

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**DESLIZAMIENTOS DE LADERAS INDUCIDOS
POR TERREMOTOS EN LA CIUDAD
DE TIJUANA, B. C.**

**TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS**

JUAN CARLOS MONTALVO ARRIETA

ENSENADA B.C. MEXICO JULIO DE 1996

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE
ENSENADA.

DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA.
DEPARTAMENTO DE SISMOLOGÍA.

DESLIZAMIENTOS DE LADERAS INDUCIDOS POR TERREMOTOS EN LA
CIUDAD DE TIJUANA, B. C.

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO
EN CIENCIAS presenta:

JUAN CARLOS MONTALVO ARRIETA.

Ensenada, Baja California, México. Julio de 1996.

RESUMEN de la Tesis de Juan Carlos Montalvo Arrieta, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en SISMOLOGÍA. Ensenada, Baja California, México. Julio de 1996.

DESLIZAMIENTOS DE LADERAS INDUCIDOS POR TERREMOTOS EN LA CIUDAD DE TIJUANA, B. C.

Resumen aprobado por:

Director de tesis

Los deslizamientos disparados por terremotos son eventos catastróficos los cuales pueden resultar en serias pérdidas de vidas y propiedades. Las zonas más densamente pobladas de la ciudad de Tijuana se encuentran asentadas sobre una morfología muy abrupta, con zonas propensas a deslizamientos. El propósito de esta tesis es presentar una metodología para el análisis dinámico de la estabilidad de laderas sujetas a deslizamientos del tipo rotacional ante la ocurrencia de terremotos y su aplicación se llevó a cabo en algunas zonas propensas a deslizamiento dentro de la ciudad. Se puso especial atención en presentar los resultados de manera tal que fueran de uso directo en el ámbito de la ingeniería.

El efecto sísmico es introducido en el análisis dinámico a través de la aplicación de una energía sísmica en la base de la ladera propensa a deslizamiento. Esta energía sísmica es expresada como una densidad de energía por unidad de área la cual es microzonificada dentro de la región de estudio. Esta energía sísmica es estimada a partir del rompimiento propuesto de una falla cercana a la región de estudio como una fuente puntual e instantánea, que viaja a través de un medio homogéneo, isotrópico y semi-infinito. Los factores de atenuación inelástica, longitud de ruptura y efecto de sitio son incorporados en un procedimiento independiente, aunque el efecto total es el adecuado para el cálculo de la energía sísmica.

Se propone el rompimiento de la falla La Nación, ya que éste es el que causaría el máximo daño a las zonas de mayor interés dentro de esta región, éstas corresponden a las zonas densamente pobladas del escarpe sur de la Mesa de Otay, además de que en esta zona se encuentran los accesos principales a los dos aeropuertos (Militar y Civil) de la ciudad. Se propone un rompimiento lateral derecho de 28 km de longitud, 12 km de ancho, 80.64 cm de desplazamiento y una magnitud de momento de 6.5 para generar la energía sísmica que será distribuida en la superficie. A partir de este mismo rompimiento se fabricó un mapa de intensidades sísmicas esperadas, el cual sirvió de base para la microzonación de las densidades de energía.

El análisis de la estabilidad de pendientes se realizó mediante el uso de la relación *deformación-esfuerzo-energía* que se aplicará a un elemento de volumen del material propenso a desplazarse. Se asume que el efecto de la aplicación de esta energía a una zona de debilidad tiene como objeto el dilatarla, dando como resultado la disminución de la

densidad del material y del ángulo de fricción interna y por último produciéndose el deslizamiento. La situación de estabilidad en una ladera propensa a deslizamiento es expresable a través del *Factor de Seguridad*. Se presenta una medida cuantitativa del peligro sísmico de deslizamiento obtenida de la relación de los factores de seguridad estático y dinámico, que se ha llamado en esta tesis *Factor de Conversión*.

Se presentan los factores de conversión estimados en quince frentes de deslizamiento distribuidos dentro de la región, así como en cuatro sitios donde se realizaron estudios de detalle *in situ*, los cuales sirvieron para corroborar los valores estimados en los frentes de deslizamiento.

Se desarrollaron métodos sencillos pero rigurosos para calcular la densidad de energía por unidad de área y los factores de seguridad dinámicos en el análisis de deslizamientos rotacionales de ladera, para usarse en el área ingenieril.

Los valores estimados para los factores de conversión y de seguridad dinámicos indican que el rompimiento de falla propuesto representa serios peligros de inestabilidad para la mayoría de los frentes de deslizamiento analizados.

ABSTRACT of the Thesis of Juan Carlos Montalvo Arrieta, presented as partial requirement to obtain the MASTER IN SCIENCES in EARTH SCIENCES, with option in SEISMOLOGY. Ensenada, Baja California, Mexico. July 1996.

LANDSLIDES INDUCED IN TIJUANA CITY, B. C. BY EARTHQUAKES

Landslides triggered by earthquakes are catastrophic events which may result in serious loss of life and properties. The most heavily populated zones in Tijuana city are located on a very rough morphology, with slide-prone hillsides. The objective of this thesis is to introduce a methodology for dynamical analysis of stability in rotational landslides, during the occurrence of an earthquake. Its application was carry out in several slide-prone zones in the city. Special attention was also put on presenting the results in such a way that could be used directly by the engineering community.

The seismic effect is introduced in the dynamical analysis by means of the application of seismic energy at the hillside base. The seismic energy is expressed as energy density per unit area, which is microzoned in the studied region. To calculate this seismic energy, a nearby fault rupture is proposed to produce an instantaneous and punctual seismic source, with spherical wavefront travelling inside a homogeneous, isotropic and semi-infinite medium. The anelastic attenuation, rupture length, and site effects, are incorporated by means of an independent procedure, but the final effect is a realistic estimate of the seismic energy.

The rupture of La Nacion fault is proposed because could cause important damage in areas of major concern, like the Mesa de Otay, a densely populated zone, and main access to the military and civil airports. It is proposed a right-lateral, strike-slip rupture, characterized by 28 km length, 12 km wide, 80.64 cm average slip, and a moment magnitud of 6.5. Using this rupture, an expected seismic intensities map was drawn, which was used as a base for the energy density microzonation.

The analysis stability of the landslides was made using the *energy-stress-deformation* relation, applied on a volume element of slide-susceptible material. It is assumed that the application of energy in a weak mass causes a dilatation, a density and internal shear angle reductions, and finally the landslide. The factor of safety represents the establiity situation in a slide-prone hillside. A *Conversion Factor* is introduced as a quantitative index for the seismic-induced landslide risk.

Conversion factor values were estimated at 15 landslide fronts, scattered in the Tijuana region, along with 4 additional sites where *in situ* detail studies were conducted. The results from these sites were used to corroborate those obtained at the 15 fronts.

Simple, but rigorous, methods were developed to calculate the energy density per unit area, and to estimate the dynamic factors of safety in the rotational landslide analysis, in order to be used in the engineering field.

The conversion and dynamic safety factors values indicate that the proposed fault rupture represents serius problems of inestability, at most of the landslide fronts analyzed in this study.

*No acabarán aquí mis cantos
no acabarán aquí mis flores
ante ti los elevo: soy un cantor*

*Óiganlo bien: mi oficio es tan viejo
como el de los árboles más viejos
Mi quehacer no tiene nombre...
Ramón Bolívar*

DEDICATORIA

A esas 18,000 voces que dejaron de cantar bajo el deslizamiento del Perú (1970)

y

*a esas luces que brillan en la oscuridad, las cuales dan esperanza y alumbran el camino
hacia un futuro mejor.*

AGRADECIMIENTOS

Al compa de los poemas expresivos José Gpe. Acosta Chang, quien fungió como asesor de esta tesis.

A los miembros del comité de tesis por sus comentarios y correcciones.

A Susana por su amistad.

A Tomas Cossío y Gabriel Chávez por su colaboración y sus observaciones en el trabajo de campo.

A mis cuates de parranda el Mario, Alfredo, Ramón, Sergio, Eloísa, Gerardo, Gabriel, Antonio, Ulises y a la raza de Linares, Fernando, Milton, Uriel, Efraín, Oscar Augusto. Por todo lo que hemos compartido y por lo que vendrá.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

CONTENIDO

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1 Justificaciones del estudio | 1 |
| I.2 Antecedentes | 2 |
| I.3 Objetivos | 7 |
| I.4 Alcances y limitaciones | 7 |
| II. MATERIALES Y MÉTODOS | 10 |
| II.1 Planteamiento del problema | 10 |
| II.1.1 Análisis estático | 13 |
| II.1.2 Análisis dinámico | 20 |
| II.1.3 Verificación de la existencia del problema | 23 |
| II.2 Metodología | 27 |
| II.2.1 Esquema general de la metodología | 27 |
| II.2.2 Metodología para la determinación de la densidad de energía | 28 |
| II.2.3 Modelo para evaluar el efecto sísmico sobre la ladera | 44 |
| II.3 Área de estudio | 52 |
| II.3.1 Marco tectónico regional | 52 |
| II.3.2 Marco geológico | 52 |
| II.3.3 Estratigrafía | 55 |
| II.3.4 Sismicidad | 57 |

CONTENIDO (continuación)

| | |
|---|-----|
| II.3.5 Morfología y suelos | 58 |
| II.3.6 Distribución de frentes de deslizamientos | 59 |
| III. RESULTADOS | 61 |
| III.1 Datos | 61 |
| III.1.1 Fuente sísmica propuesta | 61 |
| III.1.2 Reconocimiento de frentes de deslizamientos | 64 |
| III.1.3 Parámetros de pendientes | 68 |
| III.1.4 Mapas de isosistas | 71 |
| III.2 Procesamiento y resultados | 83 |
| III.2.1 Estimación de las densidades de energía | 83 |
| III.2.2 Estimación de los factores de conversión | 85 |
| III.2.3 Estimación de factores de seguridad estáticos y dinámicos | 94 |
| IV. DISCUSIÓN | 98 |
| IV.1 Mapas con factores de conversión | 98 |
| IV.2 Riesgos de deslizamientos por efectos sísmicos adicionales | 101 |
| IV.3 Conclusiones y recomendaciones | 102 |
| IV.3.1 Conclusiones | 102 |
| IV.3.2 Recomendaciones | 103 |
| LITERATURA CITADA | 105 |
| APÉNDICES | |
| A. Relaciones para la estimación del ángulo de fricción interna | 112 |

CONTENIDO (continuación)

| | |
|--|-----|
| B. Comparación con otros métodos | 119 |
| C. Pruebas numéricas del comportamiento del Factor de Conversión | 126 |

LISTA DE FIGURAS

| <u>Figura</u> | | <u>Página</u> |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Tipos idealizados de movimientos que ocurren en laderas. Las flechas indican el desplazamiento del material por unidad de tiempo Modificado de Costa y Baker, 1981. | 11 |
| 2 | Diagrama de Mohr que representa el criterio de falla de Mohr-Coulomb para materiales no cohesivos (σ = esfuerzo normal, τ = esfuerzo de corte). | 15 |
| 3 | Estado de fuerzas que actúan sobre una ladera con deslizamiento traslacional, bajo condiciones estáticas. | 16 |
| 4 | Estado de fuerzas y sus momentos asociados que actúan sobre una ladera con deslizamiento rotacional, bajo condiciones estáticas. | 19 |
| 5 | Distribución de aceleraciones máximas horizontales predichas en Acosta <i>et al.</i> , 1995, para un rompimiento propuesto de la falla La Nación ($M_w=6.5$) | 25 |
| 6 | Ilustración de las zonas de densidad de energía constante. Las circunferencias representan líneas de isosistas generadas por un epicentro E. S_j es la distancia a la isosista de intensidad j . El área anular entre las distancias S_j y S_{j+1} es el área de intensidad uniforme j . | 31 |
| 7 | Intersección de un frente de onda esférico con la superficie de la tierra, definiendo un área circular de radio S_j , correspondiente a la isosista de intensidad j . | 33 |
| 8 | Área del casquete esférico imaginario de un frente de onda que sobresale de la superficie. | 34 |
| 9 | Proyecciones del casquete esférico del frente de onda que sobresaldría de la superficie, sobre un plano horizontal (A) y un plano vertical (B) que contiene al hipocentro (H). | 35 |
| 10 | Área de la proyección horizontal del casquete esférico que imaginariamente sobresale de la superficie en la isosista j , perteneciente al frente de onda. | 40 |

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

| <u>Figura</u> | | <u>Página</u> |
|---------------|---|---------------|
| 11 | Área de la proyección vertical del casquete esférico que imaginariamente sobresale de la superficie en la isosista j , perteneciente al frente de onda. | 41 |
| 12 | Ilustración de las deformaciones que sufren los límites de las zonas de densidad de energía constante, por los efectos de sitio. | 43 |
| 13 | Geometría utilizada en el análisis de estabilidad de una ladera propensa a deslizamiento. Se muestra el elemento de volumen normal a la superficie de deslizamiento donde se inyectará la densidad de energía sísmica por unidad de área. | 47 |
| 14 | Valores típicos de los parámetros de densidad y ángulo de fricción interna, para materiales no cohesivos. El tipo de materiales presentes en la zona de estudio es SP. Modificado de Carter y Blentey, 1991. | 50 |
| 15 | Mapa que muestra la sismicidad del norte de Baja California y sur de California de 1964-1987. El tamaño del símbolo es proporcional a la magnitud. Tomado de Frez y González, 1991. | 53 |
| 16 | Mapa tectónico del norte de la Baja California y sur de California que muestra las principales fallas activas. Modificado de Suárez Vidal <i>et al.</i> , 1991. | 54 |
| 17 | Geología superficial de la región de estudio. Las formaciones más importantes para este estudio son: San Diego Superior (SDs) y San Diego Inferior (SDi). Elaborado a partir de cartas geológicas de INEGI (1:50000), 1976. | 60 |
| 18 | Ubicación de la falla La Nación, cuyo rompimiento puede generar un sismo de $M_w=6.5$. | 63 |
| 19 | Ubicación de los frentes de deslizamiento asociados al contacto SDs-SDi, numerados del 1 al 15. Los sitios de detalle están identificados con A (Colonia Libertad), B (Playas), C (Televisora) y D (El Rubí). | 66 |
| 20 | Perfiles estructurales del área de estudio (tomado de Aragón Arreola, 1994), cuya ubicación se muestra en la Figura 19. A partir de éstos se estimaron los espesores de SDs para los frentes de deslizamiento estudiados. | 67 |

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

| <u>Figura</u> | | <u>Página</u> |
|---------------|---|---------------|
| 21 | Características estructurales de una ladera propensa a sufrir deslizamiento rotacional. | 70 |
| 22 | Distribución de las velocidades superficiales de ondas de corte, estimadas por Acosta <i>et al.</i> , 1995, a partir de perfiles de refracción. | 74 |
| 23 | Distribución de las máximas velocidades horizontales sin efecto de sitio predichas por Acosta <i>et al.</i> , 1995, para un rompimiento propuesto de la falla La Nación (Mw=6.5) | 76 |
| 24 | Distribución de las máximas velocidades horizontales con efecto de sitio predichas por Acosta <i>et al.</i> , 1995, para un rompimiento propuesto de la falla La Nación (Mw=6.5) | 77 |
| 25 | Mapa de intensidades sísmicas predichas para el rompimiento propuesto de la falla La Nación (Mw=6.5) sin efecto de sitio. | 78 |
| 26 | Mapa de intensidades sísmicas predichas para el rompimiento propuesto de la falla La Nación (Mw=6.5) con efecto de sitio. | 79 |
| 27 | Ilustración del tipo de ecuación predictiva utilizada para la estimación de los máximos movimientos del suelo en la región de estudio. | 80 |
| B.1 | Comparación de los resultados de la densidad de energía horizontal vs. intensidades de MM, estimadas con la metodología de este trabajo con la banda de valores compilada por Borg, 1988. | 121 |
| C.1 | Valores del Factor de Conversión de cada banda de intensidad (IMM= IV-IX) en función del ángulo de inclinación de la ladera para un sitio con características promedio del área de estudio. La línea superior corresponde a la intensidad de IX y la línea inferior corresponde a la intensidad IV. | 127 |

LISTA DE TABLAS

| <u>Tabla</u> | | <u>Página</u> |
|--------------|---|---------------|
| I | Fallas cuyos rompimientos se proponen para la generación de energía, capaces de desestabilizar laderas en la ciudad de Tijuana (tomado de Reichle <i>et al.</i> , 1990; Lindvall <i>et al.</i> , 1990; Treiman, 1984 y 1989; Wesnousky, 1986; Anderson <i>et al.</i> , 1989). | 62 |
| II | Parámetros de los frentes de deslizamiento analizados en la ciudad de Tijuana (los espesores fueron tomados de Aragón-Arreola, 1994). | 68 |
| III | Parámetros de los sitios donde se realizaron estudios de detalle. | 71 |
| IV | Parámetros de fuente predichos para la falla La Nación, cuyo rompimiento se propone. | 83 |
| V | Distancias (km) estimadas a los límites superiores de las zonas de densidad de energía constante. | 83 |
| VI | Distribución de áreas y energías para las diferentes zonas producidas por el rompimiento propuesto de la falla La Nación. | 84 |
| VII | Parámetros dinámicos estimados para el frente de deslizamiento 6 generados por el rompimiento propuesto de la falla La Nación ($M_w=6.5$). | 89 |
| VIII | Factores de conversión estimados para diferentes frentes de deslizamientos en la ciudad de Tijuana para el rompimiento de la falla La Nación ($M_w=6.5$) | 93 |
| IX | Resultados del análisis dinámico de estabilidad de pendientes, aplicado en los cuatro puntos donde se hicieron estudios a detalle, <i>in situ</i> . | 97 |
| A.I | Valores de los parámetros estáticos y dinámicos (γ) y del factor de conversión cuando se utiliza la ecuación (30) en la estimación del ángulo de fricción interna. Se supone un espesor de la masa deslizante de 35 m, un espesor de la zona de debilitamiento de 40 cm y una $IMM=VII$, para un rompimiento de la falla La Nación ($M_w=6.5$). | 114 |

LISTA DE TABLAS (Continuación)

| <u>Tabla</u> | | <u>Página</u> |
|--------------|--|---------------|
| A.II | Valores de los parámetros estáticos y dinámicos (γ) y del factor de conversión, cuando se utilizan las dos ecuaciones (30 y 31) en la estimación del ángulo de fricción interna. Se supone un espesor de la masa deslizante de 35 m, un espesor de la zona de debilitamiento de 40 cm y una IMM=VII, para un rompimiento de la falla La Nación ($M_w=6.5$). | 116 |
| B.I | Parámetros reportados en la literatura para el deslizamiento rotacional de ladera en la localidad Estancia de la Virgen, Guatemala (Bolt, 1978; Harp <i>et al.</i> , 1981; Keefer, 1984; Borg, 1988). | 123 |
| B.II | Distancias (tomadas de Borg, 1988) a la bandas de intensidad constante para la localidad Estancia de la Virgen, Guatemala, $M=7.5$. | 123 |
| B.III | Resultados de los factores de seguridad dinámicos (FSD) para el deslizamiento de Estancia de la Virgen, Guatemala, $M=7.5$, obtenidos con el método de Borg (primera línea) y con el de este estudio (segunda línea). | 125 |

DESLIZAMIENTOS DE LADERAS INDUCIDOS POR TERREMOTOS EN LA CIUDAD DE TIJUANA, B. C.

I. INTRODUCCIÓN

I.1 Justificaciones del estudio.

Cuando en una región converge una serie de factores naturales y sociales, los cuales por su magnitud e impacto pueden ocasionar daños a una población, es necesario estimar y cuantificar el peligro asociado a la suma de estos factores.

El área metropolitana de Tijuana está ubicada sobre una topografía accidentada que propicia deslizamientos de ladera. Adicionalmente, la región está expuesta a peligro sísmico originado por varias provincias sismogénicas aledañas a la zona de estudio. La suma de los factores topográficos y sísmicos, aunado al crecimiento acelerado de la mancha urbana, da como resultado en caso de presentarse sismos fuertes una situación de alta vulnerabilidad.

Por lo anterior, es necesario:

- Cuantificar el peligro de deslizamientos inducidos por sismos, en el mayor número posible de sitios en la región y
- Presentar una metodología de aplicación sencilla, aunque rigurosa en sus fundamentos, que pueda ser empleada en la práctica de la ingeniería para la evaluación de la estabilidad de laderas en una gran cantidad de sitios, ya que el área es demasiado grande y un sólo estudio no podría abarcar todas las zonas propensas a deslizamientos.

1.2 Antecedentes.

Los deslizamientos de materiales terrestres situados sobre laderas inducidos por terremotos, han sido documentados desde épocas remotas. Seed (1968) menciona que en los años 373-372 A.C. ya se reconocían deslizamientos asociados a sismos. En el presente siglo existen numerosos casos de estos fenómenos; de los cuales, uno de los más catastróficos ha sido el de Perú de 1970 ($M_w=7.9$), donde el volumen estimado del material rocoso deslizado fue de 50 a 100 millones de m^3 , desplazándose una distancia de 16 km, y afectando un área de alrededor de $22.5 km^2$. Este deslizamiento cubrió los pueblos de Ranrahirca y Yungay y otras pequeñas comunidades, causando la muerte de más de 18 000 personas (Plafker *et al.*, 1971; Hansen y Franks, 1991).

Keefer, 1984, encontró que los factores que controlan a los deslizamientos inducidos por sismos están dominados por la magnitud y profundidad del terremoto, por las condiciones geológicas y las características específicas del movimiento del suelo ante cada evento sísmico en particular. Para su estudio investigó deslizamientos ocurridos en 40 terremotos históricos. Harp *et al.*, 1981, elaboraron un mapa de distribución de deslizamientos asociados al terremoto de Guatemala ($M=7.5$) de 1976; donde encontraron que los tipos de deslizamiento predominantes fueron caídas de rocas y deslizamientos traslacionales de detritos. En ese trabajo mencionan que el umbral mínimo de disparo de deslizamientos está asociado al grado VI de la escala de intensidad de Mercalli Modificada.

Hansen y Franks, 1991, mostraron que los sitios afectados por deslizamientos se presentan en muy variadas condiciones del material de la ladera, ya sea suelos suaves o rocosos y también para diferentes condiciones topográficas.

En la bibliografía actual sobre el problema de la estabilidad de laderas, se plantean dos enfoques para obtener la solución: 1) *estático* y 2) *dinámico*. Los principales elementos presentes en el análisis estático son: la orientación y el tipo de fracturas y fallas, el tipo de material que conforma el suelo (litología), la topografía, el nivel freático y la presión de poros con agua. En el análisis dinámico, los factores controladores serán el terremoto y las condiciones geológicas locales.

Entre los métodos para efectuar la evaluación del efecto de terremotos en el análisis de estabilidad de pendientes está el análisis de Newmark, 1965; en el cual, a partir del conocimiento del factor de seguridad estático se estima la aceleración crítica necesaria para producir el deslizamiento. Este análisis se aplica a deslizamientos del tipo rotacional, a través de la siguiente ecuación:

$$a_c = (FS - 1) \cdot g \cdot \operatorname{sen} \alpha \quad (1)$$

donde: a_c = aceleración mínima inducida por el terremoto para iniciar el deslizamiento

FS = factor de seguridad bajo condiciones estáticas

g = aceleración la gravedad

α = ángulo de la pendiente

A partir de la ecuación (1) se calculará el valor de la aceleración crítica (mínima) necesaria para producir el deslizamiento de una ladera.

En el área de estudio sólo se han llevado a cabo análisis estáticos, efectuados por Delgado-Argote *et al.*, 1996; Aragón-Arreola, 1994 y Montalvo *et al.*, 1995 a y b. Delgado-Argote *et al.*, 1996, presentaron una estimación regional de riesgo a partir del ángulo de la pendiente, el tipo de material y la presencia de fracturas y fallas, donde identifican *un umbral de pendiente*; este umbral representa el ángulo mínimo de 10° de la pendiente para el cual existe riesgo cuando existe una discontinuidad estructural y una litología favorable. En ese trabajo se estudió el efecto de las condiciones geológicas locales de las áreas El Patejé, El Pato y Cañada Verde-Sánchez Taboada e hicieron una estimación cuantitativa empírica del riesgo a partir del producto aritmético de la pendiente y la densidad de fracturas y fallas para definir el Valor Empírico de Riesgo.

Aragón-Arreola, 1994, concluyó que las cabeceras de los deslizamientos rotacionales se encuentran cercanas a fallas. En Tijuana, los deslizamientos rotacionales se desarrollan principalmente en el miembro inferior de la Formación (Fm.) San Diego; sin embargo, su cabecera se propaga cerca o sobre el contacto con el miembro superior, donde los estratos que contienen limos y arcillas comúnmente funcionan como planos de deslizamiento.

Montalvo *et al.*, 1995 a y b, realizaron un estudio de estabilidad de taludes en una zona de Tijuana propensa a deslizamientos y observaron que el tipo de deslizamiento principal en ese lugar es del tipo de flujos de detritos dentro de la Fm. San Diego Superior, por lo que no encontraron las superficies de deslizamiento características de los deslizamientos rotacionales. Los autores anteriores concluyeron que el contacto con la Fm. San Diego Inferior se encuentra mucho más abajo del desnivel topográfico y por tanto no existe una de las condiciones más críticas para darse el movimiento del tipo rotacional; ésto es, no existe un desnivel que contenga un contacto con material subyacente más fino para facilitar el deslizamiento.

En la actualidad existen algunas metodologías para el análisis dinámico de deslizamientos, entre los principales destacan: el análisis *pseudo-estático* de Hoek, 1976, el cual aplica aceleraciones horizontales sobre la pendiente y calcula un factor de seguridad dinámico (*FSD*) a través de la relación:

$$FSD = FS - 2.3a \quad (2)$$

donde: *FS* = factor de seguridad estático

a = aceleración horizontal inducida por un sismo

Este método requiere del conocimiento de la magnitud y dirección en la cual la aceleración actúa, así como de la duración y frecuencia de aplicación de ella, por lo que su empleo está restringido a los casos en los cuales se cuenta con registros instrumentales

triaxiales. En el área de estudio no se cuenta con este tipo de registros en la cercanía de laderas susceptibles a deslizamiento.

Debido a la falta de registros en el área de estudio, se buscó un método que no requiriera del conocimiento de magnitudes y direcciones de las sollicitaciones sísmicas, una alternativa es utilizar energía sísmica en lugar de los movimientos del suelo para calcular la estabilidad de pendientes. Esa energía sísmica puede ser estimada a partir de ecuaciones empíricas. En la literatura sólo se encontró un método que utiliza esta alternativa para el análisis de laderas propensas a deslizamientos; ésta es la propuesta por Borg, 1988, el cuál calcula el factor de seguridad dinámico a partir de la aplicación de un concepto *vectorial* de energías superficiales horizontales y verticales sobre la pendiente bajo estudio, este método se utilizó al comienzo de esta tesis. Sin embargo, los resultados obtenidos con este método son poco confiables debido a la asignación poco clara de valores a algunos parámetros claves (eficiencia sísmica, distancia de referencia y límites para la eliminación de discontinuidades) y al uso poco ortodoxo de algunos conceptos físicos (como la energía vectorial). En el apéndice B (Comparación con otros métodos) se describirán a detalle estas características, que se consideran deficiencias suficientes para no utilizar este método en esta tesis, aunque más adelante se utilizarán algunos de sus elementos para propósitos de comparación de resultados.

I.3 Objetivos.

1. Presentación de un modelo simple para la especificación de la sollicitación sísmica¹ en la base de las pendientes.
2. Aplicación de un método teórico-empírico simple para estimar la estabilidad de pendientes sometidas a sollicitaciones sísmicas en la región de Tijuana.
3. Obtención de factores de conversión estático/dinámico.
4. Elaboración de isosistas para la región, con inclusión de efecto de sitio.
5. Presentación de metodología de fácil aplicación, pero lo suficientemente ajustada a la realidad, para que pueda ser transferida al sector de la ingeniería civil.

I.4 Alcances y limitaciones.

Se presenta la descripción de los alcances de esta tesis en dos vertientes:

- Esta tesis intenta llevar el estado actual del conocimiento que se tiene acerca del riesgo de deslizamiento de laderas en la región de Tijuana un paso adelante a través de la inclusión

¹ Sollicitación sísmica: es el conjunto de perturbaciones en el terreno, originadas por la ocurrencia de un terremoto, que al ser aplicadas en la base de una estructura origina en los elementos resistentes una serie de esfuerzos que inducirán una respuesta dinámica de la estructura. La sollicitación sísmica puede especificarse a través de diversos parámetros del movimiento del suelo sobre el que se asienta la estructura.

del factor sísmico en el análisis de la estabilidad de pendientes. Existen dos formas de tratar el análisis de estabilidad de pendientes (estático y dinámico, como se menciona en la sección I.2). En el área de estudio ya se han llevado a cabo trabajos a través del análisis estático del problema de estabilidad. Este tipo de análisis se puede considerar completo y definitivo si en la región de estudio no existieran factores de riesgo adicionales a los estáticos (topográfico y geológico). Sin embargo existe la presencia de la sismicidad como elemento desestabilizador; el cual, no puede ser tratado por medio de análisis estáticos, por lo que la solución del problema necesita extenderse hasta incluir el análisis dinámico de la estabilidad de pendientes.

- Los alcances en esta tesis desde el punto de vista de la metodología no sólo se limitan a la aplicación directa de una serie de técnicas o métodos establecidos, ya que en el área de estudio las metodologías existentes no se pueden aplicar directamente. Debido a esto es necesario modificar algunos métodos para adaptarlos a las necesidades de este estudio. Cuando las modificaciones no fueron suficientes, hubo necesidad de desarrollar e implantar métodos claros y realistas para su uso.

A continuación se describen las limitaciones que tiene este trabajo.

- La principal limitación radica en la ausencia de datos reales observados del movimiento del suelo, para sismos moderados o fuertes, los cuales servirían para caracterizar adecuadamente el tipo de sollicitaciones sísmicas en la base de la ladera propensa a deslizarse. Para subsanar esta deficiencia, se recurrió al uso de relaciones teóricas y

empíricas para predecir esa sollicitación sísmica en cada uno de los puntos de interés en la región.

- Otra limitación es el hecho de haber considerado solamente el rompimiento de una falla, cuando en realidad existen varios sistemas de fallas susceptibles a romperse y producir movimientos fuertes en la región; el considerar el rompimiento de cada una de estas fallas constituiría trabajos posteriores al de esta tesis.
- En este trabajo se ha considerado como elemento de inestabilidad a un sólo aspecto del movimiento sísmico del suelo: la *energía sísmica*; la cual se considera representativa del daño inducido por un sismo. Sin embargo, el movimiento sísmico del suelo también puede caracterizarse por otros parámetros tales como la aceleración, la velocidad, la duración del movimiento, la aplicación cíclica de la sollicitación sísmica y el contenido espectral de la misma.
- En su estado actual, el modelo presentado en este trabajo para la estimación de la energía sísmica no maneja de manera integrada los factores de fuente, propagación y efecto de sitio, sino que los incorpora en etapas independientes, aunque el efecto total es el adecuado para el cálculo de la energía sísmica.
- Además del aspecto sísmico, existe otro elemento que puede contribuir a la inestabilidad, el cual no fue incluido en este trabajo, éste es el contenido de agua en la masa susceptible a deslizamiento.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1 Planteamiento del problema.

Los deslizamientos son un tipo de movimiento de ladera, que pueden ser definidos como todos aquellos desplazamientos de material superficial que cambian la morfología de la superficie terrestre. Los deslizamientos involucran diferentes tipos de movimiento (figura 1):

- Caídas, las cuales implican una caída libre de material por efecto de la gravedad.
- Volcaduras, son movimientos de volteo provocados por inclinaciones que sufren bloques rígidos.
- Deslizamientos verdaderos, involucran una falla de corte entre dos superficies. La masa situada sobre la superficie de deslizamiento se mueve como un bloque sin cizalla interna.
- Flujos, su característica principal es que no presentan una superficie de falla definida claramente, el material se comporta como una sustancia viscosa.

En el área de estudio Delgado-Argote, *et al.*, 1993, Aragón-Arreola, 1994 y Montalvo *et al.*, 1995 a y b han identificado flujos de detritos, caída de bloques y deslizamientos rotacionales.

En el caso de flujos, el factor que controla el inicio del movimiento es el contenido de fluidos; en las volcaduras el factor clave es la inclinación del cuerpo rígido que se volcará, mientras que en las caídas el factor que controla el movimiento lo constituye la gravedad. En el caso de los deslizamientos verdaderos su evolución depende de un sistema de fuerzas que

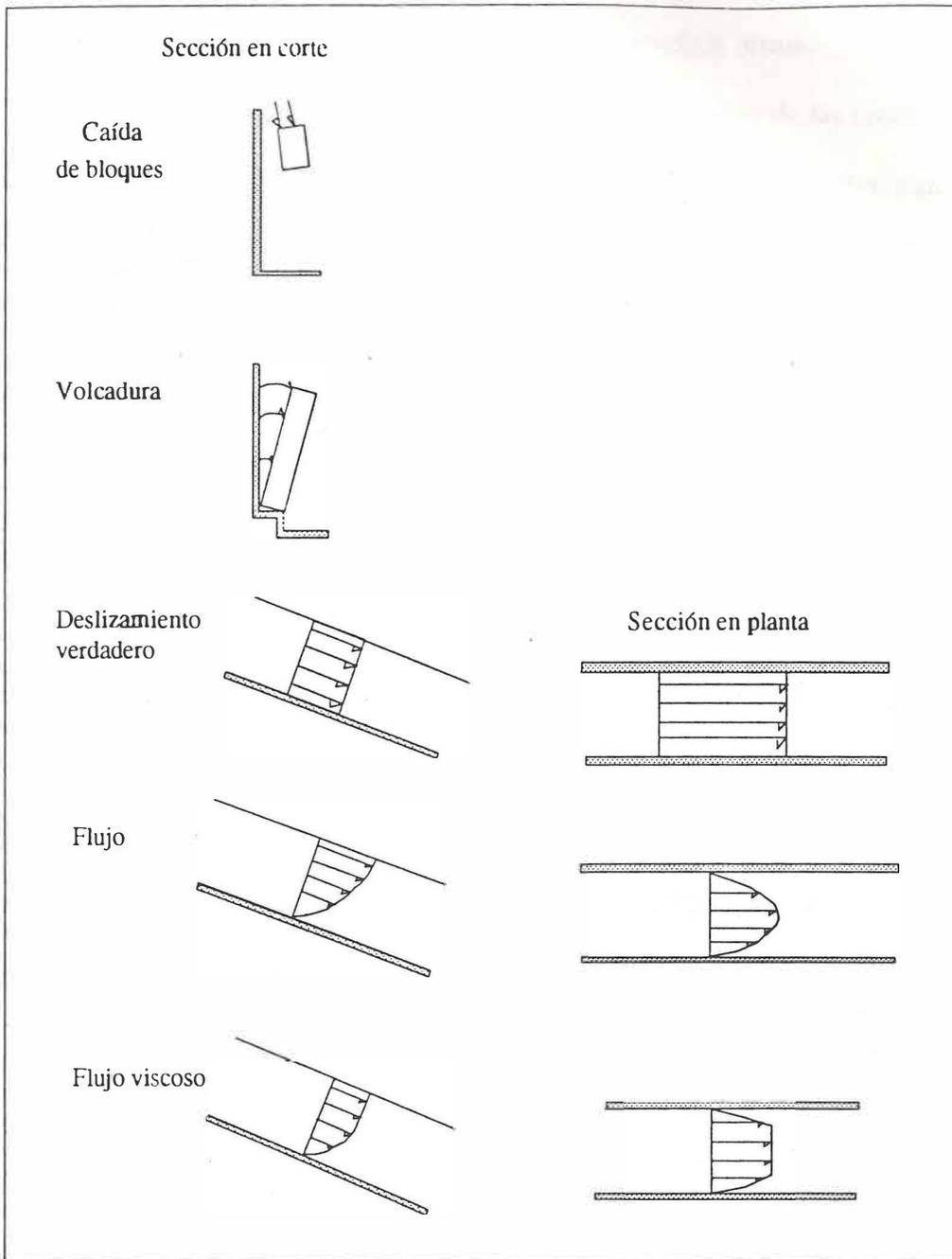


Figura 1. Tipos idealizados de movimientos que ocurren en laderas. Las flechas indican el desplazamiento del material por unidad de tiempo. Modificado de Costa y Baker, 1981.

puede verse afectado directamente por la inyección de energía sísmica. Esta tesis sólo considerará a los terremotos como el factor dominante en el cambio de las condiciones de estabilidad de una ladera. Los deslizamientos verdaderos en general se clasifican como: rotacionales y traslacionales.

Los deslizamientos rotacionales tienen una superficie curva de deslizamiento y producen desplomes por su movimiento rotacional retrógrado. Los deslizamientos traslacionales tienen una superficie de ruptura plana (Costa y Baker, 1981). En el campo de la ingeniería, los análisis dinámicos de estabilidad de pendientes están principalmente confinados a movimientos rotacionales o traslacionales; en consecuencia, los análisis están basados en la suposición de una superficie de falla ya sea plana, circular, circular compuesta, logarítmica o formas compuestas de planos y círculos (Embleton y Thornes, 1979). En esta tesis se eligió trabajar con deslizamientos del tipo rotacional, con superficie de falla (deslizamiento) circular, ya que ésta representa una forma simple y general de los diferentes casos de deslizamientos rotacionales.

En el modelo se asume que el deslizamiento del material de la ladera ocurre como resultado de la *dilatación* causada por la energía sísmica de entrada. Esta dilatación causa una reducción del entrelazado de las partículas y disminuye así la resistencia al corte del material. Newmark y Rosenblueth 1982, concluyen que los suelos no cohesivos, que consisten esencialmente en granos de tamaño medio con resistencia suficiente o sujetos a esfuerzos suficientemente pequeños para que la ruptura de granos no juegue un papel

importante en su comportamiento, tienden a dilatarse bajo deformaciones suficientemente grandes tales como las inducidas por los sismos.

El análisis del mecanismo de deslizamiento de una ladera bajo condiciones dinámicas (por ejemplo bajo una sollicitación sísmica) consiste básicamente en la modificación del valor numérico de uno o varios de los parámetros que intervienen en el análisis de la estabilidad bajo condiciones estáticas. A continuación se presentará la descripción de los cálculos involucrados en el mecanismo de deslizamientos bajo condiciones estáticas. Después de ello, se describirán los cambios que acontecen ante el arribo de la energía proveniente de un sismo.

II.1.1 Análisis estático.

El material en cada punto a lo largo de la superficie de ruptura potencial tiene una resistencia al corte, la cual mide la resistencia del material a la ruptura. La resistencia al corte del material es igual al esfuerzo de corte requerido para causar la ruptura. De acuerdo con la ley clásica de Coulomb, la resistencia al corte (τ) de un suelo cohesivo varía con el esfuerzo normal (σ_n) sobre el plano de ruptura, Carter y Bentley, 1991, de la siguiente manera:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi + c \quad (3)$$

donde: τ = resistencia al corte

ϕ = ángulo de fricción interna del material

σ_n = esfuerzo normal al plano de ruptura. La magnitud de éste depende de la carga situada sobre la superficie potencial

c = cohesión

En el caso de los materiales granulares no cohesivos, la cohesión es igual a cero, por lo tanto:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi \tag{4}$$

Geoméricamente, la ecuación anterior representa una línea recta conocida como la línea de resistencia al corte de Coulomb, la cual se ilustra en la figura 2. A partir de esta figura se puede observar que la línea de resistencia al corte representa la relación entre el esfuerzo normal y el correspondiente esfuerzo de corte necesario para producir una cizalla en el material sobre el cual están actuando. Un deslizamiento inicia su movimiento cuando las fuerzas que actúan a lo largo de una superficie potencial de ruptura exceden a las fuerzas que se resisten al movimiento. Por tanto, existen dos formas de inducir el rompimiento:

- Disminuyendo el esfuerzo normal, o
- Disminuyendo la pendiente de la recta, es decir disminuyendo el ángulo de fricción interna del material.

La resistencia al corte de un material es la suma de la resistencia de fricción superficial a la traslación en la superficie de deslizamiento y el efecto del entrelazado entre los granos individuales.

La figura 3 muestra el estado de fuerzas que actúan sobre la pendiente en condiciones estáticas. El sistema de fuerzas mostrado en esa figura se comportará de acuerdo al criterio de fallamiento de Coulomb, de tal manera que el esfuerzo normal de la ecuación (4) es:

$$\sigma_n = N = W \cdot \cos \alpha \tag{5}$$

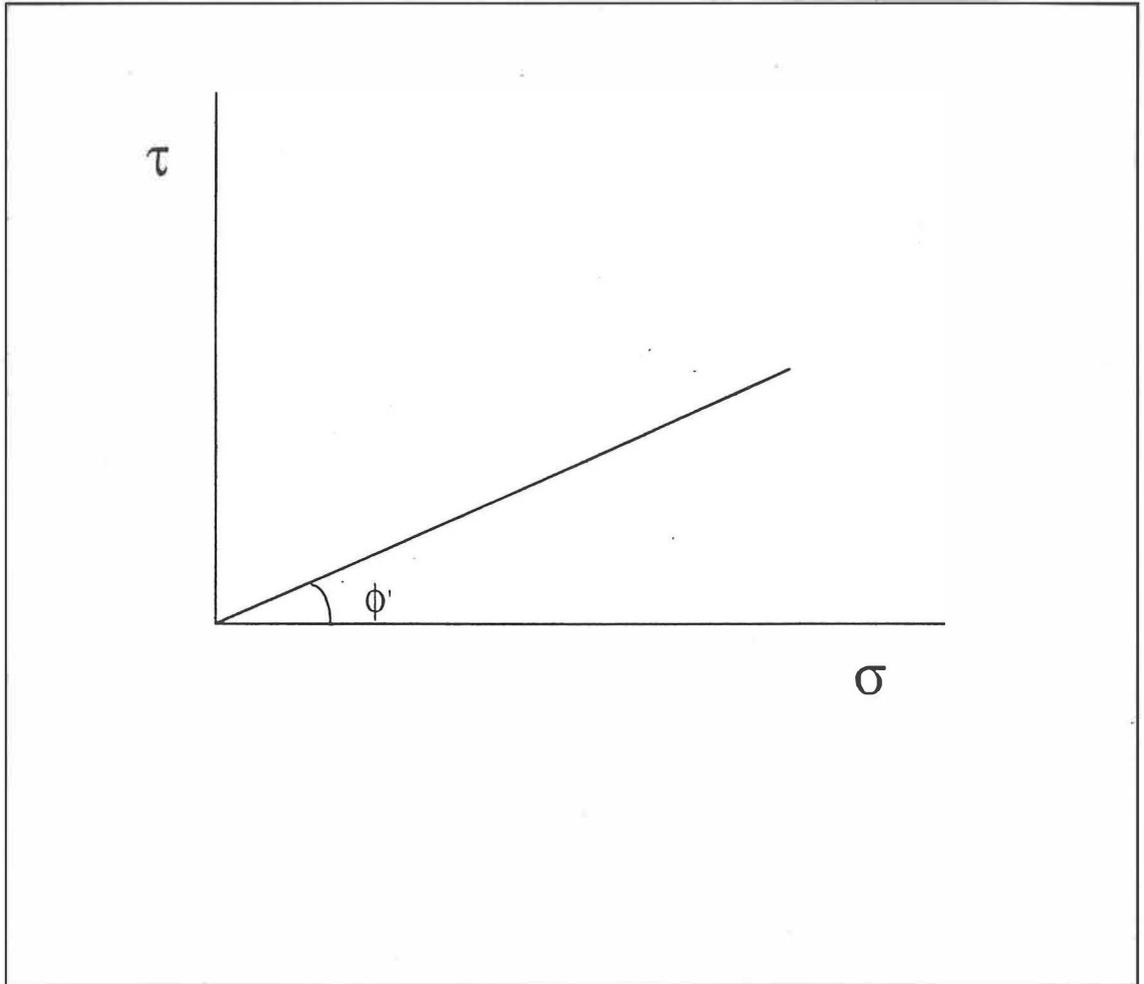


Figura 2. Diagrama de Mohr que representa el criterio de falla Mohr-Coulomb para materiales no cohesivos (σ = esfuerzo normal, τ = esfuerzo de corte).

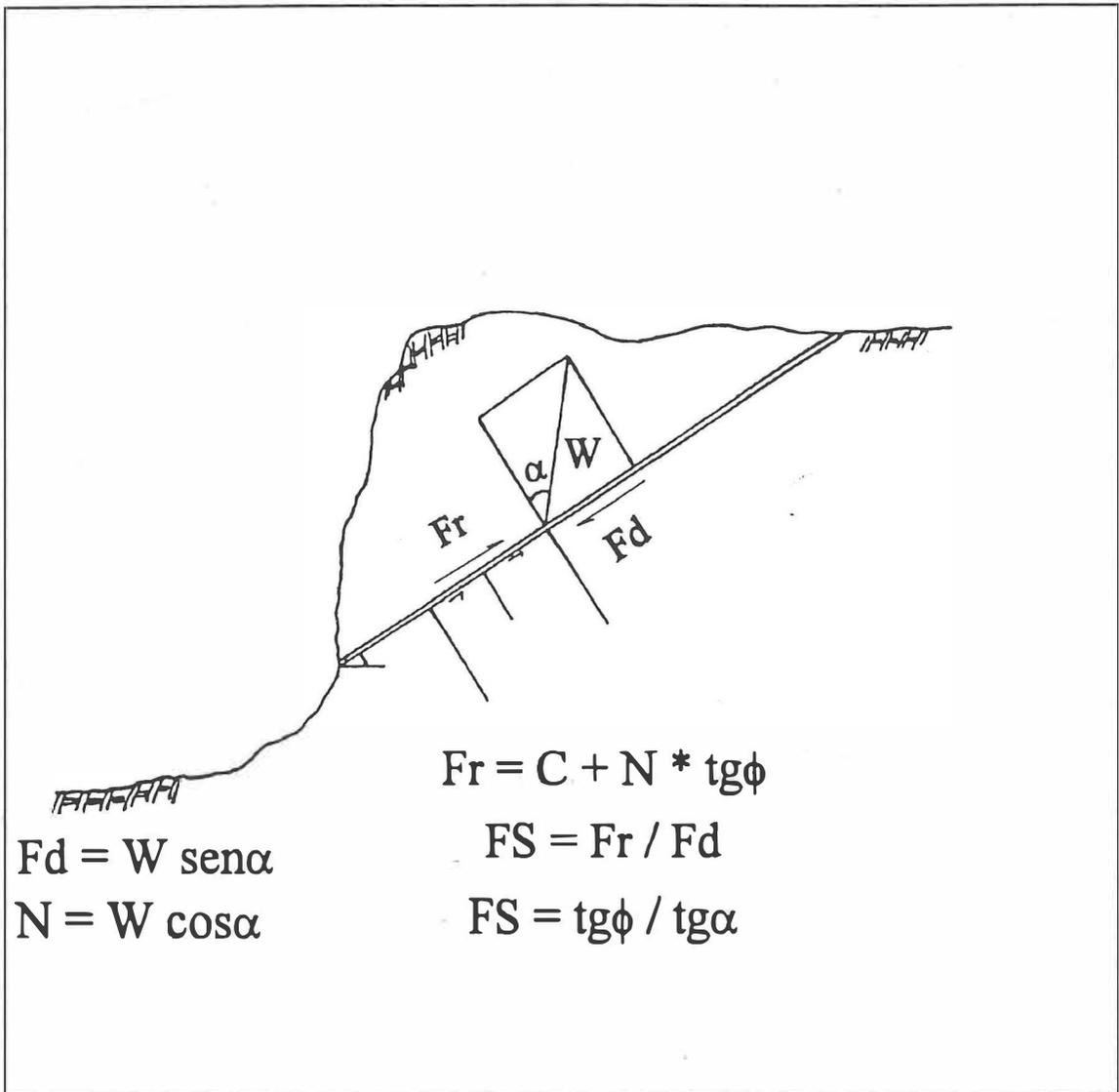


Figura 3. Estado de fuerzas que actúan sobre una ladera con deslizamiento traslacional, bajo condiciones estáticas.

donde: W = peso total del material que está situado sobre la superficie de deslizamiento

α = ángulo de la pendiente con respecto a la horizontal.

La resistencia al corte de la ecuación 4 está representada por:

$$\tau = Fr = N \cdot \tan \phi \quad (6)$$

donde: Fr = fuerza de resistencia al deslizamiento

ϕ = ángulo de fricción interna del material

En esa misma figura se aprecia que la fuerza que favorece al deslizamiento del material sobre la ladera está dada por:

$$Fd = W \cdot \text{sen} \alpha \quad (7)$$

La aproximación estándar de la ingeniería civil para el cálculo de la estabilidad de pendientes es el *Factor de Seguridad* (FS) el cual, a través del procedimiento de *pendiente infinita*, está expresado como:

$$FS = \frac{\text{fuerzas de resistencia}}{\text{fuerzas de empuje}} = \frac{Fr}{Fd} \quad (8)$$

Luego:

$$FS = \frac{\text{tg} \phi}{\text{tg} \alpha} \quad (9)$$

En la práctica de la ingeniería civil, el factor de seguridad se evalúa para los mecanismos por los cuales la pendiente se podría romper. El mecanismo de ruptura con el factor de seguridad más bajo es el que se considera como el más probable para inducir la

ruptura o deslizamiento. De acuerdo con Costa y Baker, 1981, a la magnitud del factor de seguridad, se puede calificar la estabilidad de una pendiente, de la siguiente manera:

- $FS > 1.5$, las pendientes se consideran estables
- $1.0 \leq FS \leq 1.5$, la pendiente está condicionalmente estable
- $FS \leq 1.0$, la pendiente se considera inestable

Cuando el análisis de estabilidad de pendientes se lleva a cabo mediante el procedimiento de pendiente infinita se asume una superficie de deslizamiento plana (deslizamientos traslacionales). Sin embargo, el procedimiento anterior también se puede aplicar cuando las superficies de deslizamiento son superficies de ruptura curvas, tal como sucede en los deslizamientos rotacionales (figura 4).

El cálculo del factor de seguridad para deslizamientos rotacionales no se expresa en términos de superficies de ruptura planas como en el caso de los deslizamientos traslacionales; en este caso el deslizamiento se lleva a cabo sobre una superficie curva, por lo tanto el cálculo del factor de seguridad se realiza mediante la aplicación de momentos con respecto al radio de curvatura de la superficie de deslizamiento (r_c) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 FS &= \frac{M_R}{M_D} = \frac{F_r \cdot r_c}{F_d \cdot r_c} \\
 &= \frac{(N \cdot \tan \phi) \cdot r_c}{F_d \cdot r_c} \\
 &= \frac{W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{W \cdot \text{sen} \alpha}
 \end{aligned}$$

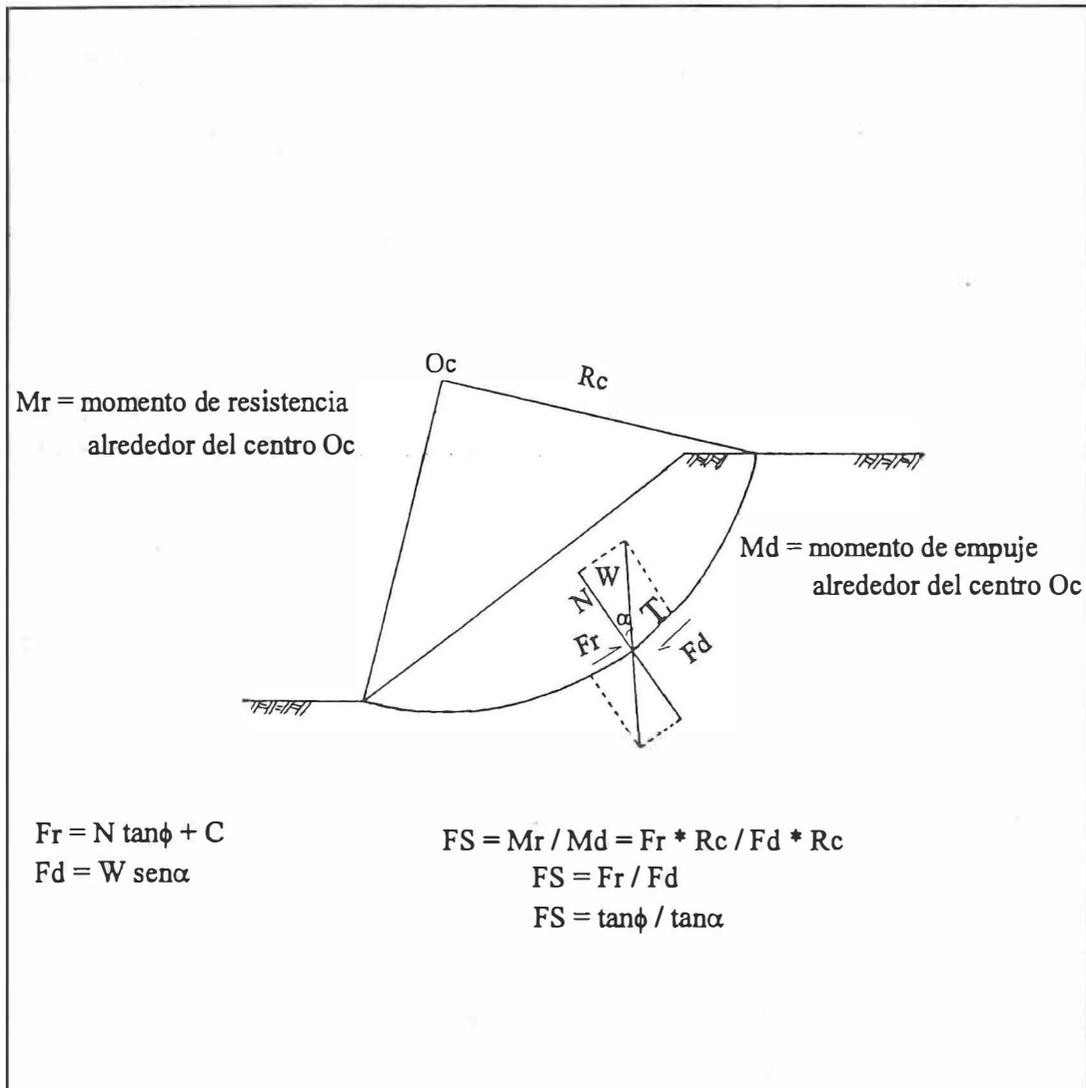


Figura 4. Estado de fuerzas y sus momentos asociados que actúan sobre una ladera con deslizamiento rotacional, bajo condiciones estáticas.

$$= \cot \alpha \cdot \tan \alpha$$

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (10)$$

donde: M_R = momento de resistencia alrededor del centro O_c del círculo de deslizamiento

M_D = momento de empuje alrededor del centro O_c del círculo de deslizamiento

r_c = radio del círculo de deslizamiento

Por lo tanto, el cálculo del factor de seguridad será igual tanto para deslizamientos rotacionales como para los deslizamientos traslacionales.

II.1.2 Análisis dinámico.

Un deslizamiento inicia su movimiento cuando las fuerzas de empuje (Fd) que actúan a lo largo de una superficie potencial de ruptura exceden a las fuerzas que se resisten al movimiento (Fr). Las fuerzas que tienden a causar la ruptura y el movimiento son los factores que conducen a la inestabilidad, y constituyen las causas externas de los deslizamientos (Costa y Baker, 1981). Las causas externas pueden ser: a) peso del material sobre la pendiente; b) alteración de la ladera, por erosión fluvial o excavación; c) cargas en la parte superior o interior de la pendiente, tales como construcción de edificios, rellenos artificiales y basureros; d) cambios en el gradiente de la pendiente por levantamientos

tectónicos y e) terremotos. Los aspectos a, b y d son considerados en esta tesis a través del modelo geométrico de la ladera (espesor, pendiente y densidad) y el terremoto será la única fuerza cuyo efecto sobre la inestabilidad será estudiada en este trabajo. El aspecto c queda fuera del alcance de esta tesis pero debería ser considerado en trabajos de detalle en cada sitio particular.

Tanto la fuerza de empuje (F_d , que favorece el deslizamiento) como el esfuerzo normal (N , que se opone al deslizamiento) son producidas por el peso del material que se encuentra sobre la superficie de deslizamiento. Por lo tanto, durante un terremoto, el peso total W del material no va a cambiar, permaneciendo constantes los parámetros α y W . Sin embargo, si se espera que la situación de estabilidad de la ladera cambie ante la incidencia del sismo, sólo queda susceptible de cambio la variable ϕ (ángulo de fricción interna del material).

La respuesta de un material a la energía sísmica es altamente compleja, así que en la aplicación de este método se harán algunas simplificaciones:

1. El material de la ladera tiene una porción intensamente fracturada la cual se comporta como un suelo granular sin cohesión.
2. Se ignoran todos los efectos de la presión de poros con agua
3. El tipo de deslizamiento se supone como del tipo rotacional, aunque su análisis sea equivalente al de un tipo traslacional, tal como se mostró anteriormente.
4. Se utilizará el método de *pendiente infinita* para la determinación del factor de seguridad.

5. Finalmente, se asume que toda la energía generada por el terremoto y que arriba al sitio, tiene una entrada instantánea hacia el material (Borg, 1988).

Como resultado de la aplicación del análisis dinámico, un solo parámetro cambiará de valor, el ángulo de fricción interna (ϕ), de la manera en que se mostrará en la sección II.2. Con este nuevo valor del ángulo de fricción interna (ϕ') se utilizará de nuevo la ecuación (10) para obtener un nuevo valor del factor de seguridad, el cual se conoce como *Factor de Seguridad Dinámico*:

$$FSD = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} \quad (11)$$

El FSD refleja perfectamente la situación de inestabilidad de una ladera; sin embargo, existe una gran cantidad de zonas, con dimensiones de cientos de metros, propensas a deslizamientos, donde existe una gran variación en los ángulos de inclinación de la pendiente aunque los espesores y densidades se mantienen prácticamente constantes. En estos casos, sería necesario realizar muchas estimaciones del FSD, separadas por distancias de unos pocos metros, para caracterizar adecuadamente el peligro sísmico de deslizamiento en cada una de esas zonas, lo cual constituiría una cantidad enorme de trabajo. Por eso sería muy conveniente el disponer de un parámetro que no cambiara significativamente para el rango normal de valores de inclinación de pendientes, pero que reflejara adecuadamente el peligro sísmico de deslizamiento para esa zona.

La razón entre los dos factores de seguridad (estático y dinámico), refleja adecuadamente el peligro sísmico bajo algunas condiciones, que se cumplen en el caso de la

región de estudio, tal como se mostrará en la sección III.2.2. Este parámetro no ha sido presentado antes en la literatura, por lo tanto, se propone su uso como un nuevo elemento al que se denominará *Factor de Conversión* (FC). Este factor representa una cuantificación relativa del peligro sísmico de deslizamientos y queda expresado de la siguiente manera:

$$FC = \frac{FS}{FSD} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi'} \quad (12)$$

En la ecuación (12) se aprecia que el factor FC queda en función de los valores de ϕ y ϕ' . A su vez el valor de ϕ' depende débilmente del ángulo de la pendiente α , por lo tanto FC variará ligeramente con el valor de α , permitiendo usarlo para caracterizar a todo un frente de deslizamiento.

II.1.3. Verificación de la existencia del problema.

En el área de estudio hay evidencias de la presencia de los dos elementos que serán partes claves de esta tesis: laderas y sismicidad, el siguiente paso es verificar en forma general a partir de un método alternativo si la conjugación de estos elementos es capaz de producir situaciones de alta vulnerabilidad. Como se presentó en la sección I.2, Newmark, 1965, encontró una ecuación para calcular la aceleración crítica mínima necesaria para producir un deslizamiento; a partir de esta ecuación (1), este método permite realizar un ejercicio rápido para averiguar la posibilidad de que se produzcan dentro de la región de estudio las aceleraciones con amplitud suficiente para iniciar el proceso del deslizamiento en una ladera representativa de las condiciones imperantes en la región. El resultado de este

ejercicio daría pie para iniciar estudios de detalle como el que se pretende en esta tesis. Al aplicar la ecuación (1) a una ladera localizada en la colonia Libertad; de la ciudad de Tijuana, donde los parámetros geométricos y físicos producen un factor de seguridad de 1.84 para una pendiente de 22° , se obtiene una aceleración crítica de 308 cm/s^2 . El siguiente paso es verificar si el sitio puede experimentar esa aceleración producida por un terremoto. Se consultaron los resultados de Acosta *et al.*, 1995, los cuales se muestran en la figura 5, donde se aprecia la localización del sitio de este ejercicio con una estrella, correspondiéndole una aceleración horizontal máxima de alrededor de 300 cm/s^2 . Ésto es una indicación de que existen las condiciones sísmicas suficientes para originar problemas de estabilidad de pendientes en la región de Tijuana y es un impulso para emprender análisis dinámicos de laderas en toda la región.

Para propósitos de comparación de estimaciones de aceleración con otros métodos, se resumen a continuación los resultados de otros estudios encontrados en la literatura. Anderson *et al.*, 1989, combinaron datos geológicos del sur de California con un modelo de atenuación para obtener una estimación de los niveles de aceleración pico esperados a partir de sismos con una magnitud de momento mayor a 6. Encontraron valores de 100 a 200 cm/s^2 esperados dentro de un periodo de 100 años en el centro de San Diego. Berger y

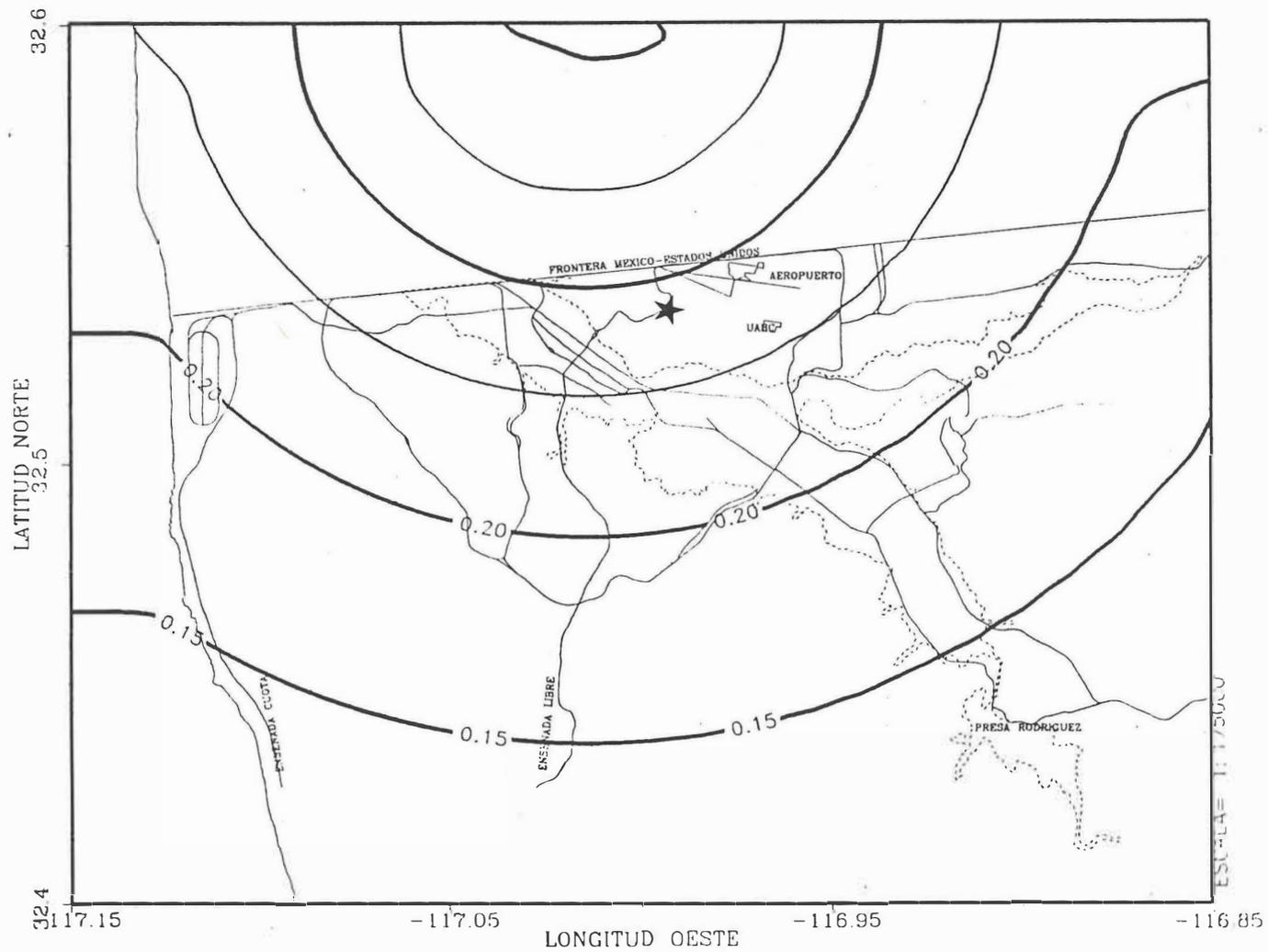


Figura 5. Distribución de aceleraciones máximas horizontales predichas en Acosta *et al.*, 1995, para un rompimiento propuesto de la falla La Nación ($M_w=6.5$).

Schug, 1991, obtuvieron aceleraciones pico en el rango de 280 a 400 cm/s^2 para un periodo de cincuenta años con el 90 % de probabilidad de no excedencia, para la zona metropolitana San Diego-Tijuana: ellos utilizaron un análisis probabilístico de riesgo sísmico en el cual incluyeron la contribución de todas las posibles fuentes sísmicas identificadas en el área. Por su parte, Sangines *et al.*, 1991, presentaron mapas de aceleraciones pico del terreno para el área metropolitana de San Diego, con un máximo de 600 cm/s^2 , suponiendo un máximo terremoto creíble de $M=7$.

II.2 Metodología.

II.2.1 Esquema general de la metodología.

El tratamiento general del problema involucra a los tres elementos claves de la sismología: fuente, trayectoria y sitio.

- La fuente será representada por el rompimiento individual para una falla conocida como activa y con probables parámetros de rompimiento reportados en la literatura. La liberación de la energía sísmica será puntual e instantánea. La descripción precisa del terremoto propuesto, con sus parámetros de fuente, se hará en la sección III.1.1.
- La propagación de la energía se hace a través de un medio homogéneo e isotrópico, mediante frentes de onda esféricos, en los cuales la energía sísmica total es constante.
- El sitio está constituido por dos elementos: la estructura geológica donde será aplicada la energía (la ladera susceptible a deslizamiento) y las condiciones geológicas y geotécnicas locales que modifican la respuesta sísmica en ese lugar. La descripción de las condiciones geológicas y geotécnicas y su aplicación se harán en la sección III.1.4.

Para resolver el problema de la estimación del factor de seguridad dinámico en cualquier sitio, se hará uso de la relación *deformación-esfuerzo-energía* (Filonenko-Borodich, 1968) en un elemento de volumen de la masa susceptible a deslizamiento. Para conseguir este fin, se requiere:

1. Especificar una fuente sísmica
2. Estimar la energía sísmica liberada

3. Estimar la energía que arriba a la superficie
4. Especificar la distribución de la densidad de energía por unidad de área
5. Especificar las condiciones de esfuerzo en la masa deslizante
6. Estimar las deformaciones
7. Estimar el factor de seguridad
8. Calcular el factor de conversión

En esta sección se presentarán las metodologías para:

- a) Determinar la densidad de energía por unidad de área.
- b) Determinar los esfuerzos presentes en la masa deslizante.
- c) Estimar la deformación provocada en la masa por la presencia de energía sísmica.
- d) Convertir la deformación en un cambio del factor de seguridad dinámico.

II.2.2 Metodología para la determinación de la densidad de energía.

El método que se utilizará en este trabajo para el análisis dinámico de estabilidad de pendientes, requiere del conocimiento de la energía expresada como densidad por unidad de área. Ésto significa que se requiere especificar dos elementos para poder estimar una densidad de energía: una cantidad de energía y una área de aplicación de ella. En esta sección se explicará primeramente la manera de definir y evaluar las áreas y después se describirá la manera de evaluar la cantidad de energía aplicable en cada una de las áreas definidas.

Definición de las zonas de densidad de energía constante.

En cada uno de los puntos donde se hará el análisis de estabilidad de pendientes se requiere del conocimiento de la densidad de energía inducida por el sismo propuesto. Consideré que es preferible definir zonas dentro de las cuales la energía se mantiene aceptablemente uniforme por las siguientes razones:

- Tanto para el interés de este trabajo como de trabajos posteriores e independientes, es ventajoso el disponer de un mapa de microzonificación que muestre la distribución de los valores de densidad de energía en la superficie, ya que esto permite conocer directamente el valor esperado de energía en cualquier sitio propuesto en este estudio o que se propongan en trabajos posteriores.
- En todos los casos revisados sobre el análisis de estabilidad de pendientes no se encontró un método para la evaluación de la energía que incluyera el efecto de sitio. Sin embargo, es importante incluir este efecto, ya que para un punto dado no se sabría si la cantidad de energía aplicada estaría correctamente estimada. Por tanto se eligió incluir este efecto mediante el uso de métodos empíricos que involucran el concepto de zonificación de la respuesta sísmica del suelo.

Se decidió hacer coincidir las zonas de densidad de energía constante con las bandas de isosistas sísmicas por las siguientes razones:

- La principal razón es que esas bandas de intensidad son calculadas a partir del mismo terremoto propuesto para la generación de las energías.

Las intensidades sísmicas están relacionadas por definición con la cantidad de daño producido en la superficie por un sismo; además, la cantidad de daño está directamente relacionada a la cantidad de energía que el terremoto induce en la superficie. Esto significa que una zona de intensidad constante puede considerarse como una zona de densidad de energía aproximadamente constante.

- Adicionalmente, la metodología para la estimación de los datos de entrada para el cálculo de las intensidades sísmicas esperadas para un terremoto propuesto, con inclusión del efecto de sitio, está suficientemente desarrollada para el sur de California y ya se encuentra implementada para su uso (Acosta *et al.*, 1995).

En esta tesis el uso de las intensidades sísmicas sólo tiene como finalidad el delimitar las zonas de densidad de energía constante de tal manera que, una vez definidas las distancias que limitan a dichas zonas, se puede olvidar el concepto de intensidades sísmicas. Esto quiere decir que las bandas de intensidades sísmicas sólo sirven para obtener las distancias a las cuales habrá cambios en la densidad de energía sísmica por unidad de área.

A partir de estas distancias se pueden estimar las áreas de las zonas de densidad de energía constante y también proporcionar una geometría para la estimación de la cantidad de energía que queda incluida en cada zona, tal como se detallará en la siguiente sección.

La figura 6 ilustra la idea de las zonas de densidad de energía constante. En la figura, el epicentro es E y las isosistas son los círculos concéntricos; las distancias que delimitan las

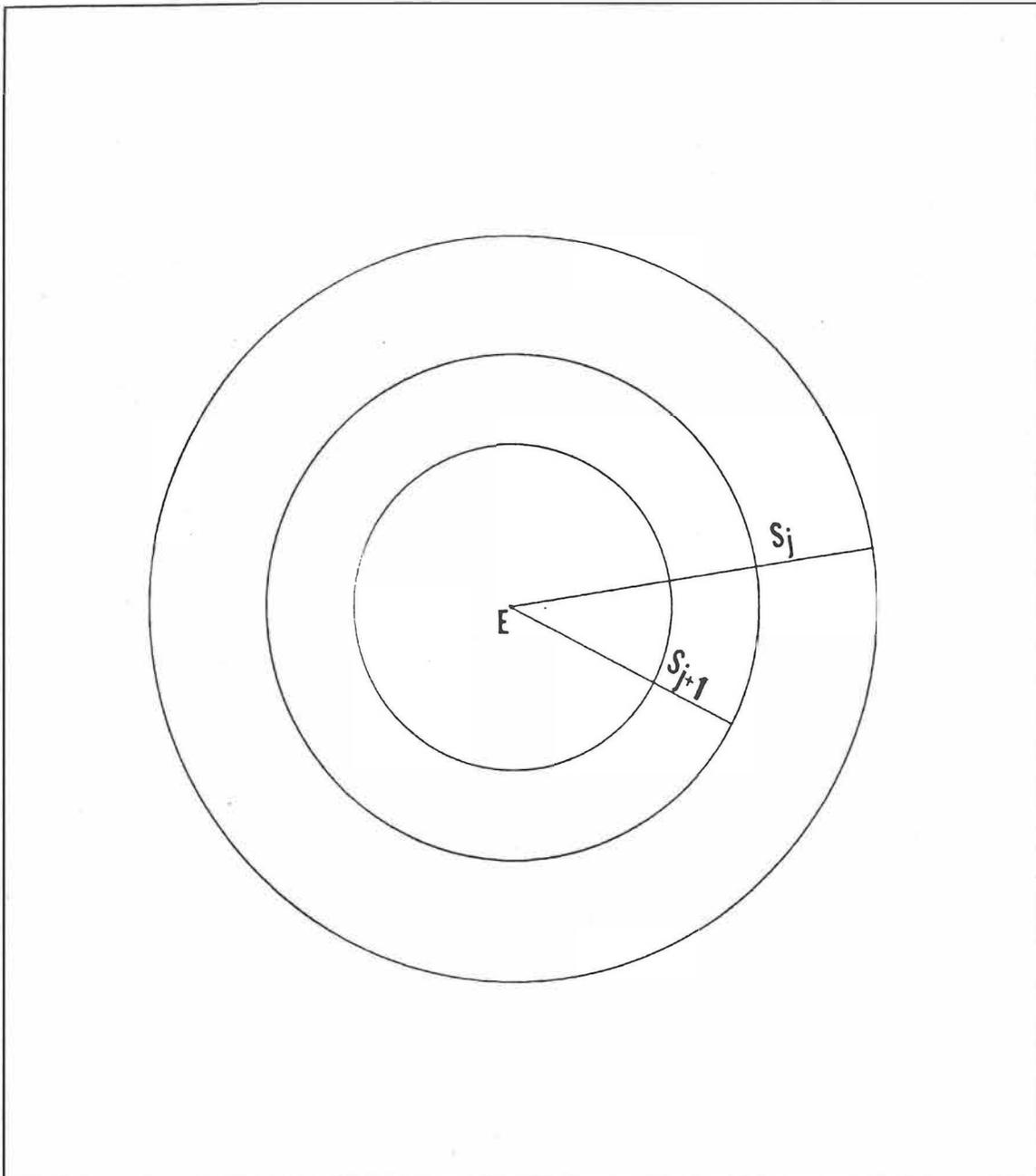


Figura 6. Ilustración de las zonas de densidad de energía constante. Las circunferencias representan líneas de isosistas generadas por un epicentro E. S_j es la distancia a la isosista de intensidad j . El área anular entre las distancias S_j y S_{j+1} es el área de intensidad uniforme j .

zonas son los radios S_j que definirán la geometría del frente de onda que inyecta energía dentro de esa zona circular de radio S_j . A partir del mapa de isosistas se tendrá un conjunto de distancias que delimitan las zonas dentro de las cuales se evaluarán las densidades de energía. Ya que se conoce la distribución de las distancias sobre la superficie, el siguiente paso es definir el frente de onda que corresponde a cada distancia sobre la superficie.

El área de radio S_j representa a la intersección de la superficie con el frente de onda esférico que lleva la energía, tal como se ilustra en la figura 7, donde el hipocentro es O, el epicentro es P y la distancia S_j está representada por la línea P-A, la profundidad hipocentral (h) por la línea P-O y el radio del frente esférico (r_j) por la línea O-A.

La figura 8 presenta el sombreado del casquete esférico que sobresaldría de la superficie y que contiene sobre su área la cantidad de energía que quedará asignada dentro de la zona superficial de radio S_j . La figura 9 ilustra una vista en planta de la geometría anterior y de su proyección en un plano vertical. En esta figura se ilustran los mismos elementos de distancia mencionados antes, de los cuales se conocen la h y la S_j y a partir de ellos se estima la r_j .

Estas áreas están definidas para un espacio homogéneo e isotrópico; por lo tanto es normal observar áreas circulares y concéntricas. Sin embargo, en la realidad física los efectos de sitio, atenuación inelástica y longitud de falla, distorsionan las formas suaves de esas áreas, pero se conserva la densidad de energía dentro de ellas.

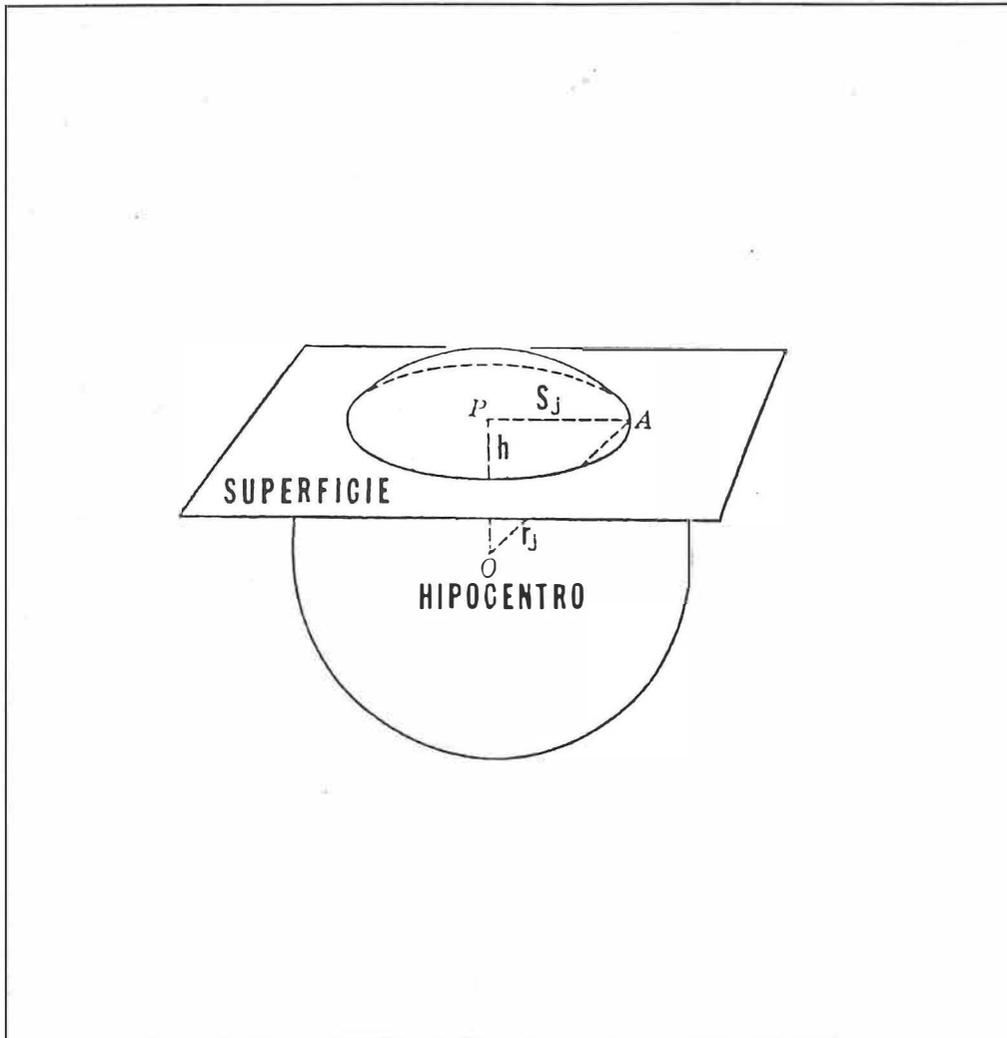


Figura 7. Intersección de un frente de onda esférico con la superficie de la tierra, definiendo un área circular de radio S_j , correspondiente a la isosista de intensidad j .

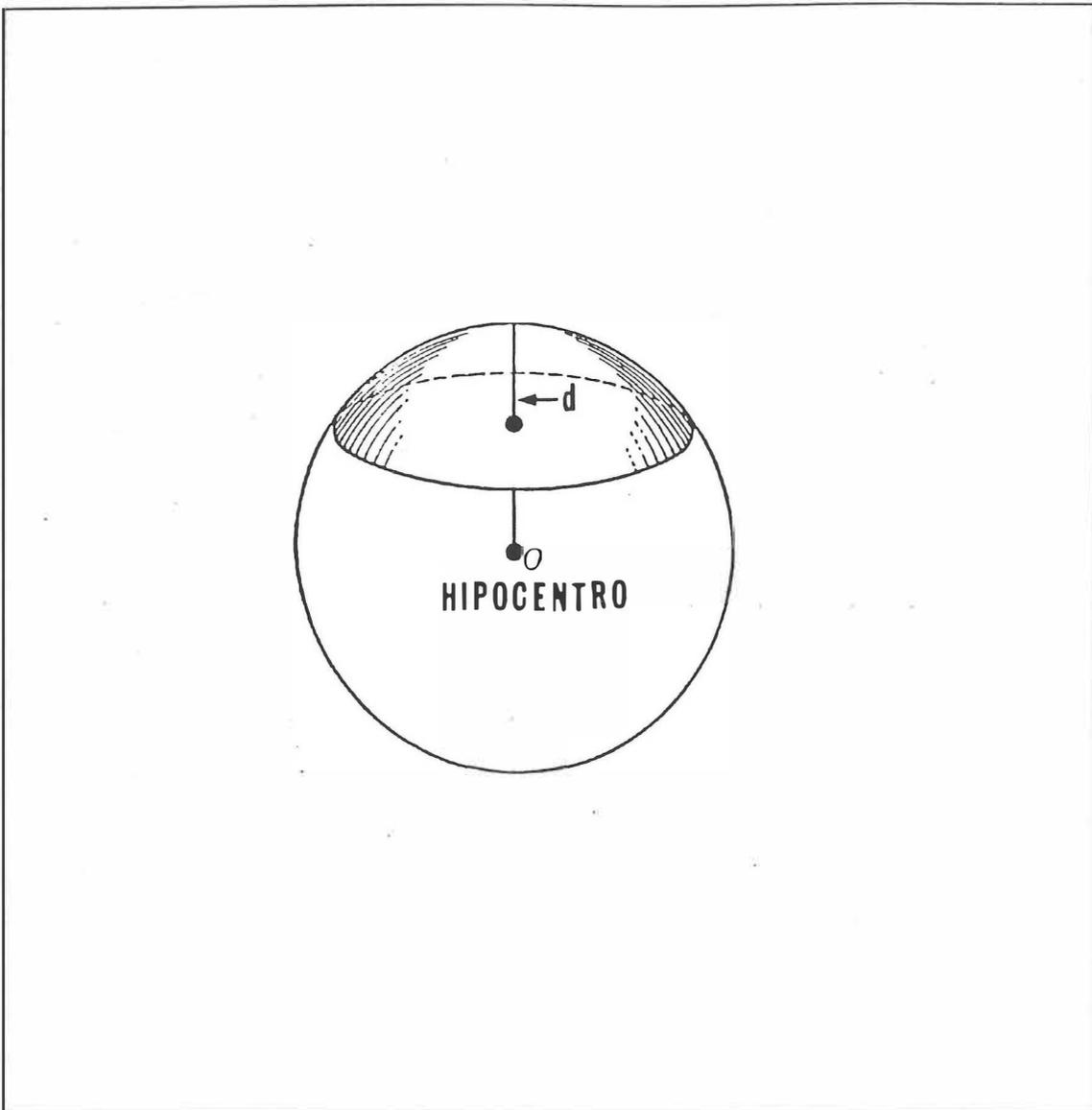


Figura 8. Área del casquete esférico imaginario de un frente de onda que sobresale de la superficie.

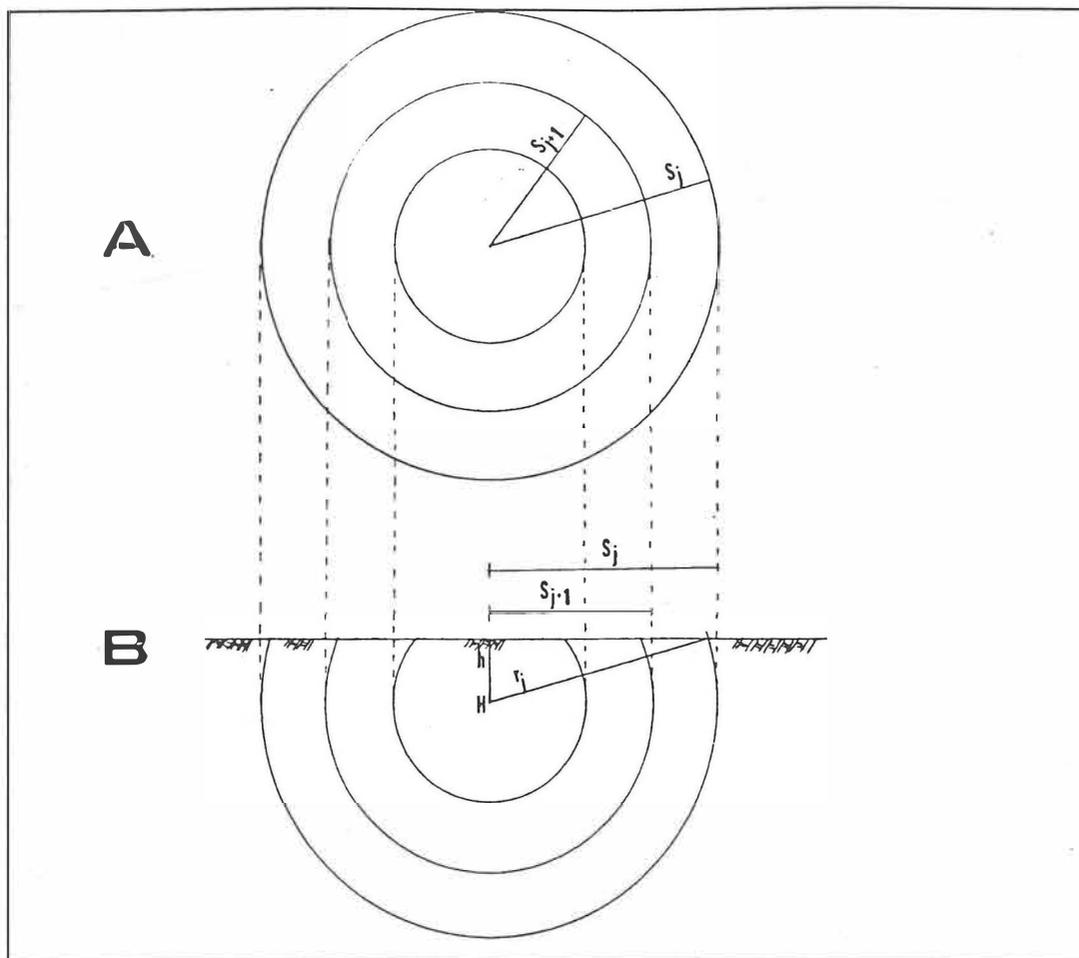


Figura 9. Proyecciones del casquete esférico del frente de onda que sobresaldría de la superficie, sobre un plano horizontal (A) y un plano vertical (B) que contiene al hipocentro (H).

Modelo para la determinación de la energía sísmica.

Como se hizo notar en la sección I.2, numerosos autores han señalado que los métodos convencionalmente usados para el análisis de la estabilidad de pendientes bajo condiciones dinámicas, desprecian la componente vertical de la aceleración sísmica. Para subsanar esta deficiencia se utiliza un método que consiste en la aplicación de una energía sísmica que actúa en todos los planos.

Primero se describirá el método para estimar la cantidad de energía sísmica que se espera se libere en el rompimiento propuesto de una falla; en segundo término, se describirá la manera en que la energía arriba a la superficie y por último, se describirá el método para estimar el valor de la densidad de energía por unidad de área dentro de cada zona definida.

Estimación de la energía sísmica liberada en la fuente.

No toda la energía liberada en la fuente (E), es radiada en forma de ondas sísmicas sino sólo una porción la cual se conoce como energía sísmica (E_s). Para evitar el problema en la estimación del parámetro de la eficiencia sísmica, que permite estimar E_s a partir de E , se prefirió emplear una relación que implícitamente hace la conversión y que estima el valor de E_s a partir de la magnitud de momento, la cual es obtenida a partir de la relación de Gutenberg-Richter (1956) y las definiciones de M_o y M_w (Kanamori, 1977):

$$\log E_s = 11.8 + 1.5 \cdot M_w \quad (13)$$

donde: E_s = energía sísmica total liberada en la fuente, en ergios

M_w = magnitud de momento, la cual de acuerdo a Kanamori, 1977, se estima como:

$$M_w = \left(\frac{\log M_o}{1.5} \right) - 10.73 \quad (14)$$

donde: M_o = momento sísmico, el cual, de acuerdo a Aki y Richards, 1980 se estima de la siguiente manera:

$$M_o = \mu \bar{U} A \quad (15)$$

donde: μ = módulo de rigidez promedio para la corteza = 3×10^{11} dinas / cm^2

\bar{U} = desplazamiento promedio sobre la falla en cm

A = área del plano de la falla en cm^2

Para estimar M_o se requiere especificar los valores de los parámetros \bar{U} y A , lo cual se consigue con el conocimiento tectónico de la región, tal como se describirá en la sección III.1. El resultado final de esta etapa es el valor esperado para la energía sísmica radiada desde la fuente.

Propagación de la energía.

Se propone que la energía sísmica es liberada por medio de una función de fuente puntual e instantánea en un medio homogéneo e isotrópico. Como resultado, la energía irradiada se propaga por medio de un frente de onda esférico. Conforme el frente de onda se expande con el tiempo, la energía total sobre la superficie permanecerá constante, pero la energía por unidad de área decrecerá. Debido a las características asignadas al medio, la densidad de energía es uniforme sobre toda la superficie esférica.

El frente de onda continúa expandiéndose hasta que su intersección con la superficie coincide con cada una de las zonas de intensidad constante que se definieron antes (ver figuras 7, 8 y 9).

Método para la determinación de la densidad de energía.

En la figura 7 se aprecia un frente de onda esférico que ha arribado a la superficie e imaginariamente ha sobresalido de ella el casquete esférico que se ilustra en esa figura. En esta sección se estimará la cantidad de energía que quedaría sobre la superficie de ese casquete. La cantidad total de energía que lleva el frente de onda de radio r_j depende de la magnitud del sismo y la porción de ella que quedaría sobre el casquete será proporcional a la relación del área total del frente de onda al área del casquete, ya que la densidad de energía es uniforme sobre todo el frente de onda esférico. Entonces, la energía total que quedará incluida en esa área circular será:

$$E_j = \frac{E_s \cdot A_{c_j}}{A_{t_j}} \quad (16)$$

donde: E_j = energía contenida en el área j , en ergios

E_s = energía sísmica total irradiada de la fuente, en ergios

A_{c_j} = área del casquete que cubre a la zona de radio S_j , en km^2

A_{t_j} = área total del frente de onda esférico de radio r_j , en km^2

la partición de la energía en los planos horizontal y vertical se hará de la siguiente manera:

$$Eh_j = E_j \cdot \frac{Ah_j}{Ah_j + Av_j} \quad (17)$$

$$Ev_j = E_j - Eh_j \quad (18)$$

donde: Eh_j = energía que actúa en el plano horizontal, en ergios

Ev_j = energía que actúa en el plano vertical, en ergios

Ah_j = área de la proyección horizontal del casquete j (figura 10), en km^2

Av_j = área de la proyección vertical del casquete j (figura 11), en km^2

$$Ah_j = \pi \cdot S_j \quad (19)$$

$$Av_j = \frac{r_j^2}{2} \cdot (\theta - \text{sen}\theta) \quad (20)$$

donde: θ = ángulo entre los dos puntos del área de radio S_j , con vértice en el hipocentro (figura 11).

El proceso numérico indicado por las ecuaciones antes descritas se repite tantas veces como círculos de intensidad se tengan definidos, o sea que el índice j varía desde la mínima hasta la máxima intensidad que se encuentren en la región.

Conocidos los valores del área y de la energía incluida en ésta, se puede proceder a la estimación de la densidad de energía en cada una de las zonas anulares limitadas por las distancias S_j como:

$$\epsilon_{T_j} = \frac{E_j - E_{j+1}}{\pi \cdot (S_j^2 - S_{j+1}^2)} \quad (21)$$

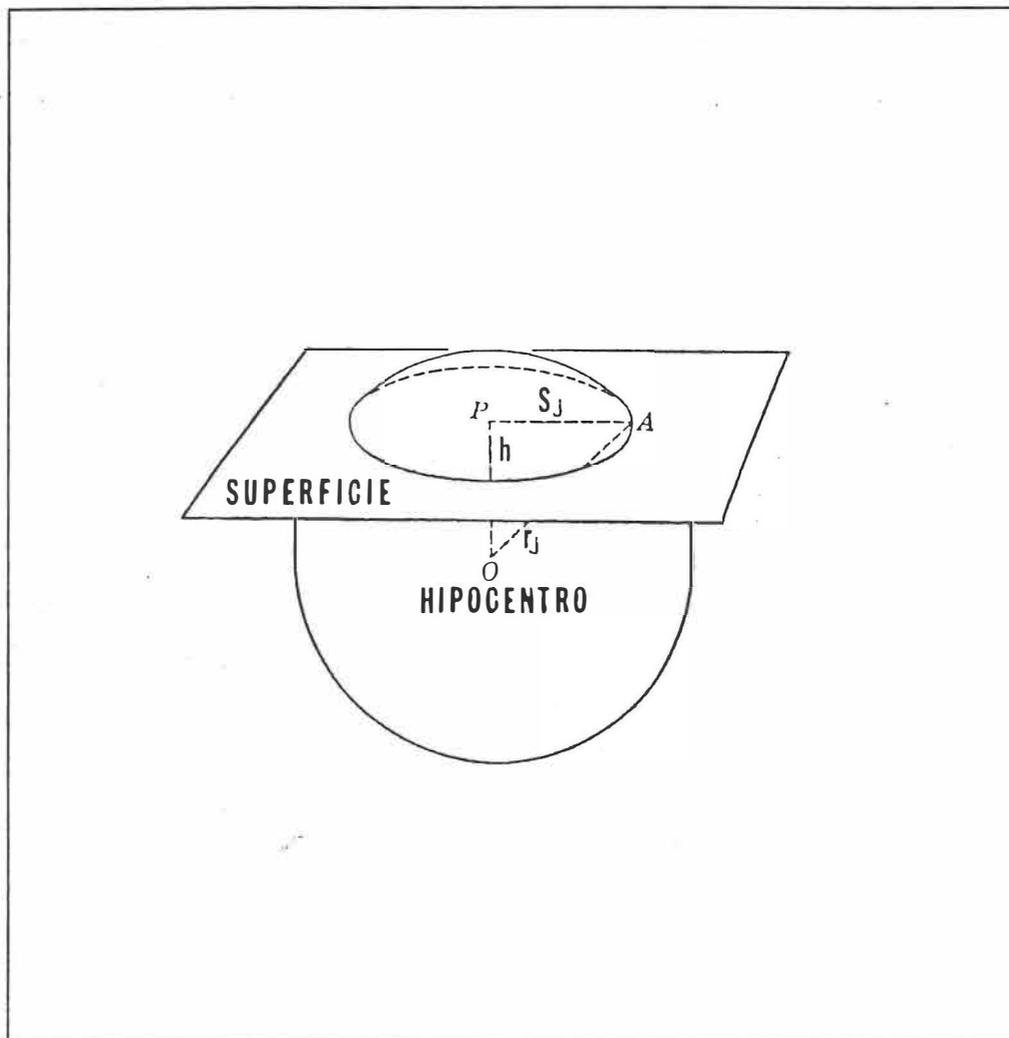


Figura 10. Área de la proyección horizontal del casquete esférico que imaginariamente sobresale de la superficie en la isosista j , perteneciente al frente de onda.

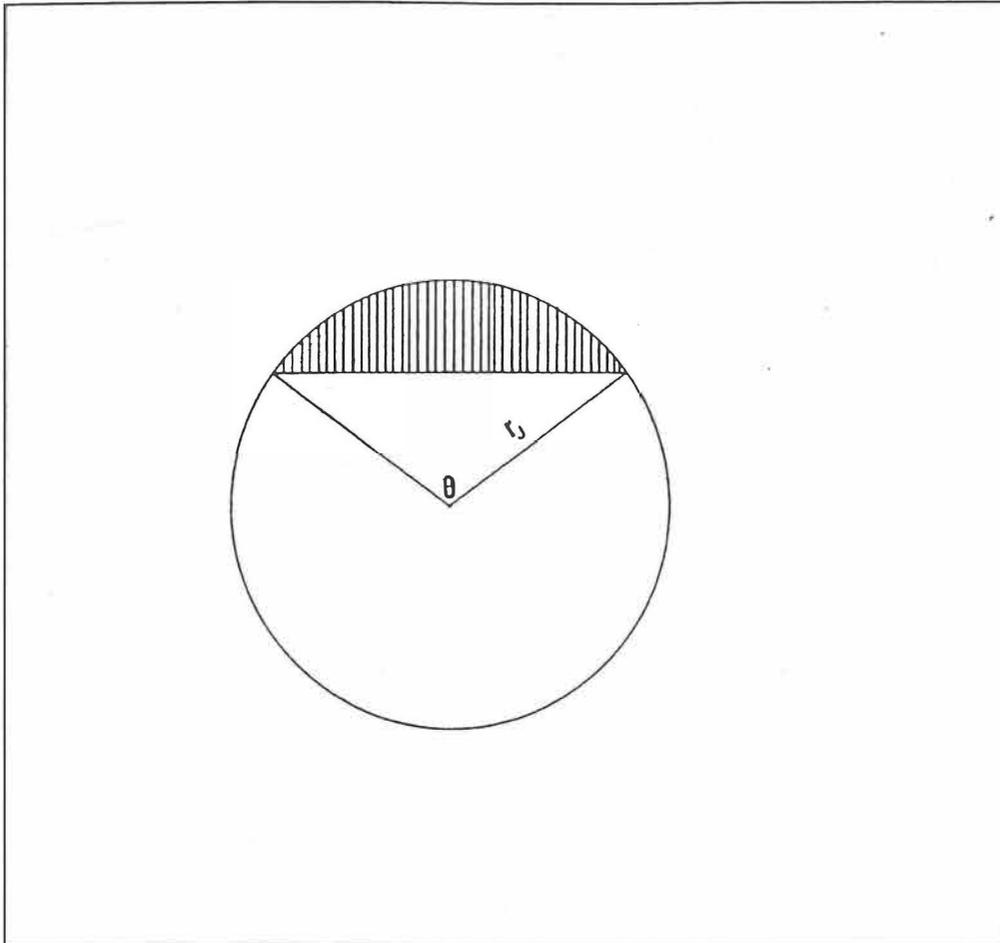


Figura 11. Área de la proyección vertical del casquete esférico que imaginariamente sobresale de la superficie en la isosista j , perteneciente al frente de onda.

donde: \mathcal{E}_{T_j} = densidad de energía por unidad de área para la zona anular

correspondiente a la zona j y limitada por los radios S_j y S_{j+1} .

La salida final de los modelos y métodos presentados en esta sección (la densidad de energía por unidad de área) presenta algunas diferencias tanto cuantitativas como conceptuales respecto al método usual para el cálculo de densidades de energía en problemas de estabilidad de pendientes (Borg, 1988). Por ello, es importante la presentación de una discusión sobre estas diferencias, la cual se presenta en el apéndice B. Las conclusiones de dicho apéndice son las siguientes:

- Para un valor dado de intensidad, el método presentado en esta tesis arroja un sólo valor sin ambigüedades, mientras que el método de Borg, 1988, maneja una banda de valores de energía para cada intensidad.
- Los valores de densidad de energía vs. intensidad aquí calculados, siguen una línea que se ubica dentro de la banda de valores compilada por Borg, 1988, a partir de datos de sismos de todo el mundo, manteniendo una tendencia compatible con la de esa banda.

Efecto de las condiciones locales sobre la densidad de energía.

Hasta ahora se ha manejado el concepto de una distribución de áreas de intensidad constante en un medio homogéneo e isotrópico; sin embargo, la presencia de condiciones locales de sitio puede modificar significativamente la respuesta sísmica (intensidad) en algunos puntos. Entonces puede suceder que alguna banda de intensidad constante contenga puntos con intensidad diferente, tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 12, donde el área marcada con A tiene intensidad diferente a la de la banda donde está incluida. En

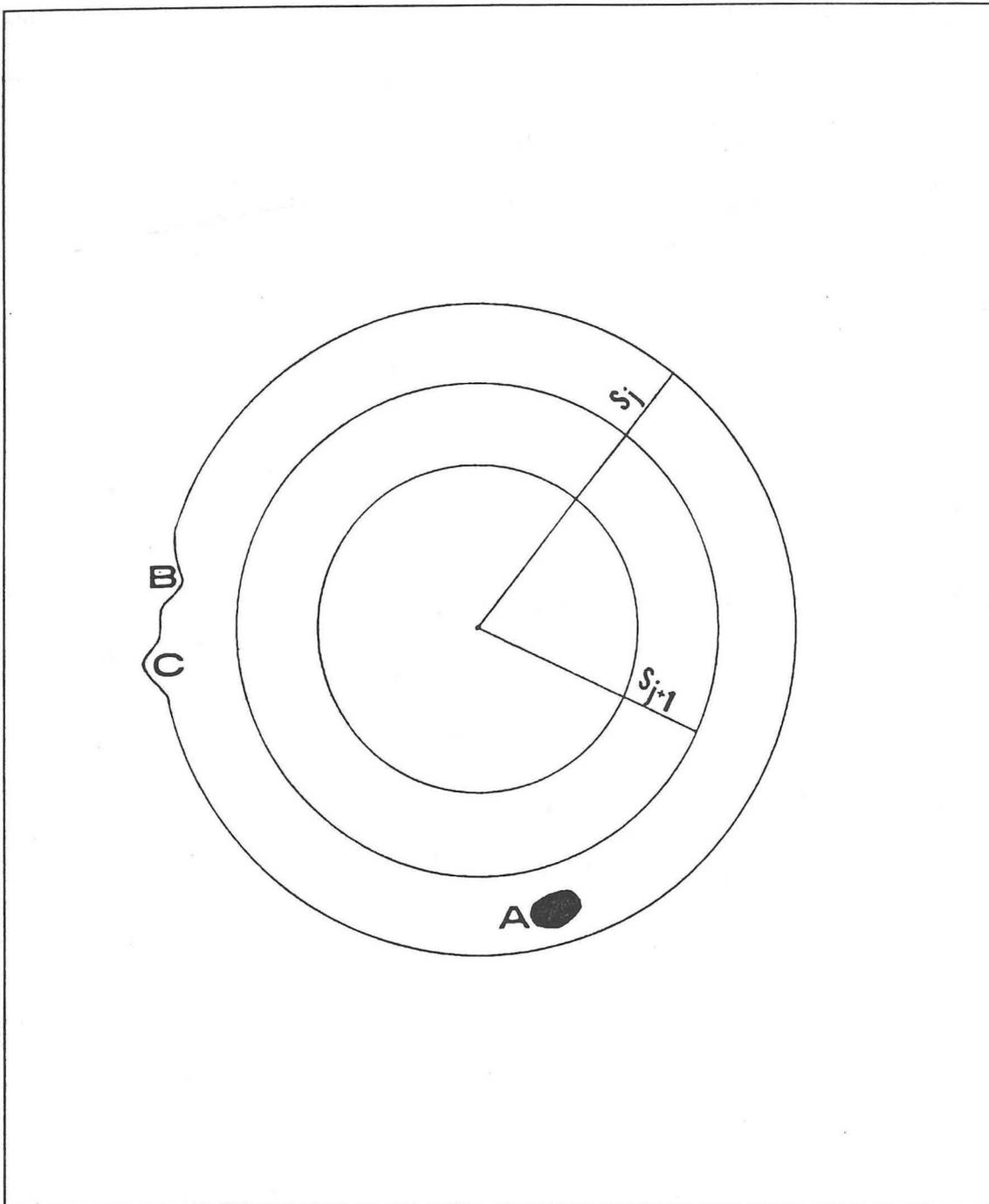


Figura 12. Ilustración de las deformaciones que sufren los límites de las zonas de densidad de energía constante, por los efectos de sitio.

tales casos, a los puntos situados en A se les asignará la densidad de energía correspondiente al área principal que tenga intensidad igual a la que experimenta el punto A. En los casos en que los puntos de intensidad anómala por coincidencia se encuentren en las cercanías de una isosista, ésta experimentaría una desviación como las marcadas con B y C en la figura 12.

II.2.3 Modelo para evaluar el efecto sísmico sobre la ladera.

El método para la estimación del factor de seguridad dinámico, el cual refleja el efecto de la aplicación de una sollicitación sísmica en la base de la ladera, está basado en un modelo con las siguientes características:

- La energía sísmica modifica temporalmente la densidad del material de la ladera a través de una deformación perpendicular a la superficie de deslizamiento.
- Al aplicar la energía sobre el material que se encuentra encima de la superficie de deslizamiento los efectos de ésta tenderán a manifestarse principalmente en aquellas porciones del material que ya se encuentren debilitadas por la presencia de fracturas. Por lo tanto, la deformación se concentra en una estrecha zona de debilidad del material.
- El ancho de la zona de debilidad se puede asociar a la continuación a profundidad de la zona de fracturas en la superficie del terreno. La presencia de fracturas superficiales en la cabecera de la ladera es indicativa de que existe propensión al deslizamiento, en caso de no presentarse estas fracturas no se puede llevar a cabo el análisis dinámico. Se supone que el grosor de la zona de debilidad es igual al ancho de la franja donde se presenta la mayor concentración de fracturas en la superficie, que comúnmente son paralelas al

escarpe de la ladera. La zona de debilidad se mantendrá asociada a la superficie de deslizamiento, ya que ésta constituye la superficie de contacto entre dos unidades litológicas diferentes, de manera que la zona de debilitamiento sobreyacerá a la superficie de deslizamiento.

- La deformación normal a la superficie de deslizamiento es directamente proporcional a la densidad de energía aplicada, e inversamente proporcional a la componente normal del peso del material por unidad de área.
- La modificación en la densidad (disminución) produce una reducción en el ángulo de fricción interna del material en la zona de debilidad, lo cual a su vez provoca una disminución en el factor de seguridad.

En este momento se dispone de una densidad de energía por unidad de área asignada a cada uno de los puntos en el área de estudio, por lo que ahora se necesita especificar la geometría y parámetros físicos de la ladera propensa a deslizamiento; después se describirá el método para introducir la densidad de energía en la geometría especificada y poder calcular su factor de seguridad dinámico.

Modelo geométrico de la ladera.

La figura 13 muestra la geometría de una ladera susceptible a deslizamiento. El ángulo que forma la ladera con la horizontal es α , el espesor del material propenso a deslizarse es L , el espesor de la zona de debilidad es D .

Se aplicará el análisis dinámico sobre un elemento de volumen de la masa propensa a deslizamiento; este elemento de volumen es perpendicular a la superficie de ruptura y con una proyección de base unitaria sobre la horizontal, ya que la densidad de energía está definida por unidad de área en esa horizontal. La longitud del elemento de volumen es L y el área de la base del elemento de volumen (A_v) sobre la superficie de deslizamiento es:

$$A_v = 1.0 \cdot \cos\alpha \quad (22)$$

Método para la determinación del factor de seguridad dinámico.

Primeramente se utiliza la relación *esfuerzo-energía-deformación* (Filonenko-Borodich, 1968), para estimar la deformación en la dirección normal a la pendiente, a lo largo del elemento de volumen antes definido:

$$Dt = \frac{\epsilon_j}{Pu} \quad (23)$$

donde: Dt = deformación total en la dirección normal a la pendiente, a lo largo del elemento de volumen

ϵ_j = densidad de energía superficial por unidad de área, ergios/ km^2

Pu = componente normal del peso de la masa, por unidad de área:

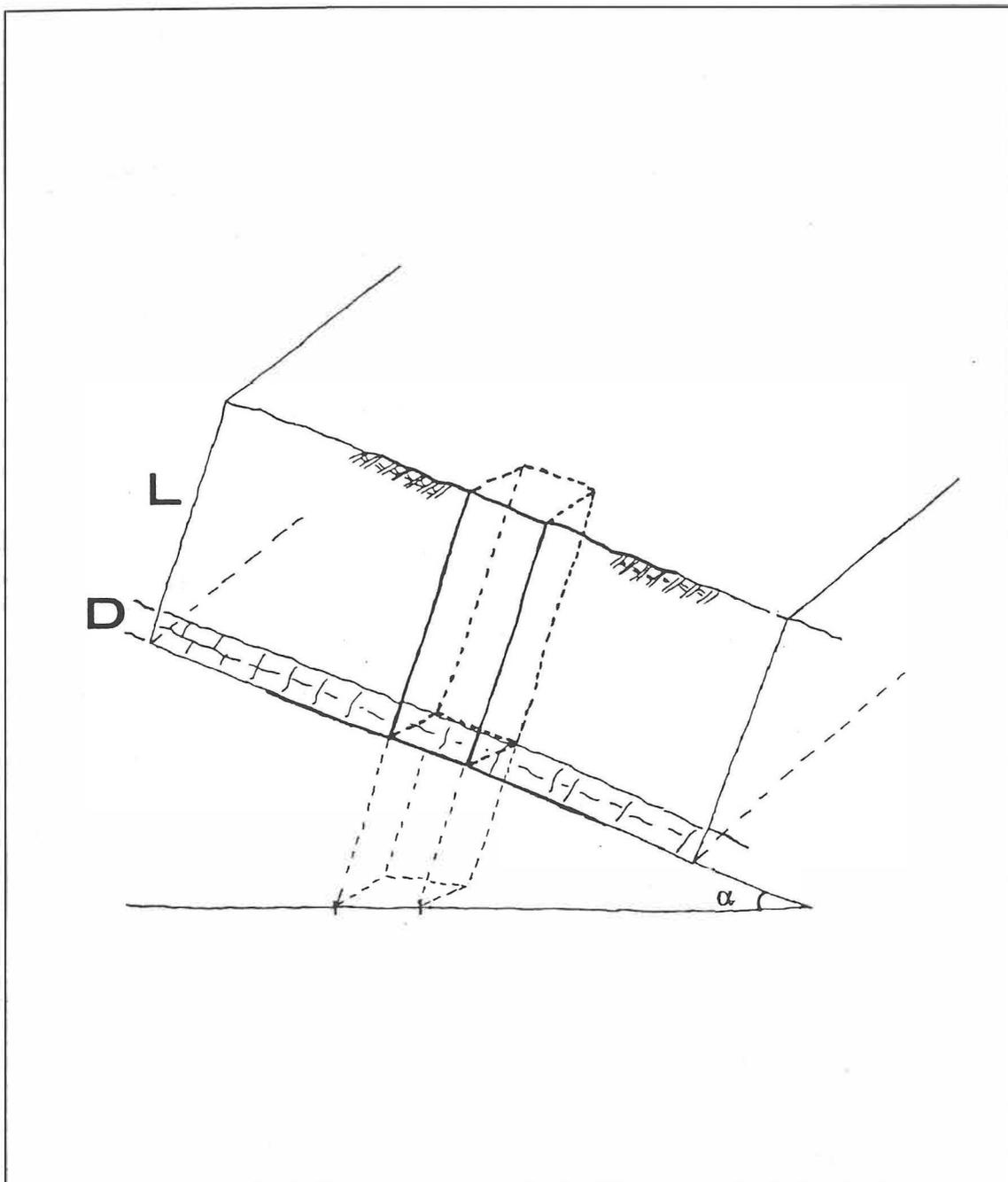


Figura 13. Geometría utilizada en el análisis de estabilidad de una ladera propensa a deslizamiento. Se muestra el elemento de volumen normal a la superficie de deslizamiento donde se inyectará la densidad de energía sísmica por unidad de área.

$$P_u = A_v \cdot L \cdot \rho \cdot \cos \alpha \quad (24)$$

donde: ρ = densidad del material ($\frac{g}{cm^3}$)

A_v = área de la base del elemento de volumen. m^2

L = longitud del elemento de volumen. m

A continuación se estima la deformación unitaria por unidad de longitud. Como se mencionó anteriormente, la energía causará mayor disturbio en una pequeña zona, la cual está representada como una zona de debilidad constituida por una franja de material situado sobre la superficie de deslizamiento. Por lo tanto, se supondrá que toda la deformación está concentrada en esta franja y sólo ahí se producirá la dilatación del material y por lo tanto la disminución de la densidad. El material situado encima de esta zona dilatada se comportará como una masa rígida que se elevará como resultado de la dilatación de su base. La deformación unitaria se estima de la siguiente manera:

$$Du = \frac{Dl}{D} \quad (25)$$

donde: Du = deformación unitaria en la dirección normal a la pendiente

Como resultado de la dilatación, expresada por medio de la deformación unitaria, se producirá un incremento en el volumen y una disminución de la densidad calculada como:

$$\rho' = \frac{\rho}{1 + Du} \quad (26)$$

donde: ρ' = densidad bajo condiciones dinámicas

ρ = densidad bajo condiciones estáticas

Como el ángulo de fricción interna (ϕ) del material depende de la densidad, una variación en ésta hará cambiar el valor de ϕ de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\phi' = A \cdot \rho' + B \quad (27)$$

donde: ϕ' = ángulo de fricción interna bajo condiciones dinámicas

A, B = representan los coeficientes que identifican a la relación ρ vs ϕ

para un cierto tipo de material, de acuerdo al diagrama de la figura 14.

En el área de estudio, el tipo de material presente está formado por arenas pobremente clasificadas y horizontes de conglomerados, que en el diagrama de la figura 14 está representado con la clasificación SP; la línea que representa a este tipo de material queda ajustada con los siguientes valores para los coeficientes:

$$A = 30.096 \text{ y } B = -17.5236 \text{ para } 1.5 \leq \rho' \leq 1.9$$

$$A = 17.648 \text{ y } B = 0.0 \text{ para } \rho' < 1.5$$

El último par de coeficientes representa la ecuación de una línea que se propone en esta tesis para extrapolar la ecuación (27) en los casos en los que la densidad adquiere valores fuera del rango normal esperado para ese tipo de material. Una discusión más amplia sobre esta propuesta se encuentra en el apéndice A.

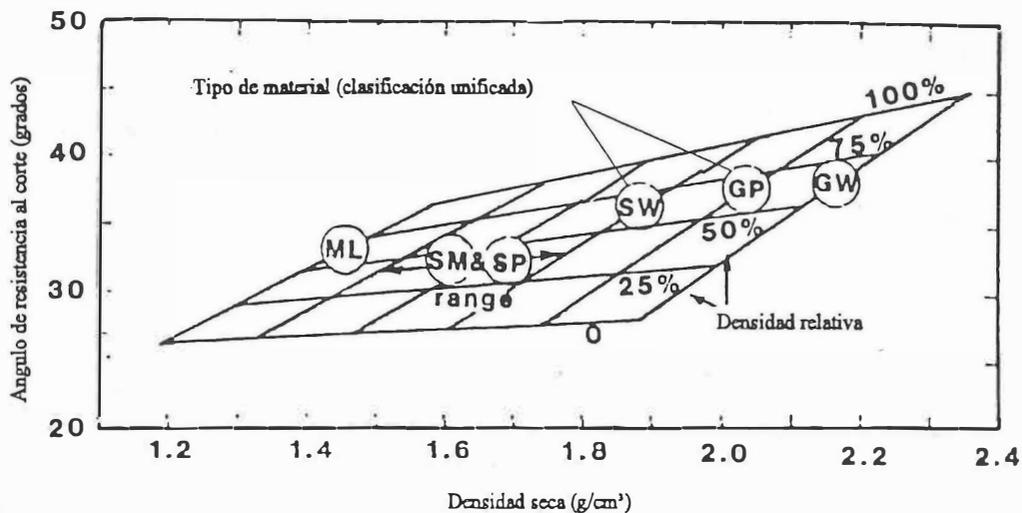


Figura 14. Valores típicos de los parámetros de densidad y ángulo de fricción interna, para materiales no cohesivos. El tipo de materiales presentes en la zona de estudio es SP. Modificado de Carter y Blentey 1991.

El siguiente paso es calcular el valor para el nuevo Factor de Seguridad usando la ecuación (11).

Las ecuaciones para el cálculo de FSD propuestas en esta sección producen resultados que pueden ser diferentes a los arrojados por el método de Borg, 1988, por lo que realicé un ejercicio consistente en la comparación de los valores de FSD estimados con estos dos modelos; los resultados de esta comparación se presentan en el apéndice B, resumiéndose lo siguiente:

- El método propuesto en esta tesis predice valores de FSD más aceptables que los resultados obtenidos con el método de Borg, 1988.

II.3 Área de estudio.

II.3.1 Marco tectónico regional.

La ciudad de Tijuana se encuentra al noroeste del estado de Baja California, colinda hacia el norte con la línea fronteriza México-EUA y al sur con la población de Rosarito, al oeste con el Océano Pacífico y al este con la ciudad de Tecate, la ciudad se encuentra asentada sobre una zona tectónicamente activa (figura 15).

La región de Tijuana está incluida dentro de una amplia zona definida como de cizalla que se encuentra entre el límite de las placas de Norteamérica y Pacífico (Legg *et al.*, 1991). En el sur de California y norte de Baja California, la zona de límite de placas tiene un ancho de más de 225 km, desde la falla San Clemente, localizada aproximadamente 100 km al oeste de la línea de costa, hasta la falla San Andrés (Berguer y Schug, 1991). La zona de cizallamiento del sur de California (Southern California Shear Zone; Legg *et al.*, 1991) tiene los siguientes límites: al este se encuentra la zona de falla de San Andrés, al norte se localiza el Bloque de Sierras Transversas Occidentales (Western Transverse Ranges Block), al oeste el sistema de fallas San Clemente y al sur la falla Agua Blanca (figura 16).

II.3.2 Marco Geológico.

La columna geológica en el área de Tijuana incluye rocas cuyas edades cubren un rango desde 140 Ma hasta la actualidad. Las rocas más antiguas están formadas por secuencias vulcanosedimentarias de la Fm. Alisitos del Cretácico, cuerpos intrusivos

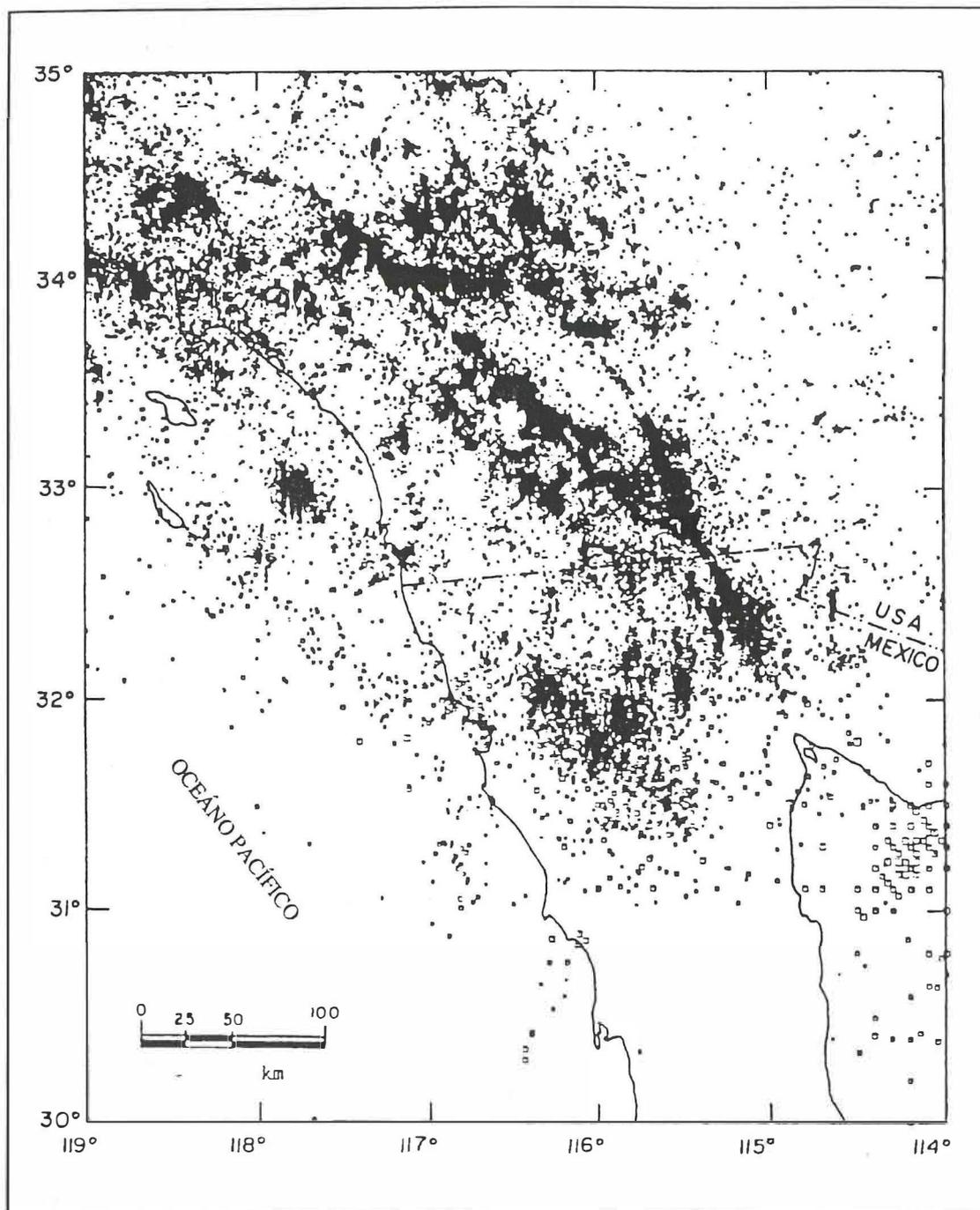


Figura 15. Mapa que muestra la sismicidad del norte de Baja California y sur de California de 1964-1987. El tamaño del símbolo es proporcional a la magnitud. Tomado de Frez y González, 1991.

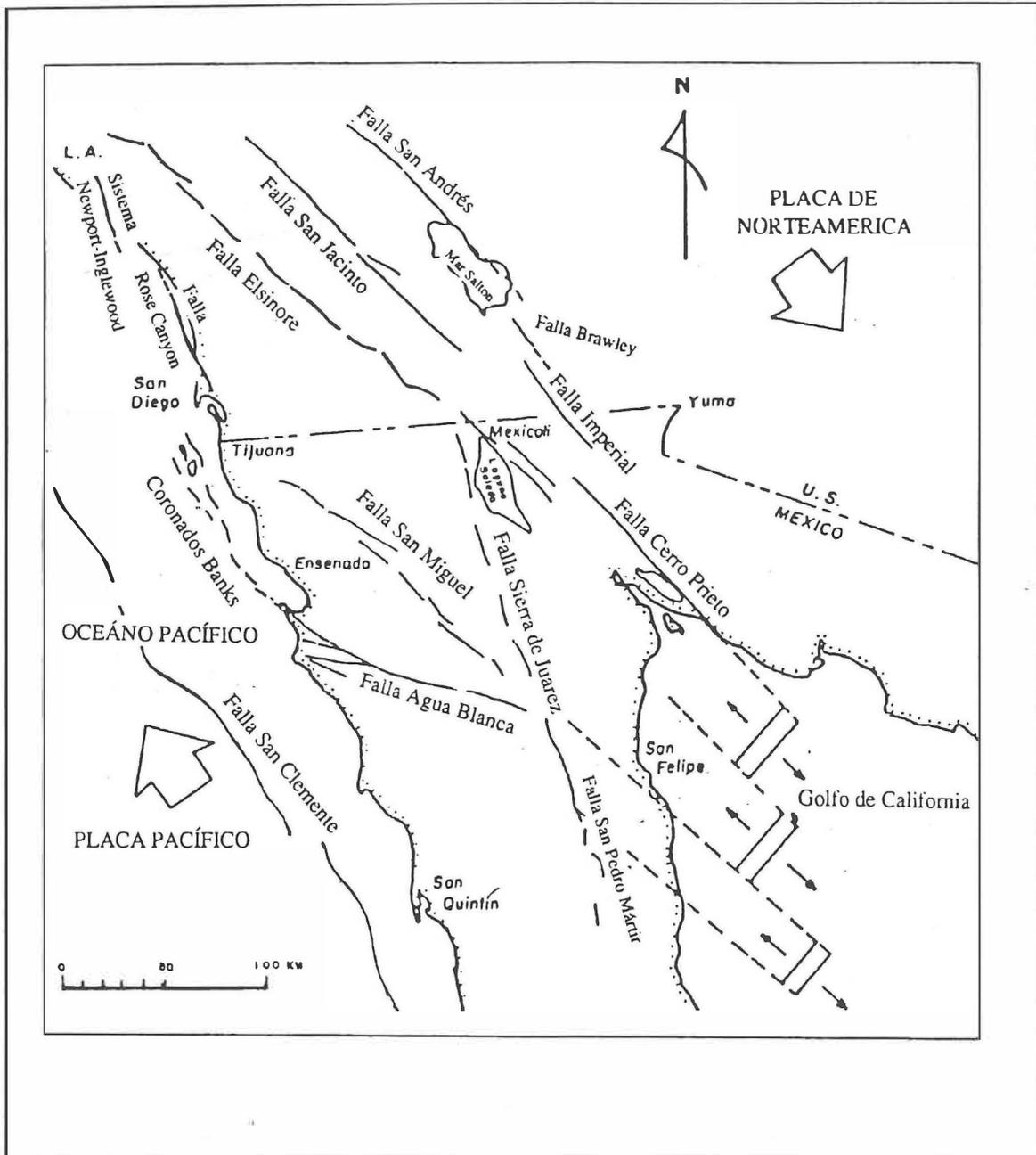


Figura 16. Mapa tectónico del norte de Baja California y sur de California que muestra las principales fallas activas. Modificado de Suárez Vidal *et al.*, 1991.

pertenecientes al Batolito Peninsular y rocas sedimentarias de la Fm. Rosario del Cretácico Tardío. Las rocas cenozoicas están representadas por intercalaciones de rocas vulcanoclásticas y sedimentarias de la Fm. Rosarito Beach y por series sedimentarias que corresponden a las Fms. San Diego y Lindavista (Delgado-Argote *et al.*, 1996; Aragón-Arreola, 1994)

II.3.3 Estratigrafía.

El basamento en la zona de Tijuana está constituido por rocas de la Fm. Alisitos y del Batolito Peninsular. La Fm. Alisitos está definida como una secuencia vulcanosedimentaria del Cretácico Temprano, compuesta por derrames dacíticos y andesíticos, aglomerados, brechas, tobas soldadas, grauvacas, subarcosas, lutitas y sedimentos calcáreos, con una afinidad de arco magmático ligeramente metamorfozado (Gastil *et al.*, 1975). En Tijuana, la Fm. Alisitos aflora en el Cerro Colorado, hacia los flancos Este y Oeste de la presa Abelardo Rodríguez (Flynn, 1970).

El Batolito Peninsular, está representado por una serie de rocas intrusivas que van desde cuarzdiorita hasta granito (Gastil *et al.*, 1975). Se ha interpretado que esta unidad forma la raíz de la Fm. Alisitos (Sedlock *et al.*, 1993). En la zona de Tijuana, rocas batolíticas afloran al sur de la presa Abelardo Rodríguez representadas por gabros y granodiorita que están en contacto por falla con andesita de la Fm. Alisitos. Sobreyaciendo discordantemente al basamento se localizan rocas del Cretácico correspondientes a la Fm.

Rosario; en el área de estudio esta formación no aflora aunque se infiere que hacia el suroeste se debe encontrar cerca de la superficie (Aragón-Arreola, 1994).

El Terciario, está representado por intercalaciones de basalto, tobas y brechas que corresponden a la Fm. Rosarito Beach (Minch, 1967). Al Plio-Pleistoceno pertenecen las Fms. San Diego y Lindavista. La Fm. San Diego consiste de una secuencia de sedimentos pobremente consolidados y deleznable; los principales movimientos de ladera se suelen desarrollar en esta formación. Está formada por dos miembros: el inferior consiste predominantemente de areniscas de color amarillo, con grano fino a medio y lentes de conglomerados; la base del miembro superior es de areniscas de grano medio con intercalaciones de conglomerados que hacia la cima están formados por fragmentos más grandes. Sobre esta formación se ha desarrollado un alto porcentaje de la mancha urbana de la ciudad de Tijuana. La Fm. Lindavista, la cual está en contacto discordante con la Fm. San Diego, está constituida por conglomerados con intercalaciones de arenisca; aflora en algunos puntos de la Mesa de Otay, aunque su distribución es muy escasa (Delgado-Argote *et al.*, 1996).

Distribuidos en las franjas asociadas a los arroyos y cañones que atraviezan el área se encuentran depósitos aluviales del Plio-Cuaternario que cubren el cauce del río Tijuana en el que se encuentran asentadas oficinas de gobierno, hospitales, centros comerciales y hoteles.

II.3.4 Sismicidad

La actividad sismotectónica del norte de Baja California y sur de California se debe principalmente a cuatro sistemas o conjuntos de fallas activas (figura 16). Hacia el oriente se encuentran las fallas Imperial, Cerro Prieto, Cucapá y Laguna Salada, todas localizadas en el Valle de Mexicali-Imperial. En el escarpe del Golfo se localizan la falla San Pedro Mártir, el lineamiento de San Felipe y las fallas asociadas con el escarpe de la Sierra Juárez. Las fallas Agua Blanca, el sistema San Miguel-Vallecitos-Calabazas cruzan el Macizo Peninsular (Suarez-Vidal *et al.*, 1991). Cerca de la costa del Pacífico están el sistema Rose Canyon-Silver Strand, la falla La Nación y en la plataforma continental se encuentran las fallas Coronado Banks y San Clemente (Anderson *et al.*, 1989; Suárez Vidal *et al.*, 1991).

Munguía-Orozco y Vidal-Villegas, 1991, identifican que la sismicidad del norte de Baja California se encuentra asociada a las siguientes zonas: el área de Ensenada, la zona de falla de San Miguel-Vallecitos, el área de Pino Solo, el área de la Sierra de Juárez y Laguna Salada y el sistema de fallas Cerro Prieto-Imperial. La zona de estudio también se ve afectada por la sismicidad de la zona de Rose Canyon, La Nación y plataforma continental (Wesnousky, 1986; Anderson *et al.*, 1989).

Frez-Cárdenas y González-García, 1991, señalan que la mayor parte de los terremotos con $M_L > 6.0$ en el norte del estado ocurren a lo largo de las fallas Cerro Prieto, Imperial y San Miguel. Además, una gran parte de la microsismicidad ($M_L < 3.0$) es esporádica, dominada por enjambres y se encuentra en buena correlación con fallas mapeables.

La sismicidad histórica de la región Tijuana-San Diego es baja cuando se le compara con el resto del sur de California y norte de Baja California. A pesar de que las tendencias generales de fallas en esta región son conocidas, el conocimiento del peligro sísmico es incompleto, debido a que las localizaciones exactas de las fallas son poco conocidas en las áreas con depósitos aluviales recientes y en las urbanizadas. A causa de la quietud sísmica relativa, esta región ha sido calificada como de bajo potencial de daño proveniente de fuentes locales. Sin embargo, recientemente se han obtenido evidencias concluyentes acerca de actividad en el Holoceno en las principales fallas que atraviesan la región: Rose Canyon y La Nación (Linvall *et al.*, 1990). Es importante hacer notar que los registros históricos son muy recientes comparados con el período de recurrencia promedio para terremotos fuertes. La falta de sismicidad de fondo no implica que los sistemas de fallas asociados a la región no sean peligrosos, sino más bien que en el presente pasan por un periodo de quietud (Reichle *et al.*, 1990)

II.3.5 Morfología y suelos.

Desde el punto de vista morfológico la ciudad de Tijuana se encuentra asentada sobre tres tipos principales de accidentes topográficos: 1) Mesas, caracterizadas por elevaciones planas limitadas en al menos uno de sus lados por un escarpe pronunciado, la principal de ellas, mesa de Otay, se encuentra al norte de la ciudad. 2) Planicies con depósitos aluviales, caracterizadas por terrenos planos y bajos, situados sobre los cauces del río Tijuana, arroyo Alamar y otros pequeños arroyos tributarios; las mayores extensiones de

estos terrenos se sitúan en la parte central de la ciudad. 3) Lomeríos, son elevaciones topográficas, generalmente alargadas y fuertemente disectadas, distribuidas principalmente hacia el sur de la región.

Respecto a suelos, la zona urbana se asienta principalmente sobre sedimentos pobremente consolidados, incompetentes y deleznable de las formaciones San Diego y Lindavista, además de los depósitos aluviales en la zona del río Tijuana y arroyos aledaños. Las rocas más antiguas de edad Cretácica son marcadamente más competentes. La figura 17 muestra la distribución litológica del área de estudio. (Delgado-Argote, *et al.*, 1996).

II.3.6 Distribución de frentes de deslizamiento.

El riesgo geológico por deslizamientos de ladera en Tijuana está asociado a un conjunto de factores, entre los que destacan los lineamientos estructurales (fallas y fracturas), las pendientes del terreno y el tipo de litología. A partir de estos factores, se reconocen gran cantidad de sitios que pueden calificarse como riesgosos. Por su distribución geográfica se ubican en dos grandes zonas:

- En la parte norte del área de estudio las zonas de inestabilidad de pendientes están relacionadas a los taludes y escarpes de las mesas, donde aflora la Formación San Diego.
- En la parte sur del área de estudio la inestabilidad está relacionada con las fuertes pendientes producidas por la excavación de los arroyos de la región.

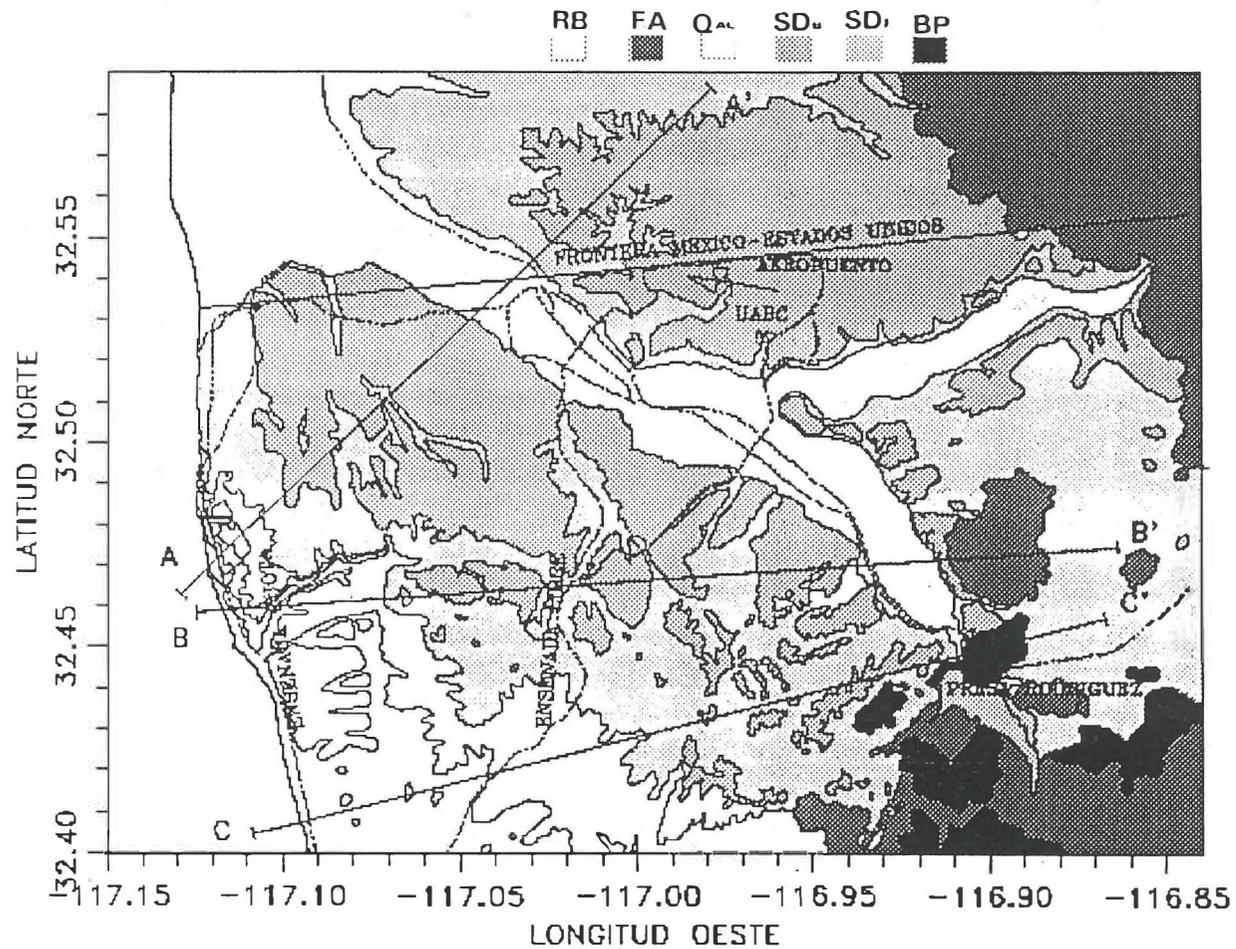


Figura 17. Geología superficial de la región de estudio. Las formaciones más importantes para este estudio son: San Diego Superior: (Sds) y San Diego Inferior (Sdi). Elaborado a partir de cartas geológicas de INEGI (1:50000), 1976.

III. RESULTADOS

III.1 Datos.

III.1.1 Fuente sísmica propuesta.

El método para la determinación de la densidad de energía y de las intensidades sísmicas se basa en el rompimiento propuesto para una falla. La elección de las fuentes sismogénicas se basó en los siguientes criterios:

- Fallas que por su cercanía a la región de estudio sean capaces de generar movimientos fuertes.
- Fallas que por sus dimensiones y razón de desplazamiento sean capaces de producir terremotos de magnitud mayor de 5.
- Fallas que presenten evidencias de actividad durante el Holoceno.
- Fallas que produzcan el mayor daño en los sitios de mayor interés (concentraciones de población, vías de comunicación, centros industriales y de comercio y estructuras críticas y estratégicas) dentro de la zona de estudio.

En este trabajo se propone el rompimiento de la falla La Nación, como la fuente más peligrosa, ya que por su posición produciría los mayores daños sobre las zonas con más alta densidad de población, de comercio, de edificios públicos y de asistencia médica; las cuales son el norte y centro de la ciudad de Tijuana y por las consecuencias sobre la interrupción de los medios de comunicación, es este caso hacia los dos aeropuertos (civil y militar); además esta falla tiene una longitud probable de rompimiento lo suficientemente grande para generar

sismos de magnitud mayor de 6 y ha mostrado evidencias de actividad en el Holoceno (Lindvall *et al.*, 1990), la cual se extiende en su extremo norte hasta La Mesa, California (a la altura de la autopista 8) y hacia el sur hasta San Ysidro, California, perdiéndose su rastro al norte de la línea internacional (ver Figura 18).

El sistema Rose Canyon-Silver Strand, es otro sistema de fallas que podría representar un riesgo considerable para la región, sus parámetros se resumen en la Tabla I (Reichle *et al.*, 1990; Lindvall *et al.*, 1990; Treiman, 1984 y 1989; Schug, 1989; Wesnousky, 1986; Anderson *et al.*, 1989), como una propuesta para futuros trabajos.

También existen otras fallas cercanas, ubicadas al sureste de la región, entre las que se cuentan las de Vallecitos, San Miguel y Calabazas, para las cuales no existen estudios a detalle en lo que respecta a longitudes esperadas de rompimiento, cantidad de desplazamiento y máximas magnitudes esperables, por lo que su consideración en estudios de este tipo no es sencillo actualmente. En la tabla I se resumen los parámetros propuestos para el rompimiento de la falla La Nación.

Tabla I. Fallas cuyo rompimiento se propone para la generación de energía, capaces de desestabilizar laderas en la ciudad de Tijuana (tomado de Reichle *et al.*, 1990; Lindvall *et al.*, 1990; Treiman, 1984 y 1989; Schug, 1989; Wesnousky, 1986; Anderson *et al.*, 1989).

| <i>Falla</i> | <i>Tipo de falla</i> | <i>Longitud estimada (km)</i> | <i>Ancho (km)</i> | <i>Desplazamiento promedio (cm)</i> | <i>Magnitud máxima esperada</i> |
|----------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Silver Strand</i> | desplazamiento lateral | 38 | 12 | 218.7 | 7.0 |
| <i>La Nación</i> | desplazamiento lateral | 28 | 12 | 80.64 | 6.5 |

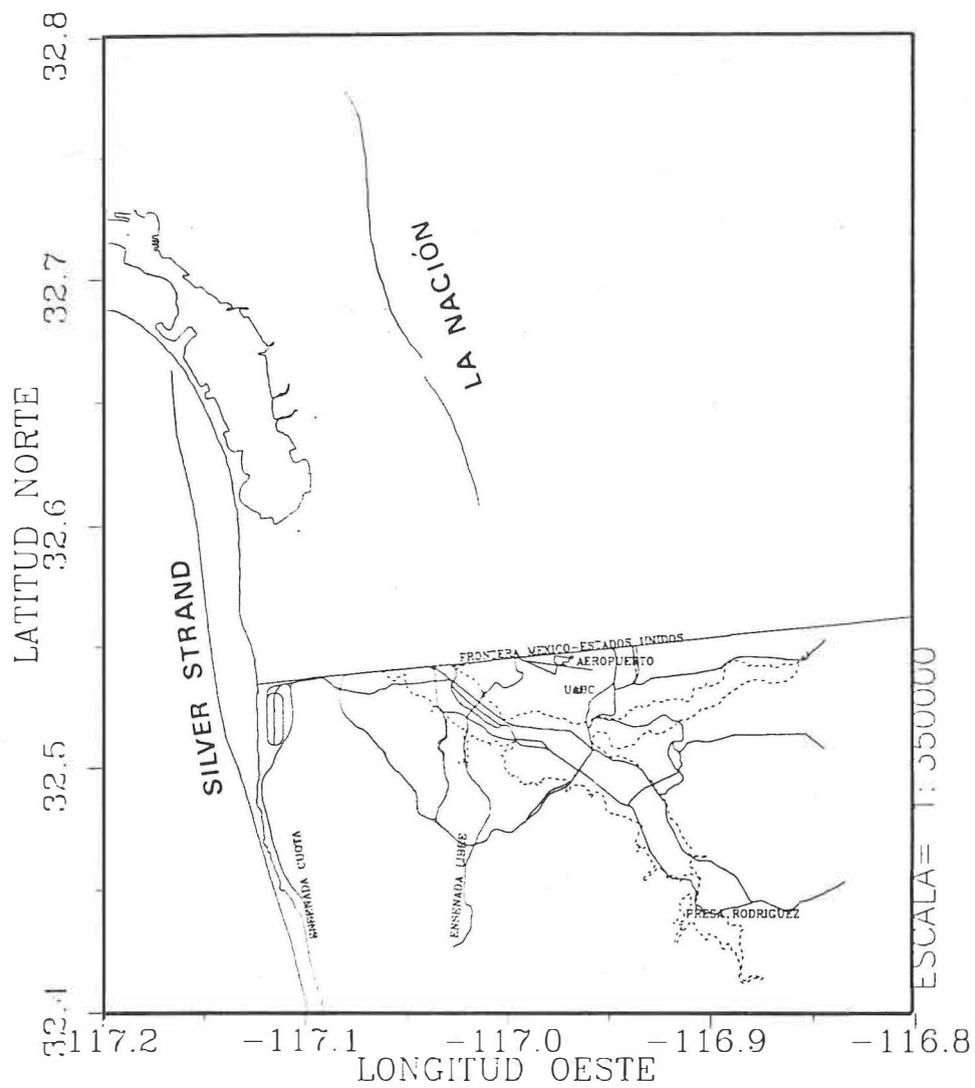


Figura 18. Ubicación de la falla La Nación, cuyo rompimiento puede generar un sismo de $M_w=6.5$.

El rompimiento de la falla La Nación se propone desde su extremo norte hacia el sur por una longitud de 28 km, ya que ésta es la porción que muestra evidencia de actividad en el Holoceno (Raines, *et al.*, 1991). El desplazamiento promedio de 80.64 cm representa al desplazamiento total esperado y se usa el calculado por Anderson *et al.*, 1989, a partir de la velocidad anual de desplazamiento y el período de recurrencia. Para esta falla se estimó una magnitud de momento calculada a partir de las ecuaciones (14 y 15) y los parámetros de la Tabla I tomados de la literatura.

$$M_o = 3.0 \times 10^{11} \cdot 80.64 \cdot (28 \times 10^5 \cdot 12 \times 10^5) = 8.128 \times 10^{25} \text{ dinas} \cdot \text{cm}$$

$$M_w = \left(\frac{\log M_o}{1.5} \right) - 10.73 = 6.5$$

III.1.2 Reconocimiento de frentes de deslizamientos.

Para el reconocimiento de los frentes de deslizamientos se buscaron las siguientes características: 1) presencia de desniveles topográficos, 2) presencia del contacto litológico de los miembros San Diego Superior-San Diego Inferior y 3) existencia de datos de espesores de la Fm. San Diego Superior.

Para verificar la presencia de los desniveles topográficos que forman laderas susceptibles a deslizamientos se emplearon mapas topográficos de INEGI escala 1:50,000 y mapas que presentan la distribución de cabeceras de deslizamientos (Aragón-Arreola, 1994). Se sobrepusieron los datos de localizaciones de frentes de deslizamiento elegidos en el paso anterior sobre mapas de INEGI de geología superficial (escala 1:50,000) y se eligieron

aquellos que estuviesen asociados a un contacto entre los dos miembros de la Fm. San Diego.

Dentro del área de estudio quedó situado un elevado número de laderas propensas a deslizamiento. Se decidió trabajar con un número reducido de ellas pero representativo de la región, ya que sólo en estos sitios se tenía un control aceptable de los espesores del material propenso a deslizarse (miembro superior de la Fm. San Diego). La elección de los frentes de deslizamiento que se analizaron se llevó a cabo de la siguiente manera: dos quedaron ubicados dentro de la zona norte en el escarpe sur de la Mesa de Otay, en el camino al aeropuerto. Los trece sitios restantes se encuentran ubicados en la zona sur, en la cual son abundantes los cañones y cauces fluviales (figura 19). La primera zona tiene una densidad de población mayor que la segunda y controla los accesos a los aeropuertos.

Los espesores del miembro superior de la Fm. San Diego se tomaron de los perfiles geológicos publicados (Aragón-Arreola, 1994, figura 20). La tabla II resume la información sobre los parámetros determinados para los 15 frentes de deslizamiento. Los ángulos de las pendientes en los frentes son muy variados y no se les consigna en la tabla II. En la sección III.2.2 se discutirá con detalle la manera como se utilizan los ángulos de las pendientes de los frentes de deslizamiento.

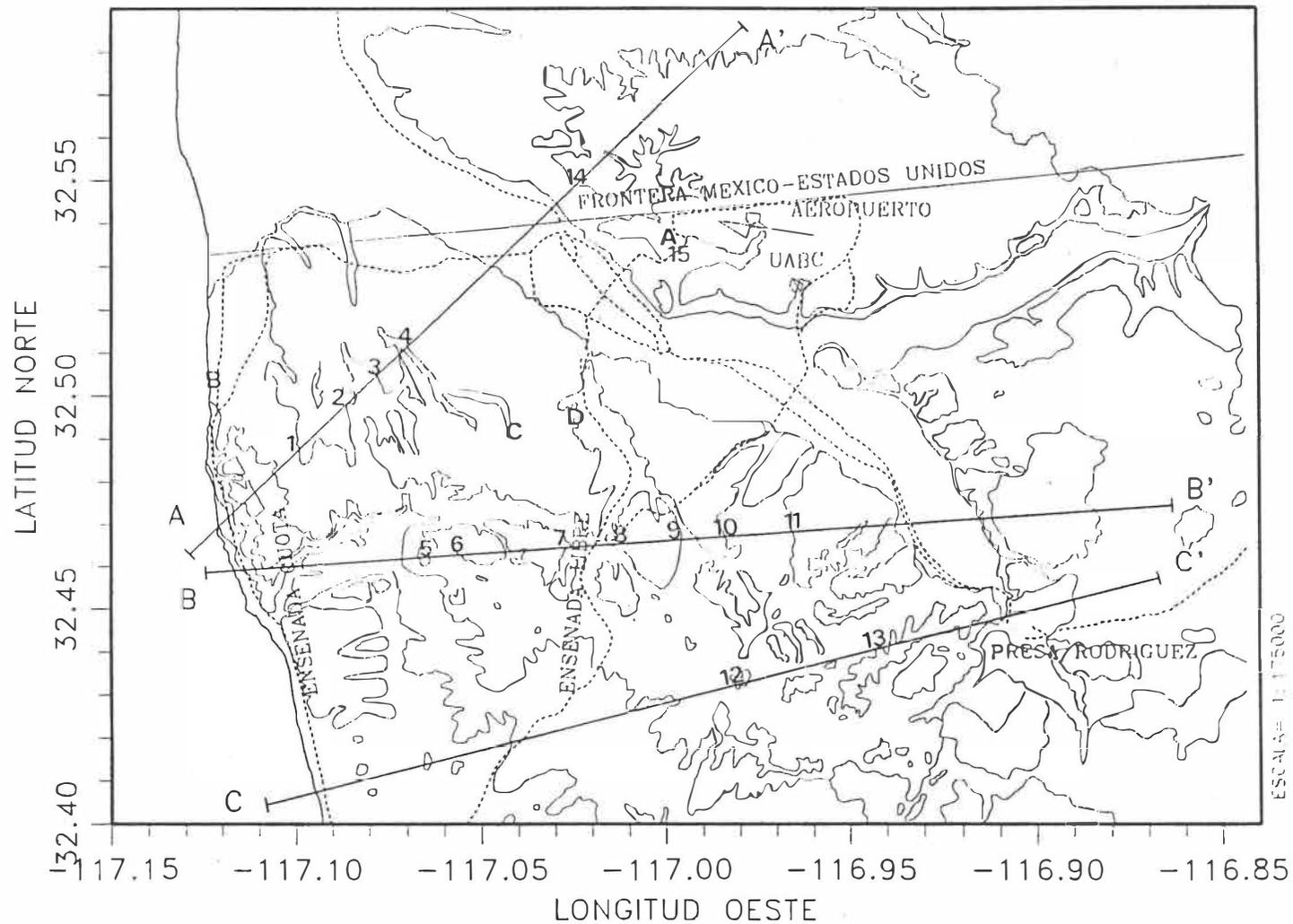


Figura 19. Ubicación de los frentes de deslizamiento asociados al contacto SDs-SDi, numerados del 1 al 15. Los sitios de detalle están identificados con A (Colonia Libertad), B (Playas), C (Televisora) y D (El Rubí).

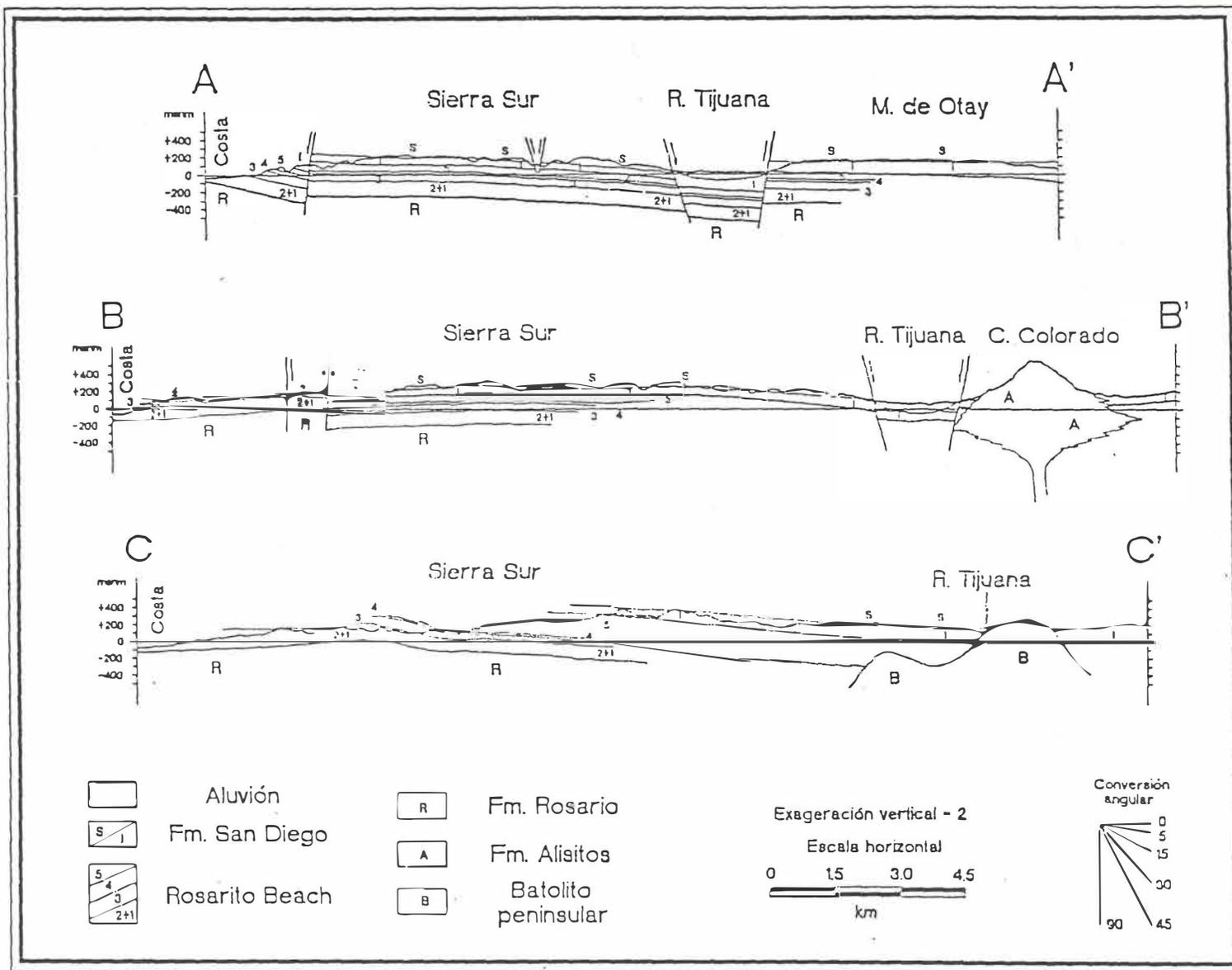


Figura 20. Perfiles estructurales del área de estudio (tomado de Aragón Arreola, 1994), cuya ubicación se muestra en la figura 19. A partir de estos se estimaron los espesores de Sds para los frentes de deslizamiento estudiados.

Tabla II. Parámetros de los frentes de deslizamiento analizados en la ciudad de Tijuana. (los espesores fueron tomados de Aragón-Arreola, 1994).

| Sitio No. | Espesor (m) | Densidad (g/cm^3) | Contacto litológico |
|-----------|-------------|------------------------------|---------------------|
| 1 | 34 | 1.8 | sds / sdi |
| 2 | 14 | 1.8 | sds / sdi |
| 3 | 41 | 1.8 | sds / sdi |
| 4 | 21 | 1.8 | sds / sdi |
| 5 | 41 | 1.8 | sds / sdi |
| 6 | 48 | 1.8 | sds / sdi |
| 7 | 62 | 1.8 | sds / sdi |
| 8 | 48 | 1.8 | sds / sdi |
| 9 | 69 | 1.8 | sds / sdi |
| 10 | 45 | 1.8 | sds / sdi |
| 11 | 55 | 1.8 | sds / sdi |
| 12 | 21 | 1.8 | sds / sdi |
| 13 | 28 | 1.8 | sds / sdi |
| 14 | 15 | 1.8 | sds / sdi |
| 15 | 9 | 1.8 | sds / sdi |

III.1.3 Parámetros de pendientes.

Los parámetros medidos en el campo sobre las laderas son:

- Tipo de material
- Ángulo de la pendiente
- Ancho y separación de las fracturas superficiales
- Desnivel topográfico
- Radio de la superficie circular de deslizamiento.

El tipo de material presente en todos los sitios que se eligieron, corresponde a la formación San Diego, cuya densidad promedio (ρ) es de 1.8 g/cm^3 (Carter y Bentley, 1991).

El ángulo de la pendiente se mide respecto a la horizontal; el desnivel topográfico se mide directamente como la distancia vertical que existe entre el pie de la ladera identificado como el lugar donde aparecen las protuberancias suaves y la zona del escarpe principal que es donde se observa el fracturamiento.

La primera señal de una ladera propensa a deslizarse es la aparición de fracturas perpendiculares a la dirección de la pendiente en la parte superior. Como se explicó en la sección II.2.3, el espesor de la zona de debilidad se infiere a partir de la proyección en superficie de esta zona, la cual se manifiesta en el suelo por medio de fracturas en el escarpe principal (figura 21). De estas fracturas se mide la separación mínima y máxima entre ellas y el ancho total del área donde aparecen.

El radio de la superficie circular del deslizamiento es la distancia que existe entre la zona de fracturas y el pie de la ladera, medido sobre la pendiente.

La Tabla III resume los valores de los parámetros arriba descritos para cuatro sitios, cuya ubicación se encuentra en la figura 19.

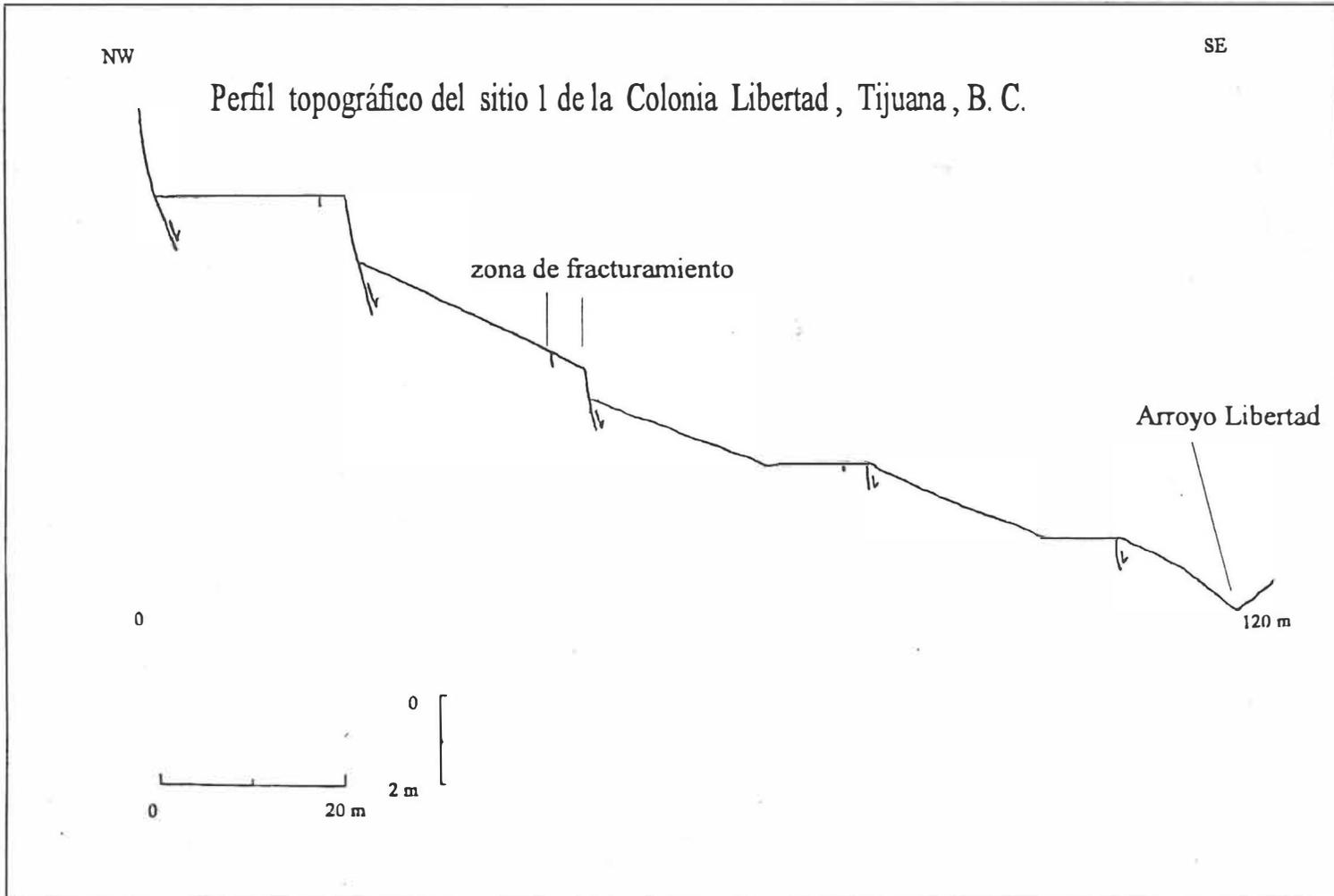


Figura 21. Características estructurales de una ladera propensa a sufrir deslizamiento rotacional.

Tabla III. Parámetros de los sitios donde se realizaron estudios de detalle

| Sitio | Tipo de material | Ángulo de la pendiente | Ancho de la zona de fracturas | Desnivel topográfico | Radio de la superficie de deslizamiento |
|----------|------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| Libertad | SP | 22° | 40 cm | 45 m | 120 m |
| TV | SP | 20° | 40 cm | 39 m | 115 m |
| Playas | SP | 25° | 35 cm | 23 m | 55 m |
| Rubí | SP | 35° | 45 cm | 40 m | 70 m |

III.1.4 Mapa de isosistas.

Se requiere la construcción de un mapa de isosistas esperadas que sirva como dato de entrada al procedimiento para la estimación de las densidades de energía. Para la región de Tijuana no existe un mapa de intensidades observadas a partir de un terremoto con las características de magnitud y proximidad similares a las de las posibles fuentes sismogénicas que en este trabajo se han compilado como posibles generadoras de inestabilidad en las laderas de la región. Por lo tanto es necesario utilizar relaciones teóricas o empíricas que predican la distribución de intensidades sísmicas para una ocurrencia propuesta de terremoto.

No fue posible encontrar una relación que estimara directamente las intensidades incluyendo el efecto de sitio. Debido a que en la región de Tijuana existen suelos aluviales y otros sedimentos que suelen modificar significativamente la respuesta sísmica local, se decidió implementar una técnica para la estimación de intensidades con inclusión de efecto de sitio, la cual se lleva a cabo en dos etapas: 1) predicción del máximo movimiento del suelo (velocidad pico) mediante el empleo de ecuaciones predictivas empíricas propias para esta región, a través de las cuales quedan especificadas la fuente, la trayectoria y el sitio; 2)

conversión de ese máximo movimiento del suelo a valores de intensidad sísmica a través de una ecuación empírica.

A continuación se describirá la aplicación de la primera etapa, a la salida de la cual se tendrán dos mapas con la distribución de velocidades pico del movimiento del suelo: con efecto y sin efecto de sitio.

Newmark y Rosenblueth, 1976, mencionan que las escalas instrumentales de intensidad que se apoyan exclusivamente en la máxima aceleración del terreno o en la traza máxima de algún tipo de sismógrafo guardan poca relación con lo destructivo del movimiento del terreno, ellos además mencionan que la destructividad está directamente relacionada a la energía que el movimiento de la tierra transmite a los seres humanos y a las estructuras por lo que encuentran una correlación mucho mejor, la cual han confirmado, con la máxima velocidad del terreno, esta correlación es mejor aún cuando se toma en cuenta la ordenada media del espectro de pseudovelocidad. Por ello se utilizará una ecuación que predice la máxima velocidad del movimiento del suelo. El éxito en la predicción de la distribución de los máximos movimientos del suelo ante la ocurrencia de un terremoto, depende de la cantidad y calidad de los datos disponibles con respecto a las áreas sismogénicas y a los suelos de la región de estudio.

Existen métodos para obtener mapas predictivos de algunos parámetros útiles a la ingeniería sísmica, como la velocidad del terreno presentada en esta sección. Los métodos para la estimación directa de la respuesta sísmica se basan primordialmente en la posibilidad de contar con tres elementos: a) ecuaciones predictivas que establezcan la relación entre los

parámetros del movimiento y variables como magnitud, distancia y condiciones locales del suelo, b) la especificación de la fuente sísmica y c) la especificación de los efectos de sitio (Joyner y Fumal, 1985). Las ecuaciones predictivas utilizadas en este trabajo son las desarrolladas por Joyner y Boore, 1981, a partir del análisis de regresión de registros de terremotos someros de la costa oeste de los Estados Unidos. La forma que adquiere la ecuación para el cálculo de la velocidad máxima del terreno es:

$$\log v = 2.17 + 0.49 \cdot (M - 6) - \log r - 0.0026 \cdot r - 0.45 \cdot \log \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right) \quad (28)$$

donde: v = velocidad pico del movimiento del suelo

$r = \sqrt{16 + d^2}$; donde: d = distancia mínima entre la traza de la falla y el

sitio de interés

M = magnitud de momento

β = velocidad de propagación de las ondas de corte en los materiales

someros

$\beta_0 = 1190 \text{ m/s}$

En este trabajo se estimó el efecto de sitio en función de las velocidades de ondas de corte (Fumal y Tinsley, 1985). Los valores de β empleados en la estimación del efecto de sitio son los reportados por Acosta *et al.*, 1995, a partir de perfiles cortos de refracción sísmica y mostrados en la figura 22. A partir de la ecuación (28) se pueden obtener dos mapas con la distribución de las velocidades máximas del movimiento del suelo. El primer

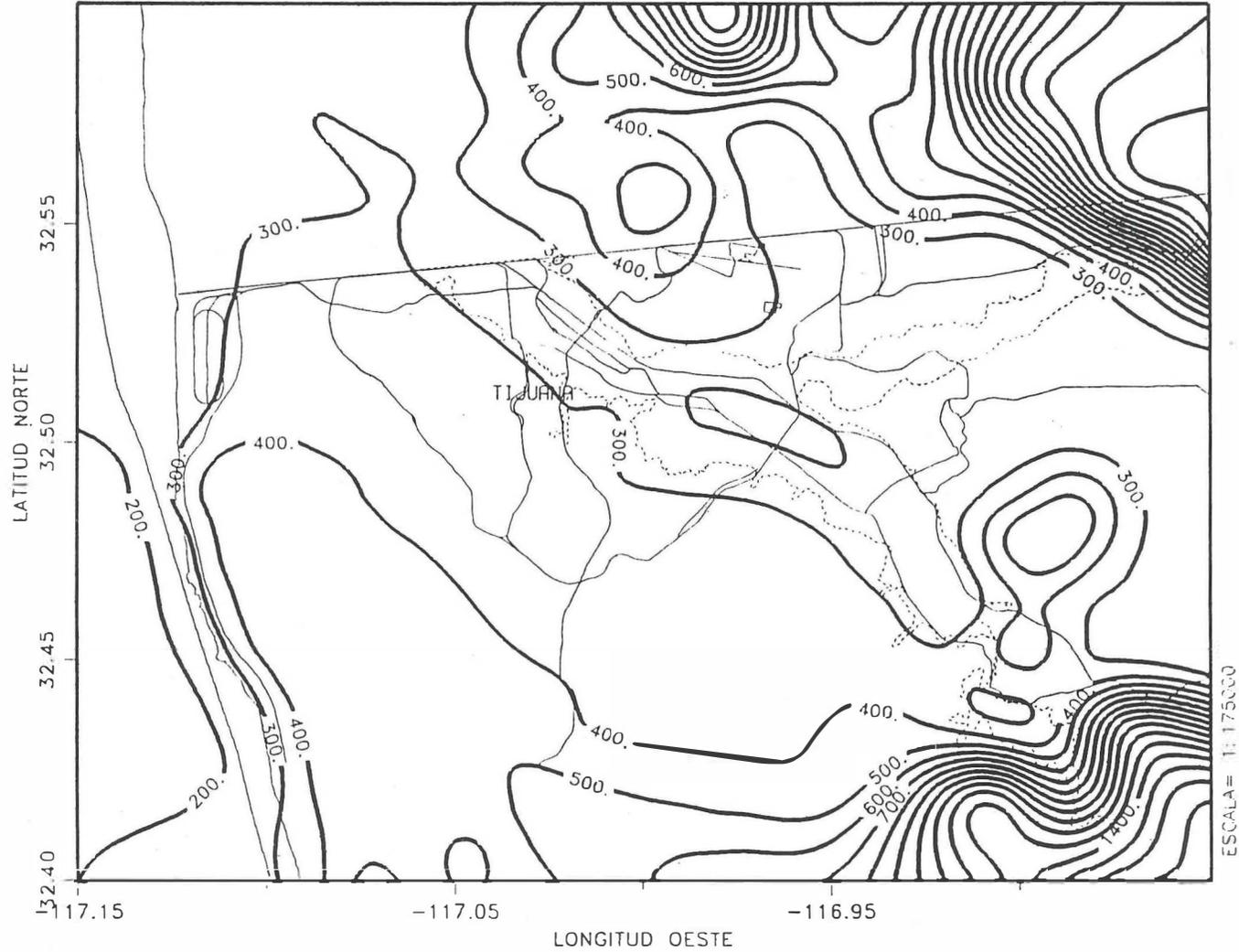


Figura 22. Distribución de las velocidades superficiales de ondas de corte, estimadas por Acosta *et al.*, 1995, a partir de perfiles de refracción.

mapa (figura 23), presenta la distribución de este parámetro sin efecto de sitio, esto se logra cuando en la ecuación (28) es eliminado el último término (donde están involucradas las velocidades). La figura 24 presenta la distribución del mismo parámetro del movimiento del suelo, pero ya con el efecto de sitio incluido a través de sustituir en el último término de la ecuación (28) los valores de velocidad superficial de ondas de corte mostrados en la figura 22.

Debido a exigencias en la metodología para la estimación de densidades de energía se necesitan dos mapas de isosistas uno con efecto de sitio y otro sin él, esa es la razón por la cual se presentan los dos mapas de las figuras 25 y 26.

Por lo general las ecuaciones predictivas del tipo de la ecuación (28), contienen implícita o explícitamente una ley empírica de atenuación que es propia de la región para la cual se estimaron los coeficientes de la ecuación. La ecuación (28) representa un caso particular (estimación de velocidad) de una ecuación más general que permite predecir otros parámetros del movimiento del suelo, tal como la aceleración pico. Con el fin de ilustrar la forma de la atenuación implícita en esta ecuación general, se utilizarán datos de aceleración contra distancia para el sur de California, ya que no fue posible disponer de datos de velocidad del movimiento del suelo. Esto se ilustra en la figura 27.

El siguiente paso es la conversión de los mapas de velocidades pico del movimiento del suelo (v) a mapas de intensidades de Mercalli Modificada. Para esto se utilizó la relación de Esteva y Rosenblueth (1964):

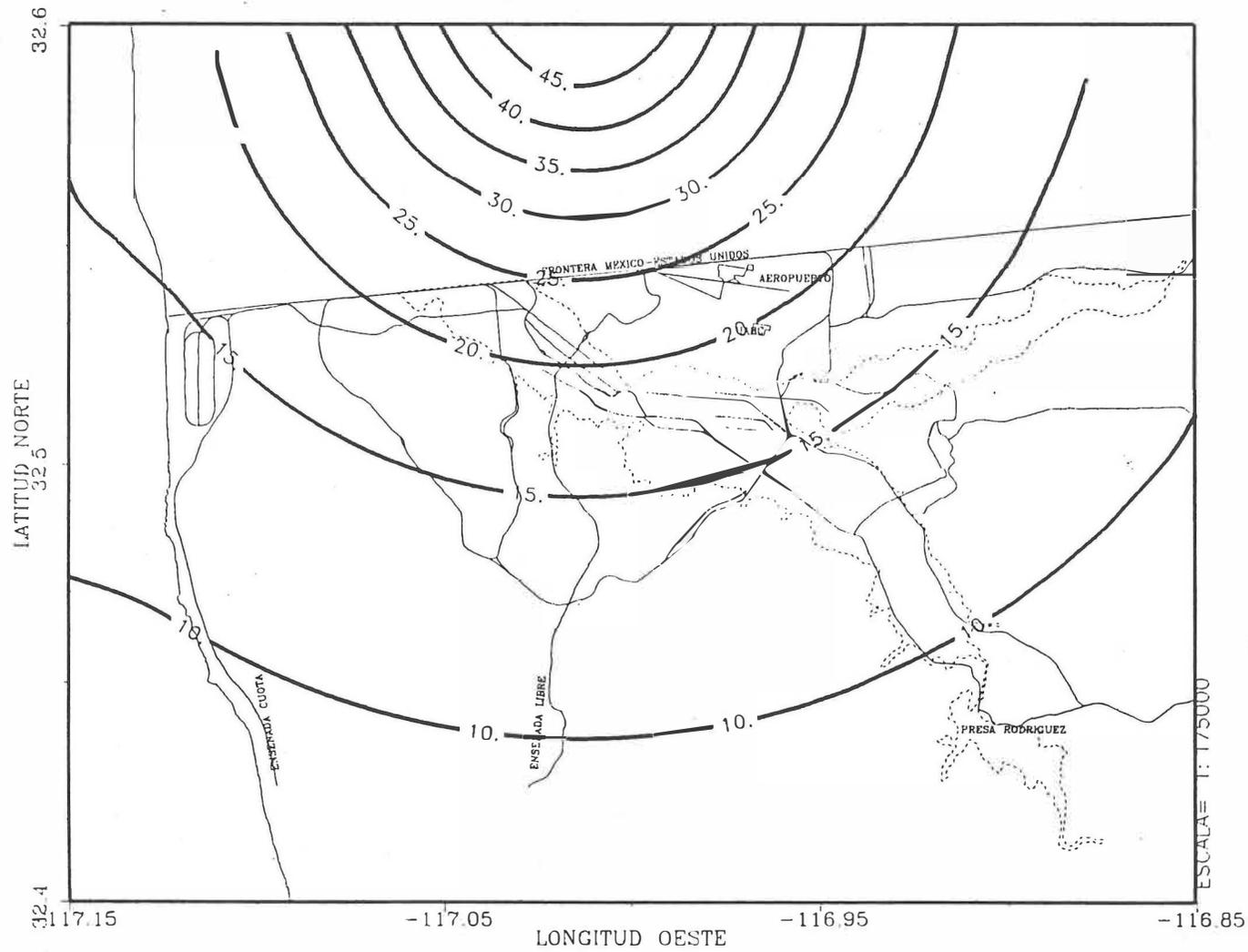


Figura 23. Distribución de las máximas velocidades horizontales sin efecto de sitio predichas por Acosta *et al.*, 1995, para un rompimiento propuesto de la falla La Nación (M_w=6.5).

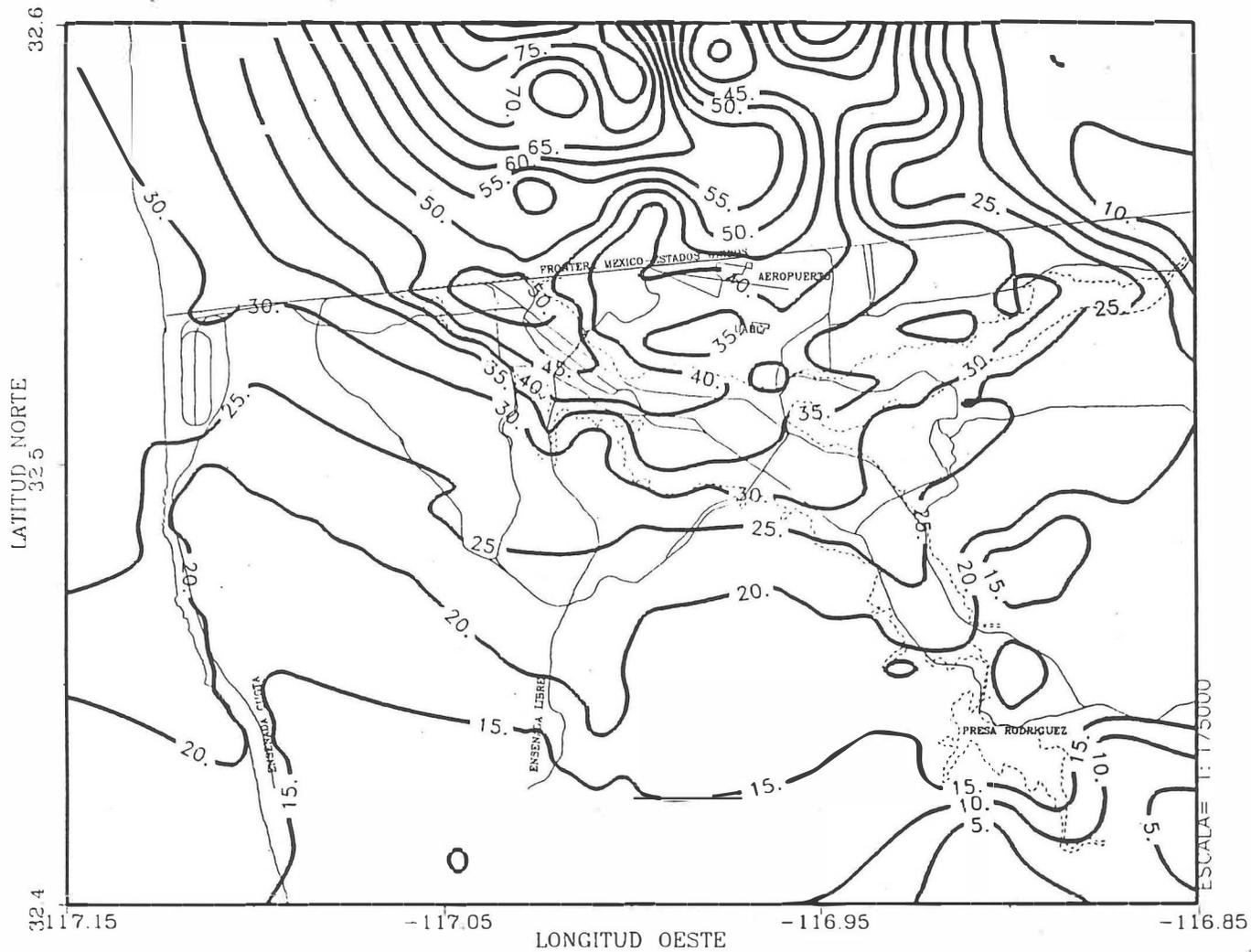


Figura 24. Distribución de las máximas velocidades horizontales con efecto de sitio predichas por Acosta *et al.*, 1995, para un rompimiento propuesto de la falla La Nación (Mw=6.5).

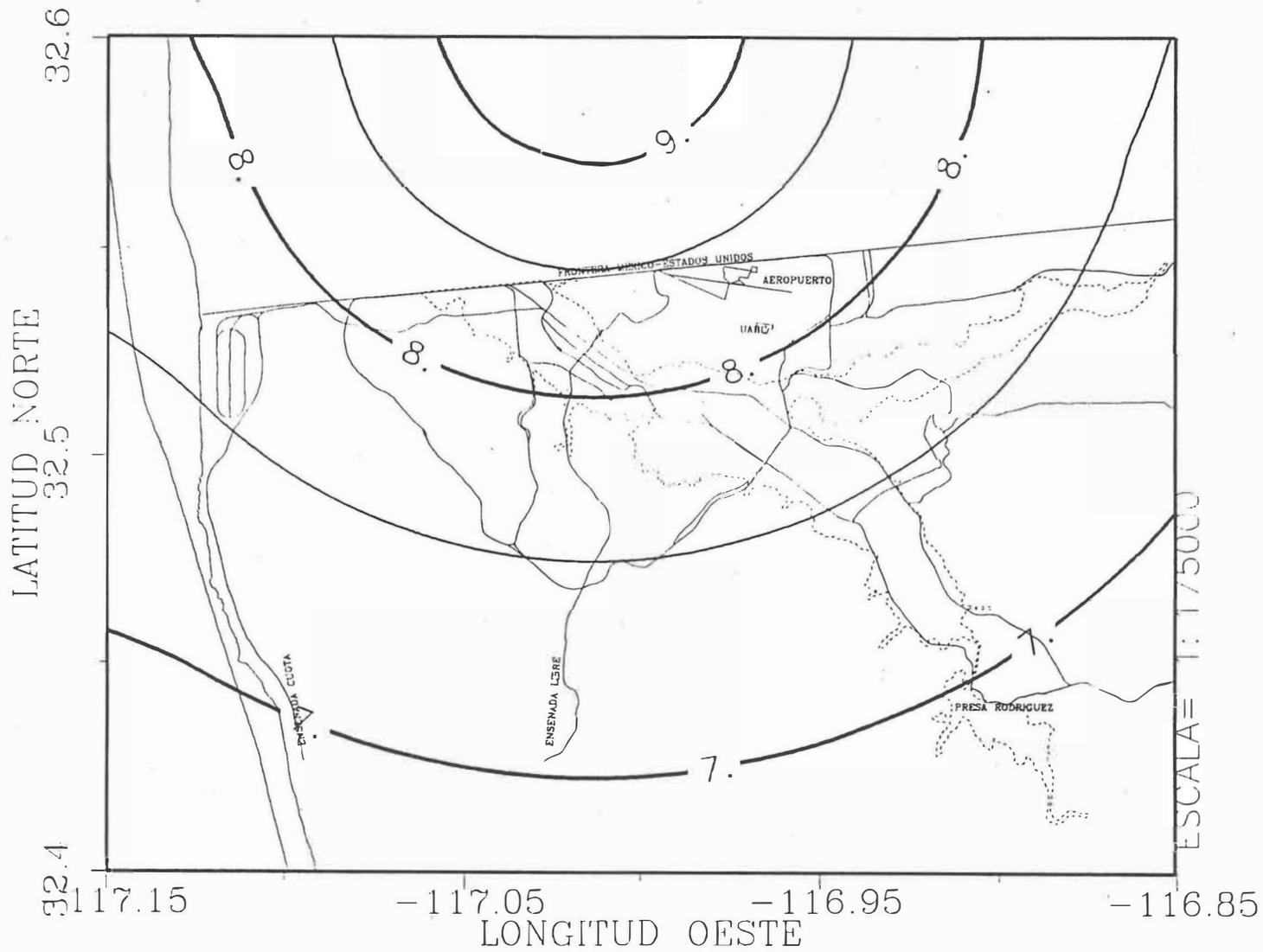


Figura 25. Mapa de intensidades sísmicas predichas para el rompimiento propuesto de la falla La Nación ($M_w=6.5$) sin efecto de sitio.

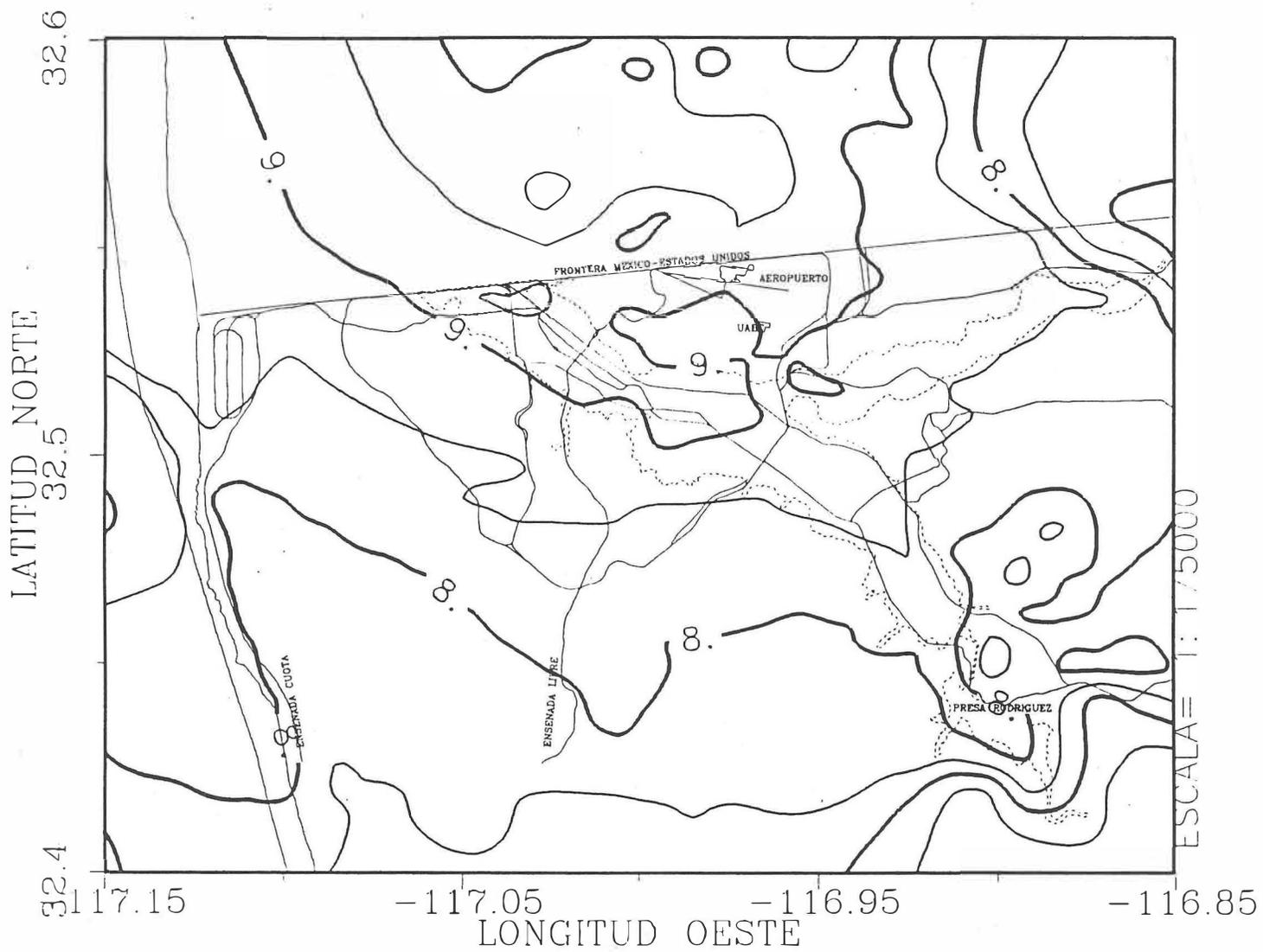


Figura 26. Mapa de intensidades sísmicas predichas para el rompimiento propuesto de la falla La Nación ($M_w=6.5$) con efecto de sitio.

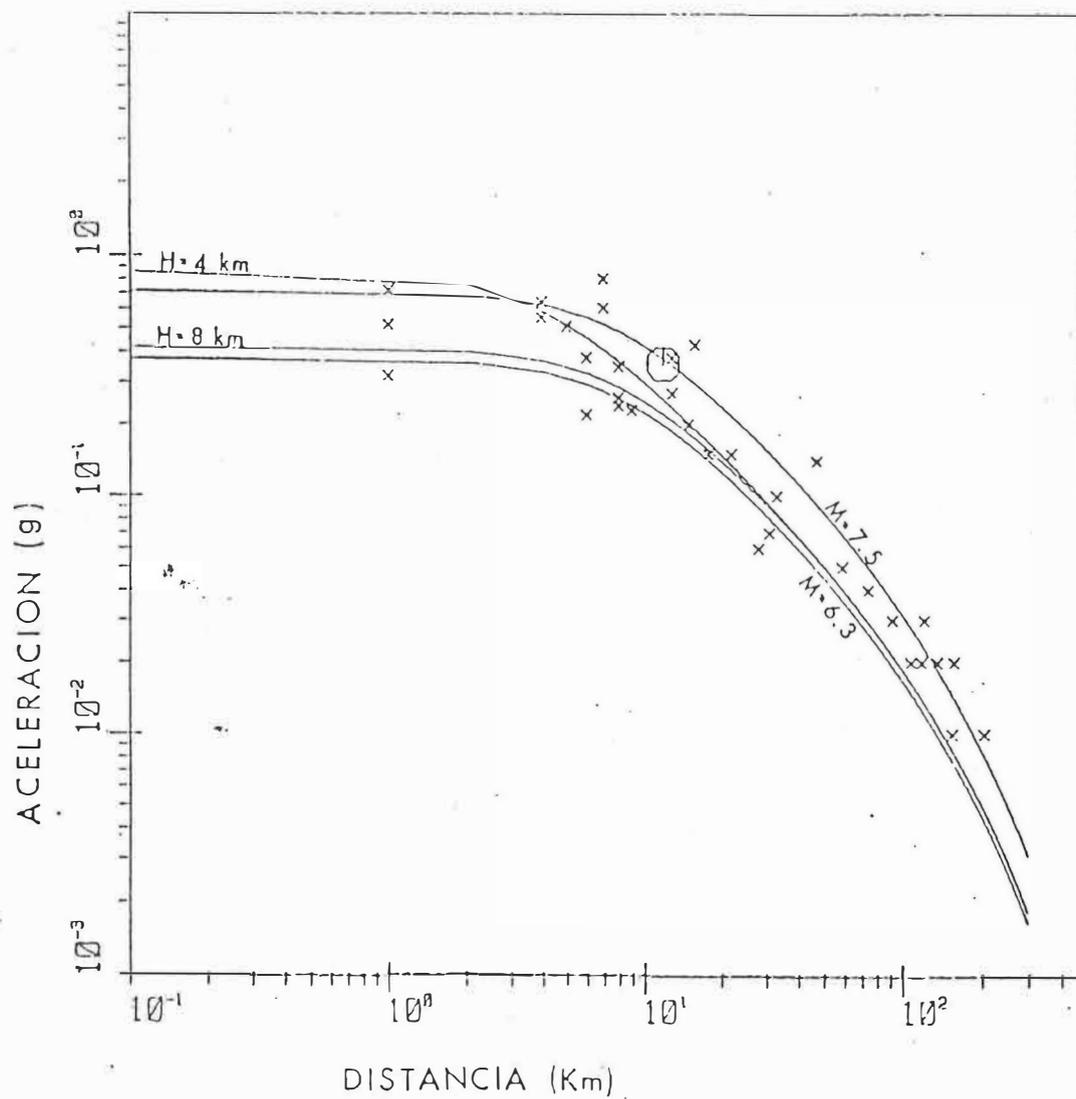


Figura 27. Ilustración del tipo de ecuación predictiva utilizada para la estimación de los máximos movimientos del suelo en la región de estudio.

$$I = \frac{\log 14v}{\log 2} \quad (29)$$

donde: I = Intensidad de Mercalli Modificada

Esta correlación es válida hasta $IMM = X$ y sobrestima IMM para valores de intensidad mayores. Las figuras 25 y 26 presentan los mapas con las isosistas predichas para el rompimiento de la falla La Nación ($M_w=6.5$) obtenidos sustituyendo en la ecuación (29) los datos de las velocidades máximas del terreno (v) presentadas en las figuras 23 y 24. Los mapas de las figuras 25 y 26 (intensidades de Mercalli Modificada, IMM) no deben ser considerados como base para estudios de uso de suelo o de microzonación para efectos de diseño de construcciones, sino más apropiadamente como información complementaria a otros tipos de estudio, como modelado numérico de los efectos locales y de sitio, estadística sísmica, espectros de respuesta observados, mecánica de suelos y otros.

El mapa de la figura 25 no incluye el efecto de sitio, ya que será utilizado para el cálculo de los radios de las área circulares con densidad de energía constante; ya que el modelo para el cálculo de las densidades de energía sísmicas en su estado actual requiere de frentes de ondas esféricos que en la superficie coincidan con bandas de intensidades sísmicas concéntricas. El efecto de sitio será tomado en cuenta a continuación a través de un procedimiento independiente, basado en las isosistas modificadas de la figura 26. Sobre este mapa se localizarán los sitios que se analizarán en las secciones siguientes; la ubicación de

cada uno de estos puntos dentro de las diferentes bandas determinará la cantidad de densidad de energía que le será aplicada en el análisis dinámico de estabilidad.

Para propósitos de comparación se resumen a continuación los resultados de otros estudios encontrados en la literatura. Agnew *et al.*, 1979, reportan un máximo de IMM = VII para la sismicidad histórica en la región desde 1800. Reichle, *et al.*, 1990, estiman una intensidad máxima de IMM = IX sobre depósitos aluviales y rellenos artificiales en el área metropolitana Tijuana-San Diego, utilizando ecuaciones predictivas empíricas para un rompimiento de la falla Silver Strand (M=6.8). Sangines *et al.*, 1991, utilizaron una relación empírica de Trifunac, 1976 para calcular una intensidad máxima de IMM = X a partir de un rompimiento de la falla Rose Canyon (M=7). En lo que respecta a fuentes sismogénicas más lejanas, como la falla Imperial que rompió en 1979 con M=6, produce intensidades máximas de IMM = V en el área de Tijuana (Reagor *et al.*, 1985)

III.2 Procesamiento y resultados.

III.2.1 Estimación de las densidades de energía.

Se utilizarán los parámetros de fuente para la falla La Nación especificados en la Tabla I, los cuales se sustituirán en las ecuaciones (13, 14 y 15) para estimar el momento sísmico, la magnitud de momento y la energía sísmica liberada en esta falla. La Tabla IV presenta estas estimaciones.

Tabla IV. Parámetros de fuente predichos para la falla La Nación, cuyo rompimiento se propone.

| Falla | Momento (<i>dinas · cm</i>) | Magnitud de momento | Energía sísmica (<i>ergios</i>) |
|-----------|----------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| La Nación | 8.128 E25 | 6.5 | 3.548 E21 |

A continuación se repartirá la energía sísmica de la Tabla IV dentro de las zonas de intensidad constante definidas en el mapa de la figura 25 usando las distancias o radios de las áreas circulares, cuyos valores (km) se resumen en la tabla V.

Tabla V. Distancias (km) estimadas a los límites superiores de las zonas de densidad de energía constante.

| <i>IMM</i> ⇒ ↓ <i>Falla</i> | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| La Nación | 99.0 | 63.9 | 37.4 | 20.2 | 10.4 | 2.7 | 0.6 |

Se utilizan las ecuaciones (16 a 21) para la estimación de la densidad de energía por unidad de área correspondiente a cada una de las zonas cuyos radios aparecen en la Tabla V. La Tabla VI resume los valores de la energía total asignada a cada zona, las áreas de los frentes de onda involucrados, las densidades de energía totales y las que actúan en los planos horizontal y vertical, para la falla La Nación.

Tabla VI. Distribución de áreas y energías para las diferentes zonas producidas por el rompimiento propuesto de la falla La Nación.

| IMM | A_r | A_c_j | E_j | Eh_j | Ev_j | ϵ_r |
|------|-----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| IV | 124420.00 | 55957.80 | 1.60 E21 | 1.10 E21 | 4.88 E20 | 5.33 E15 |
| V | 52567.80 | 22220.10 | 1.50 E21 | 1.06 E21 | 4.37 E20 | 2.13 E16 |
| VI | 18787.00 | 6964.08 | 1.31 E21 | 9.66 E20 | 3.49 E20 | 1.05 E17 |
| VII | 6409.63 | 1785.79 | 9.88 E20 | 7.70 E20 | 2.18 E20 | 4.69 E17 |
| VIII | 2602.78 | 397.13 | 5.41 E20 | 4.56 E20 | 8.50 E19 | 1.52 E18 |
| IX | 1348.25 | 23.30 | 6.13 E19 | 5.80 E19 | 3.27 E18 | 2.66 E18 |
| X | 1261.16 | 1.13 | 3.18 E18 | 3.14 E18 | 4.00 E16 | - |

donde: IMM = Escala de intensidades de Mercalli modificada

A_r = área total del frente de onda a la distancia S_j

A_c_j = área total del casquete que sobresale a la superficie

E_j = energía sísmica total asignada dentro de la zona j

E_{h_j} = energía sísmica total actuando en el plano horizontal

E_{v_j} = energía sísmica total actuando en el plano vertical

ϵ_r = densidad de energía por unidad de área dentro de la zona j

III.2.2 Estimación de los Factores de Conversión.

En esta tesis se presenta un factor que relaciona el cambio del *factor de seguridad estático* a *factor de seguridad dinámico* que experimenta un sitio o un frente de deslizamiento cuando está sujeto a una carga dinámica inducida por un sismo. Este factor se denominará el *Factor de Conversión*.

Definición: Es una medida cuantitativa de la relación entre el factor de seguridad estático y dinámico para una ladera con materiales propensos a sufrir un deslizamiento rotacional. Físicamente representa el número de veces que disminuye el factor de seguridad estático como resultado de la aplicación de una sollicitación sísmica en la base de la ladera. Representa además una calificación relativa del peligro sísmico de deslizamientos.

Antes de calcular el FC se hará un ejercicio en donde se presente la evolución de los valores del FS para diferentes ángulos de la pendiente con el objetivo de saber cuál es el rango de ángulos de pendientes que han logrado sobrevivir bajo condiciones estáticas para el

tipo de material en la región de estudio. En la Tabla VII se observa el valor del *factor de conversión* obtenido para un frente propenso a deslizamiento (sitio 6). Este frente se localiza en la banda de intensidad VII producto del rompimiento propuesto de la falla La Nación, el espesor de la masa es 48 m y el espesor de la zona de debilidad es de 40 cm. Esta tabla además presenta los valores de los factores de seguridad estáticos y dinámicos obtenidos.

Se calcularon los FS para diferentes ángulos de inclinación de la ladera ($0 - 90^\circ$), considerando una densidad del material de 1.8 g/cm^3 ; el ángulo de fricción interna del material (ϕ), bajo condiciones estáticas, de acuerdo con la ecuación (27), será

$$\phi = 30.096 \cdot 1.8 - 17.5236 = 36.65^\circ$$

Los ángulos de fricción interna dinámicos son obtenidos también con la ecuación (27), pero con la nueva densidad del caso dinámico. Una vez calculados los ángulos de fricción interna podemos usar la ecuación (9) para estimar los FS y FSD. En la ecuación (9) se puede notar que cuando $\alpha > \phi$ ($\alpha > 36.65^\circ$) se produce el deslizamiento bajo condiciones estáticas, tal como se corrobora en la Tabla VII, donde se observa que para valores de $\alpha > 37^\circ$ no es necesario aplicar una carga dinámica sobre la pendiente para que se produzca el deslizamiento, ya que para esos ángulos los FS son menores que 1.0. Es importante observar que en todos los cálculos subsecuentes sólo se necesitará trabajar con ángulos de las pendientes menores o iguales a 36° , ya que después de este ángulo la ladera no necesita una carga extra para deslizarse. Este resultado numérico predicho por los

modelos y métodos de esta tesis es corroborado por observaciones de campo efectuadas por Delgado-Argote *et al.*, 1996. quienes encontraron pendientes de laderas con ángulos máximos de 37° en el área de Tijuana.

El *factor de conversión* (FC) se obtuvo a partir de razón FS / FSD . Como se puede observar en la Tabla VII. el FC se mantuvo aproximadamente constante (1.180 ± 0.018) en el rango de inclinaciones de la ladera de $0 - 36^\circ$. Por lo tanto, para este ejemplo se puede ver que el factor de seguridad estático disminuyó su valor entre el 116 y 120 % para producir los correspondientes FSD.

En la Tabla VII se utilizaron las dos ecuaciones para el cálculo de ϕ . Como se observa en el ejercicio anterior, el FC se mantuvo prácticamente constante a pesar de la amplia variación que experimentaron los factores de seguridad estático y dinámico. Con el objetivo de generalizar esta observación, se hicieron pruebas numéricas de la sensibilidad del factor de conversión con respecto al ángulo de la pendiente para un rango muy amplio de solicitaciones sísmicas. En el apéndice B se presentan estas pruebas, cuyas conclusiones son las siguientes:

Propiedades del factor de conversión (FC):

- El FC es prácticamente independiente del valor de la pendiente para todo el rango posible de energías sísmicas esperadas en la región.
- El valor del FC se incrementa con la densidad de energía inyectada por el terremoto.
- El valor se incrementa con la disminución del espesor de la capa deslizante.

El cálculo del factor de conversión se aplicó en los 15 sitios con frentes de deslizamiento, cuyos parámetros se resumen en la Tabla II aplicando en cada uno de esos sitios la densidad de energía correspondiente a su ubicación dentro de las zonas de densidad de energía constantes presentadas en la Tabla VI. Los datos de las Tablas II y III son sustituidos en las ecuaciones (11) y de la (22 a la 27) para obtener los valores del FC mostrados en la Tabla VIII. En esta tabla se presentan los parámetros dinámicos estimados para el frente de deslizamiento 6, generados por el rompimiento propuesto de la falla La Nación ($M_w = 6.5$). Este sitio se localiza en la banda de intensidad VII, cuyo espesor es de 48 m y el ancho de la zona de debilidad es de 40 cm.

Tabla VII. Parámetros dinámicos estimados para el frente de deslizamiento 6 generados por el rompimiento propuesto de la falla La Nación ($M_w=6.5$)

| ρ | ρ' | ϕ | ϕ' | FS | FSD | FC | α |
|--------|---------|--------|---------|--------|--------|-------|----------|
| 1.8 | 1.675 | 36.650 | 32.657 | - | - | - | 0.0 |
| 1.8 | 1.675 | 36.650 | 32.656 | 42.625 | 36.718 | 1.161 | 1.0 |
| 1.8 | 1.675 | 36.650 | 32.655 | 21.306 | 18.352 | 1.161 | 2.0 |
| 1.8 | 1.674 | 36.650 | 32.652 | 14.197 | 12.227 | 1.161 | 3.0 |
| 1.8 | 1.674 | 36.650 | 32.648 | 10.640 | 9.163 | 1.161 | 4.0 |
| 1.8 | 1.674 | 36.650 | 32.643 | 8.504 | 7.322 | 1.161 | 5.0 |
| 1.8 | 1.674 | 36.650 | 32.638 | 7.079 | 6.093 | 1.162 | 6.0 |
| 1.8 | 1.674 | 36.650 | 32.631 | 6.060 | 5.215 | 1.162 | 7.0 |
| 1.8 | 1.673 | 36.650 | 32.622 | 5.294 | 4.554 | 1.162 | 8.0 |
| 1.8 | 1.673 | 36.650 | 32.613 | 4.698 | 4.040 | 1.163 | 9.0 |
| 1.8 | 1.673 | 36.650 | 32.603 | 4.220 | 3.627 | 1.163 | 10.0 |
| 1.8 | 1.672 | 36.650 | 32.591 | 3.828 | 3.289 | 1.164 | 11.0 |
| 1.8 | 1.672 | 36.650 | 32.579 | 3.500 | 3.006 | 1.164 | 12.0 |
| 1.8 | 1.672 | 36.650 | 32.565 | 3.223 | 2.766 | 1.165 | 13.0 |
| 1.8 | 1.671 | 36.650 | 32.550 | 2.984 | 2.560 | 1.166 | 14.0 |
| 1.8 | 1.671 | 36.650 | 32.534 | 2.777 | 2.381 | 1.166 | 15.0 |
| 1.8 | 1.670 | 36.650 | 32.516 | 2.595 | 2.223 | 1.167 | 16.0 |

| Tabla VII. Continuación... | | | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| 1.8 | 1.669 | 36.650 | 32.498 | 2.434 | 2.084 | 1.168 | 17.0 |
| 1.8 | 1.669 | 36.650 | 32.478 | 2.290 | 1.959 | 1.169 | 18.0 |
| 1.8 | 1.668 | 36.650 | 32.456 | 2.161 | 1.847 | 1.170 | 19.0 |
| 1.8 | 1.667 | 36.650 | 32.433 | 2.044 | 1.746 | 1.171 | 20.0 |
| 1.8 | 1.666 | 36.650 | 32.409 | 1.938 | 1.654 | 1.172 | 21.0 |
| 1.8 | 1.666 | 36.650 | 32.384 | 1.842 | 1.570 | 1.173 | 22.0 |
| 1.8 | 1.665 | 36.650 | 32.357 | 1.753 | 1.493 | 1.174 | 23.0 |
| 1.8 | 1.664 | 36.650 | 32.328 | 1.671 | 1.421 | 1.176 | 24.0 |
| 1.8 | 1.663 | 36.650 | 32.298 | 1.596 | 1.356 | 1.177 | 25.0 |
| 1.8 | 1.662 | 36.650 | 32.266 | 1.525 | 1.294 | 1.178 | 26.0 |
| 1.8 | 1.660 | 36.650 | 32.233 | 1.460 | 1.237 | 1.180 | 27.0 |
| 1.8 | 1.659 | 36.650 | 32.198 | 1.399 | 1.184 | 1.182 | 28.0 |
| 1.8 | 1.658 | 36.650 | 32.161 | 1.342 | 1.134 | 1.183 | 29.0 |
| 1.8 | 1.657 | 36.650 | 32.122 | 1.289 | 1.087 | 1.185 | 30.0 |
| 1.8 | 1.655 | 36.650 | 32.081 | 1.238 | 1.043 | 1.187 | 31.0 |
| 1.8 | 1.654 | 36.650 | 31.038 | 1.191 | 1.001 | 1.189 | 32.0 |
| 1.8 | 1.652 | 36.650 | 31.993 | 1.146 | 0.962 | 1.191 | 33.0 |
| 1.8 | 1.651 | 36.650 | 31.946 | 1.103 | 0.924 | 1.193 | 34.0 |
| 1.8 | 1.649 | 36.650 | 31.897 | 1.063 | 0.889 | 1.195 | 35.0 |
| 1.8 | 1.648 | 36.650 | 31.845 | 1.024 | 0.855 | 1.198 | 36.0 |

| Tabla VII. Continuación... | | | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| 1.8 | 1.646 | 36.650 | 31.791 | 0.987 | 0.823 | 1.200 | 37.0 |
| 1.8 | 1.644 | 36.650 | 31.734 | 0.952 | 0.792 | 1.203 | 38.0 |
| 1.8 | 1.642 | 36.650 | 31.674 | 0.919 | 0.762 | 1.206 | 39.0 |
| 1.8 | 1.640 | 36.650 | 31.612 | 0.887 | 0.734 | 1.209 | 40.0 |
| 1.8 | 1.638 | 36.650 | 31.546 | 0.856 | 0.706 | 1.212 | 41.0 |
| 1.8 | 1.635 | 36.650 | 31.477 | 0.826 | 0.680 | 1.215 | 42.0 |
| 1.8 | 1.633 | 36.650 | 31.405 | 0.798 | 0.655 | 1.219 | 43.0 |
| 1.8 | 1.630 | 36.650 | 31.329 | 0.770 | 0.630 | 1.222 | 44.0 |
| 1.8 | 1.628 | 36.650 | 31.250 | 0.744 | 0.607 | 1.226 | 45.0 |
| 1.8 | 1.625 | 36.650 | 31.166 | 0.718 | 0.584 | 1.230 | 46.0 |
| 1.8 | 1.622 | 36.650 | 31.078 | 0.694 | 0.562 | 1.234 | 47.0 |
| 1.8 | 1.619 | 36.650 | 30.986 | 0.670 | 0.541 | 1.239 | 48.0 |
| 1.8 | 1.616 | 36.650 | 30.889 | 0.647 | 0.520 | 1.244 | 49.0 |
| 1.8 | 1.612 | 36.650 | 30.787 | 0.624 | 0.500 | 1.249 | 50.0 |
| 1.8 | 1.609 | 36.650 | 30.679 | 0.602 | 0.480 | 1.254 | 51.0 |
| 1.8 | 1.605 | 36.650 | 30.566 | 0.581 | 0.461 | 1.260 | 52.0 |
| 1.8 | 1.601 | 36.650 | 30.446 | 0.561 | 0.443 | 1.266 | 53.0 |
| 1.8 | 1.597 | 36.650 | 30.320 | 0.541 | 0.425 | 1.272 | 54.0 |
| 1.8 | 1.592 | 36.650 | 30.186 | 0.521 | 0.407 | 1.279 | 55.0 |
| 1.8 | 1.587 | 36.650 | 30.045 | 0.502 | 0.390 | 1.286 | 56.0 |

| Tabla VII. Continuación... | | | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| 1.8 | 1.582 | 36.650 | 29.895 | 0.483 | 0.373 | 1.294 | 57.0 |
| 1.8 | 1.577 | 36.650 | 29.737 | 0.465 | 0.357 | 1.302 | 58.0 |
| 1.8 | 1.572 | 36.650 | 29.568 | 0.447 | 0.341 | 1.311 | 59.0 |
| 1.8 | 1.566 | 36.650 | 29.389 | 0.430 | 0.325 | 1.321 | 60.0 |
| 1.8 | 1.559 | 36.650 | 29.198 | 0.412 | 0.310 | 1.331 | 61.0 |
| 1.8 | 1.552 | 36.650 | 28.995 | 0.396 | 0.295 | 1.343 | 62.0 |
| 1.8 | 1.545 | 36.650 | 28.778 | 0.379 | 0.280 | 1.355 | 63.0 |
| 1.8 | 1.537 | 36.650 | 28.545 | 0.363 | 0.265 | 1.368 | 64.0 |
| 1.8 | 1.529 | 36.650 | 28.296 | 0.347 | 0.251 | 1.382 | 65.0 |
| 1.8 | 1.520 | 36.650 | 26.828 | 0.331 | 0.225 | 1.471 | 66.0 |
| 1.8 | 1.511 | 36.650 | 26.659 | 0.316 | 0.213 | 1.482 | 67.0 |
| 1.8 | 1.500 | 36.650 | 26.475 | 0.301 | 0.201 | 1.494 | 68.0 |
| 1.8 | 1.489 | 36.650 | 26.277 | 0.286 | 0.190 | 1.507 | 69.0 |
| 1.8 | 1.477 | 36.650 | 26.062 | 0.271 | 0.178 | 1.521 | 70.0 |
| 1.8 | 1.396 | 36.650 | 24.639 | 0.199 | 0.123 | 1.622 | 75.0 |
| 1.8 | 1.258 | 36.650 | 22.196 | 0.131 | 0.072 | 1.823 | 80.0 |
| 1.8 | 0.968 | 36.650 | 17.088 | 0.065 | 0.027 | 2.420 | 85.0 |
| 1.8 | 0.0 | 36.650 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 90.0 |

Tabla VIII. Factores de conversión estimados para diferentes frentes de deslizamientos en la ciudad de Tijuana para el rompimiento de la falla La Nación ($M_w=6.5$)

| Sitio No. | Espesor (m) | Ángulo de la pendiente (°) | Densidad (gr/cm^3) | Contacto litológico | Factor de conversión FS / FSD | Banda de Intensidad (IMM) |
|-----------|-------------|----------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 5 | 41 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 1.416 ± 0.078 | VII |
| 6 | 48 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 1.321 ± 0.036 | VII |
| 2 | 14 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 3.597 ± 0.247 | VIII |
| 4 | 21 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 2.815 ± 0.166 | VIII |
| 12 | 21 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 2.815 ± 0.166 | VIII |
| 13 | 28 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 2.420 ± 0.126 | VIII |
| 1 | 34 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 2.210 ± 0.104 | VIII |
| 3 | 41 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 2.042 ± 0.086 | VIII |
| 10 | 45 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 1.969 ± 0.079 | VIII |
| 8 | 48 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 1.922 ± 0.074 | VIII |
| 11 | 55 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 1.832 ± 0.065 | VIII |
| 7 | 62 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 1.762 ± 0.058 | VIII |
| 9 | 69 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 1.706 ± 0.052 | VIII |
| 15 | 15 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 5.072 ± 0.400 | IX |
| 14 | 15 | 0 - 37 | 1.8 | sds / sdi | 5.072 ± 0.400 | IX |

III.2.3 Estimación de Factores de Seguridad Estáticos y Dinámicos.

En esta sección se presenta el cálculo de los valores de los factores de seguridad estáticos y dinámicos para cuatro sitios.

Sitio Colonia libertad. Este punto se encuentra localizado en la parte noreste de la ciudad, en la mesa de Otay (figura 19) y forma parte de una zona de alta inestabilidad, en la cual ya se han producido o reactivado deslizamientos. La importancia de realizar estudios de estabilidad de pendientes en esta zona se debe a que el área está densamente poblada. Se eligió un sitio característico en el cual se aplicó la metodología antes mencionada para determinar su criterio de estabilidad bajo condiciones dinámicas. El sitio está limitado hacia el oriente por el arroyo La Mona y hacia el sur por el arroyo Libertad, este punto ya ha presentado movimiento (Delgado-Argote *et al.*, 1996; Aragón-Arreola, 1994). Se realizó trabajo de campo a detalle. para reconocer el tipo de material presente, se revisó la existencia de fracturamiento en la superficie midiendo el ancho de la zona de fracturas y el grosor de cada una de ellas y se levantó un perfil topográfico a lo largo de la ladera. El ancho de la zona de fracturas representa la zona de debilitamiento. La figura 27 presenta el perfil topográfico y la zona de fracturamiento encontrada. El tipo de material corresponde a los sedimentos de los miembros inferior y superior de la Fm. San Diego, formados por conglomerados con matriz arenosa o limo-arenosa, areniscas finas a muy finas con lentes limo-arcillosos y areniscas limosas con lentes de gravilla. A lo largo del perfil se identificaron zonas de fracturas y fallas perpendiculares a la dirección de la pendiente. El ancho promedio

de las franjas de fracturamiento es de 40 cm, el ángulo de la pendiente es de 22° y el perfil tiene una longitud de 120 m.

El espesor de la masa deslizante se obtuvo de la siguiente manera: primero se estimó el volumen total del material propenso a deslizarse para lo que se utilizó un método gráfico para inscribir una esfera a través de tres puntos, los dos extremos de la ladera (pie y cabecera) y un tercer punto que representa el fondo de la concavidad, el cual de acuerdo a Brunsden, 1979, está situado a 0.24 veces la longitud de la pendiente de deslizamiento. Una vez calculado el volumen, aprovechamos la equivalencia en el análisis de un deslizamiento rotacional y uno traslacional (sección II.1.1) para utilizar el mismo volumen recién calculado expresado como una losa cilíndrica de diámetro igual a la longitud de la pendiente de deslizamiento, a partir de la cual se calculó el espesor equivalente.

El factor de seguridad estático es 1.84 y su factor de seguridad dinámico es 0.37

Sitio Televisora. Este punto se localiza en la parte poniente del centro de Tijuana (figura 19). La litología local está formada por areniscas y conglomerados. La franja de fracturamiento perpendicular a la pendiente tiene un ancho de 40 cm y existen fracturas con un ancho de 8 cm. La longitud del perfil estudiado es de 115 m y tiene una pendiente de 20° .

El factor de seguridad estático es 2.0 y su factor de seguridad dinámico es 0.32

Sitio Playas de Tijuana. Este punto se localiza en la línea de costa (figura 19). Aragón-Arreola, 1994 menciona que en marzo de 1993 se produjo un deslizamiento que

abarcó un área cercana a los 6.500 m^2 , afectando cuatro casas habitación y la estación de bombeo del Sistema de Aguas Residuales de Tijuana. Actualmente el sistema de fracturamiento se observa en banquetas y pavimentos, teniendo un ancho de la franja de fracturamiento de 35 cm. La longitud del perfil es de 55 m y la pendiente de 25° . El tipo de material presente es arenas de grano medio con arcillas.

El factor de seguridad estático es de: 1.59 y su factor dinámico de 0.18

Sitio Fraccionamiento El Rubí. El punto se encuentra localizado en el centro poniente de la ciudad (figura 19). Sobre esta ladera se han construido casas habitacionales, de las cuales, cuando se realizó el trabajo de campo, algunas estaban abandonadas. En una área de 70 m existen indicios de un deslizamiento del tipo rotacional. La litología está formada por arenas de grano medio a grueso con intercalaciones de conglomerados. La longitud del perfil es de 70 m, con un ángulo de la pendiente de 35° y un ancho de la franja de fracturamiento de 45 cm.

El factor de seguridad es de: 1.06 y su factor dinámico de 0.15

La tabla IX resume los valores obtenidos de los FS, FSD y FC en los cuatro sitios.

Tabla IX. Resultados del análisis dinámico de estabilidad de pendientes, aplicado en los cuatro puntos donde se hicieron estudios a detalle, con mediciones *in situ*.

| Sitio | FS | FSD | FC |
|----------|------|------|------|
| Libertad | 1.84 | 0.37 | 4.94 |
| TV | 2.0 | 0.32 | 6.43 |
| Playas | 1.59 | 0.18 | 8.65 |
| Rubí | 1.06 | 0.15 | 7.19 |

IV. DISCUSIÓN

IV.1 Mapas con factores de conversión.

En esta sección se presenta la distribución de los factores de conversión obtenidos en los 15 sitios para el rompimiento de falla propuesto. En la figura 19, se observa la ubicación de los 15 sitios y en la Tabla VIII la banda de intensidad que les corresponde.

Antes de analizar la Tabla VIII, es necesario describir una interpretación del FC en términos del peligro sísmico de deslizamientos. El valor numérico del factor de conversión es una medida de la aportación del terremoto al peligro total de deslizamiento rotacional de ladera, por lo que se puede identificar a este factor directamente con el peligro sísmico de deslizamiento.

El peligro sísmico de deslizamiento representa un cambio en la seguridad de una pendiente por cuestiones puramente sísmicas. Esto significa que el derrumbe dependerá tanto del valor del peligro sísmico de deslizamiento (FC), como de la situación de seguridad estática previa al sismo. Un valor pequeño del FC representa un peligro sísmico bajo, aunque la aportación de otros factores como los topográficos o litológicos sean de importancia para que el derrumbe se produzca con una pequeña aportación del peligro sísmico.

Los usos que se le pueden dar a los valores del FC son los siguientes:

- Representan una distribución cuantitativa del peligro de deslizamiento asociado a terremotos.

- Sirven como un herramienta para la identificación de zonas de alta vulnerabilidad en las cuales será necesario llevar a cabo estudios de detalle para identificar algunos parámetros que contribuyen a la inestabilidad de la ladera (geometría de la pendiente, tipo de material, ángulo de la pendiente, espesor de la masa deslizante y otros). La intención de los estudios de detalle es la de afinar las predicciones antes hechas sobre peligro de deslizamiento inducido por sismos.
- Sirven para evaluar el peligro total (no solamente el peligro sísmico). Si se hace uso de los FC sólo es necesario estimar el FS, lo que se puede realizar de manera sencilla por cualquier profesional de la ingeniería.

En la Tabla VIII se observa el siguiente comportamiento general para los valores de FC:

- Los FC se incrementan con la intensidad, debido al incremento en la sollicitación sísmica en la base de las laderas. Se presenta un mínimo de 1.321 en la intensidad VII y un máximo de 5.072 para la intensidad IX.
- Dentro de cada banda de intensidad los FC se incrementan con la disminución del espesor, debido a la disminución del peso unitario en la dirección normal a la pendiente, causado, a su vez, por la reducción en la longitud del elemento de volumen a partir del cual se calcula ese peso. En otras palabras, la sollicitación sísmica encuentra una cantidad menor de material que levantar y por tanto la dilatación es mayor y el cambio en el FC será mayor.

De todos los frentes analizados, los marcados con 5 y 6 son los que presentan los factores menores de conversión, de 1.416 ± 0.078 y 1.321 ± 0.036 , respectivamente. Ésto es debido a que se encuentran ubicados dentro de una banda de intensidad menor a los de los demás frentes de deslizamiento (IMM = VII), lo cual significa que cuando ocurra el terremoto, estos sitios presentarán el menor cambio en el FS, implicando que el fenómeno sísmico aportaría muy poco al peligro de deslizamiento. Los sitios del 1 al 4 y del 7 al 13 caen dentro de la zona de intensidad VIII; de estos frentes, el que sufrirá mayor cambio en el factor de seguridad es el que corresponde al sitio 2, ya que es el que tiene el menor espesor de material, su cambio será de 3.597 ± 0.247 .

Por último los frentes 14 y 15 son los que experimentarán mayor cambio en el factor de seguridad estático; este cambio es del orden de 5 veces, ya que están localizados en la banda donde se encuentra la mayor densidad de energía por unidad de área, según se observa en la Tabla VIII.

Con respecto a los resultados obtenidos en los cuatro puntos donde se hicieron estudios a detalle, presentados en la sección III.2.3, el único punto que se encuentra exactamente sobre uno de los frentes de deslizamiento es el situado en la colonia Libertad (número 15 en la figura 19), camino al aeropuerto. En ese lugar, los valores del factor de conversión resultaron idénticos cuando se estimaron de las dos maneras: 1) con los datos obtenidos en el campo (espesor, inclinación, densidad, volumen del material, desnivel topográfico) y 2) con los valores obtenidos a partir de mapas geológicos y topográficos,

para todos los valores posibles del ángulo de inclinación. Este resultado da confianza acerca de los resultados obtenidos en los 15 frentes de deslizamiento, de tal manera que se puede confiar en que los factores de conversión representan adecuadamente el peligro sísmico de deslizamiento de laderas en la región de Tijuana.

IV.2 Riesgos de deslizamientos por efectos sísmicos adicionales.

Esta tesis gira alrededor de los efectos causados por la energía sobre la densidad del material; sin embargo, es importante tener en cuenta que también pueden existir otros efectos que no he considerado y que produce el sismo sobre la pendiente. Uno de estos efectos es la forma en que actúa la aceleración producida por un sismo ya que, como ésta tiene magnitud y dirección, es importante analizar como respondería una ladera a diferentes direcciones de entrada. Lo anterior podría realizarse si se contara con registros triaxiales o con aceleraciones máximas predichas en las tres direcciones para cada uno de los frentes de deslizamiento. También es importante considerar el efecto de la velocidad del terreno, la duración de la sacudida, y la posible degradación del material de la ladera por el efecto de la sacudida producida por el sismo.

IV.3 Conclusiones y recomendaciones

IV.3.1 Conclusiones.

Las conclusiones son las siguientes:

1. Se desarrolló una metodología de aplicación directa y rápida para el cálculo de los factores de seguridad estáticos y dinámicos en análisis de deslizamientos rotacionales de ladera para usarse en el área ingenieril.
2. Se presenta una medida cuantitativa (*factor de conversión*) de la relación entre los factores de seguridad estático y dinámico. Físicamente, representa el número de veces que disminuye el factor de seguridad estático como resultado de la aplicación de una sollicitación sísmica en la base de la ladera. Además, esta medida representa una calificación relativa del peligro sísmico de deslizamientos.
3. Se obtuvo el mapa de intensidades sísmicas de Mercalli Modificada teóricas producidas por el rompimiento propuesto para la falla La Nación, con inclusión de efectos de sitio en 2470 puntos.
4. Los frentes de deslizamiento analizados en la ciudad de Tijuana presentan cambios en su factor de seguridad del orden de 1.3 a 5.1 veces cuando están sujetos a cargas dinámicas.
5. Los estudios puntuales en los frentes de deslizamiento estudiados sirvieron como validación del factor de conversión.
6. Se obtuvo una metodología sencilla pero rigurosa que permite calcular la densidad de energía por unidad de área en la superficie de la tierra.

7. Se modificó la metodología para el cálculo de la variación de la densidad de una columna de material cuando se le somete a una carga dinámica debida a un sismo.
8. Los efectos de sitio, longitud de rompimiento y atenuación inelástica han sido incluidos en el análisis de estabilidad de pendientes presentado en este trabajo, a través de métodos indirectos.

IV.3.2 Recomendaciones.

Como resultado de este trabajo han surgido una serie de problemas y trabajos adicionales que se recomienda realizar:

- Identificar otros posibles efectos de los sismos sobre la estabilidad de pendientes.
- Incluir los efectos de las modificaciones a los taludes (cortes, cargas de estructuras, etc.)
- Realizar estudios a detalle en los puntos identificados como altamente vulnerables debido al valor del FC.
- Reconocimiento de nuevos frentes de deslizamientos.
- Identificar otras zonas de fallas activas al sur del área de estudio y cerca de la zona costera, para producir un escenario sísmico diferente para cada una de ellas, en términos de peligro de deslizamientos inducidos por sismos.
- Instalar equipo de registro sísmico en algunas laderas con alto peligro sísmico de deslizamiento, para obtener acelerogramas triaxiales que puedan ser usados para

corroborar los resultados del análisis dinámico de estabilidad con otros métodos alternos, así como para estudiar los efectos de amplificación debidos a la geometría de la ladera.

- Buscar relaciones o ecuaciones predictivas directas que relacionen el cálculo de la energía superficial a partir de parámetros de fuente y trayectoria.
- Obtener valores de intensidades sísmicas predichas a partir de espectros de pseudovelocidad, ya que este parámetro se relaciona más directamente con la energía inducida en la superficie por el sismo.
- Incluir la presencia del agua en el cálculo del factor de seguridad estático.
- Incluir de manera directa el efecto de sitio en el modelo del cálculo de la energía superficial horizontal.
- Incluir fuentes no instantáneas, pero puntuales, en el modelo del cálculo de la energía superficial horizontal.
- Incluir fuentes no puntuales, sino distribuidas por área en el modelo del cálculo de las energías superficiales horizontales.
- Buscar relaciones empíricas entre diversos parámetros conocidos del movimiento del suelo y la densidad de energía.
- Incluir el efecto de atenuación inelástica de manera directa en el modelo.

LITERATURA CITADA

- Acosta, J.G., S. Alvarez Tinajero, G. Arellano Zepeda y L. Mendoza Garcilazo. 1995. "Mapas sísmicos predictivos para la región de Tijuana, B. C". Comunicaciones Académicas, Serie Sismología, CICESE 81 pp. CTSIT9503.
- Agnew, D.C., M. Legg and C. Strand. 1979. "Earthquake history of San Diego", in Abbot. P. and W. Elliot (eds.). "Earthquakes and Other Perils: San Diego Region". San Diego Association of Geologists, San Diego, California. 123-128 pp.
- Aki, K. and P.G. Richards. 1980. "Quantitative Seismology, Theory and Methods". Volume I. W. H. Freeman and Company. San Francisco. 557 pp.
- Anderson, J.G., M. ERRI, T.K. Rockwell and D.C. Agnew. 1989. "Past and Possible Future Earthquakes of Significance to the San Diego Region". Earthquake Spectra. 5(2): 299-333 p.
- Aragón Arreola, M.J. 1994. "Evaluación de riesgo geológico debido a movimientos de ladera en la ciudad de Tijuana, B.C., México. Tesis de Maestría. CICESE. 124 p.
- Bolt, B.A. 1978. "Earthquakes". W. H. Freeman and Company. New York. 241 pp.
- Borg, S. F. 1988. "Earthquake engineering". World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Second edition. Singapore. 312 pp.
- Brunsdon, D. 1979. "Mass movements", in Embleton, C., and J. Thornes eds. "Process in Geomorphology". John Wiley & Sons. New York. 436 pp.
- Carter, M, and S. P. Bentley. 1991. "Correlations of soil properties". Pentech Press. London. 130 pp.

- Costa, J.E. and V.R. Baker. 1981. "Surficial Geology. building with the earth". John Willey and Sons, New York, 498 pp.
- Delgado-Argote, L.A., A. Hinojosa-Corona, M. Aragón-Arreola, V. M. Frías-Camacho. 1996. "Estudio de riesgo geológico en Tijuana, Baja California con base en rasgos estructurales y la respuesta del terreno." *Geos, Unión Geofísica Mexicana*. 16(2): 57-89 p.
- Esteva, L. y E. Rosenblueth. 1964. "Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes". *Bol. Soc. Mex. Sísm.* 2(1): 1-18 p.
- Filonenko Borodich, M. 1968. "Theory of elasticity". MIP Publishers. Moscow. 388 pp.
- Flynn, C. 1970. "Post-Batholithic Geology of the La Gloria-Presa Rodriguez Area, Baja California, Mexico." *Geological Soc. of America Bull.* 81: 1789-1806 p.
- Frez, J. and J. González. 1991. "Crustal structure and seismotectonics of the northern Baja California", in J. Paul Dauphin and Bern R.T. Simoneit eds. "The Gulf and Peninsular Province of the Californias. AAPG. Memoir 47: 261-283 p.
- Fumal, T.E. and Tynsley, J.D. 1985. Mapping shear-wave velocities of near-surface geologic materials", in "Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region". U.S. Geological Survey Professional Paper 1360. 127-149 p.
- Gastil, R.G., R.P. Phillips and E.C. Allison. 1975. "Reconnaissance geology of the State of Baja California". Geological Society of America. Memoir 140. 170 pp.
- Gutenberg, B. and C.F. Richter. 1956. "Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration". *Bull. Seism. Soc. Am.* 46: 105-145 p.

- Hanks, T.C. and H. Kanamori. 1979. "A moment magnitude scale". *Journal of Geophysics Research*. 84(20): 2981-2987 p.
- Hansen, A. y C. A. Franks. 1991. "Characterisation and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation". *Proceedings of the fourth international conference on seismic zonation*. EERI. I: 149-195 p.
- Harp, E.L., R.C. Wilson, and G.F. Wieczorek. 1981. "Landslides from the February 4, 1976, Guatemala Earthquake". *Geological Survey Professional paper 1204-A*. 35 p.
- Hoek, E. 1976. "Rock Slopes". *Proc. of Speciality Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*. ASCE. Univ. of Colorado. 2: 157-171 p.
- Joyner, W.B. and Boore, D.M. 1981. "Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California". *Bull. Seis. Soc. Am.* 71: 2011-2038 p.
- Joyner, W.B. and T.E. Fumal. 1985. "Predictive mapping of earthquake ground motion", in "Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region". *U.S. Geological Survey Professional Paper 1360*. 203-220 p.
- Kanamori, H. 1977. "The energy release in great earthquakes". *J. Geophys. Res.* 82: 2981-2987 p.
- Keefer, D.K. 1984. "Landslides caused by earthquakes". *Geological Society of America Bulletin*. 95: 406-421 p.
- Legg, M.R., V. Wong Ortega y F. Suarez Vidal. 1991. "Geologic Structure and Tectonics of the Inner Continental Borderland of Northern Baja California", in J. Paul Dauphin

- and Bern R.T. Simoneit eds. "The Gulf and Peninsular Province of the Californias. AAPG. Memoir 47: 145-177 p.
- Lindvall, S. C., T.K. Rockwell and C.E. Lindvall. 1990. "The seismic hazard of San Diego revised: New evidence for magnitude 6+ Holocene earthquake on the Rose Canyon fault zone.", in Proc. 4th U.S. Conf. on Earthquake Engineering. Earthquake Engin. Research Inst. 1: 679-688 p.
- Minch, J.A. 1967. "Stratigraphy and structure of Tijuana-Rosarito Beach area, northwestern Baja California, Mexico". Geological Society of America Bulletin. 78: 1155-1178 p.
- Montalvo, J. C., J. Acosta, L. Mendoza, S. Alvarez, T. Cossío, G. Chávez . 1995a. "Estudio de Estabilidad de Taludes en la Colonia El Rubí, Tijuana, B.C. Parte I: Geología". Informe Técnico. Comunicaciones Académicas. Serie Sismología. CICESE. CTSIT9508. 18 p.
- Montalvo, J. C., J. Acosta, L. Mendoza, S. Alvarez, T.Cossío, G. Chávez. 1995b. "Estudio de Estabilidad de Taludes en la Colonia El Rubí, Tijuana, B.C. Parte II: Sismología". Informe Técnico. Comunicaciones Académicas. Serie Sismología. CICESE. CTSIT9509. 23 p.
- Munguía Orozco, L. y Vidal Villegas, A. 1991. "Seismicity of the Northern Baja California region: 1980-1990", in Patrick L. Abbott and Willian J. Elliot eds. Environmental Perils San Diego. GSA Annual Meeting and SDAG, USA. p. 61-74.
- Newmark, N.M. 1975. "Effects of earthquakes on dams and embankments". Geotechnique 15: 139-160 p.

Newmark, N.M y E. Rosenbluth. 1976. "Fundamentos de ingeniería sísmica". Editorial Diana. México. 663 pp.

Plafker, G., G.E. Ericksen and J. Fernandez Concha. 1971. "Geological Aspects of the May 31, 1970 Peru Earthquake". Bull. of the Seismological Soc. of America. 61: 543-578 p.

Raines, G.L., M.E. Hatch and S.C. Haley. 1991. "Liquefaction potential in the San Diego-Tijuana metropolitan region", in Patrick L. Abbott and Willian J. Elliot eds. Environmental Perils San Diego. GSA Anual Meeting and SDAG, USA. 109-118 p.

Reagor, B.G., C.W. Stover, K.V. Steinbrugge, P. Hubiak, M.G. Hopper and L.M. Barnhard. 1985. "Preliminary evaluation of the distribution of seismic intensities", in The Imperial Valley California, earthquake of october 15, 1979. Geological Survey. Professional Paper 1254. 251-258 p.

Reichle, M., J.E. Kahle, T.G., Atkinson, E.H. Johnson, R.A. Olson, H.J. Lagario, K.V. Steinbruge, L.S. Cluff. T.P. Haney, and J.E. Powers. 1990. "Planning scenario for a major earthquake, San Diego-Tijuana metropolitan area. California Deparment of Conservation, Division of Mines and Geology, Special Publication 100, 189 pp. and maps.

Sangines, E.M., KW. Campbell and H.A Seligson. 1991. "Ground motion, intensity, and damage expected in the metropolitan San Diego area as a result of a M=7 earthquake on the Rose Canyon fault", in Patrick L. Abbott and Willian J. Elliot eds. Environmental Perils San Diego. GSA Anual Meeting and SDAG, USA. 101-108 p.

- Seed, H.B. 1968. "Landslides during earthquakes due to soil liquefaction". American Society of Civil Engineers, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions. 94(SM5): 1053-1122 p.
- Schug, D. 1989. "Impacts of the Rose Canyon fault zone in downtown San Diego, California", in: Proceedings, Workshop on the seismic risk in the San Diego region. Special focus on the Rose Canyon fault system.
- Suárez Vidal, F., R. Armijo, P. Bodin and R.G. Gastil. 1991. "Framework of recent and active faulting in northern Baja California", in J. Paul Dauphin and Bern R.T. Simoneit eds. "The Gulf and Peninsular Province of the Californias. AAPG. Memoir 47: 285-299 p.
- Treiman, J.A. 1984. "The Rose Canyon fault zone; a review and analysis". California Division of Mines and Geology. Report to the Federal Emergency Management Agency, Cooperative Agreement EMG-83-k-0148.
- Treiman, J. 1989. "The Rose Canyon fault zone: a historical review", in: Proceeding, Workshop on the seismic risk in the San Diego region. Special focus on the Rose Canyon fault system.
- Trifunac, M.D. 1976. A note on the range of peak amplitudes of recorded accelerations, velocities and displacements with respect to the modified mercalli intensity scale". Earthquake Notes. 47(1): 9-24 p.

U.S. Navy. 1982. "Design Manual: Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures".

Navy Facilities Engineering Command. Navfac. U.S. Naval Publications and Forms Center.

Wesnousky, S.G. 1986. "Earthquakes, Quaternary Faults, and Seismic Hazard in California". Journal of Geophysical Research. 91(B12): 12587-12631 p.

APÉNDICE A.- Relaciones para la estimación del ángulo de fricción interna.

En este apéndice se discute el rango de aplicabilidad de la ecuación (30), para la litología del área de estudio. El elemento principal para explicar el cambio de la condición de estabilidad de una ladera lo constituye el cambio en el valor de la densidad de un elemento de volumen del material que forma una ladera. La energía aplicada a la columna litológica tendrá como efecto el disminuir el valor de la densidad en el instante en que ésta interactúe con la zona de debilitamiento.

Como se mencionó antes, el valor de la densidad varía en un rango de $1.50 \leq \rho \leq 1.90 \text{ g/cm}^3$ para el tipo de material que corresponde a la Fm. San Diego. En la figura 14 se observa que para el tipo de material SP, el valor mínimo del ángulo de fricción interna bajo condiciones estables es de 26.4° . Sin embargo, ¿qué pasa si la energía produce una variación en la densidad, tal que disminuya por debajo del valor mínimo de 1.5 como se observa en la tabla A.I para los ángulos mayores de 18° ? La ecuación (30) puede producir resultados físicamente inaceptables cuando el valor de la densidad queda fuera del rango de valores permitidos. Por ejemplo, cuando se usan las densidades de la tabla A.I para ángulos de inclinación mayores a 84° , se obtienen ángulos de fricción interna negativos, lo cual no puede suceder en la naturaleza; este problema se puede presentar para otros ángulos mucho menores, dependiendo del tipo de material, espesores y densidad de energía aplicada. Para remediar este problema, se realizó una extrapolación de la ecuación que relaciona la densidad con el ángulo de fricción, desde el límite inferior de valores de densidad reportados

por la U.S. Navy (1982) para ese tipo de material. llevando la extrapolación a través de una relación lineal, cuya única condición es que los ángulos de fricción interna se mantengan en valores físicamente creíbles. Ésto significa que se asume que el ángulo de fricción interna es cero únicamente cuando la densidad sea justamente cero. Esta ecuación es:

$$\phi' = 17.648\rho' \quad (31)$$

donde: ϕ' = ángulo de fricción interna del material bajo cargas dinámicas

$$\rho' = \text{densidad bajo cargas dinámicas } (0 \leq \rho' < 1.5)$$

Entonces, cuando la densidad del material sea menor que 1.5, la ecuación que se empleará es la (31), ya que se considera que al actuar la energía sobre la ladera, el tipo de material seguirá siendo el mismo, pero su densidad adquirirá un valor que no es normal para ese tipo de material (SP) bajo condiciones estáticas normales. Al hacer este cambio de ecuación, durante el breve intervalo de tiempo en que se produce la dilatación del material, no se presentarán valores negativos del ángulo de fricción interna, lo cual es físicamente congruente.

Este fenómeno de la disminución de la densidad, por abajo de los valores normalmente exhibidos por los materiales presentes en la región se presentará para ciertas condiciones extremas de intensidad sísmica y espesor de los materiales propensos a deslizarse.

Ahora se repetirá el ejercicio de la tabla A.I, pero se utilizarán ambas ecuaciones. Para los ángulos de inclinación de la ladera entre 0° y 18° se utilizará la ecuación normal

(30), mientras que para ángulos mayores de 18° , correspondientes a densidades menores a 1.5, se utilizará la ecuación (31). Los resultados se muestran en la tabla A.II, en donde se puede notar que los valores de los parámetros ρ', ϕ' , FSD y FC muestran un comportamiento uniforme y monótonico, sin discontinuidad o cambio abrupto cuando se usa la otra ecuación. Nótese que los valores de los parámetros dinámicos mencionados anteriormente cambian de valores negativos y físicamente imposibles de la tabla A.I a los valores aceptables de la tabla A.II.

Tabla A.I. Valores de los parámetros estáticos y dinámicos ($'$) y del factor de conversión cuando se utiliza la ecuación (30) en la estimación del ángulo de fricción interna. Se supone un espesor de la masa deslizante de 35 m, un espesor de la zona de debilitamiento de 40 cm y una IMM=VII, para un rompimiento de la falla La Nación ($M_w = 6.5$).

| ϕ | ϕ' | ρ | ρ' | FS | FSD | FC | α | |
|--------|---------|--------|---------|--------|--------|-------|----------|--------|
| 36.650 | 28.010 | 1.800 | 1.513 | 42.625 | 30.475 | 1.399 | 0.249 | 1.000 |
| 36.650 | 28.007 | 1.800 | 1.513 | 21.306 | 15.231 | 1.399 | 0.249 | 2.000 |
| 36.650 | 28.001 | 1.800 | 1.513 | 14.197 | 10.146 | 1.399 | 0.249 | 3.000 |
| 36.650 | 27.994 | 1.800 | 1.512 | 10.640 | 7.602 | 1.400 | 0.250 | 4.000 |
| 36.650 | 27.984 | 1.800 | 1.512 | 8.504 | 6.073 | 1.400 | 0.250 | 5.000 |
| 36.650 | 27.971 | 1.800 | 1.512 | 7.079 | 5.053 | 1.401 | 0.250 | 6.000 |
| 36.650 | 27.957 | 1.800 | 1.511 | 6.060 | 4.323 | 1.402 | 0.251 | 7.000 |
| 36.650 | 27.940 | 1.800 | 1.511 | 5.294 | 3.774 | 1.403 | 0.251 | 8.000 |
| 36.650 | 27.921 | 1.800 | 1.510 | 4.698 | 3.346 | 1.404 | 0.252 | 9.000 |
| 36.650 | 27.900 | 1.800 | 1.509 | 4.220 | 3.003 | 1.405 | 0.253 | 10.000 |
| 36.650 | 27.876 | 1.800 | 1.508 | 3.828 | 2.721 | 1.407 | 0.254 | 11.000 |
| 36.650 | 27.850 | 1.800 | 1.508 | 3.500 | 2.486 | 1.408 | 0.255 | 12.000 |
| 36.650 | 27.821 | 1.800 | 1.507 | 3.223 | 2.286 | 1.410 | 0.256 | 13.000 |
| 36.650 | 27.790 | 1.800 | 1.506 | 2.984 | 2.114 | 1.412 | 0.257 | 14.000 |
| 36.650 | 27.757 | 1.800 | 1.505 | 2.777 | 1.964 | 1.414 | 0.258 | 15.000 |
| 36.650 | 27.721 | 1.800 | 1.503 | 2.595 | 1.833 | 1.416 | 0.259 | 16.000 |
| 36.650 | 27.682 | 1.800 | 1.502 | 2.434 | 1.716 | 1.418 | 0.260 | 17.000 |
| 36.650 | 27.641 | 1.800 | 1.501 | 2.290 | 1.612 | 1.421 | 0.262 | 18.000 |
| 36.650 | 27.597 | 1.800 | 1.499 | 2.161 | 1.518 | 1.423 | 0.263 | 19.000 |
| 36.650 | 27.550 | 1.800 | 1.498 | 2.044 | 1.433 | 1.426 | 0.265 | 20.000 |
| 36.650 | 27.501 | 1.800 | 1.496 | 1.938 | 1.356 | 1.429 | 0.267 | 21.000 |
| 36.650 | 27.448 | 1.800 | 1.494 | 1.842 | 1.286 | 1.432 | 0.269 | 22.000 |
| 36.650 | 27.393 | 1.800 | 1.492 | 1.753 | 1.221 | 1.436 | 0.271 | 23.000 |
| 36.650 | 27.334 | 1.800 | 1.490 | 1.671 | 1.161 | 1.439 | 0.273 | 24.000 |
| 36.650 | 27.273 | 1.800 | 1.488 | 1.596 | 1.106 | 1.443 | 0.275 | 25.000 |

| Tabla A.I. Continuación... | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 36.650 | 27.208 | 1.800 | 1.486 | 1.525 | 1.054 | 1.447 | 0.277 | 26.000 |
| 36.650 | 27.140 | 1.800 | 1.484 | 1.460 | 1.006 | 1.451 | 0.279 | 27.000 |
| 36.650 | 27.069 | 1.800 | 1.482 | 1.399 | 0.961 | 1.456 | 0.282 | 28.000 |
| 36.650 | 26.994 | 1.800 | 1.479 | 1.342 | 0.919 | 1.461 | 0.285 | 29.000 |
| 36.650 | 26.915 | 1.800 | 1.477 | 1.289 | 0.879 | 1.466 | 0.288 | 30.000 |
| 36.650 | 26.833 | 1.800 | 1.474 | 1.238 | 0.842 | 1.471 | 0.290 | 31.000 |
| 36.650 | 26.746 | 1.800 | 1.471 | 1.191 | 0.807 | 1.476 | 0.294 | 32.000 |
| 36.650 | 26.656 | 1.800 | 1.468 | 1.146 | 0.773 | 1.482 | 0.297 | 33.000 |
| 36.650 | 26.562 | 1.800 | 1.465 | 1.103 | 0.741 | 1.488 | 0.300 | 34.000 |
| 36.650 | 26.463 | 1.800 | 1.462 | 1.063 | 0.711 | 1.495 | 0.304 | 35.000 |
| 36.650 | 26.359 | 1.800 | 1.458 | 1.024 | 0.682 | 1.501 | 0.308 | 36.000 |
| 36.650 | 26.251 | 1.800 | 1.454 | 0.987 | 0.654 | 1.509 | 0.312 | 37.000 |
| 36.650 | 26.138 | 1.800 | 1.451 | 0.952 | 0.628 | 1.516 | 0.316 | 38.000 |
| 36.650 | 26.020 | 1.800 | 1.447 | 0.919 | 0.603 | 1.524 | 0.320 | 39.000 |
| 36.650 | 25.897 | 1.800 | 1.443 | 0.887 | 0.579 | 1.532 | 0.325 | 40.000 |
| 36.650 | 25.768 | 1.800 | 1.438 | 0.856 | 0.555 | 1.541 | 0.330 | 41.000 |
| 36.650 | 25.633 | 1.800 | 1.434 | 0.826 | 0.533 | 1.551 | 0.335 | 42.000 |
| 36.650 | 25.492 | 1.800 | 1.429 | 0.798 | 0.511 | 1.560 | 0.340 | 43.000 |
| 36.650 | 25.344 | 1.800 | 1.424 | 0.770 | 0.490 | 1.571 | 0.346 | 44.000 |
| 36.650 | 25.190 | 1.800 | 1.419 | 0.744 | 0.470 | 1.582 | 0.352 | 45.000 |
| 36.650 | 25.029 | 1.800 | 1.414 | 0.718 | 0.451 | 1.593 | 0.358 | 46.000 |
| 36.650 | 24.860 | 1.800 | 1.408 | 0.694 | 0.432 | 1.606 | 0.365 | 47.000 |
| 36.650 | 24.683 | 1.800 | 1.402 | 0.670 | 0.414 | 1.619 | 0.372 | 48.000 |
| 36.650 | 24.498 | 1.800 | 1.396 | 0.647 | 0.396 | 1.633 | 0.380 | 49.000 |
| 36.650 | 24.305 | 1.800 | 1.390 | 0.624 | 0.379 | 1.647 | 0.387 | 50.000 |
| 36.650 | 24.102 | 1.800 | 1.383 | 0.602 | 0.362 | 1.663 | 0.396 | 51.000 |
| 36.650 | 23.889 | 1.800 | 1.376 | 0.581 | 0.346 | 1.680 | 0.404 | 52.000 |
| 36.650 | 23.666 | 1.800 | 1.369 | 0.561 | 0.330 | 1.698 | 0.414 | 53.000 |
| 36.650 | 23.431 | 1.800 | 1.361 | 0.541 | 0.315 | 1.717 | 0.424 | 54.000 |
| 36.650 | 23.185 | 1.800 | 1.353 | 0.521 | 0.300 | 1.737 | 0.434 | 55.000 |
| 36.650 | 22.927 | 1.800 | 1.344 | 0.502 | 0.285 | 1.759 | 0.445 | 56.000 |
| 36.650 | 22.655 | 1.800 | 1.335 | 0.483 | 0.271 | 1.783 | 0.457 | 57.000 |
| 36.650 | 22.368 | 1.800 | 1.325 | 0.465 | 0.257 | 1.808 | 0.470 | 58.000 |
| 36.650 | 22.067 | 1.800 | 1.315 | 0.447 | 0.244 | 1.835 | 0.483 | 59.000 |
| 36.650 | 21.749 | 1.800 | 1.305 | 0.430 | 0.230 | 1.865 | 0.498 | 60.000 |
| 36.650 | 21.413 | 1.800 | 1.294 | 0.412 | 0.217 | 1.897 | 0.514 | 61.000 |
| 36.650 | 21.059 | 1.800 | 1.282 | 0.396 | 0.205 | 1.932 | 0.530 | 62.000 |
| 36.650 | 20.684 | 1.800 | 1.270 | 0.379 | 0.192 | 1.971 | 0.548 | 63.000 |
| 36.650 | 20.287 | 1.800 | 1.256 | 0.363 | 0.180 | 2.013 | 0.568 | 64.000 |
| 36.650 | 19.866 | 1.800 | 1.242 | 0.347 | 0.168 | 2.059 | 0.589 | 65.000 |
| 36.650 | 19.419 | 1.800 | 1.227 | 0.331 | 0.157 | 2.111 | 0.612 | 66.000 |
| 36.650 | 18.944 | 1.800 | 1.212 | 0.316 | 0.146 | 2.168 | 0.637 | 67.000 |
| 36.650 | 18.438 | 1.800 | 1.195 | 0.301 | 0.135 | 2.232 | 0.665 | 68.000 |
| 36.650 | 17.898 | 1.800 | 1.177 | 0.286 | 0.124 | 2.304 | 0.695 | 69.000 |
| 36.650 | 17.322 | 1.800 | 1.158 | 0.271 | 0.114 | 2.386 | 0.728 | 70.000 |
| 36.650 | 13.736 | 1.800 | 1.039 | 0.199 | 0.065 | 3.044 | 0.962 | 75.000 |
| 36.650 | 8.366 | 1.800 | 0.860 | 0.131 | 0.026 | 5.059 | 1.434 | 80.000 |

| Tabla A.I. Continuación... | | | | | | | | | |
|----------------------------|---------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|--|
| 36.650 | 6.959 | 1.800 | 0.813 | 0.118 | 0.019 | 6.096 | 1.592 | 81.000 | |
| 36.650 | 5.401 | 1.800 | 0.762 | 0.105 | 0.013 | 7.870 | 1.789 | 82.000 | |
| 36.650 | 3.665 | 1.800 | 0.704 | 0.091 | 0.008 | 11.615 | 2.043 | 83.000 | |
| 36.650 | 1.721 | 1.800 | 0.639 | 0.078 | 0.003 | 24.757 | 2.382 | 84.000 | |
| 36.650 | -0.470 | 1.800 | 0.567 | 0.065 | -0.001 | -90.645 | 2.857 | 85.000 | |
| 36.650 | -2.959 | 1.800 | 0.484 | 0.052 | -0.004 | -14.392 | 3.570 | 86.000 | |
| 36.650 | -5.810 | 1.800 | 0.389 | 0.039 | -0.005 | -7.312 | 4.758 | 87.000 | |
| 36.650 | -9.106 | 1.800 | 0.280 | 0.026 | -0.006 | -4.642 | 7.135 | 88.000 | |
| 36.650 | -12.960 | 1.800 | 0.152 | 0.013 | -0.004 | -3.233 | 14.267 | 89.000 | |

Tabla A.II. Valores de los parámetros estáticos y dinámicos (ϕ') y del factor de conversión, cuando se utilizan las dos ecuaciones (30 y 31) en la estimación del ángulo de fricción interna. Se supone un espesor de la masa deslizante de 35 m, un espesor de la zona de debilitamiento de 40 cm y una IMM=VII, para un rompimiento de la falla La Nación ($M_w = 6.5$).

| ϕ | ϕ' | ρ | ρ' | FS | FSD | FC | α | |
|--------|---------|--------|---------|--------|--------|-------|----------|--------|
| 36.650 | 28.010 | 1.800 | 1.513 | 42.625 | 30.475 | 1.399 | 0.249 | 1.000 |
| 36.650 | 28.007 | 1.800 | 1.513 | 21.306 | 15.231 | 1.399 | 0.249 | 2.000 |
| 36.650 | 28.001 | 1.800 | 1.513 | 14.197 | 10.146 | 1.399 | 0.249 | 3.000 |
| 36.650 | 27.994 | 1.800 | 1.512 | 10.640 | 7.602 | 1.400 | 0.250 | 4.000 |
| 36.650 | 27.984 | 1.800 | 1.512 | 8.504 | 6.073 | 1.400 | 0.250 | 5.000 |
| 36.650 | 27.971 | 1.800 | 1.512 | 7.079 | 5.053 | 1.401 | 0.250 | 6.000 |
| 36.650 | 27.957 | 1.800 | 1.511 | 6.060 | 4.323 | 1.402 | 0.251 | 7.000 |
| 36.650 | 27.940 | 1.800 | 1.511 | 5.294 | 3.774 | 1.403 | 0.251 | 8.000 |
| 36.650 | 27.921 | 1.800 | 1.510 | 4.698 | 3.346 | 1.404 | 0.252 | 9.000 |
| 36.650 | 27.900 | 1.800 | 1.509 | 4.220 | 3.003 | 1.405 | 0.253 | 10.000 |
| 36.650 | 27.876 | 1.800 | 1.508 | 3.828 | 2.721 | 1.407 | 0.254 | 11.000 |
| 36.650 | 27.850 | 1.800 | 1.508 | 3.500 | 2.486 | 1.408 | 0.255 | 12.000 |
| 36.650 | 27.821 | 1.800 | 1.507 | 3.223 | 2.286 | 1.410 | 0.256 | 13.000 |
| 36.650 | 27.790 | 1.800 | 1.506 | 2.984 | 2.114 | 1.412 | 0.257 | 14.000 |
| 36.650 | 27.757 | 1.800 | 1.505 | 2.777 | 1.964 | 1.414 | 0.258 | 15.000 |
| 36.650 | 27.721 | 1.800 | 1.503 | 2.595 | 1.833 | 1.416 | 0.259 | 16.000 |
| 36.650 | 27.682 | 1.800 | 1.502 | 2.434 | 1.716 | 1.418 | 0.260 | 17.000 |
| 36.650 | 27.641 | 1.800 | 1.501 | 2.290 | 1.612 | 1.421 | 0.262 | 18.000 |
| 36.650 | 26.458 | 1.800 | 1.499 | 2.161 | 1.445 | 1.495 | 0.263 | 19.000 |
| 36.650 | 26.431 | 1.800 | 1.498 | 2.044 | 1.366 | 1.497 | 0.265 | 20.000 |
| 36.650 | 26.402 | 1.800 | 1.496 | 1.938 | 1.293 | 1.499 | 0.267 | 21.000 |
| 36.650 | 26.371 | 1.800 | 1.494 | 1.842 | 1.227 | 1.501 | 0.269 | 22.000 |
| 36.650 | 26.339 | 1.800 | 1.492 | 1.753 | 1.166 | 1.503 | 0.271 | 23.000 |
| 36.650 | 26.304 | 1.800 | 1.490 | 1.671 | 1.110 | 1.505 | 0.273 | 24.000 |
| 36.650 | 26.268 | 1.800 | 1.488 | 1.596 | 1.058 | 1.508 | 0.275 | 25.000 |
| 36.650 | 26.230 | 1.800 | 1.486 | 1.525 | 1.010 | 1.510 | 0.277 | 26.000 |
| 36.650 | 26.190 | 1.800 | 1.484 | 1.460 | 0.965 | 1.513 | 0.279 | 27.000 |

| Tabla A.II. Continuación... | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 36.650 | 26.149 | 1.800 | 1.482 | 1.399 | 0.923 | 1.515 | 0.282 | 28.000 |
| 36.650 | 26.105 | 1.800 | 1.479 | 1.342 | 0.884 | 1.518 | 0.285 | 29.000 |
| 36.650 | 26.059 | 1.800 | 1.477 | 1.289 | 0.847 | 1.522 | 0.288 | 30.000 |
| 36.650 | 26.010 | 1.800 | 1.474 | 1.238 | 0.812 | 1.525 | 0.290 | 31.000 |
| 36.650 | 25.960 | 1.800 | 1.471 | 1.191 | 0.779 | 1.528 | 0.294 | 32.000 |
| 36.650 | 25.907 | 1.800 | 1.468 | 1.146 | 0.748 | 1.532 | 0.297 | 33.000 |
| 36.650 | 25.851 | 1.800 | 1.465 | 1.103 | 0.718 | 1.536 | 0.300 | 34.000 |
| 36.650 | 25.793 | 1.800 | 1.462 | 1.063 | 0.690 | 1.540 | 0.304 | 35.000 |
| 36.650 | 25.733 | 1.800 | 1.458 | 1.024 | 0.663 | 1.544 | 0.308 | 36.000 |
| 36.650 | 25.669 | 1.800 | 1.454 | 0.987 | 0.638 | 1.548 | 0.312 | 37.000 |
| 36.650 | 25.603 | 1.800 | 1.451 | 0.952 | 0.613 | 1.553 | 0.316 | 38.000 |
| 36.650 | 25.534 | 1.800 | 1.447 | 0.919 | 0.590 | 1.558 | 0.320 | 39.000 |
| 36.650 | 25.461 | 1.800 | 1.443 | 0.887 | 0.567 | 1.563 | 0.325 | 40.000 |
| 36.650 | 25.386 | 1.800 | 1.438 | 0.856 | 0.546 | 1.568 | 0.330 | 41.000 |
| 36.650 | 25.307 | 1.800 | 1.434 | 0.826 | 0.525 | 1.574 | 0.335 | 42.000 |
| 36.650 | 25.224 | 1.800 | 1.429 | 0.798 | 0.505 | 1.579 | 0.340 | 43.000 |
| 36.650 | 25.137 | 1.800 | 1.424 | 0.770 | 0.486 | 1.586 | 0.346 | 44.000 |
| 36.650 | 25.047 | 1.800 | 1.419 | 0.744 | 0.467 | 1.592 | 0.352 | 45.000 |
| 36.650 | 24.952 | 1.800 | 1.414 | 0.718 | 0.449 | 1.599 | 0.358 | 46.000 |
| 36.650 | 24.853 | 1.800 | 1.408 | 0.694 | 0.432 | 1.606 | 0.365 | 47.000 |
| 36.650 | 24.750 | 1.800 | 1.402 | 0.670 | 0.415 | 1.614 | 0.372 | 48.000 |
| 36.650 | 24.641 | 1.800 | 1.396 | 0.647 | 0.399 | 1.622 | 0.380 | 49.000 |
| 36.650 | 24.528 | 1.800 | 1.390 | 0.624 | 0.383 | 1.631 | 0.387 | 50.000 |
| 36.650 | 24.409 | 1.800 | 1.383 | 0.602 | 0.367 | 1.640 | 0.396 | 51.000 |
| 36.650 | 24.284 | 1.800 | 1.376 | 0.581 | 0.353 | 1.649 | 0.404 | 52.000 |
| 36.650 | 24.153 | 1.800 | 1.369 | 0.561 | 0.338 | 1.659 | 0.414 | 53.000 |
| 36.650 | 24.016 | 1.800 | 1.361 | 0.541 | 0.324 | 1.670 | 0.424 | 54.000 |
| 36.650 | 23.871 | 1.800 | 1.353 | 0.521 | 0.310 | 1.681 | 0.434 | 55.000 |
| 36.650 | 23.720 | 1.800 | 1.344 | 0.502 | 0.296 | 1.693 | 0.445 | 56.000 |
| 36.650 | 23.560 | 1.800 | 1.335 | 0.483 | 0.283 | 1.706 | 0.457 | 57.000 |
| 36.650 | 23.392 | 1.800 | 1.325 | 0.465 | 0.270 | 1.720 | 0.470 | 58.000 |
| 36.650 | 23.216 | 1.800 | 1.315 | 0.447 | 0.258 | 1.735 | 0.483 | 59.000 |
| 36.650 | 23.029 | 1.800 | 1.305 | 0.430 | 0.245 | 1.750 | 0.498 | 60.000 |
| 36.650 | 22.832 | 1.800 | 1.294 | 0.412 | 0.233 | 1.767 | 0.514 | 61.000 |
| 36.650 | 22.624 | 1.800 | 1.282 | 0.396 | 0.222 | 1.785 | 0.530 | 62.000 |
| 36.650 | 22.405 | 1.800 | 1.270 | 0.379 | 0.210 | 1.805 | 0.548 | 63.000 |
| 36.650 | 22.172 | 1.800 | 1.256 | 0.363 | 0.199 | 1.826 | 0.568 | 64.000 |
| 36.650 | 21.925 | 1.800 | 1.242 | 0.347 | 0.188 | 1.848 | 0.589 | 65.000 |
| 36.650 | 21.663 | 1.800 | 1.227 | 0.331 | 0.177 | 1.873 | 0.612 | 66.000 |
| 36.650 | 21.384 | 1.800 | 1.212 | 0.316 | 0.166 | 1.900 | 0.637 | 67.000 |
| 36.650 | 21.088 | 1.800 | 1.195 | 0.301 | 0.156 | 1.929 | 0.665 | 68.000 |
| 36.650 | 20.771 | 1.800 | 1.177 | 0.286 | 0.146 | 1.962 | 0.695 | 69.000 |
| 36.650 | 20.433 | 1.800 | 1.158 | 0.271 | 0.136 | 1.997 | 0.728 | 70.000 |
| 36.650 | 18.331 | 1.800 | 1.039 | 0.199 | 0.089 | 2.246 | 0.962 | 75.000 |
| 36.650 | 15.181 | 1.800 | 0.860 | 0.131 | 0.048 | 2.742 | 1.434 | 80.000 |
| 36.650 | 14.356 | 1.800 | 0.813 | 0.118 | 0.041 | 2.907 | 1.592 | 81.000 |
| 36.650 | 13.443 | 1.800 | 0.762 | 0.105 | 0.034 | 3.113 | 1.789 | 82.000 |

| Tabla A.II. Continuación... | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--|
| 36.650 | 12.425 | 1.800 | 0.704 | 0.091 | 0.027 | 3.377 | 2.043 | 83.000 | |
| 36.650 | 11.285 | 1.800 | 0.639 | 0.078 | 0.021 | 3.728 | 2.382 | 84.000 | |
| 36.650 | 10.000 | 1.800 | 0.567 | 0.065 | 0.015 | 4.220 | 2.857 | 85.000 | |
| 36.650 | 8.540 | 1.800 | 0.484 | 0.052 | 0.011 | 4.954 | 3.570 | 86.000 | |
| 36.650 | 6.869 | 1.800 | 0.389 | 0.039 | 0.006 | 6.177 | 4.758 | 87.000 | |
| 36.650 | 4.936 | 1.800 | 0.280 | 0.026 | 0.003 | 8.615 | 7.135 | 88.000 | |
| 36.650 | 2.676 | 1.800 | 0.152 | 0.013 | 0.001 | 15.918 | 14.267 | 89.000 | |

APÉNDICE B. Comparación con otros métodos.

En esta tesis se utilizan modelos y métodos nuevos para la estimación de la densidad de energía basados en conceptos físicos y geométricos muy sencillos, de tal manera que no requieren la verificación o validación de hipótesis complejas. Sin embargo, se considera necesario realizar una verificación indirecta de los resultados relativos a las estimaciones de la densidad de energía, a través de la comparación con los resultados producidos por algún otro método que también utilice a la energía como el elemento sísmico que causa la inestabilidad.

Se utilizará el método de Borg, 1988, para propósitos de comparación. Este método fue considerado para su aplicación en las primeras etapas de esta tesis debido a que no requiere de la disponibilidad de registros triaxiales del movimiento del suelo para especificar la sollicitación sísmica que será aplicada en la base de la ladera propensa a deslizamiento. El método se basa en la aplicación de densidades de energía sísmica para analizar el criterio de estabilidad de pendientes. Sin embargo, sus ecuaciones requieren de suposiciones arbitrarias respecto a los valores de algunos parámetros (eficiencia sísmica, distancia a la intensidad I y otros), sobre los cuales no tengo control en la región de interés. Borg, 1988, utiliza una expresión para el cálculo de la energía que representa la energía total generada en la fuente, no sólo la energía sísmica, por lo que requiere hacer uso del concepto de eficiencia sísmica, el cual aún cuando teóricamente está bien definido, prácticamente no se conocen sus valores precisos. Además, ese autor utiliza un parámetro que llama eficiencia que globaliza los

efectos de transformaciones de energía total a energía sísmica, efectos geológicos, magnitud del terremoto y la partición de la energía sísmica entre planos horizontales y verticales en la superficie; toda esta conjunción de efectos la expresa por medio de una relación de volúmenes cuyo valor el autor dice no es conocido actualmente y tiene que ser asumido, sugiriendo un valor específico. Similarmente, para el cálculo de la distribución de energías superficiales horizontales él propone una ecuación que queda en términos de una relación de distancias que el autor considera indefinida pero asume un valor "razonable". Los valores de la energía sísmica obtenidos por este autor los maneja como entidades vectoriales y aplica una "resultante" sobre la ladera. Debido que en la región de estudio no se pueden validar los valores asumidos arbitrariamente por Borg, se decidió no utilizar este método. Pero se aprovechará la compilación que hizo Borg de datos mundiales sobre la relación de intensidad-energía sísmica superficial, la cual le resultó en una banda muy amplia de valores, como puede verse en la figura B.1.

La relación de Borg, 1988, predice que para una cierta intensidad y una magnitud se le puede asociar un valor de energía horizontal superficial. Sin embargo, como se puede ver en la figura B.1 la banda que contiene al rango de magnitudes no está claramente definida; ésto quiere decir que para un mismo valor de intensidad se pueden obtener valores de energía que pueden variar hasta en un orden de magnitud. Con el método que se propone en esta tesis se puede asignar un valor puntual de energía para una intensidad y magnitud dadas.

Se calculará la distribución de energías superficiales horizontales con ambos métodos, el de Borg, 1988, y el de este trabajo, aplicándolos en una región que ha sido

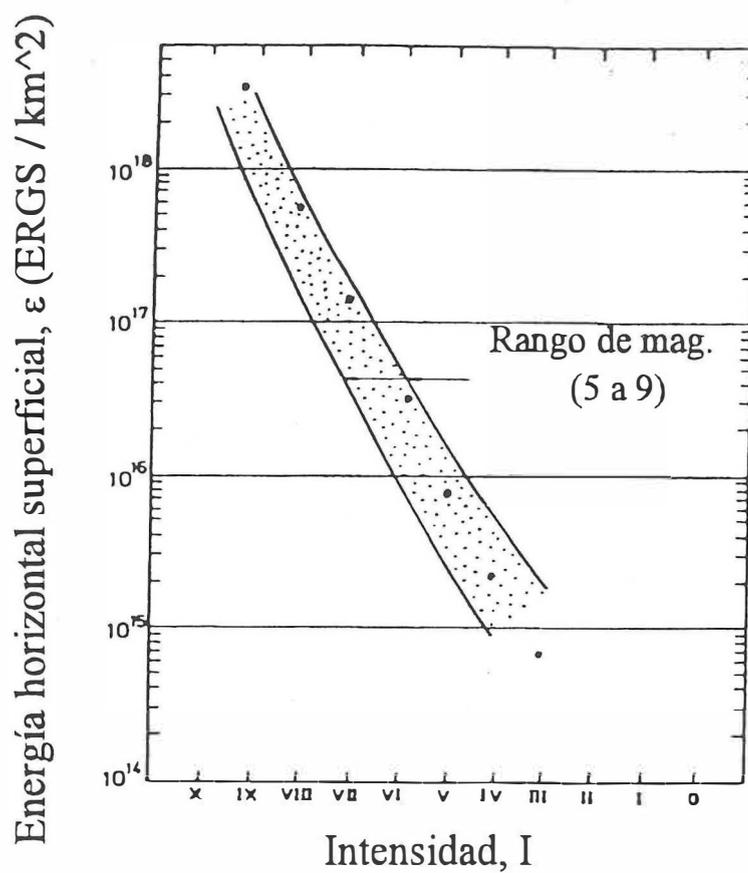


Figura B.1. Comparación de los resultados de la densidad de energía horizontal vs. intensidades de MM, estimadas con la metodología de este trabajo con la banda de valores compilada por Borg, 1988.

ampliamente estudiada desde el punto de vista de deslizamientos, como lo es el caso del pueblo Estancia de la Virgen, Guatemala, donde se dió un deslizamiento rotacional de ladera como resultado del terremoto de Guatemala de 1976 ($M=7.5$). Los parámetros que caracterizaron a este deslizamiento han sido reportados por (Bolt, 1978; Harp *et al.*, 1981; Keefler, 1984; Borg, 1988). Para este sismo existe un mapa de isosistas observadas, a partir del cual tomé las distancias a cada una de las bandas de intensidad constante. La tabla B.II presenta las distancias a las bandas y los valores de las densidades de energía superficial horizontal obtenidas a partir de sustituir los parámetros que se muestran en la tabla B.I en las ecuaciones (13) a (21).

En la figura B.1 se grafican los valores de la tabla B.II sobre la banda de relación intensidad vs. densidad de energía de Borg, 1988. Como se puede observar, los valores predichos con la metodología de esta tesis caen dentro de la franja de Borg, 1988, siguiendo una línea que tiene una tendencia compatible con la de esa banda. Este comportamiento de los resultados obtenidos en este trabajo es aceptable y tiene la ventaja adicional de que se obtienen resultados puntuales. Ésto quiere decir que para una intensidad y magnitud dadas obtengo un valor único de energía, mientras que para la banda de Borg, (1988) para la misma magnitud e intensidad hay un rango de valores de densidad de energía que puede variar hasta en un orden de magnitud.

Tabla B.I. Parámetros reportados en la literatura para el deslizamiento rotacional de ladera en la localidad Estancia de la Virgen, Guatemala (Bolt, 1978; Harp *et al.*, 1981; Keefer, 1984; Borg, 1988).

| Ángulo de la pendiente | Densidad (g / cm^3) | Espesor de la masa deslizante | Espesor zona de debilidad | Energía sísmica total |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| 22° | 2.335 | 20 m | 30 cm | 5.6×10^{17} ergs / km ² |

Tabla B.II.- Distancias (tomadas de Borg, 1988) a las bandas de intensidad constante, para la localidad Estancia de la Virgen, Guatemala, M=7.5.

| IMM | Distancia (km) | Energía superficial horizontal (ergs / km ²) |
|------|----------------|---|
| III | 470.0 | 6.14074 E14 |
| IV | 317.0 | 2.14239 E15 |
| V | 207.0 | 8.04920 E15 |
| VI | 134.0 | 3.19282 E16 |
| VII | 85.0 | 1.43060 E17 |
| VIII | 51.0 | 5.50661 E17 |
| IX | 36.0 | 3.47575 E18 |
| X | 13.0 | - |

A continuación presentaré un ejercicio que ilustra lo adecuado de los resultados obtenidos con la metodología de esta tesis, a través de la aplicación de ella a un caso de deslizamiento (Estancia de la Virgen) el cual, por estar muy documentado en la literatura, puede ser usado para validar dichos resultados. El terremoto de Guatemala de 1976 (M=7.5) produjo una gran cantidad de deslizamientos, el que se produjo cerca del pueblo Estancia de la Virgen causó la muerte de 13 personas y se desarrolló en rocas andesíticas cubiertas por capas de material pumicítico de edad Terciario cuyos espesores varían desde

pocos metros hasta 20 m. El deslizamiento es del tipo rotacional y el volumen desplazado de material fue de aproximadamente $6 \times 10^6 \text{ m}^3$, el sitio se ubicó en la banda de intensidad VIII.

Harp *et al.* (1981) mencionan que el deslizamiento de Estancia de la Virgen se desarrolló justamente durante la ocurrencia del terremoto, a diferencia de otros que se dispararon después de éste o a causa de la ocurrencia de lluvias. De acuerdo con la clasificación de la estabilidad de una pendiente en función del factor de seguridad, podemos pensar que aquellos deslizamientos que se produjeron después del sismo debieron tener Factores de Seguridad cercanos a 1.0, mientras que el deslizamiento de Estancia de la Virgen debió presentar un valor del FS claramente inferior a 1.0, debido a que el derrumbe se dió de manera casi instantánea durante el terremoto.

A la luz de estas consideraciones se compararán el resultado que Borg, 1988, obtuvo para este caso con el obtenido con la metodología presentada en esta tesis. En la tabla B.III se observa que el FSD calculado con el método de Borg, 1988, es de ~ 1.0 , de donde puede interpretarse que el terremoto sólo produjo la inestabilidad pero no el deslizamiento, ya que como se mencionó antes, cuando el FSD = 1.0, la pendiente está en una condición crítica de estabilidad. Mientras que los resultados obtenidos en esta tesis arrojan un FSD = 0.75, lo cual es más probable si se considera que la ladera se deslizó durante el sismo. Por lo tanto, ese último resultado es más cercano a la realidad que el presentado por Borg, 1988. Además, Harp *et al.*, (1981) mencionan que durante el terremoto de Guatemala se dispararon cientos de deslizamientos.

Tabla B.III. Resultados de los factores de seguridad dinámicos (FSD) para el deslizamiento de Estancia de la Virgen, Guatemala, $M=7.5$, obtenidos con el método de Borg (primera línea) y con el de este estudio (segunda línea).

| Ángulo de la pendiente | ϕ | FS | Energía sísmica total | ϕ' | FSD |
|------------------------|------------|------|---|---------------|------|
| 23° | 45° | 2.36 | | 22.8° | 0.99 |
| 23° | 45° | 2.36 | 1.03×10^{18} <i>ergs / km²</i> | 17.72° | 0.75 |

APÉNDICE C. Pruebas numéricas del comportamiento del Factor de Conversión.

En este apéndice se presenta una generalización del comportamiento del factor de conversión para un conjunto de valores promedio de los parámetros que caracterizan a los frentes de deslizamiento de Tijuana, cuando se les somete a un amplio rango de sollicitaciones sísmicas.

Se utilizó un espesor de los materiales propensos a deslizamientos de 40 m, una zona de debilitamiento promedio de 40 cm, una densidad del material de 1.8 g/cm^3 ; el contacto litológico está representado por los miembros superior e inferior de la Fm. San Diego y una variación de los ángulos de la pendiente de $0 - 36^\circ$. Para cubrir todas las posibles sollicitaciones que se pudieran presentar en la región de estudio, utilizaré las seis zonas de densidad de energía que se estimaron para el rompimiento propuesto de la falla La Nación, los cuales se muestran en la Tabla VI.

La figura C.1 muestra los resultados de ese ejercicio. Cada línea representa los valores del factor de conversión en función del ángulo de la pendiente, para una densidad de energía superficial. Como es de esperarse, la altura de cada línea depende del valor de la densidad de energía correspondiente a cada banda de intensidad, la línea superior es para la intensidad de IMM = IX y la inferior para IMM = IV. En el extremo derecho de cada línea está anotado el valor medio de los 36 factores de conversión calculados para cada intensidad, además de la variación máxima de ese valor medio.

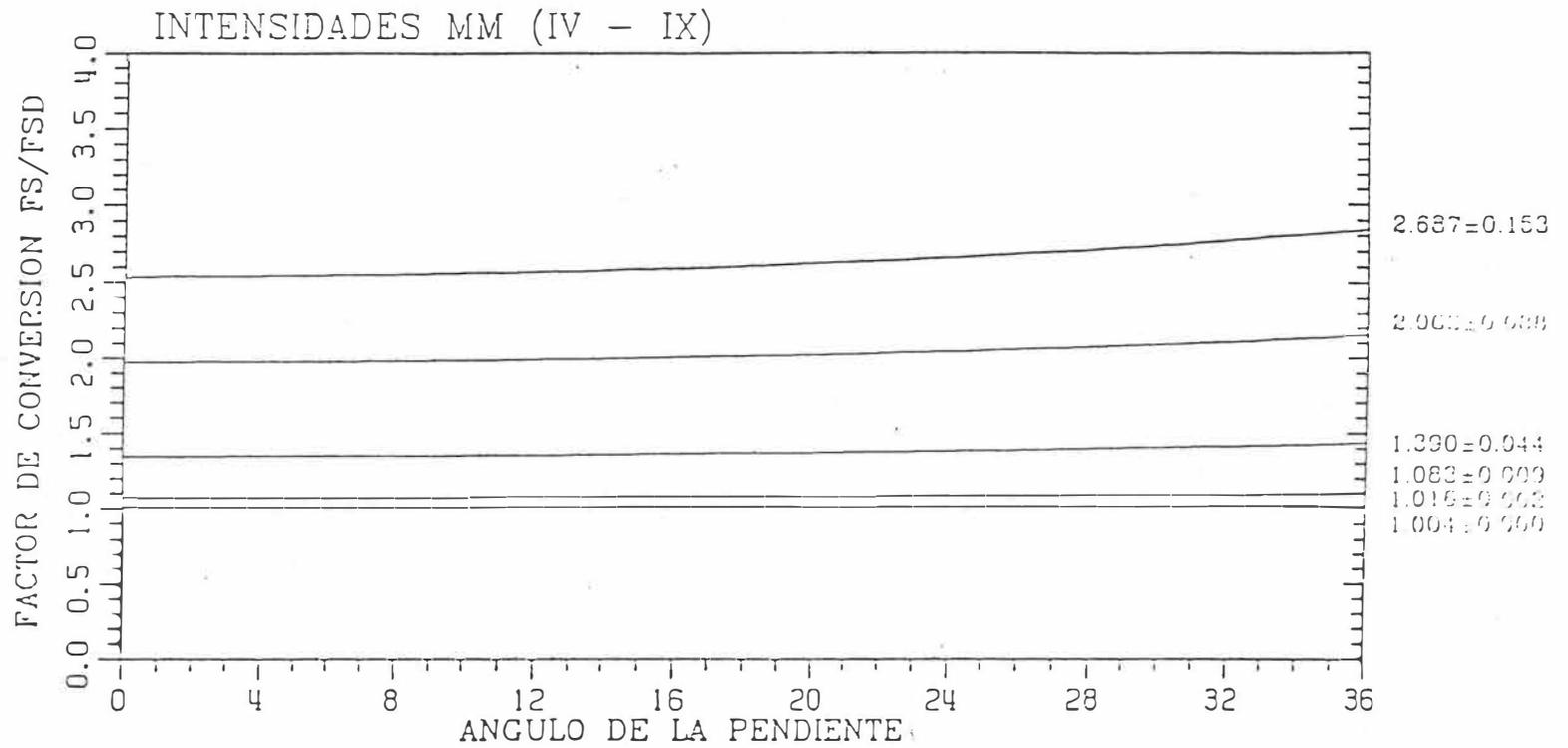


Figura C.1. Valores del Factor de Conversión de cada banda de intensidad (IMM= IV-IX) en función del ángulo de inclinación de la ladera para un sitio con características promedio del área de estudio. La línea superior corresponde a la intensidad de IX y la línea inferior corresponde a la intensidad IV.

Como puede observarse, las variaciones en los valores del factor de conversión para cada zona son despreciables con respecto al valor del factor de conversión, obteniendo un valor máximo del 5% de variación para la intensidad más alta ($IMM = IX$) y una variación prácticamente nula para una $IMM = IV$. La conclusión obvia de este experimento es que el factor de conversión es aceptablemente constante para todo un frente de deslizamiento, en el cual se mantienen razonablemente constantes a lo largo del frente, la densidad y el espesor del material, siendo la única variable la inclinación de la pendiente. Esta última puede variar por la actividad humana o la erosión.