corriente eficaz y V el voltaje eficaz.

Normalmente un circuito de CA contiene la reactancia suficiente para limitar la potencia eficaz. En cualquier caso la potencia suministrada al circuito solo es función de la componente del voltaje V que está en fase con la corriente i , la componente es V_R y puede escribirse:

$$V_R = V \cos \phi \quad 1.53$$

donde ϕ es el ángulo de fase. Por lo tanto, la potencia eficaz que un circuito de CA consume es:

$$P = iV \cos \phi \quad 1.54$$

la cantidad $\cos \phi$ se llama factor de potencia del circuito.

1.2.3 AERONÁUTICA.

DISEÑO DINÁMICO.

Un avión en vuelo nivelado y no perturbado está equilibrado y la sustentación neta equilibra el peso del avión. Esta situación sólo es temporal, porque normalmente el flujo aéreo en la atmósfera está cambiando continuamente de velocidad y dirección.

Las cargas extremas que actúan sobre un avión provienen del aire, en forma de turbulencias o rachas o cargas de maniobra, y del suelo durante el rodaje, el despegue, el aterrizaje o el manejo en tierra.

Además de las cargas aéreas estudiadas anteriormente, existen otras cargas resultantes de la respuesta dinámica de la estructura. Toda estructura tiene una frecuencia de vibración natural o resonante. La estructura del avión es elástica, es decir se deflexiona o tuerce bajo la acción de las cargas y está sujeta a las fuerzas aerodinámicas; por tanto, se pueden producir oscilaciones aeroelásticas de los componentes. A una cierta velocidad la frecuencia de esfuerzos de la corriente de aire será igual a la frecuencia de resonancia de algún componente, como puede ser cualquier superficie de mando o las alas, y lo hará vibrar. Como esto ocurre a la frecuencia de resonancia del componente, la amplitud de la vibración aumentará rápidamente sin necesidad de aumentar la energía de la fuerza actuante. Entonces, o se reduce la velocidad o se produce la destrucción del componente. Este fenómeno se conoce como aleteo o vibración resonante.

Cualquier componente puede vibrar si la velocidad es suficientemente alta y las condiciones atmosféricas son las adecuadas. Durante la fase de diseño estructural del avión, se determina la velocidad de vibración de aleteo que debe ser claramente superior a la velocidad máxima del avión. Un diseño adecuado de la estructura prevé este tipo de cargas "armonizando" la estructura del avión para determinadas frecuencias de respuesta.

Para conocer la frecuencia de cada componente del avión, se instrumenta cada componente y se le aplica una carga dinámica a la estructura, cada parte del avión alcanzará su frecuencia natural de vibración en determinado momento; sin embargo, los registros estarán contaminados con las vibraciones de los demás componentes. Con la técnica de Fourier es posible conocer el espectro de respuesta de cada componente y correlacionando las diversas partes instrumentadas se podrán obtener las funciones de transferencia para encontrar las frecuencias naturales.

1.2.4 EXPLORACIÓN.

ASTRONÓMICA.

Algunas veces no es posible conseguir toda la información que se necesita de un telescopio normal, entonces se utilizan ondas de radio o el radar. Estas señales de radar son tratadas como cualquier otra señal.

El satélite Magellan fue enviado a Venus en Mayo de 1989, su misión fue estudiar la superficie del planeta Venus, que a pesar de ser el planeta más próximo a la Tierra poco se sabía de él pues siempre está cubierto por una densa capa de nubes que los telescopios ópticos no pueden atravesar.

Magellan contaba con radar con el que pudo tomar información de la superficie del planeta a través de la capa de nubes, y con un sistema de procesamiento avanzado que descomponía las ondas con la técnica de Fourier para conocer el espectro de respuesta e interpretarlo. En la estación terrestre se recibieron imágenes a escala de 20 Km de ancho.

Con la información de esta misión y la recopilada por exploraciones anteriores, la Pioneer y las soviéticas Venera 13 y 14, se pudo producir una imagen global del planeta Venus.

OCEANOGRÁFICA.

El sonar lateral utiliza un pulso de 6.5 KHz que transmite en el océano hacia el piso del mar en ángulo oblicuo. La señal reflejada proporciona la información sobre la inclinación del piso del mar, su impedancia acústica, también destaca cualquier estructura pequeña o imperfecciones que puedan estar presentes.

1.2.5 MEDICINA.

ULTRASONIDO.

El ultrasonido médico también llamado sonography, es un modo de proyección de imagen que tiene una amplia gama de usos clínicos, como modalidad primaria y como adjunto a otros procedimientos de diagnóstico. La base de su operación es la transmisión de un sonido de alta frecuencia en el cuerpo, seguido por la recepción, procesado y exhibición paramétrica de los ecos que vuelven de las estructuras y de los tejidos finos dentro del cuerpo. El ultrasonido es sobretodo una modalidad tomográfica, pues presenta una imagen bien delimitada de una sección del tejido fino bajo investigación. Esta técnica no proporciona imágenes útiles a través de los huesos o de cuerpos de gas, tales como los que se encuentran en los pulmones o intestinos. Su utilidad clínica se debe en gran parte a que no utiliza radiación de ionización, a que proporciona la medida y la proyección de imagen cuantitativas del flujo de la sangre y a que es un estudio en tiempo real.

Un transductor típico utiliza una serie de elementos piezoeléctricos para transmitir un pulso sano en el cuerpo y para recibir los ecos que vuelven tras dispersarse los pulsos dentro del cuerpo. Los equipos de barrido electrónico tienen la capacidad de retrasar individualmente en tiempo, las señales recibidas. Esto se hace con el fin de dirigir y enfocar electrónicamente cada pulso eléctrico de una secuencia para ser reflejado en el cuerpo. Esto produce mapas en dos o tres dimensiones de los ecos dispersados. El proceso de manejo y de enfocar estos pulsos acústicos se conoce como beamforming.

La transformada de Fourier en óptica, hace posible el establecimiento de relaciones generales, que clarifiquen y simplifiquen el cálculo de la formación de imágenes por un sistema óptico, en este caso el transductor o sonda emisora – receptora.

Considérese una pantalla absorbente AB, cuyo coeficiente de transmisión en un punto x está dado por $f(x)$; supóngase que la pantalla está iluminada por una onda monocromática plana de longitud de onda λ , si se examina la amplitud compleja de la onda resultante, la contribución del elemento dx en un punto x tiene la amplitud proporcional a $f(x)$, y una fase dada por $[2\pi sen(\theta/\lambda)]x$. Si la onda incidente está representada por la cantidad compleja:

$$U_0 e^{i\omega t},$$

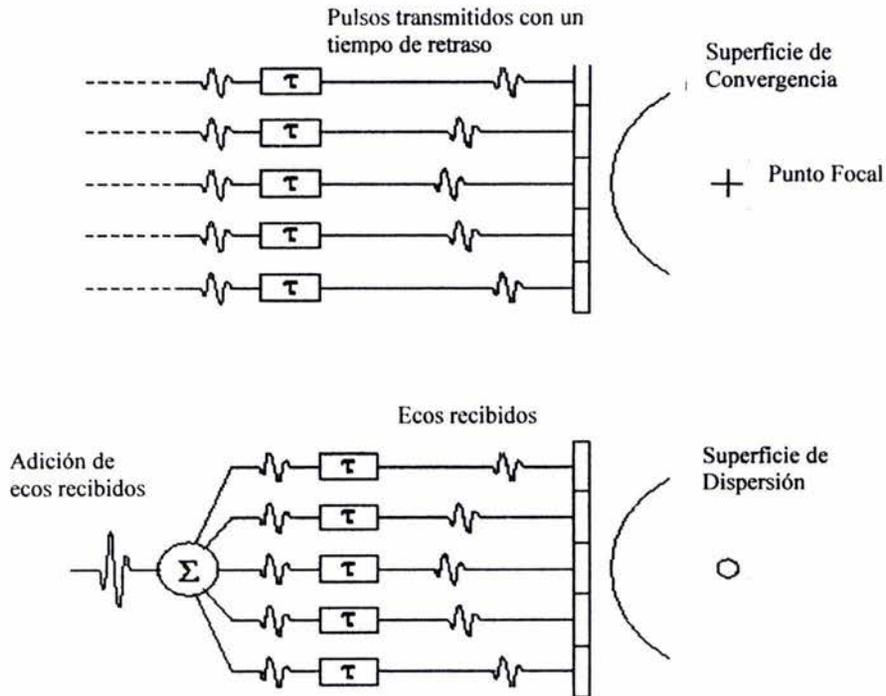


figura I.12 Un diagrama conceptual de la serie de pulsos puesta en fase beamforming. Arriba: Varios pulsos son retrasados apropiadamente desde una serie de elementos piezoeléctricos para alcanzar el área de interés. Abajo: los ecos vuelven retrasados antes de ser sumados para formar una señal característica del área de interés.

entonces la contribución debida a dx en el punto x está dada por:

$$U_0 f(x) e^{i(\omega t - kx)}, \quad \text{I.56}$$

donde

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{sen}\theta \quad \text{I.57}$$

por tanto, la contribución total de toda la pantalla está dada por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} U_0 f(x) e^{i(\omega t - kx)} dx = U_0 e^{i\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx. \quad \text{I.58}$$

Entonces el patrón de difracción de la pantalla, que está definido como la relación de la onda resultante en la dirección θ a la onda incidente, se puede expresar como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx = F(k), \quad \text{I.59}$$

donde:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{sen}\theta \quad \text{I.60}$$

Se observa que la característica de transmisión $f(x)$ y el patrón de difracción $F(k)$, forman un par de transformadas de esta manera, se tiene:

$$f(x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{ikx} dk. \quad \text{I.61}$$

Para que se formen las imágenes es necesario abordar la transformada de Fourier en dos dimensiones.

La transformada bidimensional de Fourier $F(u,v)$, de una función bidimensional $f(x,y)$, se puede definir como una integral doble:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(ux+vy)} dx dy \quad \text{I.62}$$

Entonces $f(x,y)$ se puede hallar por la fórmula de inversión:

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{i(ux+vy)} du dv \quad \text{I.63}$$

Cuando una función de dos variables independientes, tal como la intensidad de la luz en un punto, se produce en otra parte como otra función de dos variables, se habla de formación de imágenes.

Una imagen se puede describir en su totalidad, por la distribución de la intensidad de iluminación $I(x,y)$; supóngase que $E(x,y)$ es la imagen de una fuente puntual, y que $O(x,y)$ representa la distribución de un objeto. En efecto, como el objeto es incoherente, la distribución de la intensidad en la imagen se puede obtener, sumando las intensidades individuales producidas por cada imagen se puede obtener, sumando las intensidades individuales producidas por cada imagen de los varios puntos del objeto.

De esta manera, la distribución de la imagen $I(x,y)$, se obtiene de la distribución del objeto $O(x,y)$, por convolución con la imagen de un punto $E(x,y)$; es decir:

$$I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(x', y') E(x - x', y - y') dx' dy'$$

$$I(x, y) = O(x, y) * E(x, y) \quad \text{I.64}$$

La ecuación anterior define la integral de convolución, de dos funciones en dos dimensiones $O(x,y)$ y $E(x,y)$.

I.2.6 ANÁLISIS SÍSMICOS DE PRESAS.

Una presa se puede considerar como un sistema aleatorio o como uno determinista, el primero considera las excitaciones como un espectro de potencia.

El fin del análisis sísmico es conocer las características de vibración, funciones de transferencia, de coherencia, ángulos de fase y tiempos de retardo, pues con la información que dan estos elementos se puede conocer el estado en el que se encuentra la presa o el riesgo de falla.

Con los registros de los acelerómetros se pueden obtener los espectros de respuesta mediante la transformada de Fourier.

En una presa por lo general se tiene más de una estación acelerográfica. Los registros se pueden correlacionar y al aplicar la transformada de Fourier a las funciones de autocorrelación de entrada y de salida se obtiene como resultado la función de densidad espectral. Esta función describe la composición frecuencial del proceso aleatorio o espectro de respuesta.

Con la función anterior y la función de densidad espectral cruzada de dos procesos aleatorios se pueden obtener las características de vibración. No se abunda en este momento sobre el proceso descrito pues es el fin de este trabajo.

II ANTECEDENTES SÍSMICOS DE LA PRESA EL CARACOL.

II.1 ORIGEN DE LOS SISMOS.

Un sismo es el movimiento trepidatorio del terreno causado por una sucesión de vibraciones que se propagan en todas direcciones a partir de un punto de origen llamado foco o hipocentro. Al punto ubicado en la superficie de la tierra sobre el foco se le llama epicentro.

La principal causa por la que ocurren los sismos, es la falla en las rocas que no soportan los esfuerzos a los que están sometidas. Esto se da cuando las fuerzas que actúan sobre las rocas aumentan rápidamente y hace que se comporten de manera plástica hasta llegar a la ruptura.

La aparición de la falla, la ruptura que se da en la roca y la fricción entre ambas caras de la fractura disipa parte de la energía elástica almacenada en forma de esfuerzo en la roca deformada, otra pequeña parte queda en la roca en forma de esfuerzo residual, el resto se libera en forma de ondas sísmicas; esta última energía liberada se conoce como energía sísmica, que es como su nombre lo indica la causante de los sismos. A las fuentes sísmicas asociadas a fallas se les conoce como tectónicas.

La gran mayoría de los sismos de origen tectónico son causados por los movimientos de las diferentes placas que forman la litosfera. Cuando dos placas divergen, esto significa que se aleja una de la otra, en el hueco emerge material caliente del manto de la Tierra que se solidifica y forma una nueva corteza. A su vez, la corteza antigua es consumida en las llamadas fosas o trincheras oceánicas, donde una placa se introduce bajo un continente o bajo otra placa oceánica regresando al manto. Este proceso es conocido con el nombre de subducción.

A lo largo de la zona donde ocurre la subducción ocurre una gran cantidad de sismos. La zona definida por estos sismos es conocida como zona de Benioff.

Existen algunos procesos capaces de generar ondas sísmicas y que no están asociados con fallas, algunas de estas fuentes sísmicas son las siguientes: colapsos (cavernas, túneles, etc.), explosiones, fuentes volcánicas, fuentes de impacto (meteoritos).

Tres tipos básicos de ondas elásticas producen las vibraciones mencionadas, son las tres componentes de los sismos. De estas ondas dos son conocidas como ondas de cuerpo o internas, el otro tipo de onda es llamado onda de superficie.

La onda interior más rápida es conocida como onda P (primaria) o componente longitudinal del sismo, aunque también se le llama, por sus características, de empuje o compresional. Puede viajar en medios sólidos, líquidos o gases, su movimiento es el mismo que el de una onda de sonido en que a medida que se propaga, comprime y dilata alternativamente la roca. Su velocidad de propagación en rocas graníticas es de más de 5.0 Km/s y de más de 11.0 Km/s en el interior de la Tierra. Variando según las propiedades elásticas del suelo y roca por los que pasan.

La componente transversal del sismo u onda S (secundaria) es el segundo tipo de onda de cuerpo, también es conocida como de esfuerzo cortante, de sacudida o distorsionales. Cuando una onda S se propaga, deforma la roca lateralmente en ángulo recto a la dirección de propagación, solo se propaga en medios sólidos, ya que un medio líquido no soporta esfuerzos cortantes. Su velocidad de propagación es proporcional a la rigidez del material que atraviesan, pero se estima que es de aproximadamente de 3.5 Km/s.

Además de las ondas de cuerpo existen las ondas de superficie, su movimiento está restringido a la superficie del suelo y según aumenta la profundidad, el desplazamiento debido a ellas disminuye, pues su amplitud es máxima en la superficie y nula en las grandes profundidades. Estas ondas se dividen en dos tipos, las ondas Love y las Rayleigh.

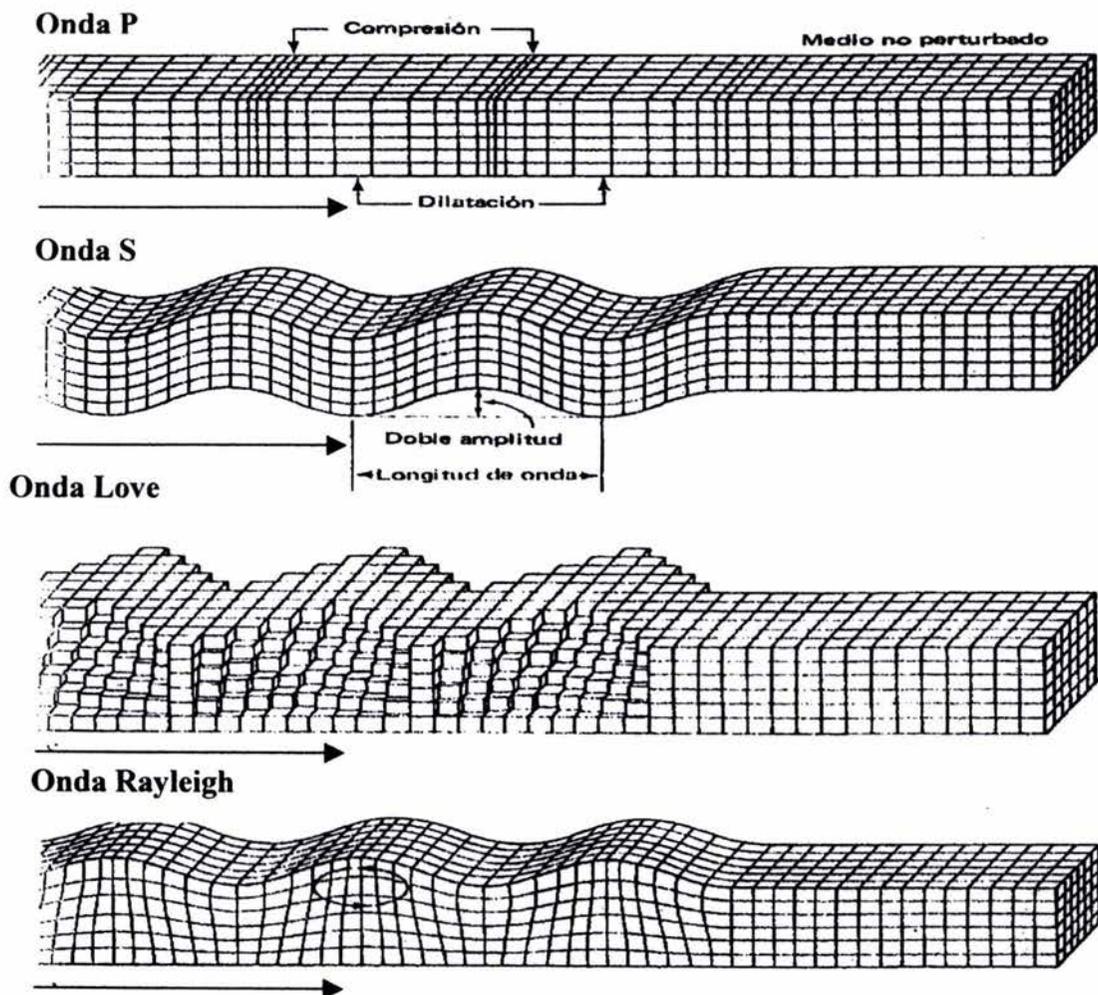


Figura II.1 tipos de ondas sísmicas

El segundo tipo de onda superficial es conocido como onda Rayleigh, las partículas afectadas por estas ondas se mueven vertical y horizontalmente en el plano vertical orientado en la dirección en que viajan las ondas, o sea, se mueven según una elipse cuando pasa la onda. Son las ondas más lentas con velocidades de grupo (la velocidad con que viaja la energía) que van de 1 a 4 Km/s.

La velocidad de las ondas superficiales es menor que el de las ondas de cuerpo y de las primeras, las ondas Love viajan más deprisa que las ondas Rayleigh. De esta forma, cuando las ondas sísmicas se propagan a partir del foco sísmico, se separan los diferentes tipos en forma predecible.

Otra característica de las ondas de cuerpo es que se reflejan y refractan en la superficie de separación de las diferentes capas de roca por las que viajan. Cuando sucede esto parte de la energía de un tipo es convertida en ondas del otro tipo. Además, cuando las ondas P y S alcanzan la superficie del suelo, casi toda su energía se refleja al interior de la corteza, por lo que la superficie se ve afectada por ondas que se mueven hacia arriba y hacia abajo, debido a esto se presenta a menudo cerca de la superficie una amplificación de la sacudida.

Las ondas Love, formadas por ondas S polarizadas, muestran el mismo movimiento que el de las ondas S que no tiene desplazamiento vertical; mueven el suelo de lado a lado en un plano horizontal paralelo a la superficie de la tierra pero en ángulo recto a la dirección de propagación (Fig.II.1).

II.2 EFECTOS SÍSMICOS SOBRE PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO.

Cuando ocurre un sismo, la base de casi cualquier construcción sigue el movimiento del terreno sobre el que se apoya y debido a la flexibilidad de éstas, la parte superior obedece más a la inercia. Esto ocasiona desplazamientos relativos en la estructura. Entonces la estructura debe deformarse para mantener su integridad.

La respuesta sísmica de la cortina de una presa depende de varios factores, como son el tipo de estructura, la magnitud del sismo, la distancia epicentro- estructura, la profundidad focal y las características del suelo sobre el que se apoya la construcción o la geometría de la misma. Hay que tomar en cuenta que durante un sismo se suman otras fuerzas actuantes además del empuje hidrostático, como el empuje hidrodinámico o las fuerzas de inercia, mientras que las fuerzas resistentes pueden verse reducidas por la pérdida progresiva de resistencia de un material sensible a la carga cíclica o por la licuación o pérdida de resistencia de la cimentación.

El mecanismo más importante, por la cantidad de ejemplos que se presentan en las estadísticas, son los deslizamientos o distorsiones. Dependiendo de las características mecánicas de la cortina y la cimentación, de la zonificación de los materiales en aquella y de la localización de zonas de debilidad de esta, los deslizamientos por cortante pueden implicar desde una ligera distorsión de los taludes del terraplén hasta la traslación masiva de una gran parte de la cortina. En terraplenes con exteriores granulares puede ocurrir

rodamiento progresivo de las partículas superficiales, individualmente o en capas delgadas, dando lugar a distorsiones.

Si la distorsión por cortante es de ciertas proporciones, el resultado final puede ser la destrucción de la presa, sea por debilidad de la porción remanente o porque el cambio de geometría permita desbordamiento, con la consecuente erosión de la cortina.

El siguiente efecto sísmico en importancia por la ocurrencia es el agrietamiento longitudinal, este es en realidad un efecto secundario de las fallas o distorsiones de corte. Otro mecanismo capaz de originar agrietamiento longitudinal es el asentamiento longitudinal de la cortina; en presas de sección homogénea o con corazón impermeable muy inclinado otro mecanismo más es la flexión, producida por la componente horizontal del sismo normal al eje de la cortina (Fig. II.2).

Los efectos sísmicos expuestos son los principales por la ocurrencia de un sismo. Existen otros que aunque su ocurrencia es menor también son importantes. Estos otros efectos son: el agrietamiento transversal que es causado principalmente por asentamientos diferenciales, pérdida de bordo libre por densificación de la cimentación y el terraplén, rotura de conductos enterrados, daños por derrumbes de ladera, cambio de nivel de fondo del vaso, desbordamiento por oscilación del embalse y daños por desplazamiento en falla geológica.

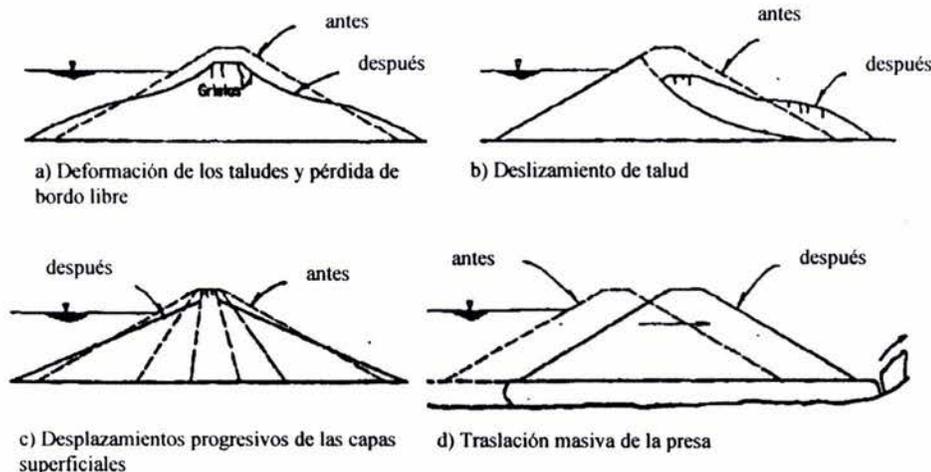


Figura II.2 algunos efectos sísmicos sobre la cortina de una presa.

Se puede esperar que las presas de enrocamiento, bien diseñadas, desplantadas sobre cimentaciones densas, no presenten desplazamientos masivos durante sismos. Sin embargo, aún las presas bien diseñadas pueden sufrir distorsiones provocadas por un fuerte temblor, lo que hace necesario analizar la sismicidad de la región donde se quiere construir la presa en cuestión.

II.3 SISMICIDAD LOCAL

La Presa El Caracol está construida en una de las zonas de más alta sismicidad en el país, la del Río Balsas. Los sismos que afectan esta área están asociados principalmente con la subducción de la placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica

La capa superficial de la Tierra, llamada litosfera, está 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. Este proceso se conoce como tectonismo.

México, incluyendo su mar territorial, está repartido entre cuatro placas: 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 Costa Rica; y la pequeña placa de Rivera, que se encuentra en la boca del golfo de California.

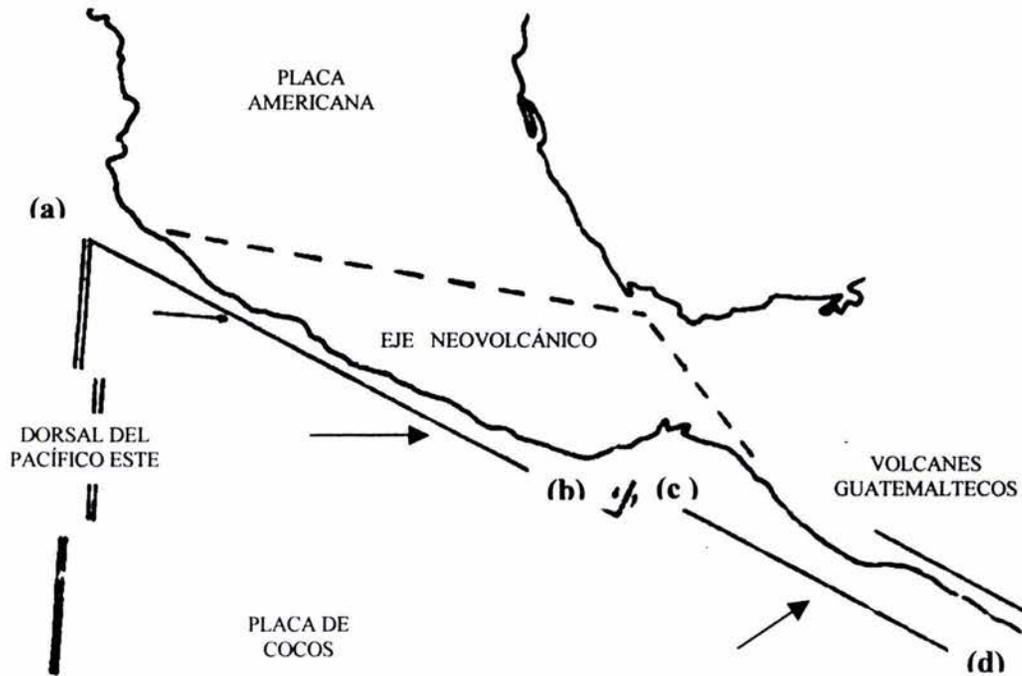
La Placa de Cocos está siendo “separada” de la Placa del Pacífico en la dorsal del Pacífico Oriental; este movimiento es el que genera el proceso de subducción desde Colima hasta Panamá en la Trinchera Mesoamericana.

El proceso de subducción de la Placa de Cocos no se presenta ni con la misma velocidad ni con el mismo echado en todos los puntos de contacto con la Placa Norteamericana, sino que presenta diferentes características según la región. Como consecuencia, la sismicidad local varía con la profundidad y con la distancia a la costa.

Esto se puede corroborar por la configuración del Eje Volcánico mexicano. En muchas partes del mundo donde existen trincheras, se encuentran cadenas volcánicas, de tipo andesítico, paralelas a ellas, causadas por el ascenso de material fundido proveniente de la placa subducida, pero, en México, el eje volcánico no es paralelo a la trinchera, se cree que esto se debe al cambio de echado de la placa subducida a profundidad, pues los volcanes más cercanos se encuentran donde la placa subducida alcanza 110 Km de profundidad y en esta zona los sismos se presentan a mayor profundidad que en la zona costera (Fig. II.3).

La velocidad de subducción va de 5 cm/año, cerca de la frontera de Jalisco, hasta 8.3 cm/año, cerca de la frontera con Guatemala. La actividad a lo largo de la trinchera en México es más bien somera, alcanzando solamente profundidades máximas de menos de 300 Km. La gran mayoría de los sismos destructivos que ocurren en México se producen en esta trinchera (Fig. II.4).

Utilizando la distribución epicentral de la sismicidad en la zona del Río Balsas, algunas investigaciones han definido dos franjas sísmicas: una paralela a la costa y otra al interior del estado de Guerrero



- a) Placa delgada, joven, caliente, menor velocidad de subducción, mayor ángulo, menos rígida, entrada no perpendicular. Resiste poco la interacción con la Placa Americana.
- b) Placa más espesa, fría, más vieja, mayor velocidad de subducción, menor ángulo, más rígida, entrada a mayor profundidad. Se presenta una gran interacción con la Placa Americana.
- c) Cambio en la dirección de la trinchera, más alejada de la línea de costa, entrada perpendicular, trinchera más vieja y fondo más suave por el relleno de sedimentos.

Figura II.3 Comportamiento de la Placa de Cocos.

Se concluye que la primera banda es producto del contacto entre la Placa de Cocos y la Norteamericana y los mecanismos son de falla inversa. La segunda banda se origina por la deformación interna que sufre la placa de Cocos durante el proceso de subducción, los mecanismos son de falla inversa a profundidades someras (32 a 35 Km) y de falla normal para sismos con profundidades mayores a 40 Km.

Los estudios añaden que existe una tercera franja adyacente al Río Balsas. Se cree que en esta región se da la flexión de la Placa de Cocos, después de casi 200 Km de trayectoria casi horizontal desde la trinchera a una profundidad de 50 Km.

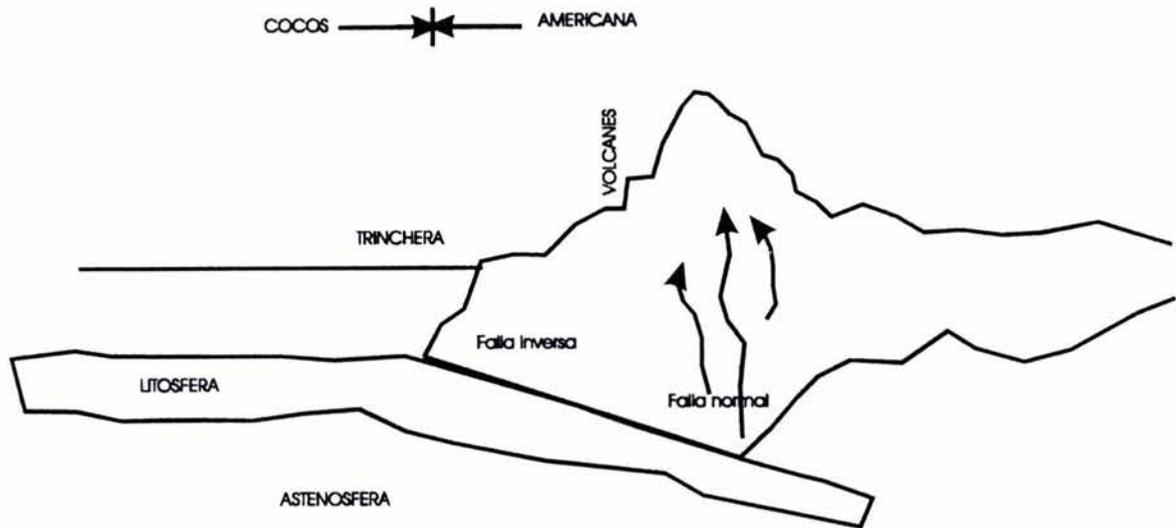


Figura II.4 Esquema diagramático de la subducción de la placa de Cocos.

II.4 REGISTRO SÍSMICO ESTADÍSTICO.

Desde su construcción, la presa Carlos Ramírez Ulloa (El Caracol) se ha visto sometida a cargas dinámicas provocadas por eventos sísmicos de diferentes magnitudes y se han podido registrar casi 400 sismos de magnitud igual o mayor que 3 en el periodo comprendido entre 1984 y 2003. En la tabla se muestra la distribución porcentual por magnitud.

MAGNITUD	3 - 4	4.1 - 5	5.1 - 6	6.1 - 7	> 7
PORCENTAJE	17 %	63 %	13 %	5 %	2 %

Tabla II.1 porcentaje de sismos registrados en la presa por magnitud.

La localización de los epicentros de los sismos registrados se presenta en la figura II.5. En ésta se aprecia la ubicación de los sismos que se han detectado en la presa.

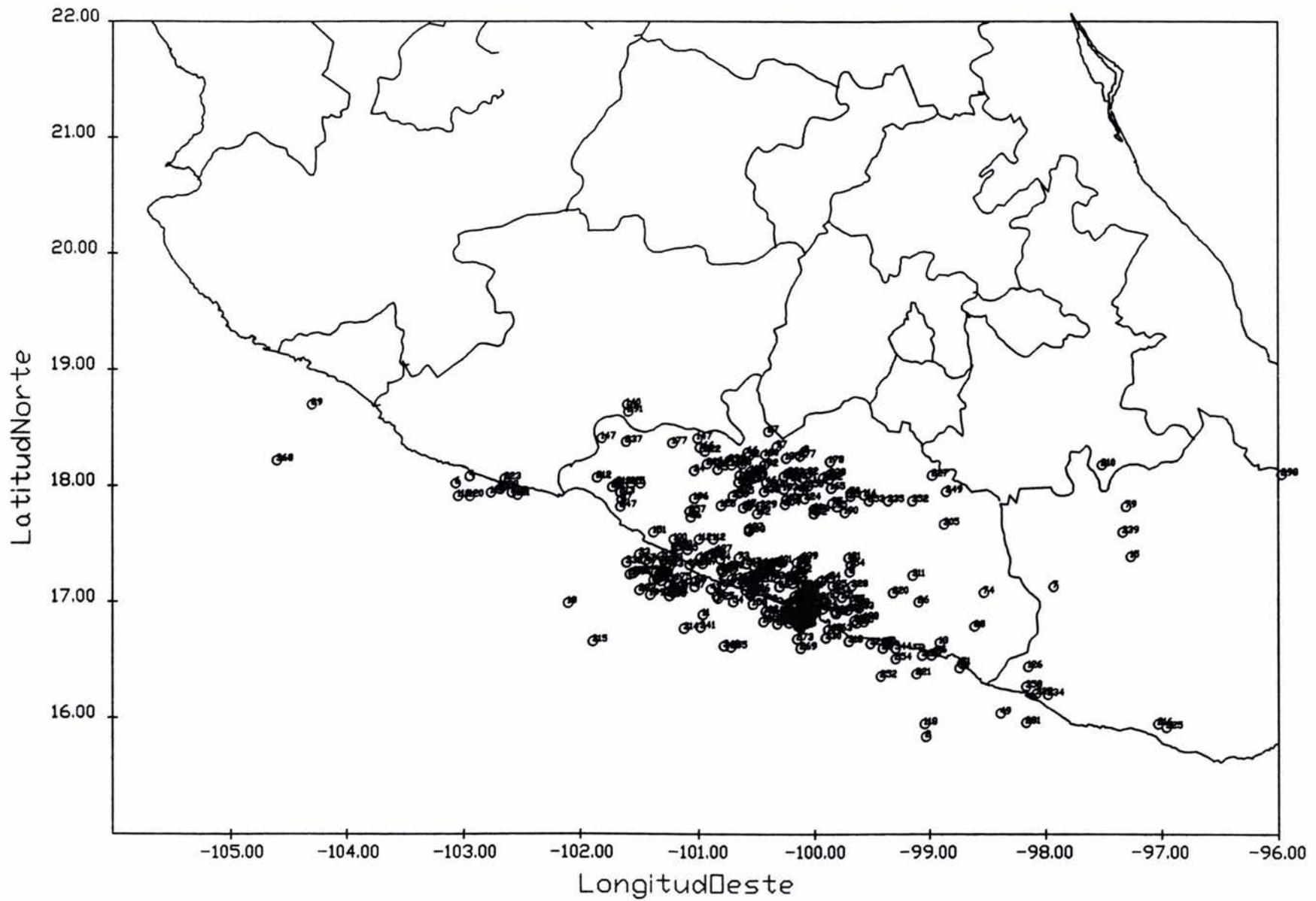


Figura II.5 Ubicación de los sismos registrados.

Observando el mapa se pueden definir dos áreas principales de concentración de sismos, la mayor está ubicada en las costas de Guerrero. Abarca parte de la Costa chica, Acapulco de Juárez y la Costa Grande hasta la punta El Potosí, cerca de Zihuatanejo. Esta zona se puede dividir en dos la concniente a la plataforma continental y la oceánica.

La segunda área se encuentra en la plataforma continental de Guerrero, en la zona del Río Balsas donde se encuentra la presa El Caracol.

Entre el Río Balsas y la costa se puede definir una región sísmica intermedia, esta con escasa actividad.

Otras áreas sismogénicas, pero de menor tamaño, se encuentran al norte de Ixtapa por la Barranca de los Picachos, y otra más en las costas de Michoacán entre los ríos Nexpa y Carrizal, en plataforma oceánica.

Los demás sismos se encuentran diseminados por la zona oeste del estado de Oaxaca, el sur del Estado de Puebla y la plataforma oceánica cercana al Estado de Colima.

A continuación en la tabla II.2 se concentran las características de los sismos registrados por la instrumentación instalada en la cortina.

EVENTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
1	28-Ene-84	115	< 5	
2	02-Jul-84	255	< 5	/Mb=5.90/Ms=6.00
3	14-Jul-84	82	< 5	/Mb=5.20
4	19-Sep-85	323	15	/Mb=6.80/Ms=8.10/M=8.10
5	21-Sep-85	164	15	/Mb=6.30/Ms=7.60/Mc=7.50
6	30-Abr-86	336	20	/Mb=6.20/Ms=7.00/M=6.40
7	09-Jul-86	239	5	/Mb=4.40
8	05-Sep-86	40	5	
9	14-Dic-86	112	20	/Mc=4.30
10	16-Dic-86	84	38	/Mc=4.30
11	11-Ene-87	159	< 5	
12	26-Mar-87	116	17	/Mb=4.80/Ms=4.50/Mc=4.80
13	07-Jun-87	184	23	/Mb=5.50/Ms=4.80/Mc=4.90
14	21-Jun-87	69	< 5	/Mc=3.80
15	15-Jul-87	301	6	/Mb=6.00/Mc=5.70
16	25-Ago-87	74	< 5	
17	29-Ago-87	66	< 5	
18	22-Nov-87	255	< 5	
19	08-Feb-88	139	19	/Mb=5.50/Ms=5.70/Mc=5.00
20	31-Mar-88			
21	09-Abr-88			
22	29-May-88	19	54	/Mb=4.60/Mc=4.20
23	24-Feb-89	31	55	/Mc=3.40
24	09-Mar-89	82	40	/Mb=4.50/Mc=3.70
25	10-Mar-89	134	18	/Mb=5.30/Ms=4.80/Mc=5.00
26	13-Mar-89	141	27	/Mc=3.60
27	21-Abr-89	73	19	/Mc=4.10

EVENTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
28	24-Abr-89	90	29	/Mc=4.10
29	25-Abr-89	161	19	/Mb=6.30/Ms=6.90/M=6.50
30	25-Abr-89	161	19	/Mb=6.30/Ms=6.90/M=6.50
31	25-Abr-89			
32	02-May-89	153	13	/Mb=5.40/Ms=4.90/M=5.10
33	06-Jul-89	176	8	/Mb=4.80/Mc=4.90
34	12-Ago-89	117	57	/Mb=5.50/Ms=4.50/Mc=4.80
35	17-Ago-89	92	26	/Mb=4.90/Mc=4.80
36	08-Oct-89	88	36	/Mb=5.00/Ms=4.10/Mc=5.00
37	09-Nov-89	127	10	/Mb=5.10/Ms=4.10/M=5.10
38	13-Ene-90	130	12	/Mb=5.3/Ms=5.0/Mc=5.0
39	13-Ene-90	58	< 5	/Mc=4.10
40	04-Abr-90	158	15	/Mb=4.30/Ms=4.30/Mc=5.00
41	11-May-90	138	12	/Mb=5.30/Ms=4.90/M=5.30
42	19-May-90	170	5	/Mb=5.00/Ms=4.30/M=5.10
43	31-May-90	137	16	/Mb=5.80/Ms=5.90/M=5.50
44	31-May-90	112	18	
45	10-Jul-90	131	18	/Mb=4.50/Mc=4.80
46	24-Nov-90	49	48	/Mb=4.00/Mc=4.60
47	29-Dic-90	147	7	/Mb=4.40/Mc=4.70
48	25-Mar-91			
49	01-Abr-91	272	26	/Mb=5.50/Ms=5.4/M=5.3
50	15-Abr-91	31	51	/Mb=3.0/Mc=4.2
51	27-Abr-91	92	29	/Mb=4.60/Ms=4.10/Mc=4.90
52	21-May-91			
53	28-May-91	117	27	/Mb=4.60/Ms=3.60/Mc=4.90
54	19-Ago-91	131	10	/Mb=4.30/Mc=4.60
55	09-Ene-92	109	32	/Mb=4.70/Mc=4.30
56	12-Feb-92	121	< 5	/Mb=5.10/Ms=4.60/Mc=4.40
57	31-Mar-92	162	19	/Mb=4.70/Mc=4.30
58	31-Mar-92	165	11	/Mb=5.20/Ms=5.10/Mc=4.70
59	01-Abr-92	157	18	/Mb=4.90/Mc=4.50
60	02-Ago-92	97	25	/Mb=4.30/Mc=4.30
61	19-Sep-92	17	54	/Mc=4.10
62	30-Oct-92	126	21	/Mb=4.70/Mc=4.40
63	10-Nov-92	118	6	/Mb=4.60/Ms=4.20/Mc=4.30
64	17-Nov-92	96	50	/Mb=4.40/Mc=4.20
65	11-Ene-93	101	47	/Mc=4.00
66	01-Mar-93	75	19	/Mc=4.30
67	18-Mar-93	173	34	/Mb=4.70/Mc=4.70
68	31-Mar-93	142	8	/Mb=5.30/Ms=5.00/Mc=5.30
69	30-Abr-93	80	19	/Mc=4.70
70	15-May-93	215	20	/Mb=5.80/Ms=5.80/Mc=5.80
71	15-May-93	213	15	/Mb=5.90/Ms=5.90/Mc=6.00
72	19-Jul-93	73	51	/Mc=4.80
73	29-Jul-93	97	43	/Mb=5.00/Ms=4.20/Mc=5.00
74	05-Ago-93	183	32	/Mb=4.90/Mc=5.10
75	29-Ago-93	96	69	/Mb=4.70/Mc=4.80
76	10-Sep-93	189	20	/Mb=4.80/Mc=4.80
77	24-Oct-93	189	19	/Mb=6.20/Ms=6.60/Mc=6.50
78	27-Dic-93			

EVENUTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
79	23-Feb-94	290	5	/Mb=5.40/Mc=5.00
80	22-Abr-94	75	104	/Mb=4.10/Mc=4.20
81	23-May-94	66	23	/M=5.60
82	23-May-94			
83	12-Jul-94	60	62	/Mb=3.70/Mc=4.50
84	29-Oct-94	108	24	/M=5.10
85	10-Dic-94	173	20	/Mc=6.30
86	26-Abr-95	17	61	/Mc= 4.3
87	27-Abr-95	182	61	/Mc= 4.9
88	14-Sep-95	195	21	/Mw=7.3/Ms=7.5
89	09-Oct-95	477	33	/Mw=7.9/ME=7.5/Ms=7.6
90	03-Dic-95	99	34	/Mc= 4.5
91	20-Dic-95			
92	23-Dic-95			
93	05-Mar-96	27	14	/Mc= 3.8
94	31-Mar-96	155	5	/Mc= 4.4
95	01-Abr-96	23	51	/Mc= 4.1
96	18-Abr-96	170	<5	/Mc= 4.9
97	21-Jun-96	57	44	/Mc= 4.7
98	15-Jul-96	141	20	/Mc= 6.0
99	16-Jul-96	151	10	/Mc= 4.7
100	18-Jul-96	141	20	/Mc= 5.1
101	19-Jul-96	75	20	/Mc= 4.8
102	09-Oct-96	21	95	/Mc= 4.1
103	01-Nov-96	155	32	/Mc= 4.1
104	14-Nov-96	113	13	/Mc= 3.8
105	16-Nov-96			
106	17-Nov-96	891	62	/Mc=4.7
107	19-Nov-96	127	51	/Mc= 3.9
108	20-Nov-96	91	99	/Mc= 4.1
110	12-Dic-96	28	21	/Mc= 4.1
111	14-Dic-96			
112	17-Dic-96	120	70	/Mc= 4.5
113	18-Dic-96	65	22	/Mc= 4.1
114	23-Dic-96	44	51	/Mc= 3.8
115	28-Dic-96	157	32	/Mc= 4.4
116	28-Dic-96	124	6	/Mc= 4.4
117	01-Ene-97			
118	07-Ene-97	243	21	/Mc=4.7
119	11-Ene-97	334	16	/Mb= 6.5
120	12-Ene-97	323	25	/Mc=4.6
121	12-Ene-97	278	14	/Mc= 4.6
122	13-Ene-97	84	35	/Mc=3.3
123	15-Ene-97		30	/Mc=3.6
124	16-Ene-97	303	25	/Mc= 5.1
125	20-Ene-97			
126	21-Ene-97	259	18	/Mb= 5.1
127	16-Feb-97	109	49	/Mc= 3.9
128	05-Mar-97	91	59	/Mc= 4.1
129	06-Mar-97	84	27	/Mc= 3.9
130	16-Mar-97	106	53	/Mc= 4.2

EVENUTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
131	22-Mar-97	103	30	/Mc= 4.6
132	23-Mar-97	117	31	/Mc= 4.7
133	24-Mar-97	138	41	/Mc= 4.3
134	03-Abr-97			
135	19-Abr-97	43	31	/Mc= 3.8
136	20-Abr-97	90	27	/Mc= 3.8
137	22-Abr-97	70	30	/Mc= 3.8
138	28-Abr-97			
139	01-May-97	64	39	/Mc= 4.0
140	05-May-97	194	43	/Mc= 4.4
141	08-May-97	86	12	/Mc= 4.8
142	09-May-97	74	40	/Mc= 4.4
143	09-May-97	14	52	/Mc= 3.7
144	14-May-97	84	15	/Mc= 4.1
145	19-May-97	95	40	/Mc= 4.2
146	19-May-97			
147	22-May-97	123	59	/Mb= 5.9
148	26-May-97	44	52	/Mc= 3.7
149	01-Jun-97			
150	15-Jun-97	81	36	/Mc=4.0
151	17-Jun-97	157	38	/Mc=4.40
152	25-Jun-97	30	46	/Mc=3.20
153	28-Jun-97	116	28	/Mc=3.90
154	01-Jul-97	76	41	/Mc=3.60
155	19-Jul-97	103	51	/Mc=4.90
156	19-Jul-97	115	43	/Mc=4.10
157	21-Jul-97	93	12	/Mc=4.10
158	24-Jul-97	123	10	/Mc= 4.0
159	28-Jul-97			
160	29-Jul-97	84	51	/Mc=4.40
161	03-Ago-97			
162	10-Ago-97	16	53	/Mc=3.80
163	28-Jul-97	132	28	/Mc= 4.6
164	29-Ago-97			
165	13-Sep-97	13	71	/Mc= 3.8
166	11-Dic-97	117	50	/Mc= 4.3
167	16-Dic-97			
168	16-Dic-97			
169	22-Dic-97	165	5	/Mc= 4.6
170	26-Dic-97	17	83	/Mc= 3.7
171	23-Ene-98			
172	31-Ene-98			
173	05-Feb-98	66	6	/Mc=3.9
174	22-Feb-98	174	14	/Mc=4.4
175	25-Feb-98	156	15	/Mc=4.8
176	11-Mar-98	105	40	/Mc=4.2
177	20-Abr-98	142	66	/Mc=5.0
178	01-May-98	31	49	/Mc=3.9
179	09-May-98	171	18	/Mc=4.8
180	11-May-98	60	28	/Mc=4.0
181	15-May-98	69	55	/Mc=4.2

EVENUTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
182	16-May-98	169	14	/Mc=5.1
183	17-May-98	169	12	/Mc=4.5
184	01-Jun-98	125	5	/Mc=4.8
185	27-Jun-98	116	11	/Mc=4.0
186	28-Jun-98			
187	05-Jul-98	125	5	/Mc=4.9
188	11-Jul-98	188	5	/Mc=4.9
189	12-Jul-98	134	4	/Mc=4.8
190	16-Jul-98	32	4	/Mc=4.1
191	17-Jul-98	109	27	/Mc=4.6
192	04-Ago-98	56	38	/Mc=3.7
193	05-Ago-98	31	53	/Mc=4.4
194	09-Ago-98	123	3	/Mc=4.5
195	24-Ago-98	90	20	/Mc=4.4
196	25-Oct-98	115	39	/Mc=4.3
197	01-Nov-98	73	51	/Mc=4.1
198	27-Nov-98	128	23	/Mc=4.4
199	27-Dic-98	184	5	/Mc=4.5
200	15-Feb-99			
201	15-Feb-99	106	66	/Mc= 4.3
202	19-Feb-99	109	21	/Mc= 4.2
203	02-Mar-99	117	41	/Mc= 4.2
204	03-Mar-99	33	58	/Mc= 4.3
205	03-Abr-99			
206	24-Abr-99			
207	25-Abr-99	117	27	/Mc= 4.6
208	11-May-99			
209	30-May-99	117	53	/Mc= 4.6
210	15-Jun-99	268	69	/Mb= 6.4
211	21-Jun-99	190	54	/Mb= 6.0
212	22-Jun-99	205	28	/Mc= 4.4
213	05-Jul-99	183	12	/Mb= 4.8
214	16-Ago-99	101	55	/Mc= 4.3
215	26-Ago-99	73	62	/Mc= 4.2
216	30-Sep-99	390	16	/Ma= 7.6
217	08-Nov-99	128	23	/Mc= 4.6
218	29-Dic-99	186	82	/Me=5.9
219	08-Mar-00	115	30	/Mc= 4.2
220	18-Mar-00	120	31	/Mc= 4.7 Mb= 4.8
221	21-Mar-00	197	25	/Mc= 4.8 Mb= 4.8
222	30-Mar-00	117	45	/Mc= 3.8
223	11-Abr-00	290	10	/Mc= 5.1 Mb= 5.0
224	15-Abr-00	125	9	/Mc= 4.4 Mb= 4.0
225	15-May-00	138		/Mc= 4.6 Mb= 4.2
226	05-Jul-00	111	31	/Mc= 4.2
227	21-Jul-00	109	48	/Mc= 5.4 Mb= 5.4
228	09-Ago-00	292	16	/Mb= 6.1
229	08-Sep-00			
230	28-Sep-00	115	46	/Mc= 4.2
231	30-Nov-00	166	14	/Mc= 4.4 Mb= 4.2
232	01-Dic-00	284	14	/Mc= 5.3 Mb= 5.3

EVENUTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
233	10-Ene-01	66		Mc= 4.2
234	26-Ene-01	25		Mc= 9.8 Mb=5.0
235	04-Feb-01	51		Mc=4.0
236	06-Feb-01	75		Mc=4.1
237	11-Feb-01	56		Mc= 4.5 Mb= 4.6
238	23-Feb-01	16		Mc= 4.1
239	05-Mar-01	32		Mc= 4.9
240	05-Mar-01	36		Mc= 4.5 Mb= 4.1
241	05-Mar-01			
242	06-Mar-01			
243	06-Mar-01	32		Mc= 5.1
244	06-Mar-01			
245	07-Mar-01	48		Mc= 4.0
246	29-Abr-01			
247	23-May-01	5		Mc= 4.5 Mb=3.9
248	26-May-01	5		Mc=4.4
249	16-Jun-01	15		Mc= 4.9
250	27-Jun-01	78		Mc= 4.4
251	02-Jul-01			
252	09-Jul-01	12		Mc= 4.4 Mb=4.2
253	16-Jul-01	57		Mc= 4.0
254	20-Jul-01	15		Mc= 4.5 Mb= 4.1
255	22-Jul-01	6.4		Mc= 4.4
256	11-Ago-01	51		Mc= 4.0
257	07-Sep-01	56		Mc= 4.4 Mb= 4.5
258	06-Oct-01	3		Mc=4.5 Mb0 3.9
259	08-Oct-01	4		Mc= 5.5
260	08-Oct-01	4		Mc= 3.8
261	08-Oct-01	3		Mc= 3.6
262	08-Oct-01	12		Mc= 3.5
263	08-Oct-01	9		Mc= 3.8
264	08-Oct-01	5		Mc=4.4 Mb= 4.6
265	08-Oct-01	3		Mc= 3.9
266	08-Oct-01	6		Mc= 4.5
267	08-Oct-01	6		Mc= 3.8
268	09-Oct-01	6		Mc= 4.5
269	09-Oct-01	11		Mc= 4.4 Mb= 3.9
270	09-Oct-01	6		Mc= 4.4 Mb= 3.8
271	11-Oct-01	9		Mc= 4.1
272	11-Oct-01	8		Mc= 4.4
273	11-Oct-01	20		Mc= 4.2
274	12-Oct-01	8		Mc= 4.3
275	12-Oct-01	6		Mc= 4.5 Mb= 4.2
276	22-Oct-01	13		Mc= 4.2
277	24-Oct-01	59		Mc= 3.7
278	29-Oct-01	4		Mc= 5.1 Mb= 5.1 Me= 5.4
279	29-Oct-01	6		Mc= 4.4 Mb= 4.2
280	07-Nov-01	7		Mc= 4.4
281	10-Nov-01	9		Mc= 5.1 Mb= 5.2 Ms= 5.1
282	19-Nov-01	19		Mc= 4.8
283	19-Nov-01	4		Mc= 4.4

EVENUTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
284	19-Nov-01	2		Mc= 4.3
285	23-Nov-01	5		Mc= 4.9 Mb= 4.8
286	24-Nov-01	5		Mc= 4.2
287	30-Nov-01	5		Mc= 4.2
288	09-Dic-01	8		Mc= 4.2
289	19-Dic-01	6		Mc= 4.1
290	26-Dic-01	6		Mc= 4.1
291	02-Ene-02	59		Mc= 4.6 Mb= 4.7
292	03-Ene-02	5		Mc= 4.2
293	06-Ene-02	66		Mc= 4.0
294	16-Ene-02	67		Mc= 4.0
295	20-Ene-02	5		Mc= 4.9 Mb=4.5
296	23-Ene-02	5		Mc= 4.6 Mb= 4.0
297	23-Ene-02	2		Mc= 4.4
298	30-Ene-02	109		Mc= 5.5 Mb=5.2
299	31-Ene-02	48		Mc= 3.9
300	10-Feb-02	9		Mc= 4.2
301	12-Feb-02	51		Mc= 4.0
302	14-Feb-02	7		Mc= 4.6 Mb= 4.1
303	14-Feb-02	9		Mc= 4.7 Mb= 4.5
304	15-Feb-02	6		Mc= 4.3
305	16-Feb-02	57		Mc= 4.3 Mb= 3.7
306	17-Feb-02	37		Mc= 4.7 Mb= 4.4
307	19-Feb-02	8		Mc= 4.7 Mb= 4.1
308	21-Feb-02	34		Mc= 4.5
310	07-Mar-02	5		Mc= 4.5 Mb= 4.4
311	26-Mar-02	20		Mc=4.3 Mb=4.0
312	05-Abr-02	9		Mc= 4.5
313	17-Abr-02	7		Mc= 4.3
314	18-Abr-02	22		Mc= 6.5 Mb= 5.4
315	18-Abr-02	12		Mc= 5.9 Mb= 5.8
316	21-Abr-02	7		Mc= 4.0
317	21-Abr-02	10		Mc= 4.1
318	28-Abr-02	8		Mc=4.6 Mb= 4.5
319	28-Abr-02	24		Mc=4.7 Mb= 4.7
320	03-May-02			
321	11-May-02			
322	12-May-02	64		Mc= 4.7
323	19-May-02	5		Mc= 4.7
324	22-May-02	64		Mc= 3.6
325	07-Jun-02	82		Mc= 5.6
326	10-Jun-02	5		Mc= 4.8
327	19-Jun-02	10		Mc= 5.5
328	22-Jun-02	7		Mb= 4.6
329	27-Jun-02	45		Mb= 4.5
330	28-Jun-02	10		Mb= 4.9
331	14-Jul-02	66		Mb= 4.0
332	09-Ago-02	8		Mb= 4.6
333	10-Ago-02	5		Mb= 4.2
334	15-Ago-02	10		Mb= 4.3
335	16-Ago-02	52		Mb= 4.0

EVENTO	FECHA	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL	MAGNITUD.
336	19-Ago-02	10		Mb= 4.2
337	23-Ago-02	5		Mb= 4.5
338	23-Ago-02	5		Mb= 4.0
339	29-Ago-02	105		Mb= 4.4
340	30-Ago-02	34		Mb= 5.4
341	01-Sep-02	20		Mb= 4.8
342	05-Sep-02	30		Mb= 4.0
343	10-Sep-02	11		Mb= 4.3
344	11-Sep-02	20		Mb= 4.4
345	25-Sep-02	10		Mb= 5.3
346	27-Sep-02	36		Mb= 5.2
347	27-Sep-02	6		Mb= 4.4
348	29-Sep-02	3		Mb= 4.3
349	04-Oct-02	54		Mb= 3.9
350	08-Oct-02	55		Mb= 4.1
351	12-Oct-02	44		Mb= 3.9
352	12-Oct-02	39		Mb= 4.3
353	13-Oct-02			
354	14-Oct-02	33		Mb= 4.2
355	15-Oct-02	26		Mc= 4.3
356	03-Nov-02	10		Mc= 4.4
357	04-Nov-02	4		Mc= 5.3
358	08-Nov-02	10		Mc= 5.2
359	20-Nov-02	61		Mc= 4.1
360	10-Dic-02	20		Mc =5.7
361	14-Dic-02	12		Mc= 4.6
362	19-Dic-02	5		Mc= 4.1
363	21-Dic-02	61		Mc=4.1
364	21-Dic-02			
365	10-Ene-03	25		Mb= 5.3
366	12-Ene-03	38		Mb= 4.1
367	16-Ene-03	2		Mb= 4.2
368	22-Ene-03	10		Mb= 7.6
369	30-Ene-03			
370	31-Ene-03	5		Mb= 4.4
371	04-Feb-03	52		Mb= 4.1

Tabla II.2 Características de los sismos registrados en la presa.

En la tabla mostrada se puede observar que de 232 sismos cuya profundidad epicentral ha sido registrada; 72 sismos presentan valores entre 30 y 60 Km, solo 12 los presentan mayores de 60Km (aunque cercanos a este valor) y todos los demás registran profundidades menores de 30 Km. Se concluye que la actividad sísmica en la región es somera, casi superficial.

Si se analiza la configuración de los sismos en el mapa de la figura II.5 conjuntamente con sus características en la tabla II.2, se puede observar que los sismos más cercanos a la presa (zona del Balsas) presentan las mayores profundidades y las magnitudes con valores más pequeños, a medida que se alejan los sismos disminuye la profundidad y aumenta la

magnitud, siendo los de la costa de Michoacán los más lejanos, los que presentan mayores magnitudes y profundidades casi superficiales, esto se ilustra en la tabla siguiente.

ZONA	RANGO DE DISTANCIAS [Km]	PROFUNDIDAD MÍN Y MÁX.[Km]	MAGNITUD MIN Y MAX.	CANTIDAD DE SISMOS
RIÓ BALSAS	13 – 142	4.0 – 104	3.2 – 5.9	21.5 %
FRANJA INTERMEDIA	64 – 189	5.0 - 95	3.6 – 7.5	6.5 %
COSTA CONTINENTAL GRO.	66 – 195	10 – 99	3.3 – 6.5	31 %
PLATAFORMA OCEÁNICA GRO.	108 – 255	4.0 – 54	4.2 – 6.9	28.5 %
ZONA CERCANA AL BALSAS Y LA COSTA	164 – 205	12.0 – 82.0	4.4 – 7.6	3.5 %
PLATAFORMA OCEÁNICA, MICH	284 - 336	14 - 25	4.6 – 8.1	4.5 %

Tabla II.3 Actividad sísmica por región en la zona del Río Balsas.

Esto es indicativo de lo ya expuesto; que la placa de Cocos entre debajo de la Placa de Norteamérica en la costa y se mantiene casi horizontal por 200 Km y a esta distancia cambia de ángulo en la zona del Balsas. Además también se confirma que el mecanismo de falla en las cercanías de El Caracol es de falla normal y en las costas de falla inversa.

III GENERALIDADES DE LA PRESA EL CARACOL.

III.1 UBICACIÓN.

La presa Carlos Ramírez Ulloa “El Caracol” se construyó entre los años 1979 Y 1986 en el estado de Guerrero sobre el río Balsas, aguas arriba de las presas El Infiernillo y La Villita, a 225 Km al sur de la Cd. de México y 125 Km al sur de la Ciudad de Iguala. La boquilla se encuentra aproximadamente a 73 Km aguas abajo del cruce del río con la carretera nacional México – Acapulco en el puente Mezcala. Sus coordenadas geográficas correspondientes son $17^{\circ} 57' 30''$ de la latitud norte con $99^{\circ} 59' 8''$ de longitud oeste, cerca del poblado de Apaxtla de Castrejón. El área de la cuenca del río es de $48,837 \text{ Km}^2$, el escurrimiento medio anual es de $6,144 \times 10^6 \text{ m}^3$ y el gasto medio anual es $195 \text{ m}^3/\text{s}$ (figura III.1).



Figura III.1 Localización de la presa El Caracol

III.1.1 GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA.

El embalse de *El Caracol* tiene una capacidad de almacenamiento al NAME (elev. 523.60 m) de $1860 \times 10^6 \text{ m}^3$, su planta de generación cuenta con 594 MW de potencia instalada y la generación media anual de la planta es de 1,486.00 GWh.

La lluvia en esta región alcanza una altura máxima de 1000 mm normalmente; cuando llueve lo hace, generalmente, con vientos cuyas velocidades llegan hasta 150 Km/h. Y se determinó, en los estudios previos a la construcción, que la avenida máxima registrada era de $3,881 \text{ m}^3/\text{s}$, con una recurrencia de 100 años.

El Río Balsas fluye en dirección este – oeste, en la región del embalse, tiene un curso sinuoso fluyendo a través de meandros y cañones con alturas de entre 150 y 200 metros y pendientes de casi 70 %. En un doble meandro en forma de “C” que el río labró se localiza la presa.

El lugar elegido para levantar la presa es un sinclinario cubierto por rocas sedimentarias: areniscas, limolitas y lutitas interestratificadas del cretácico, que forman parte de la formación Mezcala, cuya edad se remonta al Cretácico Superior. Siendo su característica más importante la alternancia de arenisca, lutitas y tobas de composición andesítica o graboide que intrusionan en las rocas sedimentarias (figura III.2).

El espesor promedio de la secuencia sedimentaria es superior a los 1000 m, condición que no es posible medir con exactitud debido a la gran cantidad de pliegues recumbentes. Cabe señalar que el sitio está altamente plegado y fracturado. La mayoría de las fracturas están rellenas de calcita, aunque algunas de ellas permanecen abiertas y otras con relleno de arcilla. Con menor frecuencia, las fracturas están rellenas por diques ígneos de consistencia dura a blanda.

En el sitio de la boquilla las rocas sedimentarias se clasifican en dos unidades U-A y U-B, predominando en la primera los estratos de arenisca y en la segunda los de lutita. Ambas unidades se encuentran en contacto por medio de la falla F-4, con orientación N-S y echado de 70° al W, que atraviesa el cauce del río en dirección casi perpendicular al mismo y a lo largo del eje de la cortina, quedando localizada la unidad U-A aguas arriba de la falla. Aunque esta falla es considerada inactiva actualmente continúa en observación y medición pues su estado podría cambiar por la alta sismicidad de la zona.

En la margen izquierda existen dos cuerpos intrusivos (diques), ambos de composición félsica (dacítica – andesítica), de rumbo $N77^\circ W$ con inclinación 55° al NE (hacia el río) el dique D-1, y $N20^\circ E$ con inclinación 40° al NW el dique D-2. En esta misma margen, en la zona del núcleo impermeable, se tenía un espesor considerable (30cm aproximadamente) de roca muy intemperizada que obligó a efectuar trabajos de regularización importantes.

En la margen derecha de la boquilla se localizó el dique D-1 de composición dacítico – andecítica con rumbo E –W y echado de $52^\circ N$; en la misma margen, aguas arriba de la boquilla se encontró el dique D-3 de composición félsica y básica con rumbo E-W .

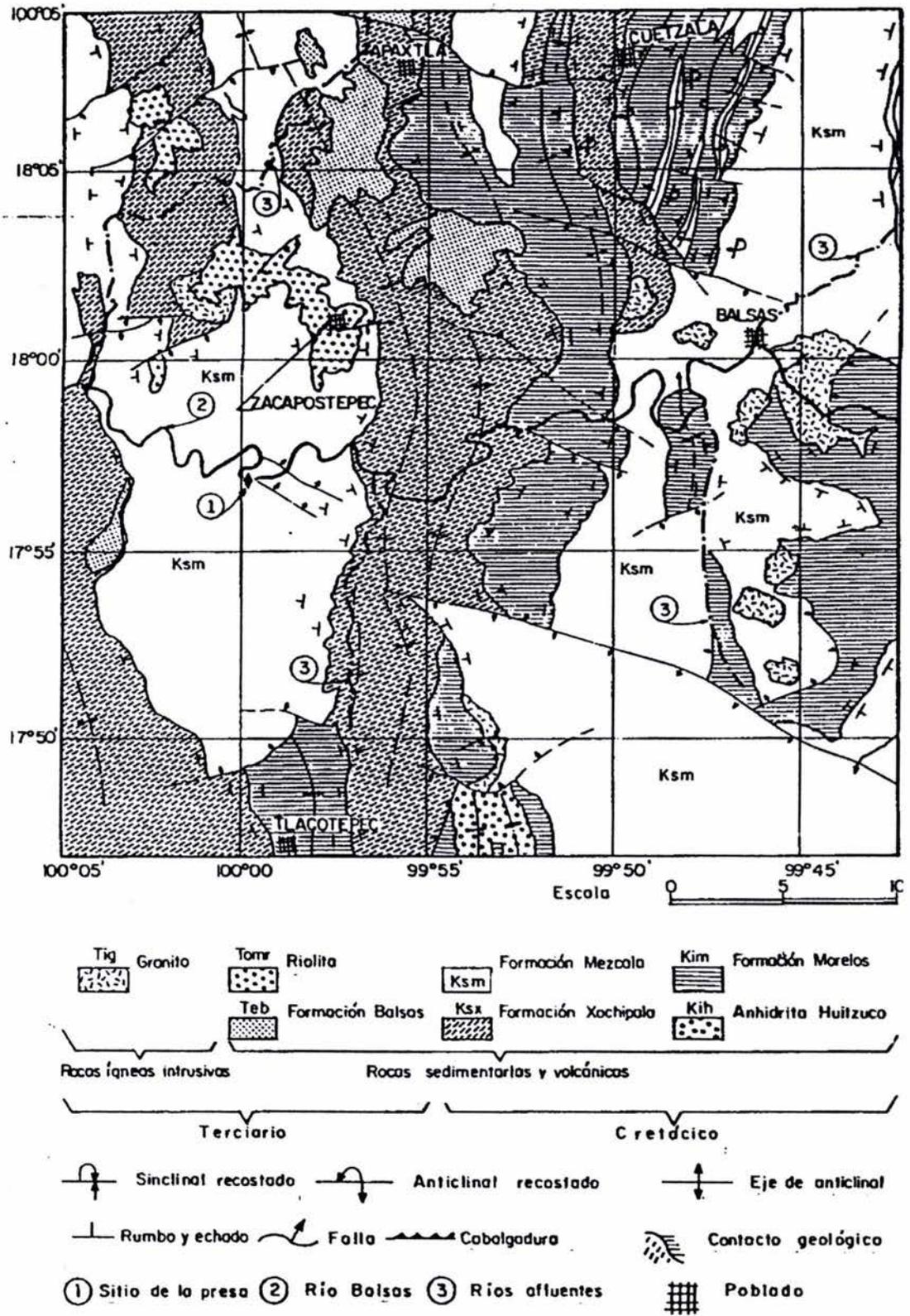


Figura III. 2 Geología de la Región.

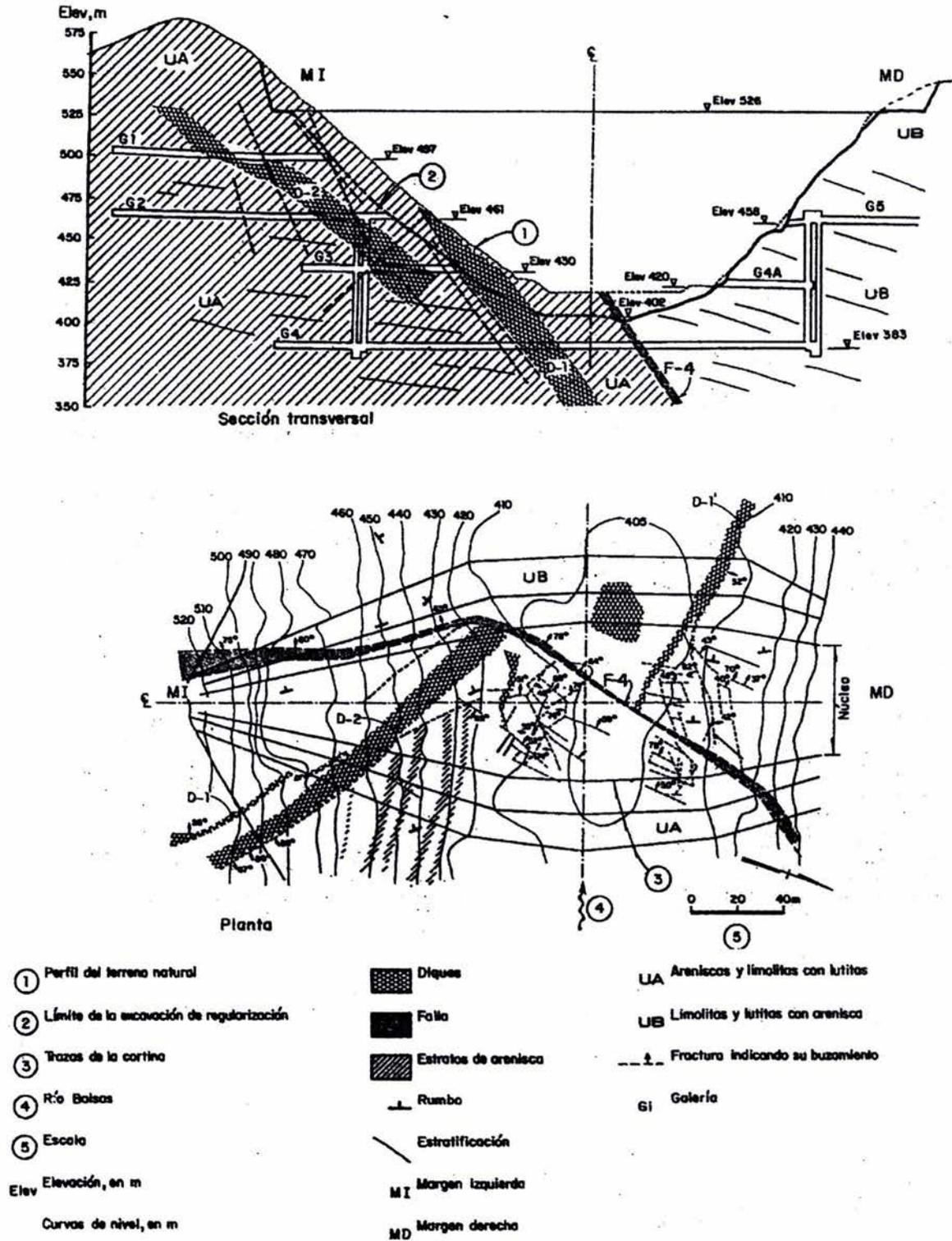


Figura III.3 Geología de la Boquilla.

En general la roca sedimentaria se encuentra fuertemente plegada y cortada por cuatro familias de fracturas, de las cuales las de dirección E-W son las más importantes(figura III.3).

Es importante mencionar que aunado a todo lo anterior en la zona adyacente al eje del río, se encontraron 4 zonas consideradas como inestables: una localizada a 250 m hacia aguas abajo de los desfuegos, de aproximadamente 18m de espesor de material deslizado. En la margen derecha también se encontró otra zona a unos 40 m de los túneles de desvío con un espesor de 20 m de material producto de deslizamiento. Empotrada en la barranca Pepahue en la margen izquierda, se encuentra localizada la tercera de 100 m de espesor. Por último, dentro de la misma margen aguas abajo del eje de la cortina se encontró una zona de roca afectada por un deslizamiento.

III.2 DESCRIPCIÓN DE LA PRESA.

CORTINA.

Conocidas las condiciones geológicas y geográficas del lugar se decidió construir la presa de enrocamiento, con un núcleo central de arcilla compactada, soportada por masas de filtros, transiciones y respaldos de enrocamiento compactado con taludes exteriores 2:1. La altura máxima de la cortina es de 126 m, el ancho total de la base es de aproximadamente 540 m, la longitud de la corona es de 348 m y los volúmenes de materiales utilizados son los siguientes: $5.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ en los enrocamientos, transiciones y filtros, y $0.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ en el núcleo. Integrada a la cortina se encuentran las ataguías, parte de la obra de desvío, y una plataforma al pie de aguas abajo, diseñada originalmente con una longitud variable entre 110 y 200 m y cuya corona alcanzaba la elev. 440. Se ha construido con el material de desperdicio, producto de las excavaciones del vertedor y otras estructuras. Sin embargo, debido a que el volumen de roca de mala calidad resultó mucho mayor del estimado originalmente, las dimensiones de la plataforma mencionada se incrementaron tanto en longitud(aproximadamente 400 m) como en altura (elevaciones 463 y 458).

VERTEDOR.

El vertedor está ubicado en la margen derecha, es de eje recto con descarga en canal abierto con muro central, cuenta con ocho compuertas radiales de 14.5 m de ancho x 22 m de altura. El gasto máximo que desaloja es $11,300 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde a una avenida de entrada al embalse de $17,800 \text{ m}^3/\text{s}$.

OBRA DE TOMA.

Cuenta con tres obras de toma en la margen derecha, con estructura de rejillas en la entrada, una compuerta auxiliar en rampa para las tres unidades, cada una opera con un gasto máximo de $257 \text{ m}^3/\text{s}$.

CASA DE MÁQUINAS.

La casa de máquinas es subterránea tiene una longitud de 114 m, un ancho de 20 m y una altura máxima de 39 m, alberga tres turbinas Francis de 190 MW cada una. Se optó por construir una casa de máquinas subterránea, para eliminar el riesgo que hubiera creado la solución a cielo abierto, que requería efectuar excavaciones de gran altura en condiciones

poco propicias para su estabilidad, por la orientación desfavorable de los echados de los estratos.

OBRA DE DESVÍO.

La obra de desvío se encuentra en la margen derecha, está formada por dos túneles de sección portal, no revestidos, con una altura máxima de 13 m y una longitud de 400 m, y dos ataguías con alturas 44 m la de aguas arriba y 9 m la de aguas abajo. Las ataguías están integradas a la cortina (figura III.4).

FASE CONSTRUCTIVA.

Como ya se mencionó, la cortina es de materiales graduados con un núcleo central de arcilla compactada, este núcleo es impermeable, esta edificado con una grava arcillosa (SC-CL), formada por alteración de lutitas, con porcentaje de finos menores de la malla No. 200 comprendido entre 20 y 50 %. Este material se acarreo de los prestamos San Marcos y Remolino, distantes 8 a 10 Km de la presa, y se almacenaron temporalmente (mínimo 15 días). Se formaron terraplenes en capas de 40 cm de espesor humedecidas con aspersor, para alcanzar los contenidos de agua de colocación, según se tratara de arcilla “húmeda o normal”, ya que en las fronteras con los filtros de aguas arriba y abajo y en el contacto con las laderas, la arcilla se colocó con contenidos de agua hasta 3% mayores que el óptimo ($W = W_0 + 3\%$), en tanto que en el resto del núcleo se compactó el material “normal” con la humedad óptima más 1% ($W = W_0 + 1\%$). Esto con el fin de tener fajas de material más deformable en los contactos con las zonas ya mencionadas.

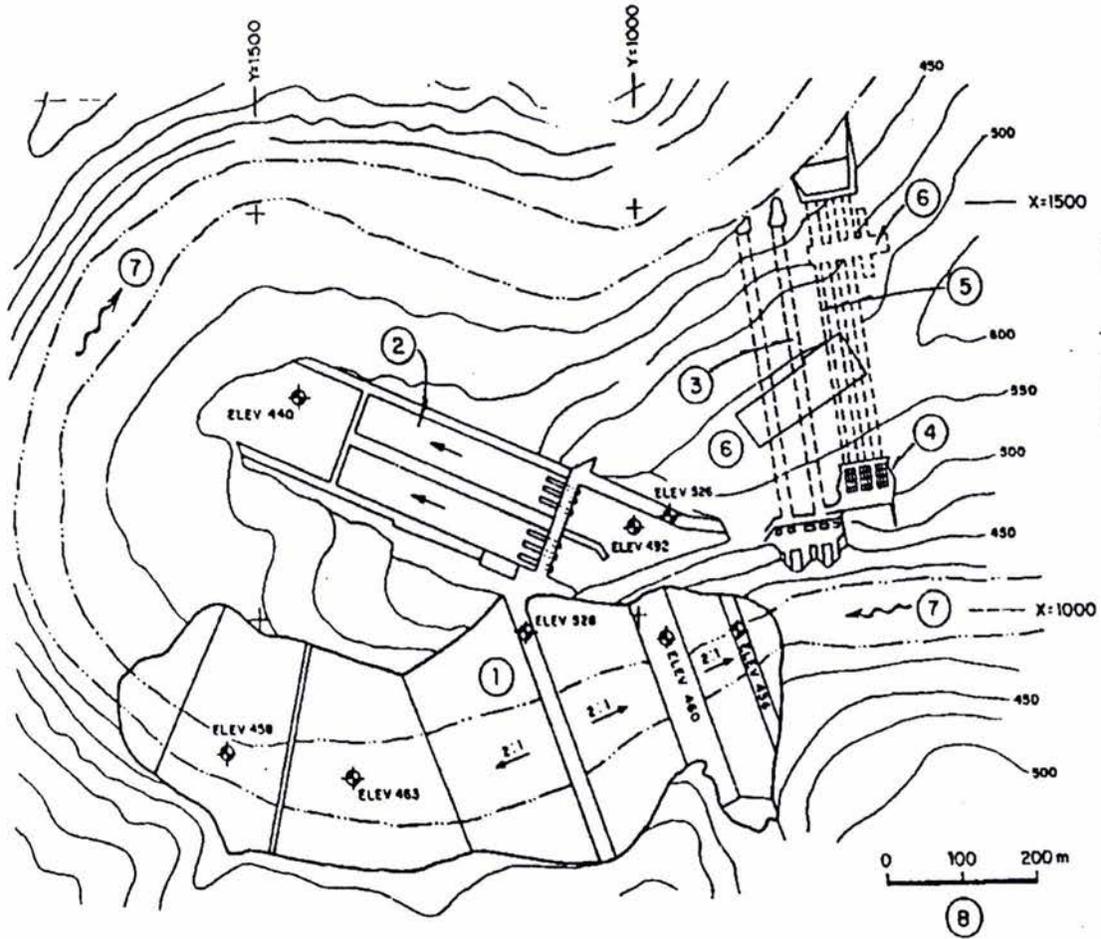
Los filtros están formados con material en greña de los playones de río, triturado parcialmente a tamaño máximo de 5.08 mm (2”) y lavado para eliminar los finos (menores que la malla No 200). Una vez saturados y lavados se separó el material en gravas (material mayor que 3/8”) y arenas; se colocó el material de tal forma que siempre se tuviera un volumen de arenas mínimo de 25% y que la curva granulométrica resultante quedara dentro de las curvas límite especificadas.

El material de transición, así como los enrocamientos, procede de la cantera Chachalacas que está formada por estratos de arenisca sana y se encuentra a un kilómetro de distancia aguas arriba de la cortina. Para la zona de transición, el tamaño máximo de partículas es de 6”; para el enrocamiento compactado de 30 cm, mientras que para el enrocamiento de protección se ocuparon fragmentos con tamaño máximo de 100cm y para el enrocamiento de gran tamaño fragmentos de 1 tonelada de peso o menor (figura III.5).

Debido a la presencia de fallas y accidentes geológicos mencionados anteriormente se tuvo especial cuidado en el tratamiento de la cimentación. Además de la pantalla general de inyecciones, se trataron por separado cada uno de los diques y fallas encontradas en la zona de desplante de la presa.

Para tratar la falla F-4 se efectuó una limpia cuidadosa en una faja de 20 m de ancho y a lo largo de su desarrollo bajo el núcleo impermeable. Se excavó una zanja con taludes 1:1 y profundidad de 3 m, la que se limpió cuidadosamente y se rellenó de concreto. Su finalidad fue la de actuar como tapón tanto para dificultar el paso del agua a través de la falla por debajo del núcleo, como para servir de techo a las inyecciones de consolidación bajo la falla. De modo semejante, aunque con excavaciones de menor profundidad, se

trataron las zonas de roca que se encontraban muy fracturadas a lo largo de la falla, rellenándose con 30 a 50 cm de espesor de concreto. En el resto de la falla, las fracturas se limpiaron con chorros de agua y aire a presión y se juntaron con mortero de cemento aplicado con cepillo.



1 Cortina

2 vertedor.

3 Túneles de desvío.

4 Obra de toma.

5 Túneles de presión.

6 Casa de máquinas

7 Río Balsas.

8 Escala gráfica.

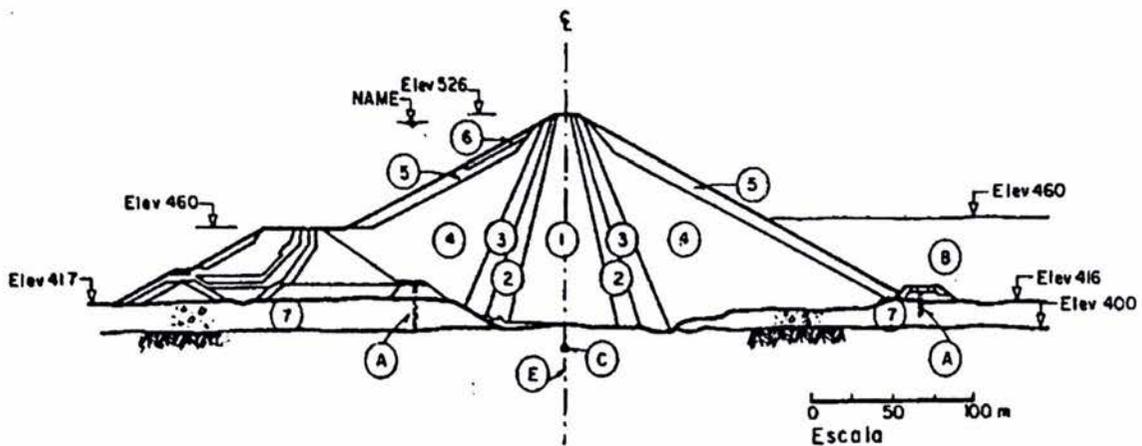
Elev Elevación en m.

Coordenadas y curvas, en m.

Figura III.4 Planta General de la Presa.

En la zona de desplante del corazón, aguas arriba de la falla F-4 se colocó una losa de concreto de espesor variable entre 1.0 y 2.2 m y dimensiones en planta de aproximadamente 35 x 16 m, anclada a la roca de cimentación mediante varillas corrugadas de 3.8 cm (1 1/2 ") de diámetro por 4.5 m de longitud colocadas formando una retícula de 2 X 2 m; la función de esta losa fue la de regularizar la roca de cimentación y servir de techo a las inyecciones superficiales de consolidación.

El tratamiento superficial de la roca ("tapete de consolidación") se efectuó desde el desplante (elev 400 aprox.) hasta la corona (elev. 526) mediante una cuadrícula de perforaciones de 7.5 cm de diámetro (3") y 10m de profundidad con inclinaciones variables entre 30 ° y 45° , según la zona por tratar. Las dimensiones de esta cuadrícula en su primer etapa fueron de 12 x 12 m con un barreno central, cerrando a 6 x 6 m en su segunda etapa, 3 x 3 en tercera y barrenos intermedios para las etapas subsecuentes. Estos barrenos se inyectaron con lechadas estables de agua-cemento-bentonita, cuyas proporciones cemento-agua variaron entre 0.35 y 0.45 en peso y los porcentajes de bentonita (con relación al peso del cemento) estuvieron comprendidos entre el 1.7 y el 2.2 %. Se utilizó una presión de inyectado de 5 Kg/cm² entre 0 y 5m de profundidad y de 10 Kg/cm² entre 5 y 10m.



- 1 Núcleo.
- 2 Filtro.
- 3 Transición.
- 4 Enrocamiento.
- 5 Enrocamiento a volteo.
- 6 Enrocamiento de gran tamaño.
- 7 Depósitos de río.
- 8 Material de desperdicio producto de las excavaciones en roca

- A Pantalla impermeable.
- B Galería perimetral.
- C Galería 4.
- E Eje de la cortina.

Elev Elevación, en m.

Figura III.5 Corte de la cortina.

La zona de construcción de la cortina no fue el único lugar donde se llevaron a cabo trabajos de regularización. Al iniciar la excavación de la casa de máquinas subterránea del proyecto El Caracol, Guerrero, se observaron movimientos en su pared sur. Se efectuaron de inmediato, levantamientos geológicos de detalle de la zona y varios análisis de estabilidad de la masa rocosa involucrada. Se instrumentó, además, con extensómetros el macizo rocoso inestable registrando constantemente la magnitud de los desplazamientos inducidos durante el proceso constructivo. Estos registros permitieron ponderar en todo momento la efectividad de las medidas correctivas utilizadas para asegurar la estabilidad de esta excavación subterránea.

En la pared sur de la casa de máquinas y en la pared oeste de la sala de tableros quedaron visibles durante la excavación varias fallas. Además, se apreció claramente en la pared oeste de la sala de tableros, al inicio de su excavación, la presencia de un dique de rumbo N65°E con echado de 54°NW. Tales discontinuidades, aunadas a los planos de estratificación del macizo rocoso que buzaban hacia el este conforman tres cuñas inestables de la roca.

Ante esta situación se suspendieron las excavaciones y se procedió a realizar trabajos de anclaje, drenaje, control de los patrones de voladura y modificaciones en el diseño geométrico. El anclaje necesario en la cuña 1 resultó ser de 18.9 ton/m², en la cuña 2 de 6 ton/m² y nulo en la cuña 3, tomando en cuenta drenaje total y aceleración máxima por efecto de sismos de 0.15 g.

Después de llevar a cabo los trabajos, la instrumentación mostró que los desplazamientos seguían siendo excesivos por lo que se incrementó el anclaje, con lo que se procedió a seguir con las voladuras de excavación. Esto provocó el incremento notable de los desplazamientos registrados, por lo que se procedió por tercera vez a aumentar el anclaje y se redujeron las cargas de las voladuras de banqueo. El esfuerzo total de compresión equivalente proporcionado finalmente a la cuña 1 fue de 31.9 ton/m². Las posteriores excavaciones en la sala de tableros incrementaron notablemente los desplazamientos de la cuña 1. Sin embargo; al iniciar los colados de las losas de la sala de tableros, la velocidad de estos desplazamientos se redujo notablemente.

INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA.

Con el fin de conocer los efectos de la interacción entre los diferentes sectores de la cortina y de éstos con las laderas, esto mediante la medición de esfuerzos y deformaciones, se instrumentó la presa con diferentes dispositivos.

Las estructuras instrumentadas, para evaluar su estabilidad, son: la cortina y su cimentación incluyendo la falla F-4, la pared sur de la casa de máquinas, el talud arriba de la plataforma de transformadores y el talud izquierdo del canal de descarga del vertedor

Para la cortina de El Caracol, como en otras presas, la mayoría de los instrumentos están alojados en dos planos normales entre sí, aproximadamente coincidentes con las secciones máxima longitudinal y transversal de la cortina. Sin embargo, en este caso se necesitó instrumentación extra por la existencia de la falla geológica F-4 y la potencialidad sísmica de la zona.

La instrumentación geotécnica de la cortina está formada por ocho inclinómetros, tres deformómetros, dieciséis niveles hidráulicos, varios extensómetros de barra y, en la superficie, 120 referencias topográficas distribuidas en seis líneas transversales y tres longitudinales más. También se cuenta con doce grupos de aparatos, cada uno compuesto por; a) siete celdas de presión, tres orientadas en planos perpendiculares a los ejes de referencia X, Y, Z y tres en planos normales a los ejes a 45° contenidos en los planos XY, XZ, y YZ con una celda extra en cada uno de estos planos; b) seis extensómetros lineales orientados en forma paralela a los ejes mencionados, y c) un piezómetro neumático solo para los grupos localizados en el núcleo impermeable y el filtro (figura III. 6).

Los inclinómetros instalados en la sección transversal máxima indican que los desplazamientos horizontales en la dirección paralela al río se registran a media altura del núcleo con dirección aguas abajo, el desplazamiento máximo es de 24 cm de los cuales solo el 9% (2.2 cm) ha ocurrido en los últimos seis años. La mayor deformabilidad es desarrollada por el enrocamiento y el material de transición del talud aguas arriba, esto es natural pues los materiales del talud aguas arriba se encuentran saturados por estar en contacto con el embalse.

Asimismo, esta serie de aparatos indican que los movimientos verticales disminuyen gradualmente con la profundidad, el asentamiento máximo se da en el talud de aguas arriba, esto se da por la mayor deformabilidad de los materiales por su condición de saturación.

Los inclinómetros situados en la sección longitudinal máxima indican que los movimientos horizontales en dirección paralela al eje del río reducen ligeramente su magnitud hacia los extremos. Los valores indican que la parte izquierda de la cortina sufre mayores deformaciones que la derecha. Esta misma serie de aparatos indican que los desplazamientos horizontales en la dirección del eje de la cortina son menores que los que se presentan en la dirección eje del río y se desarrollan preferentemente hacia al centro del cauce.

En cuanto a los asentamientos medidos con los inclinómetros de la sección longitudinal máxima, se desprende que el mayor de estos ocurre al centro de la cortina y disminuye ligeramente hacia los extremos

Lo descrito en los párrafos anteriores se corrobora con la información obtenida de las líneas de referencia. En todas las líneas la tendencia de los desplazamientos horizontales es hacia aguas abajo y éstos disminuyen conforme avanza el tiempo debido a la mayor trabazón y disminución de los huecos por el reacomodo de los fragmentos de roca. En cuanto a los asentamientos medidos con las líneas de mojoneras se corrobora la mayor deformabilidad del talud aguas arriba con respecto al de aguas abajo; la mayor deformación vertical tiene lugar sobre la sección transversal máxima.

Los extensómetros instalados en la parte superior de la cortina para conocer las deformaciones, están posicionados en la dirección eje de río en tres secciones transversales a la elevación 516m, y en la dirección eje cortina en la sección longitudinal máxima en la elevación 520m. En general estos aparatos reportan que durante el primer llenado se desarrollaron las mayores deformaciones como era de esperar; después de este acontecimiento los valores de las deformaciones son prácticamente los mismos.

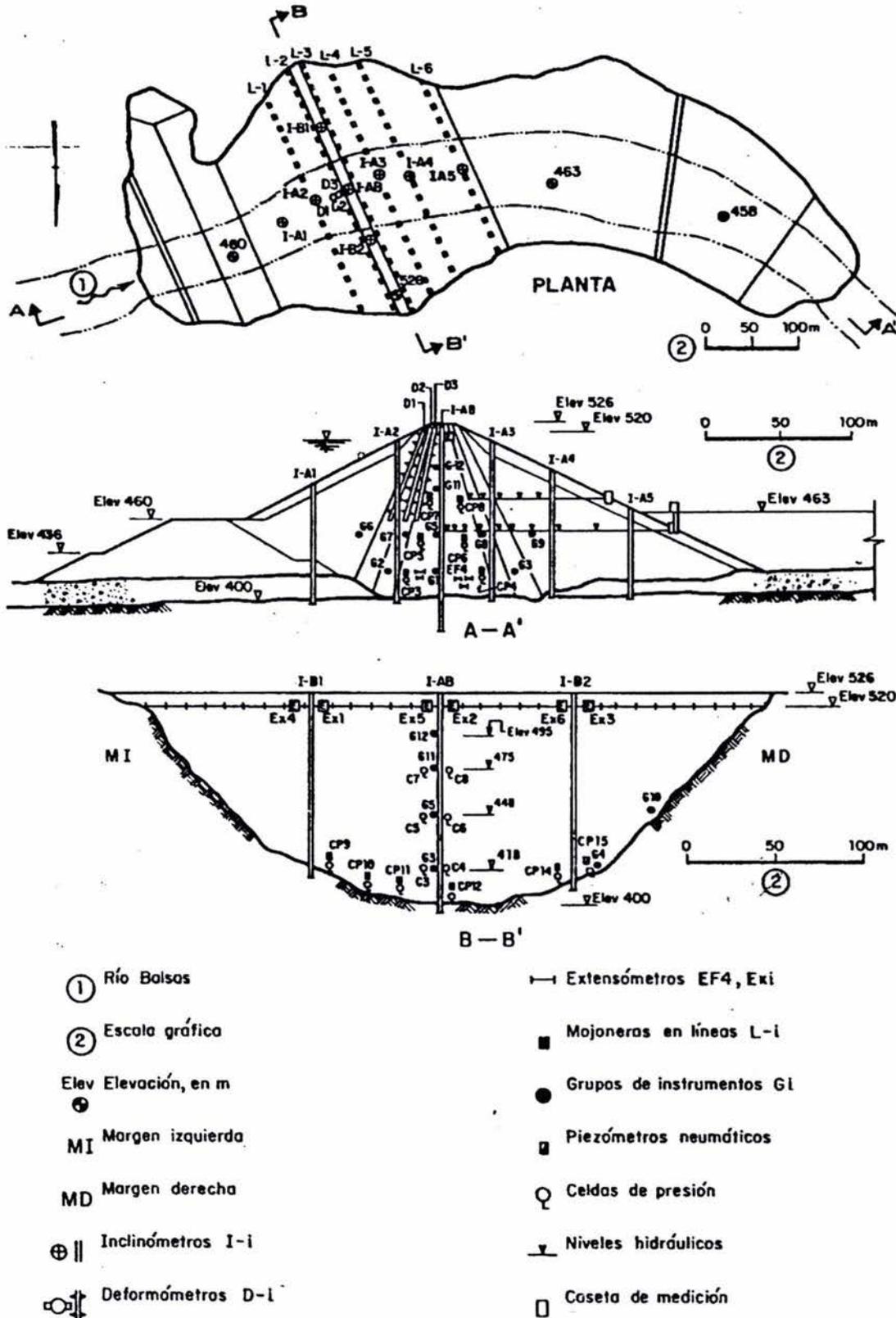
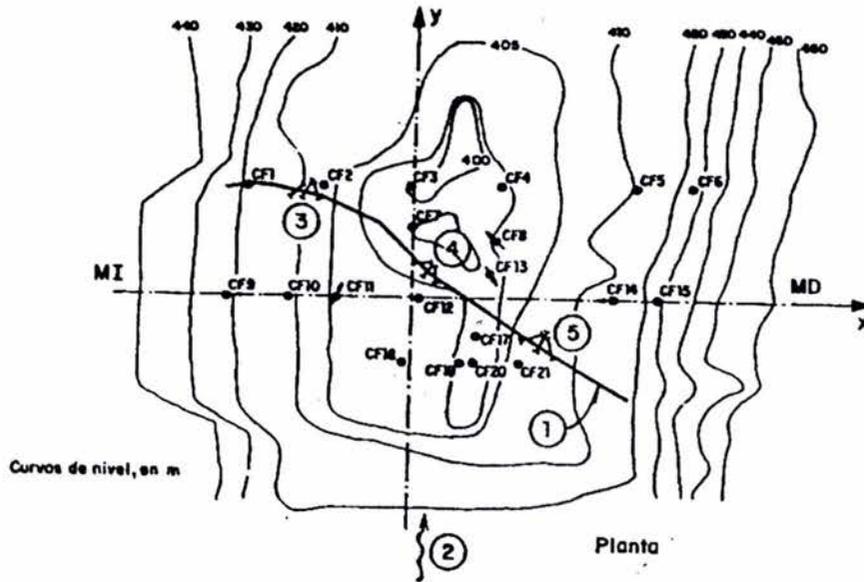


Figura III.6 Instrumentación Geotécnica ubicada en la cortina.

En los extensómetros ubicados en las secciones transversales, las compresiones se desarrollan en los instrumentos ubicados sobre el eje de la cortina y las extensiones en los aparatos colocados hacia los hombros. Los extensómetros instalados en la sección longitudinal máxima acusan deformaciones de compresión no mayores de 0.3% con una configuración casi constante; solo los extensómetros colocados hacia los empotramientos reportan valores mayores de deformación. Estos resultados son lógicos pues al acomodarse y deformarse el material se reacomoda observándose un cambio de volumen que produce tensiones del material en contacto con los empotramientos.

Para la cimentación (falla F-4), se instalaron tres grupos de tres extensómetros lineales cada uno. Para medir esfuerzos se instalaron veinte celdas de presión total, nueve en el horst y 11 en el graben incorporando junto a cada una de ellas un piezómetro neumático. (figura III.7)



MI Margen izquierda	1 Falla F-4	3 Grupo 1	5 Grupo 3	● celdas de presión
MD Margen derecha	2 Río Balsas	4 Grupo 2	⊥ Extensómetros.	

Figura III.7 Instrumentación en la falla F-4.

Los extensómetros instalados han registrado pequeños movimientos causados por el proceso de construcción y el primer llenado.

Para la casa de máquinas la instrumentación consistió en varios extensómetros de barra colocados tanto en las paredes norte y sur como en la bóveda. En la pared sur es donde, debido a la aparición de varias discontinuidades que forman dos cuñas, se puso mayor atención; sin embargo, la baja velocidad de deformación, reportada a través de las mediciones en los extensómetros, no se vislumbra riesgo de falla a corto plazo.

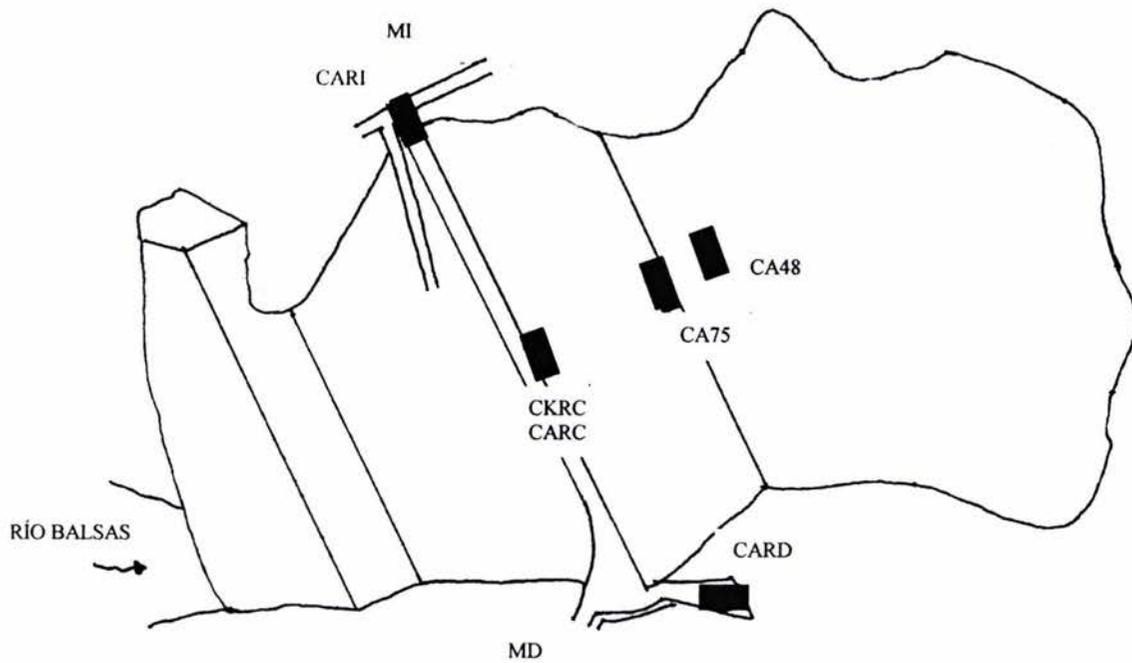
En el talud izquierdo del vertedor se colocaron 10 extensómetros de barra. En los tres ubicados en la unidad litológica U-B se han presentado velocidades de deformación de hasta 0.42 mm/año. Sin embargo, no existen grietas ni fisuras en el concreto lanzado que indiquen la presencia de un deslizamiento, posiblemente los movimientos registrados están asociados a una relajación de la capa superior del material.

En el talud de la plataforma de transformadores se instalaron dos ternas de extensómetros a diferentes profundidades, una a la elevación 580 y la otra a la 570. A la fecha estos aparatos no han mostrado inestabilidad, pues la magnitud de los desplazamientos registrados ha sido pequeña (menor que 1 mm).

INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA.

Como ya se mencionó el río Balsas se encuentra en una de las zonas de más alta sismicidad en el país. Los sismos que afectan esta zona están asociados principalmente con la subducción de la placa de Cocos, bajo la zona continental del sur de México y se generan en la interfase de dicha placa con la zona continental (Trinchera mesoamericana) y en la superficie de esta zona.

Para registrar los sismos, existen instalados seis acelerógrafos en la presa El Caracol, tres en la cortina, dos en las márgenes y uno más en la subestación. Cabe señalar que por un tiempo hubo cuatro en la cortina pues uno de ellos fue reemplazado pero no de manera inmediata. Los de la cortina están colocados de la siguiente manera: el primero en la base de esta estructura en la elevación 448 su clave es CA48, el segundo a media cortina, en el nivel 475 y su clave es CA75 y por último al centro de la corona en la elevación 528 está instalado el CKRC, el aparato que trabajó simultáneamente por un tiempo con este último equipo llevaba la clave CARC y también estaba instalado en la corona. En cada margen hay instalado un equipo, en la derecha el CARD y a la izquierda el CARI; las lecturas de estos equipos se pueden considerar como de campo libre. El acelerógrafo instalado en la subestación lleva la clave CARS (figura III.8)



CARC Estación Corona Centro.
 CKRC Estación Corona Centro.
 CARI Estación Margen Izquierda.
 CARD Estación Margen Derecha.
 CA48 Estación Base Cortina Nivel 448 .
 CA75 Estación Media Cortina Nivel 475.
 CARS Estación de la Subestación.

MD Margen Derecha.
 MI Margen Izquierda.

Figura III.8 Instrumentación sísmica en la cortina.

IV ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO.

IV.1 ESPECTROS DE RESPUESTA.

Los contenidos de energía más altos de las figuras de los espectros de respuesta de las siete estaciones instaladas en la presa El Caracol se presentan en un rango de frecuencias de 2.0 a 10 Hz (Figs. IV.4- IV.10).

En la corona se presentaron las aceleraciones más altas. En este lugar se encuentra instalada la estación CKRC que sustituyó a la estación CARC, aunque por un corto tiempo trabajaron simultáneamente. En los registros de la estación CARC los valores de la aceleración espectral se encuentran por debajo de 0.4 g excepto para los sismos 30 y 81. El primero de estos sismos presenta su valor máximo en 1.74 Hz y es 0.766 cm/s^2 , se distingue por ser somero y por presentar aceleraciones muy altas en sus tres componentes; para el caso de la componente transversal el valor de la aceleración casi duplica a la de las otras dos. Su epicentro está frente a las costas de Guerrero cerca de la Costa Chica a 161 Km de la presa a una profundidad de 19 Km. Por su parte, el sismo 81 presenta en la componente transversal la aceleración más alta registrada, 225.3 cm/s^2 . También es somero pues su epicentro se presentó a una profundidad de 23 Km a sólo 66 Km de la presa, en la plataforma continental del estado de Guerrero. Este sismo mantiene valores altos de la aceleración desde 2.0 hasta 10 Hz (Figs. IV.6).

Para el espectro obtenido de esta estación CKRC, los valores de la aceleración son menores que 0.25 cm/s^2 . Para varios sismos se da el mismo fenómeno que para el sismo 81 en la estación CARC, esto es, los sismos mantienen un nivel alto y casi constante de aceleración en un rango de 2.0 a 10.0 Hz. Con todos estos elementos se puede afirmar que a medida que pasa el tiempo, los sismos tienen mayor participación en modos de vibración superiores de la cortina. Además, como los sismos que provocan este fenómeno son cercanos, arriban a la presa con un espectro de frecuencias muy amplio, a diferencia de los lejanos, cuyo espectro de frecuencias se ve filtrado por los estratos de suelo que atraviesan (Figs. IV.6 – IV.7).

A media cortina las aceleraciones son menores a 0.2 cm/s^2 excepto para los sismos 30 y 81 cuyas características ya fueron expuestas en los párrafos anteriores. Los valores máximos de estos sismos son cercanos a 3.0 Hz, el sismo 30 presenta su máxima amplificación alrededor de los 2.0 Hz, mientras que el 81 la muestra alrededor de los 13.0 Hz (Figs. IV. 5).

En la base, las aceleraciones son menores que 0.2 cm/s^2 , excepto para los sismos 30, 81 y 100. Al igual que los dos primeros, el sismo 100 es somero, se presentó a una profundidad de 20 Km y una distancia de 141 Km de la presa, su magnitud fue de 4.8 (Figs. IV.4). En la tabla IV.1 se pueden observar las características de los sismos mencionados en este capítulo y en las figuras IV.1, IV.2 y IV.3 la ubicación de los mismos.

Como se puede ver, hasta aquí los mayores contenidos de energía se presentaron en la corona, mientras que en la base y a media cortina los valores son semejantes.

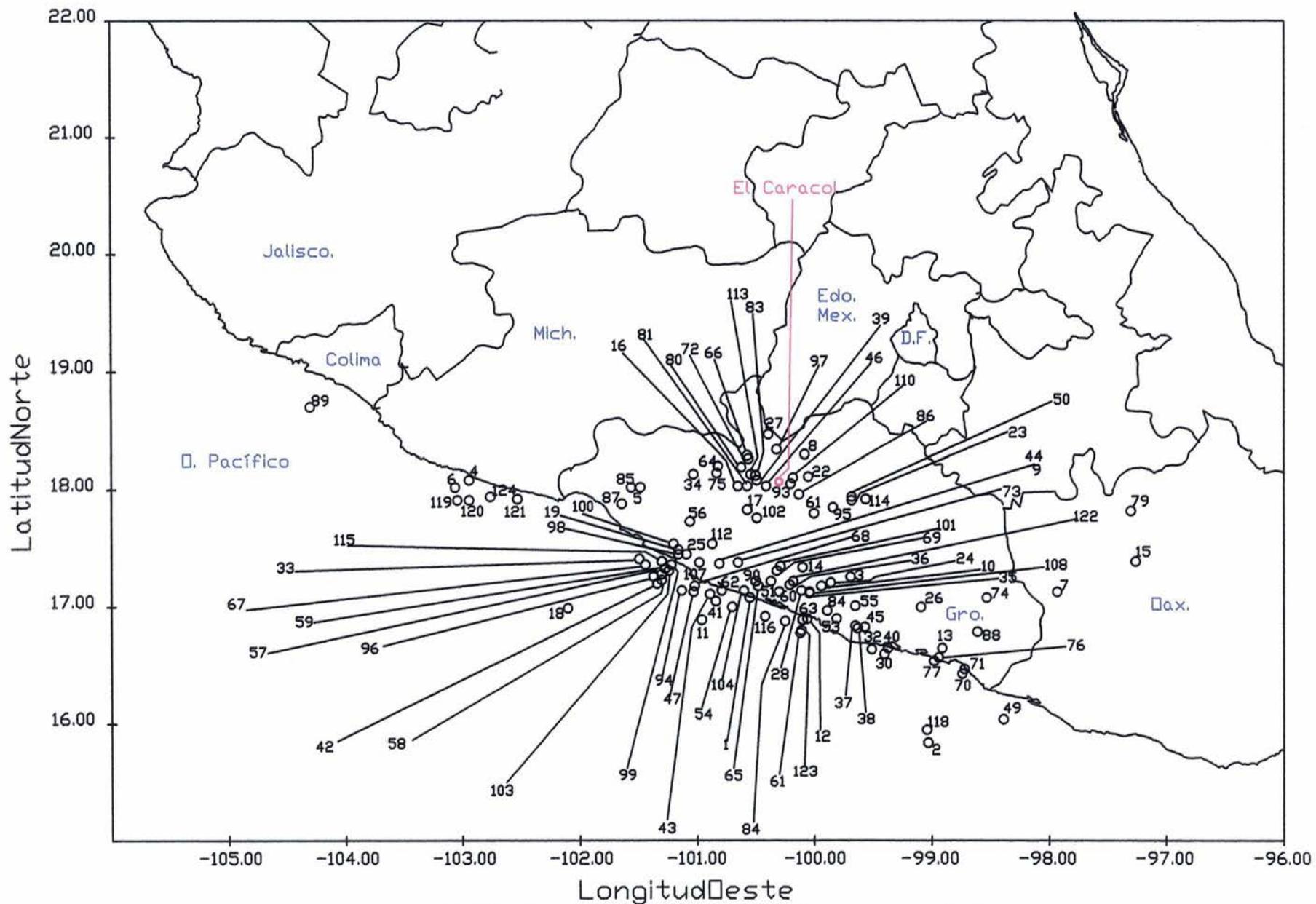


Figura IV.1 Ubicación de los sismos registrados.

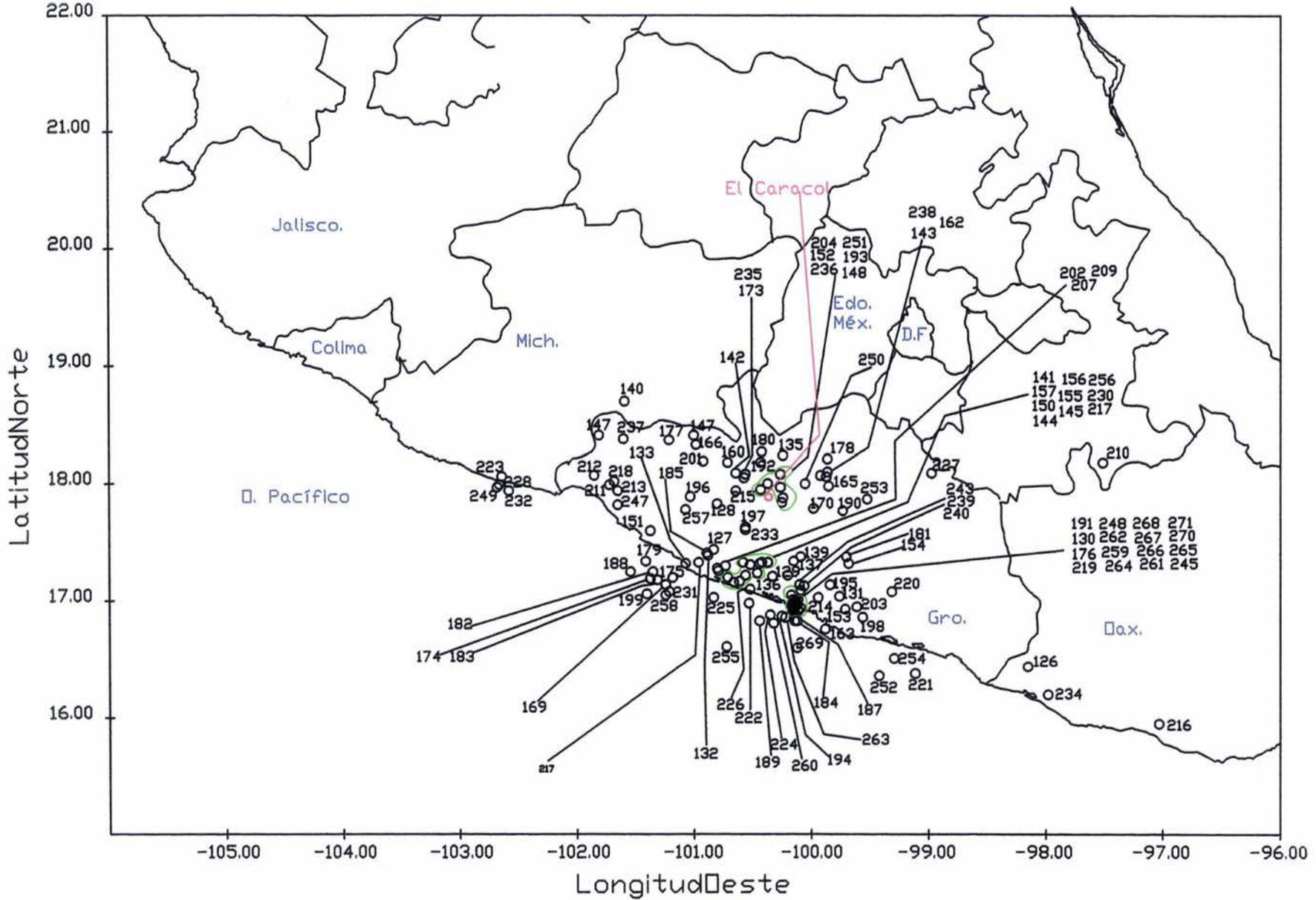


Figura IV.2 Ubicación de los sismos registrados (continuación).

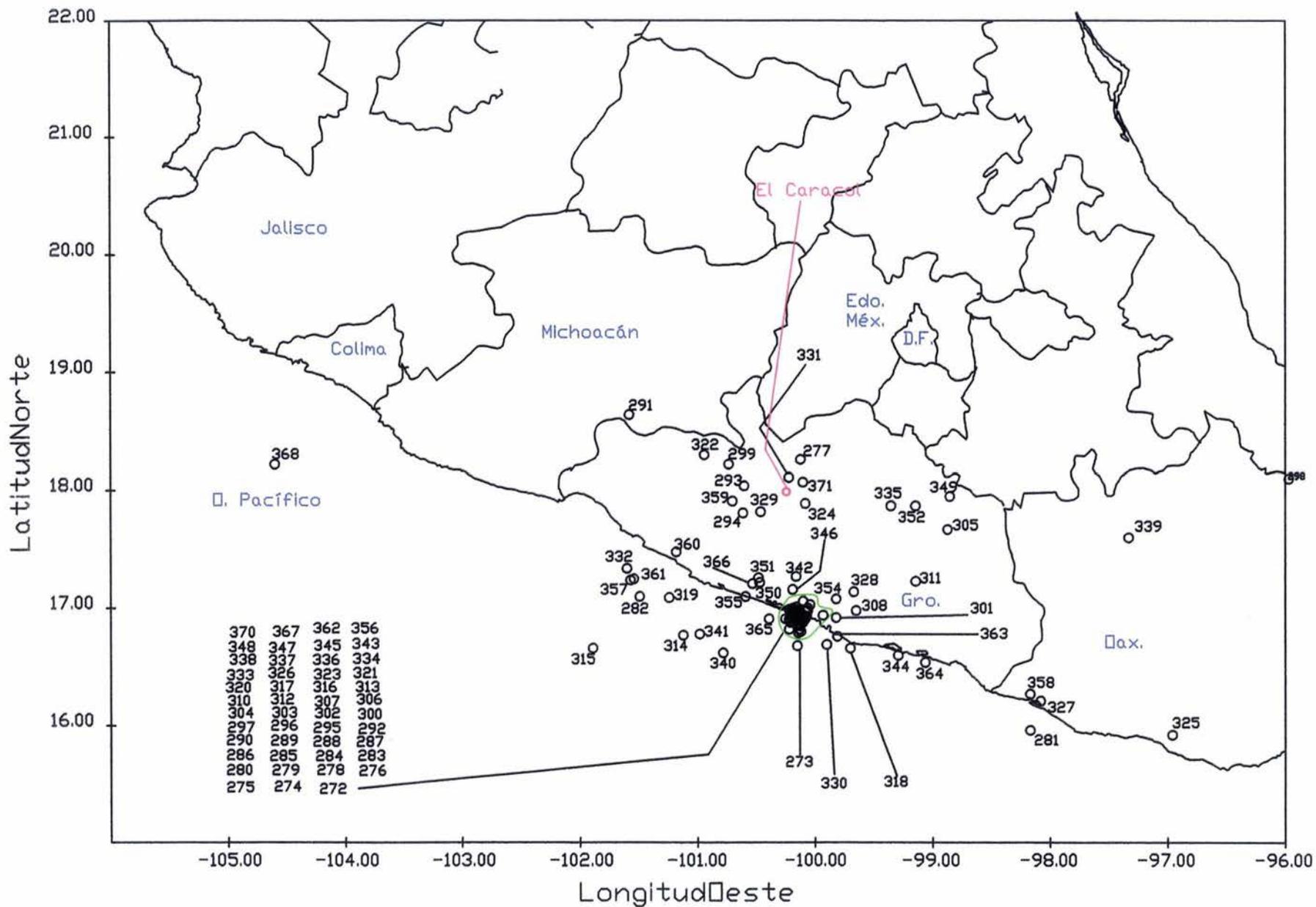


Figura IV.3 Ubicación de los sismos registrados (continuación).

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACIÓN	ACELERACIÓN MÁXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
1	28-Ene-84		CARI	-13.49	24.8	-29.33
			CARD	-8.36	-9.76	-16.09
2	02-Jul-84	/Mb=5.90/Ms=6.00	CARI	17.01	-22.77	-30.53
3	14-Jul-84	/Mb=5.20	CARI	17.01	-22.77	-30.53
4	19-Sep-85	/Mb=6.80/Ms=8.10/M=8.10	CARI	-40.78	50.24	-89.38
5	21-Sep-85	/Mb=6.30/Ms=7.60/Mc=7.50	CARI	33.77	-55.71	-66.17
			CARD	38.88	-35.42	-45.23
6	30-Abr-86	/Mb=6.20/Ms=7.00/M=6.40	CARI	-23.52	31.22	-26.21
			CARD	8.5	26.99	-15.61
7	09-Jul-86	/Mb=4.40	CARC	1.62	2.2	2.49
8	05-Sep-86		CARC	7.63	-6.85	-8.9
9	14-Dic-86	/Mc=4.30	CARC	4.24	4.54	-6.34
10	16-Dic-86	/Mc=4.30	CARC	-6.95	6.51	-11.14
11	11-Ene-87		CARC	-2.39	3.35	6.7
12	26-Mar-87	/Mb=4.80/Ms=4.50/Mc=4.80	CARC	-5.74	5.74	-9.09
13	07-Jun-87	/Mb=5.50/Ms=4.80/Mc=4.90	CARI	-2.88	3.35	5.74
			CARC	10.05	-11.01	19.62
14	21-Jun-87	/Mc=3.80	CARC	4.79	-7.66	8.14
15	15-Jul-87	/Mb=6.00/Mc=5.70	CARI	-2.87	-4.31	4.78
			CARC	-14.36	15.79	-18.19
16	25-Ago-87		CARC	8.61	-7.18	19.62
17	29-Ago-87		CARI	-3.83	-5.74	5.26
			CARC	10.53	14.83	12.44
18	22-Nov-87		CARC	-4.79	6.22	-9.09
19	08-Feb-88	/Mb=5.50/Ms=5.70/Mc=5.00	CARI	11.04	-15.15	10.17
			CA48	14.09	-16.79	27.94
			CA75	12.79	15.68	-20.4
			CARC	36.85	33.5	58.38
20	31-Mar-88		CARC	-2.87	-4.83	0
21	09-Abr-88		CARC	9.12	10.47	-9.36
22	29-May-88	/Mb=4.60/Mc=4.20	CARI	-9.02	10.54	11.65
			CARD	17.26	-30.66	35.98
			CA48	9.86	-10.97	-15.83
			CARC	23.31	-29.26	30.36
23	24-Feb-89	/Mc=3.40	CARS	-10.53	-13.4	-18.18
			CARI	-8.79	-14.19	-12.16
			CARD	-17.23	-46.42	34.45
			CA48	-8.61	-22.01	16.27
			CA75	-14.83	-21.53	24.88
			CARC	29.19	-39.72	35.41
24	09-Mar-89	/Mb=4.50/Mc=3.70	CARS	7.66	-11.48	-9.57
			CARI	7.77	8.6	-13.54
			CARD	-12.92	-14.36	15.31
			CA48	-5.74	-9.57	8.61
			CARC	17.23	19.62	26.8
25	10-Mar-89	/Mb=5.30/Ms=4.80/Mc=5.00	CARI	-11.23	-7.2	-8.36
			CARD	-14.78	21.55	-25.55
			CA48	13.4	10.53	8.61
			CA75	13.88	-12.92	-15.79
			CARC	26.8	-24.4	28.71
26	13-Mar-89	/Mc=3.60	CARC	-5.74	6.22	-7.66
27	21-Abr-89	/Mc=4.10	CARC	4.31	5.74	-8.13
28	24-Abr-89	/Mc=4.10	CARC	4.79	-6.22	-8.61
29	25-Abr-89	/Mb=6.30/Ms=6.90/M=6.50	CARI	16.73	29.18	-27.04
			CARC	-56.94	66.51	-129.2
30	25-Abr-89	/Mb=6.30/Ms=6.90/M=6.50	CARD	-21.37	-25.88	33.16
			CA48	22.97	-24.88	28.71
			CA75	23.45	-27.28	42.11
31	25-Abr-89		CARS	19.03	23.91	22.39
32	02-May-89	/Mb=5.40/Ms=4.90/M=5.10	CARI	3.83	-5.26	-8.61
			CA48	-5.63	5.47	-7.47
			CARC	13.4	-13.88	-22.97
33	06-Jul-89	/Mb=4.80/Mc=4.90	CARC	-3.35	-4.31	11.01

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CMS/2]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
34	12-Ago-89	/Mb=5.50/Ms=4.50/Mc=4.80	CARS	5.74	-9.57	9.57
			CARI	-5.26	4.31	-5.26
			CARD	-8.13	15.79	12.44
			CA48	-5.31	-6.37	-8.92
			CA75	-7.22	11.61	-9.9
			CARC	-15.31	16.27	-17.23
35	17-Ago-89	/Mb=4.90/Mc=4.80	CARC	-7.18	8.13	-9.57
36	08-Oct-89	/Mb=5.00/Ms=4.10/Mc=5.00	CARI	-8.61	-14.36	-12.44
			CARD	14.83	-23.93	24.4
			CA75	-17.71	17.71	-13.4
			CARC	-29.67	31.1	35.41
37	09-Nov-89	/Mb=5.10/Ms=4.10/M=5.10	CARI	-2.39	-4.79	-4.31
			CARC	6.7	-9.09	-15.79
38	13-Ene-90	/Mb=5.3/Ms=5.0/Mc=5.0	CARS	5.26	-11.48	-9.09
			CARI	-3.83	4.79	6.7
			CA75	-7.18	5.74	-9.57
			CARC	14.36	-11.48	25.84
39	13-Ene-90	/Mc=4.10	CARC	-5.74	7.66	8.61
40	04-Abr-90	/Mb=4.30/Ms=4.30/Mc=5.00	CARC	5.26	-7.18	-7.18
41	11-May-90	/Mb=5.30/Ms=4.90/M=5.30	CARS	-12.92	-12.44	10.05
			CARI	-8.13	12.44	-11.01
			CARD	-7.66	-16.75	-22.01
			CA48	8.61	9.09	11.96
			CA75	-8.13	9.57	-12.44
			CARC	-20.58	22.49	-46.89
42	19-May-90	/Mb=5.00/Ms=4.30/M=5.10	CARI	2.87	-4.31	-4.79
			CA48	5.26	-5.26	-7.66
			CARC	20.1	11.01	22.97
43	31-May-90	/Mb=5.80/Ms=5.90/M=5.50	CARS	20.1	36.37	-17.23
			CARI	-21.05	37.8	22.01
			CARD	30.63	40.2	46.42
			CA48	30.15	-23.45	-22.97
			CA75	33.5	36.37	38.28
			CARC	-62.69	-52.64	86.61
44	31-May-90		CARC	5.74	-4.79	10.53
45	10-Jul-90	/Mb=4.50/Mc=4.80	CARC	-6.22	5.74	-11.48
46	24-Nov-90	/Mb=4.00/Mc=4.60	CARS	4.31	-14.36	-5.74
			CARD	9.57	21.05	-12.44
			CA75	-5.74	7.18	9.09
			CARC	-8.61	15.79	-15.79
47	29-Dic-90	/Mb=4.40/Mc=4.70	CARC	-2.87	-3.83	-7.18
48	25-Mar-91		CARI	-4.31	4.31	-4.79
			CARC	-7.24	-10.17	-16.89
49	01-Abr-91	/Mb=5.50/Ms=5.4/M=5.3	CARC	3.35	4.31	6.7
50	15-Abr-91	/Mb=3.0/Mc=4.2	CARD	5.74	9.57	-12.92
			CARC	-8.61	10.53	12.44
51	27-Abr-91	/Mb=4.60/Ms=4.10/Mc=4.90	CARI	-4.31	4.79	-5.26
			CARC	8.13	-13.4	15.31
52	21-May-91		CARC	-5.26	-7.66	-9.09
53	28-May-91	/Mb=4.60/Ms=3.60/Mc=4.90	CARI	4.79	5.26	9.09
			CARD	-7.18	10.05	7.66
			CA48	-5.26	4.31	4.79
			CARC	-12.92	-12.92	18.66
54	19-Ago-91	/Mb=4.30/Mc=4.60	CARC	-6.22	-5.74	-7.66
55	09-Ene-92	/Mb=4.70/Mc=4.30	CARI	-3.35	4.31	-5.74
			CARD	5.26	-8.13	-10.05
			CARC	-9.57	-11.48	11.96
56	12-Feb-92	/Mb=5.10/Ms=4.60/Mc=4.40	CARC	-4.79	-5.26	7.66
57	31-Mar-92	/Mb=4.70/Mc=4.30	CARD	3.35	-6.7	-5.26

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CMS ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
58	31-Mar-92	/Mb=5.20/Ms=5.10/Mc=4.70	CARS	-4.79	-6.22	-4.79
			CARI	3.83	-5.74	-5.26
			CARD	5.26	-11.01	6.7
			CA48	3.83	5.74	-4.79
			CA75	5.26	-7.66	7.66
			CARC	6.22	7.66	8.61
59	01-Abr-92	/Mb=4.90/Mc=4.50	CARS	-4.31	-6.7	-4.79
			CARI	3.83	-6.22	5.26
			CARD	5.26	-11.48	9.57
			CA48	6.22	-6.7	-6.7
			CA75	5.74	-6.22	-7.66
			CARC	-10.05	13.4	20.58
60	02-Ago-92	/Mb=4.30/Mc=4.30	CARS	-5.74	-7.66	-9.09
			CARI	-4.79	-6.7	-5.26
			CARD	7.66	-8.13	10.53
			CA48	4.79	-6.22	5.26
			CA75	-6.7	7.66	-5.74
			CARC	18.18	12.92	20.58
61	19-Sep-92	/Mc=4.10	CARS	26.32	46.42	-32.54
			CARI	16.27	22.97	19.62
			CARD	-30.15	54.55	-47.85
			CA48	-11.96	-24.88	-22.97
			CA75	18.18	-25.36	-22.97
			CARC	-39.24	46.89	-50.24
62	30-Oct-92	/Mb=4.70/Mc=4.40	CARI	2.87	5.26	-2.87
			CARD	-4.31	-11.01	-8.13
			CA48	2.87	4.31	-4.31
			CA75	4.31	5.26	-5.26
			CARC	8.13	10.05	-9.09
63	10-Nov-92	/Mb=4.60/Ms=4.20/Mc=4.30	CARS	3.83	-5.74	6.7
			CARI	-5.26	-7.18	-4.31
			CARD	5.26	-11.48	-11.96
			CA48	4.31	-7.18	-3.83
			CA75	5.74	-9.09	-6.7
			CARC	-10.05	-9.57	13.4
64	17-Nov-92	/Mb=4.40/Mc=4.20	CARC	-4.79	7.18	-8.61
65	11-Ene-93	/Mc=4.00	CARS	-5.74	-7.66	7.18
			CARI	-6.7	-9.09	-7.18
			CARD	-6.22	11.96	-19.62
			CA48	6.22	6.7	8.61
			CA75	10.05	7.66	8.13
			CARC	13.88	9.57	-16.75
66	01-Mar-93	/Mc=4.30	CARD	-3.35	8.13	6.22
67	18-Mar-93	/Mb=4.70/Mc=4.70	CA75	-3.83	-2.87	-4.79
			CARC	4.31	8.13	-11.48
68	31-Mar-93	/Mb=5.30/Ms=5.00/Mc=5.30	CARI	-5.26	-5.26	4.31
			CARD	6.22	12.44	-8.13
			CA48	4.79	5.74	-4.31
			CA75	-5.74	-5.74	5.26
			CARC	10.53	-13.88	-16.27
69	30-Abr-93	/Mc=4.70	CARD	3.83	-5.26	6.22
			CARC	-5.26	5.26	9.57
70	15-May-93	/Mb=5.80/Ms=5.80/Mc=5.80	CARI	-2.87	3.83	4.79
			CARD	-3.83	-4.31	5.74
			CA48	-3.83	4.31	-5.26
			CA75	-4.31	-4.31	-9.09
			CARC	8.13	9.09	27.28
71	15-May-93	/Mb=5.90/Ms=5.90/Mc=6.00	CARI	-3.83	-3.83	4.31
			CARD	4.31	-7.66	7.18
			CA48	-4.79	-4.79	-8.13
			CA75	-5.74	-5.74	-12.44
			CARC	11.01	-11.48	39.72

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
72	19-Jul-93	/Mc=4.80	CARS	4.79	4.79	-6.22
			CARI	4.79	4.79	6.22
			CARD	9.09	-20.1	24.88
			CA48	4.79	8.61	-8.61
			CA75	-9.09	11.96	9.57
			CARC	12.44	14.83	-22.49
73	29-Jul-93	/Mb=5.00/Ms=4.20/Mc=5.00	CARS	4.79	7.66	7.66
			CARI	4.79	4.79	-4.79
			CARD	7.66	-13.4	-13.4
			CA48	4.31	-6.7	-6.22
			CA75	6.22	7.18	-7.18
			CARC	-10.53	14.36	-20.1
74	05-Ago-93	/Mb=4.90/Mc=5.10	CARC	4.79	9.57	7.18
75	29-Ago-93	/Mb=4.70/Mc=4.80	CARD	3.35	6.7	4.31
76	10-Sep-93	/Mb=4.80/Mc=4.80	CARC	-3.83	3.83	6.22
77	24-Oct-93	/Mb=6.20/Ms=6.60/Mc=6.50	CARS	-5.74	7.18	6.7
			CARI	5.74	7.66	-8.61
			CARD	-7.18	-11.48	9.09
			CA48	7.18	-9.09	10.05
			CA75	-9.09	-8.61	-11.96
			CARC	15.31	18.66	-25.84
78	27-Dic-93		CARD	3.35	-17.71	-12.44
			CA48	-2.39	6.22	-5.74
			CA75	-4.79	4.79	-6.7
			CARC	7.66	8.13	11.01
79	23-Feb-94	/Mb=5.40/Mc=5.00	CARS	3.83	5.74	5.26
			CARI	-3.35	3.35	3.83
			CARD	5.26	7.18	-7.66
			CA48	2.87	-5.74	4.31
			CA75	-5.26	5.74	5.26
			CARC	-9.57	-11.01	-20.1
80	22-Abr-94	/Mb=4.10/Mc=4.20	CARD	3.35	-9.09	7.66
			CA48	1.44	3.83	-2.87
			CARC	7.66	-7.66	9.09
81	23-May-94	/M=5.60	CARI	-47.85	-65.56	52.16
			CARD	95.22	214.38	175.62
			CA48	47.85	-53.59	-66.04
			CA75	58.38	-69.86	-78.48
			CARC	162.7	-132	-225.3
82	23-May-94		CARD	3.35	-7.66	7.66
83	12-Jul-94	/Mb=3.70/Mc=4.50	CARI	2.87	6.22	4.31
			CARD	-9.15	22.07	-22.44
			CA48	-3.58	8.26	7.22
			CARC	12.92	22.49	-19.14
84	29-Oct-94	/M=5.10	CARS	13.88	18.66	-14.83
			CARI	-17.23	-21.05	11.96
			CA48	-16.27	-14.36	-12.92
			CA75	-20.58	22.01	-22.49
			CARC	-28.71	35.41	-35.89
85	10-Dic-94	/Mc=6.30	CARS	12.44	22.97	15.79
			CARI	10.05	12.44	-13.88
			CARD	15.79	-31.1	30.63
			CA48	-12.37	19.45	15.22
			CA75	-19.62	-20.58	-17.23
			CARC	31.58	29.67	54.07
86	26-Abr-95	/Mc= 4.3	CARS	13.33	-7.18	7.01
			CARI	-10.53	-2.87	-4.31
			CARD	20.1	-7.66	7.66
			CA48	7.18	3.83	-4.31
			CA75	-15.31	-5.74	-6.22
			CARC	16.27	-8.61	22.01

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
87	27-Abr-95	/Mc= 4.9	CARD	-2.87	-9.09	-5.74
			CA48	1.91	4.31	-3.83
			CA75	-3.35	-4.79	-3.83
			CARC	-7.18	-6.22	8.13
88	14-Sep-95	/Mw=7.3/Ms=7.5	CARS	-8.61	13.4	9.57
			CARI	-7.66	-10.05	9.57
			CARD	8.13	11.48	10.53
			CA48	9.09	-12.92	13.88
			CA75	11.96	-14.83	-16.27
			CARC	-22.01	-28.23	-44.5
89	09-Oct-95	/Mw=7.9/ME=7.5/Ms=7.6	CARC	-4.31	-5.26	8.61
90	03-Dic-95	/Mc= 4.5	CARD	3.35	-7.66	-5.26
			CARC	-4.31	-5.26	7.66
91	20-Dic-95		CARD	3.35	8.61	7.18
			CA48	3.35	-3.35	-2.87
			CA75	-3.35	3.35	-6.22
92	23-Dic-95		CARC	-3.35	2.39	4.79
93	05-Mar-96	/Mc= 3.8	CARD	-9.57	7.66	6.7
94	31-Mar-96	/Mc= 4.4	CARC	5.26	-4.31	5.74
95	01-Abr-96	/Mc= 4.1	CARS	-2.39	-4.79	3.35
			CARD	-3.83	6.7	-4.31
			CARC	4.69	8.19	-8.83
96	18-Abr-96	/Mc= 4.9	CARC	3.83	3.35	8.13
97	21-Jun-96	/Mc= 4.7	CARD	-6.7	11.01	-8.61
			CA48	2.39	3.35	4.31
			CARC	-6.22	-8.13	-11.48
98	15-Jul-96	/Mc= 6.0	CARS	14.83	-18.66	-14.83
			CARI	-17.23	16.27	18.18
			CARD	16.27	31.1	-28.71
			CA48	-18.66	22.97	-22.49
			CARC	38.28	45.46	-75.13
99	16-Jul-96	/Mc= 4.7	CA48	-2.87	2.87	-4.31
			CARC	-8.61	-6.7	12.92
100	18-Jul-96	/Mc= 5.1	CARS	-5.74	-7.18	3.83
			CARI	5.96	-6.77	-4.69
			CARD	4.79	-8.61	6.7
			CA48	-3.83	7.18	6.7
			CARC	-13.88	9.57	-17.71
101	19-Jul-96	/Mc= 4.8	CARS	-7.18	-12.44	10.05
			CARI	7.66	-11.48	-9.57
			CARD	12.44	-20.1	25.84
			CA48	-6.7	12.92	7.18
			CARC	22.01	-16.75	31.1
102	09-Oct-96	/Mc= 4.1	CARD	-6.22	12.44	8.61
			CA48	11.96	12.92	13.4
103	01-Nov-96	/Mc= 4.1	CARC	-0.3	-0.35	0.73
104	14-Nov-96	/Mc= 3.8	CARC	0.8	1.21	1.47
105	16-Nov-96		CARD	-0.68	-1.16	1.06
			CARC	-1.69	1	1.69
106	17-Nov-96	/Mc=4.7	CARD	-1.18	-2.04	1.79
107	19-Nov-96	/Mc= 3.9	CARC	0.76	0.76	0.93
108	20-Nov-96	/Mc= 4.1	CARD	-1.11	-1.58	-1.63
			CARC	1.67	-2.44	-3.49
110	12-Dic-96	/Mc= 4.1	CARD	-5.43	-8.05	7.83
			CARC	-5.36	-5.83	7.72
111	14-Dic-96		CARC	-0.66	0.82	1.08
112	17-Dic-96	/Mc= 4.5	CARD	0.93	1.85	-1.74
			CARC	-2.04	1.86	2.63
113	18-Dic-96	/Mc= 4.1	CARD	1.43	3.27	2.88
			CARC	-1.88	2.26	4.17
114	23-Dic-96	/Mc= 3.8	CARD	-1.32	-1.81	1.77
			CARC	-1.97	-1.96	-3.93

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
115	28-Dic-96	/Mc= 4.4	CARD	0.58	-1.01	1.42
			CARC	-1.19	-1.21	1.43
116	28-Dic-96	/Mc= 4.4	CARD	0.86	-0.96	-1.24
			CARC	2.02	1.95	2.26
117	01-Ene-97		CARD	0.73	1.25	1.14
			CARC	-0.88	-1.3	1.99
118	07-Ene-97	/Mc=4.7	CARC	0.26	-0.29	-0.58
119	11-Ene-97	/Mb= 6.5	CARS	-8.68	-16.54	-10.39
			CARI	-7.53	-8.91	-10.29
			CARD	-10.96	28.43	21.44
			CA48	9.89	13.08	12.27
			CA75	12.76	-14.27	-15.49
			CARC	22.13	23.85	-49.42
120	12-Ene-97	/Mc=4.6	CARC	-0.41	0.47	-0.85
121	12-Ene-97	/Mc= 4.6	CARC	0.43	-0.43	-0.95
122	13-Ene-97	/Mc=3.3	CARC	0.59	0.78	-1.68
123	15-Ene-97	/Mc=3.6	CARC	0.38	-0.64	1.01
124	16-Ene-97	/Mc= 5.1	CARD	0.54	1.58	0.92
			CARC	-1.4	1.16	-1.8
125	20-Ene-97		CARC	-0.49	-1.42	1.67
126	21-Ene-97	/Mb= 5.1	CARD	1.42	-2.35	1.95
			CARC	-3.19	4.26	11.47
127	16-Feb-97	/Mc= 3.9	CARD	1.08	-1.48	1.84
128	05-Mar-97	/Mc= 4.1	CARD	-2	3.19	3.33
129	06-Mar-97	/Mc= 3.9	CARD	1.23	-1.5	-2.01
130	16-Mar-97	/Mc= 4.2	CARD	-3.07	-3.63	3.56
131	22-Mar-97	/Mc= 4.6	CARD	6.05	6.23	-9.96
132	23-Mar-97	/Mc= 4.7	CARD	6.59	8.96	11.49
			CA75	4.89	-5.24	-6.47
133	24-Mar-97	/Mc= 4.3	CARD	-0.77	-1.32	-1.09
134	03-Abr-97		CARD	1.57	-3.55	2.76
135	19-Abr-97	/Mc= 3.8	CARD	2.43	-2.04	3.19
136	20-Abr-97	/Mc= 3.8	CARD	-0.82	0.99	-1.46
137	22-Abr-97	/Mc= 3.8	CARD	1.83	-2.02	-2.68
138	28-Abr-97		CARC	-4.31	5.5	10.67
139	01-May-97	/Mc= 4.0	CARD	2.36	-3.31	4.3
140	05-May-97	/Mc= 4.4	CARD	-0.71	-1.68	1.5
141	08-May-97	/Mc= 4.8	CARS	18.23	19.65	-18.16
			CARI	-20.09	-22.04	16.85
			CARD	-27.06	46.62	62.6
			CA48	-17.36	-18.04	29.49
			CA75	18.67	-25.2	-33.26
142	09-May-97	/Mc= 4.4	CARD	-3.78	8.9	-7.33
143	09-May-97	/Mc= 3.7	CARD	-1.76	0.99	-0.88
144	14-May-97	/Mc= 4.1	CARD	-3.64	4.33	7.08
145	19-May-97	/Mc= 4.2	CARS	-6.66	-5.03	-4.58
			CARD	6.42	8.95	-8.76
			CA48	2.55	-4.66	4.11
			CA75	-3.97	-3.79	6.2
146	19-May-97		CARD	2.58	3.82	-3.91
147	22-May-97	/Mb= 5.9	CARS	-5.61	9.04	-6.66
			CARI	5.53	6.67	-6.92
			CARD	-8.27	-23.08	16.74
			CA48	-5.09	-8.94	-7.83
			CA75	-6.82	7.21	10.54
148	26-May-97	/Mc= 3.7	CARD	1.15	2	2.29
149	01-Jun-97		CARD	-0.79	-0.91	1.24
150	15-Jun-97	/Mc=4.0	CARD	-3.59	4.58	-4.36
151	17-Jun-97	/Mc=4.40	CARD	0.44	-0.77	-1.02
152	25-Jun-97	/Mc=3.20	CARD	0.74	1.26	-1.23
153	28-Jun-97	/Mc=3.90	CARD	-1.25	-2.06	-2.65
154	01-Jul-97	/Mc=3.60	CARD	-0.89	-0.86	-1.28

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
155	19-Jul-97	/Mc=4.90	CARS	-11.36	12.36	9.19
			CARI	-8.49	7.76	-12.45
			CARD	9.1	-11.05	-16.34
			CA48	-7	-8.9	-9.11
			CA75	-8.44	7	-11.18
156	19-Jul-97	/Mc=4.10	CARD	-2.83	-4.16	-3.98
157	21-Jul-97	/Mc=4.10	CARD	3.94	-6.53	5.86
			CA48	-2.74	-3.65	3.81
158	24-Jul-97	/Mc= 4.0	CARD	1.19	1.8	1.93
159	28-Jul-97		CARD	-2.2	-1.29	1.58
160	29-Jul-97	/Mc=4.40	CARD	-1.78	-3.43	3.94
161	03-Ago-97		CARD	0.75	-1.73	1.42
162	10-Ago-97	/Mc=3.80	CARD	-1.82	2	2.8
163	28-Jul-97	/Mc= 4.6	CARS	3.43	4.68	3.16
			CARD	-3.65	-7.86	-6.37
			CA48	2.41	-3.29	3.91
			CA75	-3.19	4.07	-4.82
			CARC	7.32	-10.74	-11.23
164	29-Ago-97		CARD	1.13	-1.78	2.66
165	13-Sep-97	/Mc= 3.8	CARD	-2.51	-4.79	4.8
166	11-Dic-97	/Mc= 4.3	CARD	-0.84	1.93	-1.52
			CKRC	-1.13	-1.49	-1.05
167	16-Dic-97		CKRC	1.29	0.73	2.05
168	16-Dic-97		CKRC	2.41	-2.69	-5.3
169	22-Dic-97	/Mc= 4.6	CARD	-7.59	-14.64	9.56
170	26-Dic-97	/Mc= 3.7	CARD	-0.84	1.87	-1.56
			CKRC	-1.43	-1.82	-2.77
171	23-Ene-98		CKRC	-0.64	-1.15	0.8
172	31-Ene-98		CKRC	0.6	-1.1	-0.67
173	05-Feb-98	/Mc=3.9	CARD	-2.22	3.5	-2.57
			CKRC	1.82	3.16	-2.66
174	22-Feb-98	/Mc=4.4	CARD	-1.34	-2.74	-1.99
175	25-Feb-98	/Mc=4.8	CARD	-1.68	-3.61	-2.42
			CARC	-2.8	2.45	-7.03
176	11-Mar-98	/Mc=4.2	CARD	3.13	4.39	-3.51
177	20-Abr-98	/Mc=5.0	CARS	5.69	14.78	7.58
			CARI	-2.95	-3.05	-3.03
			CARD	12.05	21.08	19.05
			CA48	-6.04	9.31	9.3
			CA75	-7.78	-11.63	11.66
			CARC	16.27	15.7	-29.17
			CKRC	16.1	-30.1	16.85
178	01-May-98	/Mc=3.9	CARD	-1.97	-4.4	-2.47
179	09-May-98	/Mc=4.8	CARS	-2.38	-4.52	2.55
			CARD	3.27	5.93	-6.14
			CA75	-2.92	4.17	6.31
			CARC	5.59	7.64	-11.29
			CKRC	5.64	-11.7	8.37
180	11-May-98	/Mc=4.0	CARD	-0.95	2.36	2.26
181	15-May-98	/Mc=4.2	CARD	1.28	2.12	1.52
182	16-May-98	/Mc=5.1	CARS	3.51	4.38	-3.97
			CARD	3.62	-9.18	-7.5
			CA48	4.39	3.42	4.88
			CA75	-4.05	-4.57	-5.37
			CARC	-13.89	7.1	17.71
			CKRC	-13.76	-13.76	17.25
183	17-May-98	/Mc=4.5	CKRC	-2.14	3.89	1.62
184	01-Jun-98	/Mc=4.8	CARD	-1.89	-2.77	-4.5
			CARC	-3.17	-4.16	4.88
185	27-Jun-98	/Mc=4.0	CARD	-0.96	-1.57	-1.68
186	28-Jun-98		CARD	-2.94	2.23	3.98

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
187	05-Jul-98	/Mc=4.9	CARD	-3.48	6.49	7.62
			CA75	-4.3	4.99	6.28
			CARC	7.35	8.17	-10.37
			CKRC	7.22	8.51	-10.25
188	11-Jul-98	/Mc=4.9	CARD	3.48	-8.59	-5.65
			CA75	-4.47	4.43	5.67
			CARC	6.7	-8.56	13.49
189	12-Jul-98	/Mc=4.8	CARD	1.68	-3.25	-3.95
			CARC	4.88	-4.6	6.93
			CKRC	4.76	-4.67	6.89
190	16-Jul-98	/Mc=4.1	CKRC	-1.5	-1.62	-3.74
191	17-Jul-98	/Mc=4.6	CARS	-11	-12.93	10.56
			CARI	11.79	-12.32	-14.68
			CARD	12.37	17.24	-21.78
			CA75	11.25	-17.05	-16.27
			CARC	-35.44	27.38	44.01
			CKRC	-34.34	27.6	44.12
192	04-Ago-98	/Mc=3.7	CARD	-1.58	2.15	2.31
193	05-Ago-98	/Mc=4.4	CARI	9.83	11.58	-13.03
			CARD	18.3	38.17	33.01
			CA48	0.2	-0.31	0.27
			CA75	-8.48	19.17	12.2
			CARC	-22.03	-22.51	28.71
			CKRC	-27.04	-27.72	29.4
194	09-Ago-98	/Mc=4.5	CKRC	-4.23	4.4	-4.99
195	24-Ago-98	/Mc=4.4	CKRC	-5.37	4.16	4.8
196	25-Oct-98	/Mc=4.3	CKRC	2.41	-2.76	-3.34
197	01-Nov-98	/Mc=4.1	CKRC	-3.39	4.58	-7.81
198	27-Nov-98	/Mc=4.4	CKRC	-2.96	3.15	4.1
199	27-Dic-98	/Mc=4.5	CKRC	-1.48	-1.71	-2.62
200	15-Feb-99		CKRC	-2.35	-3.2	4.95
201	15-Feb-99	/Mc= 4.3	CARD	-2.092	-6.589	3.51
202	19-Feb-99	/Mc= 4.2	CKRC	2.71	3.43	-4.1
203	02-Mar-99	/Mc= 4.2	CARD	-2.729	-5.6	-5.309
			CA48	-1.835	-2.4	-3.546
			CA75	2.93	4.88	3.42
			CKRC	6.04	5.79	11.31
204	03-Mar-99	/Mc= 4.3	CARS	5.37	6.29	-4.83
			CARD	-4.173	12.584	-9.563
			CA48	1.916	4.187	3.594
			CKRC	6.69	12.42	-10.45
205	03-Abr-99		CKRC	2.59	-2.88	-4.37
206	24-Abr-99		CA75	5.86	6.84	5.37
207	25-Abr-99	/Mc= 4.6	CARS	-3.88	-5.84	-5.02
			CARI	-2.4	-2.76	-1.96
			CARD	4.661	13	-12.58
			CA48	4.945	5.024	4.032
			CKRC	-8.99	18.94	-13.56
			CKRC	1.4	2.84	-2.76
208	11-May-99		CKRC	1.4	2.84	-2.76
209	30-May-99	/Mc= 4.6	CARD	6.32	7.678	-10.13
			CKRC	-6.46	8.33	-10.3
210	15-Jun-99	/Mb= 6.4	CARS	16.78	28.261	18.595
			CARI	-14.19	-16.76	-16.76
			CARD	28.264	59.025	40.161
			CA48	11.711	-20.59	-19.05
			CKRC	-37.84	-52.01	-71.84
211	21-Jun-99	/Mb= 6.0	CARS	-7.128	-12.91	-8.496
			CARI	-6.363	6.184	-9.144
			CARD	9.637	-17.86	24.792
			CA48	7.214	-11.32	-10.06
			CA75	-9.76	-10.74	14.16
			CKRC	17.28	-20.84	-30.9
212	22-Jun-99	/Mc= 4.4	CKRC	-1.53	1.66	-2.78

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S2]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
213	05-Jul-99	/Mb= 4.8	CKRC	4.49	4.11	5.69
214	16-Ago-99	/Mc= 4.3	CKRC	-6.15	-3.73	5.52
215	26-Ago-99	/Mc= 4.2	CARD	1.721	-5.302	-4.43
216	30-Sep-99	/Ma= 7.6	CARI	7.995	-9.618	-9.425
			CARD	-8.629	15.433	14.227
			CA48	-8.307	-9.985	8.174
			CA75	9.28	10.25	13.18
217	08-Nov-99	/Mc= 4.6	CARS	-4.091	6.2202	4.3374
			CARD	-5.897	9.766	-11.77
			CA48	3.4077	-3.934	-4.48
218	29-Dic-99	/Me=5.9	CARS	3.7746	-5.764	-5.009
			CARI	-3.648	4.3282	-3.565
			CARD	5.3047	-10.45	9.3993
			CA48	-2.647	-5.099	4.759
			CA75	-4.39	5.85	-6.34
			CKRC	9.21	8.21	-12.09
219	08-Mar-00	/Mc= 4.2	CKRC	-1.62	-1.64	-2.17
220	18-Mar-00	/Mc= 4.7 Mb= 4.8	CARS	-2.675	3.4149	-3.436
			CARD	4.1706	-7.211	-5.197
			CA48	-2.478	3.353	-4.1
			CKRC	5.52	-6.93	-16.17
221	21-Mar-00	/Mc= 4.8 Mb= 4.8	CKRC	2.35	2.72	-2.87
222	30-Mar-00	/Mc= 3.8	CKRC	1.02	1.63	1.91
223	11-Abr-00	/Mc= 5.1 Mb= 5.0	CKRC	1.17	1.42	-1.86
224	15-Abr-00	/Mc= 4.4 Mb= 4.0	CARS	-2.508	4.04	2.8981
			CARD	-4.452	-7.735	-4.745
			CKRC	9.36	-6.32	9.77
225	15-May-00	/Mc= 4.6 Mb= 4.2	CKRC	-2.85	3.56	-4.26
226	05-Jul-00	/Mc= 4.2	CKRC	-2.65	-3.88	5.47
227	21-Jul-00	/Mc= 5.4 Mb= 5.4	CARS	-20.11	28.74	-25.34
			CARI	-15.32	17.742	14.882
			CARD	-27.95	75.558	-51.63
			CA48	-14.26	-19.74	-17.25
			CA75	30.27	-31.73	26.85
			CKRC	50.94	63.54	57.96
228	09-Ago-00	/Mb= 6.1	CKRC	-9.46	10.48	22.46
229	08-Sep-00		CARD	-6.201	9.7542	6.4868
230	28-Sep-00	/Mc= 4.2	CKRC	1.43	1.87	-2.03
231	30-Nov-00	/Mc= 4.4 Mb= 4.2	CKRC	-1.22	-1.36	-1.96
232	01-Dic-00	/Mc= 5.3 Mb= 5.3	CKRC	2.71	3.27	6.66
233	10-Ene-01	Mc= 4.2	CKRC	-3.98	-6.45	-4.99
234	26-Ene-01	Mc= 9.8 Mb=5.0	CKRC	-1.55	-1.86	-3.07
235	04-Feb-01	Mc=4.0	CKRC	2.36	-3	-3.81
236	06-Feb-01	Mc=4.1	CARS	-3.684	4.3115	-4.437
			CARI	2.4765	2.2446	2.8219
			CARD	4.8164	12.89	10.573
			CA48	2.7838	3.8328	-4.706
			CA75	-4.39	-6.84	7.81
			CKRC	-7.02	5.82	9.83
237	11-Feb-01	Mc= 4.5 Mb= 4.6	CKRC	-2.22	2.43	-2.98
238	23-Feb-01	Mc= 4.1	CARS	-3.236	-3.319	2.8958
			CKRC	-3.03	4.38	-6.96
239	05-Mar-01	Mc= 4.9	CARS	-8.622	-15.8	-10.54
			CARI	-10.09	-11.01	14.847
			CARD	-14.18	-22.05	-28.49
			CA48	-9.513	10.468	8.0619
			CKRC	26.46	24.8	39.05
240	05-Mar-01	Mc= 4.5 Mb= 4.1	CARS	1.6587	2.9958	-1.939
			CARI	-1.542	-2.487	2.2547
			CKRC	3.96	6.18	-6.59
241	05-Mar-01		CA75	-11.72	-16.6	15.13
242	06-Mar-01		CKRC	1.26	-1.8	2.68

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
243	06-Mar-01	Mc= 5.1	CARS	7.6932	12.933	11.605
			CARI	12.819	-10.98	-11.49
			CARD	11.124	-19.63	15.807
			CA48	-9.58	11.241	10.826
			CKRC	12.88	20.92	-31.75
244	06-Mar-01		CKRC	1.01	1.8	1.73
245	07-Mar-01	Mc= 4.0	CKRC	1.05	-1.48	1.38
246	29-Abr-01		CKRC	0.87	1.51	-1.68
247	23-May-01	Mc= 4.5 Mb=3.9	CKRC	-1.4	-1.42	-2.49
248	26-May-01	Mc=4.4	CKRC	-1.87	-2.18	-2.31
249	16-Jun-01	Mc= 4.9	CKRC	2.02	1.74	-4.39
250	27-Jun-01	Mc= 4.4	CKRC	-1.88	2.48	1.93
251	02-Jul-01		CARS	-4.304	5.2976	-5.812
			CARI	2.8743	-3.293	-2.873
			CARD	-6.232	-19.74	-10.97
			CA48	-2.394	-6.226	-4.797
			CKRC	10.37	-11.54	-12.73
252	09-Jul-01	Mc= 4.4 Mb=4.2	CKRC	-1.66	-1.62	-2.21
253	16-Jul-01	Mc= 4.0	CKRC	-1.99	-3.07	2.91
254	20-Jul-01	Mc= 4.5 Mb= 4.1	CKRC	1.71	2.2	1.88
255	22-Jul-01	Mc= 4.4	CARS	-3.667	-4.29	-5.947
			CARI	5.1807	4.988	-4.223
			CARD	4.4019	-8.056	6.1059
			CA48	-3.052	-5.109	3.4698
			CKRC	-9.78	8.23	-9.85
256	11-Ago-01	Mc= 4.0	CKRC	1.39	-2.11	-2.47
257	07-Sep-01	Mc= 4.4 Mb= 4.5	CKRC	1.47	2.69	2.74
258	06-Oct-01	Mc=4.5 Mb0 3.9	CKRC	-0.96	2.04	-2.03
259	08-Oct-01	Mc= 5.5	CARI	20.625	-26.24	40.705
			CARD	-41.19	37.853	61.205
			CA48	-18.67	23.471	20.027
			CKRC	41.36	45.84	71.27
260	08-Oct-01	Mc= 3.8	CKRC	2.95	3.16	3.3
261	08-Oct-01	Mc= 3.6	CKRC	2.18	2.51	2.9
262	08-Oct-01	Mc= 3.5	CKRC	-1.95	-2.38	3.09
263	08-Oct-01	Mc= 3.8	CKRC	2.68	-4.12	5.68
264	08-Oct-01	Mc=4.4 Mb= 4.6	CARI	3.0244	4.521	-2.556
			CARD	-3.31	7.2228	-6.87
			CA48	-2.809	3.3028	3.6627
			CKRC	6.36	6.87	-10.36
265	08-Oct-01	Mc= 3.9	CKRC	1.13	1.31	1.69
266	08-Oct-01	Mc= 4.5	CARI	-2.266	-2.742	2.1731
			CKRC	4.32	-4.76	-6.43
267	08-Oct-01	Mc= 3.8	CKRC	-1.29	-1.41	1.73
268	09-Oct-01	Mc= 4.5	CARI	4.0876	4.5758	4.2472
			CARD	6.2724	9.5802	8.4147
			CA48	-4.224	4.8831	5.1233
			CKRC	8.91	-8.57	8.47
269	09-Oct-01	Mc= 4.4 Mb= 3.9	CKRC	1.86	2.35	-3.08
270	09-Oct-01	Mc= 4.4 Mb= 3.8	CARI	-2.156	1.9277	2.0016
			CKRC	-4.36	-3.82	-5.44
271	11-Oct-01	Mc= 4.1	CKRC	-2.72	2.94	3.13
272	11-Oct-01	Mc= 4.4	CARI	1.4991	-1.875	3.1006
			CKRC	-4.86	-3.37	-5.91
273	11-Oct-01	Mc= 4.2	CKRC	1.66	-1.76	-2.09
274	12-Oct-01	Mc= 4.3	CKRC	3.35	3.27	-5.28
275	12-Oct-01	Mc= 4.5 Mb= 4.2	CKRC	-6.22	4.42	4.97
276	22-Oct-01	Mc= 4.2	CKRC	4.89	3.51	6.14
277	24-Oct-01	Mc= 3.7	CARS	-4.761	-5.781	5.1469
			CARD	-3.858	-3.334	-5.747
			CKRC	2.48	5.43	4.84

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S2]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
278	29-Oct-01	Mc= 5.1 Mb= 5.1 Me= 5.4	CARS	-11.12	-18.75	-12.51
			CARI	-4.628	5.9009	7.4634
			CARD	-9.597	11.574	13.326
			CA48	-5.181	-6.329	-5.805
			CKRC	13.52	-13.39	-21.06
279	29-Oct-01	Mc= 4.4 Mb= 4.2	CKRC	-1.44	-1.81	3.17
280	07-Nov-01	Mc= 4.4	CKRC	-1.3	1.69	-2.31
281	10-Nov-01	Mc= 5.1 Mb= 5.2 Ms= 5.1	CKRC	3.82	2.68	5.63
282	19-Nov-01	Mc= 4.8	CKRC	3.13	3.1	-3.42
283	19-Nov-01	Mc= 4.4	CARS	2.4022	4.5136	-3.761
			CKRC	2.39	-4.86	4.48
284	19-Nov-01	Mc= 4.3	CKRC	1.49	-1.27	-2.03
285	23-Nov-01	Mc= 4.9 Mb= 4.8	CARS	14.312	18.33	-14.56
			CARI	-5.735	7.5683	7.6636
			CARD	-9.157	11.591	14.77
			CA48	5.9319	-7.256	-7.244
			CKRC	10.82	12.8	18.48
286	24-Nov-01	Mc= 4.2	CKRC	-1.35	-1.67	2.62
287	30-Nov-01	Mc= 4.2	CKRC	-1.77	-2.28	2.8
288	09-Dic-01	Mc= 4.2	CKRC	1	-1.59	-1.52
289	19-Dic-01	Mc= 4.1	CKRC	2.59	-5.08	-4.25
290	26-Dic-01	Mc= 4.1	CKRC	-1.51	-2.56	2.32
291	02-Ene-02	Mc= 4.6 Mb= 4.7	CKRC	1.44	-1.49	-1.95
292	03-Ene-02	Mc= 4.2	CKRC	1.42	-1.93	2.19
293	06-Ene-02	Mc= 4.0	CARS	8.2361	-12.28	9.4898
			CARI	2.4765	2.2446	2.8219
			CARD	6.8775	12.926	-9.136
			CA75	-2.92	-5.37	-3.41
			CKRC	8.65	-8.63	14.34
294	16-Ene-02	Mc= 4.0	CARS	-3.432	-4.956	-4.041
			CKRC	4.05	-3.89	6.92
295	20-Ene-02	Mc= 4.9 Mb=4.5	CARS	4.3992	-5.662	-5.109
			CARI	2.0183	2.424	-2.261
			CKRC	-5.25	-6.12	5.89
296	23-Ene-02	Mc= 4.6 Mb= 4.0	CARS	-7.054	9.6368	7.2964
			CARI	3.4459	4.9045	2.679
			CARD	-6.606	6.1821	-6.775
			CA75	-4.39	-5.37	-3.41
			CKRC	7.01	10.39	10.26
297	23-Ene-02	Mc= 4.4	CKRC	3.42	-3.97	-6.06
298	30-Ene-02	Mc= 5.5 Mb=5.2	CARS	-2.435	4.3467	3.7937
			CKRC	5.09	5.03	-7.49
299	31-Ene-02	Mc= 3.9	CKRC	-1.06	-1.56	1.85
300	10-Feb-02	Mc= 4.2	CKRC	1.4	1.35	2
301	12-Feb-02	Mc= 4.0	CKRC	-1.38	-1.54	3.63
302	14-Feb-02	Mc= 4.6 Mb= 4.1	CARS	-5.362	-5.424	-6.286
			CARI	2.0016	1.9159	-1.915
			CKRC	3.18	-5.17	-8.46
303	14-Feb-02	Mc= 4.7 Mb= 4.5	CARS	4.528	-7.911	7.6828
			CARI	-2.874	-2.759	3.2745
			CARD	4.3258	5.7677	-6.62
			CKRC	6	-7.57	11.62
304	15-Feb-02	Mc= 4.3	CKRC	-1.78	-2.01	-3.16
305	16-Feb-02	Mc= 4.3 Mb= 3.7	CKRC	0.98	-1.86	-1.63
306	17-Feb-02	Mc= 4.7 Mb= 4.4	CARS	-13.7	19.951	9.9038
			CARI	-6.226	-7.789	-11.01
			CARD	8.9245	10.059	11.486
			CA48	4.4447	5.9368	-6.491
			CKRC	13.86	15.97	19.42

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S2]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
307	19-Feb-02	Mc= 4.7 Mb= 4.1	CKRC	1.99	-3.71	4.31
308	21-Feb-02	Mc= 4.5	CKRC	2.28	-1.7	3.26
310	07-Mar-02	Mc= 4.5 Mb= 4.4	CARS	-6.034	6.6823	4.2609
			CARI	-1.749	-2.561	1.9159
			CKRC	4.79	5.54	6.8
311	26-Mar-02	Mc=4.3 Mb=4.0	CKRC	2	-1.99	2.23
312	05-Abr-02	Mc= 4.5	CKRC	1.31	1.79	-2.7
313	17-Abr-02	Mc= 4.3	CKRC	-1.52	-2.64	-3.4
314	18-Abr-02	Mc= 6.5 Mb= 5.4	CKRC	1.58	-1.49	-3.97
315	18-Abr-02	Mc= 5.9 Mb= 5.8	CKRC	1.39	-1.17	2.71
316	21-Abr-02	Mc= 4.0	CKRC	-1.54	1.76	-2.31
317	21-Abr-02	Mc= 4.1	CKRC	1.86	1.82	2.85
318	28-Abr-02	Mc=4.6 Mb= 4.5	CKRC	3.45	-3.57	-9.07
319	28-Abr-02	Mc=4.7 Mb= 4.7	CKRC	1.49	3.02	4.78
320	03-May-02		CKRC	-2.02	2.67	3.9
321	11-May-02		CKRC	4.02	3.79	-4.87
322	12-May-02	Mc= 4.7	CARD	3.3864	6.2226	-5.266
			CKRC	6.5	-5.85	8.2
323	19-May-02	Mc= 4.7	CKRC	-1.76	2.08	3.21
324	22-May-02	Mc= 3.6	CKRC	-4.58	4.09	3.96
325	07-Jun-02	Mc= 5.6	CKRC	-0.76	0.95	-1.69
326	10-Jun-02	Mc= 4.8	CKRC	-2.69	2.53	3.04
327	19-Jun-02	Mc= 5.5	CKRC	-1.77	-1.82	-3.63
328	22-Jun-02	Mb= 4.6	CARI	2.8719	-1.939	2.4075
			CKRC	4.47	-4.27	6.81
329	27-Jun-02	Mb= 4.5	CARI	-4.792	-6.784	-7.654
			CARD	-8.541	-22.02	-16.3
			CA48	4.9307	-7.651	8.1337
			CKRC	-17.13	17.33	21.46
330	28-Jun-02	Mb= 4.9	CKRC	3.98	3.33	5.48
331	14-Jul-02	Mb= 4.0	CARD	-3.822	9.5185	-9.58
			CKRC	-7.21	6.7	-7.34
332	09-Ago-02	Mb= 4.6	CKRC	1.57	-2.24	2.16
333	10-Ago-02	Mb= 4.2	CKRC	2.14	-3.71	-2.34
334	15-Ago-02	Mb= 4.3	CKRC	2.76	-2.25	-3.3
335	16-Ago-02	Mb= 4.0	CKRC	-1.55	1.9	-1.81
336	19-Ago-02	Mb= 4.2	CKRC	2.26	1.91	2.38
337	23-Ago-02	Mb= 4.5	CARI	-2.394	3.3578	-3.343
			CARD	-4.678	-5.268	-6.815
			CKRC	5.6	6.9	12.66
338	23-Ago-02	Mb= 4.0	CKRC	-2.32	-2.37	3.32
339	29-Ago-02	Mb= 4.4	CKRC	-2.27	2.82	2.36
340	30-Ago-02	Mb= 5.4	CKRC	-3.01	3.11	-4.56
341	01-Sep-02	Mb= 4.8	CKRC	2.13	-2.84	3.66
342	05-Sep-02	Mb= 4.0	CKRC	2.51	3.18	-4.07
343	10-Sep-02	Mb= 4.3	CKRC	2.15	-2.6	3.41
344	11-Sep-02	Mb= 4.4	CKRC	1.72	-1.5	-2.54
345	25-Sep-02	Mb= 5.3	CARS	-5.99	-11.31	7.74
			CARI	-4.742	5.269	-4.311
			CARD	4.4734	-9.999	-8.617
			CKRC	-8.54	-10.44	-16.54
346	27-Sep-02	Mb= 5.2	CARS	28.74	53.81	32.791
			CARI	19.16	-24.85	15.817
			CARD	16.601	-24.4	-25.86
			CKRC	28.7	34.11	-53.26
347	27-Sep-02	Mb= 4.4	CARS	6.4009	-6.51	-5.591
			CARD	-3.579	-6.663	4.7903
			CKRC	3.79	-4.79	7.04
348	29-Sep-02	Mb= 4.3	CARS	2.921	-4.351	-3.446
			CKRC	-3.2	-3.97	-5.22

EVENTO	FECHA	MAGNITUD.	ESTACION	ACELERACION MAXIMA [CM/S ²]		
				VERTICAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
349	04-Oct-02	Mb= 3.9	CARS	5.7524	6.4009	13.402
			CARD	4.0585	-5.011	-4.378
			CKRC	-4.53	-10.58	-6.59
350	08-Oct-02	Mb= 4.1	CARS	5.4139	8.9034	10.251
			CARI	-2.874	4.321	-4.31
			CARD	-4.721	8.903	-12.45
			CKRC	5.12	-8.37	11.24
351	12-Oct-02	Mb= 3.9	CKRC	1.79	1.98	2.4
352	12-Oct-02	Mb= 4.3	CKRC	-1.75	2.63	2.61
353	13-Oct-02		CKRC	1.77	-1.54	-2.1
354	14-Oct-02	Mb= 4.2	CARS	18.245	-25.8	21.028
			CARI	5.269	-8.142	-4.825
			CARD	10.059	-16.33	14.369
			CKRC	-12.65	-17.82	-19.12
355	15-Oct-02	Mc= 4.3	CARS	-6.615	-11.81	7.43
			CARI	2.7266	-3.953	-2.373
			CARD	-5.269	-6.794	-5.826
			CKRC	-8.2	-8.05	-8.16
356	03-Nov-02	Mc= 4.4	CARS	-3.736	4.0512	4.0368
			CKRC	-3.76	-4.35	5.43
357	04-Nov-02	Mc= 5.3	CKRC	1.39	-2.16	3.04
358	08-Nov-02	Mc= 5.2	CKRC	1.16	1.49	2.02
359	20-Nov-02	Mc= 4.1	CKRC	-2.28	-1.64	-2.71
360	10-Dic-02	Mc =5.7	CARS	-9.351	-17	-9.351
			CARI	-4.229	-3.229	-4.311
			CARD	-4.78	-9.887	10.992
			CKRC	9.8	-9.92	-23.91
361	14-Dic-02	Mc= 4.6	CKRC	-3.42	-4.49	6.06
362	19-Dic-02	Mc= 4.1	CARS	3.8032	4.795	2.8791
			CKRC	-2.68	2.13	-3.02
363	21-Dic-02	Mc=4.1	CARS	5.7239	-4.57	4.8703
			CKRC	2.94	3.93	-4.37
364	21-Dic-02		CKRC	1.4	1.2	-2.1
365	10-Ene-03	Mb= 5.3	CARS	23.95	27.028	21.824
			CARI	10.514	17.244	-13.42
			CARD	9.1017	14.387	19.155
			CKRC	-16.09	-22.9	41.1
366	12-Ene-03	Mb= 4.1	CKRC	-2.34	2.05	3.45
367	16-Ene-03	Mb= 4.2	CKRC	-1.31	2.34	-2.55
368	22-Ene-03	Mb= 7.6	CARS	-9.566	11.4	8.4408
			CARI	-5.138	4.7902	3.5126
			CARD	-6.639	6.7439	4.6663
			CKRC	-8.3	9.81	-19.5
369	30-Ene-03		CARS	-4.442	-6.605	6.1768
			CARI	-2.394	-2.875	2.7195
			CARD	4.7473	5.269	-5.747
370	31-Ene-03	Mb= 4.4	CKRC	4.72	6.08	-9
371	04-Feb-03	Mb= 4.1	CKRC	2.24	-2.69	-3.36

Tabla IV.1 Características de los sismos registrados

Como se puede ver en la tabla IV.1, en la mayoría de los sismos la aceleración correspondiente a la componente transversal es mayor que la de las otras dos componentes y las aceleraciones de los sismos registrados en roca son mayores en la margen derecha.

En lo referente a las aceleraciones registradas en el cuerpo de la cortina, las de la corona son mayores que las que se presentaron a media cortina y en la base se presentan las menores, aunque la diferencia es pequeña. Esto es indicativo de que la presa vibra de

manera uniforme, aunque bajo el nivel 475 es limitada su vibración por el material de la rezaga y por los depósitos del afluente.

En la tabla IV.2 se presentan la cantidad de sismos que se han presentado según la aceleración máxima que han provocado en la cortina. Como se puede ver el mayor número de eventos provocó una aceleración de entre 0 y 50 cm/s^2 , además, no existe relación entre ellos pues las características de los eventos son diferentes para cada uno.

Aceleración Transversal Máxima cm/s^2	cantidad	Porcentaje	Notas
0 a 50	358	96.7%	Magnitudes, localizaciones y profundidades diversas.
50 a 100	10	2.7%	Magnitudes, localizaciones y profundidades diversas.
100 a 150	1	0.27%	Sismo 30.
150 a 200	Cero	0 %	
Mayor que 200	1	0.27%	Sismo 81.

Tabla IV.2 Cantidad de sismos registrados por la aceleración provocada en la cortina.

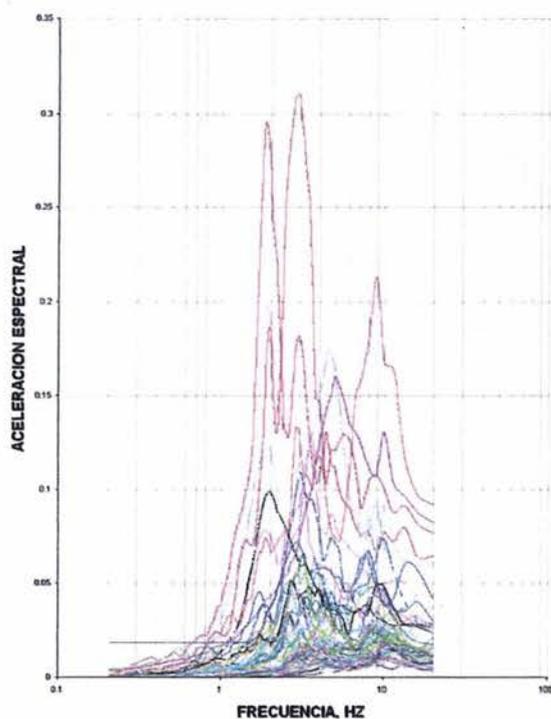


Figura IV.4 Espectro de respuesta Estación Base de la cortina.

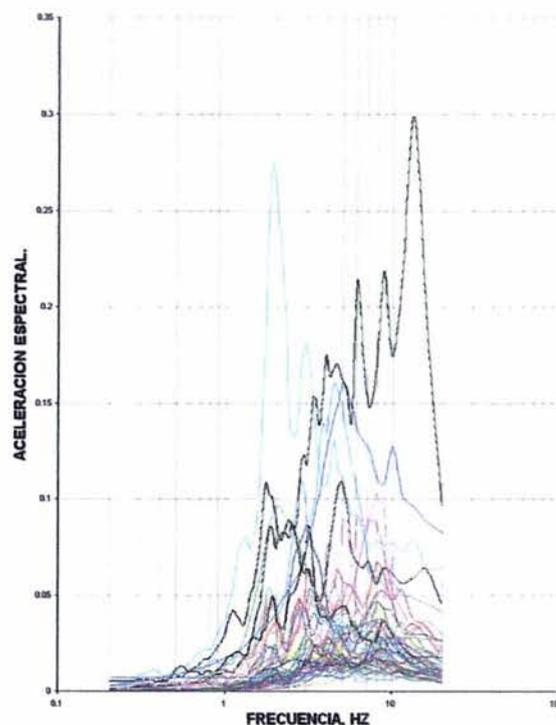
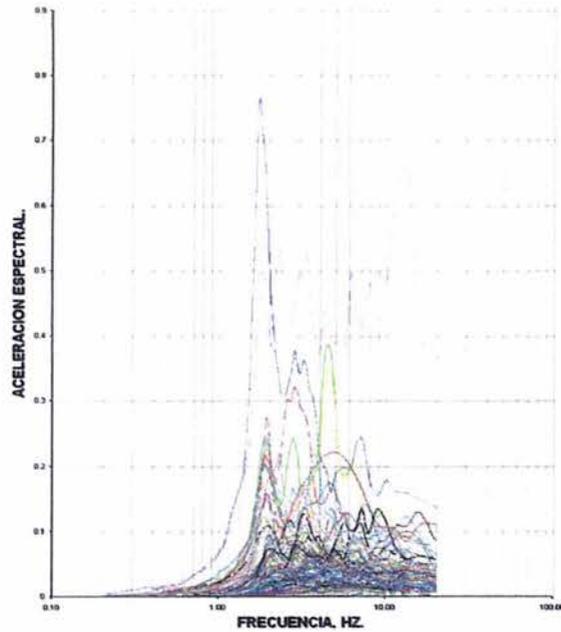
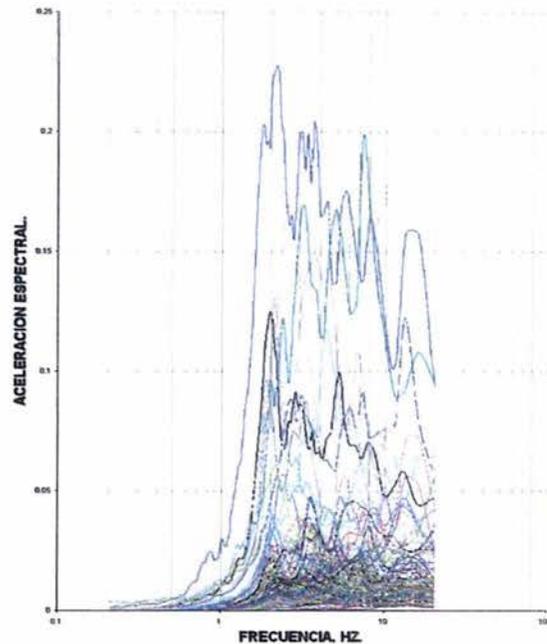


Figura IV.5 Espectro de respuesta Estación Media Cortina.



*Figura IV.6 Espectro de respuesta
Estación Corona CARC*



*Figura IV.7 Espectro de respuesta
Estación Corona CKRC*

Los registros de las estaciones instaladas en ambas márgenes de la presa presentan contenidos de energía similares, concentrándose los valores altos de aceleración en frecuencias altas, sobre todo en la margen derecha. Sin embargo, para algunos sismos en estas últimas figuras se localizan altas aceleraciones en frecuencias bajas; es el caso del sismo 83 en la margen izquierda y del sismo 30 en la margen derecha. Ambos sismos son someros. El sismo 30 es de magnitud alta, $M=6.9$, y se presentó en plataforma continental frente a las costas de Guerrero, cerca de la Costa Chica a una profundidad de 19 Km. El sismo 83 es de magnitud media, $M=4.5$, pero su epicentro se localizó a solo 60 Km de la presa y a una profundidad de 62 Km (Figs. IV.8- IV.9).

En el espectro de la margen derecha, el sismo 30 alcanza un máximo de energía de 0.65 para una frecuencia de 1.77 Hz. El otro sismo que generó una gráfica con valores altos en el espectro de esta estación fue el 81, que como también ya se vio es somero y con altas aceleraciones. Para los demás sismos las aceleraciones son menores que 0.3 g (Fig. IV.9).

Las aceleraciones en el espectro de respuesta de la estación margen izquierda son menores que 0.3 g, con excepciones del sismo 83 que presenta un máximo valor de 0.572 g para 13.33 Hz y del sismo 48 con 0.323 g para 4.7 Hz como valor máximo (Fig. IV.8).

En la figura del espectro de respuesta de la subestación se puede observar que se presentan los valores de aceleración más bajos de todas estas figuras, estando éstos por debajo de 0.15g. Otra característica de estas figuras es que se presentan valores de aceleración “altos” en rangos amplios de la frecuencia, es decir de 2 a 10 Hz (Fig. IV.10).

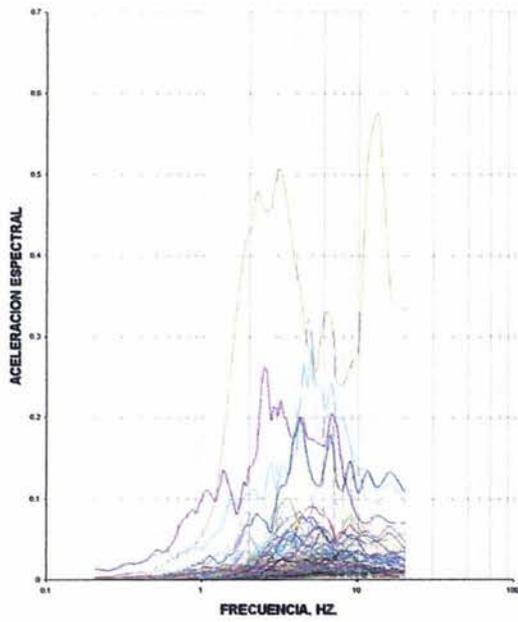


Figura IV.8 Espectro de respuesta Estación Margen Izquierda.

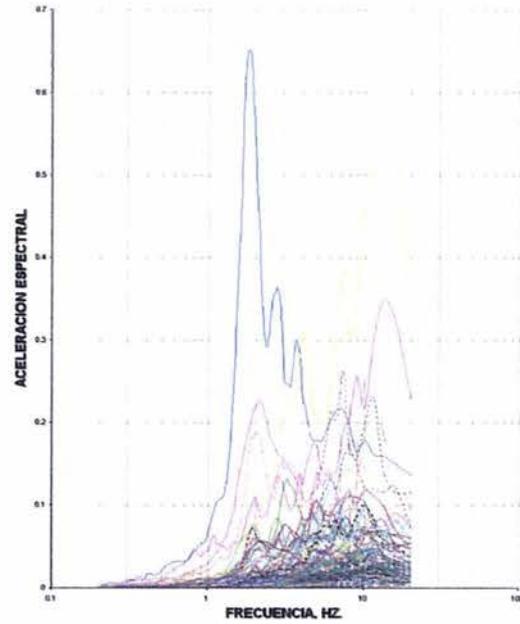


Figura IV.9 Espectro de respuesta Estación Margen Derecha.

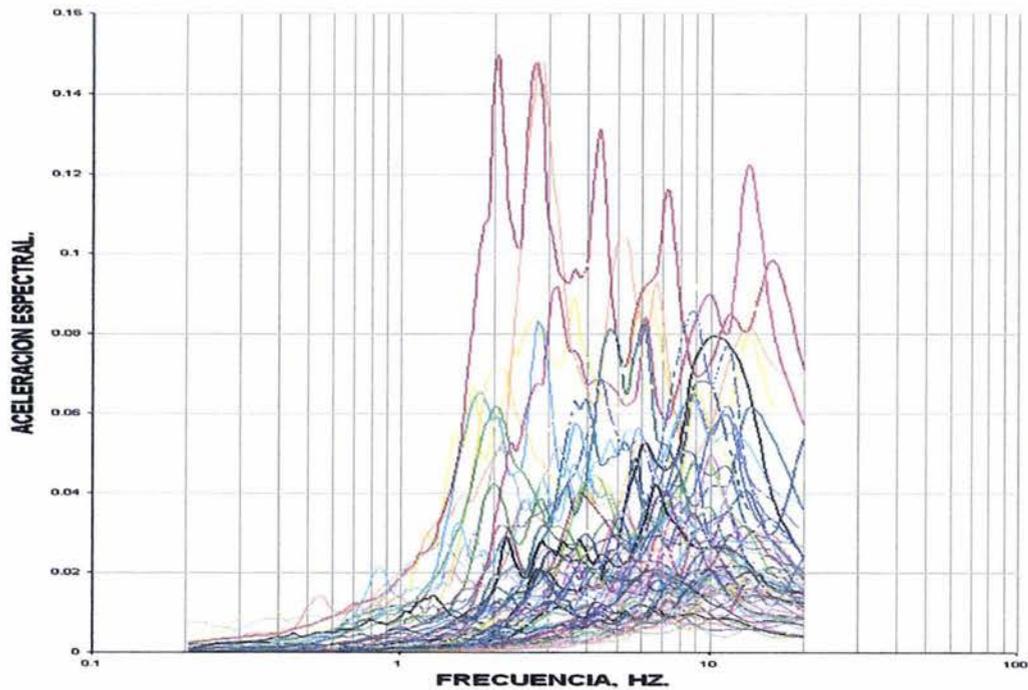


Figura IV.10 Espectro de respuesta Subestación.

IV.2 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.

En general las figuras de las funciones de transferencia presentan configuraciones diferentes.

En casi todas las figuras la mayor amplificación se presenta alrededor de una frecuencia de 2 Hz o tienen uno de sus picos de máximo valor alrededor del valor señalado. Esto no se cumple únicamente para las gráficas de las funciones Margen Izquierda-Margen Derecha, Subestación-Margen Derecha y Subestación-Margen Izquierda (Figs. IV.21-IV.23), que como se puede advertir son las funciones obtenidas entre las estaciones instaladas fuera de la cortina, por lo que se puede afirmar que la frecuencia natural de vibración de la cortina se encuentra alrededor de 2 Hz (Figs. IV.11- IV.13).

En las gráficas de las funciones Subestación – Base, Margen Izquierda – Base y Margen Derecha - Base el valor de la frecuencia característica es 3.0 Hz; se puede observar que en estas funciones se relacionan la estación de la Base, que está influenciada por los depósitos de rezaga y los del afluente, con las estaciones instaladas fuera de la cortina, por lo que aumenta un poco su rigidez (Figs. IV.14- IV.16).

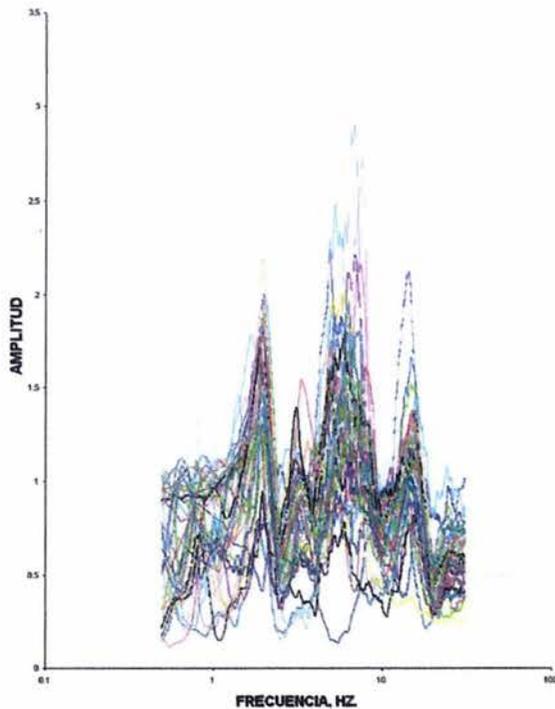


Figura IV.11 Función de Transferencia Base- Media Cortina

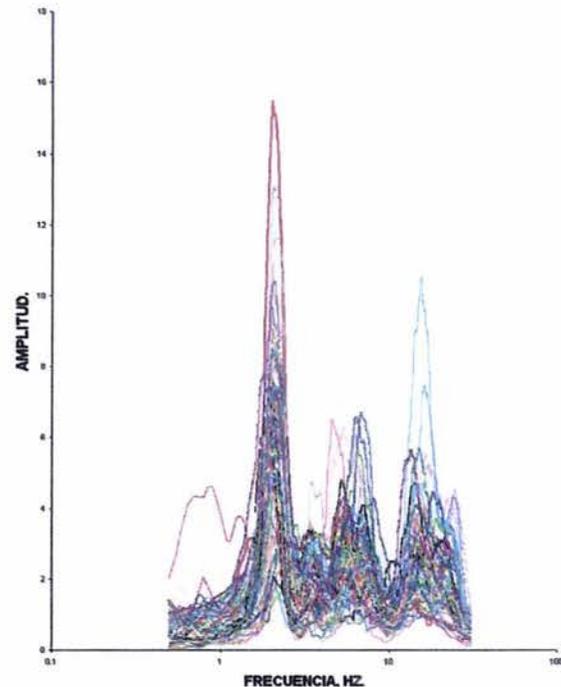
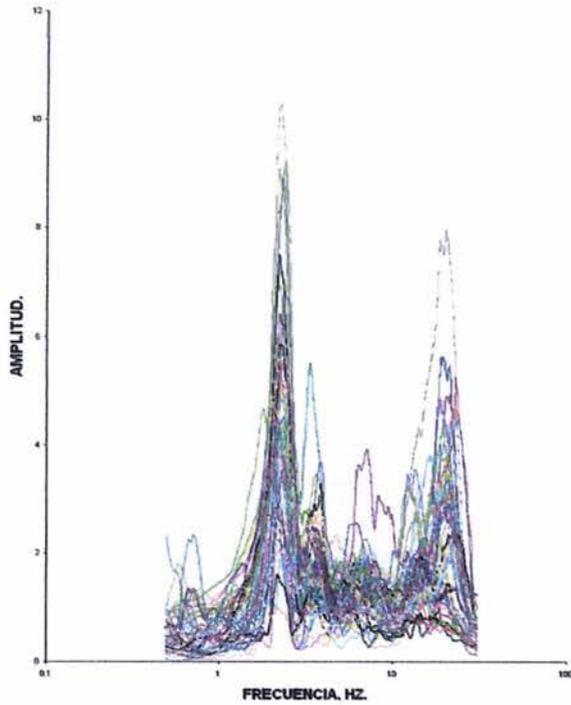
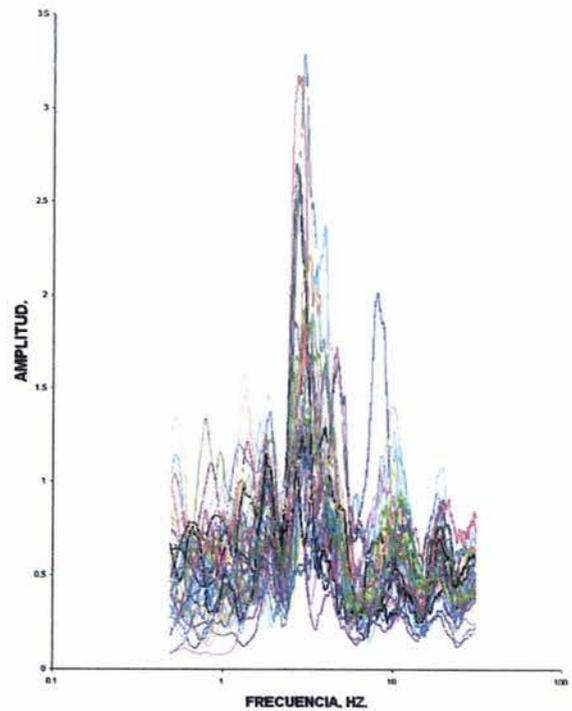


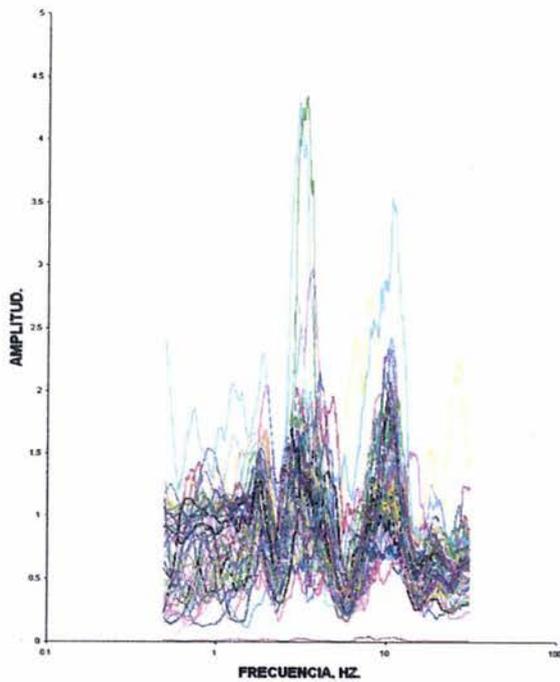
Figura IV.12 Función de Transferencia Base- Corona.



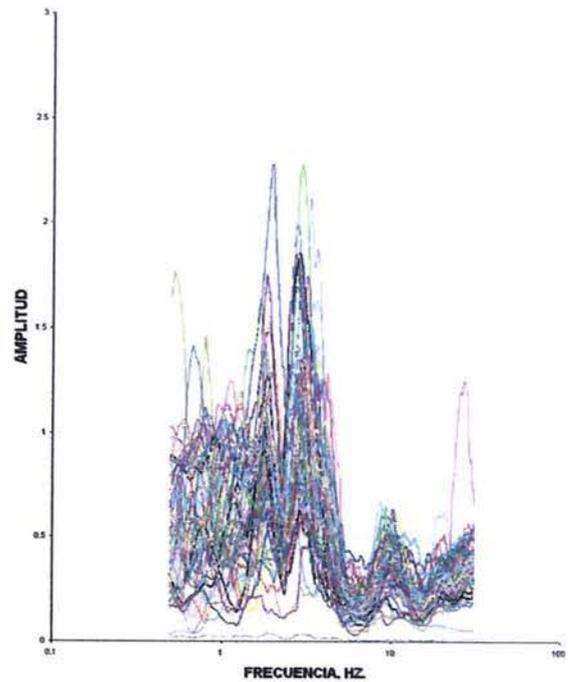
*Figura IV.13 Función de Trans.
Media Cortina- Corona.*



*Figura IV.14 Función de
Transferencia Subestación- Base.*

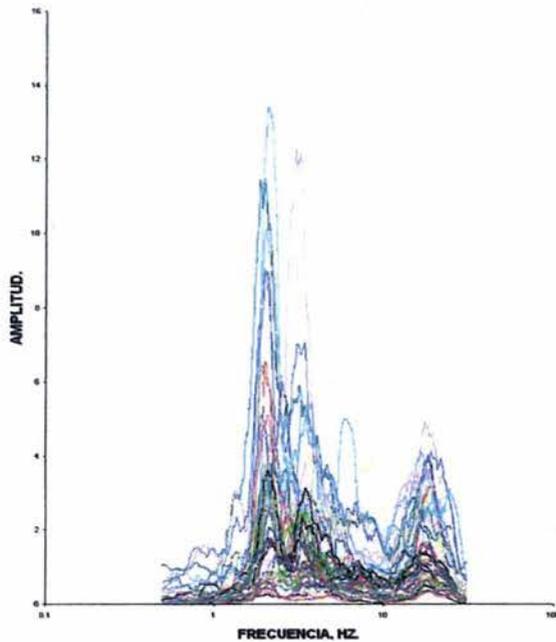


*Figura IV.15 Función de Transferencia
Margen Izquierda- Base.*

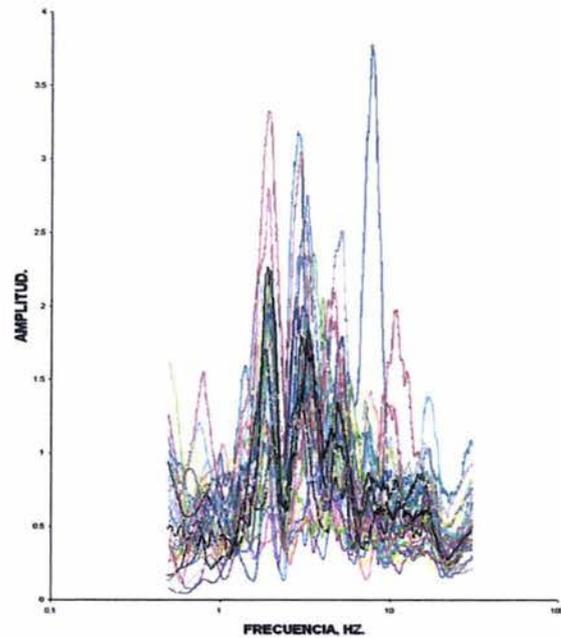


*Figura IV.16 Función de Transferencia
Margen derecha- Base.*

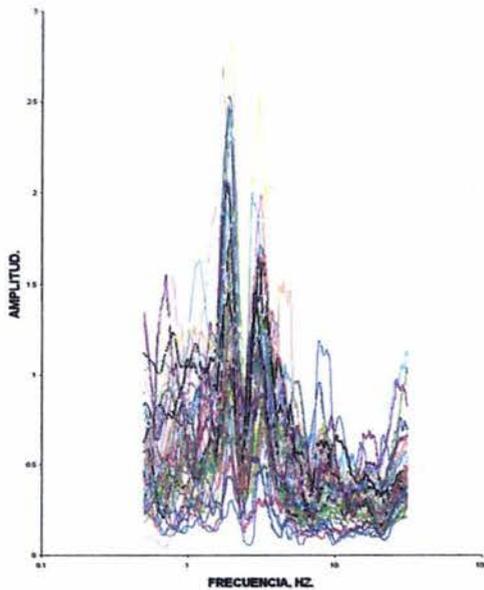
En las figuras Subestación – Estación CKRC, Subestación – Media Cortina, Margen derecha – Media Cortina y Margen Izquierda – Media Cortina se presenta un marcado segundo modo de vibración en 3.0 Hz (Figs. IV.17- IV.20).



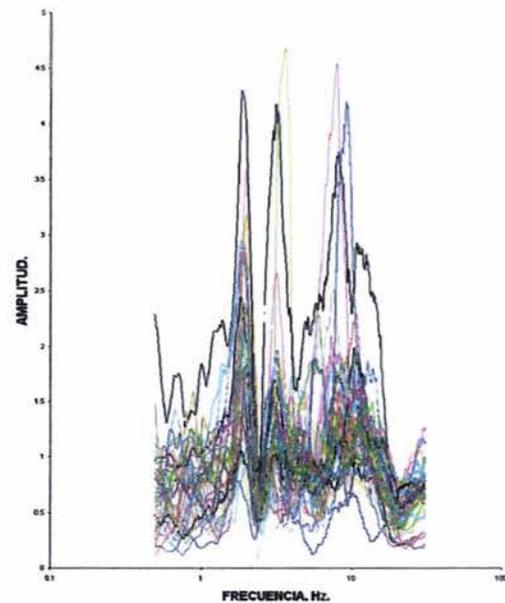
*Figura IV.17 Función de Transferencia
Subestación- est. CKRC*



*Figura IV.18 Función de Transferencia
Subestación- Media Cortina*



*Figura IV.19 Función de Transferencia
Margen Derecha- Media Cortina*



*Figura IV.20 Función de Transferencia
Margen Izquierda- Media Cortina*

En las figuras que relacionan las estaciones instaladas fuera de la cortina no existe una marcada frecuencia de vibración. En la figura Margen Izquierda – Margen Derecha hay una concentración de valores de 5.0 a 15 Hz por debajo de 8.0 g. Para la figura Subestación – Margen Izquierda la concentración de valores se da de 2.0 a 7.0 Hz por debajo de 2.0 g excepto para el sismo 65 que presenta un máximo de 2.79 g en una frecuencia de 3.79 Hz. Para la función de transferencia Subestación – Margen Derecha los valores se concentran de 4.0 a 20.0 Hz por debajo de 0.4g; en esta figura el sismo 65 presenta un máximo de 4.79 en una frecuencia de 5.0 Hz. Como se puede observar la concentración de valores se da en frecuencias altas, ya que todas las figuras mencionadas incluyen alguna instalada en roca (Figs. IV.21- IV.23).

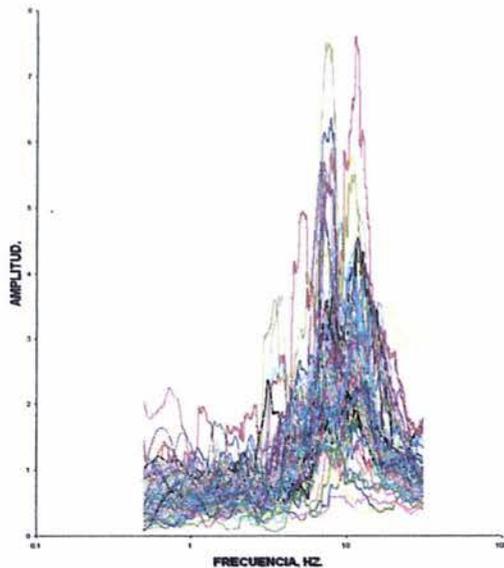


Figura IV.21 Función de Transferencia Margen Izquierda- Margen Derecha

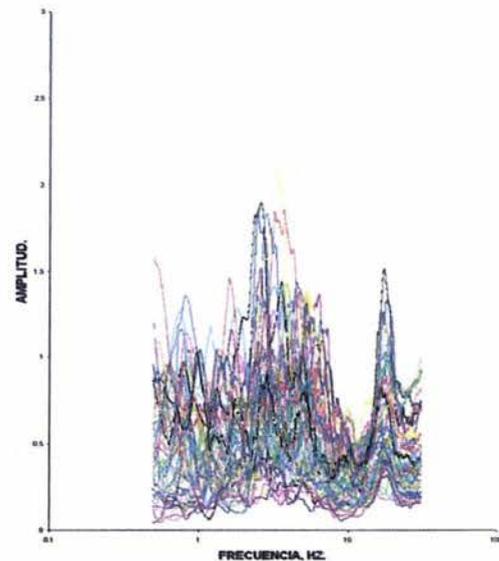


Figura IV.22 Función de Transferencia Subestación- Margen Izquierda

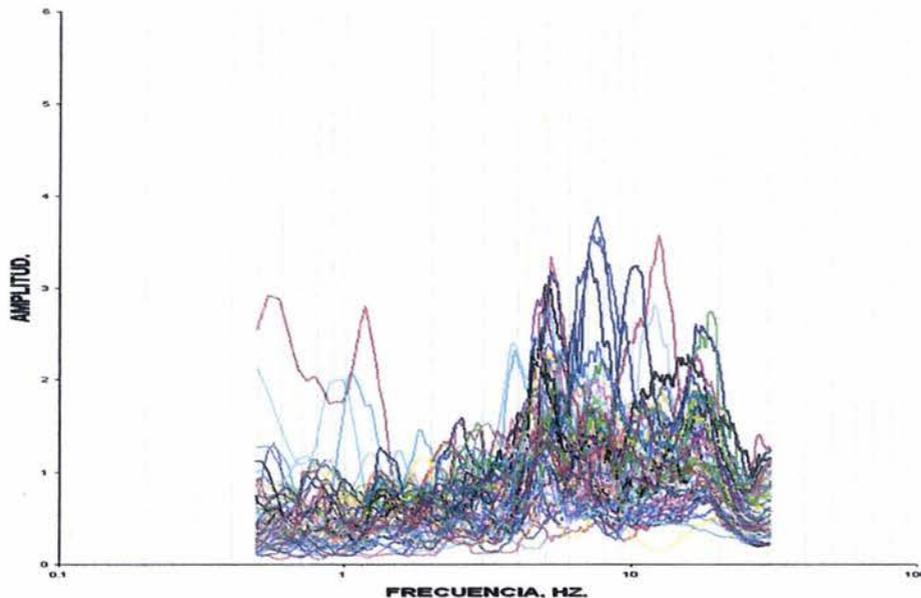


Figura IV.23 Función de Transferencia Subestación- Margen Derecha

La geometría de las gráficas de las funciones de transferencia entre la margen derecha y las estaciones de la cortina es mucho más homogénea que la de las gráficas de la margen izquierda y la cortina, esto nos indica que de alguna forma la geometría y la geología de la boquilla esta influyendo en la manera como se transmiten los sismos, pues hay que recordar que en la margen derecha predominan los depósitos de lutitas y en la izquierda predominan los depósitos de arenisca y el sistema de fallas y diques es un poco más grave, además de que en la margen derecha se encuentra la obra de excedencias y su rigidez afecta a la ladera (Figs. IV.15, IV.16, IV.19, IV.20, IV.24- IV.25).

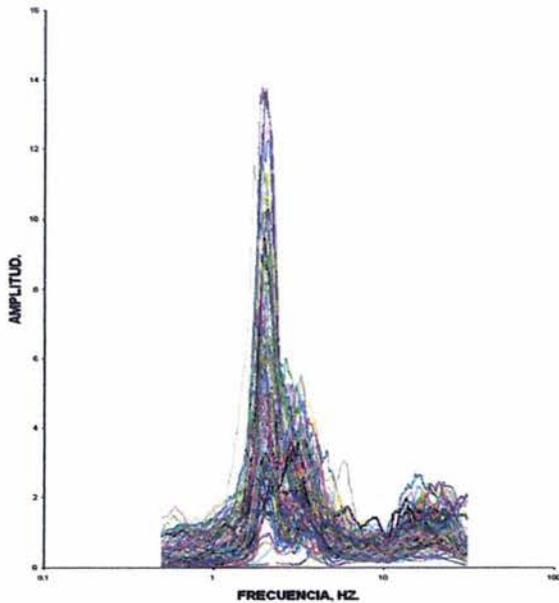


Figura IV.24 Función de Transferencia Margen Derecha- Corona

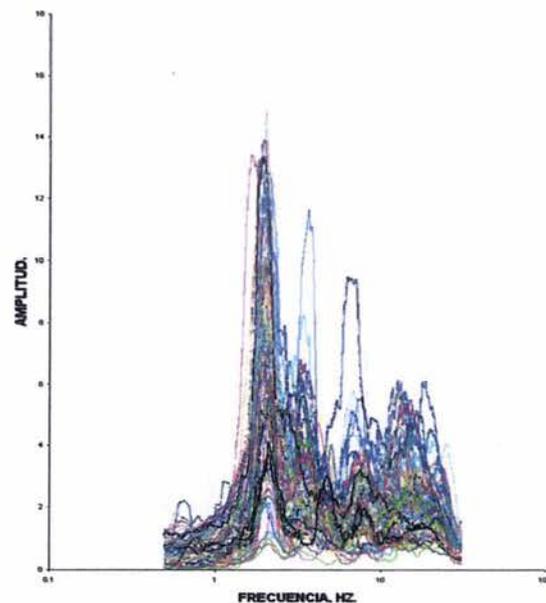
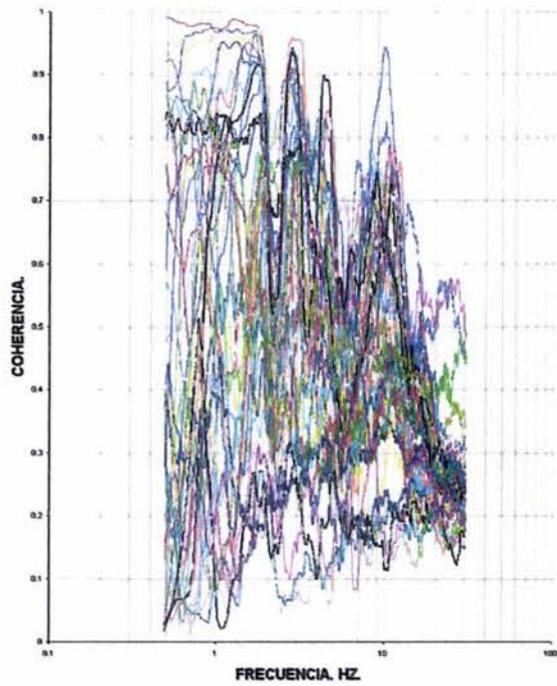


Figura IV.25 Función de Transferencia Margen Izquierda- Corona

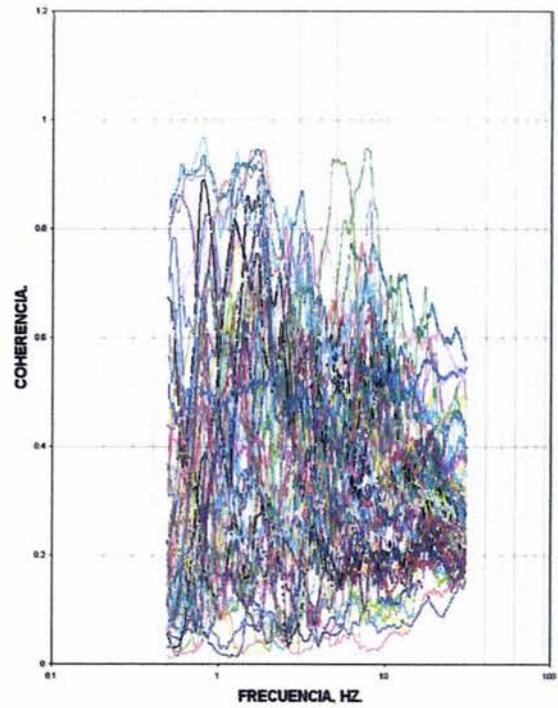
IV.3 FUNCIONES DE COHERENCIA.

En el rango de frecuencias de 0.5 a 2 Hz es en donde las gráficas se acercan más al valor de 1, esto reafirma que la frecuencia natural de vibración de la cortina se encuentra alrededor de 2.0 Hz. Mientras más se incrementan los valores de la frecuencia, más decrecen los de la coherencia (Figs. IV.26- IV.28).

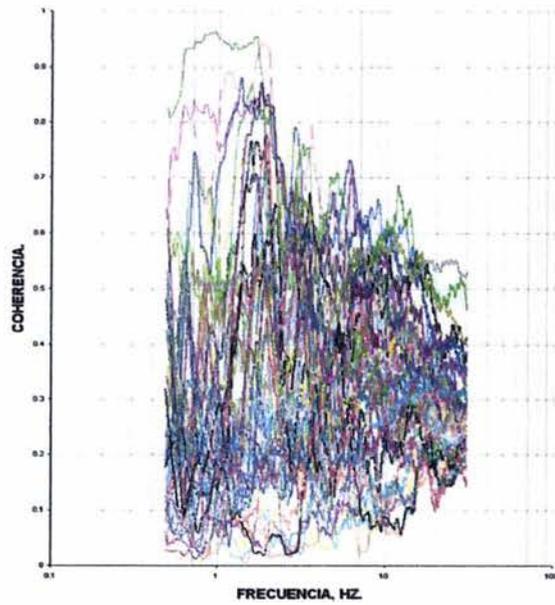
En las figuras que relacionan a la estación de la Base con alguna otra de la cortina y la Margen Derecha – Base, se presenta el siguiente fenómeno; algunos sismos después de disminuir su coherencia a partir de los 2.0 Hz se vuelven a acercan a la unidad para una frecuencia de 10.0 Hz (Figs. IV.26, IV.27, IV.29)



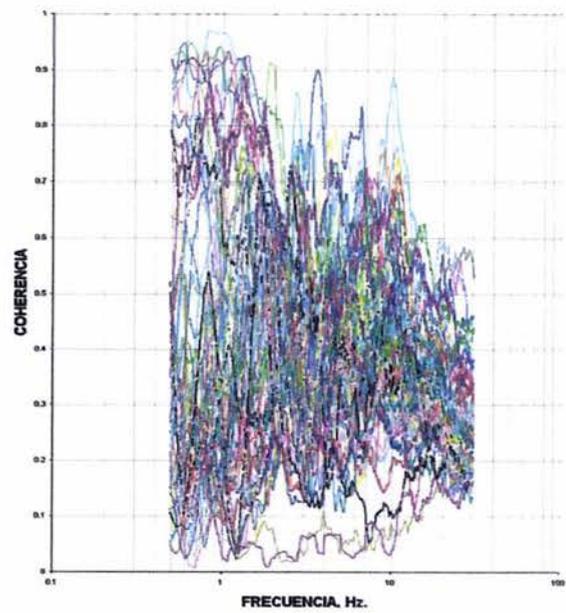
*Figura IV.26 Función de Coherencia
Base- Media Cortina*



*Figura IV.27 Función de Transferencia
Base- Corona*



*Figura IV.28 Función de Coherencia
Media Cortina-Corona*



*Figura IV.29 Función de Coherencia
Margen derecha- Base*

Los sismos que de 0.5 a 2.0 Hz o alrededor de 10.0 Hz se aproximan a la unidad, se caracterizan por tener una magnitud mayor o igual a 4.8 y por ser someros sin importar su ubicación.

Sismo	Distancia epicentral[Km]	Profundidad focal[Km]	Magnitud
43	137	16	Mb=5.8
71	213	15	Mb=5.9
81	66	23	M = 5.6
88	195	21	Mw=7.3
98	141	20	Mc=6.0
119	334	16	Mb=6.5
141	86	12	Mc=4.8
147	123	59	Mb=5.9
155	103	51	Mc=4.9
191	109	27	Mc=4.6
210	268	69	Mb=6.4

Tabla IV.2 Características de los sismos que en algunos rangos de la frecuencia se acercan al valor de la unidad en la coherencia.

Las figuras que relacionan la Subestación con alguna de las estaciones instaladas en la cortina, presentan valores de la coherencia por debajo de 0.9 (Figs. IV.30- IV.32).

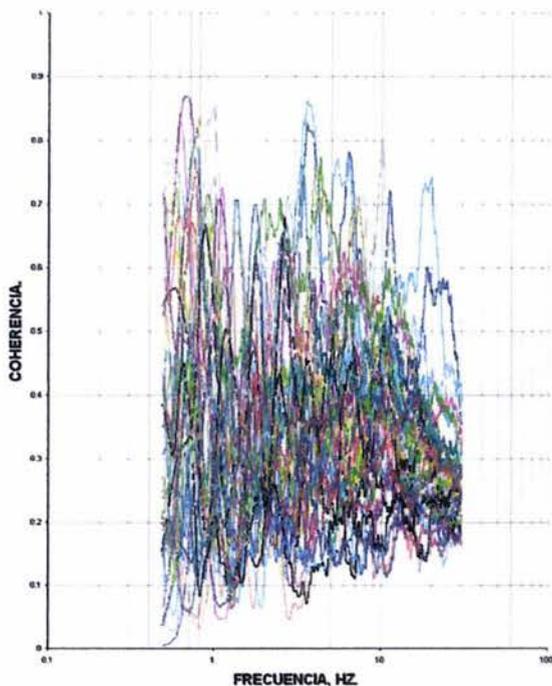


Figura IV.30 Función de Coherencia Subestación- Base

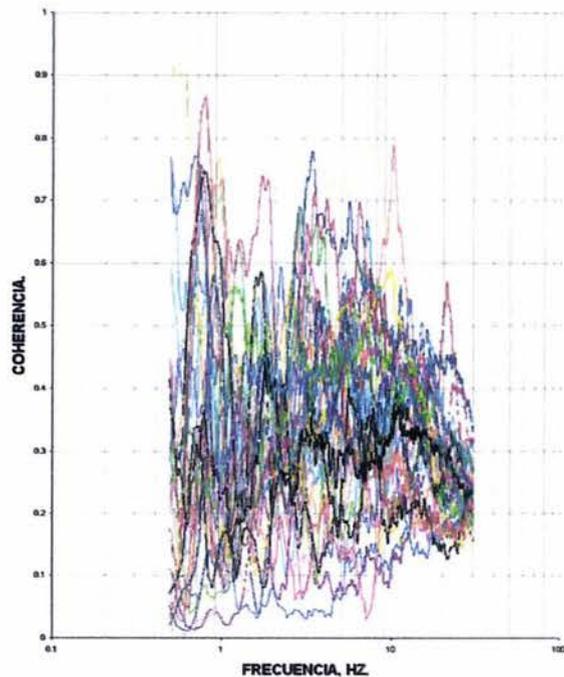
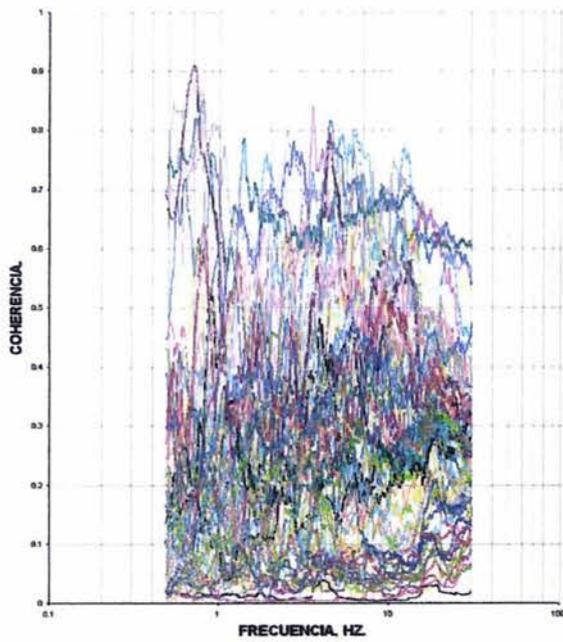
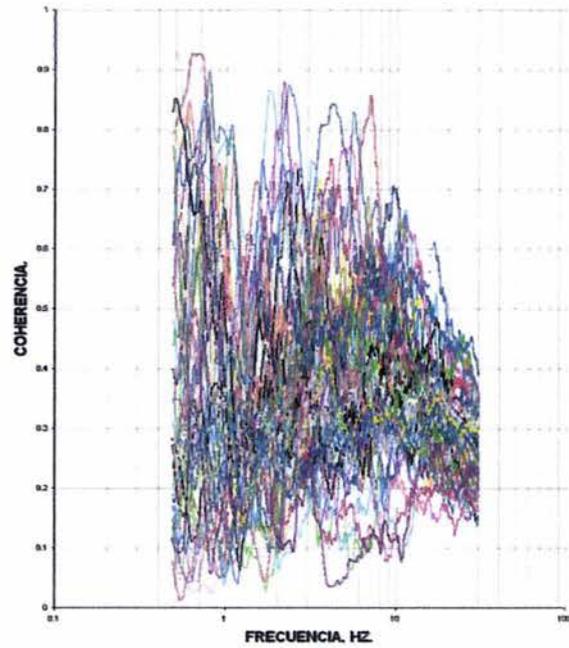


Figura IV.31 Función de Coherencia Subestación- Media Cortina

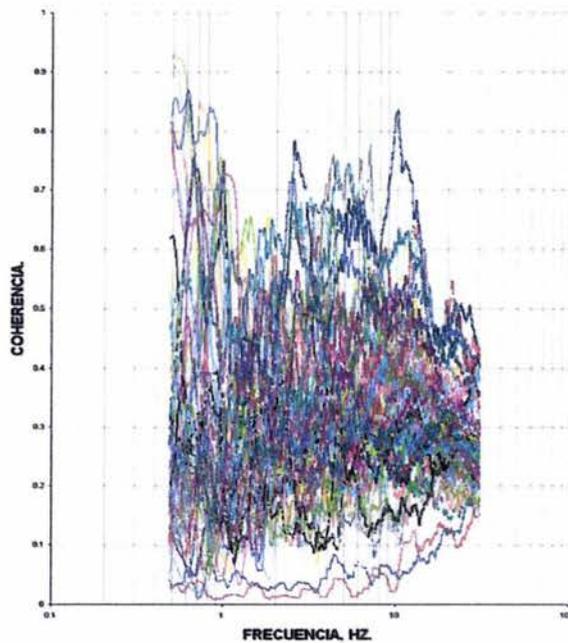


*Figura IV.32 Función de Coherencia
Subestación-Corona*

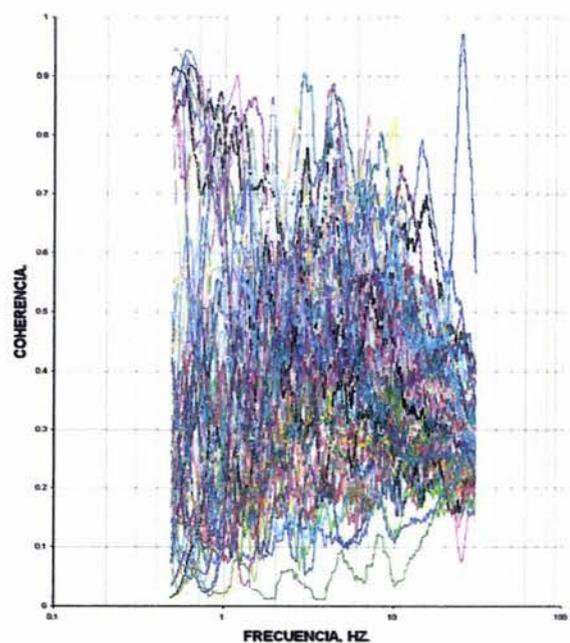


*Figura IV.33 Función de Coherencia
Subestación- Margen Izquierda*

En las funciones de coherencia que relacionan la Subestación con las márgenes, los valores se presentan por debajo de 0.9, con la excepción de que en la función Subestación – Margen Izquierda el sismo 61 alcanza un valor de 0.93 en una frecuencia de 5.0 Hz (Figs. IV.33- IV.34).



*Figura IV.34 Función de Coherencia
Subestación- Margen Derecha*



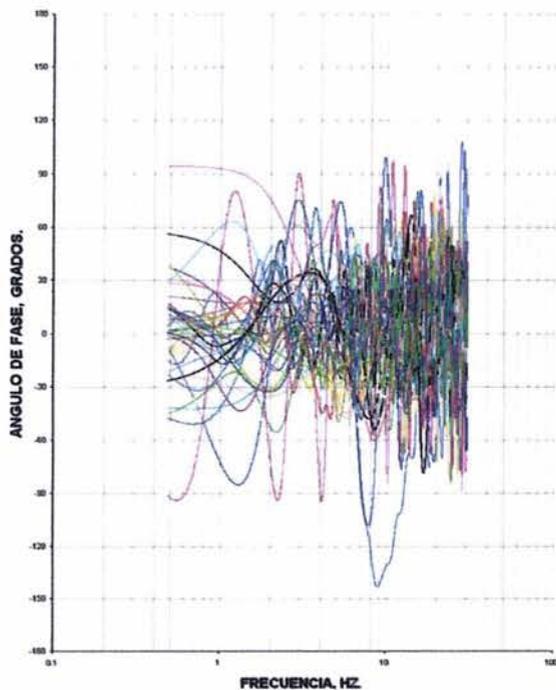
*Figura IV.35 Función de Coherencia
Margen Izquierda- Margen Derecha*

La función Margen Izquierda – Margen Derecha presenta valores cercanos a la unidad para algunos sismos en un rango de 0.5 a 1.0 Hz, con la excepción del 01 que alcanza el valor de 0.96 en 25.53 Hz y el sismo 350 que alcanza en 5.11 Hz un valor de 0.96 (Fig. IV.35).

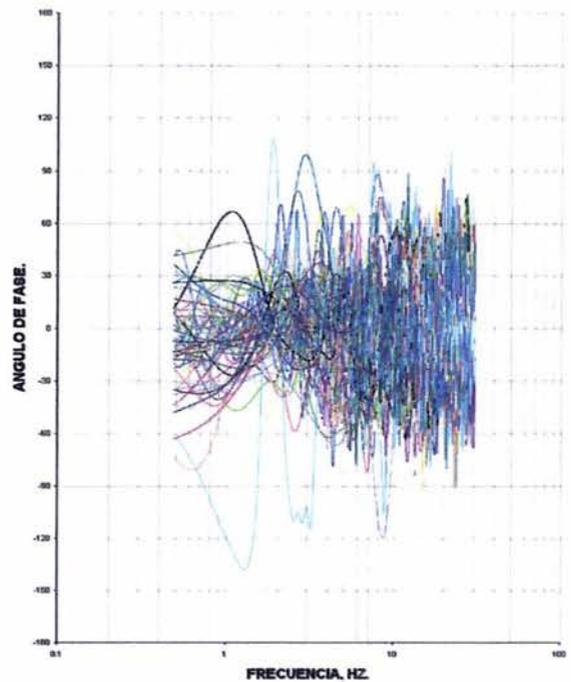
IV.4 ÁNGULOS DE FASE.

Los valores del ángulo de fase se concentran de -90° a 90° . De 0.5 a 2.0 Hz los cambios de signo son pocos o nulos comparados con los que se presentan en frecuencias subsecuentes. En 2.0 Hz aumenta la frecuencia con la que las gráficas cambian de signo. En algunas figuras se reincrementan los cambios de signo en 5.0 Hz.

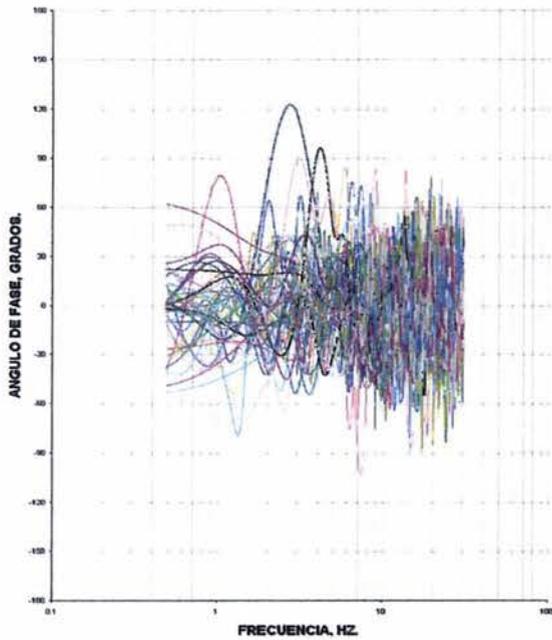
En las figuras que relacionan las estaciones instaladas en la cortina se puede notar que los mayores valores de los ángulos de fase se presentan en la correlación Base – Media Cortina. En esta figura el sismo 177, que se presentó a 142 Km de la presa con una magnitud de 5.0 y una profundidad de 66 Km, casi alcanza en 88 Hz un ángulo de fase de -150° . Al contrario, en las gráficas Base- Corona y Media Cortina- Corona se presentan los ángulos menores y el rango mencionado se ve rebasado, aunque no de forma considerable (Figs. IV.36- IV.38).



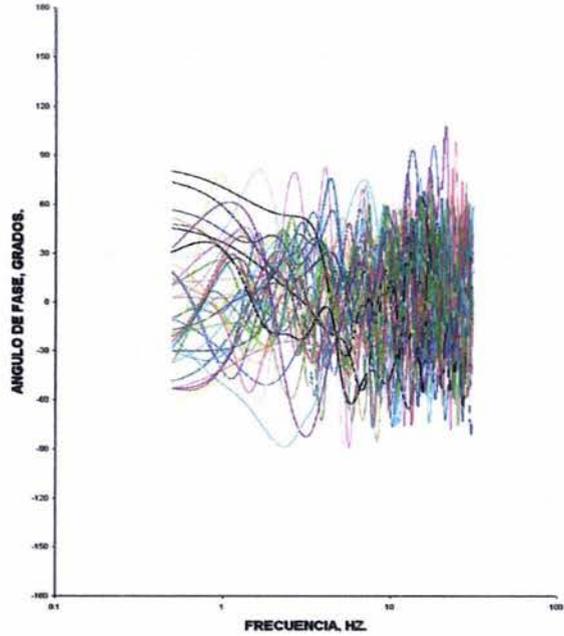
*Figura IV.36 Función de Coherencia
Base- Media Cortina*



*Figura IV.37 Función de Coherencia
Base- Corona*

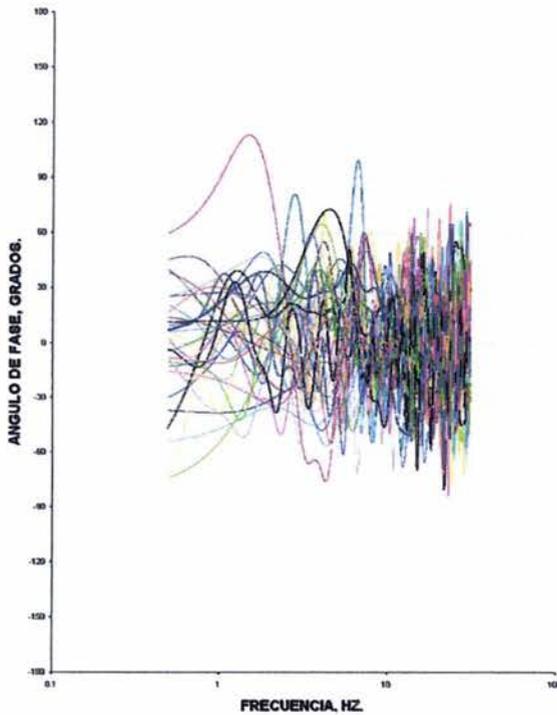


*Figura IV.38 Función de Coherencia
Media Cortina- Corona*

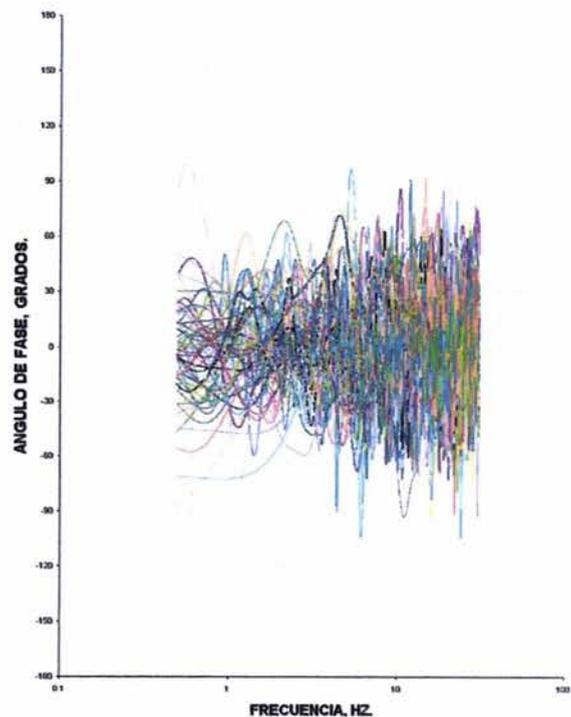


*Figura IV.39 Ángulo de Fase
Subestación- Base*

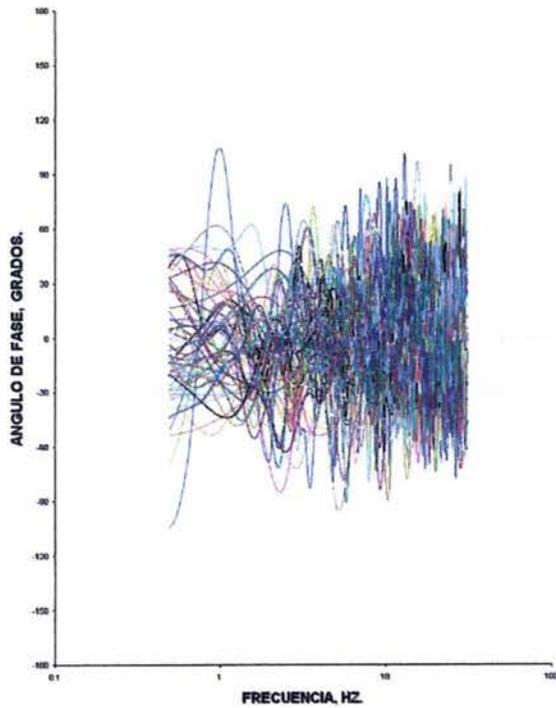
En las figuras de los ángulos de fase que relacionan la Subestación con cualquier otra estación acelerográfica, los valores se concentran en el rango de -90° a 90° casi sin excepción (Figs. IV.39- IV.43).



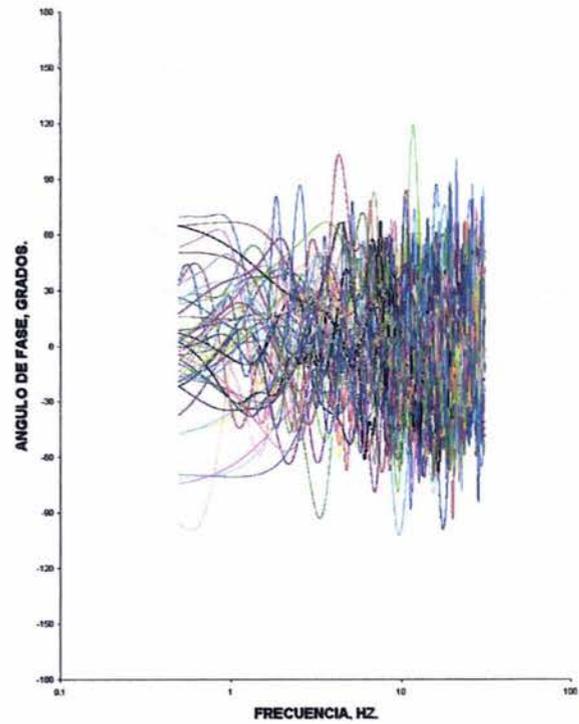
*Figura IV.40 Ángulo de Fase
Subestación- Media Cortina*



*Figura IV.41 Ángulo de Fase
Subestación- Corona*



*Figura IV.42 Ángulo de Fase
Subestación- Margen Derecha*



*Figura IV.43 Ángulo de Fase
Subestación- Margen Izquierda*

Los sismos que superan el rango de $[-90^\circ, 90^\circ]$ se caracterizan por ser someros y por presentar magnitudes mayores que 4.1 sin importar la ubicación (tabla IV.3).

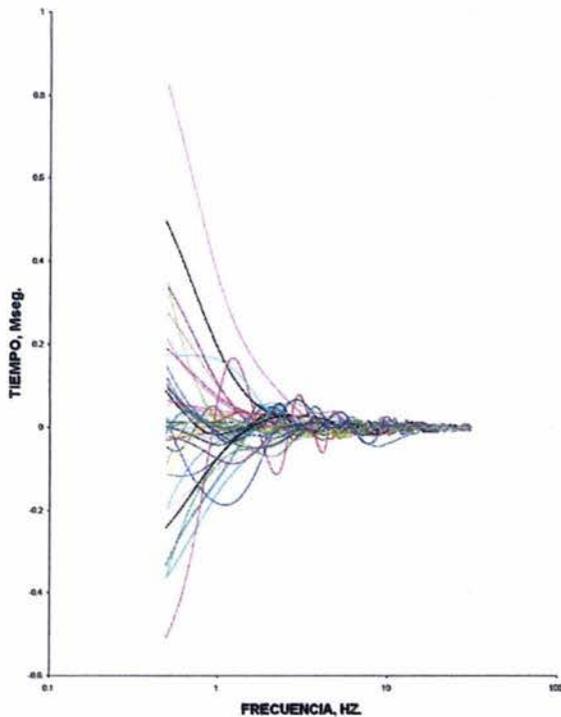
Sismo	Distancia epicentral	Profundidad focal	Magnitud
05	164	15	Mb=6.3
29	161	19	Mb=6.3
43	137	16	Mb=5.8
53	117	27	Mb=4.6
58	165	11	Mb=5.2
61	17	54	Mc=4.1
81	66	23	M = 5.6
98	141	20	Mc=6.0
141	86	12	Mc=4.8
177	142	66	Mc=5.0
179	171	18	Mc=4.8
188	188	5	Mc=4.9
191	109	27	Mc=4.6

Tabla IV.3 Características de los sismos que superan en determinada frecuencia el rango común en los ángulos de fase de -90° a 90° .

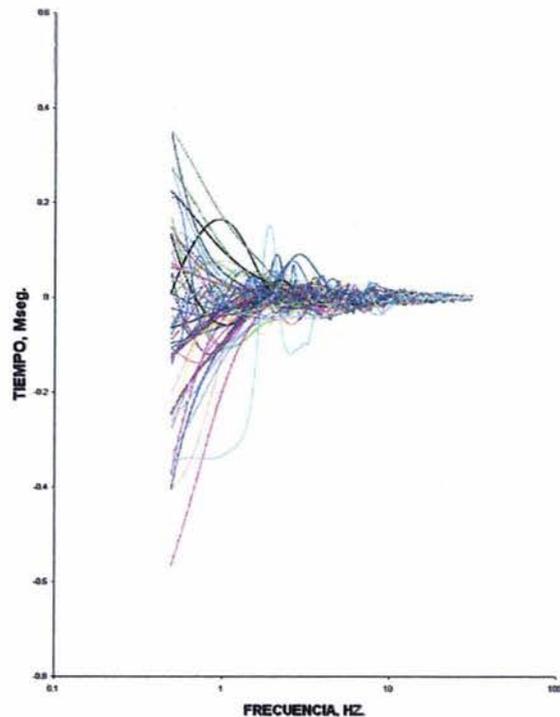
IV.2.5 TIEMPOS DE RETARDO.

El menor tiempo de retardo se presenta en la correlación media cortina- corona est. CKRC, $0.12 \mu s$, esto sería indicativo de que toda la energía de los sismos se transmite de una zona a otra casi inmediatamente. El tiempo máximo se registró en la figura Margen Derecha – Base y es de $0.88 \mu s$.

Los valores máximos de las figuras que relacionan las estaciones instaladas en la cortina se presentan en un rango de -0.5 a $0.5 \mu s$ en promedio, excepto para la figura Media Cortina – estación CKRC, que como ya se vio presenta los tiempos menores de todos (Figs. IV.44- IV.46).



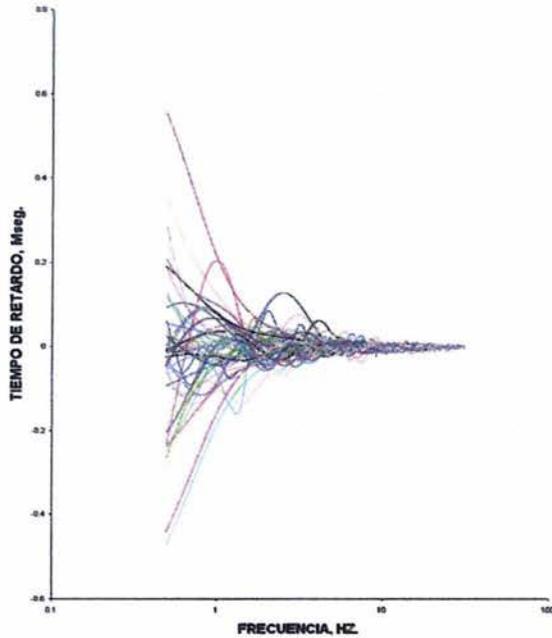
*Figura IV.44 Tiempo de Retardo
Base- Media Cortina*



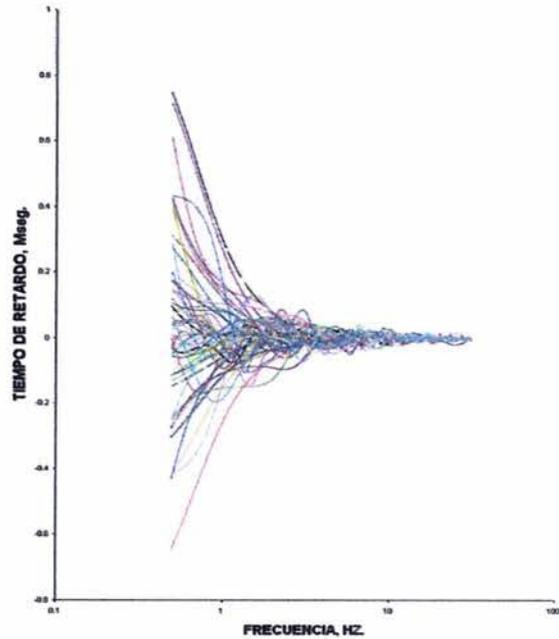
*Figura IV.45 Tiempo de Retardo
Base- Corona*

Las figuras que relacionan la Subestación o la estación Margen Derecha presentan los tiempos mayores. Por el contrario las figuras que relacionan la estación Corona CKRC, presentan los tiempos más pequeños.

El hecho de que la Margen Derecha presente los tiempos más altos es indicativo de que la rigidez aportada a esta margen por la obra de excedencias es determinante en su comportamiento. Fenómeno ya observado en las funciones de transferencia

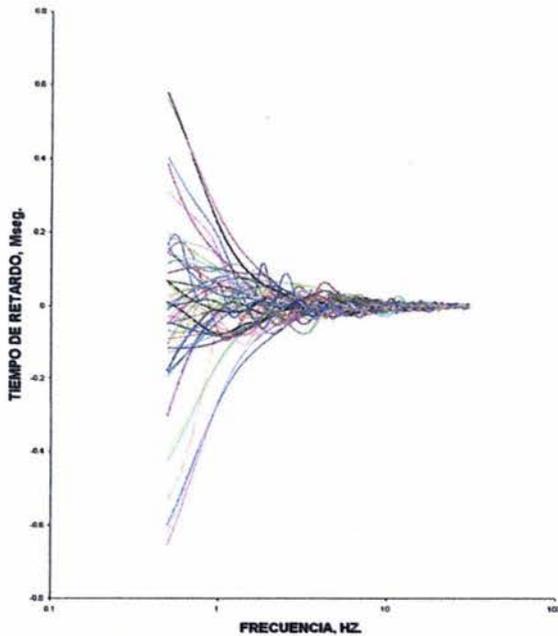


*Figura IV.46 Tiempo de Retardo
Media Cortina- Corona*

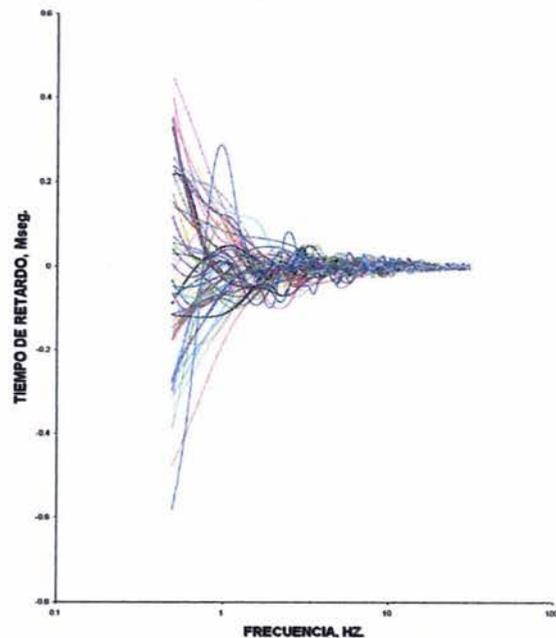


*Figura IV.47 Tiempo de Retardo
Margen Derecha- Margen Izquierda*

En las figuras que relacionan las estaciones no instaladas en la cortina, los tiempos son de los más altos. Hay que tomar en cuenta que en estas figuras están presentes las estaciones Margen Derecha y Subestación que como ya se vio presentan los tiempos mayores (Figs. IV.47- IV.49).



*Figura IV.48 Tiempo de Retardo
Subestación- Margen Izquierda*



*Figura IV.49 Tiempo de Retardo
Subestación- Margen Derecha*

Los sismos que registraron los tiempos máximos por cada figura, no presentan características comunes, lo que nos indica que en la transmisión de la energía sísmica son más determinantes las características de los materiales o la topografía de la boquilla que las características de los eventos.

Como se puede apreciar hasta aquí, algunos sismos por sus características resaltan del resto; uno de ellos, el 81, que provocó las mayores aceleraciones en la cortina, se generó a 66 Km de la presa a una profundidad de 23 Km, su magnitud fue de 5.6° y la aceleración máxima que provocó fue de 225.3 cm/s² que fueron por mucho superiores a las que causaron los demás sismos.

En los espectros de respuesta se puede observar que el sismo 81 presenta altos contenidos de energía para un rango de 3 a 15 Hz y por lo general el punto máximo en estas figuras se encuentra alrededor de 13.0 Hz. Las funciones de transferencia del sismo en cuestión muestran participación en modos superiores de vibración y la máxima amplificación se presentó de 1.5 a 3.0 Hz según cada figura. Las funciones de coherencia muestran valores cercanos a la unidad en un rango de 0.5 a 2.0 Hz.

Se puede asegurar que el comportamiento descrito en el párrafo anterior se debe a la cercanía del sismo a la presa, pues esto impide que las frecuencias con las que arriba a la estructura se filtren, como sucede con las de sismos lejanos. Las funciones de coherencia revelan, que los sismos cercanos arriban con más uniformidad que los sismos lejanos sin llegar al movimiento en fase como lo revelan las figuras de los ángulos de fase que presentan configuraciones distintas para cada correlación.

Frente a las costas de Michoacán se han presentado los sismos con las magnitudes de valor más grande registradas. El sismo 119, sismo representativo de la zona, se generó a 334 Km de la presa a una profundidad de 16 Km, su magnitud fue de 6.5 y ante este sismo la presa presentó el comportamiento que a continuación se describe.

Los espectros de respuesta muestran en general contenidos bajos de energía, en las márgenes se registraron valores concentrados de 5.0 a 10.0 Hz con el valor máximo alrededor de 5.0 Hz, mientras que en la presa el valor máximo se registró alrededor de 2.0 Hz. Las funciones de transferencia muestran una clara amplificación en la frecuencia característica de la presa, 2.0 Hz, más una segunda cresta alrededor de 8.0 Hz, también en estas figuras se nota una concentración de valores de 15.0 a 20.0 Hz. Las funciones de coherencia indican que todos los registros son estadísticamente independientes puesto que presentan valores menores que la unidad.

Otro sismo que sobresale por el comportamiento que tuvo la presa ante él fue el sismo 30. Este evento se generó en la trinchera mesoamericana frente a las costas de Guerrero a 161 km de la presa El Caracol, a una profundidad de 19 Km y una magnitud de 6.9 grados. Los espectros de respuesta de los registros de la cortina muestran niveles altos de energía, así como aceleraciones máximas alrededor de 2.0 Hz, por otra parte, la margen izquierda muestra niveles muy bajos con participación en modos superiores de vibración, pero la margen derecha presenta aceleraciones muy altas alrededor de los 2.0 Hz, incluso más altas que las registradas en la presa, esto debido a las características de la roca. Las

funciones de transferencia muestran amplificaciones máximas alrededor de 2.0 Hz y las funciones de transferencia muestran que los registros son estadísticamente independientes.

Los sismos 41 y 43, segundo y tercero en importancia por su magnitud en la zona de la plataforma oceánica frente a las costas de Guerrero, presentan similitudes con el sismo 30, pero en lo esencial discrepan. Los espectros de respuesta de los sismos mencionados presentan, también, niveles de energía bajos en la margen izquierda y altos en la derecha y demás estaciones. Para las funciones de transferencia las figuras se amplifican en las mismas frecuencias donde lo hacen las figuras del sismo 30; sin embargo, para los sismos 41 y 43 los puntos máximos se presentan después de 5.0 Hz. Las funciones de coherencia presentan para ambos sismos registros estadísticamente independientes.

El sismo 88 es por su magnitud, 7.5 grados, el tercero en importancia de los detectados en la presa. Se presentó a 195 Km de la presa a una profundidad de 21 Km. Los espectros de respuesta exhiben muy bajos niveles de energía y las funciones de transferencia muestran dos frecuencias donde se amplifican los movimientos, principalmente las figuras, 2.0 Hz como modo principal y el otro entre 3.0 y 5.0 Hz.

V CONCLUSIONES.

1.- El comportamiento dinámico de la presa ha sido satisfactorio. Esto se comprueba porque los mayores asentamientos que ha sufrido la cortina de la presa ocurrieron durante el primer llenado, a pesar de la fuerte actividad sísmica que la afecta. Lo que indica que la resistencia a esfuerzos cortantes en los materiales de la presa ha sido mayor a los inducidos por las fuerzas dinámicas.

2.- El azolve del vaso ocasionado por ser la primera presa en el cause del Río Balsas y la plataforma construida con rezaga colocada aguas abajo de la cortina es determinante en el comportamiento dinámico de ésta, pues al estar mas confinada aumenta su rigidez. Esto se comprueba con el periodo fundamental de la presa, pues, el calculado en los estudios preliminares fue de 6.0 s, mientras que el real es de aproximadamente 5.0 s.

3.- El efecto de rigidización por el aumento de volumen de la plataforma aguas abajo y el azolve aguas arriba, así como la ubicación de la presa, a aproximadamente 130 Km de la costa de Guerrero y a más de 300 Km de la de Michoacán, ha provocado, según el lugar de generación de los sismos, el comportamiento que a continuación se describe:

- a) Los sismos que arriban de la costa de Michoacán, presentan por lo general, magnitudes mayores a 6° y son superficiales, pues sus profundidades no rebasan los 30 Km. Los espectros de respuesta muestran bajos contenidos de energía concentrada en frecuencias de 2.0 Hz en adelante. Por su parte, las funciones de transferencia muestran 2.0 Hz como frecuencia fundamental de la presa pues es en este valor donde se encuentra la mayor amplificación de los movimientos.
- b) Para los sismos que se generan en plataforma continental, la respuesta de la presa depende de la distancia epicentral. En general, para los sismos que se generan a una distancia mayor a 70 Km cualquiera que sea su magnitud o profundidad, las aceleraciones espectrales son medias o bajas en comparación con las máximas registradas. Las funciones de transferencia de las estaciones instaladas en la presa, muestran para estos sismos, que el modo fundamental de vibración se encuentra alrededor de 2.0 Hz.

Por otro lado, los sismos que se generan a menos de 70 km de la presa tienen mayor participación en modos superiores de vibración de la cortina, pues en los espectros de respuesta se mantienen aceleraciones altas en un rango de 2.0 a 10.0 Hz. Las funciones de transferencia que relacionan las estaciones instaladas en la presa, muestran para estos sismos, en alrededor de 2.0 Hz, la frecuencia fundamental de vibración, mientras que en las demás funciones de transferencia la frecuencia fundamental no aparece bien definida, pues, aparte de la frecuencia de 2.0 Hz hay amplificación importante de movimientos para diferentes frecuencias después de 3.0 Hz. Si los eventos tienen magnitud menor que 5° , las aceleraciones espectrales son medias o bajas. En cambio, si la magnitud es mayor que 5° las aceleraciones espectrales son altas.

Se puede asegurar que el comportamiento descrito en este inciso se da por la cercanía de los sismos, pues, esta condición no permite que frecuencias altas se filtren como sucede a los sismos lejanos.

- c) Los sismos que se generan en plataforma oceánica frente a las costas de Guerrero, arriban con aceleraciones espectrales concentradas de 5.0 a 15.0 Hz. Las funciones de transferencia presentan tres modos de vibración alrededor de 2.0, 5.0 y 15.0 Hz, siendo cada uno de éstos el principal, según la correlación. Esto no se cumple para el sismo 30 que es el único sismo de la región con magnitud mayor que 6°.
- 4.- La frecuencia natural de vibración de la cortina se encuentra alrededor de 2.0 Hz, el cual es el valor encontrado en la mayoría de las funciones de transferencia que relacionan alguna de las estaciones alojadas en la cortina; sin embargo, este resultado no es concluyente pues para las funciones de transferencia Subestación-base y Margen izquierda- Base el valor característico de la frecuencia es 3.0 HZ.
- 5.- Los registros acelerográficos muestran que las aceleraciones mayores se presentan en la corona y que las de media cortina superan, por poco, a las de la base, siendo éstas similares, lo que nos indica que la cortina vibra de manera uniforme.
- 6.-Las aceleraciones de la componente transversal son mayores que las de las componentes longitudinal y vertical, esto nos permitió analizar en forma adecuada las características de vibración de la presa ya que en este trabajo se consideran las tres componentes estadísticamente independientes entre sí. Sin embargo, es importante observar el comportamiento de la presa ante el acoplamiento de las tres componentes, por lo que se recomienda llevar a cabo este trabajo.
- 7.-Existe una gran diferencia entre las características de vibración de las márgenes. Esto se debe a que en la margen derecha se encuentran alojada la obra de excedencias, lo que mejora su rigidez, además de que en esta margen predominan los estratos de lutita, mientras que en la izquierda lo hacen los de areniscas.
- 8.-El sismo que mayor aceleración ejerció sobre la presa fue el 81, sismo superficial que ocurrió el 23 de Mayo de 1994 a una profundidad de 23 Km, con epicentro a 66 Km de la presa en el estado de Guerrero y con una magnitud de 5.6. La aceleración máxima fue de 225.3 cm/s^2 , y causó en la cortina un reacomodo dinámico de los materiales sin provocarle asentamientos considerables, como atestigua la instrumentación geotécnica y las inspecciones realizadas después del sismo.
- 9.- El sismo 30 con epicentro a 161 Km de la presa, profundidad de 19 Km y magnitud de 6.9° , provocó una amplificación considerable en 2.0 Hz, que como se indicó, es la frecuencia fundamental de la presa. Este sismo es representativo de la región donde se generó, las costas de Guerrero, pues, las características de vibración correspondientes a este sismo son similares a las de otros sismos de la región, excepto por la amplificación mencionada. Si se compara el sismo 30 con el sismo 32, que se presentó en la misma región, la diferencia en la magnitud es de solo 2°, pero esta diferencia significó, un incremento de casi 10 veces la amplificación en la frecuencia fundamental de la presa. Al ser el sismo 30 el único de la región con magnitud mayor a 6°, el fenómeno descrito podría ser una excepción o una regla. En el segundo de los casos, los sismos de magnitud mayor que 6° provocarían una importante participación en el modo fundamental de la presa.

Aunque hay que tomar en cuenta que la escala con que se miden las magnitudes sísmicas es logarítmica, por lo que, para que un sismo aumente un grado, se necesita una gran cantidad de energía.

10.- Para algunos sismos someros y con magnitud mayor que 4.8° la presa casi se mueve en fase en el rango de la frecuencia de 0.5 a 2.0 Hz, como lo atestiguan las funciones de coherencia, que presentan valores cercanos a la unidad, y los ángulos de fase, que muestran una relativa similitud en forma. Como se puede ver, es un rango muy pequeño. La casi inexistencia del movimiento en fase se da por las siguientes causas: la geometría de la boquilla, la diferencia en los materiales que forman los márgenes, el aumento gradual del confinamiento de la cortina y la directividad de los sismos.

11.- La falla F-4 hasta ahora se ha comportado como una falla completamente inactiva; sin embargo, es necesario seguir observándola.

12.- Es necesario seguir monitoreando los registros sísmicos para verificar la evolución de la directividad en la zona de la presa.

13.- Para el diseño sísmico de la cortina de la presa, se determinó la aceleración óptima (ref. 6); esta aceleración varía según la tasa de actualización y el parámetro M, que toma en cuenta destrucción de ciudades, zonas agrícolas o inestimables como pérdidas de vidas humanas. El valor mínimo que toma la aceleración óptima es de 491 cm/s^2 . La aceleración máxima registrada fue de 225.3 cm/s^2 y, como se puede ver, está muy por debajo del valor de la aceleración óptima. Para alcanzar o superar la primera cifra mencionada tendría que ocurrir un sismo de magnitud muy alta y somero, situación que podría suceder en las costas de Michoacán; sin embargo, por la distancia que existe entre la costa y la presa, sucedería lo que con todos los sismos de aquella región, que arriban a la estructura con niveles de energía muy bajos y concentrado en frecuencias altas, por lo que se puede afirmar que el buen funcionamiento de la presa está asegurado.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1- CFE, COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS CONSTRUIDAS EN MÉXICO CONTRIBUCIÓN AL XV CONGRESO INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS VOL. 2, LOUSANNE SUIZA, 1985.
- 2- CFE, PROYECTO HIDROELÉCTRICO ING. RAMÍREZ ULLOA, MÉXICO.
- 3- HERNÁNDEZ ROMERO REGINALDO, PRESA CARLOS RAMÍREZ ULLOA INFORME DE COMPORTAMIENTO, SUBGERENCIA DE COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS, CFE, MÉXICO.
- 4- HERNÁNDEZ REGINALDO, COMPORTAMIENTO SISMICO DE PRESAS DE TIERRA A PARTIR DE PROTOTIPOS, TESIS DE MAESTRIA, 2000, FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM, MÉXICO.
- 5- CFE, EFFECTS OF THE SEPTEMBER 1985 EARTHQUAKES ON DAMS BUILT ON THE BALSAS RIVER, CENTRO EDITORIAL DE LA DIRECCIÓN GENERAL CFE, MÉXICO, 1987
- 6- LÓPEZ G, ESTUDIOS PRELIMINARES PARA EL DISEÑO SÍSMICO ÓPTIMO DE LA CORTINA DEL CARACOL, INFORME A CFE, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, MÉXICO, 1978.
- 7- BAZAN. E. Y ESTEVA. L, RIESGO SÍSMICO EN EL CARACOL, INFORME A CFE, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, MÉXICO, 1978.
- 8- HANUS VACLAV Y VANEK JIRI, SUBDUCTION OF THE COCOS PLATE AND DEEP ACTIVE FRACTURE ZONES OF MÉXICO, GEOFÍSICA INTERNACIONAL VOL 17, 1978, MÉXICO.
- 9- BOLT BRUCE, EARTHQUAKES, W. H. FREEMAN AND COMPANY, SAN FRANCISCO, 1979.
- 10- NAVA ALEJANDRO, TERREMOTOS, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, MÉXICO, 1987.
- 11- MARSAL RAÚL Y RESÉNDIZ DANIEL, PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO, EDITORIAL LIMUSA, MÉXICO, 1979.
- 12- FIGUEROA. J, CATÁLOGO DE SÍSMOS OCURRIDOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA DE 1970 A 1982, PUBLICACIÓN NÚM. 478 DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM, MÉXICO, 1983.

13- HSU HWEI, ANÁLISIS DE FOURIER, FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO S A , BOGOTÁ, 1973.

14- RANDALL R. B., APPLICATION OF B & K EQUIPMENT TO FREQUENCY ANALYSIS, 1977.

15- BOHUMIL PSENICKA, PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES, UNAM FAC. DE INGENIERÍA, MÉXICO, 1994.

16- CONNOR F. R. , RUIDO, EDITORIAL LABOR, S.A. , BARCELONA, 1985.

17- CONNOR F. R. , TRANSMISIÓN DE ONDAS, EDITORIAL LABOR, S.A. , BARCELONA, 1975.

18- SICHLE NEIL WELCH JOHN, AERONÁUTICA MODERNA, PARANINFO, MADRID, 1985.

19- BECK ARNOLD, PALABRAS Y ONDAS, EDICIONES GUADARRAMA, MADRID, 1975.

20- HERNÁNDEZ REGINALDO ANESSE: PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM, MÉXICO.

PAGINAS DE INTERNET.

- [http// www. Prosig.com/signal procesing/correlation.html](http://www.Prosig.com/signal%20procesing/correlation.html)
- [http// www. Spol.eee. strath.ac.uk/~interact/fourier.html](http://www.Spol.eee.strath.ac.uk/~interact/fourier.html)
- [http// dukemil.egr.duke.edu/ultrasound/k-space/node1.html](http://dukemil.egr.duke.edu/ultrasound/k-space/node1.html)
- [http// www. cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)