

01161

1

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

*Tesis:*

**CRISIS99.1. SISTEMA DE CÓMPUTO PARA EL  
CÁLCULO DE PELIGRO SÍSMICO**

*Presentada por:*

**ARMANDO AGUILAR MELÉNDEZ**

*para obtener el grado de:*

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ESTRUCTURAS)**

*Director de tesis:*

**DR. MARIO ORDAZ**



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.

## ADVERTENCIA

Mi optimismo todavía no llega a grado de ingenuidad, por eso sospecho que de nuevo serán muchas las personas quienes tan solo leerán las dedicatorias. El de nuevo significa que desde mi tesis de licenciatura aclaré que sabía de la poca costumbre de leer tesis, y allí mismo establecí una posible explicación de tal comportamiento. Sin embargo, mi optimismo se debe a que afortunadamente no soy un reincidente más, pues la parte principal del presente trabajo de investigación, es un programa de cómputo el cual ya tiene diversos usuarios internacionales. Por ello, esta vez no hizo falta comprometer a mi mamá para que leyera algún capítulo de mi tesis.

Mi director y yo consideramos que sería bueno iniciar el cambio de formato de tesis, de manera que en lugar de entregar un libro baste con dar un disco compacto. Finalmente optamos por imprimir el texto que complementa el programa de cómputo, y que bien puede incluirse en un disco compacto junto a CRISIS99. Afortunadamente el texto impreso me permitió colocar las dedicatorias exigidas por mi mamá.

AAM

A :

AMELIA CAMPOS RIOS  
ARMANDO AGUILAR LARIOS  
ARACELI MELÉNDEZ AVIÑA  
ARACELI AGUILAR MELÉNDEZ  
GRISSEL AGUILAR MELÉNDEZ  
NISAO OGATA AGUILAR  
JUM-KO OGATA AGUILAR  
JACOBA AVIÑA CUENCA  
BUENAVENTURA CAMPOS CAMACHO  
AMELIA RIOS CAMACHO  
IRMA, SALUD, BIBIANA, CRUZ, GORE  
JUAN, GERO, BETO, SEVE, PANCHO, BENJA, TOLLÍN, DAVID  
YUNUEM, HUEMAN, ISAAC, NOE, ATZIN, SANICTÉ  
COCO Y RAFA

Por todo, excepto porque:

- 1) Mi esposa a pesar de que la amo tanto no me mantiene y no me llevó con ella a Japón.
- 2) Mi papá no me invitó ni a Francia ni a Nueva York.
- 3) Mi mamá no se conforma con que ya esté casado y ahora hasta nietos quiere que le de.
- 4) Mi hermana mayor inició su doctorado en la Universidad de California en Riverside y con ello siguen los malos ejemplos en la familia.
- 5) Mi hermana menor no aprende de los hermanos e insiste en casarse.
- 6) Mi cuñado no me ha llevado a uno solo de sus viajes previos a su examen doctoral.
- 7) Mi sobrina no me ha invitado a Disneylandia.
- 8) Mi abuelita no me ha enseñado el truco para lidiar con tantos hijos, nietos y bisnietos y seguir teniendo tanta paciencia.
- 9) No me ha enseñado mi suegro sus secretos de la política.
- 10) Mi suegra le enseñó tan bien a leer y hacer cuentas a Amelia, que no hay forma de ganarle.
- 11) Mis cuñadas le recomiendan a Amelia que se porte mal.
- 12) Mis cuñados no me avisaron que me casaba con la más regañona de la familia.
- 13) Mis sobrinos no se han escapado de sus papás para visitarnos en Tuxpan.
- 14) Los papás de mis sobrinos escogieron un sitio lejano para vivir.

Agradezco especialmente:

Al Dr. Mario Ordaz por la oportunidad de realizar mi tesis bajo su excelente dirección.

Al M. en I. Jorge Arboleda por su importante colaboración.

A los sinodales por sus valiosas sugerencias con relación al presente trabajo.

A Rodrigo Gómez, Arturo Pérez, Luis Ibarra, Mauricio Ayala, Misael Requena, Marcos García, Manuel Martínez y Omar Villegas. Por formar un equipo genial de trabajo y de parranda (preocúpense en México si integrantes de ese grupo se vuelven a reunir).

Al CONACYT por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

Y al Instituto de Ingeniería de la UNAM por la ayuda económica brindada para la realización del presente trabajo.

## RESUMEN

CRISIS99 es un sistema de cómputo que calcula peligro sísmico en regiones. El programa opera bajo ambiente Windows. Los datos básicos requeridos son: geometría de las fuentes, sismicidad de las fuentes, y relaciones de atenuación.

La geometría de las fuentes se puede modelar como: 1) fuente área, mediante un polígono con al menos tres vértices, con coordenadas en longitud, latitud y profundidad para cada vértice. Este tipo de fuente se puede usar, por ejemplo, para modelar placas que subducen; 2) Fallas, con el uso de polilíneas; y 3) fuentes puntuales, que se incluyeron para fines académicos.

La sismicidad de las fuentes se puede modelar como un proceso de Poisson o como un proceso del temblor característico. En el primero, las relaciones de magnitud-frecuencia son curvas Gutenberg-Richter suavemente truncadas, mientras que para el segundo, el programa asume que las magnitudes tienen distribución Gaussiana.

Los cálculos de peligro sísmico se pueden realizar simultáneamente para diversas medidas de intensidad, por ejemplo,  $a_{max}$ ,  $v_{max}$  y varias ordenadas espectrales. Las leyes de atenuación requeridas por el programa se deben de establecer en forma de tablas, que contengan los valores medios de las medidas de intensidad como una función de la magnitud, y de la distancia focal. En una sola ejecución del programa se pueden usar varios modelos de atenuación.

CRISIS99 esta orientado al cálculo de peligro sísmico de grandes regiones. Las estimaciones de peligro sísmico se hacen para puntos de una malla que no es necesariamente rectangular. CRISIS99 incluye un módulo de post-procesado que puede usarse para visualizar los resultados, dados en términos de mapas de medidas de intensidad para periodos de retorno arbitrarios o curvas de tasa de excedencia para un sitio elegido, que no es necesariamente un punto de la malla original de sitios. Es posible también generar espectros de peligro uniforme.

## ABSTRACT

CRISIS99 is a computer system, operating under Windows, to compute seismic hazard in extended regions. Basic input data are: geometry of the sources, seismicity of the sources, and attenuation relations.

Source geometry can be modeled as: 1) area sources, using a polygon with at least three vertex; longitude, latitude and depth must be given for each vertex, so this type of source can be used to model, for instance, dipping plates; 2) fault sources, using polylines; and 3) point sources, included essentially for academic purposes.

Seismicity of the sources can be modeled either as Poisson or characteristic earthquake processes. In the first, magnitude-frequency relations are smoothly truncated Gutenberg-Richter curves, whereas for the second, the program assumes Gaussian distribution of the magnitudes.

Hazard computations can be performed, simultaneously, for several intensity measures, for instance,  $a_{max}$ ,  $v_{max}$ , and several spectral ordinates. Required attenuation laws are given in the form of tables containing the median values of the intensity measures, as a function of magnitude and focal distance. Several attenuation models can be used in the same run.

CRISIS99 is oriented to computing seismic hazard in extended regions. Hazard estimations are made for points in a grid that is not necessarily rectangular. CRISIS99 includes a post-processing module that can be used to visualize the results, given in terms of maps of intensity measures for arbitrary return periods or exceedance rate curves for a selected site, not necessarily a point in the original grid of sites. Also uniform-hazard spectra can be produced.

## ÍNDICE

I. Introducción	1
II. Pronóstico de sismos	2
III. Pronóstico de movimientos del terreno mediante CRISIS99.1	9
III.1. Pantalla principal	9
III.2. Pantalla de malla de sitios de cálculo	13
III.3. Pantalla de mapas	16
III.4. Pantalla de geometría de fuentes sísmicas	17
III.5. Pantalla de sismicidad de fuentes sísmicas	22
III.5.1. Sismicidad considerada como proceso de Poisson	22
III.5.2. Sismicidad considerada como proceso del temblor característico	30
III.6. Pantalla de leyes de atenuación de intensidades sísmicas	33
III.6.1. Terreno firme	34
III.6.2. Efectos locales	35
III.7. Pantalla de intensidades	38
III.8. Pantalla de parámetros globales	40
III.9. Pantalla de resumen de fuentes sísmicas	42
III.10. Pantalla de validación de datos	43
III.11. Pantalla de selección de archivos de resultados	44
III.12. Pantalla de inicio de cálculo de <i>peligro sísmico</i>	45
III.12.1. Modelo de <i>peligro sísmico</i>	47
III.12.2. Integración espacial en el cálculo de <i>peligro sísmico</i>	48
III.13. Pantalla de éxito en el cálculo de <i>peligro sísmico</i>	49
III.14. Pantalla del Post-Procesador <i>Map Generator</i> de CRISIS99.1	50
III.14.1. Influencia de la malla de cálculo en los mapas de <i>peligro sísmico</i> realizados con el post-procesador <i>Map Generator</i> de CRISIS99.1	51
III.14.2. Influencia del método numérico de integración espacial en resultados de <i>peligro sísmico</i>	58
III.14.3. Influencia de la forma de la fuente sísmica	64
III.14.4. Uso de diferentes leyes de atenuación para una fuente	67

III.15. Pantalla de gráficas de leyes de atenuación	68
III.16. Cálculo de peligro sísmico en regiones	69
III.16.1. Datos	69
III.16.2. Resultados	72
III.16.2.1. Mapas de intensidades sísmicas	72
III.16.2.2. Tasas de excedencia de intensidades por fuente	75
IV. Comentarios finales	76
Referencias	78
Apéndice A. Formato de archivos	82
Apéndice B. Archivos de resultados	85



## I. Introducción

Televisa dirá que los daños son muy graves. Televisión Azteca que ellos fueron los primeros en informar. TV UNAM se deslindará de cualquier noticia y llamará a sesión urgente. Los especialistas harán análisis detallados y el resto de la gente tendrá su conclusión: afortunado o priísta. Así son los días con sucesos extraordinarios.

Las sociedades saben que es normal que se presenten eventos extraordinarios, pero en general también aceptan la importancia de prepararse para enfrentar los acontecimientos peligrosos del futuro. En ese afán de prepararse para el futuro las sociedades identifican las fuentes de peligro: PRD, PAN, PRI, CGH, FMI, Papa, fenómenos naturales, etc.

Ciertos movimientos del terreno han causado grandes daños a las sociedades. Por tal razón se sabe que los sismos son peligrosos. Pero dicha información no es suficiente. Se requiere estimar los peligros que enfrentarán las sociedades por la presencia de sismos.

En el mundo intervienen numerosas personas en estudios referentes a sismos. Con la idea de sistematizar el conocimiento sísmico se han establecido diversas áreas de estudio. Se ha requerido también fijar términos técnicos. Por ejemplo, para fines de ingeniería actualmente se establece diferencia entre *peligro sísmico* y *riesgo sísmico*. *Peligro sísmico* se refiere a la estimación de futuras intensidades sísmicas, es decir, futuro tamaño de sismos, mientras que *riesgo sísmico* incluye estimación de futuras pérdidas, debidas a la ocurrencia de sismos.

El presente texto describe conceptos empleados en el desarrollo de un sistema de cómputo para el cálculo de *peligro sísmico*. El sistema de cómputo se denominó CRISIS99 y se desarrolló en el Instituto de Ingeniería, como parte de mi trabajo de investigación final. Dicho sistema de cómputo emplea un método probabilista para estimar *peligro sísmico*. CRISIS99 permite un empleo más eficiente de la información respecto a sismos. Posee también herramientas gráficas que facilitan la generación del archivo de datos y la interpretación de resultados.

## II. Pronóstico de sismos

### *Tenis Nike y movimientos del terreno*

El movimiento del terreno que producen un par de tenis *Nike* preocupa a las hormigas porque atenta contra sus habitaciones. Movimientos mucho más grandes del terreno preocupan al hombre porque atenta contra sus edificios. Eventualmente dichos movimientos del terreno son suficientemente grandes para producir numerosas pérdidas materiales, económicas y en casos extremos, pérdidas humanas.

### *Edificios ante movimientos grandes del terreno*

La presencia de movimientos del terreno ha sido frecuente en determinadas zonas del mundo. En algunos sitios, tales movimientos del terreno han provocado daños en construcciones. Pero los daños no son los mismos en todos los edificios. Se ha observado que el tipo de daño depende de las propiedades del edificio y de las características del movimiento del terreno. A partir de tal experiencia el hombre ha procurado mejorar sus construcciones (De Buen, 95; Riobóo, 95; Hernández, 95).

El conocimiento adquirido a través del tiempo se ha incorporado en las construcciones nuevas. A pesar de ello, aún no es posible garantizar que cualquier edificio que se diseñe con normas actuales se comportará adecuadamente ante cualquier movimiento del terreno. Tal limitación se debe a la imposibilidad de responder con precisión dos preguntas generales: **¿Cuáles serán las características del próximo movimiento del terreno?** y **¿Cómo se comportarán los edificios ante tal movimiento del terreno?**

### *Fecha del próximo sismo*

A pesar de lo que puedan decir Jaime Maussan o adivinadores similares, pronosticar la hora, el día y el lugar en que ocurrirán todos los grandes movimientos naturales del terreno aún no es posible (Allen, 95; Wesnousky, 97). Lo que sí se puede afirmar, es que la corteza terrestre está dividida en grandes bloques irregulares y de diferentes tamaños, que se mueven entre sí a distintas velocidades y direcciones. Por ello, algunas placas se han encontrado con otras y se ha producido fricción entre ellas. Eventualmente dicha fricción impide que se sigan desplazando. No obstante, el

empuje persiste y la fuerza de fricción entre las placas aumenta, hasta que se supera la resistencia de la roca. Al originarse el rompimiento brusco de la roca se produce un movimiento ondulatorio del terreno, que se conoce como temblor de tierra, sismo o terremoto (del lat. *Terra*, tierra y *motus*, movimiento).

Los satélites que transmiten los programas de televisión son los mismos que miden el movimiento relativo de las placas tectónicas (Roldán *et al*, 88; Hudnut *et al*, 96). Las mediciones hechas por dichos satélites confirman que las placas que forman la corteza terrestre se mueven ( la placa de Cocos con respecto al continente varía desde unos 5 cm/año cerca de Manzanillo hasta 7 cm/año en Chiapas; Singh *et al*, 94). Cuando la mayor parte de la sociedad tenga presente esta última información, entenderá el origen de la mayoría de los sismos y además sabrá que seguirán ocurriendo, por lo que estará menos expuesta a los líderes eclesiásticos y a los Jaimes Maussanes.

Las peculiaridades de los movimientos del terreno dependen de diversos factores:

- A) El **origen del sismo**;
- B) El **camino recorrido** por la propagación del movimiento ondulatorio del terreno;
- C) Las **características del suelo**, y;
- D) La **distancia desde el origen** del sismo.

A su vez el origen de un sismo puede ser:

- A.1) Tectónico;
- A.2) Volcánico, y;
- A.3) Artificial.

Por su parte los sismos tectónicos cambian en función de:

- A.1.1) La dirección en que se movieron las placas;
- A.1.2) El tiempo en que se movieron;
- A.1.3) La profundidad a la que se movieron;
- A.1.4) La velocidad con que se movieron, y;
- A.1.5) El tamaño de las secciones de las placas que se movieron.

Respecto al camino recorrido el movimiento del terreno se modifica según:

- B.1) Los tipos de suelo o roca que recorrieron las ondas sísmicas, y;
- B.2) Los accidentes topográficos que cruzaron las ondas.

La forma en que se moverá el terreno depende también de:

- C.1) Las propiedades del suelo, y;
- C.2) El espesor que tiene cada estrato de suelo.

Finalmente, la distancia desde el origen del sismo suele ser un factor determinante en el tamaño del movimiento del terreno.

La información disponible respecto a terremotos indica que cerca del 90% de los sismos que ocurren en el mundo, se originan en los bordes de las grandes placas que forman la corteza terrestre (sismos interplacas). El resto se originan en el interior de las placas (sismos intraplacas).

A pesar de que sabemos que seguirán ocurriendo sismos ¿Qué día ocurrirá el próximo sismo? ¿Dónde ocurrirá? ¿De qué tamaño será? y ¿Cuánto durará? Son preguntas cuyas respuestas aún no se pueden responder con precisión. Sin embargo, las numerosas y crecientes investigaciones interdisciplinarias que respecto a sismos se realizan en el mundo, permiten responder mejor dichas preguntas. Parte de tales investigaciones se ha orientado a determinar zonas con potencial sísmico. Por ejemplo, hay algunas zonas sísmicas bien estudiadas como la denominada falla de San Andrés, en California. Pero zonas sísmicas en el mismo estado y muy cercanas a la de San Andrés, como la que generó el sismo de Northridge en 1994, se conocen poco (Ward, 94). Es decir, aún no se conocen con suficiente detalle las propiedades estáticas y dinámicas de las muy diversas capas que constituyen la Tierra. Por ello, para estimar cuántos, de qué tamaño y cuándo ocurrirán movimientos importantes del terreno, es todavía necesario recurrir a modelos probabilistas.

Si en el futuro próximo el nuevo conocimiento generado permite estimar, no adivinar, hasta la hora en que ocurrirá un sismo, será posible evacuar a los ocupantes de edificios. Sin embargo, aún en esas condiciones seguirá siendo importante evitar que estos y sus contenidos se dañen seriamente. Por tales razones, se realizan numerosos estudios orientados a responder mejor, **¿cómo se comportarán los edificios ante futuros movimientos del terreno?**

#### *Nuevos edificios en sitios con presencia frecuente de sismos*

Construir una casa o edificio implica difíciles actividades para los involucrados. El dueño, el constructor, el diseñador y el asegurador, deben, respectivamente:

- 1) Obtener suficiente dinero;
- 2) Conseguir albañiles, plomeros y carpinteros aptos;
- 3) Estimar cargas y características del terreno, y;
- 4) Calcular la prima del seguro.

Sin embargo, si en el sitio en que se realizará la construcción han ocurrido sismos, se agregan las siguientes dificultades:

- 1) El dueño tendrá que conseguir más dinero:
- 2) El constructor poner más cuidado en la supervisión:
- 3) El diseñador considerar la posible presencia de sismos, y;
- 4) El asegurador estimar los nuevos peligros sobre el edificio.

Pero quienes se enfrentan a mayores incertidumbres son: el diseñador y el asegurador. Porque como se mencionó anteriormente, no se sabe con certeza cuándo ocurrirá el próximo sismo, ni cuál es el sismo más grande que se presentará en los próximos años. Sin embargo, el diseñador y el asegurador deben considerar uno o varios movimientos del terreno que podrán mover al edificio. Dicha elección tiene implicaciones económicas. Por ejemplo, se puede diseñar con las normas de la ciudad de México un edificio que se construirá en la ciudad de Monterrey (alejada 650 km al norte de la ciudad de México). Sin embargo, muy probablemente resultará un edificio con columnas, traveses y cimentación grandes. Con tamaño suficiente para resistir un sismo como el de la ciudad de México, del 19 de septiembre de 1985. No obstante, quizás no se presente en Monterrey ningún sismo tan grande, durante los 50 años de vida útil del edificio. Por lo que se gastaría dinero en columnas, traveses y cimentación grandes, que no eran necesarios. Reflexiones como estas últimas han llevado a proponer filosofías de diseño, que establecen que los edificios deberán diseñarse para que resistan:

1. Sin daño niveles menores de movimiento sísmico (estado límite de servicio);
2. Sin daño estructural, aunque posiblemente con algún tipo de daño no estructural, niveles moderados de movimiento sísmico (estado límite de daño), y;
3. Sin colapso, aunque con algún tipo de daño estructural y no estructural, niveles mayores de movimiento sísmico (estado límite de seguridad: Terán-Gilmore, 96).

Es decir, se aceptan daños de distintos grados en edificios. Pero en ningún caso el edificio puede caerse y provocar la muerte de personas. Sin embargo, para lograr que los edificios no se derrumben se debe estimar primero cuáles serán los movimientos del terreno que se presentarán en cada sitio, y con qué frecuencia ocurrirán.

*Elección de movimientos del terreno para el diseño de edificios*

Las normas de cada país establecen los requisitos mínimos con que habrán de diseñarse los edificios. Los gobiernos se encargan de promover la realización de tales normas. Al hacerlo ayudan en la toma de decisiones a los ingenieros y dan mayor seguridad a dueños y ocupantes de edificios. Dichas normas contienen parámetros que permiten estimar efectos en estructuras debidos a sismos. Por ejemplo, las aceleraciones que pueden presentarse en los edificios durante sismos grandes. Uno de los procesos empleados con frecuencia para determinar dichas aceleraciones, que se utilizan para estimar fuerzas sísmicas de diseño, se puede resumir en el siguiente diagrama:

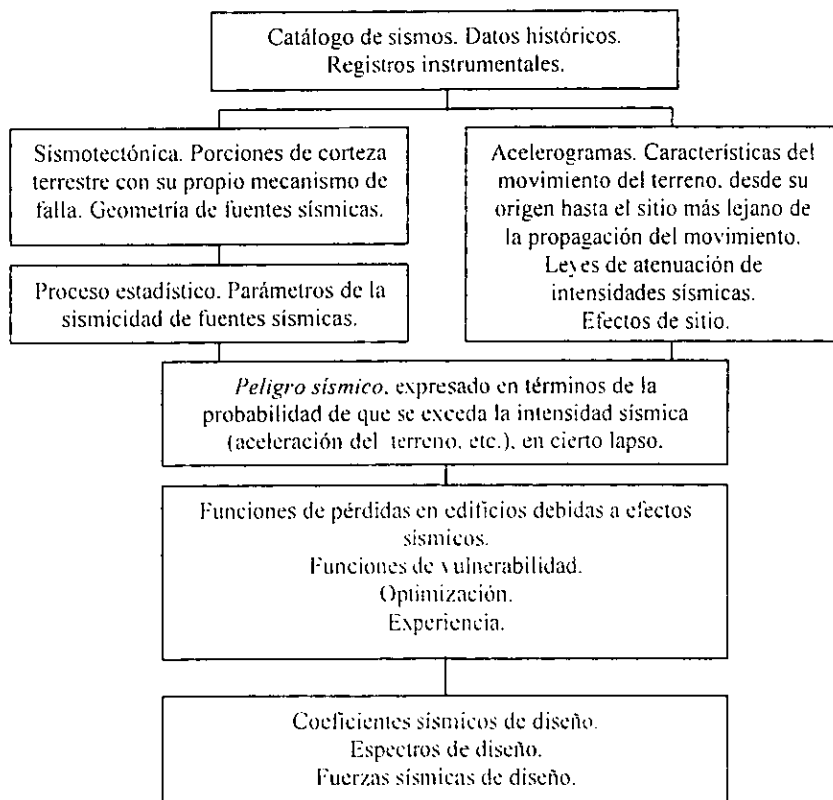


Fig. II.1. Diagrama para el cálculo de fuerzas sísmicas requeridas en el diseño de edificios.

*Predicción actual de sismos*

La determinación de las fuerzas sísmicas para diseñar edificios es muy importante. Sin embargo, para lograrlo se requiere estimar primero el tamaño o intensidad de los futuros movimientos del terreno que generarán tales fuerzas sísmicas. Por tal motivo, aparece la necesidad de mejorar las herramientas involucradas en el pronóstico de sismos. Con tal idea surge el presente trabajo, que consiste en una nueva versión del programa CRISIS denominada CRISIS99, el cual calcula *peligro sísmico*. Se conoce por *peligro sísmico* a la descripción probabilista de las intensidades de los temblores que pueden afectar a un sitio dado. CRISIS99 calcula tasas de excedencia de intensidades sísmicas (aceleraciones máximas del terreno u ordenadas de los espectros de respuesta). La tasa de excedencia es el número medio de veces en que un evento se presenta en determinado tiempo. Así, la tasa de excedencia de las intensidades indican el número medio de veces en que en determinado sitio se presentan intensidades mayores o iguales a una dada. La tasa de excedencia es también el inverso del periodo de retorno. Por ejemplo, al realizar cálculos con CRISIS99 se puede determinar que en el terreno firme de la ciudad de México la intensidad de 50 gal tiene una tasa de excedencia de 0.01 (1/año), es decir, se presentarán los 50 gal 0.01 veces al año. Por lo tanto, la intensidad de 50 gal se presentará una vez cada 100 años.

Con CRISIS99 es posible obtener espectros de peligro uniforme, definidos como espectros cuyas ordenadas tienen el mismo periodo de retorno. Dichos espectros son de gran ayuda para los ingenieros que habrán de tomar decisiones en el diseño de edificios, porque describen los efectos que es posible esperar en las estructuras por la presencia de movimientos del terreno. De hecho, se considera que una de las formas más racionales de seleccionar espectros de diseño es a partir de espectros de peligro uniforme (Miranda *et al*, 99). Con la ayuda de los espectros de diseño es posible calcular la resistencia lateral que deberán tener las estructuras, para soportar los efectos generados por movimientos del terreno.

CRISIS99 posee características orientadas a facilitar el cálculo de peligro sísmico. Con CRISIS99 y su post-procesador, es posible obtener diversos resultados gráficos, por ejemplo: mapas de intensidades sísmicas para cualquier periodo de retorno.

La versión anterior de CRISIS99 está en inglés porque dicho programa se incluyó dentro de un paquete de programas de sismología, que se distribuyó inicialmente entre usuarios con dominio

del idioma inglés. Por ser CRISIS99 una continuación del programa CRISIS se decidió hacer también en inglés los letreros del nuevo programa.



### III. Pronóstico de movimientos del terreno mediante CRISIS99.1

#### III.1. Pantalla principal

Conceptualmente, el análisis probabilista de peligro sísmico no ha cambiado desde los desarrollos hechos por Esteva y Cornell en la década de los sesentas (Ordaz, 97 ; Coppersmith y Youngs, 90). De tal modo que para calcular *peligro sísmico* se requiere aún determinar:

- 1) Las posibles **fuentes de sismos** que puedan afectar al sitio en estudio;
- 2) La **tasa de recurrencia de sismos** de todas las magnitudes, hasta la máxima en cada fuente, y;
- 3) La **atenuación de movimientos fuertes del terreno**, como una función de la magnitud del sismo y de la distancia del origen del sismo al sitio en estudio.

Por ello, en esencia, la información que se obtiene en los pasos anteriores es la requerida por el programa CRISIS99 para estimar *peligro sísmico*. Sin embargo, lo que sí ha mejorado de manera importante desde los sesentas, es la habilidad para estimar los parámetros que intervienen en el análisis probabilista de *peligro sísmico* (Coppersmith y Youngs, 90).

El modelo probabilista empleado por CRISIS99 para calcular *peligro sísmico* presenta numerosas ventajas, porque permite involucrar incertidumbres presentes en el conocimiento del fenómeno sísmico. Además, la sencillez del modelo probabilista otorga mayor control de los parámetros involucrados (Allen, 95).

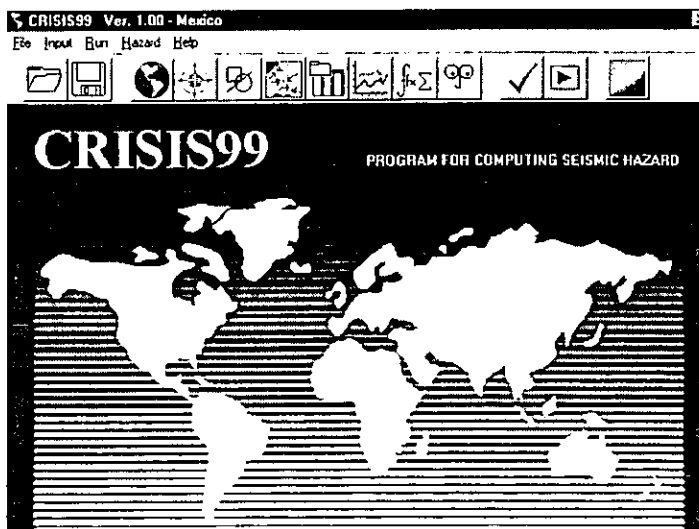


Fig. III.1.1. Pantalla principal del programa CRISIS99

CRISIS99 calcula tasas de excedencia de la intensidad para un sitio o una región. Las tasas de excedencia para cada sitio calculadas por CRISIS99 indican:

1. La probabilidad de que una intensidad (aceleración máxima del terreno, velocidad máxima del terreno, etc.), sea excedida en determinado tiempo.
2. El periodo de recurrencia de dicha intensidad.

Así, un valor de la tasa de excedencia de 0.01 para la aceleración de 50 gal. indica que existe 0.01 de probabilidad de que se excedan los 50 gal en un año. También significa que la aceleración de 50 gal se presenta en promedio cada 100 años.

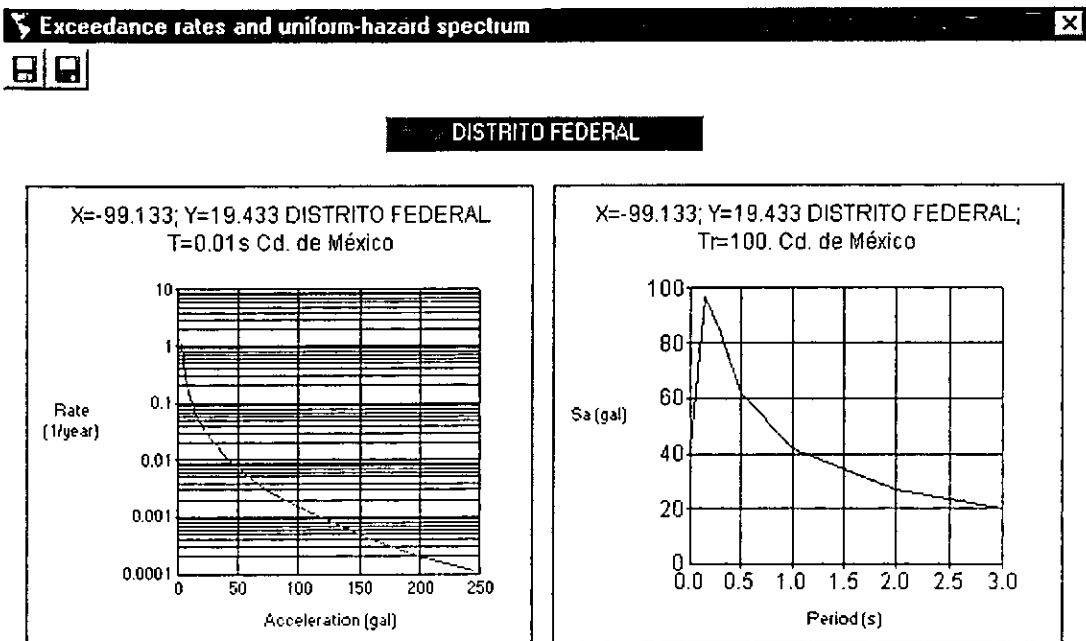


Fig.III.1.2. Curva de tasas de excedencia de la aceleración y espectro de peligro uniforme en el terreno firme de la ciudad de México.

La tasa de excedencia de la aceleración en un sitio puede deberse a la influencia de una fuente sísmica o a varias. Es decir, dicha aceleración se deberá a la ocurrencia de un sismo o de varios, en una o varias fuentes sísmicas.

Para calcular tasas de excedencia de intensidades sísmicas con CRISIS99 se requiere:

- 1) Definir las zonas en las que se generan sismos (fuentes sísmicas);
- 2) Fijar las relaciones de recurrencia de la magnitud para cada fuente sísmica;
- 3) Proporcionar las leyes de atenuación de las ondas sísmicas;
- 4) Precisar la región en estudio, mediante una malla de puntos y;
- 5) Establecer otros parámetros.

CRISIS99 cuenta con diversas pantallas o ventanas que permiten asignar cada uno de los datos requeridos para calcular *peligro sísmico*. La pantalla principal (Fig. III.1.1) proporciona el acceso al resto de las ventanas, ya sea que se quieran establecer nuevos datos, modificar los existentes o analizar resultados.

**Menús de la pantalla principal de CRISIS99**

**1. File:**

- *New.* Comando para iniciar la asignación de datos nuevos para calcular peligro sísmico.
- *Open.* Comando para abrir un archivo de datos.
- *Save As.* Comando para guardar los datos en un archivo.
- *Exit.* Comando para finalizar la ejecución del programa CRISIS99.

**2. Input:**

- *Maps.* Abre la ventana donde se debe indicar la ubicación de los archivos que contienen los datos para dibujar mapa y ciudades.
- *Grid of sites.* Muestra la ventana donde se tienen que fijar los sitios a los que se les calculará peligro sísmico.
- *Sources:*
  - *Geometry.* Abre la ventana donde se requiere definir la geometría de cada fuente sísmica a considerar en los cálculos de peligro sísmico.
  - *Seismicity.* Abre la ventana donde se deben fijar los parámetros que definen la sismicidad de cada fuente.
  - *Summary.* Abre la ventana donde se pueden observar los datos generales asignados a cada fuente.
- *Attenuation Data.* Abre la ventana donde se debe indicar el nombre de los archivos que contienen las leyes de atenuación a usar. En esta misma ventana es necesario asignar ley o leyes de atenuación a cada fuente sísmica
- *Intensities.* Abre la ventana donde se tiene que fijar los límites de las intensidades sísmicas, de las que se quiere obtener su tasa de excedencia.
- *Global parameters.* Abre la ventana donde se deben proporcionar los periodos de recurrencia y la máxima distancia de integración para limitar los cálculos.

**3. Run:**

- *Validate.* Comando que revisa los datos asignados.
- *Output files.* Abre la ventana donde es posible seleccionar los archivos de resultados que se desea obtener.
- *Start.* Comando para iniciar el cálculo de peligro sísmico.

**4. Hazard:**

- *Hazard Map Generator.* Abre el post-procesador donde se pueden obtener múltiples resultados gráficos.

**5. Help:**

- *Index.* Abre el archivo de ayuda de CRISIS99.
- *About CRISIS.* Muestra información referente a los autores del programa.

**Sugerencia**

Use con frecuencia el comando *Save As* de CRISIS99 para guardar los datos que vaya introduciendo en el programa.

**III.2. Pantalla de malla de sitios de cálculo**

En general, el tamaño de las ondas sísmicas disminuye conforme se alejan del origen del sismo. Por tal motivo, en el cálculo de peligro sísmico deben considerarse únicamente las fuentes sísmicas que pueden producir alguna intensidad importante en la región en estudio.

El programa CRISIS99 posee una pantalla para definir la malla de sitios de cálculo (Fig. III.2.1) que represente a la región en estudio. Cada punto de la malla se identifica con su longitud y latitud respectiva. CRISIS99 calculará tasas de excedencia para cada uno de los puntos de la malla de cálculo.

Los límites de la malla quedan definidos por la región a estudiar. Sin embargo, la elección de la densidad de la malla depende de diversos factores. A medida que la malla es más densa, es posible esperar definiciones más detalladas de resultados. No obstante, una malla muy densa puede implicar también mucho tiempo de cálculo. La elección de la malla es responsabilidad del usuario.

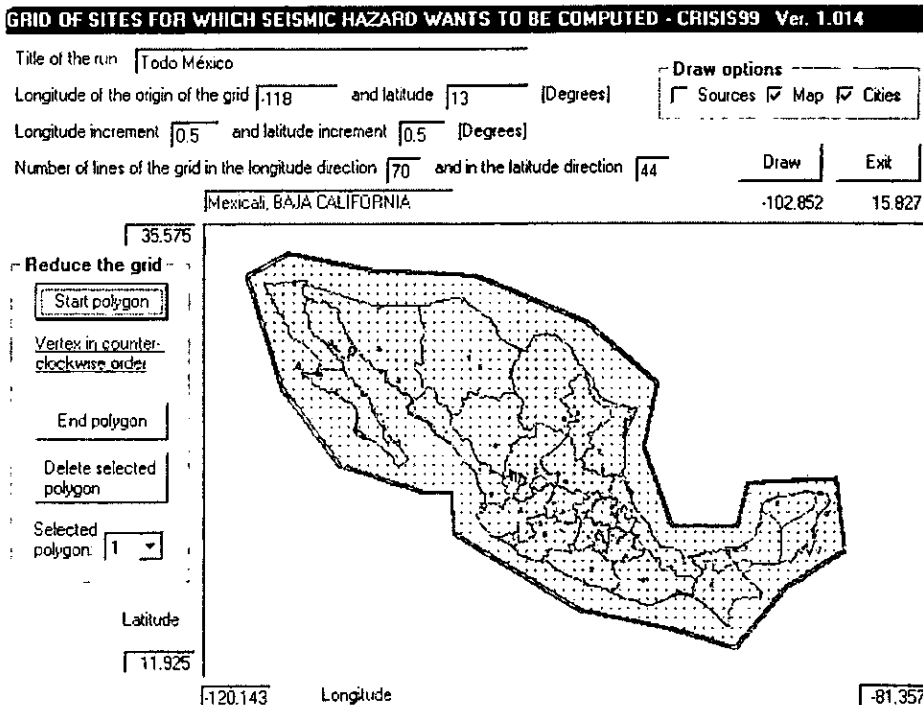


Fig. III.2.1. Pantalla del programa CRISIS99 donde se define la malla de los sitios de cálculo.

**Datos mínimos requeridos en la pantalla *Grid of sites***

1. *Title of the run.* Nombre de la ejecución.
2. *Longitude of the origin of the grid.* Longitud(°) del punto desde el que se construirá la malla.  
Ejemplo: -5.
3. *Latitude of the origin of the grid.* Latitud(°) del punto desde el que se construirá la malla.  
Ejemplo: -15.
4. *Longitude increment.* Separación entre puntos de la malla en la dirección de la longitud.  
Ejemplo: 0.25
5. *Latitude increment.* Separación entre puntos de la malla en la dirección de la latitud. Ejemplo: 0.35
6. *Number of lines of the grid in the longitude direction.* Cantidad de líneas que tendrá la malla en la dirección de la longitud. Ejemplo:25
7. *Number of lines of the grid in the latitude direction.* Cantidad de líneas que tendrá la malla en la dirección de la latitud. Ejemplo:35

**Datos opcionales**

**Polígonos auxiliares.**

Los polígonos auxiliares sirven para reducir los puntos de cálculo de la malla rectangular inicial. Al oprimir el botón *Start Polygon* el puntero del *mouse* cambia de forma, de una flecha se convierte en una cruz. La cruz como puntero del *mouse* indica que es posible definir en el área de dibujo los vértices de un polígono auxiliar. Basta con hacer click en algún punto dentro del área de dibujo para que dicho punto se convierta en el vértice enésimo de un polígono auxiliar. Sólo se realizarán cálculos en los puntos que estén dentro del polígono o de los polígonos auxiliares. Se permiten hasta 30 vértices por polígono. Es posible emplear hasta 10 polígonos.

**Ayudas gráficas**

Es posible seleccionar los elementos que se desean ver en el área de dibujo. Los elementos a elegir son: a) El mapa; b) Las ciudades y c) Las fuentes sísmicas. El comando *Draw* genera el dibujo con las opciones seleccionadas.

Las coordenadas del punto donde se encuentre el puntero del *mouse* dentro del área de dibujo, se indican en la esquina superior derecha.

Sugerencias

Reduzca la malla rectangular inicial con la ayuda de polígonos auxiliares.

Antes de iniciar cálculos con mallas muy densas, es recomendable realizar cálculos con mallas pequeñas, por ejemplo, de 9 puntos. Con dicho cálculo es posible estimar el tiempo de ejecución requerido para una malla de numerosos puntos. En ejecuciones con mallas densas conviene elegir que se impriman tasas de excedencia en el archivo \*.res, porque con editores de texto poderosos como Microsoft Word ©, es posible abrir el archivo \*.res cuando CRISIS99 aún está realizando cálculos. En dicho archivo \*.res se puede verificar en que punto de la malla se encuentra la ejecución.

### III.3. Pantalla de mapas

Para facilitar la generación del archivo de datos y la interpretación de resultados en CRISIS99 es posible dibujar mapa y ciudades. Para ello es necesario crear en algún editor de textos un archivo con los datos del mapa y otro con los datos de las ciudades.

En la pantalla de mapas (*Fig.III.3.1*) sólo se requiere indicar el nombre y ubicación de los archivos previamente creados para dibujar el mapa y para representar ciudades. El mapa y las ciudades son únicamente ayudas gráficas, por tal razón es posible realizar cálculos sin incluir mapa y ciudades.

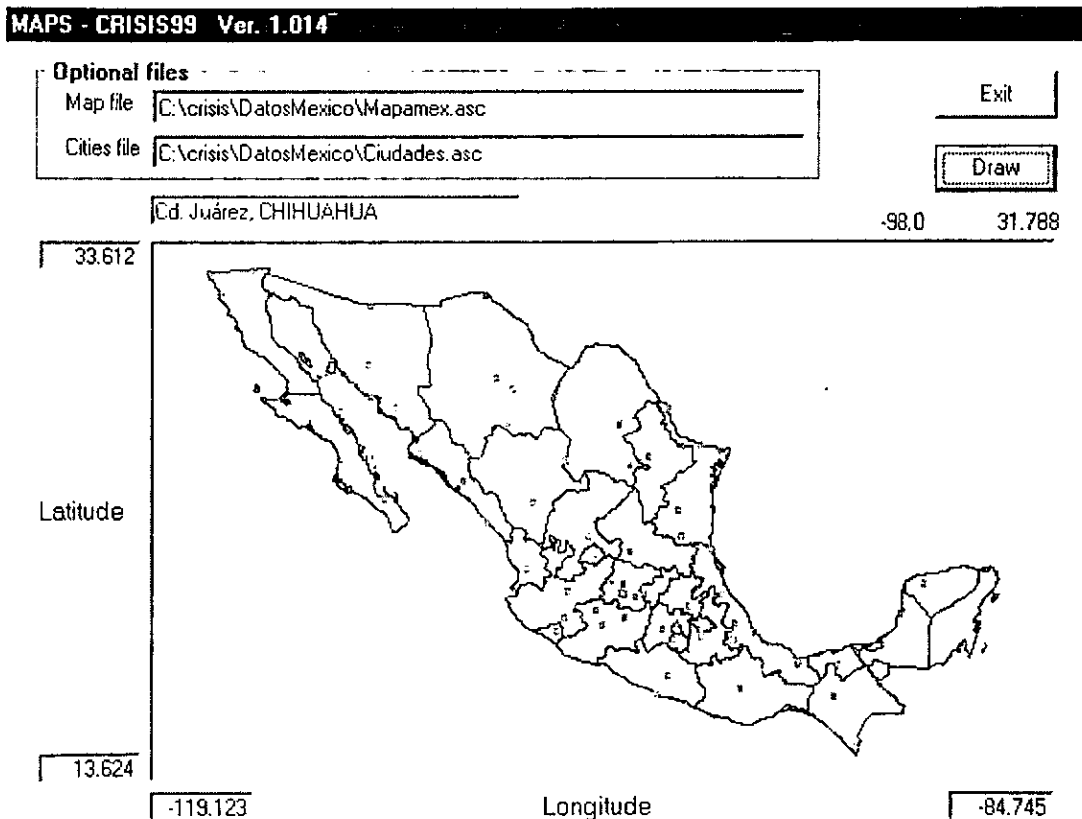


Fig. III.3.1. Pantalla del programa CRISIS99 para la selección de los archivos del mapa y de las ciudades.



**Datos opcionales requeridos en la pantalla Maps**

1. *Map file.* Nombre y ubicación del archivo que contiene los datos para dibujar un mapa. Si se hace doble *click* con el puntero del *mouse* en el renglón donde se requiere el nombre del archivo, aparece un cuadro de diálogo de Windows que permite buscar y seleccionar el archivo del mapa previamente creado por el usuario. El formato del archivo se indica en el apéndice A.
2. *Cities file.* Nombre y ubicación del archivo que contiene los datos para representar ciudades. Si se hace doble *click* con el puntero del *mouse*, en el renglón donde se requiere el nombre del archivo, aparece un cuadro de diálogo de Windows que permite buscar y seleccionar el archivo del mapa previamente creado por el usuario. El formato del archivo se indica en el apéndice A.

**Ayudas gráficas**

El comando *Draw* dibuja el mapa y las ciudades consideradas. Desde aquí se puede verificar que el formato y los datos de los archivos sean correctos.

Las coordenadas del punto donde se encuentra el puntero del *mouse* dentro del área de dibujo, se indican en la esquina superior derecha.

**Sugerencias**

Haga el archivo de ciudades y el archivo de mapas porque son de gran ayuda, tanto para la generación del archivo de datos como para interpretar resultados.

### **III.4. Pantalla de geometría de fuentes sísmicas**

Para evaluar el peligro sísmico de una región se requiere obtener la información disponible de los sitios cercanos (500 km de radio, por ejemplo). Se necesita establecer los sitios en los que han ocurrido sismos y se estime puedan seguir ocurriendo (fallas activas). También se estudian las particularidades de los sismos y se agrupan los eventos sísmicos con características similares.

En el estado de California de los Estados Unidos de Norteamérica es posible observar desde la superficie, los límites de dos placas de la corteza terrestre que se mueven entre sí. En tales límites se han originado sismos con determinada frecuencia (sismicidad). En este caso se tiene cierta facilidad para definir con buena precisión la región donde se originan sismos (fuente sísmica). Sin embargo, no todas las regiones donde ocurren sismos se pueden delimitar con la certeza que sí es posible en la falla de San Andrés. Por ello se dice que definir y entender las fuentes sismotectónicas es frecuentemente la parte principal de un análisis de peligro sísmico. El

conocimiento de las fuentes sismotectónicas crece gracias a los estudios que realizan geofísicos, geólogos y sismólogos.

El estudio de la corteza terrestre ha permitido establecer que la falla de San Andrés se debe al desplazamiento entre dos placas: la Norteamericana y la del Pacífico. Se han delimitado también placas en subducción: pedazos de corteza terrestre que se desplazan hacia el interior de la tierra. En las placas en subducción se originan sismos a distintas profundidades debido a rompimientos de roca en dichas placas inclinadas. Como es posible intuir, delimitar dichas placas que subducen presenta mayores dificultades que delimitar placas que se ven desde la superficie, como las que generan la falla de San Andrés. Dichas dificultades aún no son totalmente superadas, por lo que existen incertidumbres en la definición de la geometría de ciertas placas tectónicas.

Cada zona de la corteza terrestre en que se estima ocurren sismos, debidos a un mecanismo de falla en particular puede considerarse una fuente sísmica. En CRISIS99 es posible definir fuentes sísmicas mediante alguno de los tipos de geometría enumerados enseguida:

- 1) Área. Se define mediante un polígono en el espacio. Los vértices de dicho polígono tienen componentes en longitud, latitud y profundidad;
- 2) Polilínea. Se define mediante vértices con componentes en longitud, latitud y profundidad, y;
- 3) Punto(s). Se define(n) por sus correspondientes componentes en longitud, latitud y profundidad.

En todos los casos se considera que la sismicidad es uniforme. Por ejemplo, para el caso de fuente área, se considera que en toda la superficie hay la misma probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud dada.

La definición de fuentes sísmicas presenta dificultades importantes. Implica delimitar zonas de la corteza terrestre que frecuentemente no se conocen al detalle. A ellas se asocia una sismicidad, cuya estimación también presenta incertidumbres (Reiter, 90). Afortunadamente, cada vez hay mayor información que permite definir mejor las fuentes sísmicas. Dicha información se debe a diversos tipos de datos como los que se mencionan enseguida:

- 1) Geológicos (localización, composición, edad y configuración estructural de distintas

rocas y sedimentos de la superficie terrestre);

- 2) Tectónicos (definición de placas de la corteza terrestre y sus respectivos tipos de movimientos);
- 3) Geofísicos (configuración de la tierra a profundidades no observables directamente, anomalías magnéticas, refracción y reflexión de ondas sísmicas, investigaciones geodésicas, etc.);
- 4) De esfuerzos (variación del campo de esfuerzos) y;
- 5) De sismicidad (sismos registrados con instrumentos y sismos históricos).

El cálculo que realiza CRISIS99 es probabilista, por ello a medida que la información sea más precisa será posible esperar mejores resultados.

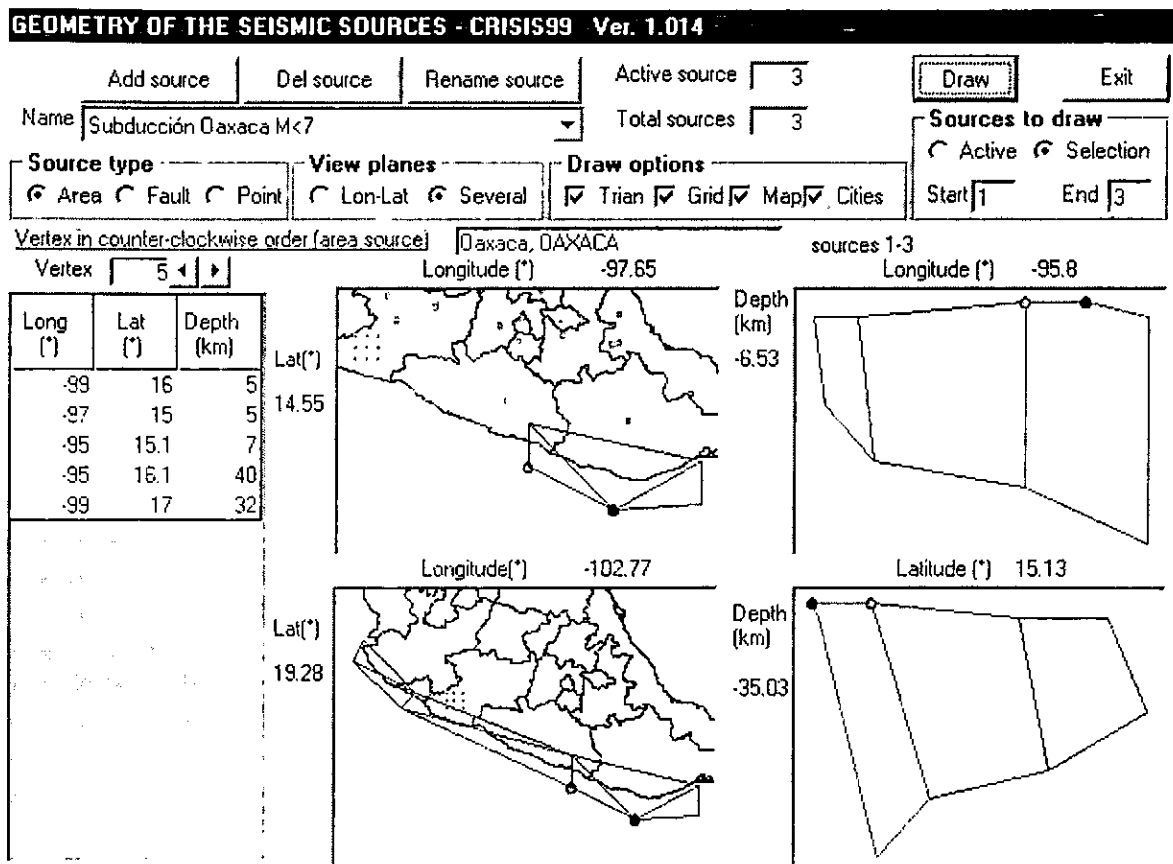


Fig. III.4.1. Pantalla del programa CRISIS99 donde se define la geometría de las fuentes sísmicas.

Las diversas formas geométricas que se pueden hacer con CRISIS99 para representar fuentes sísmicas, facilita la generación de geometrías semejantes a las que se le atribuyen a las regiones sismotectónicas. Al lograr mejores representaciones geométricas se reducen los errores en la estimación de la sismicidad por diferencias geométricas.

**Datos mínimos requeridos en la pantalla *Geometry of the seismic sources***

Para definir la geometría de cada fuente sísmica se requiere:

- 1) Agregar con el botón *Add source* una fuente sísmica. Al agregar una fuente CRISIS99 le asigna el número íésimo de fuente que le corresponda y la nombra como la fuente íésima. En ese momento dentro del programa la fuente íésima es la fuente activa, dado que la fuente activa es aquella cuyo nombre, tipo de fuente, coordenadas y número de fuente se muestran en la pantalla. El nombre de la fuente activa se indica en la barra junto al letrero *Name* y el número de la fuente activa se indica junto al letrero *active source*. Se permiten hasta 200 fuentes.
- 2) Seleccionar forma geométrica entre las opciones del marco *Source type: Area, fault o point;*
- 3) Agregar vértices o puntos para la fuente activa. El número de vértices o puntos se cambia con la barra de desplazamiento localizada junto a la palabra *vertex o point*, según corresponda. Es posible hacer polígonos con hasta 25 vértices.
- 4) Escribir la longitud (°), latitud (°) y profundidad (km) de cada vértice o punto. El orden de los vértices de cada fuente área debe estar en sentido antihorario para que el programa pueda triangularla, es decir, dividirla en triángulos. Dicha división es requerida por el algoritmo de cálculo de peligro sísmico. Por tal motivo se debe verificar que CRISIS99 puede triangular todas las fuentes área definidas.

**Ayudas gráficas**

En el marco *View planes* se elige entre dos opciones:

**A) *Lon-Lat.*** Cuando esta opción está seleccionada se muestra únicamente una ventana de dibujo en el plano latitud-longitud. Las coordenadas del punto donde se encuentre el puntero del *mouse* en el área de dibujo se indican en la esquina superior derecha.

**B) *Several.*** Cuando esta opción se elige se muestran 4 ventanas de dibujo.

Ventana 1) En la esquina superior izquierda se muestra un plano con coordenadas en longitud y latitud. En ella se dibujará únicamente la fuente activa. Se indican las coordenadas del punto donde se encuentre el puntero del *mouse* en el área de dibujo.

Ventana 2) En la esquina inferior izquierda se muestra un plano con coordenadas en longitud y latitud. En ella se dibujará la fuente activa y las fuentes cercanas a ella. Además aquí se podrá observar la triangulación. Se indican las coordenadas del punto donde se encuentre el puntero del *mouse* en el área de dibujo.

Ventana 3) En la esquina superior derecha se muestra un plano con coordenadas en longitud y profundidad. En ella se dibujará únicamente la fuente activa. Se indican las coordenadas del punto donde se encuentre el puntero del *mouse* en el área de dibujo.

Ventana 4) En la esquina inferior derecha se muestra un plano con coordenadas en latitud y profundidad. En ella se dibujará únicamente la fuente activa. Se indican las coordenadas del punto donde se encuentre el puntero del *mouse* en el área de dibujo.

En el primer vértice de la fuente área se dibuja un punto rojo. En el segundo vértice se dibuja un punto azul. Estos puntos ayudan al usuario a verificar el sentido antihorario de los vértices del polígono.

### Ayudas gráficas

En el marco *Draw options* se elige qué elementos se desean observar, además de las fuentes.

**Triang.** Cuando se elige esta opción se dibujará la triangulación de las fuentes área.

**Grid.** Con esta opción se dibujará la malla de puntos de cálculo definida en la ventana *Grid of Sites*.

**Map.** Si se elige esta opción se dibujará el mapa.

**Cities.** Se dibujarán las ciudades cuando esta opción se seleccione. Al pasar el puntero del *mouse* cerca de un punto que represente una ciudad, cambiará el color del punto y aparecerá el nombre de la ciudad bajo el marco *Draw options*.

En el marco *Sources to draw* hay tres opciones:

- 1) **Active.** Con esta opción únicamente se dibujará la fuente activa.
- 2) **Range.** Esta opción permite elegir el intervalo de fuentes que se dibujarán. El intervalo se define al escribir junto al letrero *start* el número de la primera fuente del intervalo, y junto al letrero *end* el número de la última fuente que se dibujará.  
Si la fuente activa está dentro del intervalo elegido se dibujará de color rojo.
- 3) **Selection.** Esta opción permite seleccionar las fuentes que se dibujarán. Al escoger con el *mouse* esta opción aparece la ventana "Choosing the sources to draw" que contiene el nombre de todas las fuentes generadas hasta el momento. Al hacer click con el puntero del *mouse* en la columna llamada DRAW y en el renglón de cualquier fuente, aparecerá el letrero "OK" que indica que la fuente del renglón seleccionado será dibujada. Con el mismo procedimiento se pueden seleccionar más fuentes. Al hacer click de nuevo sobre el letrero "OK" desaparecerá el letrero. Si la fuente activa es una de las seleccionadas entonces dicha fuente se dibujará de color rojo. Al hacer doble click sobre la opción *selection* cuando dicha opción esta seleccionada, se abrirá de nuevo la ventana "Choosing the sources to draw" y será posible elegir otras fuentes sísmicas.

### Sugerencia

Verifique el sentido antihorario de los vértices en fuentes área. Compruebe con la opción de dibujo *Triang* que se puede realizar la triangulación de fuentes área.

### **III.5. Pantalla de sismicidad de fuentes sísmicas**

El número de sismos con características particulares que ocurren en un sitio en determinado periodo se conoce como sismicidad.

La concentración de focos de sismos en zonas determinadas y el conocimiento de la tectónica regional permiten delimitar fuentes sísmicas. Cada fuente queda definida en función de dos características: geometría y sismicidad. Por ello, después de que se ha definido la geometría de una fuente, CRISIS99 requiere los datos que describan su sismicidad, es decir, parámetros que describan aproximadamente el número y tamaño de sismos con características particulares que se originaron durante cierto tiempo en la región definida.

La estimación de sismicidad se lleva a cabo con técnicas estadísticas a partir de catálogos de sismos e información geológica. Estimar la sismicidad equivale a determinar la distribución de probabilidad del tiempo entre sismos y la distribución de sus magnitudes (Ward, 94). CRISIS99 permite elegir entre dos modelos de ocurrencia, cuya diferencia principal estriba en que la ocurrencia de sismos es independiente del tiempo en el primero (modelo de Poisson), mientras que en el segundo el tamaño de los sismos sí depende del tiempo (proceso de deslizamiento predecible).

#### **III.5.1. Sismicidad considerada como proceso de Poisson**

Se han estudiado los datos disponibles en catálogos de temblores. Al hacerlo se ha llegado a diversas conclusiones. Una de ellas es que en muchos casos el proceso estocástico de Poisson permite modelar adecuadamente la ocurrencia de sismos. En el modelo de Poisson los tiempos entre eventos se encuentran exponencialmente distribuidos. Su distribución no se altera al aumentar el tiempo sin temblar. Por ello, frecuentemente se dice que el modelo de Poisson se caracteriza por no tener memoria. De manera que la ocurrencia de un sismo el primer día de septiembre no tiene ningún efecto en el número de sismos que pueden ocurrir en el resto del mes. Aun cuando el número total de sismos que ocurren en un mes es aleatorio, al transcurso del año el número total de temblores, dividido por la longitud del tiempo, será aproximadamente constante. Es decir, los sismos arriban aleatoriamente, pero a una tasa uniforme.

Los distintos parámetros que definen la sismicidad local se estiman principalmente a partir de

los datos contenidos en catálogos, donde se indica la fecha, el sitio, la profundidad y el tamaño de los sismos que se han registrado o que se han estimado. Sin embargo, la estimación de la sismicidad está aún limitada por insuficiencia y en ciertos casos ausencia de datos. Los registros de sismos con mayor confiabilidad en México datan de cerca de 100 años para sismos grandes. En el caso de Estados Unidos el periodo es similar. Periodos que en la escala del tiempo geológico (5 mil millones de años del origen de la tierra), son muy pequeños. Por lo tanto, son insuficientes para hacer estimaciones netamente estadísticas. Para resolver la ausencia de datos se ha recurrido principalmente a dos procedimientos complementarios. Por un lado se emplean técnicas novedosas para obtener más datos de sismicidad. Esto se realiza con la ayuda de la geología, paleosismología, geodesia espacial y sismología (Ward, 94). Y por otra parte se desarrollan procedimientos que aprovechen mejor los datos disponibles (Arboleda, 93).

Por todo lo mencionado anteriormente, resulta fácil aceptar que el uso de los catálogos para la determinación de los parámetros de sismicidad requiere de especial cuidado. Por tal motivo, existen métodos para identificar los cambios producidos por el hombre en los catálogos (Habermann, 87), que pueden provocar estimaciones erróneas de sismicidad.

La función de probabilidad del modelo de Poisson se puede escribir como:

$$p(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (\text{III.5.1})$$

Para el caso actual,  $p(n)$  es la probabilidad de que en determinada región ocurran  $n$  temblores con magnitud mayor que  $M$ , en el intervalo de tiempo  $(0,t)$ , donde  $\lambda (M)$  es el valor esperado del número de temblores con magnitud mayor o igual a  $M$ , que ocurrirán en dicha región, por unidad de tiempo.

Si  $n$  igual a cero en la expresión III.5.1 se obtiene:

$$p(0) = e^{-\lambda t} \quad (\text{III.5.2})$$

que representa la probabilidad de que no ocurran temblores, con magnitud mayor que  $M$ , en el intervalo de tiempo  $t$ . Por lo tanto, la probabilidad de que sí ocurran temblores, con magnitud mayor que  $M$ , en el intervalo de tiempo  $t$ , será igual a

$$p(n) = 1 - p(0) \quad (\text{III.5.3})$$

Si se considera a la variable aleatoria  $T$ , como el tiempo de la primer ocurrencia de un evento, entonces la probabilidad de que  $T$  exceda algún valor de  $t$  (o que el tiempo  $T$  de la primera ocurrencia de un evento sea mayor que el tiempo del intervalo limitado por  $t$ ), es igual a la probabilidad de que no ocurran eventos en el intervalo de tiempo  $t$ , es decir,  $p(0) = 1 - P_1(t) = e^{-\lambda t}$ ;  $t \geq 0$  (III.5.4) de donde:

$$P_1(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad ; t \geq 0 \quad (III.5.5)$$

$$p_1(t) = \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad ; t \geq 0 \quad (III.5.6)$$

De manera que en el proceso de Poisson, la densidad de probabilidades del tiempo entre eventos, con magnitud mayor o igual a  $M$ , es exponencial y está dada por:

$$p_i(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (III.5.7)$$

donde  $t$  es el tiempo entre eventos con magnitud mayor que  $M$  y  $\lambda(M)$  es la tasa de excedencia de la magnitud  $M$ .

El tiempo esperado entre eventos (periodo de recurrencia) con magnitud  $M$  o mayor, vale  $1/\lambda(M)$ . Por lo tanto, si se conoce el parámetro  $\lambda(M)$ , la distribución de los tiempos entre eventos está totalmente determinada.

Por ejemplo: Si en una región ocurrieron 50 sismos de magnitud mayor a 4, en 100 años, entonces la tasa de excedencia de la magnitud 4 es aproximadamente  $\lambda(4) = 50/100 = 0.5$ . El periodo de recurrencia para este mismo ejemplo, es igual a  $1/\lambda(4) = 1/0.5 = 2$ . Es decir, aproximadamente cada dos años ocurrirá un sismo de magnitud mayor a 4.

La frecuencia con que se presentan sismos de cada magnitud en determinada región se puede representar con gráficas como la de la Fig. III.5.1.



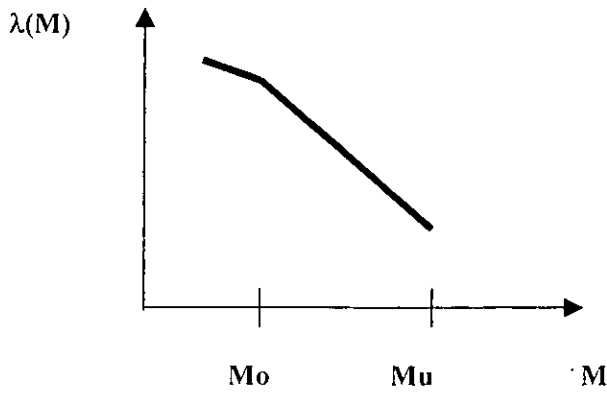


Fig. III.5.1. Modelo bilineal de la tasa de excedencia de la magnitud.

La gráfica de la figura III.5.1 muestra un punto de flexión, que determina a partir de qué valor de la magnitud el comportamiento es homogéneo. Esta magnitud se suele emplear como la magnitud umbral en los aparatos de medición. La elección de la magnitud umbral influirá en el espectro de peligro. Dicha influencia puede ser importante por lo que se recomienda ser cuidadosos en la selección de dicho umbral (Bender y Campbell, 89).

La recta de la Fig. III.5.1 que se forma a la derecha del punto de inflexión (línea continua), se puede representar con la siguiente ecuación (Gutenberg y Richter, 44):

$$\log (N|N>m) = a - bm \quad (III.5.8)$$

donde N es el número de sismos con magnitud mayor o igual a m. a es igual al logaritmo del número de sismos de magnitud mayor que cero y b es la proporción de sismos de una cierta magnitud.

Al reescribir la ecuación III.5.8 como:

$$\ln (N|N > m) = \alpha - \beta m \quad (III.5.9)$$

donde:

$$\alpha = a \ln (10) = \lambda_0 = \lambda(M_0) \quad (III.5.10)$$

$$\beta = b \ln (10) \quad (III.5.11)$$

es posible escribir que:

$$\lambda(M) = \lambda_0 e^{-\beta(M-M_0)} \quad (III.5.12)$$

donde  $\lambda_0$  es la tasa de excedencia de la magnitud umbral  $M_0$ , es decir, el número de temblores de

magnitud mayor o igual a  $M_0$ , generados en promedio por unidad de volumen y por unidad de tiempo en una zona determinada. La expresión III.5.12 no representa adecuadamente la ocurrencia de sismos porque no considera ningún límite para la magnitud máxima  $M_u$ .

Existe un modelo más realista, propuesto por Cornell y Vanmarcke (69). En él se tiene la siguiente expresión de la tasa de excedencia de la magnitud:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (\text{III.5.13})$$

donde  $\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$  son parámetros desconocidos, y  $M_0$  es la magnitud por encima de la cual el catálogo está completo. Si la ec. III.5.13 se representa en papel semilogarítmico se observa que para magnitudes pequeñas, es una línea recta con pendiente igual a  $-\beta$ , lo que está de acuerdo con lo observado por Gutenberg y Richter (54) para todo el mundo. Conforme  $M$  aumenta, la curva, todavía en papel semilogarítmico, se vuelve cóncava hacia abajo y  $\lambda(m)$  vale cero para  $M > M_u$ , reconociendo el hecho de que  $M_u$  es la magnitud máxima que puede generarse en la fuente sísmica correspondiente (Ordaz *et al*, 89).

Los parámetros desconocidos  $\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$  se estiman con base en el catálogo de temblores de la zona, y en la información de regiones tectónicamente similares. Rosenblueth y Ordaz (87) proponen un método bayesiano (es decir, basado en el teorema de Bayes) para este fin. El enfoque consiste en suponer que los parámetros desconocidos son variables aleatorias, proponer densidades previas de probabilidad y actualizarlas, vía el teorema de Bayes con la información estadística. Posteriormente, Arboleda y Ordaz (93) ampliaron el enfoque para extenderlo a casos en que se cuenta con más de una zona de completitud del catálogo. Con este método se concluye que los parámetros  $\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$ , tienen, después de incorporar los datos estadísticos, ciertas densidades de probabilidad, cuyos parámetros las definen completamente. Los criterios para fijar los parámetros previos se discuten en Newmark y Rosenblueth (71) y Rosenblueth y Ordaz (87). Al considerar como aleatorios los parámetros que definen la forma de  $\lambda(M)$ , esta cantidad debe interpretarse también como aleatoria.

Al estimar los parámetros  $\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$  es posible obtener curvas como la que se muestra en la Fig. III.5.2, la cual describe la sismicidad de una fuente sísmica:

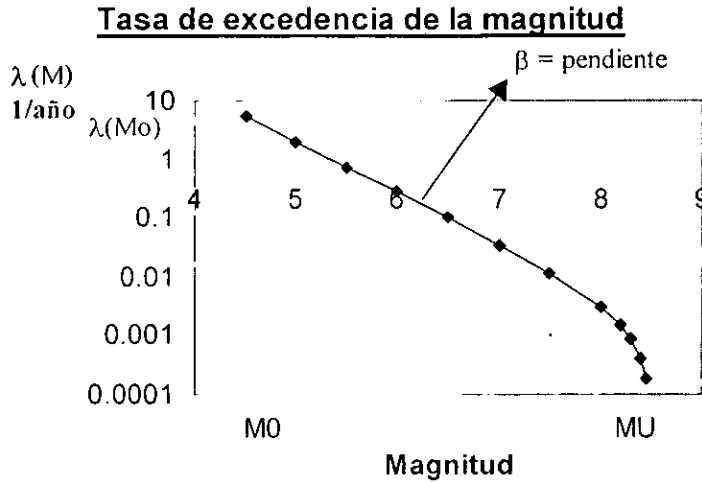


Fig. III.5.2. Curva de la tasa de excedencia de la magnitud obtenida con la ecuación de Cornell y Vanmarcke.

Dada la definición de  $\lambda(M)$  la densidad de la magnitud resulta:

$$p_M(M) = -\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda(M)}{dM}, \quad M_0 \leq M \leq M_U \quad (\text{III.5.14})$$

Con ello se definen ya la distribución de los tiempos entre eventos y la distribución de las magnitudes del proceso de Poisson.

Se considera inadecuado estimar la máxima magnitud en una fuente con el empleo exclusivo de los catálogos de temblores, ya que los máximos sismos que se generan en las fuentes tienen periodos de recurrencia de cientos o miles de años, y por el momento no hay catálogos confiables que cubran tales periodos. En lugar de ello suelen estimarse la máxima longitud de ruptura, máxima área de ruptura y máximo desplazamiento que pueden presentarse en la fuente (Coppersmith *et al*, 90). Con el uso de relaciones empíricas entre dichos parámetros y la magnitud se obtienen magnitudes máximas esperadas. Como hay dispersión asociada a los valores de la magnitud máxima se emplea la desviación estándar para medir dicha dispersión (Wells *et al*, 94).

Los datos requeridos por el programa CRISIS99 (Fig.III.5.3) para cada fuente sísmica con recurrencia de sismos descrita por un proceso de Poisson, son básicamente parámetros que definen la curva de la tasa de excedencia de la magnitud.

**SEISMICITY - CRISIS99 Ver. 1.014**

Source number  of  total sources

Source name

**Occurrence model**  
 Poisson  
 Characteristic

**Draw options**  
 Active  Map  
 All

**Poisson Model**

$\lambda$ (M0)	<input type="text" value="2.014"/>
Expected value of $\beta$	<input type="text" value="1.827"/>
Coefficient of variation of $\beta$	<input type="text" value="0.11"/>
Expected value of the maximum magnitude	<input type="text" value="7.2"/>
Standard deviation of the maximum magnitude	<input type="text" value="0.01"/>
Maximum observed magnitude	<input type="text" value="6.9"/>
Threshold magnitude (M0)	<input type="text" value="4.5"/>

Longitude  Latitude

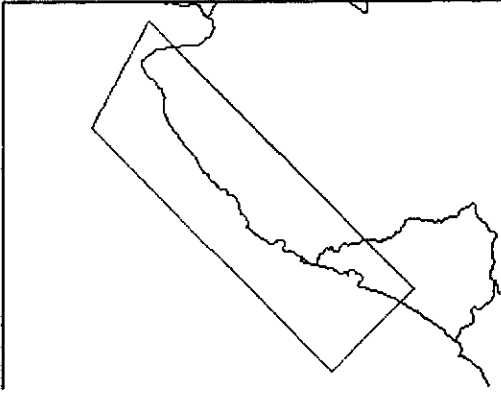


Fig. III.5.3. Pantalla para proporcionar datos de sismicidad de fuentes con proceso de Poisson

**Datos mínimos requeridos por CRISIS99 en la pantalla *Seismicity***

En el marco llamado *Occurrence model* se debe elegir el tipo de modelo de ocurrencia de sismos que se asignará a la fuente activa. El nombre y número de la fuente activa aparecen en la pantalla. Para asignar datos a otra fuente basta con buscarla con la barra de desplazamiento localizada junto al letrero *Source number*.

**CRISIS99 requerirá los siguientes datos para cada fuente sísmica con sismicidad Poissoniana**

1. ***Lambda (M0)***. ( $E(\lambda_0)$ ). Valor esperado de la tasa de excedencia de la magnitud umbral. Cuando no se hacen consideraciones Bayesianas,  $\lambda_0$  es igual al número de sismos de magnitud mayor a la magnitud umbral entre el número de años del catálogo considerado [1/año]. Ejemplo: 1.62
2. ***Expected value of beta***. Pendiente esperada de la curva de la tasa de excedencia de la magnitud. Ejemplo: 1.1
3. ***Coefficient of variation of Beta***. Dispersión obtenida al calcular el valor esperado de Beta. Ejemplo: 0.1
4. ***Expected value of the maximum magnitude***. Valor esperado de la magnitud máxima. Se estima con diversos métodos. Ejemplo: 7.5
5. ***Standard deviation of the maximum magnitude***. Dispersión obtenida al estimar el valor esperado de la máxima magnitud. Ejemplo: 0.2
6. ***Maximum observed magnitude***. Magnitud máxima observada. Requerida para considerar que la magnitud máxima posible tiene que ser igual o superior a la máxima observada. Ejemplo: 6.8
7. ***Threshold magnitude (M0)***. Magnitud umbral. En general, magnitud a partir de la cuál el catálogo es homogéneo y completo. Ejemplo: 4.5

**Ayudas gráficas**

Es posible observar la geometría de la fuente sísmica a la que se le están asignando parámetros de sismicidad. En el marco llamado *Draw options* se elige si se dibuja únicamente la fuente activa o si se dibujan todas las fuentes. Cuando se elige esta última opción la fuente activa se dibujará de color rojo. También se puede elegir dibujar el mapa.

El botón *View summary* abre una ventana donde están dos áreas de dibujo. En el rectángulo superior se dibujan las fuentes con modelo de *Poisson* y en el rectángulo inferior las fuentes con modelo del temblor característico.

### III.5.2. Sismicidad considerada como proceso del temblor característico

Al analizar los datos de sismos en diversas regiones del mundo, se ha observado que en determinadas provincias sismotectónicas la ley Gutenberg-Richter subestimaría o sobrestimaría la sismicidad. Un ejemplo de esto ocurre en la zona de subducción mexicana (Singh *et al*, 83; Youngs *et al*, 85), donde los tiempos entre eventos no se parecen a una distribución exponencial, y más bien los tiempos entre sismos presentan periodicidad. Por otra parte, hay ausencia de ciertas magnitudes sísmicas, es decir, los sismos parecen preferir ciertos tamaños. Para considerar estas propiedades CRISIS99 dispone del modelo del temblor característico (Fig. III.5.2.1), donde el tamaño de los sismos depende del tiempo que ha transcurrido sin temblar. En este modelo se considera que la magnitud, condicionada al tiempo, tiene distribución normal. Como la magnitud de un temblor está correlacionada con el tiempo que hubo que esperar para que aquel ocurriera, se dice que sigue un modelo de deslizamiento predecible (Kiremidjian *et al*, 84). Por ello la magnitud esperada se puede definir de la siguiente forma (Jara y Rosenblueth, 88):

$$E(M|T00) = \max (M_0, D + F*LN(T00)) \quad (III.5.2.1)$$

donde  $E(M|T00)$  es el valor esperado de la magnitud del próximo evento, dado que han transcurrido  $T00$  años desde la última ocurrencia de un temblor característico de magnitud mayor o igual que  $M_0$ ;  $M_0$  es la magnitud umbral, y  $D$  y  $F$  parámetros que definen cómo aumenta la magnitud con el tiempo transcurrido desde la última ocurrencia de un sismo característico.

En el modelo del temblor característico la tasa de excedencia de la magnitud  $\lambda(M)$  cambia en función del tiempo y está dada por:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \left[ 1 - \Phi \left[ \frac{M - E(M | T00)}{\sigma_M} \right] \right] , \quad M_u > M \geq M_0 \quad (III.5.2.2)$$

$$\lambda(M) = 0 , \quad M > M_u \quad (III.5.2.3)$$

donde  $\lambda_0 = \frac{1}{T_0}$  . (III.5.2.4)

$T_0$  es el tiempo medio entre eventos con  $M > M_0$ ,  $\sigma_M$  es la desviación estándar de la magnitud de los temblores característicos y  $\Phi$  denota distribución normal estándar.

**SEISMICITY - CRISIS99 Ver. 1.014**

Source number  of  total sources

Source name

**Occurrence model**

Poisson

Characteristic

**Draw options**

Active  Map

All

**Characteristic Model**

Median value of the time between characteristic earthquakes

Standard deviation of the magnitude of the characteristic earthquakes

Minimum possible magnitude of a characteristic earthquake (M0)

Maximum magnitude of the characteristic earthquake to be used in the integration process

Parameters defining the expected magnitude as a function of time.

---

T00=Time elapsed since the last occurrence of a characteristic earthquake

$E(M|T00) = \max \{ M0, D + F \cdot \ln(T00) \}$

D  F  T00

Longitude  Latitude

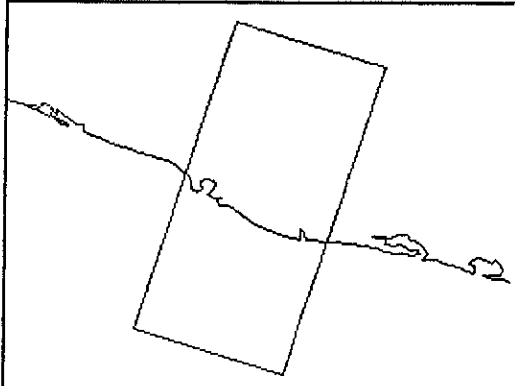


Fig. III.5.2.1. Pantalla para proporcionar datos de sismicidad en fuentes sísmicas con modelo del temblor característico.

**Datos mínimos requeridos por CRISIS99 en la pantalla *Seismicity***

En el marco llamado *Occurrence model* se debe elegir el tipo de modelo de ocurrencia de sismos que se asignará a la fuente activa. El nombre y número de la fuente activa aparecen en la pantalla. Para asignar datos a otra fuente basta con buscarla con la barra de desplazamiento localizada junto al letrero *Source number*.

**CRISIS99 requerirá los siguientes datos para cada fuente sísmica con sismicidad *característica***

1. *Median value of the time between characteristic earthquakes*. Mediana del tiempo entre temblores característicos. Ejemplo: 90 (años)
2. *Standard deviation of the magnitude of the characteristic earthquakes*. Desviación estándar de la magnitud del temblor característico. Ejemplo: 0.27
3. *Minimum possible magnitude of a characteristic earthquake (M0)*. Magnitud mínima posible de un temblor característico (M0). Sismos con magnitud  $M < M_0$  se ignoran totalmente. Ejemplo: 7.0
4. *Maximum possible magnitude of a characteristic earthquake to be used in the integration process*. Magnitud máxima de un temblor característico a usarse en el proceso de integración. Ejemplo: 8.4
5. *Parameters defining the expected magnitude as a function of time :*

**D y F:** Parámetros que definen la magnitud esperada como una función del tiempo. Se asume que:

$$E(M|T00) = \max(M_0, D + F * \text{LN}(T00))$$

Ejemplo: D=5.36 y F=0.635

Por supuesto, si F se fija a cero, entonces D será la magnitud esperada del temblor característico.

6. **T00:** Tiempo transcurrido desde la última ocurrencia de un temblor característico. Ejemplo: 80 (años).

**Ayudas gráficas**

Permiten observar la geometría de la fuente sísmica a la que se le están asignando parámetros de sismicidad.

En el marco llamado *Draw options* se elige si se desea ver únicamente la fuente activa o todas las fuentes. Cuando se elige esta última opción la fuente activa se dibujará de color rojo. También se puede elegir ver el mapa.

El botón *View summary* abre una ventana donde están dos áreas de dibujo. En el rectángulo superior se dibujan las fuentes con modelo de *Poisson* y en el rectángulo inferior las fuentes con modelo del temblor característico.



### III.6. Pantalla de leyes de atenuación de intensidades sísmicas

Las leyes de atenuación permiten estimar intensidades sísmicas en cualquier sitio, en función de la magnitud del temblor y la distancia del sitio al foco del sismo. Por ejemplo, es posible estimar la aceleración del suelo que se podrá presentar en un sitio alejado 100 km del origen de un sismo profundo de magnitud 7. Tal como se intuye, las leyes de atenuación dependen de las características del origen del sismo, de las del camino que recorrerán las ondas sísmicas y de las del terreno en estudio. Es decir, el movimiento en un sitio generado por un sismo será diferente:

- a) Si el origen del sismo ocurrió en la superficie terrestre o a grandes profundidades (efecto de fuente y de trayectoria).
- b) Si las ondas sísmicas se desplazan a través de roca sana o rocas fracturadas (efecto de trayectoria).
- c) Si las ondas sísmicas cruzaron un cerro o un valle (efectos topográficos).
- d) Si el terreno en las inmediaciones del sitio está constituido por roca o por suelo arcilloso (efecto de sitio).

Para obtener relaciones empíricas de atenuación requeridas para el cálculo de peligro sísmico, se emplean los registros de movimientos sísmicos. Dichos registros incluyen diversos factores que modifican a las ondas sísmicas durante su recorrido. Sin embargo, los registros que existen son insuficientes para predecir la atenuación sísmica ante cualquier tipo de sismo y tipo de medio, a través del cual se propagan las ondas sísmicas en la Tierra. Esto es así porque, como se mencionó anteriormente, los factores que determinan las características de los sismos son diversos y los registros disponibles son únicamente de ciertos tipos de sismos, de ciertas regiones y de algunas magnitudes. De manera que las intensidades que se obtienen con las leyes de atenuación tienen asociadas grandes dispersiones.

Con diversos procedimientos como el de estimación bayesiana de Ordaz *et al* (94b), es posible obtener leyes de atenuación para las ordenadas del espectro de respuesta (seudoaceleración, 5% del amortiguamiento crítico), para periodos de entre 0 y 6 s (Ordaz, 97). Esto último es muy útil, toda vez que la aceleración máxima del suelo es un parámetro insuficiente para describir los posibles efectos en estructuras. Por ejemplo, durante el sismo de magnitud  $M_s=8.1$  que ocurrió en las costas de México, la aceleración pico medida en un área donde se presentaron numerosos daños en edificios en la ciudad de México fue de 0.17 g, aceleración pico similar a la de 0.18 g que se

presentó en Ohio debido al sismo de Magnitud  $m_b=5$  del 31 de enero de 1986. Sin embargo, este último temblor sólo ocasionó ligeros daños en plafones y vidrios. Las diferencias en los daños ocasionados se entienden mejor al observar más detalles de los movimientos, pues el sismo de México consistió predominantemente en movimiento de largo periodo, por más de dos minutos, y el de Ohio fue un movimiento de apenas un segundo, predominantemente de periodo muy corto (Reiter, 90). Por ello conviene obtener leyes de atenuación para las ordenadas del espectro de respuesta, que permitan estimar peligro sísmico para distintos periodos estructurales. Con esto último se obtiene mayor información de las intensidades sísmicas que será posible esperar en diferentes tipos de edificios.

CRISIS99 requiere un archivo por cada ley de atenuación a considerar en los cálculos (Fig. III.6.2.1). Cada archivo deberá contener en forma de tabla los valores que representen a la ley de atenuación de intensidades sísmicas (Ver apéndice A), es decir, valores que permitan generar curvas de atenuación de intensidades originadas por sismos de diferentes magnitudes, a diversas distancias del foco de los temblores. El empleo de tablas para representar leyes de atenuación facilita la incorporación de complejos comportamientos asociados a la atenuación de las ondas sísmicas. Por ejemplo, existen leyes de atenuación exclusivas para sitios cercanos a la fuente (Campbell, 97), las cuales pueden definirse con facilidad mediante dichas tablas de atenuación.

### III.6.1. Terreno firme

El modelo de peligro sísmico que emplea el programa CRISIS99 permite estimar tasas de excedencia de intensidades para distintos tipos de terreno. Las intensidades obtenidas son válidas para el tipo de terreno al que correspondan las leyes de atenuación empleadas en los cálculos de peligro sísmico.

Es común realizar estudios de peligro sísmico en los que se estiman intensidades en roca o en suelo firme. Después, con algún procedimiento adicional se consideran las amplificaciones o atenuaciones de las intensidades sísmicas debidas a la presencia de estratos de terreno blando (efectos locales). Sin embargo, conviene tener presente que el suelo firme de una región puede tener propiedades muy distintas al terreno firme de otra región. Por ejemplo, en la propia ciudad de México se ha visto que la zona considerada como terreno firme amplifica de manera importante las ondas sísmicas, debido a que está asentada sobre un suelo más blando que favorece dicha amplificación (Ordaz *et al.* 92). Por ello, no basta con saber que el suelo del sitio en estudio es

firme, sino que conviene tener registros sísmicos del sitio e información referente a las propiedades del terreno a distintas profundidades. Por los diversos factores que influyen en la atenuación de las intensidades sísmicas, es preferible que al calcular el peligro sísmico en una región se empleen leyes de atenuación obtenidas con registros de la propia región en estudio.

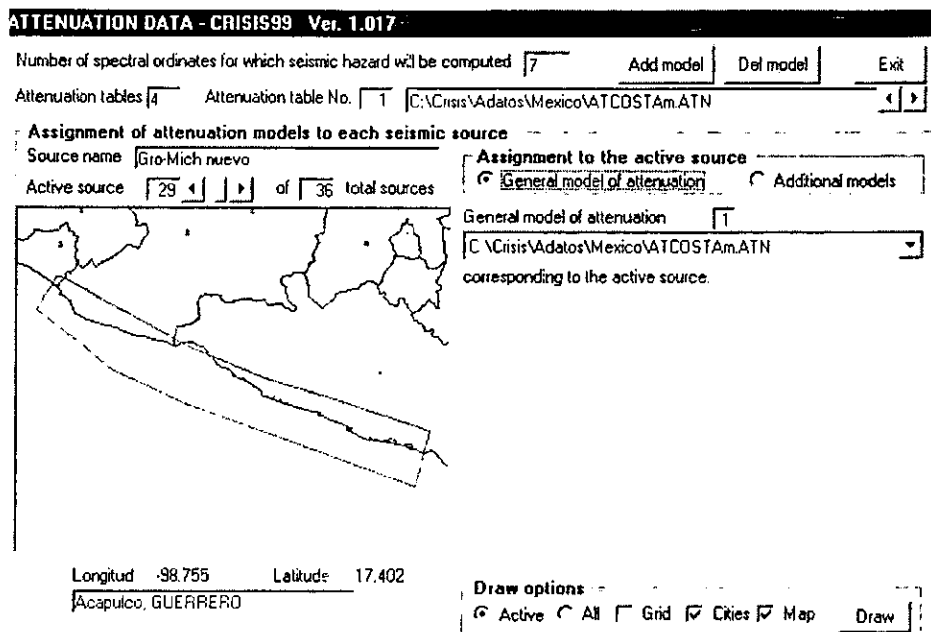


Fig. III.6.2.1. Pantalla de leyes de atenuación. Opción para la asignación de la ley de atenuación general de la fuente sísmica.

### III.6.2. Efectos locales

Las amplificaciones producidas por estratos blandos de suelo pueden ser sumamente importantes. Caso notorio es la ciudad de México, donde se han estimado factores de amplificación con valores muy distintos, aun en suelos con propiedades similares. Por ejemplo, dos sitios cercanos en la ciudad de México con casi el mismo periodo dominante, presentan amplitudes de 10 y 30 veces respectivamente. Se han determinado también valores de amplificación de hasta 75 veces en zonas de lago con estratos de arcilla profundos en Xochimilco-Tláhuac y Texcoco, con periodos dominantes entre 4 y 5.1 s (Reinoso *et al*, 97). De manera que en lugares como la ciudad de México los efectos de sitio representan un factor determinante en el tamaño del movimiento del terreno. En el programa CRISIS99 es posible considerar dichos efectos mediante las leyes de atenuación (Fig.III.6.2.2). Por ejemplo, existen leyes de atenuación que consideran algunos de los efectos especiales que se presentan en la ciudad de México (Ordaz, 97). La propia ciudad de

México podría dividirse en varias zonas que tuvieran leyes de atenuación diferentes, las cuales incluyeran los efectos de amplificación.

Hay casos en que la información de sitios permite realizar mapas de efectos sísmicos con mucho detalle. Sin embargo, CRISIS99 considera efectos locales únicamente en función de las leyes de atenuación asignadas a cada fuente (Fig. III.6.2.1). Por lo que la precisión en la definición de zonas con efectos locales dependerá principalmente de la densidad de la malla de cálculo, y de los polígonos empleados en la asignación de leyes de atenuación.

Por ejemplo, en la figura III.6.2.2 se muestra la pantalla en la que se le asignó una ley de atenuación adicional a la fuente sísmica llamada subducción Jalisco. En dicho ejemplo se usará la ley de atenuación adicional llamada ATCOSDF.atn, únicamente para calcular intensidades sísmicas en puntos de la malla de cálculo que estén dentro de la región de atenuación, llamada ciudad de México, debidos a sismos ocurridos en la fuente Subducción Jalisco. Esta región de atenuación ciudad de México se definió con 4 vértices cuyas coordenadas también se muestran en la figura III.6.2.2. Si sólo se considera una ley de atenuación adicional para la fuente Subducción Jalisco, entonces en cualquier sitio fuera de la región particular de atenuación Ciudad de México, se empleará la ley de atenuación general llamada ATCOSTAm.ATN (Fig. III.6.2.1)

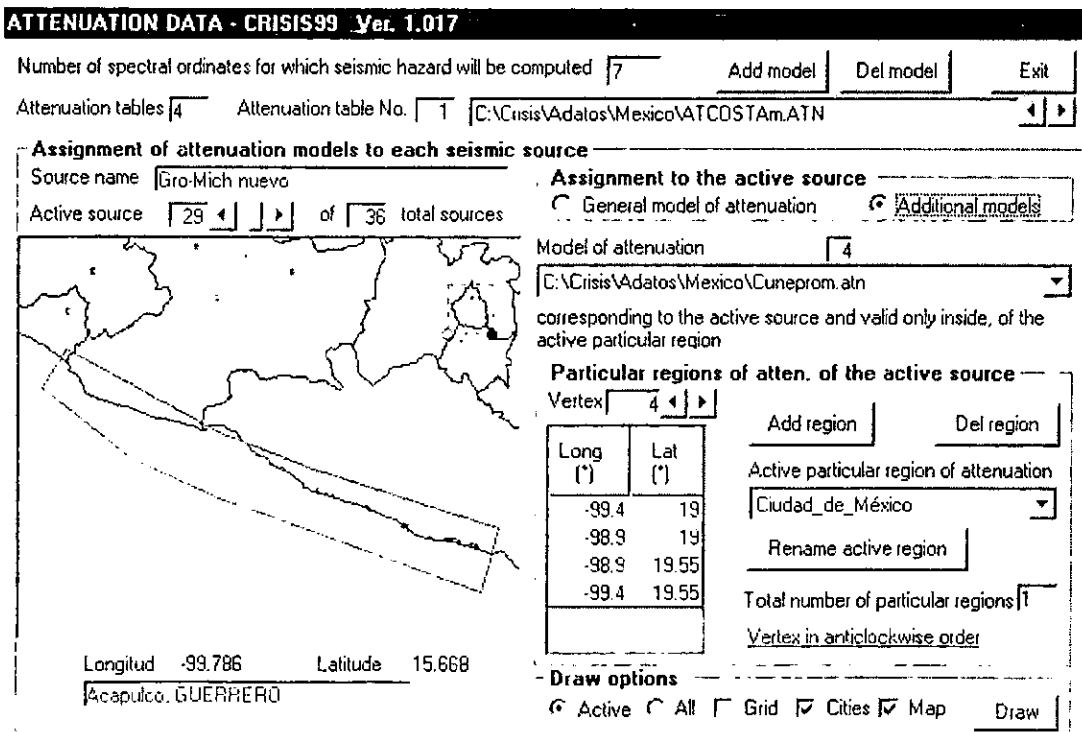


Fig. III.6.2.2. Pantalla de leyes de atenuación Opción para la asignación de leyes de atenuación adicionales.

**Datos mínimos requeridos por CRISIS99 en la pantalla *Attenuation Data***

*Number of spectral ordinates for which seismic hazard will be computed.* Número de ordenadas espectrales para las cuales se calculará peligro sísmico. Para poder calcular intensidades sísmicas de diversos periodos estructurales. se requiere que las leyes de atenuación tengan datos para cada uno de tales periodos. Ejemplo: 7

Por cada ley de atenuación a considerar se requiere un archivo, el cual contendrá en formato de tabla los parámetros que definen a la ley de atenuación. Las tablas que representan a la ley de atenuación pueden hacerse en cualquier editor de textos. Cada tabla debe cumplir con el formato mostrado en el apéndice A.

El botón *Add Model* de la pantalla *Attenuation Data* permite agregar al proyecto los archivos previamente creados que contienen las tablas de atenuación. Por tal motivo, cuando se use la ventana *Attenuation data* ya deben existir los archivos que contengan las leyes de atenuación en forma de tabla (apéndice A). Al hacer click sobre el botón *Add Model*, aparece el cuadro de diálogo que permite seleccionar cada archivo que contiene una tabla de atenuación. Deben agregarse tantos archivos como leyes de atenuación diferentes se deseen emplear en los cálculos.

En el marco *Assignment of attenuation models to each seismic source* se debe asignar una o varias leyes de atenuación a cada fuente sísmica. Junto al letrero *Source name* aparece el nombre de la fuente sísmica a la que se le debe asignar al menos una ley de atenuación.

La opción llamada *General model of attenuation* del marco *Assignment to the active source*, permite asignarle a la fuente sísmica activa una ley de atenuación. Esta ley de atenuación para fines de identificación dentro de CRISIS99 se llama Modelo General de Atenuación. A todas las fuentes sísmicas se les debe asignar una ley de atenuación dentro de esta opción llamada *General model of attenuation*.

La opción llamada *Additional models* del marco *Assignment to the active source* permite asignarle a la fuente sísmica activa más de una ley de atenuación. Sin embargo, para ello se requiere definir la región en la que será válida cada ley de atenuación adicional. El botón *Add particular region* permite iniciar la definición de la región particular en la que será válida una ley de atenuación adicional. La barra de deslizamiento junto al letrero *vertex* se emplea para agregar vértices a cada región particular. Se deben proporcionar las coordenadas de cada vértice. A cada región particular se le debe asignar una ley de atenuación. CRISIS99 dibuja las regiones particulares con línea punteada para distinguirlas de las fuentes sísmicas.

Es posible realizar cálculos de peligro sísmico sin que se hayan asignado modelos adicionales de atenuación. En este caso se empleará únicamente la ley de atenuación asignada a cada fuente en la opción ***General model of attenuation.***

Cuando se haya asignado más de una ley de atenuación a ciertas fuentes sísmicas, CRISIS99 verificará qué ley de atenuación usar para cada punto de la malla de cálculo. Las leyes de atenuación adicionales son válidas únicamente dentro de su propia región particular. La ley de atenuación general de cada fuente es válida en cualquier sitio si solo se asignó una ley de atenuación. Si se asignaron ley o leyes de atenuación adicionales, la ley de atenuación general será válida fuera de las regiones particulares correspondientes a las leyes de atenuación adicionales.

#### **Ayudas gráficas**

Permiten observar la geometría de la fuente sísmica a la que se le están asignando ley o leyes de atenuación.

En el marco llamado ***Draw options*** se elige si se desea ver la fuente activa o todas las fuentes. También se puede ver el mapa y las ciudades.

#### **Sugerencias**

No olvide hacer los archivos que contengan las leyes de atenuación a usar en los cálculos de *peligro sísmico*, antes de entrar a la pantalla de *Data Attenuation* de CRISIS99. El formato requerido de las tablas se muestra en el apéndice A.

### **III.7. Pantalla de intensidades**

CRISIS99 considera a la intensidad, como una medida razonable y con significado ingenieril del tamaño del temblor en el sitio de interés. Son medidas de intensidad comúnmente usadas la aceleración máxima del terreno, la velocidad máxima del terreno y las ordenadas del espectro de respuesta para 5% del amortiguamiento crítico (Ordaz, 97). CRISIS99 calculará tasas de excedencia para los valores de intensidad definidos por el usuario. Para ello, CRISIS99 (Fig.III.7.1.) requiere los valores extremos que definan el intervalo de intensidades por considerar y el número de puntos a contemplar dentro de dicho intervalo. Se debe fijar un intervalo de intensidades para cada periodo estructural establecido. Por ejemplo, se puede indicar que para el periodo estructural de 0.15 s se calcule la tasa de excedencia de 10 aceleraciones distintas (con separación logarítmica), con valores

entre 1 y 2000 gal. En este caso, se obtendrán tasas de excedencia para cada uno de los 10 valores de aceleración (1.00, 2.33, 5.41, 12.60, 29.32, 68.22, 158.74, 369.38, 859.51, 2000.00 [gal]), los cuales permitirán establecer la curva de las tasas de excedencia de la aceleración. Los límites de los intervalos de intensidades suelen requerir modificaciones en función de resultados de peligro sísmico. Es decir, se requiere calibrar los intervalos de intensidades hasta conseguir que contengan las intensidades asociadas a las tasas de excedencia de interés.

**INTENSITIES FOR EACH SPECTRAL ORDINATE - CRISIS99 Ver. 1.014**

Total number of spectral ordinates	<input type="text" value="7"/>
Actual spectral ordinate	<input type="text" value="4"/>
Structural period of actual spectral ordinate	<input type="text" value="0.5"/> ◀ ▶
Lower limit of intensity level	<input type="text" value="1"/>
Upper limit of intensity level	<input type="text" value="1500"/> Units <input type="text" value="gal"/>
Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed	<input type="text" value="5"/> <span style="float: right;"><input type="button" value="Exit"/></span>

Fig. III.7.1. Pantalla de CRISIS99 para definir las intensidades sísmicas de las que se obtendrán tasas de excedencia

**Datos requeridos por CRISIS99 en la pantalla *Intensities for each spectral ordinate***

*Lower limit of intensity level.* Se debe proporcionar el valor del límite inferior del nivel de intensidad para cada periodo estructural y cada ordenada espectral. El número junto al letrero *Structural period of actual spectral ordinate*, indica el periodo estructural al cual corresponden los datos de los límites de intensidad mostrados en la pantalla. Los valores de los periodos estructurales mostrados en la pantalla fueron leídos por CRISIS99 del archivo que contiene la primera ley de atenuación agregada en la pantalla *Attenuation Data*. Los valores de los periodos estructurales sólo se emplean para fines de identificación, por ello cuando el periodo estructural no tenga significado bastará con establecer números secuenciales.

*Upper limit of intensity level.* Se debe proporcionar el valor del límite superior del nivel de intensidad para cada periodo estructural y cada ordenada espectral.

*Units.* Se deben proporcionar las unidades correspondientes a cada intervalo de intensidades.

La barra de desplazamiento junto al letrero *Structural period of actual spectral ordinate* permite ver los periodos a los cuales se les debe asignar límites de las intensidades y sus correspondientes unidades.

Finalmente junto al letrero *Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed* se debe escribir un valor entre 2 y 20, que indica el número de puntos a considerar dentro de cada intervalo de intensidades asignado.

**Sugerencias**

Diez puntos dentro de cada intervalo de intensidades asignado suele proporcionar buenas definiciones de la curva de tasa de excedencia de las intensidades. Las intensidades establecidas en las leyes de atenuación son referencia útil para la elección de los límites de las intensidades.

**III.8. Pantalla de parámetros globales**

El programa CRISIS99 calcula intensidades sísmicas para los periodos de retorno establecidos por el usuario (Fig. III.8.2) La gráfica de la figura III.8.1. muestra algunas de las curvas que suelen emplearse para realizar estimaciones de distintas probabilidades de excedencia, en diferentes periodos. Por ejemplo, una intensidad con periodo de retorno de 200 años, tiene también 22% de probabilidad de que sea excedida en 50 años. Las intensidades para un periodo de retorno de 475 años se emplean con mucha frecuencia como parámetros en el diseño de edificios. En tal periodo existe 10% de probabilidad de que la intensidad sea excedida en 50 años. La expresión que permite evaluar distintas probabilidades de excedencia en distintos periodos es de la forma:

$$\text{Periodo de retorno} = -T / \ln(1 - P(A > a))$$

donde  $P(A > a)$  es la probabilidad de excedencia elegida para el periodo seleccionado  $T$ .

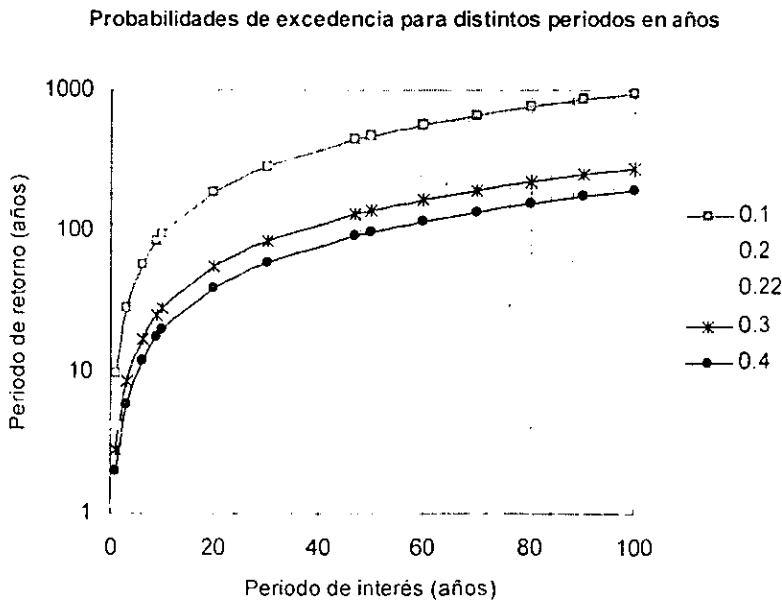


Fig. III.8.1. Gráfica de probabilidades de excedencia para distintos periodos.



Con el fin de hacer cálculos eficientes en CRISIS99 se requiere fijar un radio máximo para los sitios en estudio (Fig.III.8.2). CRISIS99 desprecia la influencia que pudieran producir fuentes sísmicas fuera de la esfera definida por el sitio y el radio máximo. Por tal motivo la selección del radio máximo requiere del criterio del usuario. Cuando no se tiene certeza al respecto, conviene proporcionar grandes distancias para evitar errores en los cálculos de peligro sísmico por subestimar fuentes sísmicas.

**GLOBAL PARAMETERS - CRISIS99 Ver. 1.00**

**Integration parameter**

Parameter controlling the spatial integration process  km

**Fixed return periods**

First return period	<input type="text" value="50"/>	years
Second return period	<input type="text" value="100"/>	years
Third return period	<input type="text" value="150"/>	years
Fourth return period	<input type="text" value="1000"/>	years
Fifth return period	<input type="text" value="10000"/>	years

Fig. III.8.2. Pantalla para asignar parámetros globales como periodos de retorno.

**Datos requeridos en la pantalla *Global Parameters***

*Parameter controlling the spatial integration process.* Este valor es el del radio, con centro en cada punto de la malla de cálculo, fuera del cual CRISIS99 despreciará la influencia de fuentes sísmicas.

*Fixed return periods.* CRISIS99 requiere que se definan cinco periodos de retorno para los cuales el programa obtendrá resultados.

Al entrar en la pantalla *Global Parameters* por primera vez durante la creación de un archivo de datos, aparecerán valores propuestos de los datos requeridos en dicha pantalla. Basta con escribir sobre ellos para proponer valores diferentes a los propuestos.

Comentarios

CRISIS99 escribirá resultados para los periodos de retorno elegidos en la pantalla *Global Parameters* en los archivos tipo ASCII. Sin embargo, con el post-procesador de CRISIS99 se pueden obtener mapas de intensidades para cualquier periodo de retorno.

### III.9. Pantalla de resumen de fuentes sísmicas

La pantalla de resumen de fuentes sísmicas (Fig.III.9.1) permite revisar los datos generales asignados a cada fuente sísmica: geometría, sismicidad y ley de atenuación general.

**SUMMARY OF THE SOURCES - CRISIS99 Ver. 1.014**

Source number    Number of vertex

Source Name  
Subducción Jalisco M<7

General attenuation file corresponding to the actual source  
C:\Crisis\Adatos\Mexico\ATCOSTAm.ATN

Long (°)	Lat (°)	Depth (km)
-106	20	7
-104.5	18.5	7
-104	19	28
-105.65	20.65	20

**Poisson Model**

$\lambda$  (M0)

Expected value of  $\beta$

Coefficient of variation of  $\beta$

Expected value of the maximum magnitude

Expected standard deviation of the maximum magnitude

Maximum observed magnitude

Threshold magnitude (M0)

**Draw options**

Active  All  Map  Cities

Cd. Guzmán, JALISCO

Area source Longitude -103.767 Latitude 20.238

Fig. III.9.1. Pantalla para ver datos generales asignados a cada fuente sísmica.

#### Comentarios

En la pantalla *Summary of the sources* únicamente se pueden ver los datos asignados a las fuentes sísmicas. Para modificar algún dato se requiere ir a la pantalla correspondiente. En la pantalla *Summary of the sources* solamente se muestra la ley de atenuación general asignada a cada fuente. Para verificar si hay leyes de atenuación adicionales se debe referir a la pantalla *Data Attenuation*.

### III.10. Pantalla de validación de datos

El comando *validate* del menú *Run* de la pantalla principal de CRISIS99 permite verificar que los datos proporcionados para calcular peligro sísmico sean válidos. Cuando CRISIS99 encuentra algún valor incorrecto indica cuál es el error.

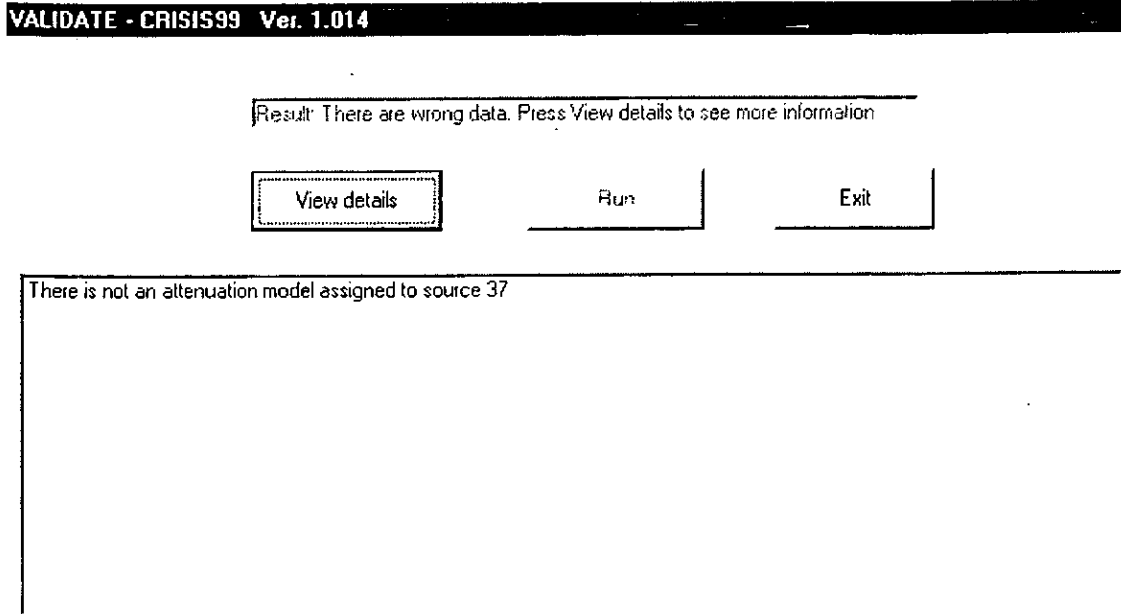


Fig. III.10.1. Pantalla para verificar datos antes de iniciar cálculos.

#### Información proporcionada por la Pantalla *Validate*

Esta pantalla muestra el resultado de revisar los datos proporcionados para calcular peligro sísmico. Si los datos son correctos entonces aparecerá el letrero: *There are not wrong data. Press Run to start calculations.* Al oprimir el botón *Run* se iniciarán los cálculos de peligro sísmico. En cambio si se encuentran errores aparecerá el letrero: *There are wrong data. Press View details to see more information.* Al oprimir el botón *View details* aparecerá la lista de los errores encontrados por CRISIS99.

#### Sugerencias

Aún cuando el cálculo de peligro sísmico con CRISIS no se realice en una PC, es muy recomendable revisar los datos con CRISIS99 para Windows, porque sólo en esta versión se realiza una revisión detallada de los datos.

### III.11. Pantalla de selección de archivos de resultados

De acuerdo al tipo de estudio de peligro sísmico que se realice será la información principal requerida. Por tal motivo en CRISIS99 se pueden seleccionar los archivos de resultados que se requieren generar. La elección de los archivos de resultados que se desea obtener se realiza en la pantalla llamada *Output files* (Fig.III.11.1), la cual se activa con el comando *Output files* del menú *Run*.

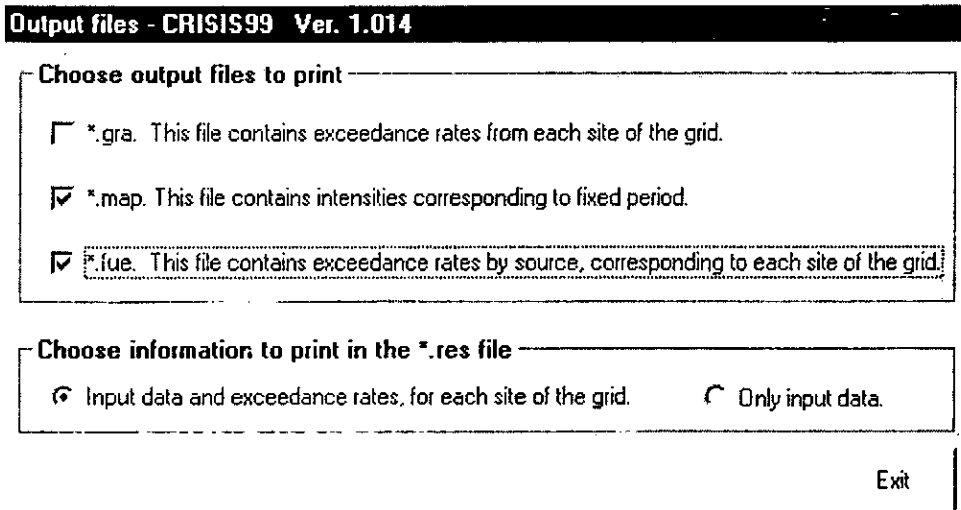


Fig. III.11.1. Pantalla para seleccionar archivos de resultados.

#### Datos requeridos por la Pantalla *Output files*

En esta pantalla se deben elegir los archivos en formato ASCII que se desean obtener. Por *default* CRISIS99 generará todos los archivos posibles con resultados. El archivo \*.res siempre se generará; sin embargo, es posible elegir si se guardan resultados en dicho archivo o solo se guardan los datos.

Sugerencias

Verifique siempre en el archivo \*.res que se hayan proporcionado correctamente los datos para calcular peligro sísmico. Algunos graves errores en los datos harán abortar la ejecución de CRISIS99. Al observar el archivo \*.res es posible detectar hasta que dato CRISIS99 consideró correcto.

Es muy recomendable elegir que se guarden en el archivo \*.res las tasas de excedencia de las intensidades por sitio, porque en este archivo se indica el tiempo de ejecución empleado para cada punto de cálculo. Al abrir este archivo con algún editor poderoso durante el cálculo de peligro sísmico es posible verificar que la ejecución continúa y en que parte de la misma se encuentra.

El archivo \*.fue suele ocupar mucho espacio en memoria, por lo que se recomienda tenerlo presente al realizar ejecuciones con mallas con gran densidad de puntos.

### III.12. Pantalla de inicio de cálculo de peligro sísmico

Cuando los datos son suficientes, es posible iniciar el cálculo de peligro sísmico. Con el comando *Start* del menú *Run* se inician los cálculos. La pantalla de la Fig. III.12.1. indica que estos se han iniciado.

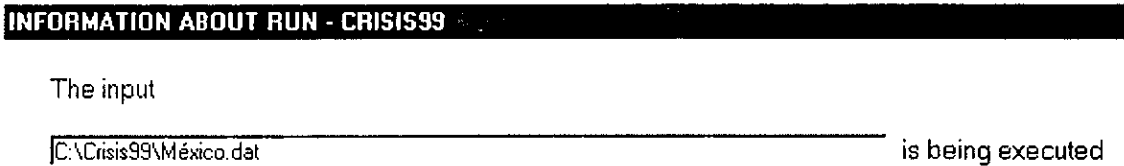


Fig. III.12.1. Pantalla del programa CRISIS99 que indica cual archivo de datos está usando el programa para calcular peligro sísmico.

Si CRISIS99 no detecta errores, entonces calculará tasas de excedencia de intensidades en cada punto de la malla, por la influencia de cada fuente sísmica. Para hacerlo CRISIS99 emplea el modelo de peligro sísmico descrito en la sección III.12.1

Comentarios

Al activar una pantalla de algún otro programa sobre la pantalla *Information about run* esta última cambiará a color blanco; sin embargo esto no implica que se haya generado algún error.

Si se abre la ventana del Sistema Operativo Windows desde donde es posible cerrar programas que están en ejecución, junto al nombre de CRISIS99 aparecerá el letrero que indica que no responde el programa. Sin embargo, esto no significa necesariamente que se haya generado algún error en la ejecución de CRISIS99. En este caso se recomienda abrir el archivo \*.res para verificar que la ejecución continúa.

### III.12.1. Modelo de peligro sísmico

Si se considera una fuente sísmica y un punto de cálculo, y si se conoce la distancia de los focos al sitio,  $R_0$ , y los parámetros  $p$  que definen la curva de tasas de excedencia de la magnitud,  $\lambda(M)$ , es posible obtener la tasa de excedencia de aceleración (o de otra intensidad),  $v(a | R_0, p)$  mediante:

$$v(a | R_0, p) = - \int_{M_0}^{M_{tu}} \frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > a | M, R_0) dM \quad (III.12.1.1)$$

donde  $\Pr(A > a | M, R_0)$  es la probabilidad de que la intensidad  $A$ , exceda el valor  $a$ , dadas cierta magnitud y distancia. En este caso

$$\Pr(A > a | M, R_0) = \Phi \left( \frac{1}{\sigma_{\ln a}} \ln \frac{\bar{a}(M, R_0)}{a} \right) \quad (III.12.1.2)$$

donde  $\Phi$  denota distribución normal estándar,  $\sigma_{\ln a}$  es la desviación estándar del logaritmo natural de las intensidades de la ley de atenuación, y  $\bar{a}$  es la mediana de la intensidad, obtenida de la tabla de atenuación, dadas una magnitud y una distancia.

En la expresión III.12.1.1 se incluyen tanto la ley de atenuación como la incertidumbre en ella. Sin embargo, para la zona sismogénica, ni la distancia epicentral es constante ni los parámetros  $p$  que definen la curva de tasas de excedencia de la magnitud, son deterministas. Por tanto, para calcular la tasa de excedencia no condicionada,  $v(a)$  procede calcular el valor esperado con respecto a las variables inciertas, por lo que la expresión de cálculo de la tasa de excedencia de la aceleración es:

$$v(a) = \int_{R(R_0)} \int_{p(p)} v(a | R_0, p) p_p(p) dp dR_0 \quad (III.12.1.3)$$

donde  $p_p(p)$  es la densidad conjunta de probabilidades, de los parámetros que definen a  $\lambda(M)$ , y  $p_R(R_0)$  es la densidad de probabilidades de la distancia epicentral.

La ecuación (III.12.1.3) proporciona la contribución de una fuente, y cuando se consideran varias fuentes basta sumar las contribuciones de todas las fuentes sísmicas, para obtener la tasa de excedencia total.

### III.12.2. Integración espacial en el cálculo de peligro sísmico

El cálculo de peligro sísmico implica la solución de integrales múltiples. Para lograrlo CRISIS99 emplea métodos numéricos.

La integración que con respecto a la distancia requiere realizar CRISIS99 presenta problemas adicionales, porque la distancia es un factor determinante en los efectos que puede producir un sismo. Con esta consideración y con la idea de hacer cálculos eficientes, CRISIS99 emplea un método de división de la fuente sísmica, en función de la distancia de la fuente al sitio de cálculo. Así, cuando un sitio está muy cerca de una fuente sísmica el programa divide en numerosas subfuentes la fuente sísmica, para lograr mayor precisión durante la integración espacial. En fuentes área la división se realiza en triángulos, es decir, independientemente de la forma de la fuente ésta será dividida en triángulos. Cada uno de los triángulos resultantes a su vez se dividirá en más triángulos si la cercanía con el sitio en estudio lo amerita.

Son dos los parámetros dentro del programa CRISIS99 que controlan la división de fuentes área: 1) El tamaño equivalente, igual a la raíz cuadrada del área de la subfuente triangular y 2) La distancia equivalente, igual a la distancia desde el centroide de la subfuente hasta el sitio en estudio, entre el tamaño equivalente. Los valores de dichos parámetros se establecieron después de realizar pruebas con distintos valores y comprobar que se obtienen resultados razonables.

Los resultados de peligro sísmico son también sensibles a la forma de las fuentes, especialmente a la forma de los triángulos en que se dividirán dichas fuentes. Por ello, se recomienda evitar fuentes área que al triangularse generen triángulos muy alargados. Esto se verifica en el propio CRISIS99, el cual permite ver la división del polígono en triángulos. Más adelante se muestran algunos ejemplos que exhiben la sensibilidad de los resultados de peligro sísmico, a la forma y orientación de los triángulos.



### III.13. Pantalla de éxito en el cálculo de peligro sísmico

En cuánto el programa CRISIS99 finaliza cálculos aparece la pantalla de la Fig. III.10.1. para

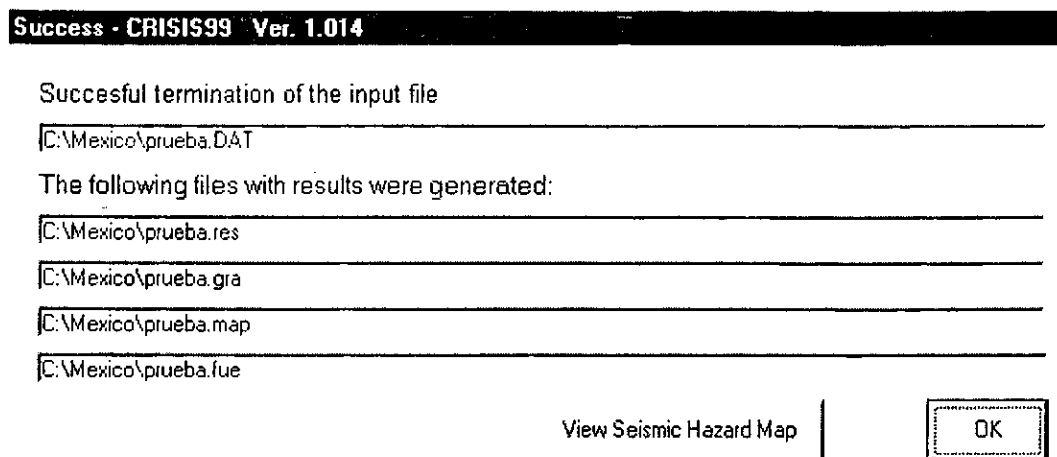


Fig. III.10.1. Pantalla de CRISIS99 que indica los archivos que contienen resultados.

indicar el nombre, y la ubicación de los archivos de resultados que se generaron. La extensión de cada archivo indica la información que contiene cada uno:

El Archivo \*.res contiene la información de los datos utilizados para el cálculo de peligro sísmico. Si se eligió guardar resultados en este archivo, entonces se encontrarán aquí las tasas de excedencia de las intensidades para cada sitio y algunos parámetros que describen los cálculos realizados en cada punto de la malla (ver apéndice B).

El Archivo \*.gra contiene únicamente las tasas de excedencia totales de las intensidades para cada sitio (ver apéndice B). La generación de este archivo es opcional.

El Archivo \*.map contiene intensidades para periodos de retorno fijos para cada sitio (ver apéndice B). La generación de este archivo es opcional.

El Archivo \*.fue contiene las tasas de excedencia de las intensidades debidas a cada fuente sísmica para cada sitio (ver apéndice B). La generación de este archivo es opcional.

Comentarios

Si se calcularon los suficientes puntos (al menos cuatro) para generar mapas de intensidades, es posible oprimir el botón *View Seismic Hazard Map*, para ejecutar el post-procesador de CRISIS99 y generar un mapa de intensidades.


**III.14. Pantalla del Post-Procesador Map Generator de CRISIS99**

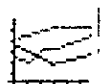
El post-procesador *Map Generator* de CRISIS99 permite obtener mapas de intensidades sísmicas para diferentes periodos de retorno, a partir de los resultados calculados por CRISIS99. Dicho post-procesador puede generar también espectros de peligro uniforme y gráficas de las tasas de excedencia para cualquier punto seleccionado dentro de la malla de cálculo. Con el Map Generator de CRISIS99 se pueden ver gráficas de las leyes de atenuación para distintas magnitudes. Para dibujar mapas de intensidades sísmicas el post-procesador de CRISIS99 realiza interpolaciones; por ello se debe tener especial cuidado en la interpretación de los mapas. Para facilitar la correcta interpretación de resultados, se recomienda comparar los mapas con los resultados para cada sitio impresos en los archivos \*.map, \*.gra y \*.res.

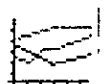
Si se calculan tasas de excedencia de las intensidades para distintos periodos estructurales, es posible obtener con el post-procesador de CRISIS99 espectros de peligro uniforme, definidos como espectros cuyas ordenadas tienen el mismo periodo de retorno.

**Pantalla *Seismic Hazard***



Al hacer click sobre el botón  de esta pantalla aparecerá una nueva ventana con un mapa de intensidades. En esta nueva ventana es posible generar mapas para cualquier periodo de retorno y para las distintas intensidades consideradas.



Al oprimir el botón  de la pantalla *Seismic Hazard* aparecerá la ventana donde es posible obtener gráficas con la información de las leyes de atenuación consideradas en los cálculos.

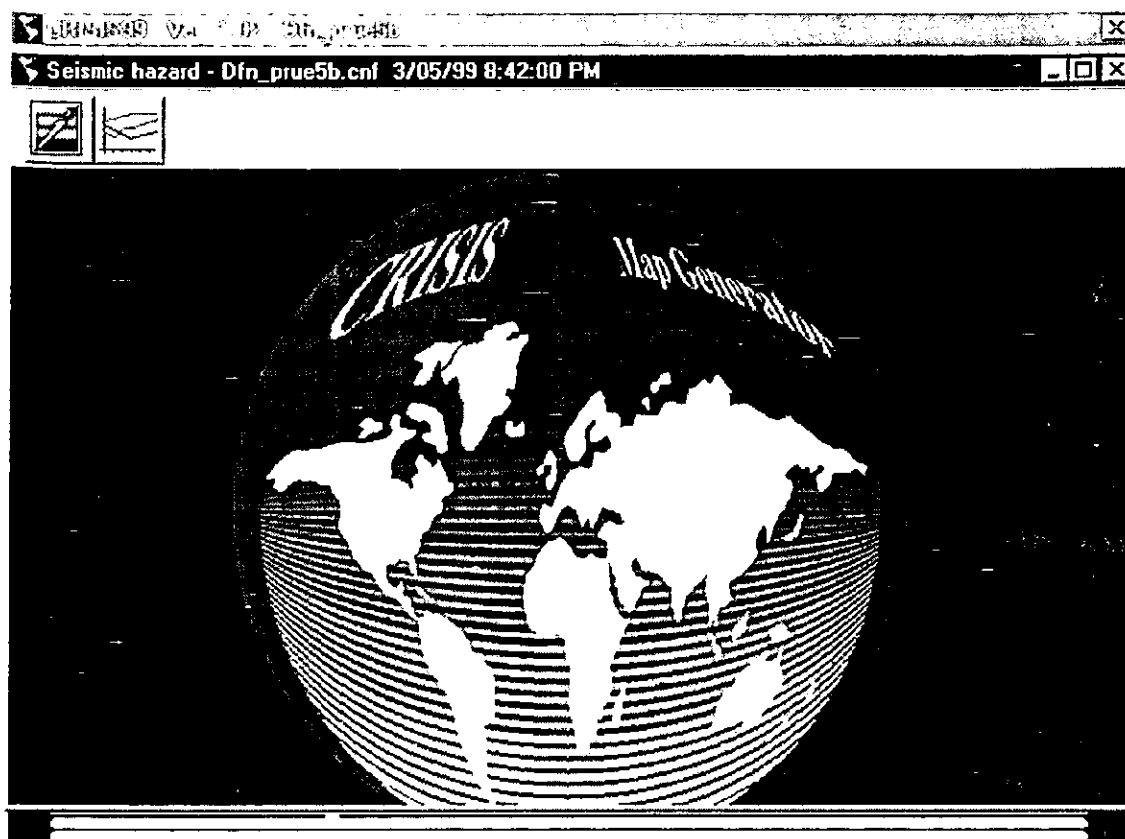


Fig. III.11.1. Pantalla de CRISIS99 para ver mapas de intensidades sísmicas.

### III.14.1. Influencia de la malla de cálculo en los mapas de mapas de peligro sísmico realizados con el post-procesador *Map Generator* de CRISIS99.

A medida que aumenta el número de puntos de la malla de cálculo crece el tiempo requerido por la computadora para obtener resultados: por ejemplo, cálculos de peligro sísmico de la República Mexicana con una malla de sitios a cada medio grado y para una ordenada espectral (4820 puntos de cálculo), requieren 5 ½ horas en una PC (Pentium de 200 Mhz de velocidad y 32 Mb en RAM). Sin embargo, dicho tiempo depende también del número de fuentes sísmicas empleadas, la distancia de las mismas a los sitios de cálculo de la malla, etc.

Enseguida se describen algunos ejemplos en los que se muestra a la izquierda del lector, la figura de la fuente sísmica y la malla de puntos de cálculo en estudio y a la derecha, el mapa de intensidades de peligro sísmico resultante. En todos los casos los mapas de intensidades son lo que se obtienen al usar el post-procesador *Map Generator* de CRISIS99.

*Caso M1.* Malla cuadrada de 11x11 líneas con separación uniforme de 0.1 de grado. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.

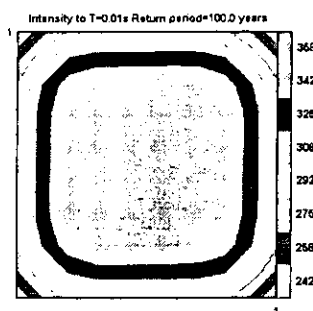
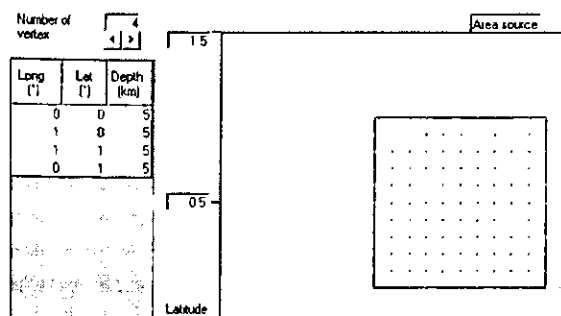


Figura M1a. Fuente sísmica

Figura M1b. Mapa de intensidades

*Caso M2.* Malla cuadrada de 21x21 líneas con separación uniforme de 0.071 de grado. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.

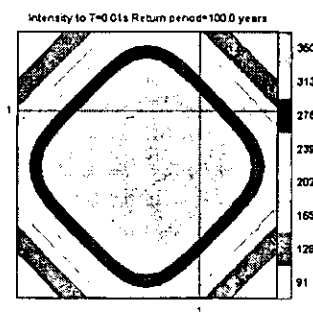
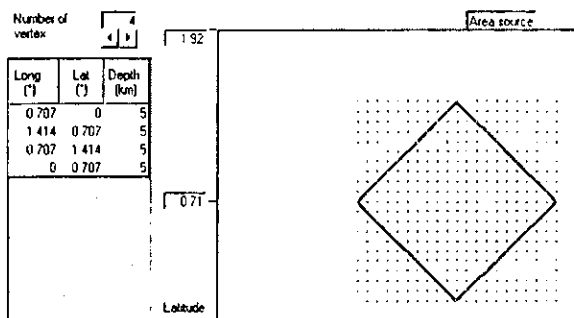


Figura M2a. Fuente sísmica

Figura M2b. Mapa de intensidades

En los casos M1 y M2 la forma de la fuente es la misma pero la posición cambia. La forma y densidad de la malla es distinta en los dos casos. A pesar de ello, como era de esperarse, las intensidades resultantes en los sitios dentro de las fuentes, en los dos casos, son similares. Las líneas

que en el mapa del caso M2 definen fronteras entre niveles de intensidad son más suaves que el caso M1, porque en el caso M2 la malla de cálculo fue más densa.

*Caso M3.* Malla cuadrada de 11x11 líneas con separación uniforme de 0.141 de grado. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.

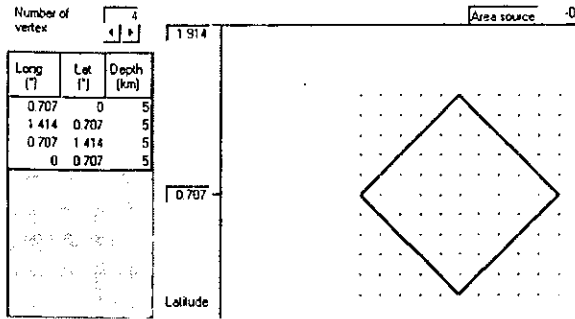


Figura M3a. Fuente sísmica

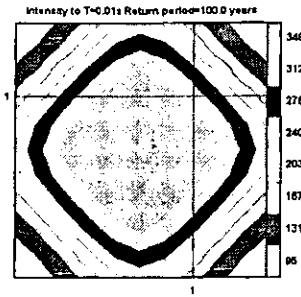


Figura M3b. Mapa de intensidades

Los casos M2 y M3 difieren en la densidad de la malla de cálculo, es decir, en la separación entre sitios de cálculo, lo cual produce mapas de intensidades con ligeras variaciones. Lo que cambia es la definición de los límites entre valores; sin embargo, los valores máximos son prácticamente los mismos.

*Caso M4.* Malla inicial cuadrada de 11x11 líneas con separación uniforme de 0.141 de grado reducida con un polígono auxiliar. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.

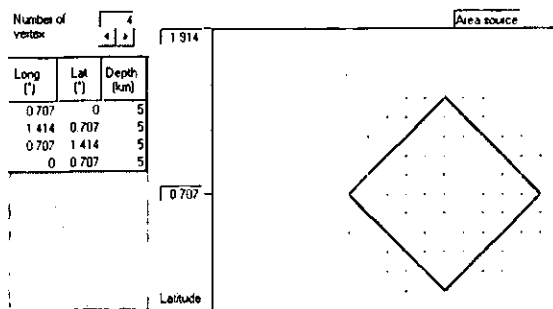


Figura M4a. Fuente sísmica

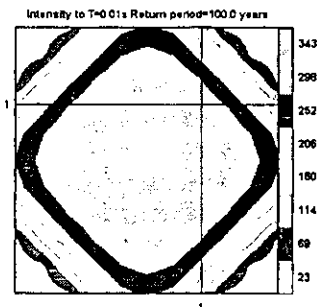
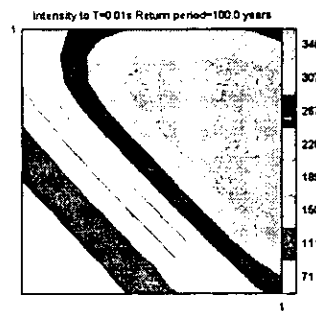
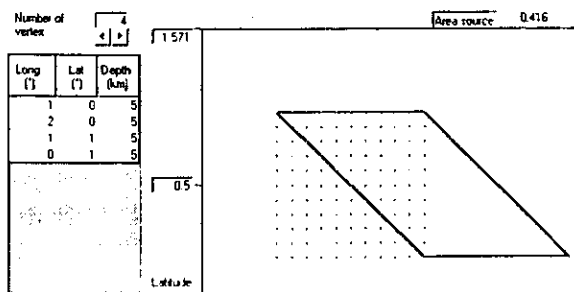


Figura M4b. Mapa de intensidades

El caso M4 muestra que al reducir la malla rectangular inicial mediante algún polígono auxiliar pueden aparecer notorias diferencias en los mapas. Estas diferencias se deben a que el proceso de realización de mapas de CRISIS99 incluye interpolaciones. En casos como este CRISIS99 interpola entre los valores de los puntos de la malla rectangular inicial. Si se redujo la malla rectangular inicial con polígonos auxiliares, como en este ejemplo, entonces CRISIS99 les asigna el valor de cero a los puntos que no se calcularon. Esos valores de cero se emplearán al generar los mapas de intensidades con el post-procesador Map-generator de CRISIS99. Por ello, conviene especificar mallas de cálculo que consideren varias líneas de puntos de cálculo más allá de la región de interés. Esto reducirá las variaciones en los mapas de peligro sísmico.

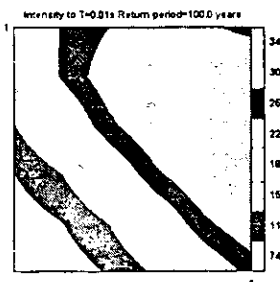
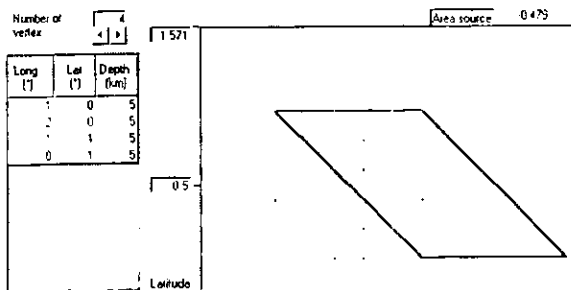
*Caso M5.* Malla inicial cuadrada de 11x11 líneas con separación uniforme de 0.1 de grado. Fuente en forma de paralelogramo con sismicidad uniforme.



*Figura M5a. Fuente sísmica*

*Figura M5b. Mapa de intensidades*

*Caso M6.* Malla inicial cuadrada de 6x6 líneas con separación uniforme de 0.2 de grado. Fuente en forma de paralelogramo con sismicidad uniforme.

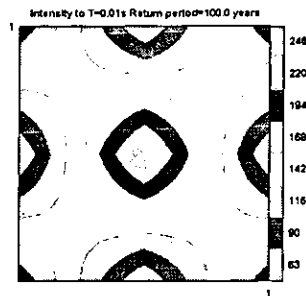
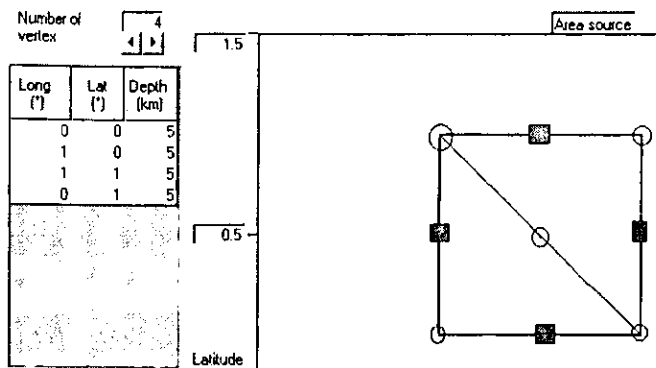


*Figura M6a. Fuente sísmica*

*Figura M6b. Mapa de intensidades*

Los casos M5 y M6 muestran la influencia de la densidad de la malla de cálculo en los mapas de peligro sísmico resultantes. En estos casos la malla considerada es rectangular y no hay efectos debido a sitios con intensidad nula. Sin embargo, la diferencia en la cantidad de puntos de cálculo produce las variaciones en los mapas de intensidades

*Caso M7.* Malla inicial cuadrada de 3x3 líneas con separación uniforme de 0.5 de grado reducida a 5 puntos mediante polígonos auxiliares. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.



- Puntos de la malla donde no se realizaron cálculos, por lo que CRISIS99 les asignó intensidad igual a cero.
- Puntos de la malla en los que CRISIS99 si hizo cálculos.

Figura M7a. Fuente sísmica

Figura M7b. Mapa de intensidades

*Caso M8.* Malla inicial cuadrada de 3x3 líneas con separación uniforme de 0.7 de grado reducida a 5 puntos mediante polígonos auxiliares. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.

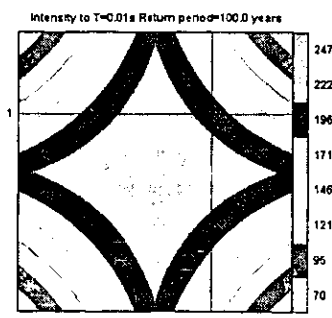
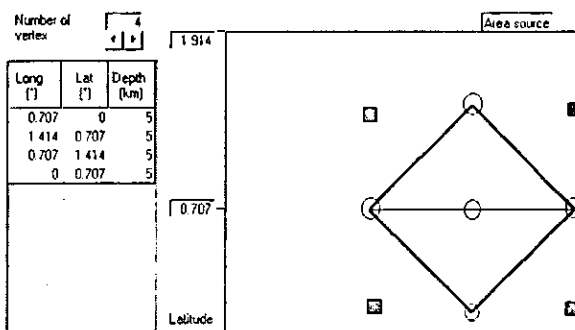


Figura M8a. Fuente sísmica

Figura M8b. Mapa de intensidades

En los dos casos anteriores M7 y M8 los puntos de cálculo con respecto a la fuente sísmica cuadrada son los mismos. Lo que cambia es la posición de la fuente sísmica y por lo tanto la malla rectangular inicial de puntos de cálculo. Del archivo de resultados caso M7.map se obtienen los siguientes valores de intensidad para tasas de excedencia fijas, es decir, para periodos de retornos fijos:

```
PROGRAM CRISIS VERSION 99.10
CasoM7
Date : 1999/ 3/18
```

INTENSITY LEVELS FOR FIXED RETURN PERIODS			
Long.	Lat.	NT	100.00
.00	.00	1	224.92
1.00	.00	1	222.57
.50	.50	1	357.88
.00	1.00	1	222.57
1.00	1.00	1	224.92

De igual forma para el CasoM8 se obtienen sus correspondientes valores de intensidad para tasas de excedencia equivalentes fijas:

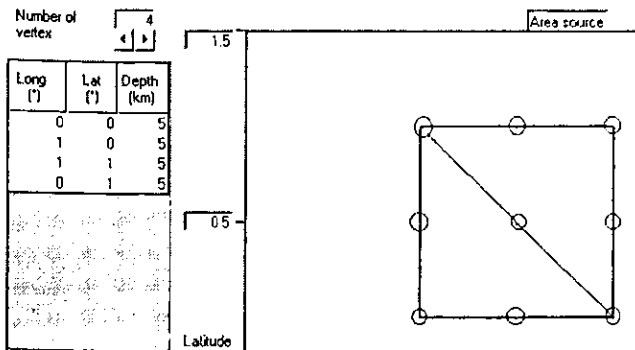
```
PROGRAM CRISIS VERSION 99.10
CasoM8
Date : 1999/ 3/18
```

INTENSITY LEVELS FOR FIXED RETURN PERIODS			
Long.	Lat.	NT	100.00
.71	.00	1	224.94
.00	.71	1	222.59
.71	.71	1	357.92
1.41	.71	1	222.59
.71	1.41	1	224.93

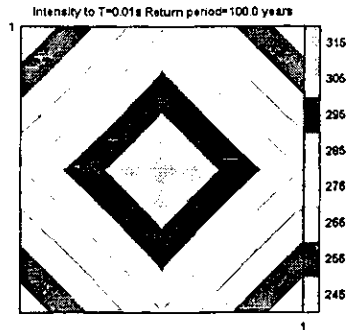
En los casos M7 y M8 la fuente sísmica tiene las mismas dimensiones y la misma sismicidad. Los puntos de calculo con respecto a la fuente sísmica son también los mismos para los dos casos. Por ello las intensidades resultantes son las mismas. Sin embargo, para fines de graficación existen diferencias que se traducen en las gráficas notoriamente distintas mostradas anteriormente. Dichas diferencias se deben principalmente a que el programa graficador de CRISIS99 utiliza la malla rectangular inicial para realizar interpolaciónes. En estos dos casos la malla es de 9 puntos. Por ello, los cuatro puntos que no se calcularon tienen valor de intensidad igual a cero. y el programa generador de mapas utiliza estos valores para interpolar y dibujar la escala de colores correspondiente, lo cual origina la diferencia en los mapas de intensidades. Si en cambio en los dos casos anteriores se calcula la malla completa de 3 x 3. resultan los siguientes mapas de intensidades.



*Caso M9.* Malla cuadrada de 3x3 líneas con separación uniforme de 0.5 de grado. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.

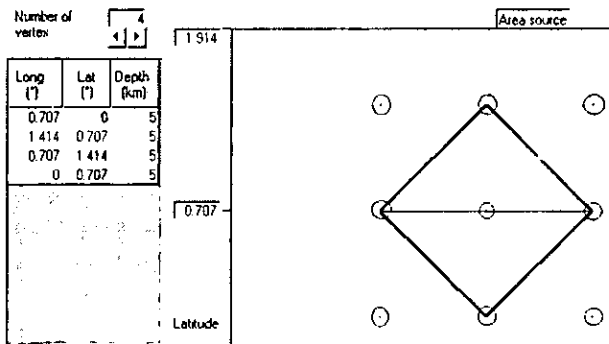


*Figura M9a. Fuente sísmica*

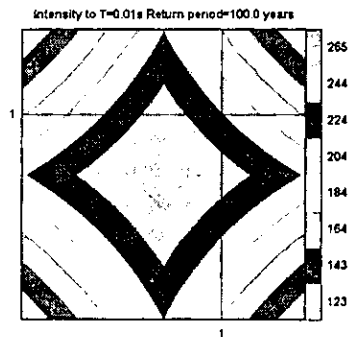


*Figura M9b. Mapa de intensidades*

*Caso M10.* Malla inicial cuadrada de 3x3 líneas con separación uniforme de 0.7 de grado reducida a 5 puntos mediante polígonos auxiliares. Fuente cuadrada con sismicidad uniforme con lados que miden un grado.



*Figura M10a. Fuente sísmica*



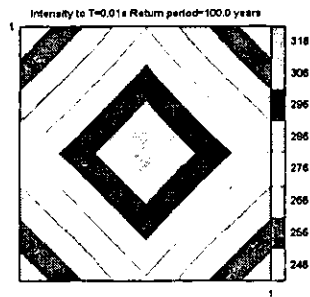
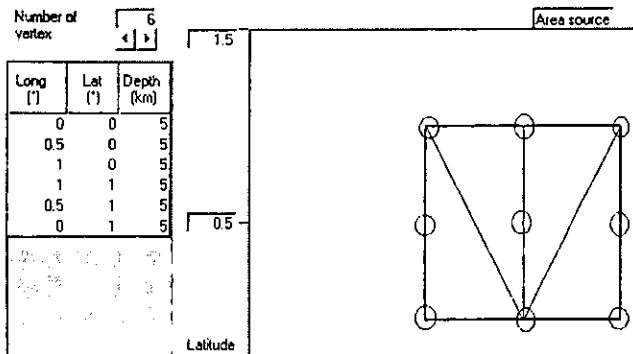
*Figura M10b. Mapa de intensidades*

En los dos casos anteriores M9 y M10 es posible notar gráficas con similar distribución de intensidades. Sin embargo, los resultados aún difieren porque los puntos de calculo respecto a la fuente no son iguales en los dos casos. Con ello se ilustra la importancia de la selección de la malla de puntos de cálculo.

### III.14.2. Influencia del método numérico de integración espacial en resultados de peligro sísmico

Tal como se mencionó en capítulos anteriores para realizar la integración espacial el programa requiere dividir las fuentes sísmicas en subfuentes. En el caso de fuentes área la subdivisión se realizará en triángulos. El número de subdivisiones depende de la cercanía de la fuente al sitio de cálculo. Enseguida se muestran algunos ejemplos en donde la forma de los triángulos y/o el número de los mismos influyen en los resultados de peligro sísmico.

Caso T1. Fuente con sismicidad uniforme con seis vértices que forman un cuadrado con lados que miden un grado. Nueve puntos de cálculo.

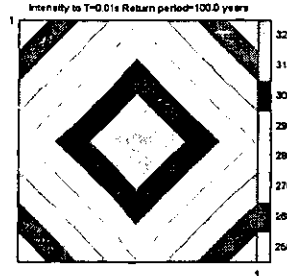
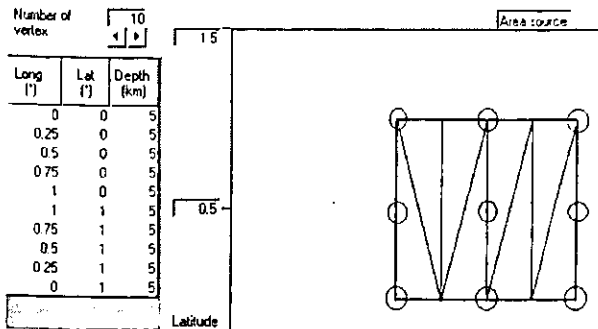


○ Puntos de cálculo.

Figura T1a. Fuente sísmica

Figura T1b. Mapa de intensidades

Caso T2. Fuente con sismicidad uniforme con diez vértices que forman un cuadrado con lados que miden un grado. Nueve puntos de cálculo.



○ Puntos de la malla en los que se hicieron cálculos.

Figura T2a. Fuente sísmica

Figura T2b. Mapa de intensidades

En los casos anteriores T1 y T2 al aumentar el número de vértices aumentó el número de triángulos. El tamaño de los triángulos fue el mismo para cada fuente, es decir, en el caso T1 el número de triángulos fue 4, pero el tamaño de ellos es el mismo. En el caso T2 el número de triángulos fue 8 y también fueron del mismo tamaño, sin embargo, en este caso a diferencia del caso T1 los triángulos no son simétricos. Por lo tanto, hubo cambios en las distancias de integración que producen las pequeñas diferencias en los mapas de intensidades.

Caso T3. Fuente con sismicidad uniforme con doce vértices que forman un cuadrado con lados que miden un grado. Nueve puntos de cálculo.

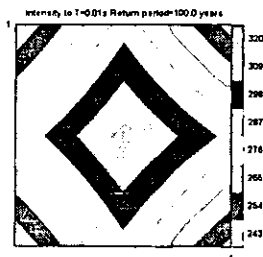
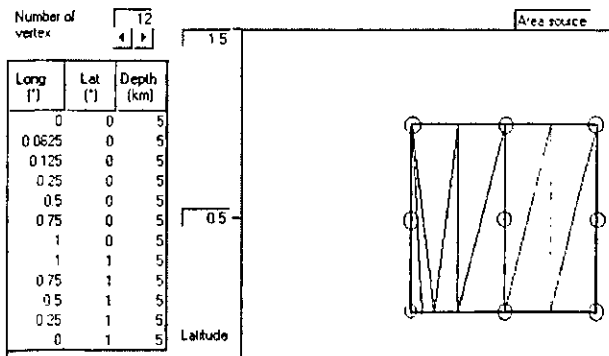


Figura T3a. Fuente sísmica

Figura T3b. Mapa de intensidades

El caso T3 difiere respecto al T2 en el número y ubicación de sus vértices. La posición de los vértices en el caso T3 produce al realizar la subdivisión de la fuente, triángulos de distintos tamaños. La diferencia de tamaño de los triángulos del caso T3 genera variaciones observables con el mapa de intensidades del caso T2. Enseguida se muestran un par de figuras para describir con mayor detalle, lo que ocurre con el proceso de integración que ocasiona dichas variaciones.

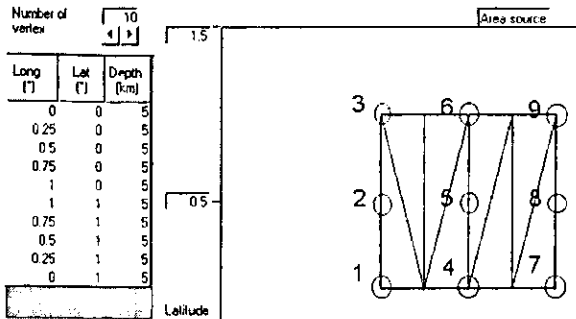


Fig T2c. Puntos de cálculo del caso T2

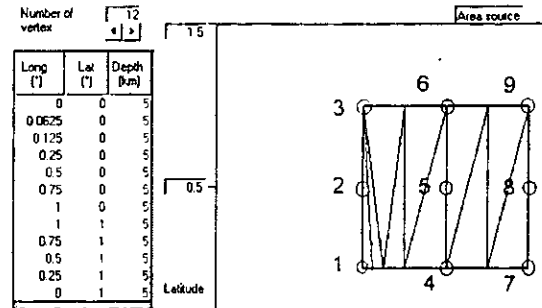


Fig T3c. Puntos de cálculo del caso T3

Sitio	Puntos de integración
1	50
2	74
3	50
4	74
5	116
6	74
7	50
8	74
9	50
<b>Suma</b>	<b>612</b>

Sitio	Puntos de integración
1	55
2	73
3	49
4	76
5	121
6	73
7	49
8	76
9	52
<b>Suma</b>	<b>624</b>

Las figuras T2c y T3c muestran la numeración de los sitios de cálculo. Bajo ellas se indica, para cada caso, el número de puntos empleados en la integración con respecto a la distancia. En los casos anteriores hay diferencias en el número de puntos de integración usados en cada punto. Las diferencias se deben a que la triangulación con que se dividió cada fuente es distinta. La triangulación cambia porque a pesar de tener las mismas dimensiones tienen distinto número de vértices. Por lo tanto, las pequeñas diferencias en los resultados se debe a los distintos puntos de integración usados para cada sitio.

Caso T4. Diez fuentes que forman la misma figura que el caso T3. Suman la misma sismicidad que el caso T3 y tienen los mismos sitios de cálculo.

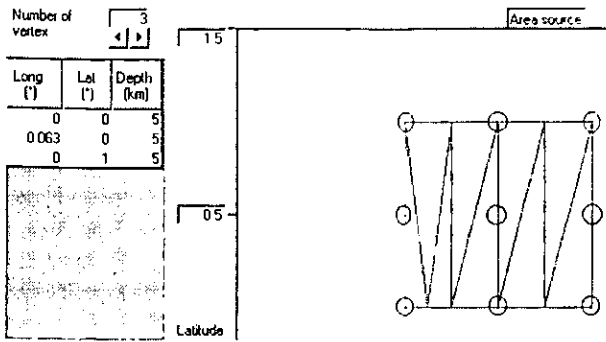


Figura T4a. Fuente sísmica

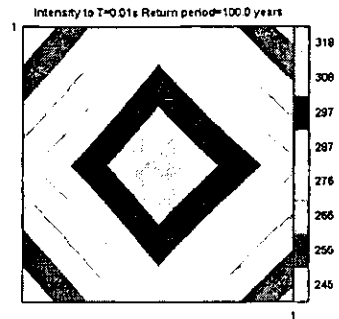


Figura T4b. Mapa de intensidades

Los resultados del caso T4 coinciden con los del caso T3 porque a pesar de que en el caso T4 cada triángulo es una fuente sísmica, en total el número, tamaño y orientación de los triángulos es igual a los del caso T3.

Caso T5. Fuente con doce vértices que forman un cuadrado con sismicidad uniforme con lados que miden un grado. Nueve puntos de cálculo.

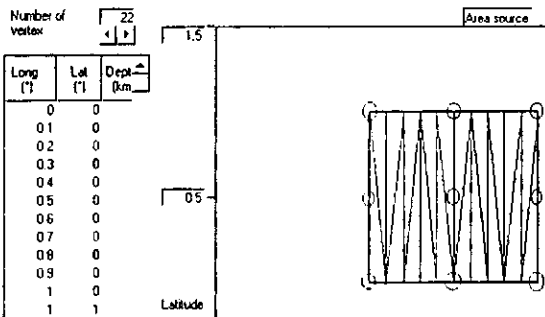


Figura T5a. Fuente sísmica

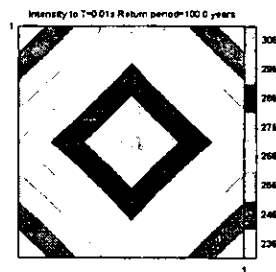


Figura T5b. Mapa de intensidades

En el caso anterior T5 se muestra una fuente que al dividirse en triángulos alargados produce cierta concentración de las intensidades en el lado superior e inferior de la fuente sísmica. En este caso las diferencias de intensidades son pequeñas; sin embargo, se recomienda evitar polígonos que generen triángulos alargados.

Caso T6. Fuente sísmica cuadrada. Sitios de cálculo sólo en las esquinas de la fuente cuadrada. Una ley de atenuación.

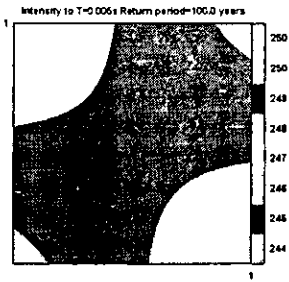
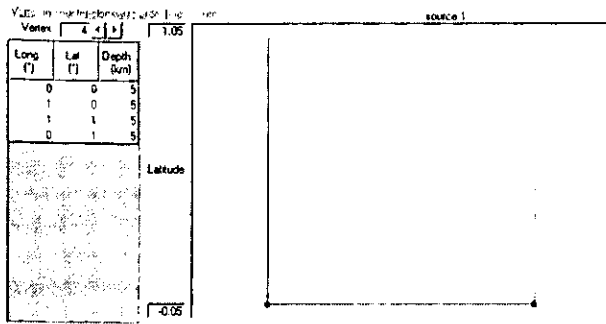


Figura T6a. Fuente sísmica

Fig. T6b. Mapa de intensidades

En el caso T6 la diferencia visible en el mapa de intensidades (Fig. T6b) se debe a que al dividir en triángulos estos no tienen la misma orientación para los cuatro puntos de cálculo en los vértices. Por ello en el punto que se localiza en la esquina superior derecha de la fuente se utilizan 42 puntos de integración con respecto a la distancia, mientras que en el punto que se encuentra en la esquina superior izquierda solo se utilizan 36. Esto explica porqué en una esquina el valor es mayor que en la otra; sin embargo, dichas diferencias no son grandes pues representan para este caso cerca del 2%.

Caso T7. Fuente cuadrada con puntos de cálculo sobre la fuente.

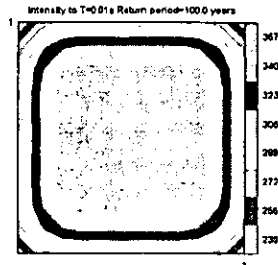
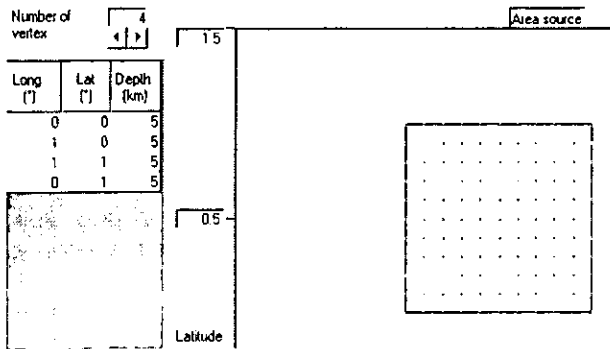


Figura T7a. Fuente sísmica

Figura T7b. Mapa de intensidades

En el caso T7 se muestra que los efectos que se produjeron en el mapa del caso T6 se reducen, tan solo con aumentar el número de puntos de cálculo.

Caso T8. Dos fuentes con la misma geometría y sismicidad con puntos de cálculo sólo dentro de una de las fuentes.

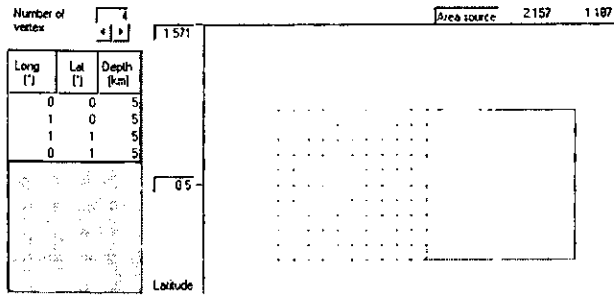


Figura T8a. Fuentes sísmicas

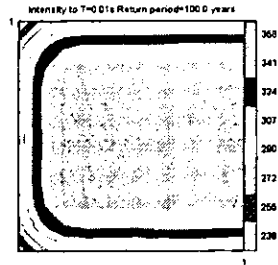


Figura T7b. Mapa de intensidades

Caso T9. Dos fuentes con la misma geometría y sismicidad con puntos de calculo solo bajo una de ellas.

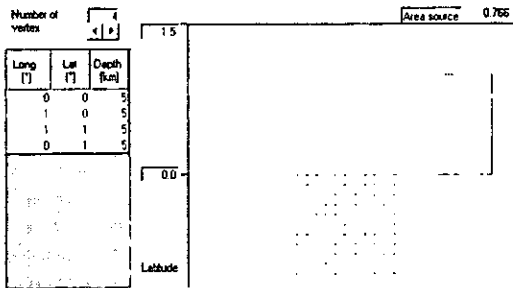


Figura T9a. Fuente sísmica

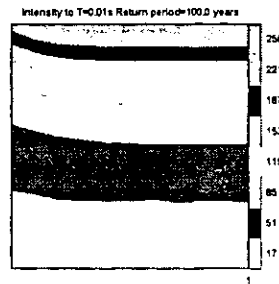


Figura T9b. Mapa de intensidades

Los casos T8 y T9 muestran dos casos en los que las fuentes sísmicas y la densidad y forma de la malla son las mismas, sin embargo, la posición de la malla respecto a las fuentes es distinta. En ambos casos las mayores intensidades se presentan en los sitios que tienen mayor sismicidad cerca de ellos. Ejercicios sencillos como estos últimos, ayudan a interpretar mejor los resultados de peligro sísmico en los que intervienen numerosas fuentes.

### III.14.3. Influencia de la forma de la fuente sísmica

Tal como se mencionó anteriormente en CRISIS99 es posible modelar fuentes área con inclinación. Enseguida se muestra un ejemplo de las ventajas que ello representa:

Caso G1. Fuente sísmica representada con un polígono de cuatro vértices con igual profundidad. La malla de cálculo es de 10 x 7 líneas de puntos separadas cada ½ grado.

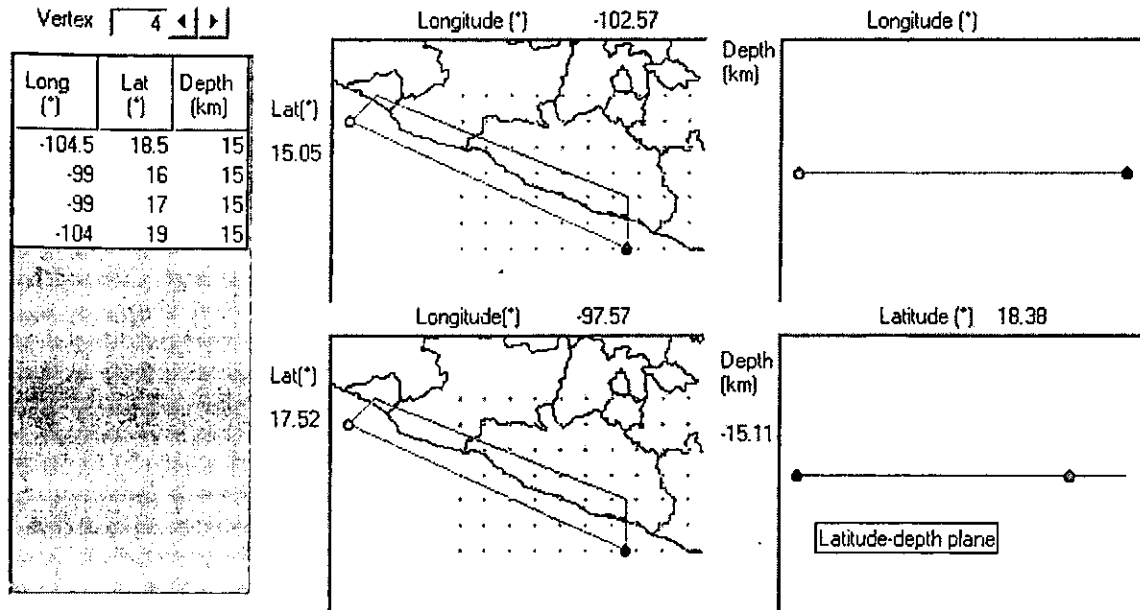


Figura G1a. Geometría de la fuente del caso G1 vista en la pantalla de geometría de fuentes de CRISIS99.

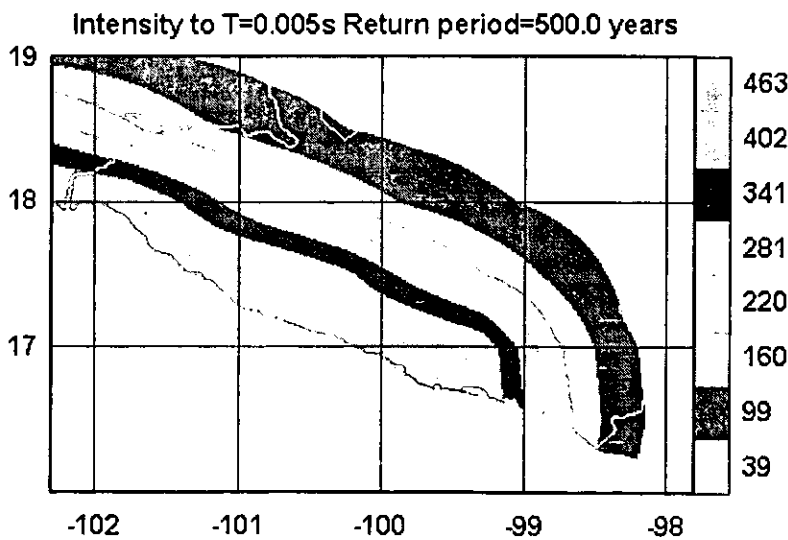


Figura G1b. Mapa de intensidades sísmicas del caso G1b



Caso G2. Fuente sísmica representada con un polígono de cuatro vértices con diferente profundidad cada uno. La malla de cálculo es de 10 x 7 líneas de puntos separados cada ½ grado.

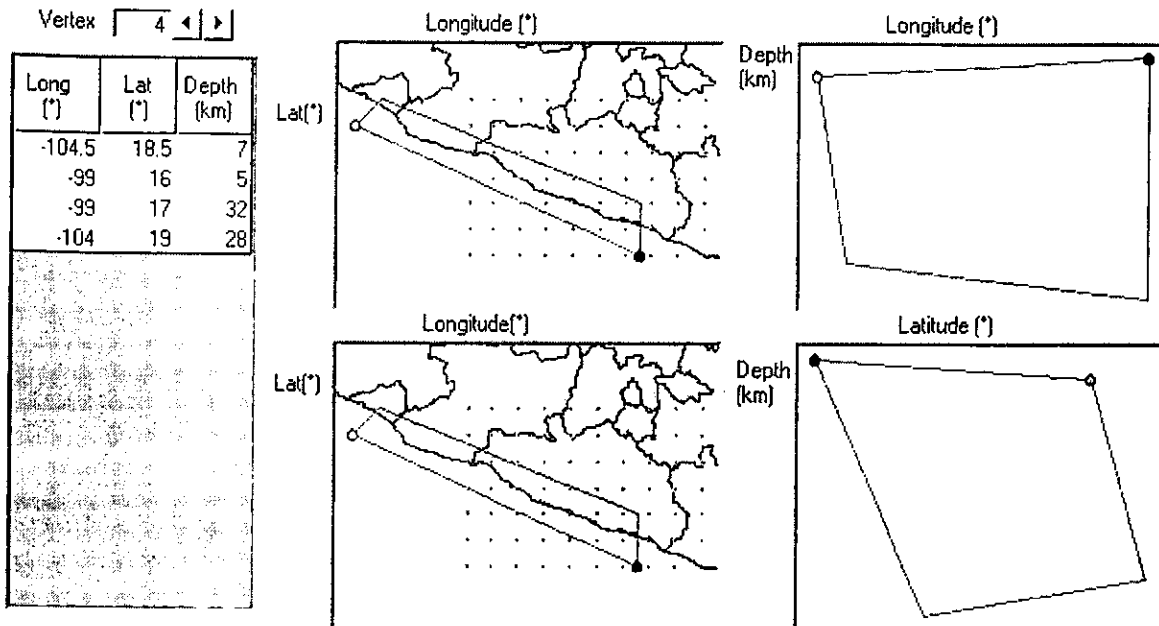


Figura G2a. Geometría de la fuente del caso G2 vista en la pantalla de geometría de fuentes de CRISIS99

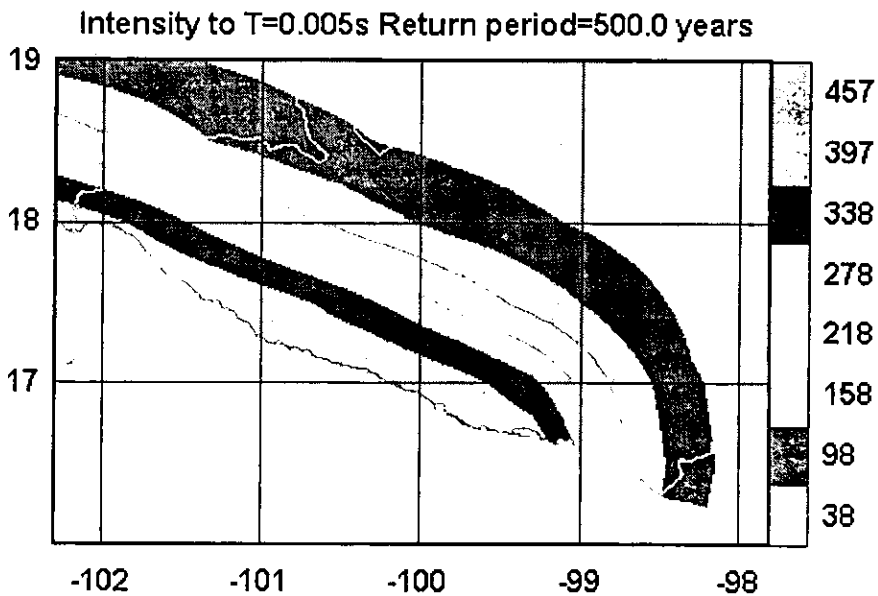


Figura G2b. Mapa de intensidades sísmicas del caso G2b

Al observar los mapas de intensidades sísmicas en las figuras G1b y G2b es posible observar diferencias en las intensidades resultantes. Tales diferencias se deben a la distinta geometría de las fuentes. El polígono con vértices con diferentes profundidades del caso G2 produce un mapa de intensidades que se atenúan más rápido, conforme los puntos de cálculo se alejan de la costa, porque conforme más se interna la placa en el continente, mayor es la profundidad a la que se encuentra, es decir, los sismos ocurrirán a mayor profundidad.

Si se calcula la intensidad para la ciudad de Chilpancingo Guerrero, localizada en la longitud  $-99.48$  y la latitud  $17.55$ , con cada una de las fuentes de los casos G1 y G2. Se obtiene una intensidad para un periodo de retorno de 500 años de 176 gal para el caso de la fuente con profundidad uniforme, y de 158 gal para el caso de la fuente sísmica inclinada. La diferencia entre las intensidades resultantes en la ciudad de Chilpancingo Guerrero es de cerca de 10%.

### III.14.4. Uso de diferentes leyes de atenuación para una fuente.

Con CRISIS99 es posible asignar más de una ley de atenuación a cada fuente sísmica. Esta función es de gran ayuda para representar fenómenos de amplificación local como los que ocurren en la ciudad de México, donde aún el terreno firme sufre amplificaciones importantes.

Caso AT1. Una fuente sísmica rectangular con una ley de atenuación.

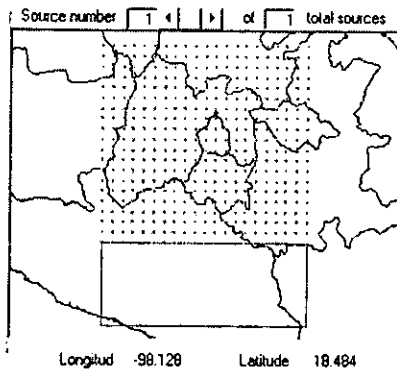


Figura AT1a. Fuente sísmica rectangular y puntos de la malla de cálculo

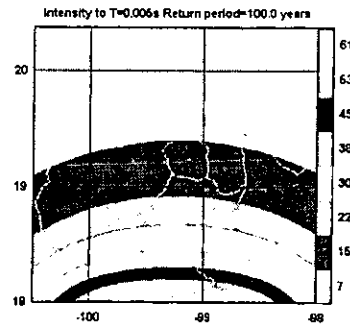


Figura AT1b. Mapa de intensidades.

Caso AT2. Una fuente sísmica rectangular con dos leyes de atenuación.

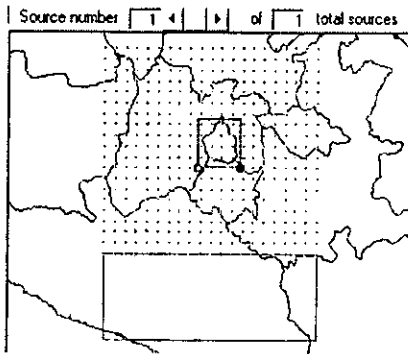


Figura AT2a. Fuente sísmica rectangular, puntos de la malla de cálculo y área cuadrada donde es válida la segunda ley de atenuación.

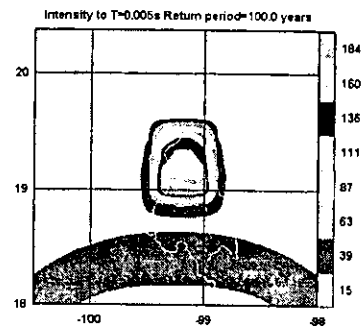


Figura AT2b. Mapa de intensidades.

La diferencia en los resultados de los casos AT1 y AT2 se debe a que en el caso AT1 se empleó para todos los sitios una ley de atenuación. Mientras que en el caso AT2 se emplearon dos leyes de atenuación para distinguir los sitios en los que las ondas sísmicas generadas en la fuente sufren amplificaciones.

### III.15. Pantalla de gráficas de leyes de atenuación

En el post-procesador de CRISIS99 existe la pantalla de modelos de atenuación (Fig. III.15.1) Dicha pantalla permite observar las curvas de las leyes de atenuación empleadas en los cálculos. Esto facilita la interpretación de resultados, pues como se mencionó anteriormente la incertidumbre asociada a las leyes de atenuación suele ser importante.

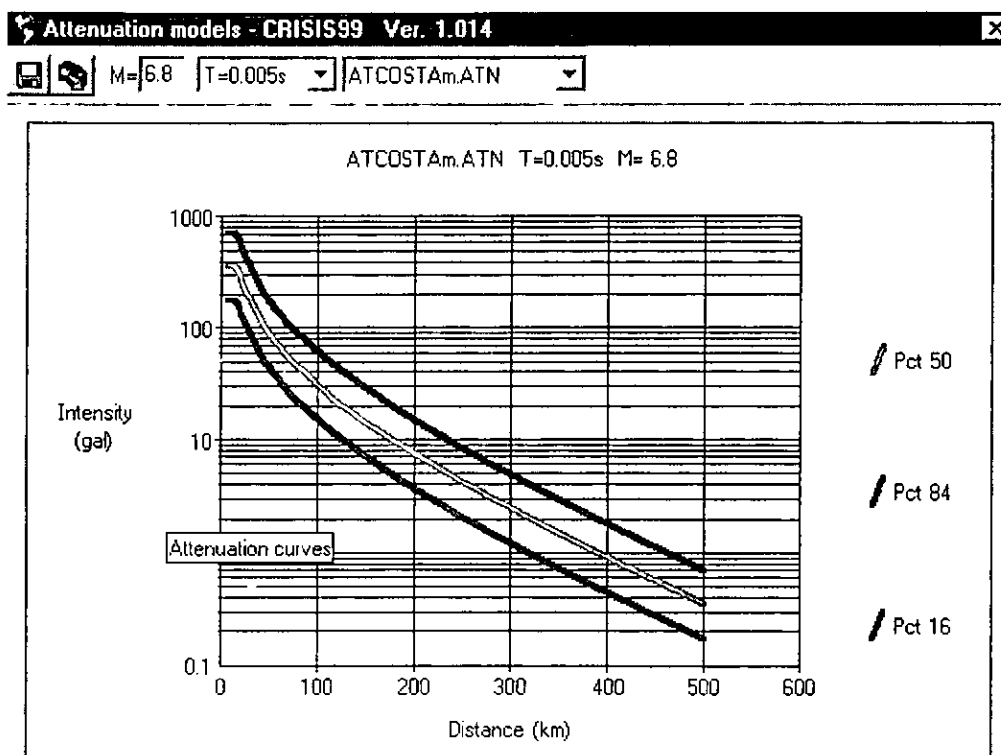


Figura. III.15.1. Pantalla de gráficas de leyes de atenuación de CRISIS99.

La figura III.15.1. Muestra las curvas de una ley de atenuación asociadas a los percentiles 16, 50 y 84. La curva del percentil 50 corresponde a la mediana de la aceleración, la curva del percentil 16 muestra el límite bajo el cual pueden caer el 16% de todos los valores de la intensidad y la curva del percentil 84 muestra el límite bajo el cual se presentarán el 84% de todos los posibles valores de la

intensidad.

### III.16. Cálculo de peligro sísmico en regiones

#### III.16.1. Datos

En el cálculo de peligro sísmico en regiones es común emplear numerosas fuentes para considerar toda la información de sismicidad disponible. Con CRISIS99 se ha calculado ya el peligro sísmico de diversas regiones. Enseguida se describen brevemente los datos empleados en el cálculo de peligro sísmico de tres países:

1) Ecuador. Se emplearon las 91 fuentes que se muestran en la figura III.16.1.1. A cada fuente se le asignó sismicidad y ley de atenuación. La malla de cálculo empleada fue de 1997 puntos separados 0.125 de grado. Se usaron dos leyes de atenuación, una propuesta por Katayama y la otra propuesta por Youngs.

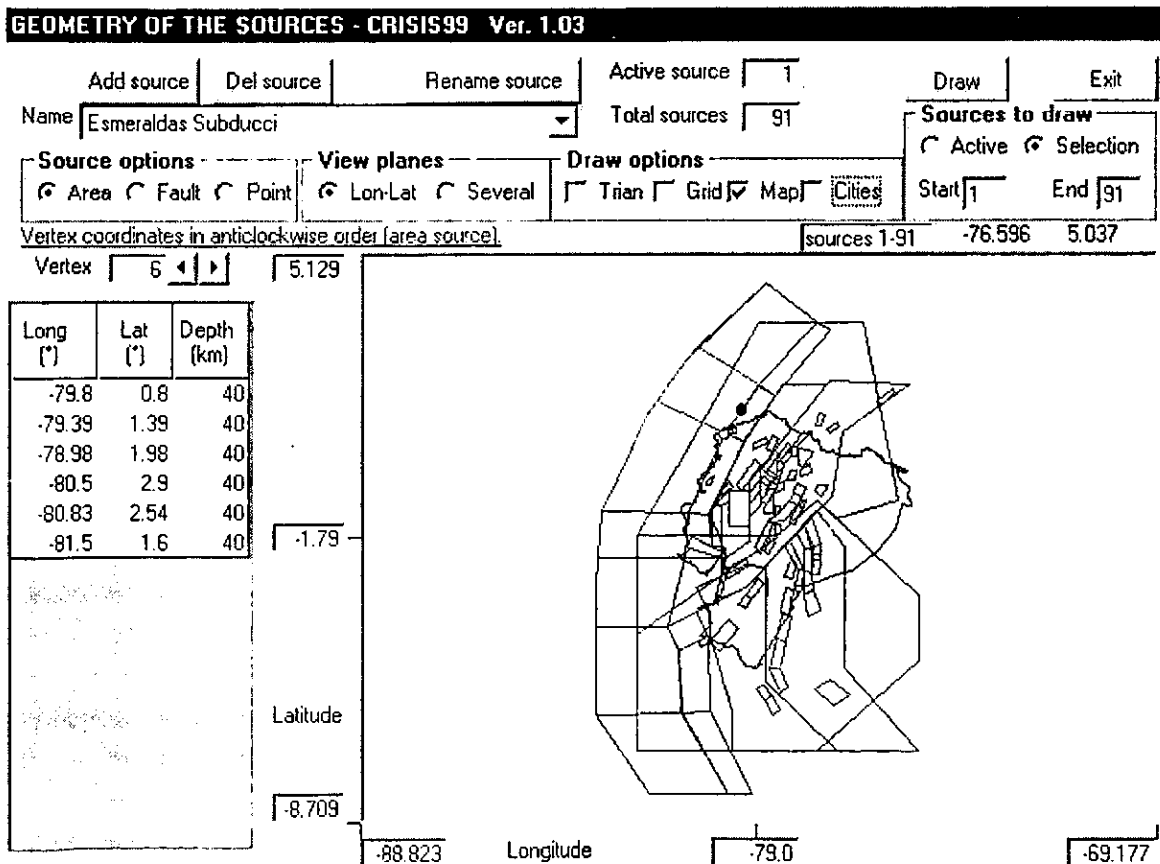


Figura.III.16.1.1. Fuentes sísmicas en la región de Ecuador.

2) México. Se emplearon 36 fuentes sísmicas (Fig. III.16.1.2). La malla rectangular inicial fue de 30,100 puntos separados 0.15 de grado, pero se redujo con un polígono auxiliar y el número final de puntos calculados fue de 13,944 puntos (la ejecución duró aproximadamente 10 horas). Se emplearon cuatro leyes de atenuación, una para temblores profundos, otra para temblores costeros, una más para temblores superficiales, y una para temblores costeros válida únicamente en la región de la Ciudad de México.

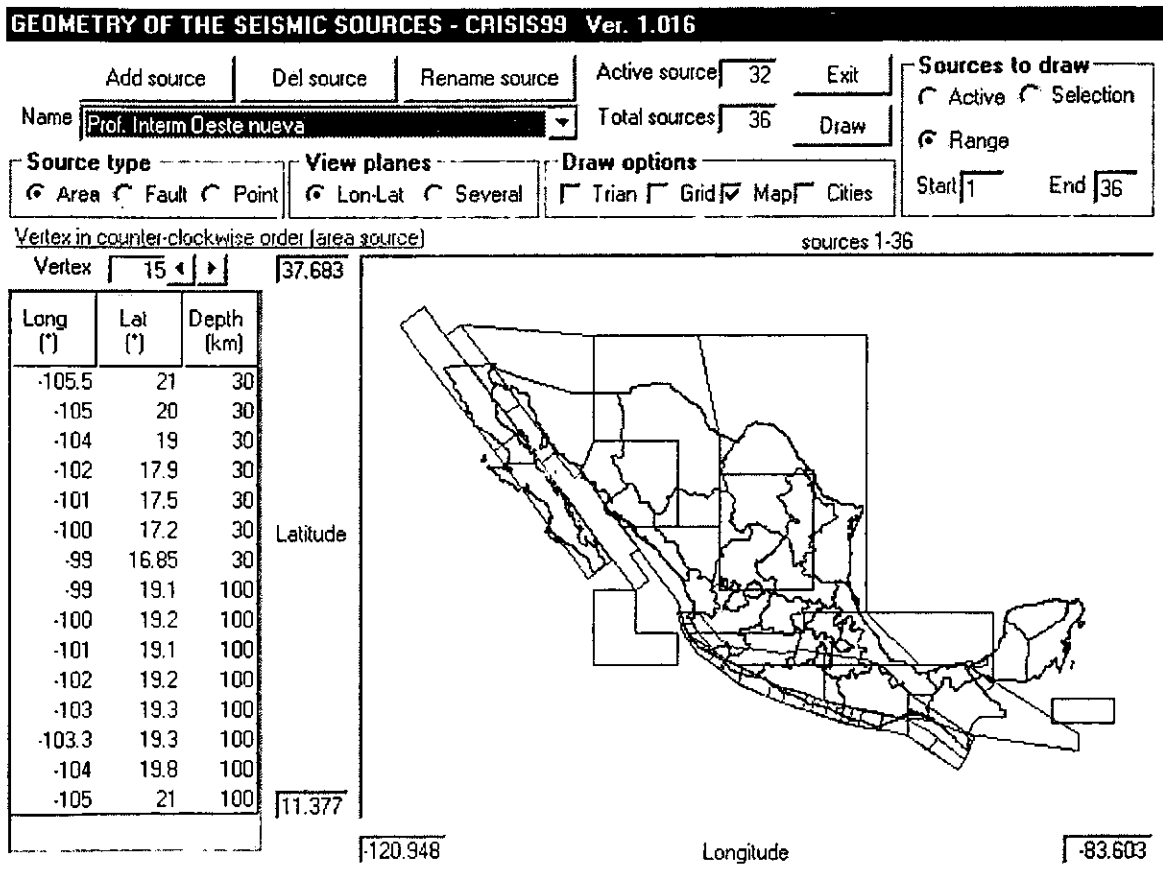


Figura.III.16.1.2. Fuentes sísmicas en la región de México.

3) Colombia. Se emplearon 72 fuentes sísmicas. La malla rectangular inicial fue de 4,200 puntos separados 0.25 de grado, pero se redujo con un polígono auxiliar y el número final de puntos calculados fue de 2,668 puntos. Se emplearon dos leyes de atenuación.

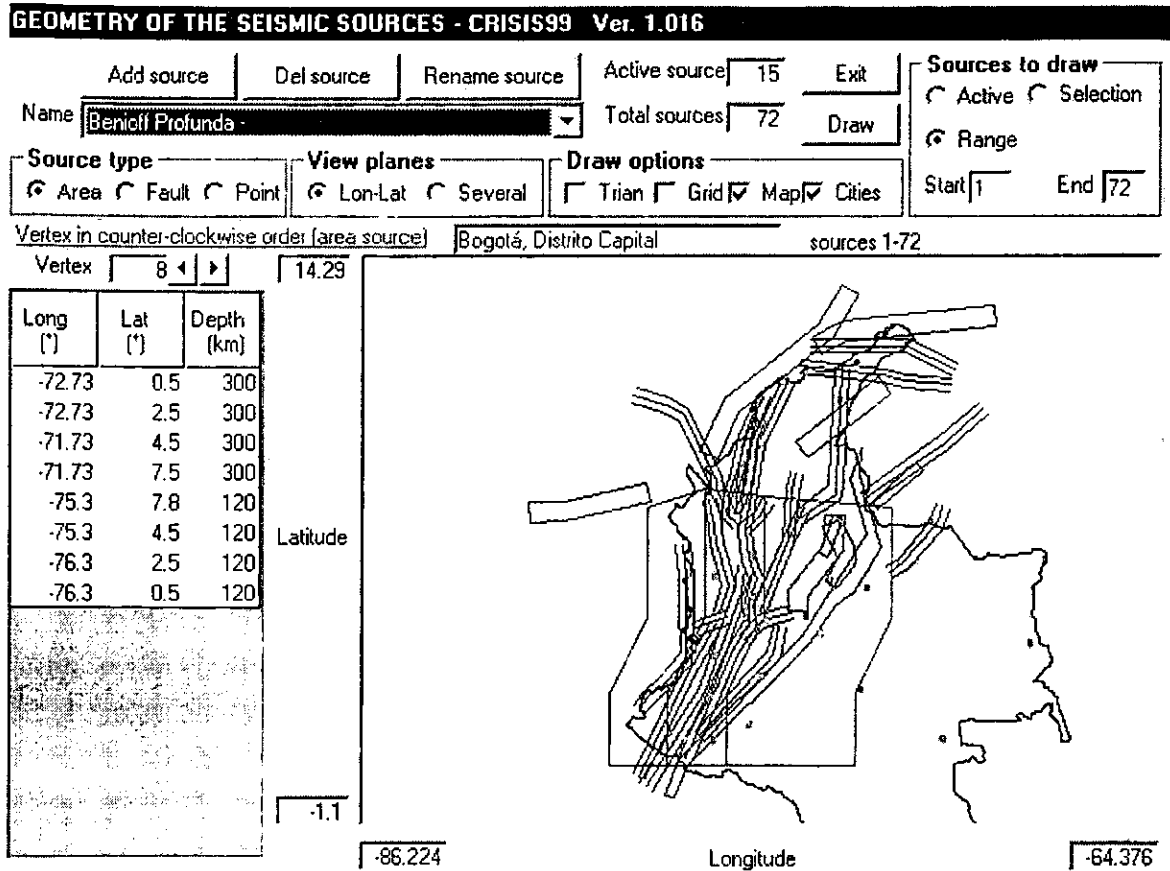


Figura.III.16.1.2. Fuentes sísmicas en la región de Colombia.

### III.16.2. Resultados

#### III.16.2.1. Mapas de intensidades sísmicas

Con CRISIS99 es posible obtener mapas de peligro sísmico. Cuando se consideran intensidades sísmicas para distintas ordenadas espectrales es posible obtener también espectros de peligro uniforme. Enseguida se muestran algunos de los resultados obtenidos para cada uno de los 3 países mencionados anteriormente:

1) Ecuador. El mapa de la figura III.16.2.1.1. corresponde a las aceleraciones esperadas, para un periodo de retorno de 100 años y un periodo estructural de 0; es decir, aceleraciones que se espera se presenten en el suelo firme de Ecuador. El programa permite leer la aceleración esperada en cada sitio de Ecuador, con tan solo hacer click con el puntero del *mouse* sobre el mapa.

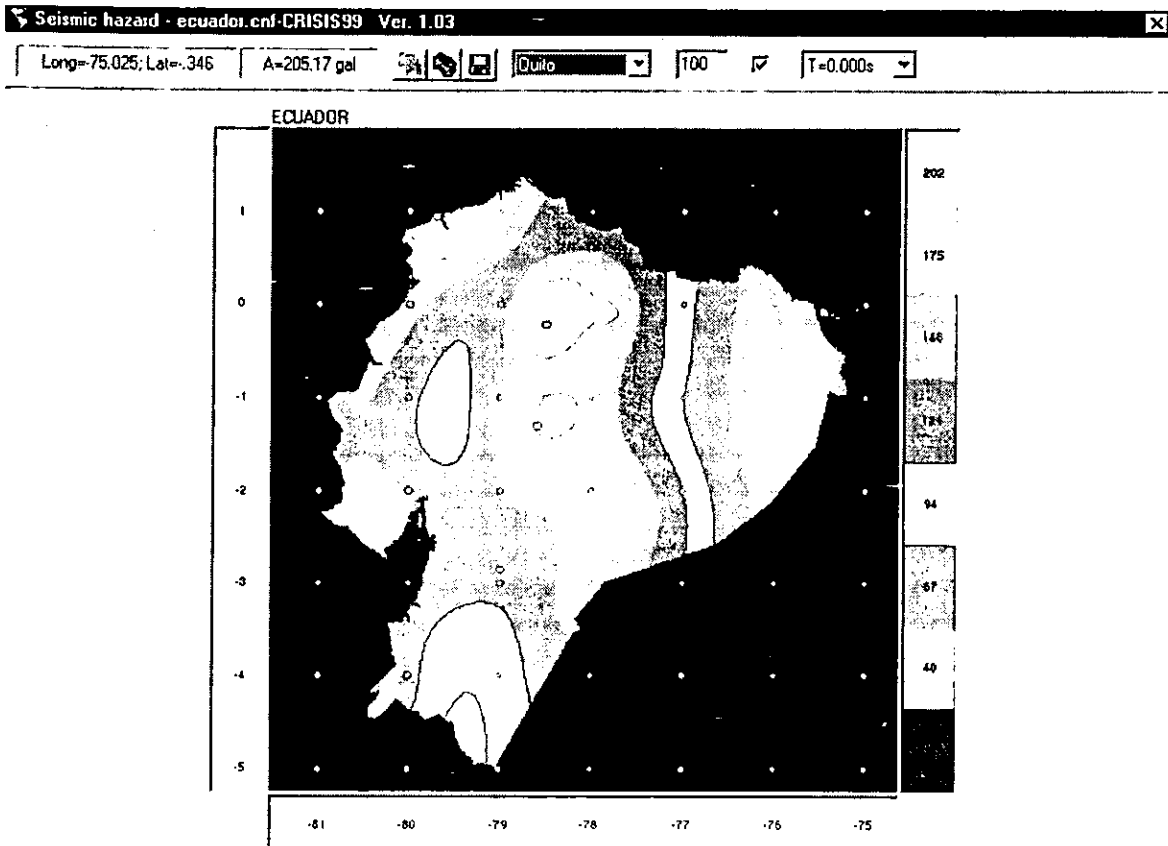


Figura. III.16.2.1.1 Mapa de peligro sísmico de Ecuador con las fuentes sísmicas de la figura III.16.1.1.



2) México. El mapa de la figura III.16.2.1.2. corresponde a las aceleraciones esperadas en la República Mexicana para un periodo de retorno de 500 años y un periodo estructural de 1; es decir, aceleraciones que se espera se presenten en estructuras con periodo de 1s. El programa permite leer la aceleración esperada, la curva de tasas de excedencia y el espectro de peligro uniforme de cada sitio de México (Figura III.16.2.1.3), con tan solo hacer click con el puntero del mouse sobre el mapa.

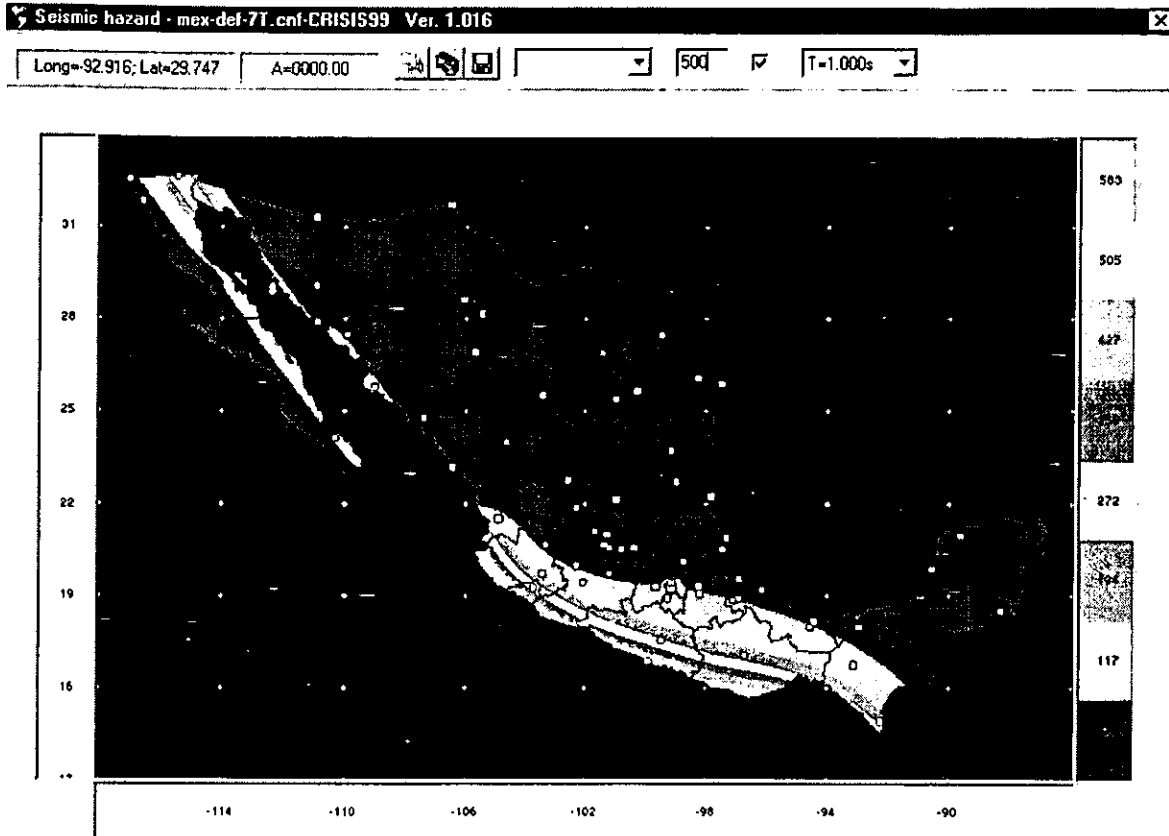


Figura. III.16.2.1.2 Mapa de peligro sísmico de México con las fuentes sísmicas de la figura III.16.1.2.

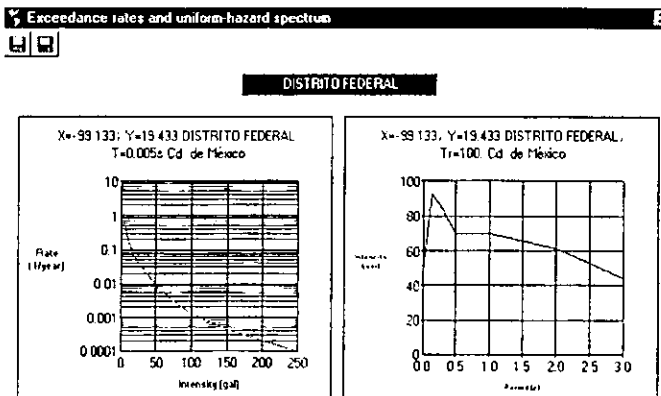


Figura. III.16.2.1.3 Espectro de peligro uniforme en la ciudad de México.

3) Colombia. El mapa de la figura III.16.2.1.4. corresponde a las aceleraciones esperadas, para un periodo de retorno de 100 años y un periodo estructural de 0; es decir, aceleraciones que se espera se presenten en el suelo firme de Colombia. El programa permite leer la aceleración esperada en cada sitio de Colombia, con tan solo hacer click con el puntero del *mouse* sobre el mapa.

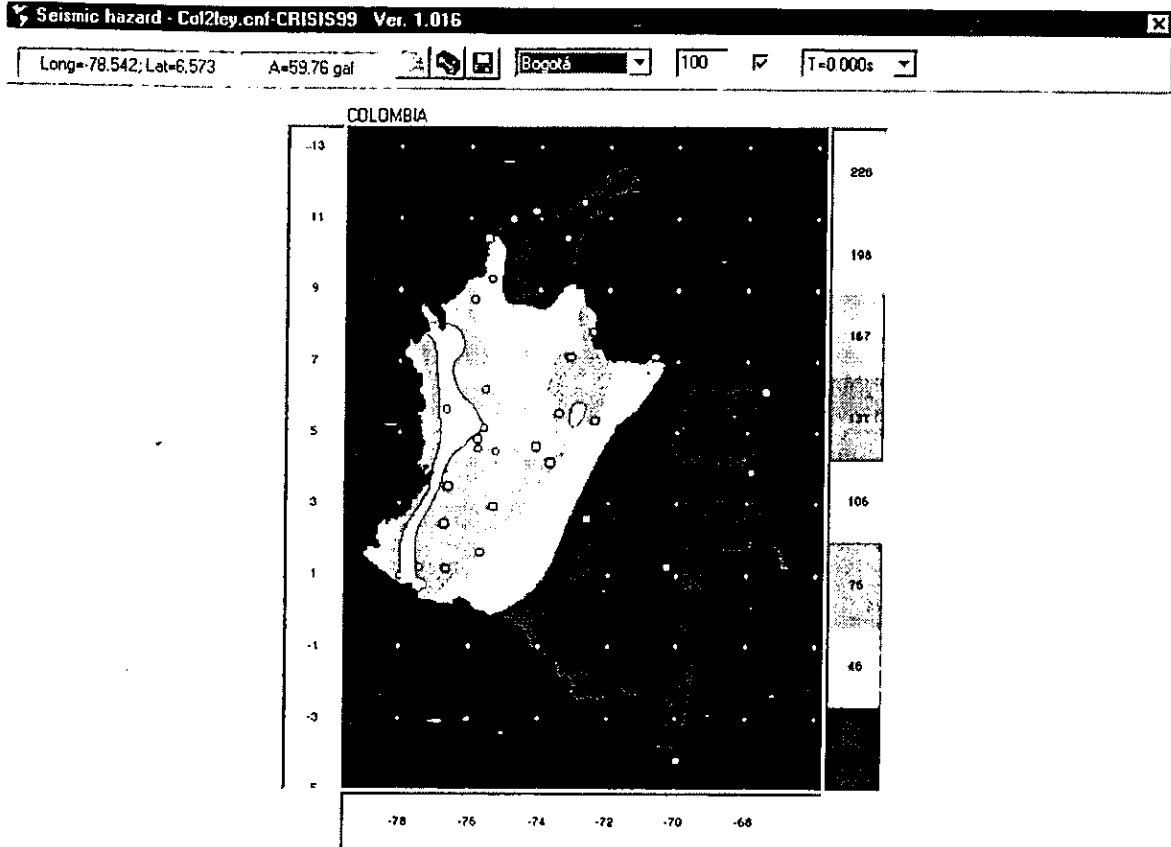


Figura III.16.2.1.4 Mapa de peligro sísmico de Colombia con las fuentes sísmicas de la figura III.16.1.1.

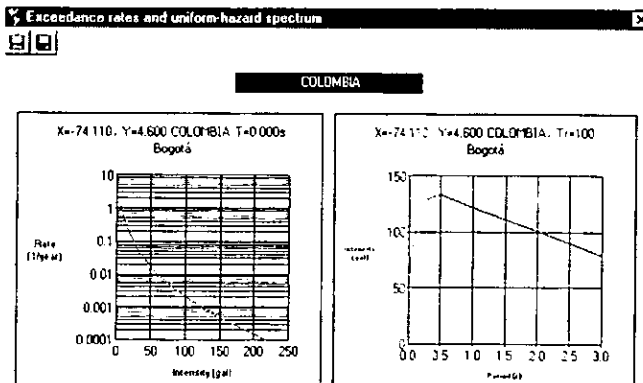


Figura III.16.2.1.5. Curva de tasas de excedencia y espectro de peligro uniforme para el terreno firme de Bogotá, en un periodo de retorno de 100 años.

### III.16.2.2. Tasas de excedencia de intensidades por fuente

CRISIS99 puede proporcionar las tasas de excedencia para cada sitio, debidas a cada fuente sísmica. Esto permite realizar gráficas como la de la figura III.16.2.2.1, donde es posible identificar la contribución de específicas fuentes al peligro sísmico de un sitio.

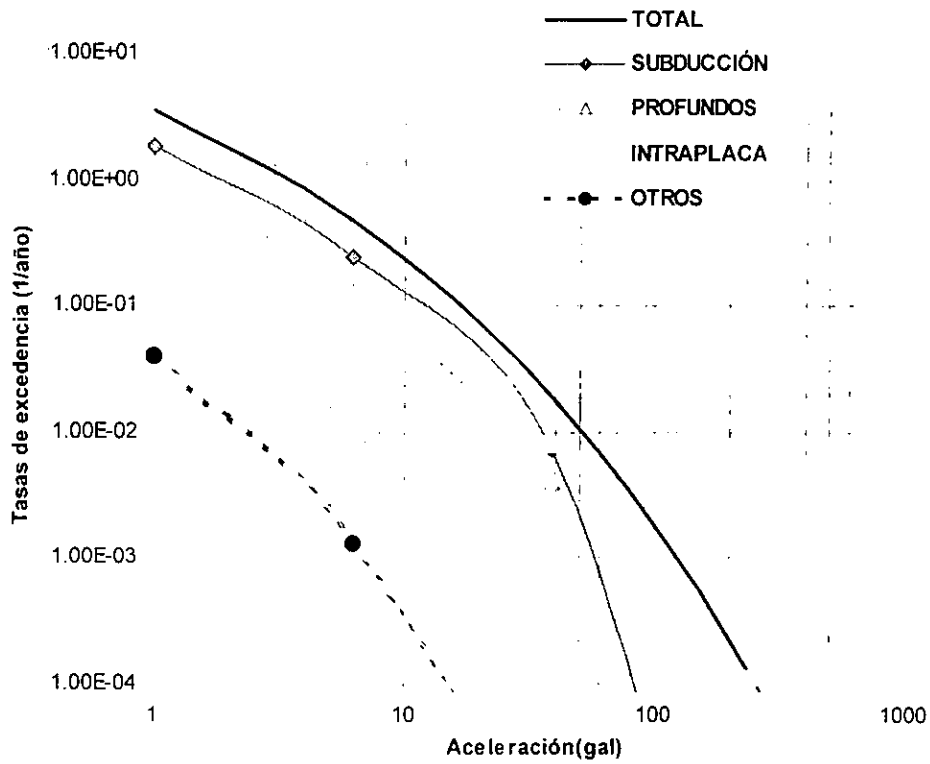


Figura. III.16.2.2.1. Gráfica de tasas de excedencia de la aceleración para la ciudad de México.

## IV. Comentarios finales

La información y el conocimiento disponible respecto al fenómeno sísmico es insuficiente para describir con certeza las características de los próximos movimientos del terreno. Por tal motivo son de gran utilidad herramientas como el programa CRISIS99, que permiten considerar diversas incertidumbres presentes en el fenómeno sísmico, para estimar que tan probable es que se presente un movimiento del terreno de cierto tamaño en determinada región.

CRISIS99 permite usar diversas formas geométricas para modelar fuentes sísmicas. Tal diversidad facilita la generación de figuras que se parezcan más a las placas de la corteza que representan. Con ello se reducen los errores debidos a equivocadas localizaciones de los focos de los sismos.

Con CRISIS99 es posible asignar más de una ley de atenuación a cada fuente sísmica. Esta opción permite considerar efectos de amplificaciones locales en los cálculos de peligro sísmico, lo cual es de gran ayuda, toda vez que se sabe que hay regiones en las que hasta en el propio terreno firme se presentan amplificaciones importantes de las ondas sísmicas.

El formato de tabla requerido por CRISIS99 para representar cada ley de atenuación facilita el empleo de muy diversas y hasta complejas leyes de atenuación.

CRISIS99 incluye un modelo de sismicidad alternativo al modelo de Poisson denominado del temblor característico. La disponibilidad de ambos modelos permite incluir fuentes sísmicas en las que el tamaño del sismo si se ve afectado por el tiempo que ha transcurrido sin temblar, y fuentes en las que el tamaño del sismo es independiente del tiempo que ha transcurrido sin temblar.

CRISIS99 proporciona diversos resultados en diferentes formatos para facilitar el manejo y la interpretación de los mismos.

El programa CRISIS99 descrito puede ser empleado por diversos usuarios: ingenieros civiles, ingenieros geofísicos, universitarios y todas aquellas personas interesadas en el *peligro sísmico*. Uno de los principales objetivos de CRISIS99 es ayudar a los ingenieros en la toma de las decisiones requeridas para diseñar edificios que resistan sismos. Los resultados obtenidos por

CRISIS99 serán mejores a medida que se reduzcan las incertidumbres en los numerosos parámetros involucrados en el cálculo de *peligro sísmico*. La creciente disponibilidad de registros sísmicos facilitará la generación de parámetros que describan mejor las diferentes regiones del mundo.

El avance tecnológico en las computadoras permite que el programa CRISIS99 que recientemente sólo se ejecutaba en *estaciones de trabajo*, ahora se pueda ejecutar en computadoras personales.

El programa CRISIS99 requiere que se hayan estimado previamente los parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas. Sin embargo, sería de gran utilidad que versiones posteriores del programa CRISIS99 incluyan herramientas que permitan estimar dichos parámetros de sismicidad.

El programa CRISIS99 está disponible en la red de internet en la dirección <http://www.angelfire.com/id/CRISIS99>

## REFERENCIAS

Allen C. R. (95). EERI Distinguished Lecture. Earthquake Hazard Assessment: Has Our Approach Been Modified in the Light of Recent Earthquakes. *Earthquake Spectra*, Vol.11, No.3, pp. 357-366.

Arboleda J. y Ordaz M. (93). Un mejor uso de los datos estadísticos para estimación de la sismicidad local, X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., 21-27.

Bender B. y Campbell K. (89). A Note on the selection of minimum magnitude for use in seismic hazard analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.79, No.1, pp.199-204

Campbell K. (97). Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity. and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismological Research Letters*.

Cornell, C.A. y E. Vanmarcke (69). The mayor influences on seismic risk. *Proc., 4WCEE*, Santiago de Chile, vol.1,A-1,69-83.

Coppersmith Kevin y Youngs Robert (90). Improved Methods for Seismic Hazard Analysis in the Western United States. *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Mayo 20-24,1990, Palm Springs, California (Vol. 1).

De Buen, Oscar (95). Evolución del diseño de Estructuras de Acero desde 1985 hasta la fecha. *La Ingeniería Civil a 10 años de los sismos de 1985*. Simposio Internacional 18 y 19 de septiembre de 1995. Publicación conjunta de las Sociedades Mexicanas de Ingeniería Sísmica, Ingeniería Estructural, Mecánica de Suelos: El Centro Nacional de Prevención de Desastres y el Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Gutenberg, B. y Richter, C.F. (44). Frequency of Earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34, 185-188.

Gutenberg, B. y Richter, C. F. (54). *Seismicity of the Earth (and associated phenomena)*, Princeton University Press, Princeton, NJ. EUA.

Habermann R. E. (87) Man-Made Changes of Seismicity Rates. Bull. Seism. Soc. Am., Vol.77, No.1, pp.141-159.

Hernández, Oscar B. (95). Estado Actual de la Mampostería en México. Simposio Internacional 18 y 19 de septiembre de 1995. Publicación conjunta de las Sociedades Mexicanas de Ingeniería Sísmica, Ingeniería Estructural, Mecánica de Suelos; El Centro Nacional de Prevención de Desastres y el Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Hudnut W.K., Shen Z., Murray M., McClusky S., King R., Herring T., Hager B., Feng Y., Fang P., Donnellan A. and Bock Y (96). Co-Seismic Displacements of the 1994 Northridge, California, Earthquake. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, No. 1B, pp. S19-s36.

Jara, J. M. y E. Rosenblueth (88). Probability distribution of times between characteristic subduction earthquakes. Earthquake Spectra 4, 499-529

Kiremidjian A. S. y Anagnos T. (84). Stochastic Slip-Predictable Model for Earthquake Occurrences. Bull. Seism. Soc. Am., Vol.74, No.2,pp.739-755,

Miranda E., Ordaz M. y Reinoso E. (99) Algunas consideraciones sobre los nuevos reglamentos mexicanos de construcción de diseño por sismo. XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Morelia Michoacán, México. Vol. II, 1061-1070.

Newark, N. M. y Rosenblueth, E. (71) Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ.

Ordaz, M., Jara J. M. y Singh, S.K. (89). Riesgo Sísmico y Espectros de Diseño en el Estado de Guerrero. Informe conjunto del Instituto de Ingeniería. UNAM y el Centro de Investigación Sísmica AC de la Fundación Javier Barros Sierra.

Ordaz, M. y S. K. Singh (92) Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of México City, Bull. Seism. Soc. Am., 82.24-43.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

Ordaz, M. (94a). Riesgo Sísmico en México. Informe Preliminar. Seismic Hazard of the Latin American Region. The International Development Research Center (Canada). México.

Ordaz, M., S. K. Singh y A. Arciniega (94b). Bayesian attenuation regressions: an application to Mexico City, *Geophysical Journal International*.

Ordaz, M. (97). Sismicidad y riesgo sísmico. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Ver., México, Vol. 1, PP.143-163.

Reinoso E. y Ordaz M. (97) Amplificación medida en el valle de México durante sismos recientes. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz. Ver., México, Vol. 1, PP.371-380.

Reiter L. (90) *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. Columbia University Press. New York. P.253.

Riobóo J. M. (95). Mejoras en la Práctica Profesional del Diseño de Estructuras y Elementos de Concreto en Zonas Sísmicas. Simposio Internacional 18 y 19 de septiembre de 1995. Publicación conjunta de las Sociedades Mexicanas de Ingeniería Sísmica, Ingeniería Estructural, Mecánica de Suelos; El Centro Nacional de Prevención de Desastres y el Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Roldán J, Castellanos F, Montano T, Rodríguez J.L. y Calmus T. (88). Mediciones geodésicas de largas distancias: aplicación al estudio del movimiento de placas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, UNAM, Vol.27-3, pp.351-377.

Rosenblueth y Ordaz (87). Use of seismic data from similar regions, *Earthq Engnrng Struct Dyn*, 15, 619-634.

Singh S. K., Rodriguez M. y Esteva L. (83). Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the mexican subduction zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 73, 1179-1796.



Singh S. K. y Ordaz M. (94) Sismicidad y movimientos fuertes en México: una visión actual. Cuadernos de Investigación No.18, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

Terán-Gilmore Amador (96). Diseño Basado en el Desempeño Sísmico de las Estructuras. Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Mérida, Yucatán.

Ward S. (94). A multidisciplinary Approach to Seismic Hazard in Southern California. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, No. 5, pp.1293-1309

Wells D. L. y Coppersmith K. J. (94). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, No. 4, pp.974-1002

Wesnousky, Steven G. (97). Presidential Address: Seismic Hazard Analysis, Earthquake Prediction, and the SSA. Seismological Research Letters, Vol. 68, No.5, p. 763-765

Youngs Robert R. y Coppersmith Kevin J. (85). Implications of Fault Slip rates and earthquake recurrence model to probabilistic seismic hazard estimates. . Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 75, No. 4, pp.939-964

**Apéndice A. Formato de archivos**

1) Archivo de Mapas. El archivo de mapas debe contener los siguientes datos en el orden mostrado:

Número de polígonos

Nombre del polígono (para cada polígono)

Número de vértices del polígono (para cada polígono)

Longitud y latitud de cada vértice del polígono (para cada polígono)

Ejemplo:

```

2
Free State
9
0.5 3
0.4 4.8
1.4 3.6
2.8 5.7
5.2 7.1
7.2 6.8
7.7 4.8
5.8 3.5
5.1 0.4
Funny State
5
0.4 4.8
0.4 7.15
1.2 8.1
2.8 5.7
1.4 3.6

```

2) Archivo de Ciudades. El archivo de ciudades debe contener los siguientes datos en el orden mostrado:

Número de ciudades

Nombre del estado donde se encuentra la ciudad, longitud y latitud de la ciudad (para cada ciudad)

Ejemplo:

10			
GUERRERO,	Acapulco,	-99.900	16.850
AGUASCALIENTES,	Aguascalientes,	-102.300	21.883
CAMPECHE,	Campeche,	-90.533	19.850
GUANAJUATO,	Celaya,	-100.783	20.517
QUINTANA ROO,	Cd. Chetumal,	-88.300	18.500
DISTRITO FEDERAL,	Cd. de México,	-99.133	19.433
CHIHUAHUA,	Cd. Delicias,	-105.467	28.183
JALISCO,	Cd. Guzman,	-103.450	19.700
CHIHUAHUA,	Cd. Juárez,	-106.483	31.733
TAMAULIPAS,	Cd. Madero,	-97.810	22.283

3) Archivo de ley de atenuación. Cada tabla de atenuación de intensidades sísmicas debe contener la siguiente información:

1. Parámetros que definen los límites de la magnitud sísmica. 1 línea

MINF, MSUP, NMAG

MINF: Límite inferior de la magnitud dada en la tabla.

MSUP: Límite superior de la magnitud dada en la tabla

NMAG: Número de magnitudes para las cuales se proporcionan valores de intensidad (formato de número entero, es decir, el número no debe contener punto decimal).

CRISIS99 asume que las intensidades están dadas para MAGNITUDES  $M(K)$ , donde

$M(K) = \text{MINF} + (K-1) * \text{DMAG}$ , donde  $\text{DMAG} = (\text{MSUP} - \text{MINFI}) / (\text{NMAG} - 1)$

2. Parámetros que definen los límites de la distancia. 1 línea

RINF, RSUP, NRAD

RINF: Límite inferior de la distancia dado en la tabla

RSUP: Límite superior de la distancia dado en la tabla

NRAD: Número de distancias para las cuales se proporcionan valores de intensidad (formato de número entero, es decir, el número no debe contener punto decimal).

CRISIS99 asume que las intensidades están dadas para distancias  $R(K)$ , donde  $\log(R(K)) = \log(RINF) + (K-1) * \text{DLRAD}$ , donde  $\text{DLRAD} = (\log(RSUP) - \log(RINF)) / (\text{NRAD} - 1)$ . Es decir, se considera que las distancias tienen separación logarítmica.

3. Para cada una de las ordenadas espectrales (NT) de las diferentes intensidades se requiere el siguiente bloque de información:

T(J), SLA(J), AMAX(J)

SA(1,1,1), SA(1,1,2), ..., SA(J,K,L), ..., SA(NT,NMAG,NRAD)

donde:

T(J): Periodo estructural de la ordenada espectral j-ésima. Se usa únicamente para fines de identificación, por lo que en el caso de que el periodo estructural no tenga significado, este valor será únicamente un número secuencial.

SLA(J): Desviación estándar del logaritmo natural de las intensidades correspondientes al j-ésimo periodo estructural.

AMAX(J): Valor máximo posible de la intensidad para el j-ésimo periodo estructural. El proceso de integración será truncado, al considerar como imposible (probabilidad cero) valores mayores que AMAX(J). Si el valor de AMAX(J) se fija a cero, entonces la integración con respecto a los posibles valores de intensidad será realizada desde 0 hasta infinito.

SA(J,K,L): Valor medio de la intensidad para el periodo estructural j-ésimo, la magnitud k-ésima y la distancia l-ésima.

Para cada modelo de atenuación, dado en un archivo separado, CRISIS99 leerá las intensidades sísmicas de la siguiente forma:

```

D0 J=1,NT
  READ(8,*) T(J),SLA(J),AMAX(J)
  DO K=1,NMAG
    READ(8,*) (SA(J,K,L),L=1,NRAD)
  ENDDO
ENDDO

```

Que quiere decir:

Desde J=1 hasta el número total de ordenadas espectrales (NT)

Lectura de T(J), SLA(J), AMAX(J)

Desde K=1 hasta NMAG

Lectura desde L=1 hasta NRAD de SA(J,K,L)

Se cierra ciclo con índice K

Se cierra ciclo con índice J

Ejemplo:

4.5	8.5	5.0								
5.0	500.0	10.0								
0.0	0.7	0.0								
119.3	97.5	70.3	45.3	26.8	14.7	7.3	3.2	1.1	0.3	
202.5	165.6	119.4	76.9	45.5	24.9	12.4	5.4	1.9	0.5	
344.0	281.2	202.7	130.6	77.3	42.3	21.1	9.1	3.2	0.8	
584.1	477.6	344.3	221.8	131.2	71.9	35.9	15.5	5.4	1.3	
992.0	811.1	584.7	376.7	222.9	122.1	60.9	26.4	9.1	2.2	
0.2	0.7	0.0								
250.4	203.2	145.2	92.7	54.2	29.4	14.5	6.2	2.1	0.5	
420.4	341.3	244.0	155.7	91.2	49.4	24.3	10.4	3.6	0.8	
708.3	575.2	411.3	262.6	153.8	83.4	41.1	17.6	6.0	1.4	
1193.5	969.6	693.8	443.3	259.9	141.0	69.5	29.7	10.2	2.4	
2014.4	1637.1	1172.1	749.4	439.6	238.6	117.7	50.4	17.3	4.1	

Donde, por ejemplo, el valor de 202.5 es la intensidad sísmica esperada al ocurrir un sismo de magnitud 5.5 a una distancia de 5 km del foco del sismo.

## Apéndice B. Archivos de resultados

## Ejemplo de archivo \*.res

1

PROGRAM CRISIS VERSION 99.10

Ejemplo Acapulco

Date : 1999/10/26

## MAXIMUM VALUES OF PARAMETERS SET IN THE PROGRAM

Attenuation Models :	15
Intensity levels :	20
Structural periods:	15
Number of regions:	200
Magnitudes in attenuation model:	15
Distances in attenuation model:	21
Number of subsources per region:	4000

## VALUES OF PARAMETERS FOR THE PRESENT PROJECT

Number of regions or seismic sources:	8
Number of attenuation models:	5
Number of structural periods:	3
Number of intensity levels (NA):	4
Number of magnitudes for integration:	10

I	T(I)	INTENSITIES		NA
		A0(I)	AU(I)	
1	5.000E-03	1.000E+00	1.500E+03	4
2	1.500E-01	1.000E+00	1.500E+03	4
3	3.000E-01	1.000E+00	1.500E+03	4

Max. dist. of integration: 5.000E+02

## INITIAL GRID OF POINTS IN WHICH HAZARD WANTS TO BE COMPUTED

Initial site longitude	-1.000E+02
Initial site latitude	1.650E+01
Longitude increment	5.000E-01
Latitude increment	5.000E-01
No. of points in longitude	2
No. of points in latitude	2

## THE INITIAL GRID WAS MODIFIED WITH THE FOLLOWING POLYGONS

Number of polygons	1
Number of vertex	21.
LONG	LAT
-118.023	32.922
-116.119	27.030
-112.973	22.964
-108.584	21.553
-107.094	21.553
-107.011	19.479
-100.139	15.412
-95.005	14.417
-91.859	13.421

-89.126	16.657
-85.980	18.566
-86.394	22.300
-91.196	22.051
-91.776	19.810
-95.253	19.893
-96.744	23.960
-95.999	27.279
-99.807	30.515
-105.686	32.922
-111.399	33.254
-115.788	34.166

ATTENUATION MODELS

I	MODEL	No. of Mag.	Lower Mag.	Magnitude Increment
1	C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATCOSTAm.ATN	10	4.00	.500
		No. of Dist.	Lower Dist.	Upper Distance
		20	5.00	500.000
2	C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATPROFam.ATN	10	4.00	.500
		No. of Dist.	Lower Dist.	Upper Distance
		20	5.00	500.000
3	C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\SADIGHam.ATN	10	4.00	.500
		No. of Dist.	Lower Dist.	Upper Distance
		20	5.00	500.000
4	C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Df.atn	10	4.00	.500
		No. of Dist.	Lower Dist.	Upper Distance
		20	5.00	500.000
5	C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Guerrero.ATN	10	4.00	.500
		No. of Dist.	Lower Dist.	Upper Distance
		20	5.00	500.000

MATRIX OF STANDARD DEVIATIONS OF INTENSITIES

Period \ Model -->	1	2	3	4	5
1	.700	.700	.700	.371	.650
2	.700	.700	.700	.375	.650
3	.700	.700	.700	.345	.650

MATRIX OF MAXIMUM VALUES OF INTENSITIES

Period \ Model -->	1	2	3	4	5
1	.000	.000	.000	.000	.000
2	.000	.000	.000	.000	.000
3	.000	.000	.000	.000	.000

PROPERTIES OF THE SOURCES

REGION: 1 Subducción\_Michoacán  
 Characteristic model  
 Area source  
 Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATCOSTAm.ATN  
 Number of vertex: 4  
 Long Lat Depth (km)  
 -103.14 17.70 15.00

```
-101.70    17.04    15.00
-101.50    17.71    30.00
-102.92    18.39    30.00
```

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Df.atn

Number of vertex: 4.

Influence area

```
Long.    Lat.
-99.40   19.00
-98.90   19.00
-98.90   19.55
-99.40   19.55
```

REGION: 2 Subducción Colima 1

Characteristic model

Area source

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATCOSTAm.ATN

Number of vertex: 4

```
Long    Lat    Depth (km)
-103.87 18.30   15.00
-103.14 17.70   15.00
-102.92 18.39   30.00
-103.61 18.76   30.00
```

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Df.atn

Number of vertex: 4.

Influence area

```
Long.    Lat.
-99.40   19.00
-98.90   19.00
-98.90   19.55
-99.40   19.55
```

REGION: 3 Subducción Jalisco

Characteristic model

Area source

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATCOSTAm.ATN

Number of vertex: 8

```
Long    Lat    Depth (km)
-104.46 18.72   15.00
-104.18 19.17   15.00
-105.00 20.00   15.00
-105.13 20.26   15.00
-105.50 21.00   30.00
-106.00 21.00   30.00
-105.70 20.00   30.00
-105.00 19.10   30.00
```

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Df.atn

Number of vertex: 4.

Influence area

```
Long.    Lat.
-99.40   19.00
-98.90   19.00
-98.90   19.55
-99.40   19.55
```

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Guerrero.ATN

Number of vertex: 6.

Influence area

```
Long.    Lat.
-99.50   16.80
-98.90   16.20
-98.00   16.50
-98.00   17.20
-98.70   17.41
-99.40   17.50
```

REGION: 4 Jalisco\_nuevo

Poisson model

Area source

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATCOSTAm.ATN

Number of vertex: 8

Long	Lat	Depth(km)
-106.00	21.00	15.00
-105.70	20.00	15.00
-105.00	19.10	15.00
-104.00	18.40	15.00
-103.73	18.84	30.00
-104.00	19.00	30.00
-105.00	20.00	30.00
-105.50	21.00	30.00

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Df.atn

Number of vertex: 4.

Influence area

Long.	Lat.
-99.40	19.00
-98.90	19.00
-98.90	19.55
-99.40	19.55

REGION: 5 Gro-Mich nuevo

Poisson model

Area source

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATCOSTAm.ATN

Number of vertex:11

Long	Lat	Depth(km)
-104.00	18.40	15.00
-103.00	17.60	15.00
-102.00	17.15	15.00
-101.00	16.80	15.00
-100.00	16.45	15.00
-99.00	16.10	15.00
-98.82	16.81	30.00
-100.00	17.20	30.00
-101.00	17.50	30.00
-102.00	17.90	30.00
-103.73	18.84	30.00

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\Df.atn

Number of vertex: 4.

Influence area

Long.	Lat.
-99.40	19.00
-98.90	19.00
-98.90	19.55
-99.40	19.55

REGION: 6 Prof.Interm\_Oeste\_nu

Poisson model

Area source

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATPROFam.ATN

Number of vertex:15

Long	Lat	Depth(km)
-105.50	21.00	30.00
-105.00	20.00	30.00
-104.00	19.00	30.00
-102.00	17.90	30.00
-101.00	17.50	30.00
-100.00	17.20	30.00
-99.00	16.85	30.00



```

-99.00    19.10    100.00
-100.00   19.20    100.00
-101.00   19.10    100.00
-102.00   19.20    100.00
-103.00   19.30    100.00
-103.30   19.30    100.00
-104.00   19.80    100.00
-105.00   21.00    100.00

```

REGION: 7 Prof.Int.centro\_nuev

Poisson model

Area source

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\ATPROFam.ATN

Number of vertex:10

Long	Lat	Depth(km)
-99.00	16.85	30.00
-98.00	16.60	30.00
-97.00	16.40	30.00
-96.00	16.20	30.00
-95.00	15.90	30.00
-95.00	17.20	100.00
-96.00	18.30	100.00
-97.00	18.80	100.00
-98.00	18.90	100.00
-99.00	19.10	100.00

REGION: 8 Eje\_Volcánico\_Norte

Poisson model

Area source

Attenuation model: C:\ARCHIVOS DE PROGRAMA\CRISIS99\Example\SADIGHam.ATN

Number of vertex: 8

Long	Lat	Depth(km)
-105.50	20.00	15.00
-104.00	19.00	15.00
-103.15	18.50	15.00
-99.00	18.50	15.00
-94.50	18.50	15.00
-97.00	21.00	15.00
-100.00	21.00	15.00
-100.00	20.00	15.00

DEFINITION OF LOCAL POISSONIAN SEISMICITY:

ALFA = Expected value of Alfa  
 BETA = Expected value of Beta  
 CBETA= Coefficient of variation of Beta  
 EMU = Expected value of the maximum magnitude  
 SMU = Standard deviation of the maximum magnitude  
 MMAX = Maximum observed magnitude  
 M0 = Threshold magnitude

REGION	ALFA	BETA	CBETA	EMU	SMU	MMAX	MO
4	2.01	1.83	.11	7.200	.010	6.90	4.50
5	4.79	1.55	.08	7.200	.010	6.90	4.50
6	2.16	1.70	.10	7.900	.100	6.80	4.50
7	1.71	1.58	.11	7.880	.100	7.00	4.50
8	.25	1.88	.22	7.390	.200	6.90	4.50

DEFINITION OF LOCAL CHARACTERISTIC SEISMICITY:

EMT = Median value of the time between characteristic earthquakes (CE)  
 T0 = Time elapsed since the last occurrence of a CE  
 D = Parameter defining the expected magnitude

F = Parameter defining the expected magnitude  
 SMT = Standard deviation of the magnitude of the CE  
 MMIN = Minimum possible magnitude of a CE  
 MU = Maximum magnitude of the CE

REGION	EMT	T0	D	F	SMT	MMIN	MU
1	25.60	6.000	7.50	.00	.27	7.00	8.40
2	47.50	18.000	7.50	.00	.27	7.00	8.40
3	19.80	57.000	7.50	.00	.27	7.00	8.40

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Longitude and latitude of the site: -1.000E+02 1.650E+01

Number of site: 1

SUMMARY OF COMPUTATIONS FOR THIS SITE

Considered Region	Points used to integrate with respect to dist.	Occurrence Model	Probability concentrations ignored	Time
1	2	Characteristic	0/10	.00
2	2	Characteristic	0/10	.00
4	1	Poisson	1/10	.06
5	102	Poisson	1/10	3.19
6	42	Poisson	1/10	1.20
7	22	Poisson	1/10	.66
8	21	Poisson	4/10	.50

INTENSITY versus EXPECTED EXCEEDANCE RATE

	5.000E-03		1.500E-01		3.000E-01
1.000E+00	4.975E+00	1.000E+00	6.799E+00	1.000E+00	7.202E+00
1.145E+01	1.538E+00	1.145E+01	2.711E+00	1.145E+01	2.808E+00
1.310E+02	5.384E-02	1.310E+02	2.928E-01	1.310E+02	2.359E-01
1.500E+03	2.904E-05	1.500E+03	1.009E-03	1.500E+03	5.087E-04

Computation time for this site: .09 min.

Computation time till this site: .09 min.

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Longitude and latitude of the site: -9.950E+01 1.650E+01

Number of site: 2

SUMMARY OF COMPUTATIONS FOR THIS SITE

Considered Region	Points used to integrate with respect to dist.	Occurrence Model	Probability concentrations ignored	Time
1	2	Characteristic	0/10	.00
2	2	Characteristic	0/10	.00
5	117	Poisson	1/10	3.46
6	45	Poisson	1/10	1.43

7	35	Poisson	1/10	1.15
8	21	Poisson	4/10	.44

INTENSITY versus EXPECTED EXCEEDANCE RATE

	5.000E-03		1.500E-01		3.000E-01
1.000E+00	4.593E+00	1.000E+00	6.455E+00	1.000E+00	6.836E+00
1.145E+01	1.472E+00	1.145E+01	2.395E+00	1.145E+01	2.461E+00
1.310E+02	6.834E-02	1.310E+02	3.561E-01	1.310E+02	2.798E-01
1.500E+03	2.515E-05	1.500E+03	1.117E-03	1.500E+03	5.617E-04

Computation time for this site: .11 min.

Computation time till this site: .20 min.

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Longitude and latitude of the site: -1.000E+02 1.700E+01

Number of site: 3

SUMMARY OF COMPUTATIONS FOR THIS SITE

Considered Region	Points used to integrate with respect to dist.	Occurrence Model	Probability concentrations ignored	Time
1	5	Characteristic	0/10	.00
2	2	Characteristic	0/10	.00
4	1	Poisson	1/10	.06
5	123	Poisson	1/10	3.84
6	76	Poisson	1/10	2.31
7	25	Poisson	1/10	.77
8	34	Poisson	4/10	.66

INTENSITY versus EXPECTED EXCEEDANCE RATE

	5.000E-03		1.500E-01		3.000E-01
1.000E+00	5.570E+00	1.000E+00	7.479E+00	1.000E+00	7.852E+00
1.145E+01	1.747E+00	1.145E+01	3.087E+00	1.145E+01	3.136E+00
1.310E+02	5.188E-02	1.310E+02	3.368E-01	1.310E+02	2.659E-01
1.500E+03	8.010E-06	1.500E+03	5.691E-04	1.500E+03	2.930E-04

Computation time for this site: .13 min.

Computation time till this site: .33 min.

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Longitude and latitude of the site: -9.950E+01 1.700E+01

Number of site: 4

SUMMARY OF COMPUTATIONS FOR THIS SITE

Considered Region	Points used to integrate with respect to dist.	Occurrence Model	Probability concentrations ignored	Time
1	2	Characteristic	0/10	.00
2	2	Characteristic	0/10	.00
5	93	Poisson	1/10	2.80
6	84	Poisson	1/10	2.42
7	44	Poisson	1/10	1.26
8	31	Poisson	4/10	.55

INTENSITY versus EXPECTED EXCEEDANCE RATE

	5.000E-03		1.500E-01		3.000E-01
1.000E+00	5.152E+00	1.000E+00	7.068E+00	1.000E+00	7.451E+00
1.145E+01	1.493E+00	1.145E+01	2.696E+00	1.145E+01	2.728E+00
1.310E+02	3.465E-02	1.310E+02	2.571E-01	1.310E+02	2.031E-01
1.500E+03	3.826E-06	1.500E+03	3.302E-04	1.500E+03	1.703E-04

Computation time for this site: .12 min.

Computation time till this site: .45 min.

Date : 1999/10/26

## Ejemplo de archivo \*.gra

1

PROGRAM CRISIS VERSION 99.10

Ejemplo Acapulco

Date : 1999/10/26

## INTENSITY versus EXPECTED EXCEEDANCE RATE

SITE: -100.00 16.50

INTENSITY 1

1.000E+00 4.975E+00

1.145E+01 1.538E+00

1.310E+02 5.384E-02

1.500E+03 2.904E-05

INTENSITY 2

1.000E+00 6.799E+00

1.145E+01 2.711E+00

1.310E+02 2.928E-01

1.500E+03 1.009E-03

INTENSITY 3

1.000E+00 7.202E+00

1.145E+01 2.808E+00

1.310E+02 2.359E-01

1.500E+03 5.087E-04

SITE: -99.50 16.50

INTENSITY 1

1.000E+00 4.593E+00

1.145E+01 1.472E+00

1.310E+02 6.834E-02

1.500E+03 2.515E-05

INTENSITY 2

1.000E+00 6.455E+00

1.145E+01 2.385E+00

1.310E+02 3.561E-01

1.500E+03 1.117E-03

INTENSITY 3

1.000E+00 6.836E+00

1.145E+01 2.461E+00

1.310E+02 2.798E-01

1.500E+03 5.617E-04

SITE: -100.00 17.00

INTENSITY 1

1.000E+00 5.570E+00

1.145E+01 1.747E+00

1.310E+02 5.188E-02

1.500E+03 8.010E-06

INTENSITY 2

1.000E+00 7.479E+00

1.145E+01 3.087E+00

1.310E+02 3.368E-01

1.500E+03 5.691E-04

INTENSITY 3

1.000E+00 7.852E+00

1.145E+01 3.136E+00

1.310E+02 2.659E-01

1.500E+03 2.930E-04

SITE: -99.50 17.00

INTENSITY 1

1.000E+00 5.152E+00

1.145E+01 1.493E+00

1.310E+02 3.465E-02

1.500E+03 3.826E-06

INTENSITY 2

1.000E+00 7.068E+00

1.145E+01 2.696E+00

1.310E+02	2.571E-01
1.500E+03	3.302E-04
INTENSITY	3
1.000E+00	7.451E+00
1.145E+01	2.728E+00
1.310E+02	2.031E-01
1.500E+03	1.703E-04

Ejemplo de archivo \*.map

```

1
PROGRAM CRICIS VERSION 99.10

Ejemplo Acapulco

Date : 1999/10/26

INTENSITY LEVELS FOR FIXED RETURN PERIODS
NNP= Flag to show the kind of operation executed.
If NNP=0 then interpolation was executed.
If NNP=1 then extrapolation was executed.
If NNP=2 then impossible calculate
Long.      lat.  NT      100.00      200.00      500.00      1000.00      5000.00      NNP
-100.00    16.50  1       226.06      282.97      380.76      476.62      802.79      0 0 0 0 0
-100.00    16.50  2       559.56      753.79      1117.66     1505.61     3007.31     0 0 0 1 1
-100.00    16.50  3       459.69      605.33      870.96      1146.90     2173.00     0 0 0 0 1
-99.50     16.50  1       236.98      293.43      389.21      481.93      791.52      0 0 0 0 0
-99.50     16.50  2       593.62      795.81      1172.44     1571.78     3104.38     0 0 0 1 1
-99.50     16.50  3       484.48      635.96      911.20      1196.09     2249.58     0 0 0 0 1
-100.00    17.00  1       207.01      250.97      323.71      392.44      613.66      0 0 0 0 0
-100.00    17.00  2       502.00      654.13      928.18      1209.47     2236.26     0 0 0 0 1
-100.00    17.00  3       423.98      543.37      754.28      966.67      1719.76     0 0 0 0 1
-99.50     17.00  1       182.72      219.95      281.06      338.33      520.42      0 0 0 0 0
-99.50     17.00  2       430.26      554.57      775.66      999.77      1802.34     0 0 0 0 1
-99.50     17.00  3       369.30      468.78      642.55      815.64      1419.15     0 0 0 0 0

```

Ejemplo de archivo \*.fuc

```

SITE: -100.00      16.50
SOURCES:
      1          2          3          4          5          6          7          8
INTENSITY 1
1.000E+00  3.808E-07  1.387E-02  0.000E+00  4.354E-04  3.912E+00  6.437E-01  3.323E-01  3.449E-02
1.145E+01  5.643E-03  4.120E-05  0.000E+00  1.397E-09  1.490E+00  3.104E-02  1.092E-02  3.994E-05
1.310E+02  4.343E-07  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  5.375E-02  8.162E-05  8.386E-06  0.000E+00
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  1.904E-05  1.328E-10  0.000E+00  0.000E+00
INTENSITY 2
1.000E+00  3.870E-02  1.592E-02  0.000E+00  8.910E-04  4.456E+00  1.361E+00  8.463E-01  8.135E-02
1.145E+01  1.278E-02  1.033E-04  0.000E+00  4.657E-09  2.485E+00  1.586E-01  5.448E-02  4.368E-04
1.310E+02  8.499E-06  4.547E-12  0.000E+00  0.000E-00  2.907E-01  1.844E-03  2.893E-04  0.000E+00
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  1.009E-03  1.485E-07  3.143E-09  0.000E+00
INTENSITY 3
1.000E+00  3.888E-02  1.898E-02  0.000E+00  6.154E-03  4.999E+00  1.261E+00  8.044E-01  7.328E-02
1.145E+01  2.41E-07  5.293E-04  0.000E+00  8.568E-08  2.610E+00  1.245E-01  5.125E-02  5.369E-04
1.310E+02  5.13E-05  1.38E-09  0.000E+00  0.000E-00  1.543E-01  1.289E-03  2.367E-04  1.490E-08
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E-00  5.886E-04  5.962E-08  1.630E-09  0.000E+00
SITE: -99.50      16.50
SOURCES:
      1          2          3          4          5          6          7          8
INTENSITY 1
1.000E+00  3.771E-07  8.817E-03  0.000E+00  0.000E+00  3.434E+00  5.908E-01  4.890E-01  3.432E-02
1.145E+01  1.679E-03  1.481E-06  0.000E+00  0.000E-00  1.415E+00  3.237E-02  2.216E-02  3.910E-05
1.310E+02  1.193E-08  0.000E+00  0.000E+00  0.000E-00  2.815E-02  1.351E-04  5.075E-05  0.000E+00
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  1.814E-05  1.108E-09  8.367E-11  0.000E+00
INTENSITY 2
1.000E+00  3.51E-02  1.064E-02  0.000E+00  0.000E+00  3.971E+00  1.239E+00  1.115E+00  8.214E-02
1.145E+01  4.470E-03  1.017E-05  0.000E+00  0.000E-00  2.117E+00  1.565E-01  1.062E-01  4.311E-04
1.310E+02  2.785E-07  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  3.825E-01  2.396E-03  1.157E-03  0.000E+00
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E-00  1.116E-03  6.146E-07  9.278E-08  0.000E+00
INTENSITY 3
1.000E+00  3.819E-02  1.510E-02  0.000E+00  0.000E+00  4.504E+00  1.156E+00  1.048E+00  7.433E-02
1.145E+01  1.003E-02  6.816E-05  0.000E+00  0.000E-00  2.239E+00  1.215E-01  9.030E-02  5.310E-04
1.310E+02  3.073E-06  4.547E-13  0.000E+00  0.000E+00  2.774E-01  1.605E-03  8.328E-04  0.000E+00
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  2.614E-04  2.258E-07  3.626E-08  0.000E+00
SITE: -100.00      17.00
SOURCES:
      1          2          3          4          5          6          7          8
INTENSITY 1
1.000E+00  3.850E-02  1.612E-02  0.000E+00  9.397E-04  4.131E+00  9.164E-01  4.031E-01  6.412E-02
1.145E+01  9.033E-03  1.019E-04  0.000E+00  8.382E-09  1.641E+00  8.028E-02  1.559E-02  3.233E-04
1.310E+02  4.218E-06  4.547E-12  0.000E+00  0.000E+00  5.109E-02  7.628E-04  1.935E-05  3.725E-09
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  7.953E-06  5.627E-08  6.366E-12  0.000E+00
INTENSITY 2
1.000E+00  3.845E-02  1.798E-02  0.000E+00  2.109E-03  4.708E+00  1.628E+00  9.638E-01  1.212E-01
1.145E+01  1.753E-02  2.681E-04  0.000E+00  2.608E-08  2.665E+00  3.247E-01  7.674E-02  2.318E-03
1.310E+02  8.13E-05  2.328E-10  0.000E+00  0.000E+00  3.169E-01  9.277E-03  5.693E-04  1.192E-07
1.500E+03  9.95E-17  0.000E+00  0.000E+00  0.000E-00  5.877E-04  1.137E-05  1.403E-08  0.000E+00
INTENSITY 3
1.000E+00  3.822E-02  1.811E-02  0.000E+00  1.211E-03  4.238E+00  1.526E+00  9.067E-01  1.106E-01
1.145E+01  2.474E-02  1.149E-03  0.000E+00  4.768E-07  2.795E+00  2.439E-01  6.833E-02  2.192E-03
1.310E+02  2.01E-04  6.81E-09  0.000E+00  0.000E-00  1.484E-01  5.777E-03  4.390E-04  3.278E-07
1.500E+03  2.880E-16  0.000E+00  0.000E+00  0.000E-00  1.455E-04  4.242E-06  6.316E-09  0.000E+00
SITE: -99.50      17.00
SOURCES:
      1          2          3          4          5          6          7          8
INTENSITY 1
1.000E+00  3.771E-07  1.111E-02  0.000E+00  0.000E+00  3.434E+00  5.908E-01  5.967E-01  6.498E-02
1.145E+01  2.640E-03  1.197E-05  0.000E+00  0.000E+00  1.368E+00  8.603E-02  3.417E-02  3.220E-04
1.310E+02  4.493E-08  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  3.133E-02  1.291E-03  1.436E-04  3.725E-09
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  1.814E-05  2.724E-07  1.412E-09  0.000E+00
INTENSITY 2
1.000E+00  3.75E-02  1.916E-02  0.000E+00  0.000E+00  4.119E+00  1.475E+00  1.247E+00  1.253E-01
1.145E+01  6.75E-03  1.899E-05  0.000E+00  0.000E+00  2.223E+00  3.390E-01  1.550E-01  2.319E-03
1.310E+02  7.036E-07  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  2.413E-01  1.279E-02  2.482E-03  1.192E-07
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  1.873E-04  3.222E-05  7.090E-07  0.000E+00
INTENSITY 3
1.000E+00  3.88E-02  1.19E-02  0.000E+00  0.000E+00  4.727E+00  1.384E+00  1.169E+00  1.142E-01
1.145E+01  1.15E-02  1.03E-04  0.000E+00  0.000E+00  2.349E+00  2.378E-01  1.256E-01  2.193E-03
1.310E+02  7.03E-06  1.38E-11  0.000E+00  0.000E+00  1.527E-01  7.651E-03  1.701E-03  3.278E-07
1.500E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  1.177E-04  1.249E-05  2.600E-07  0.000E+00

```