

CAPITULO II. ANALISIS DE AMENAZA SISMICA PARA MANAGUA-NICARAGUA

II.1 Introducción

Desde la fundación de la ciudad de Managua y de su elección como capital de la República de Nicaragua a mediados del siglo pasado, se presentó con relativa frecuencia la ocurrencia de sismos de naturaleza destructiva y originados en diversas fuentes sismogénicas. Sin embargo, los relacionados al fallamiento activo dentro de la propia ciudad o relativamente cercano han sido históricamente los más destructivos. En el presente siglo los terremotos del 31 de marzo de 1931 ($M = 5.6$) y el del 23 de diciembre de 1972 ($M_s = 6.2$) han destruido áreas extensas de la ciudad. Pero temblores de magnitud relativamente baja como el del 4 de enero de 1968 ($M_b = 4.6$) pueden causar daños considerables en áreas pequeñas.

Considerando que este es el centro poblacional y económico más importante del país, es plenamente justificado dada la historia sísmica de la región, realizar un análisis de amenaza sísmica que permita contribuir a la toma de decisiones para su prevención y mitigación.

II.2 Metodología para el análisis de la amenaza sísmica

Existen dos métodos corrientemente usados para estimar la amenaza sísmica de un sitio determinado. Estos son el método probabilístico y el método determinístico. Ambos requieren del conocimiento de datos comunes como son la sismicidad, sismotectónica (y neotectónica) a partir de los cuales se trata de establecer un modelo de ocurrencia futura de sismos. Cada uno de ellos tiene sus propias limitaciones y la aplicación de uno u otro enfoque depende en algunos casos del tipo de obra civil que se desee construir y para la cual se requerirá de una estimación de amenaza sísmica. En el caso de Managua se ha decidido la aplicación de ambos métodos, lo cual tiene dos objetivos: 1) Formativa. Se observa en el trabajo práctico las ventajas y desventajas de cada uno y la importancia del criterio sismológico en la aplicación de ambos métodos. Esto es conveniente para que el personal de sismología de INETER en su debida oportunidad dependiendo de los requerimientos apliquen el método que más convenga a las circunstancias; 2) Aplicación a una zona crítica como Managua donde se conjugan factores complejos y

de diversa naturaleza (sismológicos, costos de construcción por coeficiente sísmico determinado en el código de construcción, etc.) que favorecen el plantear el problema de análisis de la amenaza sísmica considerando el mayor rango de posibilidades existentes en este tipo de investigaciones.

Con base en los anteriores criterios aplicamos ambos enfoques lo cual nos permitirá sustentar de una mejor manera la estimación de la amenaza sísmica para Managua.

II.3 El método determinista

Con base en la sismicidad histórica y reciente, la sismotectónica y la identificación de las fallas activas, la recurrencia de los sismos de mayor magnitud y el nivel de daño asociado; se determina el sismo máximo posible o en su defecto el sismo máximo conocido para las diversas fuentes sismogénicas y se le aplica una relación de atenuación del movimiento del suelo desde las mismas hasta el sitio de interés. Esto permite determinar la intensidad o magnitud de movimiento del suelo (aceleración, velocidad, desplazamiento) que puede esperar se presente con una periodicidad determinada (con base en la información pasada) en el sitio de interés.

II.3.1 Definición de las fuentes sismogénicas

II.3.1.1 Fuente sismogénica interplaca

La zona de movimiento interplaca Coco-Caribe en la región Pacífica de Nicaragua se subdivide en dos segmentos. Lo anterior con base en:

- a) Los volcanes de la cordillera volcánica Cuaternaria en Nicaragua según Stoiber y Carr (1973) y Carr y Stoiber (1977) están constituyendo dos alineamientos volcánicos de rumbo NW pero desplazados con un salto a la derecha del orden de 10 Km en la región de Managua. Van Wyk de Vries (comunicación verbal 1990) considera que este salto es aparente pero un cambio de rumbo si se presenta cerca del Volcán Momotombo. A lo largo de esta región se presenta un alineamiento transversal de edificios volcánicos de rumbo aproximado

Proponen que esto refleja una segmentación de la placa del Coco al introducirse bajo Nicaragua, por lo cual la zona sísmica de Benioff tiene diferentes ángulos al introducirse bajo el continente. Los magmas que alimentan los edificios volcánicos se originan entonces en diferentes regiones del manto bajo Nicaragua. Los perfiles sísmicos de la zona de Benioff obtenidos de los datos de la red sísmográfica nicaraguense que operó entre 1975 y 1983, no reflejan sin embargo esta segmentación, ni tampoco los datos telesísmicos así lo muestran (Burbach et al., 1984). Por lo anterior la placa del Coco debe deformarse plásticamente en esta región bajo Nicaragua para explicar la diferencia en la distancia de los aparatos volcánicos respecto a la fosa entre los dos diferentes segmentos volcánicos. Una deformación plástica en esta región es totalmente factible considerando que la placa del Coco es relativamente joven (edad Mioceno) y térmicamente fría al llegar a la fosa por lo tanto es absorbida dentro del manto al alcanzarse profundidades de 250 Km-300 Km de profundidad.

- b) Cambio en el rumbo de la fosa al pasar del noroeste de Nicaragua hacia el suroeste. Por ejemplo en el mapa batimétrico de Case y Holcombe (1981) se observa claramente este cambio en el rumbo de la fosa que pasa de un rumbo N 40°W al suroeste a un rumbo al N 65°W al noroeste. Aburto (1975) sugiere que un cambio similar se observa en la transición de la sísmicidad somera (menos a 55 Km) con respecto a la sísmicidad de profundidad intermedia (mayor a 90 Km).

- c) Cambio en el patrón de movimientos neotectónicos verticales entre el suroeste y el noroeste de Nicaragua. En un mapa morfotectónico incluido en el trabajo de Woodward-Lundgren (1975) y realizado por geólogos de CATASTRO y de Parsons Corporation et. al. (1972), se observa que en el noroeste de Nicaragua la región costera tiene una tendencia a la subsidencia y al hundimiento mientras que al suroeste de Puerto Sandino, la región costera se está levantando. Esto se refleja en la línea de costa con acantilados frecuentes que llegan al borde marino en el suroeste de Nicaragua, contrario con lo que ocurre en el noroeste. La zona de cambio en el signo del movimiento del borde costero debe tener un control neotectónico.

d) Temblores asociados a la zona intersegmento. Carr y Stoiber (1977) postulan que zonas de ruptura alargadas en dirección transversal a la fosa pueden estar relacionados a los límites intersegmentos. En este caso el área de ruptura del terremoto del 24 de Octubre de 1956 tal como es definido por Kelleher et al. (1973) y que ocurrió en la zona entre los dos segmentos propuestos, puede ser un candidato posible de este tipo de eventos.

Con los anteriores razonamientos se consideran dos segmentos en el borde pacífico de Nicaragua. Dada la posición aproximadamente equidistante de la región de Managua respecto a las dos posibles áreas de ruptura, la misma está expuesta a una amenaza sísmica similar respecto a cualquiera de ellas.

II.3.1.1.a Amenaza sísmica del segmento noroeste

Sismo máximo posible

En el presente siglo la ruptura asociada al sismo del 28 de marzo de 1921 con epicentro en el segmento noroeste tuvo una magnitud M_s de 7.3. Debe observarse la falta de deslizamiento sísmico que ha ocurrido en la región de movimiento interplaca Coco-Caribe en Nicaragua, dado que únicamente a principio del siglo hubo una actividad de terremotos de magnitudes $M_s > 6.75$. Desde 1921, excepto por un evento ocurrido en la zona intersegmento en 1956, no se han generado eventos mayores ($M_s > 7.0$). Considerando una muestra de sismos $M_s > 7.0$ tan pequeño es difícil estimar el sismo máximo posible. El terremoto del 12 de Octubre de 1885 que ocurrió en el segmento noroeste, generó un área de daño significativa (Figura 3). Podría ser que el evento de 1885 tuvo una magnitud mayor que $M_s = 7.3$. En Centro América temblores de magnitudes 7.75 a 8.0, han ocurrido en el segmento oeste de Guatemala y en Nicoya, Costa Rica. Pero el movimiento interplaca en estas regiones ha mostrado un comportamiento de recurrencia de eventos mayores ($M_s > 7.0$) del orden de 30 a 40 años, lo cual no se observa en Nicaragua. Pensando en el evento de 1885 este pudo tener una magnitud $M_s = 7.5$ de acuerdo a los datos macrosísmicos recolectados. Esto entonces es posiblemente la magnitud mayor que podríamos tener en el borde interplaca noroeste del pacífico nicaraguense. Debe observarse, sin embargo, que Harlow et al. (1981) observa una zona de quietud sísmica en el sector oeste de Nicaragua y usando relaciones empíricas estima una magnitud entre 7.5 y 8.0. Esta zona aún permanece como un área de quietud sísmica, por lo cual esta área tendría un potencial sísmico alto o un fuerte deslizamiento asísmico.

Período de recurrencia

El comportamiento de la sismicidad para eventos mayores en el área pacífica considerando el período 1850 hasta el presente, no permite definir períodos de recurrencia para este segmento. Al segmento noroeste se pueden asociar las rupturas de 1850, 1885, 1898, 1909 y 1921. Sin embargo, el comportamiento sísmico ha sido totalmente irregular. La recurrencia de eventos mayores cada 30 ó 40 años presente en otras regiones de Centro América no se aplica al borde interplaca de Nicaragua.

Una estimación grosera sería que el evento de 1850 concluyó un proceso de rupturas del sector noroeste. A partir de 1885 se dieron rupturas sucesivas en diferentes subregiones de este borde hasta concluir con el evento de 1921. Los extremos temporales de los procesos de ruptura anteriores sugieren un período máximo de 71 años. Desde 1921 no ocurren rupturas por lo cual han transcurrido 69 años y estaríamos alcanzando el extremo temporal sugerido para la serie de rupturas que se presentaron entre 1850 y 1921.

Nivel de Aceleración Máximo para Managua

Para el segmento noroeste la distancia hipocentral mínima (R) entre el plano de resbalamiento interplaca y la ciudad de Managua, se estima considerando que este sector termina en su extremo sureste frente a Puerto Sandino. La región de movimiento interplaca se supone tiene un ángulo de 30° hacia el noreste entre las profundidades de 10 y 40 Km. Con base en lo anterior R es 90 Km aproximadamente. Usando la relación de atenuación de aceleraciones encontrada por Campbell (1981):

$$PGA = 0.0185 \exp(1.26M) [R + 0.147 \exp(0.73 M)]^{-1.75} \quad (1)$$

donde PGA es la aceleración promedio en fracción de g y M es la magnitud. Si usamos $M_s = 7.5$ y $R = 90$ Km. encontramos que $PGA = 0.06$ g y para el 84%, $PGA = 0.085$ g.

II.3.1.1.b Amenaza sísmica de la Región Intersegmento - Región Pacífica Central de Nicaragua

Sismo Máximo Posible

En el presente siglo el evento del 24 de Octubre de 1956 ($M_s = 7.3$) se ubica en esta región. Kelleher et. al. (1973) reubicaron el evento principal y las réplicas de mayor magnitud, definiendo un área de ruptura que está elongada en la dirección transversal a la fosa Mesoamericana (figura 3). Este tipo de eventos tiene una geometría de ruptura similar a la que se espera de la región intersegmento. El análisis de intensidades determinadas con base en información macrosísmica recopilada en los periódicos muestra que el área de daños estuvo comprendida entre León y Chinandega por el noroeste y Managua en la región central interior. Para el sector sureste de Nicaragua no se pudo obtener información de intensidades. Sin embargo las intensidades máximas MM están entre VI y VII.

Un evento de características de daños similares fue el del 29 de Abril de 1881. En este caso las observaciones macrosísmicas señalan un área de daños que comprende Chinandega, Corinto, Managua y San Juan del Sur. Debe sin embargo acotarse, que un evento de profundidad intermedia del sector Central costero de Nicaragua con magnitud $M_s > 7.0$ puede originar un área de daños similar. Únicamente la manera como se atenúa la energía sísmica con la distancia en un análisis detallado de este y otros sismos puede resolver la incertidumbre respecto al origen del sismo. Con base en la escasa información con que se cuenta, se considera que un sismo de magnitud máxima $M_s = 7.5$, es una escogencia adecuada.

Período de Recurrencia

Si consideramos que el evento de 1887 se asocia al movimiento sísmico en la región intersegmento, se tendría un período interrecurrencia cercano a 75 años con respecto al evento de 1956. Sin embargo, esta limitada muestra no permite dar confianza al valor anterior.

Aceleración Promedio de la Región Intersegmento

Aplicamos la relación de atenuación de Campbell (1981) (ecuación 1). Con los valores de $M = 7.5$ y la distancia hipocentral mínima de 75 Km, considerando que la profundidad mayor de la ruptura es 40 Km, y que el límite de esta región sísmica se localiza entre 25 y 30 Km del borde costero de Nicaragua comprendido entre Masachapa y Puerto Sandino, se obtiene entonces que $PGA = 0.07 g$ para la media porcentual y $PGA = 0.11 g$ para el 84%.

II.3.1.1.c Amenaza Sísmica del segmento suroeste de Nicaragua

Sismo máximo posible

El único evento que en el período 1850-1990, Nishenko (1989) identifica como posiblemente ocurrido en este sector es el del 30 de Diciembre de 1907 ($M_s = 7.2$). Debe mencionarse sin embargo, que faltan observaciones macrosísmicas que avalen esta ubicación. Se sabe que este evento causó algunos daños en Managua, pero falta el detalle de como se percibió en el sector suroeste y en otras regiones del país. La historia sísmica sugiere una componente de movimiento asísmico muy alto y una actividad para temblores mayores relativamente baja. En la zona aledaña hacia el sureste en el golfo de Papagayo en Costa Rica, el sismo del 27 de Febrero de 1916 causó daños hasta en Rivas y tuvo una magnitud de $M_s = 7.5$. Consideramos que un evento de características similares es posible que se presente en este sector, por lo cual escogemos un sismo máximo posible de $M_s = 7.5$. Llama la atención el comportamiento sísmico similar de las zonas aledañas (Papagayo - sureste de Nicaragua).

Período de recurrencia

La actividad sísmica para grandes temblores ($M_s > 7.0$) ha sido sumamente baja y únicamente el evento de 1907 parece ocurrió en esta región. Lo anterior sugiere un período de recurrencia largo de orden de 100 años o más para estos sismos. Se requiere un análisis más detallado de los sismos históricos para mejorar las localizaciones proporcionadas por Leeds (1974).

Aceleración pico promedio

Este segmento en su extremo noroeste limita con el borde suroeste de la región intersegmento, una distancia hipocentral mínima para esta zona sismogénica es 90 Km. Aplicando la ecuación (1) donde M es igual a 7.5, obtenemos que PGA es 0.07 g para la media porcentual y PGA es 0.1 g para el 84%.

II.3.1.1.d Consideraciones generales acerca de la amenaza sísmica de la región interplaca

Desplazamiento del suelo, duración de la señal y período predominante

Los niveles de aceleración pico promedio e incluso los valores para el 84% porcentual están comprendidos entre 0.06 g y 0.11 g. Estos valores son relativamente bajos. Sin embargo, si consideramos los desplazamientos que generaría esta fuente sísmica los mismos pueden ser significativos. Esto impone condiciones de riesgo para ciertos tipos de construcciones. Además si consideramos la duración del movimiento fuerte que podemos esperar para un sismo de $M = 7.5$ a la distancia hipocentral entre 75 y 90 Km, para un sitio con suelo; es entre 10 y 15 segundos para aceleraciones mayores o iguales a 0.05 g. Para un sitio rocoso sería menor a 5 segundos (Chang y Krinitzsky, 1977).

Respecto a la frecuencia predominante de la señal será de 2 hz usando las relaciones de Idriss y Kiefer (1969).

Toivanen y Wagenius (1989) han definido de acuerdo a los factores anteriores, que en el área de Managua los edificios especialmente comprendidos entre 13 y 14 pisos son los que presentan mayor vulnerabilidad de ser afectados por la ocurrencia de un sismo originado en la zona interplaca. Los desplazamientos esperados, duración de señal fuerte y espectros de frecuencias deben ser debidamente considerados en el diseño de diversas obras civiles como son edificios altos, que se construyan en la ciudad de Managua.

II.3.1.2 Fuente sísmica de los temblores de profundidad intermedia

En Nicaragua con base en datos hipocentrales obtenidos con la red mundial de estaciones y con la red local que operó en 1975 y 1983, se puede definir claramente una actividad relacionada a la subducción de la placa del Coco dentro del manto comprendida entre las profundidades de 70 a 220 Km (Molnar y Sykes, 1969; Dewey y Algèrmussen, 1974; Boletines Sismológicos IIS e INETER, 1975-1983). El ángulo de la zona e Benioff es bastante fuerte alcanzando hasta aproximadamente 60° en la zona más profunda. El comportamiento de la sismicidad de la zona de Benioff nicaraguense es similar a lo largo de toda la región, excepto por la sugerencia de Aburto (1975) de que los temblores al noroeste de la región de Puerto Sandino son de rumbo N 60° W, que difiere del rumbo hacia el sureste que tiene dirección N 45° N. Los datos telesísmicos o de la red local no permiten definir una segmentación en la zona de Benioff con diferentes ángulos como sugieren Stoiber y Carr (1973). Debe existir un comportamiento plástico para explicar el aparente cambio en el rumbo de la sismicidad entre los sectores noroeste y suroeste de Nicaragua.

Magnitud máxima posible

En el presente siglo los temblores de mayor magnitud registrados relacionados a esta fuente sísmica son el del 05 de Octubre de 1925 (h = 135 Km, M = 6.7), el del 05 de Noviembre de 1926 (h = 135 Km, M = 7.0). Estos dos eventos causaron daños en Managua y el último además en Granada, Chinandega y San Juan del Sur. Se reporta que la mitad de las casas de Managua fueron dañadas (Leeds, 1974). Luego tenemos eventos importantes el 21 de Mayo de 1932 (h = 90 Km, M = 6.9) y el 21 de Mayo de 1932 (h = 90 Km, M = 6.9). Para estos últimos sismos no hay reporte de daños en Nicaragua, aunque el último los causó en El Salvador. El 26 de Enero de 1947 un evento de M = 7.2 y h = 170 Km, se localizó al noroeste de Nicaragua, aunque los daños fueron reportados en Villa de La Unión en El Salvador. Desde esta fecha no han vuelto a ocurrir sismos con $M_s > 6.75$ originados en esta fuente sísmogénica. Se observa claramente que esta fuente sísmica es bastante activa. Es interesante observar que la actividad sísmica anterior se presentó temporalmente cerca y posterior a la ocurrencia de sismos interplaca $M_s > 7.0$ que ocurrieron hasta 1921. Lo anterior sugiere que los procesos de movimiento significativo de la placa del Coco migraron desde el sector interplaca hacia la región de sismicidad intermedia.

Considerando la sismicidad instrumental, definimos que el sismo máximo posible es $M_s = 7.5$.

Periodo de recurrencia

Observando que la secuencia de eventos de magnitud $M_s > 7.0$ en este siglo, ocurrió en un intervalo temporal relativamente corto y que después no han vuelto a ocurrir sismos de magnitud mayor, y además aunque Leeds (1974) incluye una serie de eventos con profundidad intermedia para el siglo XIX, con magnitud $M_s > 7.0$, estas localizaciones no son confiables. Por ejemplo, el evento del 12 de Octubre de 1885 lo clasificó en tal categoría. Sin embargo el área de daños y la forma como se atenuó la intensidad con la distancia indica que este evento es de tipo interplaca.

Pensando en la posible asociación entre eventos someros y de profundidad intermedia puede sugerirse un periodo de retorno entre 70 y 100 años, aunque este es especulativo.

Aceleración máxima promedio

Con base en los eventos relocalizados por Dewey y Algermissen (1974) se puede estimar que la distancia hipocentral mínima entre los eventos de profundidad intermedia y Managua es 70 Km. Usamos la relación de Campbell (1981) con $M = 7.5$ y obtenemos que $PGA = 0.08 g$ para la media porcentual y $PGA = 0.12 g$ para el 84%.

II.3.3 Fuente sismogénica relacionada al fallamiento local

II.3.3.a Sistema de fallas escalonadas de rumbo NE

Con base en la sismicidad histórica y reciente se puede ubicar tres sismos principales que han ocurrido en estas fallas en el presente siglo (Figura 4). Estos son:

1. El sismo del 31 de Marzo de 1931 ($M_s = 5.6, M_{DEN} = 6.0$) ocurrió en la falla Estadio. Originó ruptura superficial y el tipo de fracturas asociadas indican que el movimiento predominante fue de desplazamiento de rumbo sinestral (Sultan, 1931). El análisis de los daños generados en la parte central de la ciudad de Managua indican que la intensidad máxima MM fue VIII y localmente IX. Murieron alrededor de 1000 personas y la mayoría de casas y facilidades fueron destruidas.

2. El sismo del 04 de Enero de 1968 ($M_s = 4.6$), profundidad 5 Km. En el Sur de Managua en la Colonia Centroamérica por lo menos 500 casas fueron dañadas y evacuadas, pero no hubo pérdidas humanas. No se presentó colapso total de construcciones, hubo colapso parcial y los daños asociados se debieron a defectos constructivos. La intensidad máxima MM fue VIII (Algermissen et. al., 1974).

3. El terremoto del 23 de Diciembre de 1972 ($M_s = 6.2$) y profundidad de 5 Km. Originó ruptura superficial en las fallas Tiscapa, Chico Pelón y Los Bancos. El movimiento predominante de las fallas, fue desplazamiento sinistral con base en evidencias de campo y del mecanismo focal del evento principal (Brown et al., 1973; Algermissen et al., 1974).

El análisis de las réplicas mostró una concentración de eventos en los extremos NE y SW de las fallas mencionadas y pocos eventos en el área de ruptura definida con base en cartografiado geológico.

A raíz de este evento murieron alrededor de 10000 personas. El área de daños se ubicó especialmente en el centro de la ciudad y hacia el este de la misma. Las intensidades máximas MM fueron de IX grados localmente y de intensidad VIII en un área extensa de la ciudad (Algermissen et al., 1974; Hansen y Chávez, 1973).

Sismo máximo posible

En Centroamérica a lo largo del cordón volcánico cuaternario el evento de mayor magnitud asociado a este tipo de fallamiento es de 6.8 (M_s), evento que ocurrió en 1930 en el sureste de Guatemala (White y Harlow, en prensa). el siguiente evento en tamaño relacionado al mismo tipo de fallamiento fue el terremoto de Tilarán del noroeste de Costa Rica de 1973, $M_s = 6.5$. Considerando el carácter altamente fracturado de estas regiones volcánicas jóvenes, las grandes variaciones en la competencia de los materiales volcánicos y del sustrato, la presencia de efectos térmicos asociados a los aparatos volcánicos y en fin a la naturaleza altamente heterogénea de la corteza superior de estas áreas, consideramos que un evento de magnitud M_s igual a 6.5 es el sismo máximo posible que puede ser generado por el sistema de fallas escalonado que se presenta a través de la ciudad de Managua. Igual criterio se expresa en White y Harlow (en prensa).

Período de recurrencia

El sistema de fallas conjugado está constituido por una serie de fallas de rumbo NE que tiene longitudes cartografiadas diferentes (Woodward-Clyde, 1975). La falla principal del sistema parece ser la falla Tiscapa y la falla Chico Pelón que se considera una falla asociada y que dado que ambas limitan una estructura en forma de graben, es posible que en profundidad ambas se unan y constituyan una falla principal. Evidencia de lo anterior fue la observación simultánea de ruptura de ambas fallas durante el terremoto de 1972. Sin embargo, la falla Estadio es también significativa dentro del sistema y puede generar eventos de magnitud sumamente destructiva como fue el caso del terremoto de 1931.

El estudio detallado por medio de trincheras realizado por Woodward-Lundgren (1975) ha definido que la falla Tiscapa ha tenido un desplazamiento vertical acumulado entre 15 y 19 m para los últimos 25000 años. De este movimiento superficial acumulado, aproximadamente se considera que un 20% del mismo ha sido a través de movimiento en fallas. El componente vertical mayor se ha dado a través de deformación e inclinación de los bloques en la zona de falla. El comportamiento a mayor profundidad será más por deformación frágil que dúctil. La anterior valoración porcentual de la componente vertical por movimiento frágil se da con base en lo observado en la falla aledaña de Los Bancos, donde se ha determinado que el movimiento vertical ha sido de 5 a 6 m en los últimos 25000 años, pero solamente un poco más de 1 m se ha expresado por movimiento a lo largo de fracturas (Woodward-Lundgren, 1975).

Durante el terremoto de Managua, Brown et al. (1973) definieron un desplazamiento vertical máximo de 10.2 cm en la falla Tiscapa. Se puede considerar que el 20% de salto acumulado observado en la falla Los Bancos es similar para la falla Tiscapa. Para determinar el período medio de recurrencia t_r para eventos sísmicos similares utilizamos la relación:

$$t_r = \frac{\sum_{n=1}^i t_n}{\sum_{n=1}^i D_i} \quad (2)$$

donde D_i es el desplazamiento vertical en el evento i y t_i es el período interevento entre i y $i-1$. Considerando que los movimientos verticales acumulados en los últimos 25000 años en la falla Tiscapa corresponden a 3.8 m y que el desplazamiento i corresponde a un valor promedio de 10 cm, se encuentra que el período medio de recurrencia de eventos de magnitud 6.2 es aproximadamente 660 años, para la falla Tiscapa. Para la falla Los Bancos se puede encontrar un período de recurrencia para eventos de magnitud 6.2 de 1250 años considerando que los desplazamientos verticales asociados a esa falla durante el terremoto de Managua fueron de 5 cm que es un valor extremo superior, o de 750 años para un valor de desplazamiento vertical de 3 cm (Woodward-Lundgren, 1975).

Cada una de las fallas del sistema conjugado, tiene una historia de movimientos diferentes y los períodos de recurrencia son también distintos para las diferentes fallas. Dependiendo de la tasa media de deformación a la que está siendo sometido el medio geológico así tendremos que el comportamiento del conjunto de fallas originará eventos de carácter dañino con una recurrencia media que debe ser menor a 660 años. Otras fallas aledañas deben ser igualmente consideradas para evaluar en forma conjunta la amenaza sísmica asociada al neotectonismo imperante en la región de Managua.

II.3.3.1.b Sistema de fallamiento normal NS

Existe evidencia geológica abundante de la existencia de un sistema de fallas de rumbo aproximado NS que tiene expresión neotectónica clara y donde además algunas de las fallas del sistema ha mostrado actividad sísmica reciente (Figura 4). Entre los trabajos de campo que demuestran actividad reciente (holocénica) en las fallas están los de Kuang (1973) y Woodward-Clyde (1975) y Dames y Moore-Lamsa (1976). Respecto a la actividad sísmica de estas fallas tenemos que parte de la actividad de réplicas del terremoto del 23 de Diciembre de 1972, se presentó en el extremo norte de la falla San Judas. El mecanismo focal compuesto fue de desplazamiento normal (Brown et. al., 1973; Langer, et.al., 1974). La falla Ticuantepe (sistema de fallas Ticuantepe-Cofradía) mostró actividad durante un enjambre ocurrido a principios de Agosto de 1984. El mecanismo focal compuesto para el conjunto principal de sismos fue de tipo normal (Segura y Aburto, 1984).

La longitud de las fallas principales de este sistema es similar o mayor respecto a las del sistema NE. Esto sugiere que el proceso de extensión cortical en dirección E-W es relativamente importante.

Sismo Máximo posible

Considerando la longitud de las fallas, la segmentación que puedan tener las mismas, se estima que un sismo de magnitud $M_s = 6.5$ es totalmente factible, lo anterior con base en el marco neotectónico presente en el área, dado que el campo de esfuerzos regional existente es compatible en principio para que este sistema tenga un potencial sísmico considerable.

Desde el punto de vista de la sismicidad histórica existe evidencia circunstancial que sugiere que ocurrieron terremotos que se puedan asociar a este sistema de fallas.

Acá a la serie de sismos ocurridos entre Mayo y Agosto de 1844, se asoció de acuerdo a las descripciones de la época (Woodward-Lundgren, 1975), movimientos corticales diferenciales en la región comprendida entre el lago de Managua y el lago de Nicaragua. Estos desplazamientos pudieron estar relacionados al sistema de fallas de Cofradía. Sin embargo esto es sugestivo aunque no concluyente hasta que no se realice un análisis histórico más detallado de esta y otras secuencias de sismos históricos.

Considerando además el grado de heterogeneidad y fracturamiento del medio geológico un sismo de magnitud 6.5 es factible. Debe sin embargo, acotarse que alguna de estas fallas por su longitud supuesta, aunque determinada sin información geológica de detalle, podrían generar eventos un poco mayores. Este podría ser el caso de la falla Cofradía. Si esta falla con rumbo N se extiende a lo largo del borde este del Lago de Managua y si esta costa de rumbo tan lineal debe su origen a la prolongación de esta falla al norte de Tipitapa, podría tener capacidad para generar eventos de magnitud mayor que la aquí sugerida, aunque posiblemente con un periodo de recurrencia mayor que el sugerido para el sistema escalonado.

Período de recurrencia

No hay datos que permitan estimar el periodo de recurrencia de eventos sísmicos que puedan asociarse a este sistema de fallas. La única consideración es la evidencia

neotectónica, la clara expresión morfotectónica que este sistema de fallas tiene, lo cual claramente señala que es un sistema de fallamiento bastante activo. Por ejemplo, escarpes de relativamente pocos metros a decenas de metros se preservan en un ambiente climático relativamente adverso (falla Aeropuerto). Lo anterior sugiere que el periodo de recurrencia de los sismos que se originen en este sistema de fallas, debe ser relativamente frecuente, tal vez similar al encontrado para la falla Tiscapa del sistema escalonado de rumbo NE. Incluso considerando que la longitud total del sistema de fallas normales parece mayor que el sistema escalonado, podría reflejar un grado de actividad mayor.

11.3.3.1.c Falla Mateare.

De acuerdo a McBirney y Williams (1965), la falla Mateare se extiende por lo menos 70Km a lo largo del borde noreste de la Sierra de Carazo, alcanzando un relieve cercano a 1000 metros arriba de la depresión de Nicaragua justamente unos 20 km al sur de la ciudad de Managua (Figura 4). Por las anteriores razones esta falla merece un estudio especial. De acuerdo a Saint-Amant (1973) el escarpe es abrupto y poco erosionado en algunos sectores como por ejemplo al oeste de Managua. Menciona que los sedimentos en la cima están basculados hacia el oeste, y cortados por fallas secundarias asociados a la falla Mateare que sugiere tiene componente de desplazamiento de rumbo. La falla Mateare tiene según Saint Amant (1973) evidentemente un alto componente de desplazamiento normal con el bloque oeste subiendo en relación al este. Woodward-Clyde (1975) sugieren que además está superpuesta un componente de movimiento dextra].

Existen diversos criterios acerca de la longitud de esta falla. Niccum y Cluff (1973) sugieren que la falla Mateare tiene una longitud de 37 Km, en contraposición a la longitud de 70 km propuesta por McBirney y Williams (1965). Relaciones empíricas entre la magnitud y la longitud de la falla, le permiten a Saint Amant (1973) estimar que la falla es capaz de generar sismos de una magnitud cerca de 8.0 (basándose en el valor de 70 km). Niccum y Cluff (1973) estiman un sismo de magnitud 7.5, suponiendo la ruptura a lo largo de la longitud total de la falla. Observando el escarpe de la falla Mateare por medio de fotografías aéreas, no se encontró evidencia clara de fallamiento neotectónico. Localmente algunas fracturas paralelas al escarpe parecen existir. Sin embargo, las facetas triangulares más externas

del escarpe se muestran bastante erosionadas. Asimismo el índice de sinuosidad en algunos sectores no indica un control tectónico muy reciente, dado que ese escarpe frontal está relativamente disectado. Incluso un lineamiento de rumbo cercado al N fuertemente sugestivo de falla se identificó cortando este escarpe. Un análisis más detallado utilizando parámetros morfométricos, trabajo geológico de campo tratando de definir la edad del fallamiento más reciente presente en la zona de escarpe y además el origen del mismo es necesario. Para explicar el origen de un escarpe tan prominente y en algunos sectores bastante rectilíneo, debe ser con base en evidencias geológicas concretas.

Sin embargo, debe acotarse que el fallamiento neotectónico asociado al fallamiento normal es a veces difícil de detectar, por lo que solamente un trabajo específico podría definir el origen de esta estructura y la edad de los movimientos tectónicos más recientes.

Sismo máximo posible y período de retorno

Con base en los anteriores comentarios es difícil evaluar el potencial sísmico que pueda asociarse a esta estructura. El escarpe tiene una naturaleza segmentada, debe entonces considerarse la longitud máxima de las fallas identificando las barreras geométricas que son evidentes en el trazo o lo largo de la longitud del rumbo de la falla. Por lo menos tres segmentos deben analizarse, estos son: 1) El extremo sureste tiene una longitud de 12.5 Km, comprendidos entre la denominada falla Las Nubes (no se considera en este trabajo como una falla neotectónica) hasta la zona de la Comarca de Chiquidistagua. 2) A partir de acá el escarpe cambia su dirección a un rumbo más hacia el norte, teniendo un rumbo de N 25° W hasta la comarca Lapalanca y con una longitud de 12 km. 3) Desde la comarca de Lapalanca se tiene un rumbo de N 50° W y una longitud cercana a 10 km. De acuerdo a esta naturaleza segmentada los sismos de magnitud máxima creíble tendrían un valor entre 6.0 y 6.5 (Slemmons, 1977). Sin embargo, la falta de sismicidad instrumental, la escasa evidencia de fallamiento neotectónico en principio hace sugerir que esta posible falla, tiene un potencial sísmico bajo con un período de retorno considerable y no se incluye inicialmente en el análisis de amenaza sísmica del área de Managua. Un estudio detallado debe definir si debe o no ser incorporada en un análisis donde se considera períodos de retorno para obras civiles que tienen una vida útil entre 50 y 100 años.