

01/21
20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES Y
EVALUACIÓN DEL RIESGO GEOTÉCNICO EN EL
CERRO DEL TENAYO, EDO. DE MÉXICO.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
VÍCTOR CARLOS VALERIO

DIRECTOR DE TESIS:
ING. SERGIO R. HERRERA CASTAÑEDA



MÉXICO, D. F.

FEBRERO DEL 2003

Q



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/066/02

Señor
VÍCTOR CARLOS VALERIO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. SERGIO R. HERRERA CASTAÑEDA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES Y EVALUACIÓN DEL RIESGO GEOTÉCNICO EN EL CERRO DEL TENAYO, EDO. DE MÉXICO"

- I. INTRODUCCION
- II. RESUMEN
- III. GENERALIDADES
- IV. GEOGRAFÍA
- V. GEOLOGÍA
- VI. PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO EN EL CERRO DEL TENAYO
- VII. RIESGOS GEOTÉCNICOS EN EL CERRO DEL TENAYO
- VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 19 de abril de 2002.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

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

NOMBRE: Valerio
FECHA: 11 de Septiembre
FIRMA: [Firma]

b

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería por contribuir a mi formación profesional. A todos mis profesores.

Al Servicio Geológico Metropolitano, en especial a Armando García, Wendy Morales, Laura del Valle y Adriana Galván.

A Laura Timoteo, Esther Romero, Cirilo y Luis.

Al lic. Carlos Ruíz.

A mis cuates Roberto Ruedas, Alfredo Peralta, Bernardo Orozco.

Al honorable jurado.

A Fundación ICA y Telmex por el apoyo recibido durante mis estudios.

A mi director de tesis Sergio R. Herrera Castañeda.

A mi madre Lidia Valerio Gamboa (por apoyarme, creer en mi y soportarme), a mis hermanas Rosalba, Fernanda y Paty; a mis sobrinos Christopher, Alonso, Marifer, Paty y Javier.

A Toño Castro, Cristian León, José M. Tapia, Marco Rodríguez.

A Iskra y al fuego que me invadió una primavera.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
I.- RESUMEN.....	2
II.- GENERALIDADES.....	3
II.1.- INTRODUCCIÓN.....	3
II.2.- OBJETIVO.....	4
II.3.- METODOLOGÍA.....	4
III.- GEOGRAFÍA.....	8
III.1.- LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE COMUNICACIÓN.....	8
III.2.- CLIMA.....	9
III.3.- MORFOLOGÍA.....	10
III.4.- INFLUENCIA ANTRÓPICA.....	11
III.5.- TOPOGRAFÍA.....	14
III.6.- HIDROLOGÍA.....	15
IV.- GEOLOGÍA.....	16
IV.1.- GEOLOGÍA REGIONAL.....	16
IV.2.- SISMICIDAD.....	20
IV.3.- GEOLOGÍA LOCAL.....	22
IV.3.1.- ESTRATIGRAFÍA.....	24
IV.3.2.- GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	26

V.- PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO EN EL CERRO DEL TENAYO.....	43
V.1.- PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LAS ROCAS.....	43
VI.- RIESGOS GEOTÉCNICOS EN EL CERRO DEL TENAYO.....	54
VI.1.- PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.....	56
VI.1.1.- DESLIZAMIENTO.....	58
VI.1.2.- VOLTEO.....	59
VI.1.3.- EROSIÓN Y RODAMIENTO.....	60
VI.2.- TIPOS DE RIESGO RECONOCIDOS.....	62
VI.3.- ZONIFICACIÓN DE RIESGO GEOTÉCNICO.....	66
VI.4.- ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	76
VI.5.- SOLUCIONES GEOTÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS.....	85
VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97
ANEXO A.....	100
ANEXO B.....	111
ANEXO C.....	153

INTRODUCCIÓN

Hace más de 500 años la Cuenca del Valle de México estaba formada por un conjunto de lagos que, cuando la precipitación era abundante, formaban un único y enorme lago rodeado de volcanes, con una flora y fauna excepcionales. La visión idílica que maravilló a los primeros pobladores hoy es distinta. El desmesurado y caótico crecimiento de la mancha urbana en la Ciudad de México ha ocasionado un cambio radical del paisaje. Dadas las condiciones geológicas de la cuenca y de urbanización, tan peculiares, se tiene como resultado que la ciudad es afectada por una serie de peligros geológicos y geotécnicos entre los que se pueden mencionar: hundimiento, fracturamiento, sismos, inundaciones, fallas de taludes. Todos estos fenómenos tienen un potencial destructivo, sea a corto o largo plazo. Actualmente miles de personas viven en condiciones irregulares y en alguna situación de peligro por lo que es importante generar mapas de riesgo para detectar zonas vulnerables, prevenir accidentes y mitigar los peligros que ponen en juego la vida humana.

El presente trabajo de tesis contribuye al conocimiento de los factores que propician algún tipo de falla en las laderas rocosas y que ponen en riesgo la vida de las personas y la infraestructura ahí construida.

Se le da importancia a la obtención de un Mapa de Riesgo Geotécnico que separa zonas de alto, mediano y bajo riesgo, cuya utilidad inmediata es la de programar un plan de mitigación que inicie en las áreas más afectadas. Para esto se tomaron en cuenta los siguientes factores principales: litología, estructura geológica, topografía y ubicación de la infraestructura con respecto a las zonas de peligro.

I. RESUMEN

El Cerro El Tenayo es un domo volcánico de composición dacítica que forma parte de la Sierra de Guadalupe, localizado entre las coordenadas $99^{\circ} 11'$, $99^{\circ} 09' W$ y $19^{\circ} 31.5'$, $19^{\circ} 33' N$, en el municipio de Tlalnepantla, Edo de México. Presenta forma elíptica con un eje mayor de aproximadamente 1.4 Km y un eje menor de 1 Km. El desnivel que presenta con respecto a la planicie lacustre es de 250 m.

Debido al intenso crecimiento urbano desarrollado a partir de los años setenta en toda la Sierra de Guadalupe y particularmente en el Cerro El Tenayo, se tiene como resultado que gran parte de las viviendas fueron construidas en zonas de laderas que presentan serios peligros geotécnicos.

En este trabajo se establece una metodología para evaluar la estabilidad de los taludes rocosos del Cerro El Tenayo. Con base en técnicas de campo y gabinete se definieron los factores que influyen en la estabilidad de los macizos rocosos, como son: topografía, litología, comportamiento mecánico, fracturamiento, sismicidad, clima, vegetación, grado de intemperismo y procesos antrópicos. Relacionando estas variables y con base en observaciones de campo se dividió el área de estudio en cuatro zonas que presentan riesgos geotécnicos definidos. Los principales mecanismos de falla que se detectaron son: deslizamiento, volteo y caída de rocas así como flujo de detritos. Utilizando el programa de "Rock Fall" se modeló la trayectoria de los bloques para los distintos mecanismos de falla y se obtuvieron parámetros importantes como el alcance horizontal y la energía cinética desarrollada, los cuales sirven para delimitar las zonas de alto, mediano y bajo riesgo así como para plantear y diseñar soluciones geotécnicas. Toda la información anterior se integró para realizar un mapa de riesgo geotécnico. Se estimaron las propiedades índice y mecánicas de la roca más importantes para realizar los análisis de estabilidad de los cuales se desprenden las soluciones geotécnicas. Finalmente se propone un plan de mitigación de riesgo para cada zona evaluada.

II. GENERALIDADES

II.1.- INTRODUCCIÓN

El Hombre siempre ha estado en contacto con desastres naturales: sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos y flujos tanto de suelo como de roca. Estos fenómenos se presentan en la naturaleza con cierto periodo de recurrencia y pueden ser muy destructivos. Un desastre natural es de gran magnitud, es repentino, imprevisible, de corta duración y causa víctimas humanas y daños económicos. Resulta imposible vivir en un ambiente que esté fuera de peligro y que no implique ningún riesgo para las personas, pero tomar conciencia acerca de estos fenómenos y del hecho de que en ocasiones la actividad humana es la que induce el riesgo, nos compromete a todos (profesionistas, autoridades, instituciones, sociedad civil) a formular criterios que regulen el uso de tierra en zonas donde aún no se construye, así como a generar mapas de riesgo en zonas ya pobladas.

Generalmente los términos peligro y riesgo se usan como sinónimos, pero conviene distinguir claramente estos términos. Peligro se refiere a la ocurrencia de un proceso, sea natural o inducido por el hombre, con el potencial para causar daños. El peligro existe por causas naturales (volcán, ladera inestable, falla geológica) o bien, por causas antrópicas (el corte en un talud, que de una condición estable pasa a una condición inestable). Riesgo se refiere a qué tan expuestas están las personas, la infraestructura y las vías de comunicación a sufrir algún perjuicio. La Cuenca de México, dada su ubicación, su conformación geológica y la gran mancha urbana que se ha extendido sobre ella, presenta una serie de peligros y de riesgos geológicos y geotécnicos, ya sea debido a hundimiento, sismicidad, grietas de tensión, deslizamiento y caída de suelo o roca. En particular los deslizamientos y derrumbes, los desprendimientos de roca y las fallas de taludes son fenómenos que

ocurren frecuentemente en las zonas de laderas de la Cuenca del Valle de México, sobre todo en época de lluvias o bien durante periodos de actividad sísmica importante.

II.2.- OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio de estabilidad de taludes con base en las características litológicas, de fracturamiento y mecánicas de los materiales rocosos del Cerro del Tenayo así como generar un mapa de riesgo geotécnico con el fin de determinar las zonas de alto, medio y bajo riesgo.

Se realizan análisis de estabilidad representativos de cada mecanismo de falla para formular propuestas generales de mitigación para cada zona.

La elaboración del mapa de riesgo implica el manejo de algunas variables, las cuales, al conjugarse de cierta manera, nos van a definir una escala de riesgo. Los factores que se tomaron en cuenta para definir el riesgo geotécnico fueron (Hutchinson, 1998): topografía, litología, estructura geológica, comportamiento mecánico e hidráulico de los materiales, forma, tamaño y condiciones de apoyo de los bloques, fracturamiento, sismicidad, erosión, grado de intemperismo y factores antrópicos.

Para lograr el objetivo se establece una metodología que puede ser aplicada para evaluar la estabilidad de otros taludes rocosos, siempre y cuando se definan primero las condiciones particulares del sitio.

II.3.- METODOLOGÍA

La metodología consistió en la utilización de técnicas de campo y laboratorio que permitieran la evaluación cualitativa y cuantitativa de los factores que intervienen en la generación del riesgo geotécnico en la zona de estudio.

Para lograr el objetivo de la tesis se ha seguido la siguiente metodología:

- Recopilación bibliográfica. En esta etapa se buscó toda la información disponible del área de estudio, de trabajos previos y en la literatura técnica que se tiene al alcance. Se revisan artículos, memorias, tesis y se selecciona la información que interesa.
- Obtención o generación de mapas base. Es importante tener a la mano los mapas más importantes para llevar a cabo el estudio. Si no se cuenta con mapas a escala adecuada se pueden digitalizar o generar con algún programa de cómputo. Los mapas indispensables son: topográfico, de traza urbana, geológico, de pendientes y modelo sombreado.
- Fotointerpretación. Con la ayuda del estereoscopio se marcaron aquellos rasgos estructurales que se consideraron importantes y que implicaban un potencial peligro. A partir de este análisis se generó un mapa de lineamientos, en el que se marcan todos los rasgos del terreno (fracturas, escarpes, bloques, líneas de flujo, drenaje) y se identifican y separan las zonas de mayor peligro. La información que se obtiene está sujeta a posteriores verificaciones en campo.
- Reconocimiento preliminar de peligros geotécnicos. Después del análisis de la fotointerpretación se vacían los resultados al mapa topográfico. Se reconocen zonas donde se han detectado bloques inestables y rasgos de fracturamiento intenso, que coinciden con zonas de fuerte pendiente para correlacionar la topografía con el fracturamiento.
- Trabajo de campo. En el trabajo de campo se tomaron datos de rasgos estructurales como fallas y fracturas, muestreo de rocas, se detectaron macizos rocosos inestables, se tomaron fotografías y se escribieron notas y croquis de rasgos del terreno. Se utilizó el Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés)

para una adecuada ubicación de los rasgos estructurales (fallas, fracturas, cavernas, bloques) detectados en campo.

- Procesamiento de datos. Una vez realizadas las mediciones de fracturas en campo se capturan estos datos para generar las rosetas de fracturamiento. Se realizó el análisis estadístico de fracturas mediante el uso de estereogramas utilizando el paquete SPHERISTAT versión 2.0 para Sistema Operativo Windows.
- Elaboración de fichas de bloques y estaciones estructurales. Los datos de bloques obtenidos en campo se integran en una ficha geotécnica en la cual se describen sus características, su posición y nivel de peligro. La frecuencia con que se presentan estos bloques, la pendiente de su posible trayectoria y la cercanía de las casas define un nivel de riesgo. Las estaciones estructurales (puntos donde se realizó un muestreo estadístico de fracturas) contienen los datos del fracturamiento y sus características. Al final se integra esta información para generar un mapa de peligros geotécnicos.
- Zonificación de riesgo geotécnico. Para realizar la *zonificación ingenieril de riesgo geotécnico* se integró la información obtenida en las actividades previas tomando en cuenta las siguientes variables: topografía, litología, estructura geológica, comportamiento mecánico e hidráulico de los materiales, forma, tamaño y condiciones de apoyo de los bloques, fracturamiento, sismicidad, erosión, grado de inestabilidad y factores antrópicos. El mapa de riesgo geotécnico toma en cuenta el peligro geotécnico establecido y la presencia de viviendas y demás infraestructura. Se modeló la trayectoria de los bloques con el programa "Rock fall" para los distintos mecanismos de falla observados y se obtienen parámetros de máximo alcance horizontal, velocidad y energía cinética desarrollada, los cuales sirvieron para delimitar zonas de alto, mediano y bajo riesgo así como para plantear y diseñar soluciones geotécnicas en cada zona.

- Análisis de cada riesgo geotécnico. Se realizó un análisis de estabilidad tipo para cada mecanismo de falla identificado, principalmente por: deslizamiento, volteo y caída de rocas.
- Propuestas de solución para cada tipo de riesgo. Del análisis de estabilidad se desprenden las posibles soluciones geotécnicas de mitigación de riesgo. Utilizando el criterio de sencillez, economía y funcionalidad se proponen alternativas de mitigación de riesgo geotécnico y sus procedimientos constructivos.

III. GEOGRAFÍA DE LA ZONA

III.1.- LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

El Cerro del Tenayo se encuentra en el municipio de Tlalnepantla, Edo. de México, limitando con el norte del Distrito Federal, delegación Gustavo A. Madero (fig.1). Forma parte de la Sierra de Guadalupe y está localizado entre las coordenadas $99^{\circ} 11'$, $99^{\circ} 09'$ W y $19^{\circ} 31.5'$, $19^{\circ} 33'$ N, al oeste de la fosa de Cuauhtepac. El área de estudio está bien comunicada a través de la calzada Vallejo y la avenida Lázaro Cárdenas Norte, que comunican el centro del D.F. con el área de estudio. Otras vías de acceso importantes son la carretera Tenayuca-Santa Cecilia y la avenida Tlalnepantla-Tenayuca.

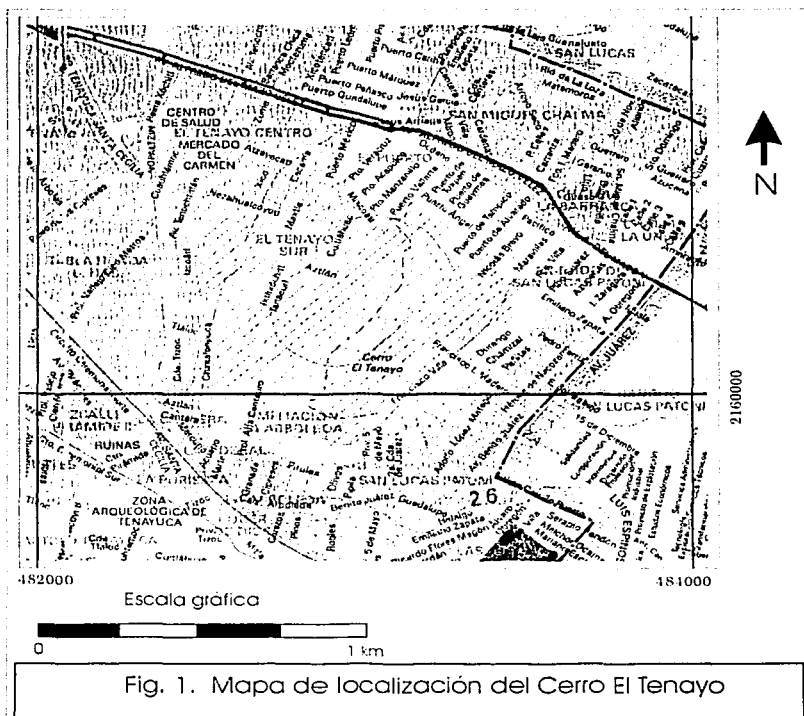


Fig. 1. Mapa de localización del Cerro El Tenayo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.2.- CLIMA Y VEGETACIÓN

En el Cerro del Tenayo el clima es templado con temperatura media anual de 17°C. La precipitación media anual es de 600-800 mm.

La vegetación espontánea es un 90 % secundaria, es decir hierbas y arbustos (Lozano, 1968). En algunas zonas aisladas llegan a crecer árboles entre las fracturas de las rocas. El clima y la vegetación están íntimamente ligados con el grado de intemperismo que presenta una roca. El intemperismo se refiere a la alteración que sufre la roca "in situ" debido a factores físicos, químicos y mecánicos. Sin embargo, todos los mecanismos de ataque del intemperismo pueden incluirse en dos grupos: desintegración mecánica y descomposición química (Juárez y Rico, 1990). El primero se refiere a agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las fracturas y fisuras de la roca, efectos de plantas y organismos (fig. 2) y la acción de la gravedad. El segundo se refiere a la acción de agentes que atacan las rocas y modifican su constitución mineralógica y química. El principal agente es el agua, sin embargo los efectos químicos de la vegetación también son importantes. El resultado de la acción de estos mecanismos produce arcilla como último producto de descomposición.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2 Las raíces de árboles que crecen entre las fracturas son un factor importante de disgregación mecánica.

III.3.- MORFOLOGÍA

El Cerro del Tenayo es una prominencia topográfica de 250 m de alto con respecto a la planicie lacustre, presenta una forma dómica y en planta se ve como una elipse con el eje mayor de 1.4 km en sentido N 30° E, y el eje menor de 1 km en sentido N 60° W (fig.3). Tiene pendientes suaves en la parte central, más pronunciadas en los flancos norte y sur y abruptas en los flancos este-oeste. Su forma es reflejo de la estructura geológica que lo define ya que se trata de un domo volcánico.

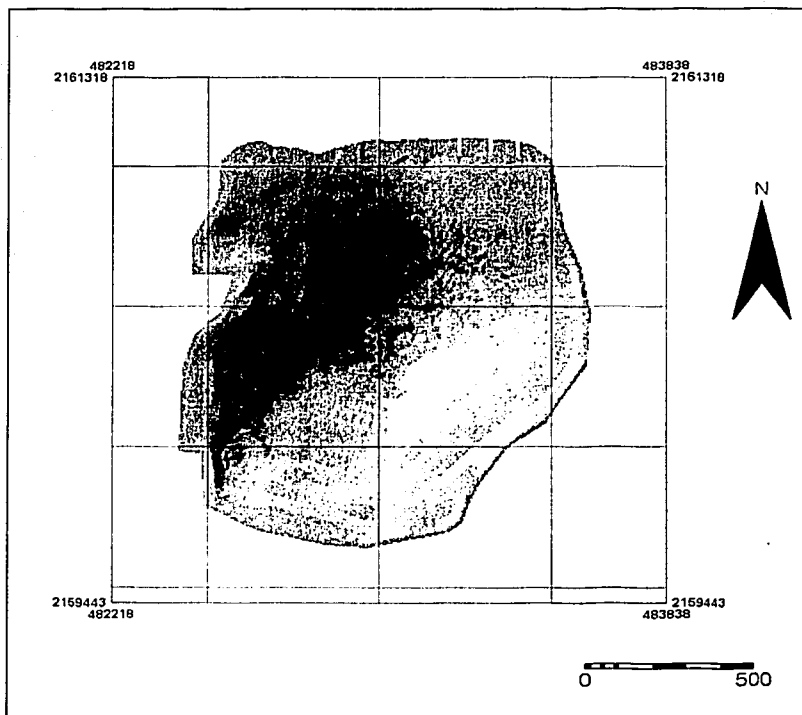


Fig. 3 Mapa de modelo sombreado. Cerro El Tenayo. Escala 0-500 metros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.4.- INFLUENCIA ANTRÓPICA

La intervención humana en los cambios y alteraciones del medio ambiente ha sido notable, sobre todo en los últimos 30 años, debido a la caótica expansión de la mancha urbana. El gran crecimiento demográfico que se ha registrado en las últimas décadas, la falta de planeación urbana y de uso de suelo y la demanda cada vez mayor de vivienda, ha tenido como resultado una expansión de la mancha urbana a zonas de laderas montañosas que presentan serios peligros desde el punto de vista geotécnico. El peligro que existe en muchas de estas laderas no ha sido evaluado, por lo que actualmente miles de personas viven en zonas de peligro. Para evitar más asentamientos irregulares hacia arriba de las laderas fue necesario construir bardas o muros ecológicos, por ejemplo en la Sierra de Guadalupe, en la cual se ha desarrollado una gran cantidad de asentamientos humanos, muchos de ellos irregulares. Particularmente el Cerro del Tenayo, empezó a poblarse a partir de 1970, sobre todo en los flancos este-oeste, sin ningún tipo de restricción respecto al uso de suelo; en los años 80 se construyeron viviendas en los extremos norte-sur; para la década de los 90 la población llegó hasta la cota 2350, es decir, poco más de 100 m de altura a partir de la planicie lacustre. Para 1993 las viviendas ya ocupaban todas las laderas del cerro (fig. 4). Este intenso proceso de urbanización ha ocasionado grandes alteraciones e impactos en el medio físico; a las condiciones naturales que favorecen algún tipo de falla de los taludes hay que añadir la influencia que ejerce la actividad humana sobre las laderas naturales que se traduce en cortes de taludes, sobrecarga de obras civiles en zonas rocosas potencialmente inestables, construcción de caminos, vibraciones por maquinaria o paso de vehículos y explotación de canteras. La influencia más notable de la actividad humana es que el riesgo nace en el momento en que se habitan y se crea infraestructura en zonas donde existe algún peligro.

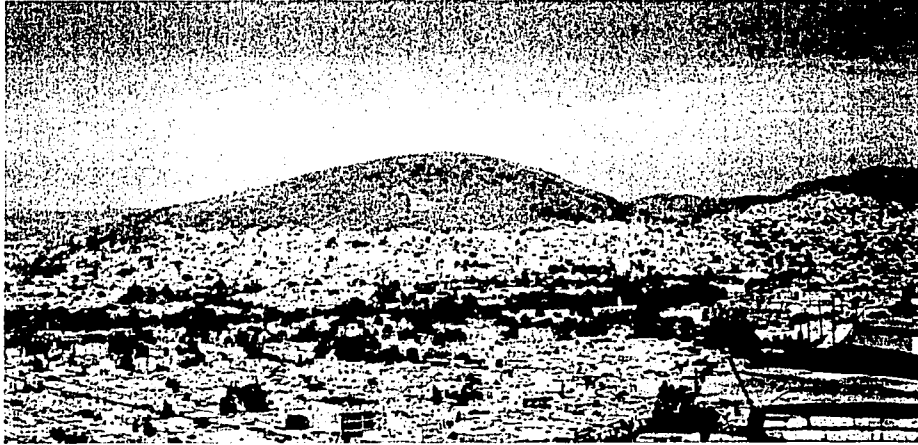


Fig. 4 Vista panorámica del Tenayo, flanco este.
Visto desde el cerro del Chiquihuite.

En la fig. 5 se muestra el mapa de crecimiento urbano de la Sierra de Guadalupe.

Es importante evaluar en términos de una escala qué tan alto o bajo puede ser el riesgo que se presenta en una determinada zona, y si éste es alto proponer alternativas de mitigación para reducir el riesgo, y si es bajo, detectar los factores tanto ambientales como antrópicos cuya combinación podría aumentar el riesgo. Finalmente queda resaltar la importancia que tiene elaborar mapas de riesgo o de peligro geotécnico, pues con ellos se puede evaluar el nivel de riesgo en que vive un sector de la población, determinar áreas que presenten peligros y que sirvan para elaborar mapas de uso de suelo en zonas donde la urbanización apenas comienza, elaborar programas de mitigación y prevención, ampliar la información que se tiene de nuestro medio y cómo afecta a la población.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

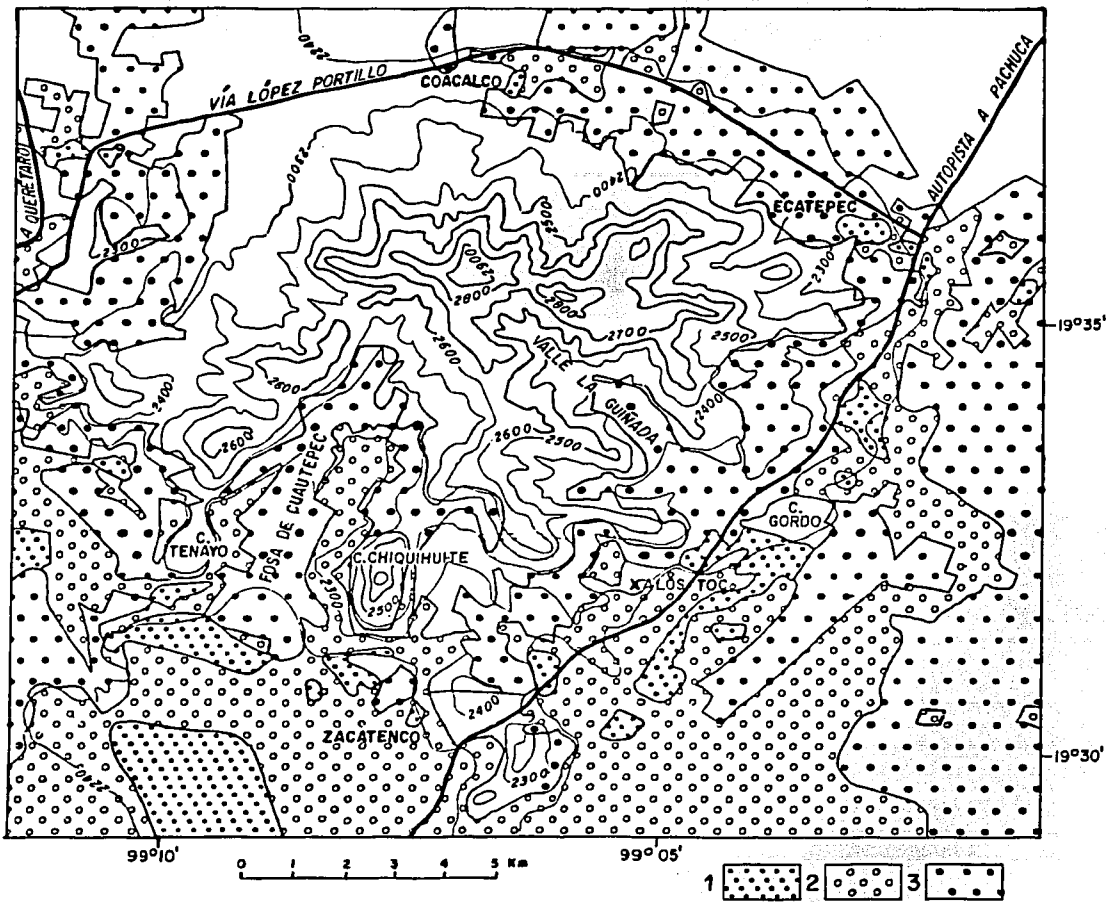


Fig. 5 Mapa de crecimiento urbano. 1) 1970; 2) 1980; 3) 1990. (Lugo y Salinas, 1996)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.5.- TOPOGRAFÍA

La topografía del Cerro del Tenayo presenta pendientes abruptas, de 60° a 90°, principalmente en sus flancos este-oeste. En los flancos norte-sur las pendientes son más suaves, de 15° a 45° (fig 6). La topografía es un factor importante para definirnos un cierto nivel de peligro y en general para elaborar mapas de riesgo. El nivel de riesgo que se asigna a cada rango de pendientes es el siguiente: bajo riesgo de 0° a 30°, mediano riesgo de 30° a 45°, de alto riesgo de 45° a 90°.

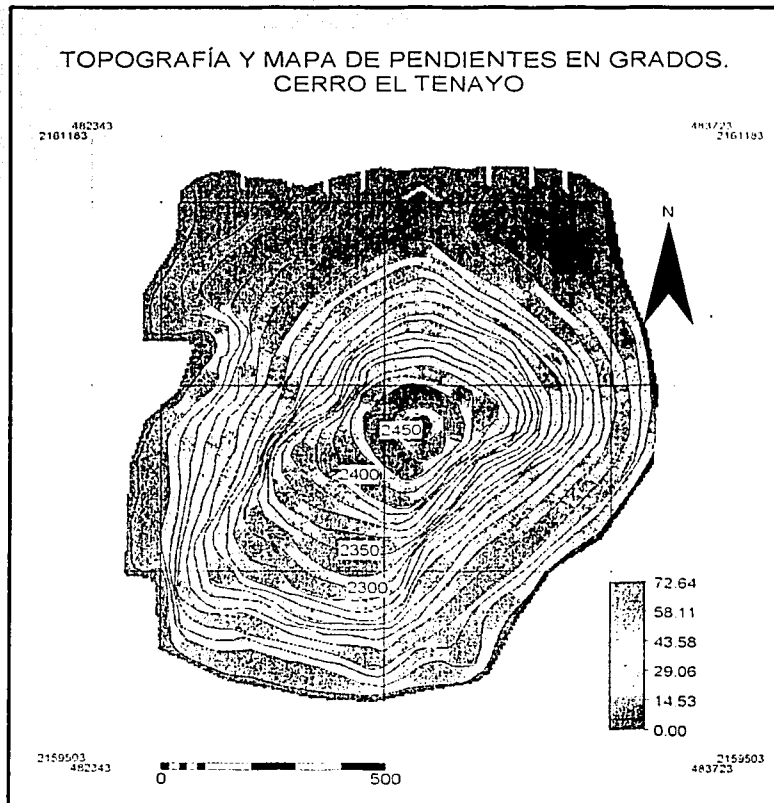
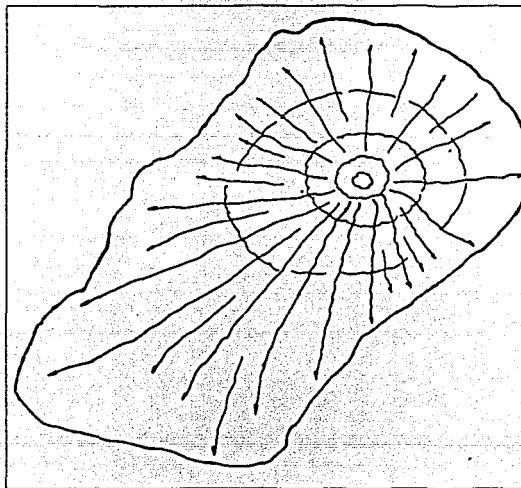


Fig. 6 Topografía y pendiente en grados

III.6.- HIDROLOGÍA

En el Cerro del Tenayo no existen cauces de agua definidos. La lluvia es la única fuente de agua que favorece la infiltración y el arrastre de material hacia pendientes bajas. El tipo de drenaje que se presenta en el cerro del Tenayo es radial (fig 7), lo cual se debe principalmente a su morfología. El escurrimiento del agua de lluvia está controlado principalmente por los patrones estructurales de fracturamiento.

Como muchas viviendas, sobre todo de la parte más alta del cerro, carecen de servicios de drenaje, la gente vierte el agua de uso doméstico pendiente abajo por lo que en algunas zonas se observa una constante filtración. La presencia de agua en un talud rocoso afecta de varias maneras: la presión de agua en fisuras y en grietas de tensión reduce la estabilidad incrementando las fuerzas que inducen la falla; el congelamiento del agua en fracturas y fisuras ejerce un empuje debido al cambio de volumen que experimenta el agua con la variación de la temperatura; la erosión en fracturas debido a la velocidad del flujo o bien el arrastre de material detrítico en pendientes pronunciadas.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 7 Red de drenaje del domo el Tenayo

IV. GEOLOGÍA

IV.1.- GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se localiza regionalmente dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM). El CVTM es un arco volcánico continental con una composición predominantemente andesítico-dacítico, que se extiende por más de 1200 Km desde las costas del Pacífico hasta las inmediaciones del Golfo de México (fig. 8), con un ancho que varía entre 20 y 200 Km (García, 2002).

Esta provincia está formada de varias cuencas, unas de origen tectónico y otras volcánicas, entre las últimas se puede señalar a la cuenca de México. (Lozano, 1968)



Fig. 8 Localización del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. (Demant, 1978)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuenca de México

La Cuenca de México constituye un gran vaso natural azolvado, en el que se depositaron los productos de erosión de las sierras aledañas y por las cenizas de numerosos volcanes en el sur, activos en los últimos 700 000 años. Mooser (1975) propuso una actividad en siete fases que formaron la cuenca de México.

- En la primera fase, de fines del Cretácico al Eoceno, se plegaron los sedimentos que constituyen la base.
- En la segunda fase, del Oligoceno Medio, surgen los primeros complejos volcánicos al norte de la cuenca, con lavas de composición intermedia y ácida, con abundantes tobas e ignimbritas.
- La tercera fase corresponde al Oligoceno Tardío, cuando surgen las estructuras dacíticas como el Peñón de los Baños, los cerros del Tigre y Zacatenco.
- La cuarta fase fue en el Mioceno y se originó el complejo principal de la Sierra de Guadalupe que se caracteriza por lavas de intermedias a ácidas. Se formaron grandes domos dacíticos, como los cerros Tenayo, Chiquihuite y Tepeyac entre otros. También surgieron las llamadas Sierras Menores.
- La quinta fase se inicia a fines del Mioceno y es cuando se forman las Sierras Mayores, las cuales fijan los límites de la cuenca al poniente y al oriente. Ejemplos de estas sierras son la de las Cruces, Río Frio y Nevada, constituidas por lavas andesíticas y dacíticas con estructura porfírica. Este vulcanismo domina en el Terciario Tardío y perdura hasta el Cuaternario.
- En la sexta fase se produce el vulcanismo plio-pleistocénico con andesitas basálticas.
- La séptima fase es el vulcanismo del Cuaternario Tardío y se forma la Sierra Chichinautzin, que obstruye el antiguo drenaje al sur y se cierra lo que es hoy la cuenca de México.

Geología de la Sierra de Guadalupe

La Sierra de Guadalupe, con una altitud máxima de 3000 m.s.n.m., se localiza en la cuenca de México, en el extremo septentrional del Distrito Federal y porciones contiguas del estado de México, entre los paralelos $19^{\circ} 37'$ y $19^{\circ} 29'$ de latitud norte y los meridianos $99^{\circ} 12'$ y $99^{\circ} 2'$ al oeste de Greenwich (fig.9). Se une al poniente con la sierra de Las Cruces - Monte Alto a través de algunas elevaciones.

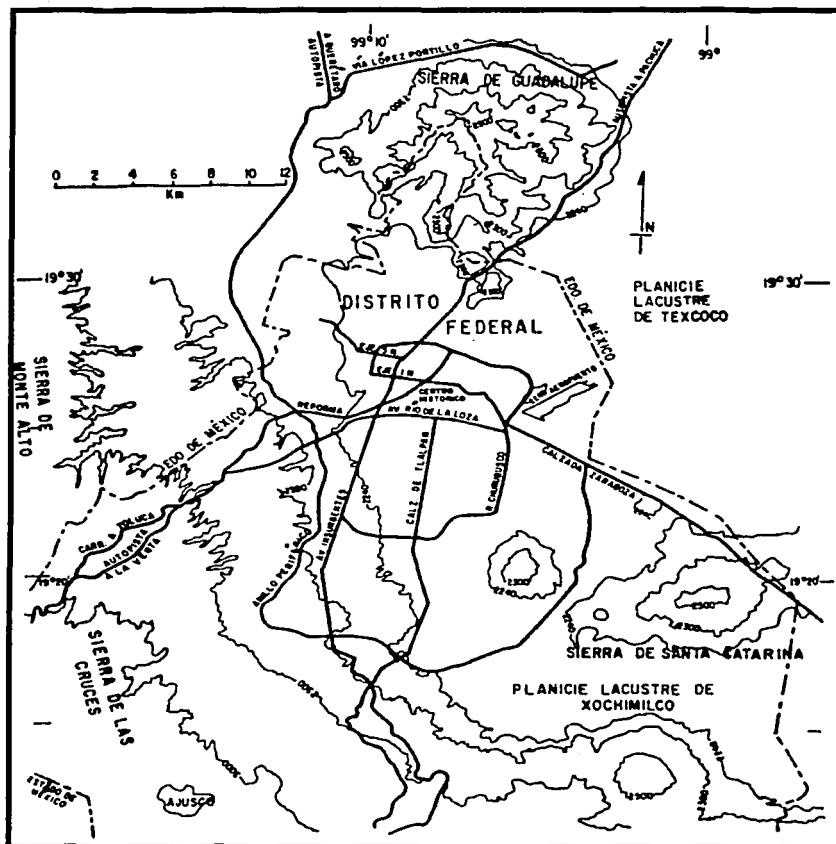


Fig.9 Localización de la Sierra de Guadalupe, al norte del Distrito Federal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La Sierra de Guadalupe presenta una forma circular, con una superficie aproximada de 170 km², con diámetros de 16 km en dirección norte a sur y 17 km de este a oeste.

Es un pequeño conjunto de elevaciones volcánicas independientes y sobrepuestas, formado a partir del Mioceno (Mooser et al., 1992; Lugo y Salinas, 1996).

Los volcanes principales de la Sierra de Guadalupe son de tipo compuesto, es decir formados por lava y material piroclástico, originados por poderosas erupciones explosivas, que culminaron con actividad extrusiva y efusiva. Ejemplos de ellos son los volcanes Guerrero, Zacatenco, Jaral, María Auxiliadora, Los Díaz, Tres Padres y Moctezuma. Otras elevaciones menores se formaron casi exclusivamente por actividad extrusiva, y es el caso de los domos volcánicos que están en la periferia de la sierra: Tenayo, Chiquihuite, Gordo, Tepeyac y otros (Lugo y Salinas, 1996).

Los tipos de roca de la Sierra de Guadalupe fueron descritos por algunos autores, y se trata de andesita con alto contenido de sílice (dacita), frecuentemente con feldespato (Ordóñez, 1895). El estudio de Campa-Uranga (1965) indica que las rocas que constituyen la Sierra de Guadalupe son principalmente andesitas y en menor cantidad riolitas y dacitas.

Lozano Barraza (1968) considera que predominan las andesitas asociadas a brechas, pórfidos y vitrófidos.

La Sierra de Guadalupe está constituida por un conjunto de domos que presentan una orientación preferencial en dirección NNE-SSW. Algunas de las principales estructuras dómicas son los cerros: Pico del Águila, María Auxiliadora, El Chiquihuite y El Tenayo. Los domos están constituidos principalmente por derrames de lava bandeada de color rosa, intercaladas con bandas de color gris de composición predominantemente dacítica. Se encuentran rodeados por grandes y extensos abanicos constituidos por depósitos fluviales, productos de caída y flujos piroclásticos. Sin embargo, en algunos sectores se puede identificar otro tipo de productos volcánicos, por ejemplo, hacia la porción meridional de la sierra predominan las lavas

andesíticas, brechas volcánicas y depósitos de flujo piroclástico y en menor grado, capas de materiales volcánicos más finos, como limos, arcillas y arenas; mientras que en el norte, predominan las pómez, lahares, cenizas, así como lavas andesíticas y dacitas (Salinas, 1994).

Lozano (1968) reportó los fechamientos de dos rocas de la sierra, en Barrientos y en la fosa de Cuautepéc, del orden de 14-15 millones de años, determinados por K-Ar. Mooser (1975) atribuye una edad a la sierra principalmente del Mioceno temprano.

IV.2.- SISMICIDAD

Los sismos que se presentan en la Cuenca de México se originan principalmente en las costas del Pacífico y se deben a la subducción de la placa de Cocos bajo la de Norteamérica.

La sismicidad es un factor importante al momento de evaluar la estabilidad de un macizo rocoso. Su influencia se manifiesta como una fuerza que casi siempre se considera horizontal. Actúa por periodos cortos y cambia de signo o sentido con una frecuencia que corresponde a la del sismo.

La fuerza por sismo queda definida como:

$$F_s = cW$$

donde W representa el peso del macizo sobre el cual se considera aplicado el empuje sísmico y la constante "c" corresponde a la proporción de la aceleración inducida por el sismo respecto a la de la gravedad g (fig.10).

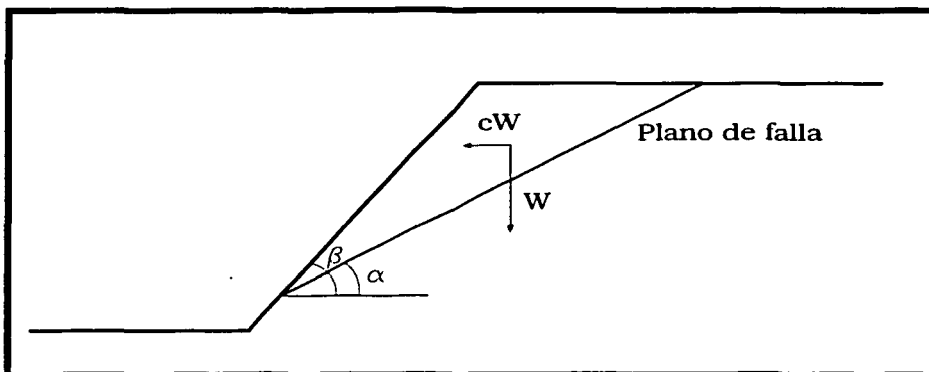


Fig. 10 Talud con las componentes del peso y empuje sísmico.

El coeficiente c se obtiene de las cartas de regionalización sísmica de la Comisión Federal de Electricidad donde se presentan los valores de la aceleración horizontal máxima que puede ocurrir en un sitio y con un periodo de retorno dados (C.F.E., 1993).

De acuerdo con la zonificación sísmica de la Comisión Federal de Electricidad, la zona de estudio se encuentra en la zona B, que aproximadamente abarca toda la Cuenca.

Zona	Suelo	c	Descripción
B	I	0.16	Terreno firme, tepetate, arenisca compacta
	II	0.20	Arenas no cementadas, arcillas de mediana rigidez
	III	0.24	Arcillas blandas muy compresibles

En la tabla, " c " representa el coeficiente sísmico básico, y en este caso se usará el valor de 0.16 asignado al tipo de suelo I, en vista de que se trata de terreno firme.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.3.- GEOLOGÍA LOCAL

Geología del Cerro del Tenayo

El Cerro del Tenayo tiene una orientación general NNE-SSW. Presenta una serie de estructuras en forma de herradura abierta hacia el E y W que indican la ocurrencia de colapsos gravitacionales en el pasado reciente, prueba de ello es que existen superficies de brecha que forman circos de deslizamiento, superficies pulidas de falla y la presencia de bloques basculados. Geológicamente se trata de un domo volcánico de carácter exógeno con un centro de emisión. Es un domo simple que está basculado hacia el SW como resultado del escurrimiento del flujo de lava al seguir la paleotopografía.

La roca se presenta en unidades de flujo, pseudoestratificadas, que presentan bandeamiento por fluidez. Estas rocas constituyen unidades litológicas con espesores de varios metros, las cuales se encuentran intemperizadas, fracturadas y falladas.

Rodean al domo el Tenayo un conjunto de abanicos constituidos predominantemente por material aluvial, así mismo, la ocurrencia de deslizamientos de roca canalizados a lo largo de los drenajes naturales, han generado depósitos de talud en zonas de pendiente pronunciada.

Litología

Si una formación rocosa tiene las mismas propiedades y apariencia física se dice que tiene la misma litología (Twiss y Moores, 1992).

La litología es el estudio y la descripción sistemática de las rocas en términos de la composición mineral y textura y emplea el conocimiento obtenido en los afloramientos o de las muestras de mano.

La descripción litológica de la dacita del Cerro del Tenayo es la siguiente:

Es una roca ígnea extrusiva, de composición química intermedia (alto contenido de silicatos). Se trata de una dacita color gris-rosáceo, de textura porfídica con fenocristales de cuarzo y plagioclasa inmersos en una pasta afanítica. Se presenta como derrames sucesivos de lava con espesores variables y presenta seudoestratificación (fig 11). Es posible hallar xenolitos (cuerpos extraños) dentro de la roca, que fueron incorporados al flujo.



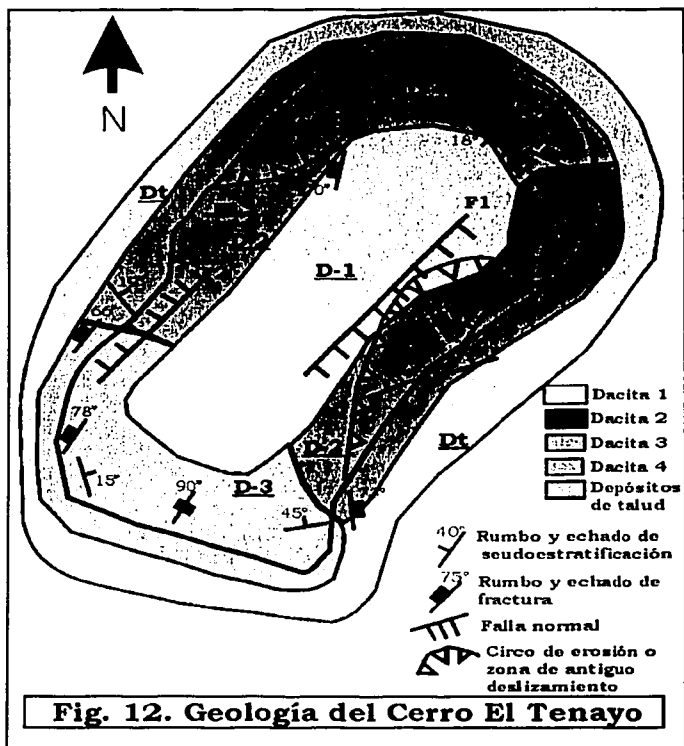
Fig. 11 Aspecto del bandeamiento por fluidez y de las líneas de flujo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.3.1.- ESTRATIGRAFÍA

En el Cerro del Tenayo se reconocieron las siguientes unidades estratigráficas:

Dacita 1 (D-1).- Esta unidad litológica es la más joven, debido al carácter exógeno del domo, donde un nuevo flujo cubría a uno anterior. Aflora en la parte superior (fig. 12) y es la unidad más estable del domo. Está constituida por dacitas de color rosa, de textura porfídica. Se encuentra cubierta de vegetación no arbórea y las fracturas que presenta se encuentran rellenas de arcilla y vegetación. No presenta problemas de estabilidad toda vez que no existen bloques sueltos que pudieran rodar o volcar pendiente abajo.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Dacita 2 (D-2).- Esta unidad se encuentra en los flancos este y oeste del domo. Está constituida por dacitas de color rosa-gris, de textura porfídica, con fenocristales de cuarzo y plagioclasa inmersos en una matriz afanítica. Se presenta en unidades de flujo de varios espesores. El rumbo de la pseudoestratificación en general es paralelo a la topografía, con echados de 5 a 25 ° buzando hacia dentro de la masa rocosa. Se encuentra afectada por fracturamiento casi perpendicular a la pseudoestratificación lo que delimita bloques tabulares de varios tamaños. Se pueden encontrar superficies pulidas, paredes brechadas, bloques basculados, lo que indica el fallamiento que ha sufrido el domo en épocas anteriores.

Dacita 3 (D-3).- Esta unidad se encuentra en la parte sur del domo. Está constituida por dacitas de color rosa claro, de textura porfídica, con fenocristales de cuarzo y plagioclasa inmersos en una matriz afanítica. Presenta pseudoestratificación con rumbos paralelos a la topografía y con echados de 5 a 25 ° buzando hacia dentro de la masa rocosa. Las fracturas que afectan a esta unidad son perpendiculares a la pseudoestratificación y con echados casi verticales. El basculamiento del domo en la dirección SW ocasiona que esta unidad se encuentre muy alterada debido a la infiltración del agua. Esto se observa en las marcas que deja el flujo de agua en los cantiles y en el hecho de que la roca se puede romper fácilmente con el martillo o con la sola presión de la mano.

Dacita 4 (D-4).- Esta unidad se encuentra en la parte norte del domo y esta constituida por dacitas de color rosa-gris. Esta unidad se encuentra estable, está cubierta de vegetación y existen pocos bloques separados de la masa estable.

Depósitos de talud (Dt).- Abarca todos los materiales que se han desprendido de los escarpes o zonas de inestabilidad debido a la erosión y se han acumulado en zonas de menor pendiente. Estos depósitos se extienden hasta mezclarse con depósitos aluviales que consisten en material suelto de origen volcánico que ha sido transportado y depositado en las partes bajas del domo.

IV.3.2.- GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Fotointerpretación

La exploración de una determinada zona, ya sea para valorar el riesgo geotécnico o establecer la ubicación de una obra civil, consiste en la recopilación de datos geológicos y geotécnicos, mediante los cuales es posible hacer un reconocimiento preliminar del sitio. En términos generales los procedimientos de estudio detallado de un sitio se dividen en dos tipos: métodos indirectos y métodos directos.

Los métodos indirectos incluyen el uso de sensores remotos y estudios geofísicos, que basados en ciertas propiedades de las rocas y los suelos permite hacer correlaciones con las características de los materiales. Los sensores remotos son principalmente películas sensibles a la luz, calor, ondas de radar, etc. que reflejan la superficie terrestre y por lo general se exponen desde aviones para obtener fotografías.

Los métodos directos sirven para obtener una información más precisa acerca de las condiciones del sitio e incluyen levantamientos geológicos superficiales, sondeos y socavones.

Para este estudio se emplearon métodos directos e indirectos: para los primeros se hicieron levantamientos geológicos y geotécnicos superficiales, se aprovecharon algunos cortes en los taludes que mostraban la continuidad de las fracturas y se hizo muestreo de mano; para los segundos se usaron fotos aéreas y mapas a diferentes escalas, con ayuda de un estereoscopio se aplicaron las técnicas de la fotointerpretación.

Para los fines y alcances del estudio no fue necesario contar con sondeos, en este caso núcleos de roca, ni con estudios geofísicos o sísmicos especiales.

La interpretación fotogeológica aprovecha la perspectiva aérea que se obtiene en las fotografías y subraya la importancia de los elementos morfológicos y las anomalías estructurales en la búsqueda de información,

basándose en los diversos criterios técnicos y científicos tanto de orden geológico como de la ingeniería. El procedimiento para la obtención de información de los sensores remotos se llama fotointerpretación y consiste en el arte de apreciar la naturaleza de los objetos sobre la superficie terrestre mediante un análisis de fotografías con ayuda de un estereoscopio. Este análisis sirve para identificar rasgos de geología, geomorfología, vegetación, drenaje, erosión, etc. Existen reglas propias de la fotointerpretación las cuales se siguieron para obtener toda la información posible y facilitar así las interpretaciones mecanico-estructurales de los materiales rocosos del Tenayo.

Se mencionan sucintamente las 12 reglas propias de la fotointerpretación, las cuales se dividen en cinco grupos, de acuerdo a su origen y similitud de sus características (Puig, 1970):

- Primer grupo: reglas correspondientes a las características físicas de las fotografías aéreas.

Regla 1.- Tono fotográfico o de los colores. Influyen: tipo de película y papel, tiempo de exposición, filtro, color de la roca, vegetación, la hora, etc.

Regla 2.- Textura de la fotografía. Ésta puede ser: gruesa-fina, lisa-áspera, manchada, granular, lineal, moteada, etc. y depende de la escala, del tamaño de grano de emulsión fotográfica y del tipo de papel entre otros.

- Segundo grupo: reglas correspondientes a las características propias de los rasgos u objetos reproducidos por sus imágenes en las fotos aéreas.

Regla 3.- Forma y tamaño de los rasgos u objetos. Los rasgos que se deben al hombre se encuentran limitados por líneas curvas o rectas, mientras que los rasgos naturales tienen usualmente bordes irregulares.

Regla 4.- Sombra. La sombra se encuentra estrechamente relacionada con la forma y tamaño de los objetos. Las sombras que aparecen en las fotos aéreas, al revelar y acentuar el relieve de la superficie terrestre que las origina, ponen en evidencia, al contrastarlos, los elementos geológicos

susceptibles de causarlas, por lo que constituyen una guía inmejorable en la localización de rasgos estructurales y tectónicos.

Regla 5.- Relaciones con objetos asociados. Cuando un rasgo geológico reproducido en una fotografía aérea, carece de caracteres distintos que permitan su identificación precisa, deberá ser relacionado con sus rasgos asociados en el área, de forma que por la identificación directa de éstos, se consiga la identificación indirecta, o interpretación de aquél..

- **Tercer grupo:** estas reglas se refieren a las características topográficas, tal como se muestran en el modelo tridimensional observado con la ayuda del esteroscopio.

Regla 6.- Formas topográficas o relieve terrestre. La topografía debe ser vista como el producto natural de procesos geológicos particulares, que operan sobre un conjunto dado de materiales geológicos, con una secuencia y un medio climático, por lo que la interpretación correcta de los rasgos topográficos y geográficos constituye la primera etapa en el uso de las fotos aéreas.

Regla 7.- Posición o gradiente. La posición de las rocas en la superficie terrestre, denota su grado de consolidación o de cohesión de los elementos que las componen, de forma que las menos consolidadas soportarán menor gradiente y tenderán hacia la posición horizontal, mientras que las más consolidadas o las cristalizadas, tendrán mayor gradiente y tenderán hacia la verticalidad.

Regla 8.- Discordancia. Las discordancias topográficas, entre las que se encuentran los cambios o rupturas de pendiente, originadas por la diversa naturaleza de los elementos que constituyen la superficie terrestre, por los diversos fenómenos que en ella tienen lugar y por la influencia del hombre, originan marcados contrastes, cuyo examen estereoscópico permite descubrir muchos fenómenos geológicos, estratigráficos y estructurales. Otras rupturas no se deben a la estructura geológica, encontrándose entre ellas las que reconocen por causa los diferentes modos de erosión, la descomposición química y la disgregación mecánica.

Regla 9.- Alineaciones. Las fotografías aéreas muestran, con gran frecuencia, notables rasgos lineales de mayor o menor longitud, escasos y aislados, o abundantes y formando sistemas paralelos, rectangulares, circulares o poligonales en general. Estas alineaciones o "lineamientos" en las fotos, muestran todos los rasgos tectónicos y estructurales que tienen tal expresión en la superficie terrestre, como fracturas, diaclasas y toda clase de fallas.

➤ **Cuarto grupo:** se refieren a las características fisiográficas y geomorfológicas.

Regla 10.- La erosión. La erosión se rige por una serie de factores físicos y químicos, que varían para cada tipo de roca y de clima, encontrándose entre los primeros la cohesión, homogeneidad y tamaño de los granos y entre los segundos, la permeabilidad y la solubilidad. Conocidos los diversos modos de erosión de las diferentes rocas, resulta factible su identificación directa e indirecta, por la expresión erosiva que exhiben en las fotografías aéreas.

Regla 11.- Avenamiento o drenaje. El drenaje, es decir, la manera en que un área dispone del agua que escurre sobre ella se encuentra, como la erosión, estrechamente unido a la naturaleza de las rocas cuya superficie lava. Los diversos tipos de avenamiento o drenaje (dentrítico, angular, anastomosado, radial) revelan la pendiente del terreno y la estructura geológica que lo controla y ponen de manifiesto los elementos geológicos y geomorfológicos más importantes.

➤ **Quinto grupo:** corresponde con las características de los suelos, de la vegetación.

Regla 12.- Correlación planta-suelo-roca. Dentro de ciertos límites se sabe que, las rocas impermeables pueden soportar exigua vegetación, mientras que las rocas porosas la soportan abundante y desarrollada.

La fotointerpretación del domo el Tenayo se realizó a partir de fotografías blanco y negro con una escala de 1 : 4500. El proceso consistió en identificar y marcar los rasgos del terreno más sobresalientes a partir de la vista tridimensional que se observó en el estereoscopio. Los lineamientos que se marcan en este proceso están sujetos a su posterior comprobación en campo. Cabe decir que una buena fotointerpretación conlleva un ahorro de tiempo cuando se está en la etapa de campo, pues ya se tienen detectados los principales rasgos estructurales y las interpretaciones se van haciendo de manera más fácil y fluida.

A partir de la fotointerpretación se hizo, de manera preliminar, una zonificación de peligros geotécnicos basada en los rasgos identificados en las fotografías y en observaciones que se hicieron en los recorridos de reconocimiento de campo.

De acuerdo con la fotointerpretación el área de estudio puede dividirse en cuatro zonas en las cuales se marcaron lineamientos de rasgos estructurales definidos (fig 13).

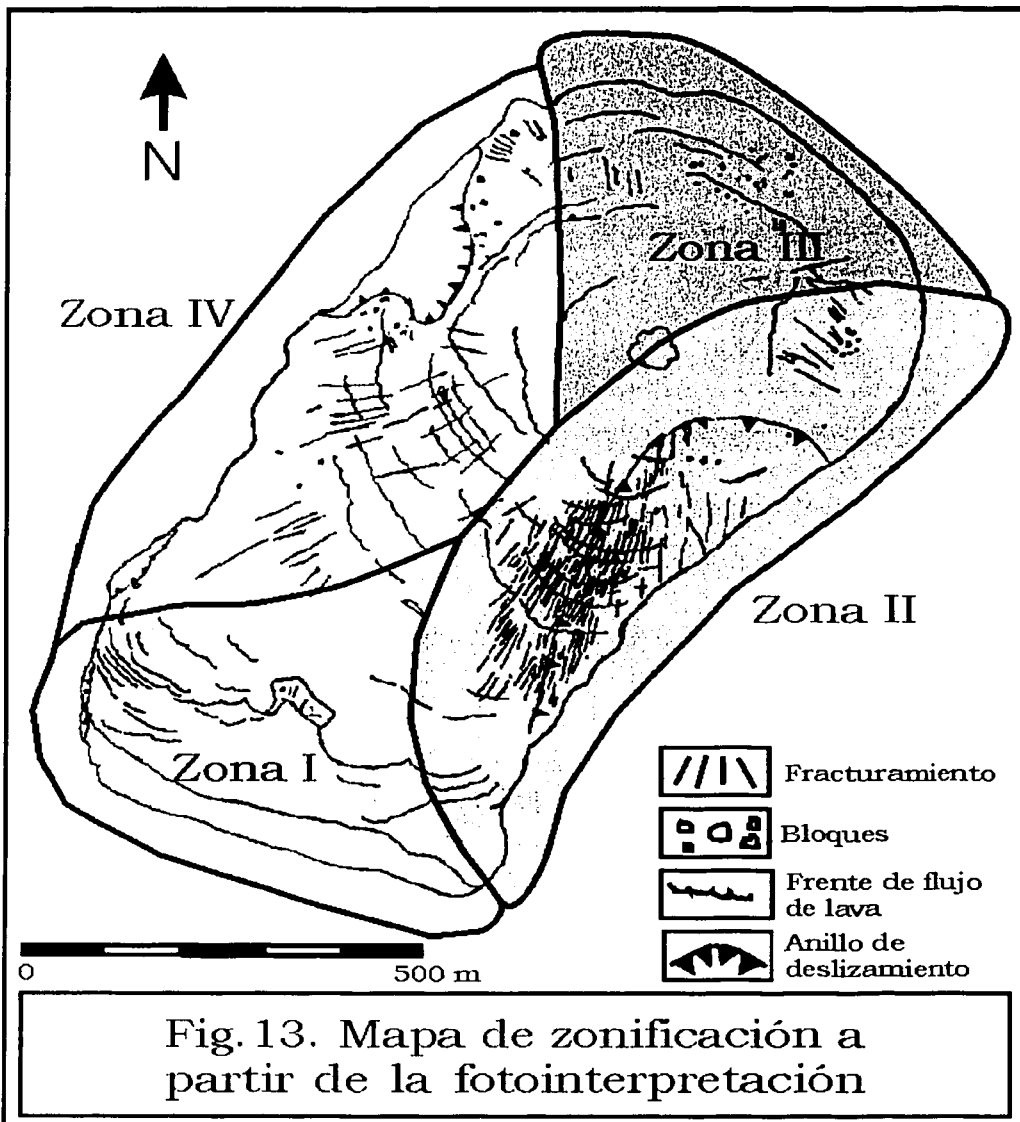


Fig. 13. Mapa de zonificación a partir de la fotointerpretación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Descripción de las zonas delimitadas por el proceso de fotointerpretación

Zona I

Esta zona está ubicada en la parte SW del domo El Tenayo (fig. 13) donde existe una gran cantidad de asentamientos humanos. Las casas están construidas sobre los frentes de lava y aún por debajo de ellos. En esta zona existen brechas las cuales sufren disgregación mecánica debido al intemperismo y a los efectos del agua. Se reconocieron taludes casi verticales que presentan construcciones tanto en la corona como en el pie del talud. Se aprecia que no existe peligro respecto a bloques que pudieran rodar hacia las casas, además la pendiente que se tiene arriba de la zona límite de viviendas es moderada. El principal peligro que se tiene en esta zona son los taludes verticales, los cuales presentan fracturas importantes que podrían afectar el comportamiento del talud, poniendo en riesgo a las viviendas que están construidas en la corona y en el pie del talud. Al interior de muchas de estas viviendas existe algún tipo de problema relacionado con caída de bloques o infiltración de agua, debido a su ubicación.

Zona II

Esta zona comprende la parte este del Tenayo. En el proceso de fotointerpretación se marcaron lineamientos de fracturamiento y de los levees o pliegues de flujo. Los levees son las ondulaciones que en planta corresponden al frente del flujo de lava. También se marcó un escarpe de falla y bloques potencialmente inestables.

El domo El Tenayo es afectado por un fallamiento de tipo normal. El fracturamiento de la zona II es la expresión estructural de la falla que delimita al Graben de Cuauhtepac, el este del domo. La zona de falla del

domo (falla normal F1 de la fig. 12) tiene un rumbo de N30°E y paralelo a este rumbo se encuentran muchos lineamientos de fracturas.

En esta zona fue donde se marcaron más lineamientos de fracturas (con rumbos comprendidos entre N 25° E y N 15° W) por lo que es de esperar que presente un alto fracturamiento. Se aprecian bloques de gran tamaño, algunos de formas tabular a sub-redondeada, que pueden rodar o volcar pendiente abajo.

Otro peligro que se detectó y que está ligado al fracturamiento es el de flujo de detritos. Existe un área (al norte de la zona II, colindando con la zona III) en la cual se forma una pequeña ladera de captación donde hay abundantes bloques y material inconsolidado (suelo y gravas) de distintas gradaciones, en una zona de fuerte pendiente, por lo que existe el peligro de que se forme un flujo de detritos ante una fuerte precipitación. Este proceso se va acelerando con el tiempo y muchas de las viviendas que se encuentran asentadas en la parte baja presentan serias deficiencias constructivas, estando así en una condición vulnerable.

Zona III

Esta zona corresponde a la parte norte del domo. Se observaron varios bloques sueltos con el peligro de rodar. Se marcaron algunos levees y en general pocos rasgos de fracturamiento. En esta zona se observa una gran cantidad de vegetación. La pendiente en general es moderada.

La fotointerpretación muestra un área que tiene las características de una avalancha o flujo de detritos que afecta en parte a la zona III.

Zona IV

Esta zona comprende la parte oeste del domo. Se marcaron lineamientos de fracturas, levees, anillos de erosión y de bloques. En esta zona la

vegetación es abundante pero sobresalen cantiles con un fracturamiento casi vertical, por lo que podrían fallar por volteo.

Es abundante la presencia de bloques, principalmente tabulares y redondeados por lo que el problema de caída y rodamiento de rocas es uno de los peligros más significativos en esta zona, con rocas de 15 a 25 m³ (según se midieron en campo) que están aisladas o en grupos y que ponen en serio riesgo a la población que vive en la parte baja. Existen rocas redondeadas en zonas de pendiente abrupta que podrían rodar a gran velocidad en caso de que su base se erosione o inestabilice. También existen salientes de roca que están delimitadas por fracturas y cuyo desprendimiento pone en riesgo a las personas que habitan al pie de estos taludes.

Cabe resaltar la presencia de una escuela secundaria construida al pie de un talud rocoso que presenta fracturamiento y rocas inestables en la corona.

Los anillos de erosión parecen ser antiguos deslizamientos, pues se encontró brecha y bloques basculados. De cualquier forma sirven como laderas de captación que arrastran material detrítico y en las cuales abundan bloques de varios metros cúbicos.

Análisis de fracturamiento

La mayor parte de las masas rocosas, especialmente si se encuentran dentro de unos pocos cientos de metros a partir de la superficie, se comportan como medios discontinuos, lo que determina en gran medida su comportamiento mecánico. Discontinuidad es el término general para designar cualquier superficie en una masa rocosa que tiene cero de esfuerzos a la tensión. Es el término colectivo para la mayoría de los tipos de fracturas, planos débiles de pseudoestratificación, planos de esquistosidad, zonas de mayor debilidad y fallas.

El Cerro del Tenayo es afectado por varias discontinuidades como son: planos de pseudoestratificación, fallas y fracturas de origen tectónico y oquedades principalmente.

Orden de las discontinuidades

Las discontinuidades que se presentan en una masa rocosa son un rasgo estructural que puede afectar el comportamiento de una obra civil o de la misma masa rocosa. Esto implica un foco de peligro geotécnico, el cual dependerá de: el estado de esfuerzos, la resistencia al corte en las discontinuidades y de las condiciones de drenaje, entre otros factores.

De manera práctica y para hacer una caracterización completa, Pusch (1995) propone 7 órdenes de discontinuidades.

Primer orden.

Zonas de fractura regional con algunos kilómetros de espaciamiento y una extensión de varias decenas de kilómetros. El ancho de la parte central, en su mayoría hidráulicamente activa y caracterizada por componentes arcillosos, va de un rango de metros a decenas de metros. La conductividad hidráulica de estas zonas oscila en el rango de 10^{-7} a 10^{-5} m/s, con grandes desviaciones locales de este intervalo.

Segundo orden

Zonas de fractura local con un espaciamiento de centenares de metros hasta un kilómetro y con una extensión de varios kilómetros. Las características son similares a las de primer orden solo que con menos anchura en el centro y con menor frecuencia de fracturamiento y contenido de arcilla. En promedio la conductividad hidráulica de toda la zona es de aproximadamente 10^{-7} m/s aunque puede oscilar entre 10^{-8} y 10^{-6} m/s.

Tercer orden

Zonas de fractura local con un espaciamiento de 30-150 m y con un ancho de unos cuantos decímetros hasta dos metros. Su extensión puede ser de varios cientos de metros. El valor de conductividad hidráulica oscila entre 10^{-9} y 10^{-7} m/s.

Cuarto orden

Estas discontinuidades son los principales miembros hidráulicamente activos de una roca localizada entre las discontinuidades de alto orden. Ocurren como discretas fracturas con un espaciamiento aproximado de 2 a 10 m, y con una extensión de más de 10 m. Una roca con discontinuidades de cuarto orden generalmente tiene un valor de conductividad hidráulica dentro del rango de 10^{-11} a 10^{-9} m/s.

Quinto orden

Representan el 90 % de las fracturas discretas visibles en la roca entre las de más alto orden. Su espaciamiento va de 0.2 a 1 m. Estas discontinuidades representan planos de debilidad donde se generan altos esfuerzos críticos cuando se altera el estado natural de esfuerzos.

Sexto orden

Las discontinuidades de este orden son planos de debilidad a pequeña escala. Representan zonas donde están alineados minerales de baja resistencia o bien fracturas finas. Forman sub-clases de planos de debilidad que no entran en las discontinuidades de quinto o cuarto orden.

Séptimo orden

Estas discontinuidades representan vacíos intercristalinos y contactos cristalinos incompletos los cuales generan posibles planos de falla.

Las fracturas (del latín *"fractus, roto*) son superficies a través de las cuales la roca o los minerales han perdido la cohesión (Twiss y Moores, 1992). En general una fractura es una ruptura de origen geológico en la continuidad de un cuerpo de roca a lo largo de la cual no ha habido desplazamiento visible. Las fracturas pueden ser de origen tectónico y no tectónico; las primeras son originadas por esfuerzos, y las segundas por enfriamiento de magma, disecación, hundimiento o intrusión.

A un grupo de fracturas paralelas se le llama sistema o familia de fracturas; a la intersección de dos o más familias se le denomina sistema de fracturamiento.

El fracturamiento sistemático se caracteriza por una geometría, rugosidad, orientación y espaciamiento muy similares. El fracturamiento no sistemático presenta geometrías curvas e irregulares, y no sigue ningún patrón definido en cuanto a su orientación y espaciamiento.

Para el caso del Cerro del Tenayo se presenta un fracturamiento sistemático, con un orden que va del 4° al 7° , predominando el de 5° orden, es decir con espaciamientos de 20 cm hasta 1 m y con una extensión de más de 10 m. El sistema de fracturamiento es generado principalmente por la intersección de tres familias de fractura, que son:

1) debido a las líneas de flujo o levees (que se puede tomar como el frente del talud) 2) debido a la seudoestratificación (que sirve como plano de desprendimiento) y 3) fracturamiento de origen tectónico.

Las fallas son también discontinuidades en la roca en las cuales se ha perdido la cohesión y existe un desplazamiento reconocible, desde unos pocos centímetros hasta kilómetros. Por lo regular son de origen tectónico y son el resultado de esfuerzos regionales. Se reconocen porque a menudo las paredes están estriadas y pulidas como resultado del deslizamiento cortante. Frecuentemente la roca a ambos lados de la falla está alterada e intemperizada, con brecha , arcilla y harina de falla.

En el Cerro del Tenayo existe una falla normal que delimita al Graben de Cuauteppec. Como evidencia se encontraron algunas paredes con un fuerte brechamiento y estriadas, harina de falla y estructuras sigmoidales (figs. 14-15).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 14 Sigmoides de deformación que denotan la existencia de una falla normal.



Fig. 15 Pared que muestra brechamiento y algunas estrias.
El bloque que falta es el bloque del bajo.

De acuerdo con Hoek y Bray (1996), los parámetros que deben de estudiarse en una zona con abundantes discontinuidades, en especial fracturas y fallas, son:

- Localización y dato de referencia: con GPS (Sistema de Posicionamiento Global) se ubican en un mapa todas las discontinuidades y bloques utilizando una nomenclatura y una clave para diferenciar cada rasgo estructural.
- Rumbo: es la orientación que con respecto al norte geográfico tiene la traza de intersección entre un plano estructural y un plano horizontal de referencia.
- Echado: es el máximo ángulo que forma un plano estructural con el plano horizontal de referencia.
- Espaciamiento: es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Si la cinta o cuerda no está perpendicular a la fractura hay que corregir el ángulo de las mediciones. El valor de espaciamiento es:

$$e = d_m \text{ sen } \alpha$$

donde d_m es la distancia más común y α es el ángulo entre la cinta y la discontinuidad.

- Apertura: es la distancia perpendicular entre las superficies de la discontinuidad en la cual el espacio existente está relleno o vacío.
- Continuidad o extensión: al ser observada y medida en un afloramiento la traza de una discontinuidad, se puede tener una medida burda de la superficie o longitud de penetración de la misma. Un rasgo estructural como una falla recorre decenas o miles de metros, mientras que discontinuidades menores como fracturas y fisuras tienen una extensión menor. Se considera que si un grupo de fracturas se extiende dentro de la masa rocosa bajo

consideración, la falla se produce involucrando a los bloques intactos que se encuentran entre las discontinuidades.

- Relleno de la discontinuidad: se refiere al material que separa las paredes de roca adyacentes a una discontinuidad y que generalmente es más débil que la roca original. Puede ser el detrito que resulta del deslizamiento entre dos superficies, o material que ha sido precipitado por sustancias mineralizantes o causado por intemperismo. Materiales típicos de relleno son: arena, limo, arcilla, brecha y harina de falla. La presencia de relleno tiene especial importancia para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante en una discontinuidad.
- Rugosidad y curvatura de la discontinuidad: se refiere a las asperezas y a las ondulaciones relacionadas con el plano medio que presentan las superficies de una discontinuidad. Tanto la rugosidad como la ondulación contribuyen al esfuerzo cortante. En este caso se estimó el valor de la rugosidad a partir de tablas que contienen valores promedio del coeficiente JRC (coeficiente de rugosidad de junta) para los diferentes perfiles de rugosidad.
- Descripción y propiedades del bloque intacto entre las discontinuidades: a partir de notas de campo, de mosaicos fotográficos y de muestras de mano se hizo una descripción del bloque, la cual se integra en una ficha que contiene: una fotografía del bloque o afloramiento, forma y medidas del bloque, condiciones de apoyo, fracturamiento y drenaje, grado de intemperismo y observaciones respecto a las condiciones que favorecen la falla.

El muestreo estadístico de fracturamiento sirve para obtener la densidad de fracturamiento que se define como el número de fracturas por unidad de área.

En el campo se utilizaron dos métodos para determinar las características de fracturamiento (Wheeler y Dixon, 1980):

- ❖ *Método de la cuerda:* se fija una cuerda de longitud conocida en la pared que se va a muestrear, tratando de que corte perpendicularmente a los sistemas de fractura. Después se miden y toman las características de todas las fracturas que queden dentro del intervalo de 50 cm a ambos lados de la cuerda; con esto se genera un rectángulo de ancho unitario y de longitud conocida L , en metros. Si el número de fracturas, sin importar a qué sistema pertenecen, es F , entonces la densidad de fracturamiento se expresa como $d_f = F/L$.
- ❖ *Método del círculo:* a partir de un punto seleccionado se fija una cuerda y se traza un círculo de radio conocido en la pared que se va a muestrear. Perpendicularmente al plano del círculo se miden y toman las características de todas las fracturas. Si el área del círculo es A la densidad de fracturamiento se expresa como $d_f = F/A$.

El apéndice A contiene las estaciones de muestreo de fracturamiento. Se presentan las rosetas, que contienen la dirección preferencial de fracturamiento y los diagramas de concentración de polos. Se usó la proyección de áreas iguales o de Schmidt para representar los datos de fracturamiento.

Tabla de peligros geotécnicos

Con base en la fotointerpretación, donde se detectaron los principales rasgos del terreno que representan un peligro potencial y el muestreo de fracturamiento, donde se hicieron recorridos en campo y se describieron las fracturas y los bloques, se genera la tabla de peligros de la fig. 16. Incluye *grosso modo* cada peligro detectado en las zonas I, II, III y IV. La combinación de dos o más peligros se resalta con tonos diferentes.

Tabla de peligros geotécnicos

Problema geotécnico	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
Deslizamiento de rocas	■	■	□	■
Volteo de rocas (toppling)	■	■	■	■
Caída de rocas (Rock fall)	□	■	■	■
Fracturamiento	□	■	□	■
Avalancha	□	■	■	□
Peligro preliminar	□	■	□	□

Fig. 16. Peligros existentes en cada zona

Simbología

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Problema Geotécnico

Peligro poco presente	□
Peligro muy presente	■

Peligro Preliminar

Peligro Alto (hasta cuatro peligros presentes)	■
Peligro Muy Alto (más de cuatro peligros presentes)	■

V. PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO EN EL CERRO DEL TENAYO

V.1.- PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LAS ROCAS

El comportamiento de las rocas bajo la acción de cargas estáticas y dinámicas, empujes hidrostáticos, dilatación por temperatura, y esfuerzos tectónicos, depende de sus propiedades físicas y mecánicas. Estas propiedades influyen determinantemente en la estabilidad de un talud rocoso.

Si se observa el talud desde lejos, llama la atención por la serie de discontinuidades que lo afectan; pero a medida que nos acercamos, llama la atención la mezcla de minerales que conforman la roca. Conviene distinguir entre propiedades macroscópicas y microscópicas de las rocas. Las macroscópicas se refieren a todo el compuesto y las microscópicas se refieren a las sustancias minerales que forman la roca.

También será útil aclarar la diferencia entre el macizo rocoso y la roca intacta.

Roca intacta: se refiere a la mezcla consolidada y cementada de partículas minerales que forman los bloques dentro de las discontinuidades del macizo rocoso. En la mayoría de rocas ígneas y metamórficas la resistencia de la roca intacta es uno o dos órdenes de magnitud más grande que la del macizo y la falla de este material generalmente no está involucrada en la falla del talud. (Hoek y Bray, 1996).

Macizo rocoso: es la roca tal y como se encuentra en el sitio y en un estado discontinuo debido a la presencia de sistemas de rasgos estructurales tales como fracturas o planos de estratificación. La falla del talud generalmente está asociada con movimientos a través de las superficies de estas discontinuidades. Otro tipo de discontinuidades son las debidas a oquedades, rellenos, fallas, planos de foliación, entre otras.

Para el caso del Cerro del Tenayo se reconocieron las siguientes discontinuidades principales que están involucradas en los mecanismos de falla que se presentan: planos de pseudoestratificación, sistemas de fracturamiento, cavidades y fallas.

Es importante conocer algunas de las propiedades más importantes de las rocas, de las cuales depende en gran medida su comportamiento, ya sea ante sollicitaciones o cargas externas o bien para obtener en términos cualitativos y cuantitativos un parámetro que nos dé una noción de estabilidad del talud.

Las propiedades índice o físicas se refieren a aquellas características de la roca que permiten clasificar y obtener una idea cualitativa de su comportamiento bajo ciertas circunstancias.

Algunas de las propiedades índice más importantes son:

Mineralogía: se refiere al contenido mineralógico de la roca y el cual influye notablemente en su comportamiento.

Peso volumétrico: es la relación entre el peso y el volumen de la muestra.

$$\gamma = W_m / V_m$$

Relación de vacíos: es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos.

$$e(\%) = (V_v / V_s) \times 100$$

Porosidad: es una medida de la cantidad de huecos que tiene la roca. Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra.

$$n(\%) = (V_v / V_m) \times 100$$

La porosidad de fisuración se refiere a las grietas alargadas y la porosidad absoluta se refiere al total de huecos dentro de la roca.

Contenido de agua: es una medida de la cantidad de agua existente en la roca. Se define como la relación entre el peso del agua en una roca entre el peso de la muestra seca, expresado en porcentaje.

$$w(\%) = (W_a / W_s) \times 100$$

Grado de saturación: es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos.

$$G_w(\%) = (V_w / V_v) \times 100$$

Permeabilidad: es una medida de la resistencia que opone una roca para que fluya una corriente de agua. En la mayoría de las rocas el flujo de agua obedece a la Ley de Darcy. El gasto en una dirección X es:

$$Q(x) = k i A$$

donde: k es el coeficiente de permeabilidad en cm/s.

i es el gradiente hidráulico.

A es el área de la sección transversal, normal al eje X, en cm².

Grado de alteración: se define como la relación entre la diferencia de pesos, de la muestra sumergida y de la muestra en estado seco, y el peso de la muestra en estado seco.

$$i_{alt} = (P_2 - P_1) / P_1$$

P₁ es el peso de la muestra en estado seco.

P₂ es el peso de la muestra sumergida durante un tiempo t.

Alterabilidad: es una medida de la velocidad con que pueden cambiar las propiedades de la roca en presencia de agentes externos. Esta propiedad expresa el potencial de intemperismo que puede sufrir la roca con el tiempo. Se representa como di/dt . La alterabilidad de una roca depende básicamente de los siguientes factores: composición mineralógica, grado de fisuración de la roca, agentes agresivos, tratamiento mecánico a que va a someterse la roca.

Las propiedades mecánicas de la roca influyen de manera determinante en la estabilidad de taludes rocosos. Si en un talud existe una superficie potencial de falla, el deslizamiento ocurrirá cuando las fuerzas que contribuyen al deslizamiento sean mayores que las fuerzas que se oponen al deslizamiento. Entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento la más importante es la resistencia al corte en la fractura.

Si un bloque o conjunto de bloques descansan o se apoyan sobre bloques más pequeños, que de algún modo dan estabilidad al conjunto, la resistencia de estos trozos de roca puede ser superada por la carga de todos los grandes bloques y al producirse la rotura del material se genera una pérdida momentánea del contacto entre bloques lo que produce la falla del conjunto.

Las propiedades mecánicas más importantes son:

Dureza: es una propiedad mecánica que afecta la resistencia de las rocas. La dureza es utilizada como criterio de resistencia. Generalmente la resistencia de las rocas crece a medida que aumenta su contenido de cuarzo.

Durabilidad: es un término relativo que está en función de la roca, el medio en que se encuentra (clima, temperatura, agentes físico-químicos), porosidad y estructura de la roca.

Plasticidad: es la propiedad de deformarse continua y permanentemente sin que se presente la ruptura bajo la acción de un esfuerzo que excede el límite de fluencia del material. Este fenómeno en que la deformación crece a esfuerzo constante se le conoce como flujo plástico. Las temperaturas y presiones elevadas contribuyen a las deformaciones plásticas de las rocas.

Deformabilidad: por lo general el módulo de deformabilidad se obtiene de curvas esfuerzo-deformación en ensayos de roca durante la prueba de compresión uniaxial.

Resistencia: se refiere a la capacidad de la roca para soportar la acción de fuerzas externas. La resistencia de una roca generalmente está controlada por los siguientes factores: composición mineralógica, dureza de los minerales, durabilidad de la roca, resistencia del cementante granular, orientación de granos y cristales respecto a las cargas y deformaciones, discontinuidades de la roca como juntas, fracturas, poros, elasticidad y plasticidad de la roca etc.

Resistencia al esfuerzo cortante (τ): se ha observado, en especímenes de roca que tienen una discontinuidad geológica, como una junta o una fractura y que han sido sujetos a un sistema de carga hasta provocar la falla a través de la discontinuidad, que el esfuerzo cortante requerido para causar el deslizamiento es mayor a medida que el esfuerzo normal (σ) incrementa.

Cohesión: son las fuerzas de atracción intergranulares, el grado de cementación o de rugosidad que presenta una discontinuidad. Si el nivel de esfuerzo normal en una discontinuidad es cero, el valor de esfuerzo cortante necesario para provocar el deslizamiento estará en función del grado de cementación o rugosidad de la fractura. Este valor inicial de esfuerzo cortante define la resistencia cohesiva (c) de la discontinuidad.

Ángulo de fricción (ϕ): se define el ángulo de fricción como el ángulo que con respecto a la horizontal forma la gráfica que relaciona al esfuerzo cortante y al esfuerzo normal. La ecuación que relaciona estas variables es:

$$\tau = c + \sigma \tan\phi$$

Resistencia al esfuerzo cortante en discontinuidades

En general las masas rocosas son atravesadas por rasgos estructurales que controlan su comportamiento mecánico, especialmente cuando están cerca de la superficie y los esfuerzos son bajos. En el análisis de estabilidad de taludes hay que considerar la geometría del macizo rocoso delimitada por las fracturas y la inclinación de éstas pues esto nos indica el tipo de bloques y la dirección en que pueden deslizarse, rodar o volcar. Otro factor importante es la resistencia al corte de la superficie potencial de falla la cual puede consistir en una superficie plana, circular o compleja, lo cual depende de si involucra una sola discontinuidad o varias, pudiéndose presentar el fracturamiento de bloques intactos.

La ecuación básica para determinar la resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades puede ser representada por la ecuación de Mohr-Coulomb, (Hoek, 1996):

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan\phi$$

donde c es la resistencia cohesiva de la superficie cementada

ϕ es el ángulo de fricción

τ_p es el máximo valor de resistencia al corte

σ_n es el esfuerzo normal

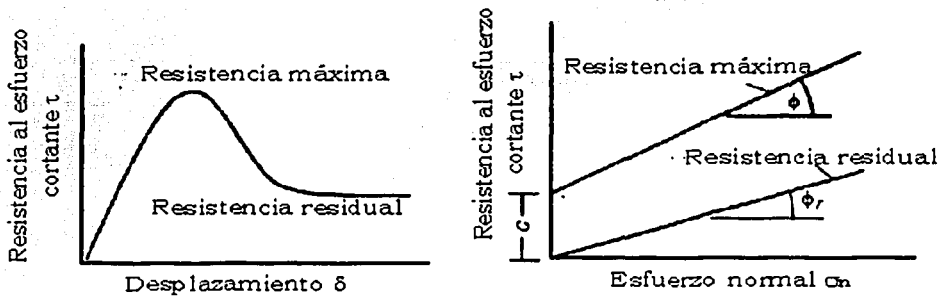
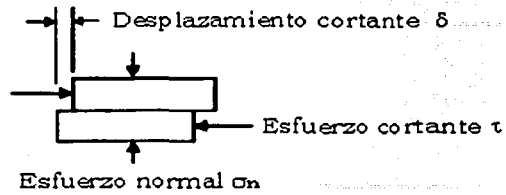


Fig. 17 Gráficas esfuerzo cortante vs desplazamiento y esfuerzo cortante vs esfuerzo normal para resistencia máxima y residual.

La resistencia de corte máxima corresponde a la suma de la resistencia del material cementante más la resistencia friccionante de las superficies probadas. Si el esfuerzo cortante aumenta se empezarán a presentar desplazamientos más fuertes en la roca llegando al punto en que la resistencia cae a un valor residual que se mantiene constante, incluso para largos desplazamientos de corte (fig. 17)

En el caso de la resistencia residual la cohesión ha sido vencida y vale 0. La ecuación se convierte en:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r$$

donde τ_r es la resistencia al esfuerzo cortante residual

ϕ_r es el ángulo de fricción residual

Patton (1966) demostró, mediante experimentos y ensayos en roca con superficies dentadas, la influencia que tienen las asperezas y ondulaciones en el comportamiento de juntas y discontinuidades, principalmente en su

resistencia al esfuerzo cortante. El desplazamiento al corte en estos especímenes de roca dentados ocurre como resultado del movimiento de las superficies inclinadas, lo que causa un desplazamiento perpendicular a la dirección de corte, presentándose un cambio de volumen del espécimen. Este fenómeno se conoce como dilatación.

La ecuación de Patton de resistencia al corte para especímenes dentados puede ser representada como (fig. 18):

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi_b + i)$$

donde ϕ_b es el ángulo base de fricción, es aproximadamente igual al ángulo residual pero generalmente se mide en pruebas de corte en especímenes dentados de roca o en muestras que contienen una discontinuidad

i es el ángulo promedio de la superficie dentada o de las ondulaciones.

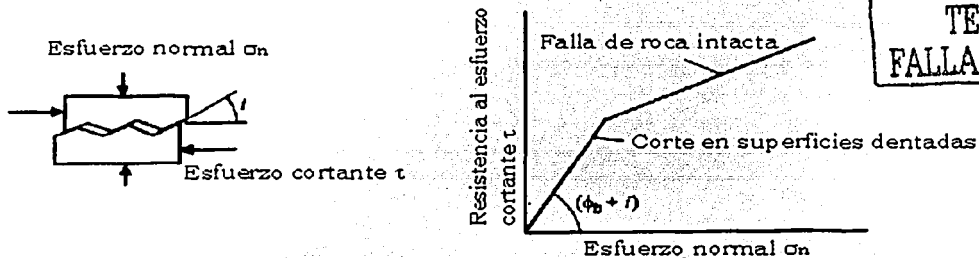


Fig 18 Influencia de la rugosidad en el cálculo del esfuerzo cortante.

La ecuación de Patton sirve para esfuerzos bajos, pero para esfuerzos altos la resistencia del material intacto se puede exceder y las asperezas se rompen teniendo como resultado que el comportamiento de la resistencia está más ligado a la resistencia del material intacto que a las características friccionantes de las superficies. Barton y Choubey (1977)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

estudiaron el comportamiento de discontinuidades naturales en roca y proponen describir la ecuación de Patton como:

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi_b + JRC \log_{10} (JCS / \sigma_n))$$

donde JRC es el coeficiente de rugosidad de junta (joint roughness coefficient).

JCS es el coeficiente de resistencia de pared de junta (joint wall compressive strength).

El JRC es un número que puede ser estimado comparando visualmente la superficie de discontinuidad con perfiles de rugosidad preestablecidos que asignan un rango de valores que van desde 0 para perfiles casi lisos hasta 20 para el perfil más rugoso (fig 19). Para estimar el JCS se utiliza el martillo de Schmidt. Con este dispositivo se aplica una presión sobre las asperezas de la pared y dependiendo de la resistencia, del ángulo de orientación del martillo y del peso específico del material, se obtiene una estimación para el valor de JCS.

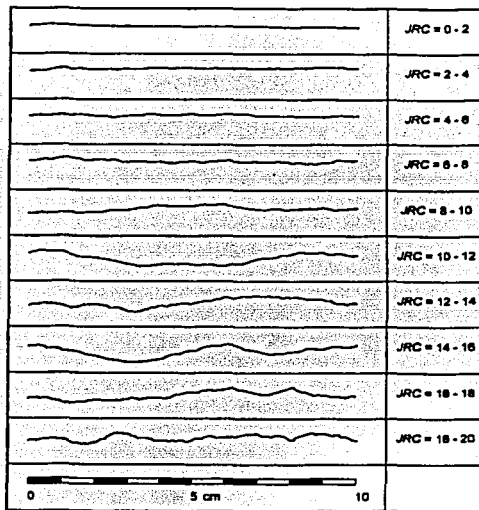


Fig. 19. Tabla de perfiles de rugosidad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Influencia del agua en la estabilidad de taludes.

El efecto lubricante del agua sobre los materiales es importante cuando las discontinuidades en un macizo rocoso están rellenas de arcilla, su influencia se manifiesta sobre todo disminuyendo el ángulo de fricción. Tratándose de discontinuidades en las que el relleno no controla la falla, como sucede en el caso de los macizos rocosos del Cerro del Tenayo, la mayor influencia que ejerce el agua es la presión "u" que puede generar en las discontinuidades, lo que reduce el esfuerzo normal σ_n . Esto genera una reducción del esfuerzo cortante y en la expresión para calcularlo se usa el *esfuerzo efectivo*: $\sigma_n' = (\sigma_n - u)$.

La ecuación para calcular la resistencia al corte es:

$$\tau_p = c + (\sigma_n - u) \tan\phi$$

En las anteriores ecuaciones de resistencia al esfuerzo cortante se debe utilizar el esfuerzo efectivo cuando se considere la presencia de agua en el talud.

Propiedades índice y mecánicas de las rocas del Cerro del Tenayo.

Las propiedades que son de interés para los análisis son básicamente el peso volumétrico, el ángulo de fricción y la cohesión.

Estos parámetros se estiman para realizar los cálculos pero no se realizaron ensayos, lo cual no es siempre necesario. Se pueden estimar indirectamente o bien haciendo uso de tablas y de clasificaciones que nos permitan ubicar la roca dentro de un rango de valores de ciertas propiedades. Se escogen los valores que mejor se adaptan al problema y a las características de la roca, tomando implícitamente un factor de seguridad al considerar los valores más bajos.

Para obtener el peso volumétrico de la dacita se cortó un trozo de roca para obtener una geometría regular y poder calcular el volumen. Después se pesó la muestra. Los datos fueron:

$$W = 406.5 \text{ gr}$$

$$L = 7.2 \text{ cm}$$

$$A = 4.7 \text{ cm}$$

$$H = 6 \text{ cm}$$

$$V = 203.04 \text{ cm}^3$$

El peso volumétrico es:

$$\gamma = W/V = 406.5/203.04 = 2.002 \text{ gr/cm}^3$$

Los valores de cohesión, ángulo de fricción y resistencia a la compresión simple se estimaron a partir de tablas y datos experimentales (Hoek y Bray, 1996; Farmer, 1968; Giani, 1992).

La cohesión que se estimó para las discontinuidades es:

$$c = 1 \text{ t/m}^2$$

El valor del ángulo de fricción que se estimó es de:

$$\phi = 30^\circ$$

El valor de resistencia a la compresión simple es de:

$$\sigma = 500 \text{ kg/cm}^2$$

El valor del peso volumétrico que se usará en los análisis (suponiendo una dacita más densa y en condiciones húmedas) es de:

$$\gamma = 2.3 \text{ t/m}^3$$

Estos valores son los que se utilizan para realizar los cálculos en los análisis de estabilidad.

VI. RIESGOS GEOTÉCNICOS EN EL CERRO DEL TENAYO

Muchas veces los términos peligro, riesgo y vulnerabilidad se manejan indistintamente, dependiendo de la persona y de la situación en que se encuentre. Varnes (1984), en un estudio para la UNESCO, propone las siguientes definiciones que son internacionalmente aceptadas.

Peligro (H) : se refiere a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un lapso determinado y en una cierta área, de un fenómeno natural potencialmente destructivo.

Vulnerabilidad (V) : significa el grado de pérdida o daño que puede sufrir un elemento o elementos en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural con cierta magnitud destructiva. Puede ser expresado en una escala del 0 (sin daño) al 1 (pérdida total).

Riesgo específico (Rs) : se refiere al grado esperado de daño o pérdida debido a un fenómeno natural en particular. Puede ser expresado como $H \times V$.

Elemento en riesgo (E) : significa la población, propiedades, actividades económicas, servicios públicos, etcétera, que se encuentran en riesgo en una determinada área.

Riesgo total (Rt) : se refiere al número esperado de pérdidas humanas, de personas afectadas, de propiedades dañadas, a la interrupción de actividades económicas y de servicios, debido a un fenómeno natural en particular. Se obtiene entonces como el producto de un riesgo específico (Rs) y de los elementos en riesgo (E).

$$R_t = (E)(R_s) = (E)(H \times V)$$

Los peligros que se presentan en el Cerro del Tenayo se deben a la inestabilidad de los materiales rocosos que conforman sus taludes. El riesgo está dado básicamente por la cercanía que tienen las viviendas con respecto a la posible área de afectación en caso de que un talud falle, cualquiera que sea el mecanismo de la falla. Este estudio de riesgo toma en cuenta variables (por ejemplo: la topografía o el fracturamiento), que definen un cierto nivel de peligro. La conjunción de estas variables señala zonas de posible afectación donde el peligro se evalúa en términos de una escala (bajo, medio a alto). Luego, dependiendo de la ubicación de la infraestructura (viviendas, carreteras, infraestructura eléctrica o hidráulica) con respecto a las zonas de peligro se realiza una *Zonificación Ingeniería de Riesgo Geotécnico*. Esta zonificación también está dada en términos de una escala (bajo, medio y alto riesgo).

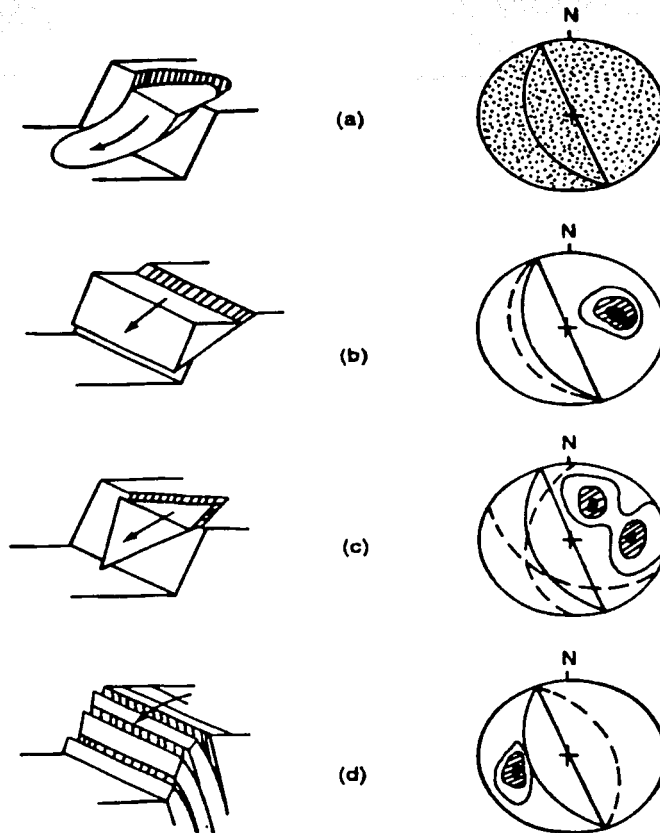
Respecto a la vulnerabilidad se puede decir de manera general que es cercana a 1 toda vez que las viviendas que se encuentran en las cotas más altas en general presentan serias deficiencias constructivas lo que las expone a sufrir un daño mayor en caso de que un bloque las impacte, lo que aumenta el riesgo de las personas que allí habitan.

VI. 1 PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Con el nombre genérico de talud designaremos a cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar las estructuras de tierra, ya sea en forma natural o por intervención del hombre (Juárez y Rico, 1990). Cualquier masa de suelo o roca, que forma una ladera, presenta la tendencia a moverse pendiente abajo, debido a: factores gravitacionales y estructurales (grietas, fracturas), pérdida de cohesión y de resistencia en superficies de debilidad, meteorización y arrastre de material, entre otros factores. Si dicha tendencia se contrarresta con la resistencia al esfuerzo cortante del suelo o roca, el talud es estable; si eso no ocurre, sobreviene el deslizamiento de esa masa, generándose una superficie de falla en la interfaz entre la masa que se mantiene estable y la masa deslizante. El estudio de todos los tipos de movimientos de taludes, tanto en suelos como en rocas, es complicado pues estos pueden tener diferentes configuraciones y mecanismos de falla (desde volteo hasta flujos), pueden involucrar una gran variedad de materiales (roca sana hasta arcillas y detritos), y pueden ser activados por varios fenómenos (precipitación intensa, sismos, acción biológica, etc.). En este estudio se tratan únicamente aspectos relacionados con la estabilidad de los taludes rocosos, particularmente los del Cerro El Tenayo; se identifican los principales mecanismos potenciales de falla y los agentes que pueden propiciarla.

El enfoque que se adopta es que las masas rocosas se comportan no como continuos elásticos sino como medios discontinuos, donde el rol de las discontinuidades determina en gran medida el tamaño del bloque y el tipo de falla. El flujo plástico que tuvo lugar al momento de la formación del domo determina la orientación de los planos de pseudoestratificación, los cuales sirven como planos de deslizamiento (sobre todo si tienen echados entre 30° y 70° a favor del talud), de desprendimiento (con echados casi horizontales), y de volteo (con echados mayores a 70°). La fig. 20 muestra tipos de falla comunes.

Principales tipos de falla de taludes y representación estereográfica de los patrones estructurales de fracturamiento que las originan.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig.20 Principales tipos de falla que se presentan en un talud y su representación en la red estereográfica: **a) Falla circular** en suelos, roca alterada o densamente fracturada. El deslizamiento rotacional se da en una superficie circular o listrica, es típica en rocas con fracturamiento denso y aleatorio; **b) Falla plana** en roca en la cual predomina una familia de fracturas que controla el movimiento, el deslizamiento ocurre sobre una superficie plana; **c) Falla en cuña** sobre dos planos, dos familias de fracturas se intersectan y el deslizamiento ocurre sobre la línea de intersección de ambos planos; **d) Falla por volteo** de rocas columnares o trozos de roca, está asociado a un fracturamiento con echados cercanos a la vertical. (Hoek et al, 1996).

VI.1.1 DESLIZAMIENTO

El deslizamiento implica movimientos rápidos pendiente abajo de suelo o roca, que se desarrollan a través de una o más superficies de deslizamiento (planos de debilidad). Ocurre cuando una masa rocosa es atravesada por una discontinuidad que aflora y delimita un bloque, el cual puede deslizarse si las fuerzas a favor del movimiento son mayores que las fuerzas que se oponen al movimiento (fig. 21)

La falla puede ocurrir como falla en cuña, falla plana y falla circular o lítrica. En la falla en cuña se tiene que el bloque desliza a través de la línea de intersección de dos discontinuidades; en la falla plana el movimiento se da a través de una discontinuidad principal o plano de deslizamiento; la falla circular o lítrica es muy común en suelos o en rocas densamente fracturadas, las cuales pueden fallar como un suelo, siguiendo una superficie circular o en forma de cuchara.

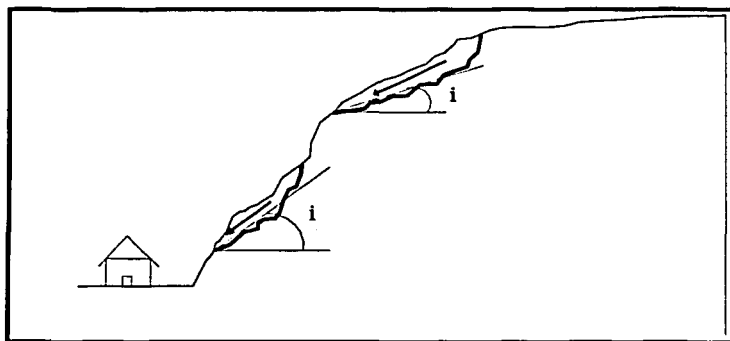


Fig. 21 Deslizamiento de rocas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI.1.2 VOLTEO

La falla por volteo ocurre cuando el vector resultante de las fuerzas aplicadas pasa fuera o a través de un punto que sirve como pivote en la base del bloque y alrededor del cual se produce el giro o volteo. Este mecanismo de falla es común en macizos rocosos que tienen discontinuidades con echados casi verticales (figs. 22 y 23)

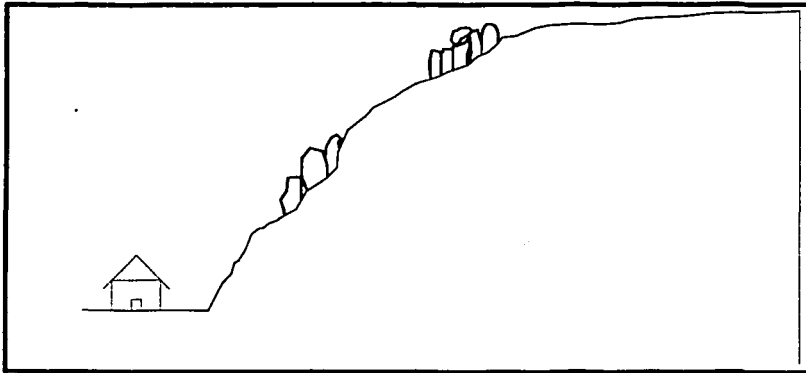


Fig. 22 Volteo de rocas.

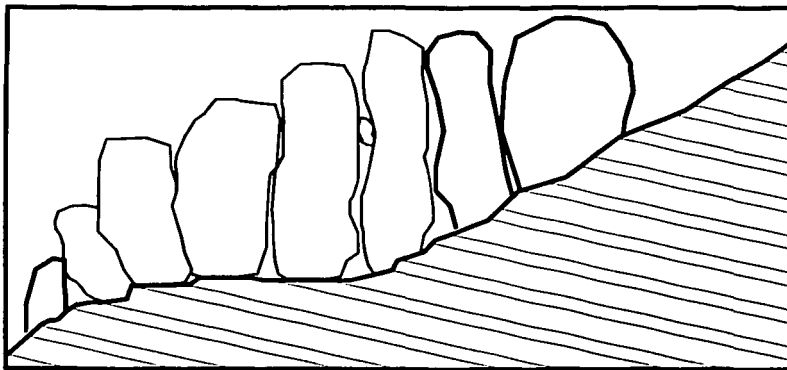


Fig.23 Falla por volteo debido a inestabilidad en el frente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI.1.3 EROSIÓN Y RODAMIENTO

Por rodamiento o caída de rocas se entiende el proceso de descenso, más o menos libre y rápido, de rocas de cualquier tamaño, que se desarrolla en taludes muy escarpados o acantilados (fig. 24). La caída de rocas es generalmente inducida por algún evento climático o biológico que cambia el estado de fuerzas actuantes en una roca.

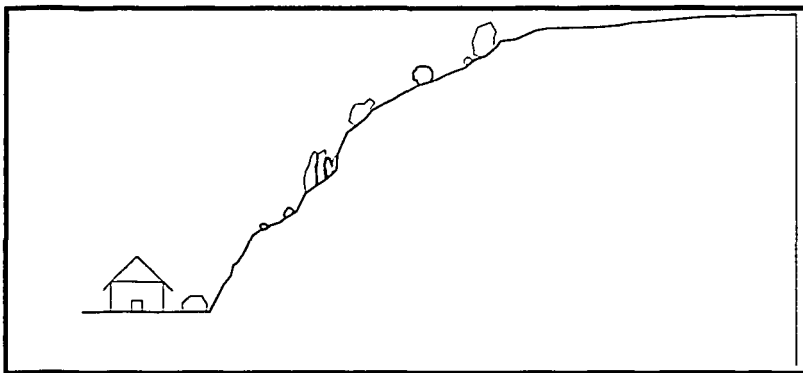


Fig. 24 Caída de rocas.

Desprendimiento de rocas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Este proceso es generado cuando una masa de roca delimitada por fracturas y generalmente de forma tabular, se desprende de un plano y cae libremente, pudiendo rodar después sobre una superficie o descender en caída libre (fig. 25).

Depósitos de Talud

Son depósitos que están constituidos por fragmentos de diferentes tamaños, los cuales se desprendieron de los escarpes. Estos caen por rodamiento, volteo y deslizamiento alcanzando posiciones de reposo en las zonas de menor pendiente.

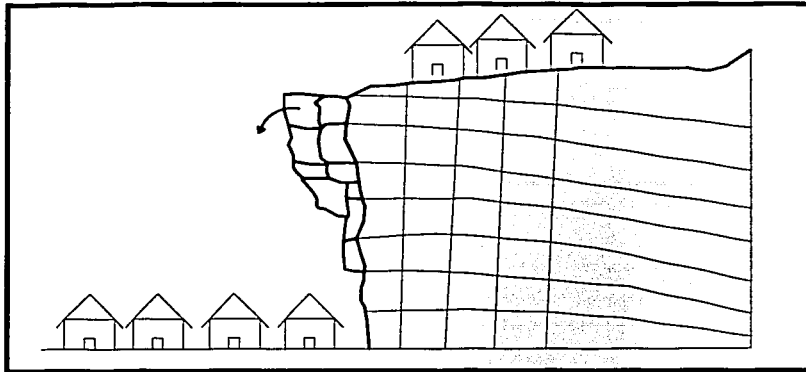


Fig. 25 Desprendimiento de rocas.

Flujo de detritos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sucede cuando material detrítico, mezclado con suelo y restos de vegetación, es arrastrado pendiente abajo en forma de un flujo debido a precipitaciones pluviales intensas.

VI.2.- TIPOS DE RIESGO RECONOCIDOS

Conviene delimitar el tipo de movimientos potenciales, los materiales y los agentes detonadores de la falla para el caso del Tenayo. Con base en salidas a campo, en el estudio detallado y la caracterización de los macizos rocosos del Tenayo se concluye que los mecanismos de falla que se presentan son:

- deslizamiento de rocas
- volteo de rocas
- caída y desprendimiento de rocas
- flujo de detritos.

En general se trata de materiales rocosos intemperizados que presentan fracturas y planos de pseudostratificación, de variadas formas (redondeada, tabular, cúbica, irregular) y que tienen condiciones de apoyo potencialmente inestables; en el caso de flujo de detritos se tiene como material de arrastre detritos de roca y suelo regolítico (producto de la alteración de la roca).

El anexo B presenta todos los bloques que se caracterizaron en campo, con su mecanismo potencial de falla, una foto del bloque en cuestión y algunas observaciones generales (condiciones de apoyo, fracturamiento, si hay vegetación que afecte a la estabilidad).

Agentes detonadores de riesgo

Los principales agentes detonadores que se identificaron son:

- precipitación pluvial intensa
- sismos
- agentes biológicos (raíces de árboles)
- deforestación y quema de basura donde la vegetación no es arbórea (lo que acelera el intemperismo)
- antrópicos (cambios de pendiente del talud, vibraciones)
- pérdida progresiva de la resistencia al corte
- intemperismo y erosión

La acción de estos agentes detonadores de la falla se ejerce combinada y progresivamente hasta que se llega a un punto límite en que cualquier desequilibrio de fuerzas provoca el deslizamiento, el volteo, la caída o el flujo de rocas (generalmente el sismo o la lluvia aportan esa fuerza desequilibrante). Se describen los agentes detonadores más importantes que se identificaron.

Precipitación pluvial: las lluvias intensas tienen efectos desfavorables sobre la estabilidad de taludes. La influencia del agua básicamente no cambia el ángulo de fricción de la roca; su principal influencia es que satura las fracturas de la roca y genera presiones de poro que disminuyen el *esfuerzo normal total* al *esfuerzo normal efectivo* ($\sigma' = \sigma - u$), lo que se traduce en una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades. La dilatación del agua contenida en fracturas debido al cambio de volumen por congelamiento induce esfuerzos en las discontinuidades. El agua genera la degradación química y alteración de la roca al infiltrarse en las fisuras del macizo.

En bloques tabulares cuyo mecanismo potencial de falla es el volteo, el agua puede generar empujes que contribuyan a aumentar las fuerzas que favorecen el volteo. El escurrimiento puede erosionar la base de

bloques potencialmente inestables y propiciar la falla por rodamiento. Las lluvias y la formación de corrientes de agua por la superficie (escorrentía superficial) favorece los procesos de erosión y de arrastre. El proceso de flujo de detritos implica el arrastre de material detrítico en una matriz fluida formada por suelo y agua.

Sismos: Este factor, junto con la precipitación pluvial intensa, es de los agentes detonadores más importantes de las fallas de taludes. Los empujes sísmicos debilitan la cohesión en las discontinuidades y ejercen una fuerza que tiende a separar los bloques a través de estas. Si existen bloques que tienen condiciones de apoyo precarias el empuje sísmico induce una fuerza desequilibrante que propicia la falla.

En el caso de bloques redondeados, ubicados en zonas de fuerte pendiente, el empuje sísmico les induce una velocidad inicial (proporcional a la intensidad del sismo) con la cual tiene lugar el rodamiento

Acción biológica: esta influencia se manifiesta principalmente en la acción de empuje que ejerce el crecimiento de raíces de árboles entre las discontinuidades de la roca, lo que tiende a separar los bloques, a disgregarlos y en casos especiales a provocar la falla. Como este proceso es lento, generalmente actúa combinado con otros y llegado a un punto límite de equilibrio, basta la influencia instantánea de otro agente detonador (lluvia, sismo, corte del talud, vibración) para que se provoque la falla.

Existen áreas en las cuales la basura se quema, lo que perjudica a la vegetación no arbórea, dejando al descubierto la roca más o menos alterada que vuelve a estar sujeta a procesos de infiltración, de erosión e intemperismo, que si la roca se mantiene estable con una cobertura de suelo y vegetación.

Antrópicos: los cortes de taludes para explotación como canteras es frecuente en la Sierra de Guadalupe. Varios taludes que antiguamente se explotaban ahora tienen construcciones tanto al pie como en la corona, y por varios años la gente ha convivido con los problemas de inestabilidad que presentan estos taludes. Si se realiza un corte en un talud sin conocer los sistemas de fracturamiento que pudiesen afectar su estabilidad, se puede estar induciendo la falla en bloques cuya salida natural la da el corte del talud. Las construcciones, las vibraciones, sean de maquinaria, detonaciones o vehículos, inducen fuerzas que afectan la estabilidad de los taludes.

Erosión e intemperismo: estos procesos naturales, modificadores del relieve terrestre, afectan: disminuyendo la cohesión y la resistencia al esfuerzo cortante en discontinuidades y de la roca intacta; aceleran los procesos de arrastre y caída de material a zonas de baja pendiente.

VI.3.- ZONIFICACIÓN DE RIESGO GEOTÉCNICO

Para realizar una zonificación de riesgo geotécnico es necesario determinar los factores más importantes que influyen en el nivel de peligro que se presenta en una zona estudiada así como la posible afectación en caso de que ocurra la falla.

En este caso, los factores que se tomaron en cuenta para determinar el riesgo geotécnico debido a la inestabilidad de taludes rocosos en el Cerro del Tenayo son:

- **Fracturamiento.** El arreglo espacial de las discontinuidades en la masa rocosa delimita la forma, el tamaño, y el tipo de estructura de bloques los cuales pueden fallar por distintos mecanismos. Se realizaron *estaciones de muestreo estadístico de fracturamiento* (anexo A) para determinar las principales familias de fracturas así como el mecanismo potencial de falla. En general las fracturas espaciadas delimitan grandes bloques y las fracturas poco espaciadas generan material de arrastre y caída. Se consideran los siguientes niveles de riesgo para cada rango de densidad de fracturamiento:

Densidad de Fracturamiento Df (Fracturas/m ²)	Nivel de Riesgo
0 - 1	Bajo
1 - 2	Medio
> 2	Alto

- **Condiciones de apoyo de los bloques.** Existen muchos bloques que han sido moldeados debido a la erosión, que están separados de la masa estable y expuestos a rodar, volcar o deslizar pendiente abajo lo que pone en serio riesgo la integridad de las personas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se realizaron *fichas de bloques* (anexo B) que contienen una foto del bloque o del talud, sus coordenadas geográficas en UTM, las medidas y forma de los bloques y su mecanismo potencial de falla. Se presentan las fotos de tal manera que se resaltan las precarias condiciones de apoyo de muchos bloques. En algunos bloques, la base en que descansan y de la que depende la estabilidad es la suficiente para mantener al bloque estático, pero los efectos de la erosión y el intemperismo se encargan de reducir el área de apoyo hasta que se presenta un agente detonante, principalmente un sismo o precipitación intensa y se presenta la falla del bloque.

- **Litología.** El tipo de material y su estructura están involucrado en el tipo de falla que se presente. En este caso, se trata de una dacita que se presenta en unidades bandeadas de flujo, con pseudoestratificación y generalmente fracturadas. En la estructura del domo aparecen fallas normales en sus flancos, fracturamiento paralelo y asociado a éstas así como planos de debilidad debido a la pseudoestratificación y líneas de flujo, grandes oquedades, bloques en varios arreglos y cortes artificiales. El tipo de roca determina el valor del coeficiente de restitución a usar en los análisis de modelado de trayectorias de rocas. De acuerdo con la descripción que se hizo en la Estratigrafía (IV.3.1), se consideran los siguientes niveles de riesgo para cada unidad litológica:

Unidad litológica	Nivel de riesgo
Dacita 1 (D-1)	Bajo
Dacita 2 (D-2)	Alto
Dacita 3 (D-3)	Medio
Dacita 4 (D-4)	Bajo
Depósitos de talud (Dt)	Medio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- **Topografía.** La trayectoria que seguirían los bloques con posibilidad de rodar o volcar estará en función de la topografía. Los niveles de riesgo que se consideran para las pendientes de los taludes son:

Pendiente en grados	Nivel de riesgo
0 - 30°	Bajo
30 - 45°	Medio
45 - 90°	Alto

- **Modelado de caída de rocas (Paquete de análisis: Rock fall)**
- Una vez que una roca ubicada en el hombro del talud inicia su movimiento (que incluye caída, rodamiento y rebotes), el factor más importante que controla la trayectoria de caída es la geometría del talud. Si un talud presenta un fuerte echado (mayor de 45°) puede añadir a la roca una cierta componente de velocidad horizontal después de su rodamiento o de cada rebote, lo que significa que el alcance horizontal de la roca con respecto al pie del talud es más grande. Asimismo, si la cara del talud es de roca sana, limpia e inalterada, se presenta mayor peligro, pues dicha superficie no retarda el movimiento de caída o rodamiento y la energía que se pierde en cada rebote es mínima. Por otro lado, si la cara del talud está cubierta de material rocoso, de grava, suelo y vegetación, una considerable cantidad de energía de la roca en movimiento será absorbida, y en ocasiones la roca se detiene completamente. La capacidad del material para retardar y absorber energía en el rodamiento y caída de rocas se expresa matemáticamente en el concepto de coeficiente de restitución. El valor de este coeficiente depende de la naturaleza de los materiales que forman la superficie de impacto. Superficies limpias de roca sana e inalterada presentan valores altos del

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

coeficiente de restitución, mientras que para superficies muy alteradas, con suelo y grava los valores del coeficiente son bajos. En el primer caso el material se restituye rápidamente y no pierde mucha energía, en el segundo caso el material se restituye menos rápido, se deforma más y pierde mayor energía.

El coeficiente de restitución varía de 0 a 1 y puede ser representado por las siguientes fórmulas (Giani, 1992):

1.- De acuerdo con la teoría de Newton de colisión de partículas el coeficiente de restitución K queda definido como:

$$K = (v_2' - v_1') / (v_2 - v_1)$$

Donde $v_{1,2}$ representa la velocidad inicial de partícula y $v_{1,2}'$ la velocidad final después de la colisión de las partículas 1 y 2.

2.- Si se trata de un bloque impactando contra el terreno el coeficiente se simplifica a:

$$K = v' / v$$

Donde v y v' son las velocidades del bloque antes y después del impacto.

3.- En ensayos de caída y rodamiento libre la ecuación anterior se modifica a la ecuación:

$$K = (h' / h)^{1/2}$$

Donde h y h' corresponden a la altura original de caída y a la altura de rebote después del impacto.

El coeficiente de restitución que se utilizó es de $K = 0.3$, para el caso de roca alterada y con cobertura vegetal.

➤ Cercanía de las viviendas. Una vez que se tienen los datos del modelado, principalmente el de alcance horizontal de los bloques, se analiza en un mapa topográfico (que de preferencia incluya la traza urbana) el alcance que tendría cada bloque a partir de su posición en el mapa y de la cual se realizó el análisis y se observa si la cota de viviendas se empalma con la probable trayectoria de los bloques. En función de esta cercanía de la traza urbana con las probables trayectorias y alcance horizontal de los bloques se define un nivel cualitativo de riesgo.

De esta forma el modelado de Rock Fall y su relación con las cotas de viviendas es uno de los principales parámetros que sirvieron para delimitar las zonas de bajo, medio y alto riesgo y para generar el Mapa de Zonificación Ingeniería de Riesgo Geotécnico del Cerro del Tenayo.

Criterio para realizar la zonificación

De todos los parámetros que se tomaron en cuenta para realizar la zonificación se hizo una evaluación cualitativa y cuantitativa para determinar su nivel de influencia en el riesgo geotécnico en cada zona.

El ancho de las bandas o franjas para cada uno de los niveles de riesgo considerados (Alto, Medio y Bajo) se determinó con base en la topografía y en los resultados del modelado de trayectoria de rocas, tomando en cuenta el peligro geotécnico establecido previamente para cada zona de acuerdo con los demás parámetros.

Los resultados se resumen en las siguientes tablas:

<u>Zona I</u>	
• Parámetro	Peligro Geotécnico Asociado a la Zona
• Litología	Unidades D-1 y D-3. La unidad D-1 genera pocos bloques y es la unidad más estable. La unidad D-3 se encuentra alterada (es fácil desprender trozos de roca con la mano). Riesgo: Medio.
• Fracturamiento	Se presentan tres familias de fracturas: 1) Planos de pseudoestratificación, 2) Frente de flujo de lava, 3) Fracturas de origen tectónico. Se intersectan perpendicularmente delimitando bloques cúbicos o tabulares. El espaciamiento promedio es de 1 - 3 m. Densidad de fracturamiento $D_f = 0.5$ (fract/m ²). Riesgo: Bajo.
• Bloques	Arriba de la franja hay pocos bloques con posibilidades de rodar o volcar. Existen bloques que están en cantilver unidos al talud por medio de los planos de pseudoestratificación. Tamaño máximo de bloque: 30 m ³ . Riesgo: Alto.

Ancho de bandas

• Parámetro	Nivel de riesgo		
	Alto	Medio	Bajo
• Topografía	Rango de pendientes: 30-70° Existen cantiles verticales.	Rango de pendientes: 5-35°	Rango de pendientes: < 15°
• Alcance horizontal de bloques	Los bloques llegan a la traza urbana y hay bloques que pueden desprenderse de los cantiles. Ancho de banda: 100 m.	Los bloques se han amortiguado previamente y el alcance de bloques es menor. Ancho de banda: 60 m.	Las trayectorias de los bloques no coinciden con esta franja. El riesgo de caídos o desprendimientos es nulo.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

<u>Zona II</u>	
• Parámetro	Peligro Geotécnico Asociado a la Zona
• Litología	Unidades D-1 y D-2. La unidad D-1 es la unidad más estable, genera pocos bloques. La unidad D-2 se encuentra intemperizada (es fácil desprender trozos de roca con un golpe de martillo), afallada y fracturada. Se encuentran bloques basculados y superficies pulidas. Zona de antiguo deslizamiento. Riesgo: Alto.
• Fracturamiento	Se presentan tres familias de fracturas: 1) Planos de seudoestratificación, 2) Frente de flujo de lava, 3) Fracturas de origen tectónico. Se intersectan perpendicularmente delimitando bloques cúbicos o tabulares. Rango de espaciamiento: 0.2 - 1 m. Densidad de fracturamiento $D_f = 4.77$ (fract/m ²). Riesgo: Alto.
• Bloques	En esta zona abundan bloques que están separados de la masa estable, de forma redondeada. El fracturamiento origina bloques tabulares de 8 m ³ en algunas áreas y material de arrastre, con bloques de menos de 2 m ³ . Tamaño máximo de bloque: 25 m ³ . Riesgo: Alto.

Ancho de bandas

Nivel de riesgo			
• Parámetro	Alto	Medio	Bajo
• Topografía	Rango de pendientes: 35° - 80° Hay paredes verticales.	Rango de pendientes: 15° - 35°	Rango de pendientes: 5° - 30°
• Alcance horizontal de bloques	Los bloques llegan francos a la traza urbana. Se presenta un flujo de detritos, colindando con la zona III. Ancho de banda: 60 m	Pocos bloques llegan a esta franja, previamente se han amortiguado. Ancho de banda: 35 - 45 m	Las trayectorias no coinciden con esta franja. El riesgo de impactos es mínimo.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

<u>Zona III</u>	
• Parámetro	Peligro Geotécnico Asociado a la Zona
• Litología	Unidades D-1, D-4 y D-2. Las unidades D-1 y D-4 generan pocos bloques. La unidad D-2 se encuentra intemperizada y fracturada, lo que genera material de arrastre que afecta a una porción de la zona. Riesgo: Alto.
• Fracturamiento	Se presentan tres familias de fracturas: 1) Planos de pseudoestratificación, 2) Frente de flujo de lava, 3) Fracturas de origen tectónico. El fracturamiento no genera muchos bloques separados de la masa estable. El rango de espaciamiento es de 0.5 - 1 m. Densidad de fracturamiento $D_f = 1.75$ (fract/m ²). Riesgo: Medio.
• Bloques	En esta zona hay pocos bloques con posibilidades de rodar o volcar. Los bloques son tabulares y sub-redondeados, de 8 m ³ . En la parte este (E) hay material de arrastre, con bloques menores de 2 m ³ . Tamaño máximo de bloque: 10 m ³ . Riesgo: Medio.

Ancho de bandas

<u>Nivel de riesgo</u>			
• Parámetro	Alto	Medio	Bajo
• Topografía	Rango de pendientes: 30° - 60°	Rango de pendientes: 15° - 45°	Rango de pendientes: 5° - 30°
• Alcance horizontal de bloques	Los bloques apenas se detienen antes de la traza urbana. Existe el riesgo de flujo de detritos, cerca de la zona II. Ancho de banda: 60 m.	Pocos bloques llegan a esta franja, previamente se han amortiguado. El flujo de detritos no afecta a esta franja. Ancho de banda: 60 m.	Las trayectorias no coinciden con esta franja. El riesgo de impactos es mínimo.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

<u>Zona IV</u>	
• Parámetro	Peligro Geotécnico Asociado a la Zona
• Litología	Unidades D-1 y D-2. La unidad D-1 es la unidad más estable, genera pocos bloques, la unidad D-2 se encuentra intemperizada (es fácil desprender trozos de roca con un golpe de martillo), afallada y fracturada. Zona de antiguo deslizamiento. Riesgo: Alto.
• Fracturamiento	Se presentan tres familias de fracturas: 1) Planos de pseudoestratificación, 2) Frente de flujo de lava, 3) Fracturas de origen tectónico. Fracturamiento poco denso que delimita bloques grandes. $Df=1.7$ (fract/m ²). Riesgo: Medio.
• Bloques	En esta zona existen bloques con posibilidades de rodar, deslizar o volcar. Los bloques son tabulares y sub-redondeados, de 2 - 16 m ³ . Tamaño máximo de bloque: 25 m ³ . Riesgo: Alto.

Ancho de bandas

Nivel de riesgo			
• Parámetro	Alto	Medio	Bajo
• Topografía	Rango de pendientes: 30° - 90° Existen cantiles verticales	Rango de pendientes: 15° - 40°	Rango de pendientes: 5° - 30°
• Alcance horizontal de bloques	Los bloques llegan francos a la traza urbana. Ancho de banda: 60 m.	Los bloques se han amortiguado previamente. Ancho de banda: 35 - 45 m	Las trayectorias no coinciden con esta franja. El riesgo de impactos es mínimo.

TESA CON
 FALLA DE ORIGEN

Principales Riesgos Geotécnicos en cada Zona

Zona I	Bloques que pueden desprenderse de los cantiles verticales, rodamiento de bloques. Las viviendas están construidas abajo y en la corona del talud. Zona de fuerte filtración y alteración. Brechas y bloques potencialmente inestables en zonas de viviendas.
Zona II	Bloques que pueden fallar por volteo, caída, deslizamiento y desprendimiento. Zona de intenso fracturamiento que genera material de arrastre. Flujo de detritos.
Zona III	Pocos bloques con posibilidades de rocar o volcar. Flujo de detritos que afecta una pequeña parte de la zona.
Zona IV	Bloques que pueden fallar por volteo, caída y deslizamiento.

El anexo C presenta el *Mapa de Peligros Geotécnicos* donde se resume la información del fracturamiento y de los peligros detectados así como el *Mapa de Zonificación de Riesgo Geotécnico*.

Se consideran los tres niveles de riesgo siguientes para los problemas de inestabilidad de las laderas del Cerro del Tenayo:

Alto riesgo: abarca áreas en las cuales los bloques podrían impactar o afectar las viviendas en caso de que se presente la falla.

Mediano riesgo: en esta zona ya se ha tenido un amortiguamiento suficiente como para que un bloque las afecte considerablemente.

Bajo riesgo: los bloques ya se han amortiguado o detenido antes y su potencial afectación es mínima.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI.4.- ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Una vez que se tienen detectados los peligros geotécnicos y su mecanismo potencial de falla así como los agentes detonadores de la falla, es posible realizar un análisis de estabilidad. Se presenta un análisis tipo para los mecanismos de deslizamiento, volteo y caída de rocas. Se utiliza el método de *equilibrio límite* para los análisis.

Deslizamiento



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se considera un ancho unitario en los análisis. Las dimensiones del bloque son: largo= 3 m, ancho=1 m, alto= 0.8 m.

El factor de seguridad se define como:

$$F.S = \tau_{res} / \tau_{act} = F_{res} / F_{act}$$

τ_{res} está dado por la resistencia de la discontinuidad al corte, que es evaluada como:

$$\tau_p = c + (\sigma_n - u) \tan(\phi + i)$$

τ_{act} está dado por la componente del peso paralela a la superficie de deslizamiento $\tau = (W/A) \sin \alpha$, siendo α el ángulo de la discontinuidad.

Considerando los siguientes valores:

$c = 1 \text{ t/m}^2$ para una superficie alterada y tomando un valor residual.

$\phi = 30^\circ$

$i = 10^\circ$

$\alpha = 60^\circ$

$\gamma = 2.3 \text{ t/m}^3$

Se considera una distribución lineal de presiones de agua.

Peso propio

$$F.S.pp = F_{res}/F_{act} = (cA + (N - U) \tan(\phi + i))/W \text{sen}\alpha,$$

$$U = \gamma_w hw L/2$$

$$hw = L/2 \text{ sen}\alpha = (1.5)(\text{sen}60^\circ) = 1.3 \text{ m}$$

$$U = (1)(1.3)(3)/2 = 1.95 \text{ t}$$

Peso del bloque W. Volumen del bloque = $V = 3 \cdot 1 \cdot 0.8 = 2.4 \text{ m}^3$

$$W = V\gamma = (2.3)(2.4) = 5.52 \text{ t}$$

Componente normal a la superficie. $N = W \cos\alpha = (5.52)(\cos60^\circ) = 2.76 \text{ t}$

Componente tangente a la superficie. $T = W \text{sen}\alpha = (5.52)(\text{sen}60^\circ) = 4.78 \text{ t}$

$$F.S.pp = F_{res}/F_{act} = (cA + (W \cos\alpha) \tan(\phi + i))/W \text{sen}\alpha$$

$$F.S.pp = (1 \cdot 3 + 2.76 \tan 40^\circ)/4.78 = 1.12$$

Peso propio más agua.

$$F.S.pp+agua = (cA + (W \cos\alpha - U) \tan(\phi + i))/W \text{sen}\alpha$$

$$F.S.pp+ agua = (1 \cdot 3 + 0.81 \tan 40^\circ)/4.78 = 0.77$$

Peso propio más sismo.

Fuerza por sismo $S = cW$, donde c es el coeficiente sísmico de la zona, en este caso se tomo $c=0.16$.

$$S = (0.16)(5.52) = 0.883 \text{ t}$$

Las componentes normal y tangencial son:

$$St = S \cos \alpha = (0.883) \cos 60^\circ = 0.442 \text{ t}$$

$$Sn = S \sin \alpha = (0.883) (\sin 60^\circ) = 0.765 \text{ t}$$

$$F.S._{pp+sismo} = (cA + (W \cos \alpha - Sn) \tan(\phi + i)) / (W \sin \alpha + St)$$

$$F.S._{pp+sismo} = (1 \cdot 3 + 1.995 \tan 40^\circ) / 5.222 = 0.89$$

Si el factor de seguridad para un talud es 1 se está en una condición límite: si es mayor que 1 bajo las condiciones más desfavorables se tiene una condición de estabilidad; si es menor que 1 se está en condiciones de inestabilidad. Del análisis se observa que por peso propio el bloque no desliza y se mantiene estable, con un factor de seguridad apenas mayor que 1. Ante sismo y presencia de agua el factor de seguridad es menor que 1, siendo más importante el empuje hidrostático que el empuje sísmico.

Volteo

Las dimensiones del bloque son: altura = 6 m, largo = 4 m, ancho en la parte superior (de la grieta al frente del talud) = 2.2 m.

El factor de seguridad se define como:

$$F.S. = \Sigma M_{res} / \Sigma M_{act}$$

Considerando los siguientes valores:

$c = 0$ (suponiendo que no existe cohesión en la fractura debido a un relajamiento previo del bloque).

$\alpha = 75^\circ$ (echado de la fractura que delimita el bloque).

$\gamma = 2.3 \text{ t/m}^3$



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Se considera una distribución lineal de presiones de agua y un ancho unitario.

Peso del bloque W. Volumen del bloque = $V = 6 \cdot 2.2 \cdot 1 = 13.2 \text{ m}^3$

$W = \gamma V = (13.2)(2.3) = 30.36 \text{ t}$

Por peso propio el bloque tiene un factor de seguridad infinito ya que no existen fuerzas desequilibrantes. En general cualquier cuerpo esbelto se puede apoyar en su base más pequeña y se mantiene estable, pero cualquier fuerza externa por mínima que sea puede bastar para que el cuerpo voltee.

Peso propio más sismo

$M_{res} = W \cdot a/3 = (30.36)(2.2/3) = 22.26 \text{ tm}$

$M_{act} = cW \cdot 2l/3 = (0.16)(30.36)(2/3)(6) = 19.5 \text{ tm}$

$$F.S = \Sigma M_{res} / \Sigma M_{act} = 22.26 / 19.5 = 1.14$$

PARA ESTOS NO SE PUEDE

Peso propio mas agua

Se considera la condición más desfavorable, es decir con la fractura saturada.

$$M_{res} = W \cdot a / 3 = (30.36)(2.2/3) = 22.26 \text{ tm}$$

$$U = \gamma_w \cdot h_w \cdot L / 2$$

$$L = 6 / \sin 75^\circ = 6.21 \text{ t}$$

$$h_w = 3 \text{ m}$$

$$U = (1)(3)(6.21) / 2 = 9.31 \text{ t}$$

$$M_{act} = U \cdot L / 2 = (9.31)(6.21/2) = 28.9 \text{ tm}$$

$$F.S = \Sigma M_{res} / \Sigma M_{act} = 22.26 / 28.9 = 0.77$$

Se aprecia que el agua tiene mayor influencia sobre la estabilidad del bloque.

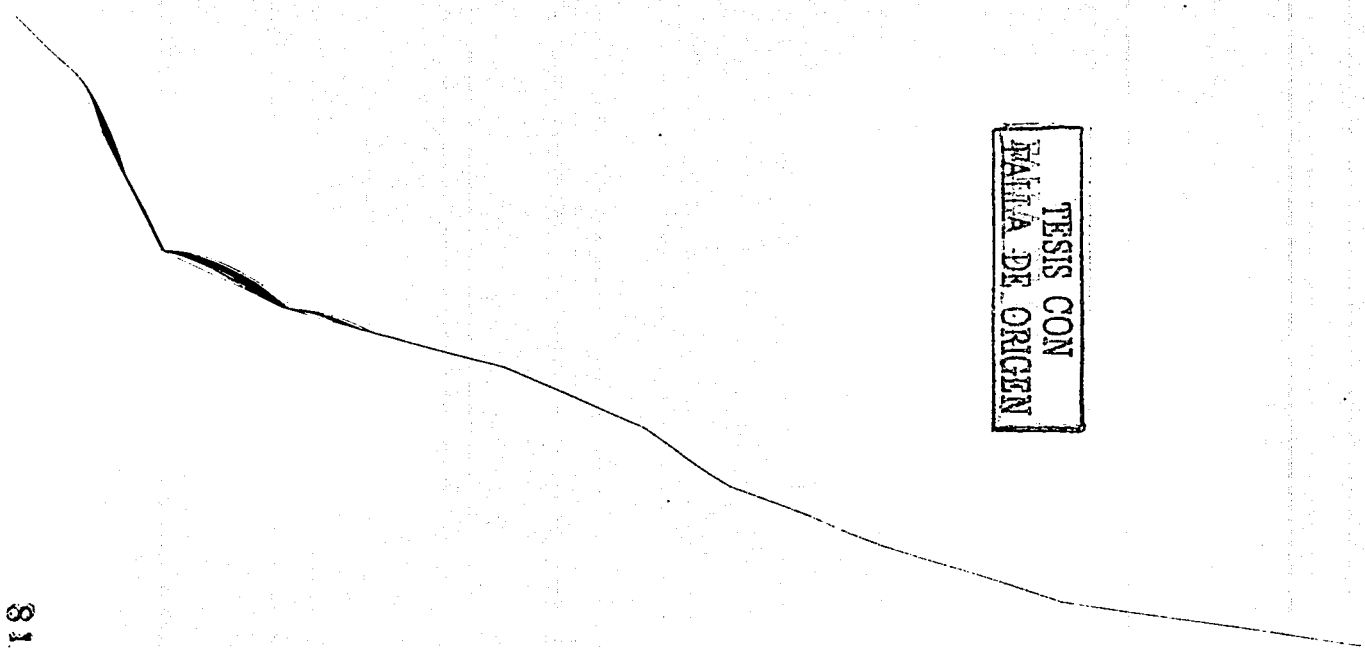
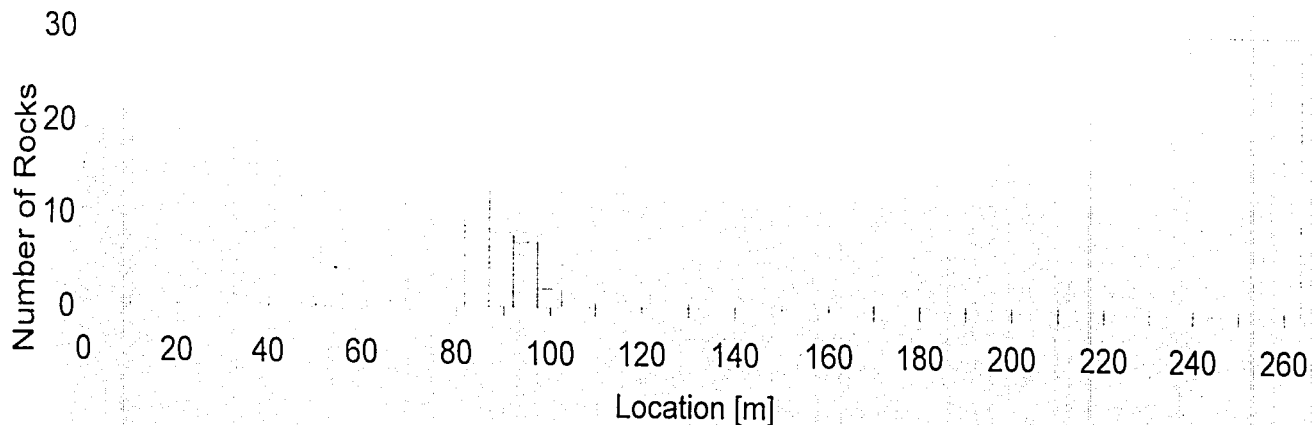
Caída de rocas

Se presentan los resultados que arrojó el Paquete de Modelado de Trayectoria de Rocas "Rock Fall" para un bloque tabular cuyo mecanismo potencial de falla es por volteo, en la Zona IV, coordenadas (482730,2160250), con un peso $W=5000 \text{ Kg}$.

Las gráficas que se presentan son de:

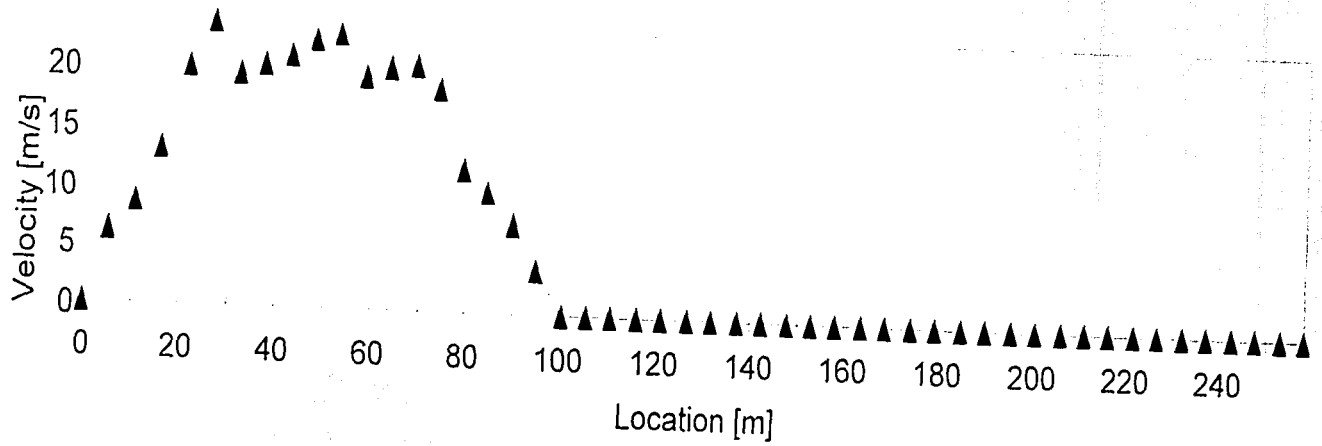
- Localización horizontal de bloques (Horizontal Location of Rock End-points).
- Velocidad (Velocity Envelope).
- Energía cinética desarrollada (Kinetic Energy Envelope).
- Altura de rebote (Bounce Height Envelope).

Horizontal Location of Rock End-points



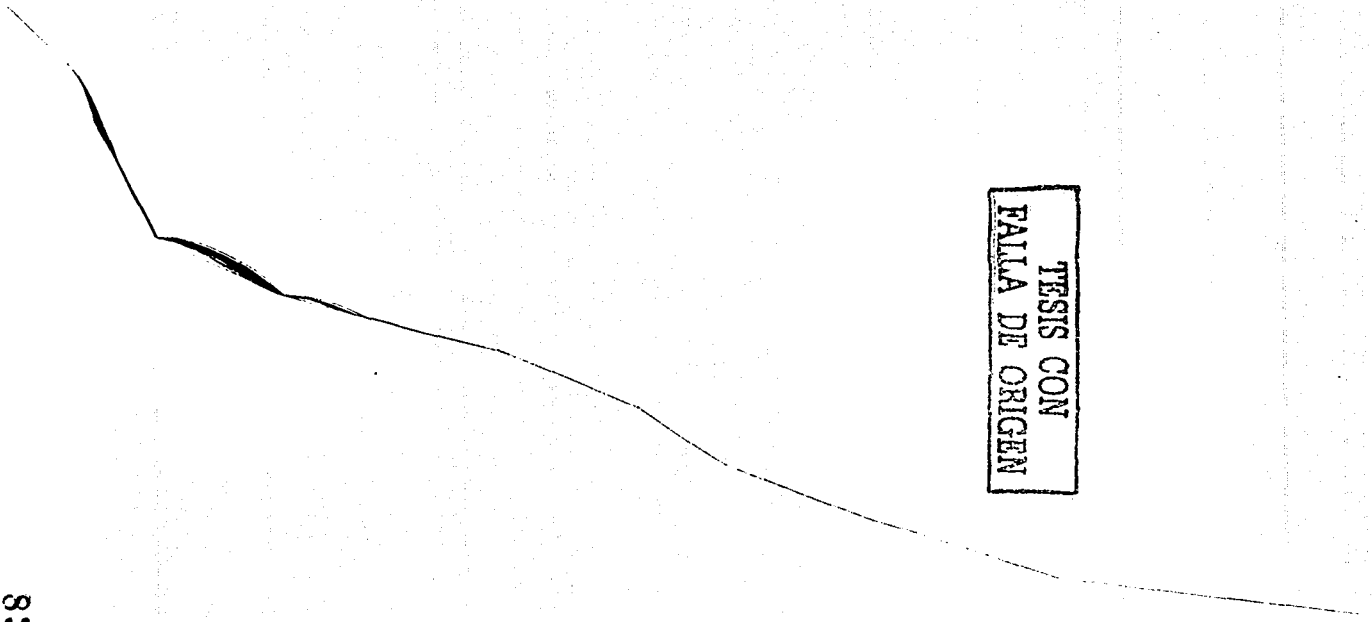
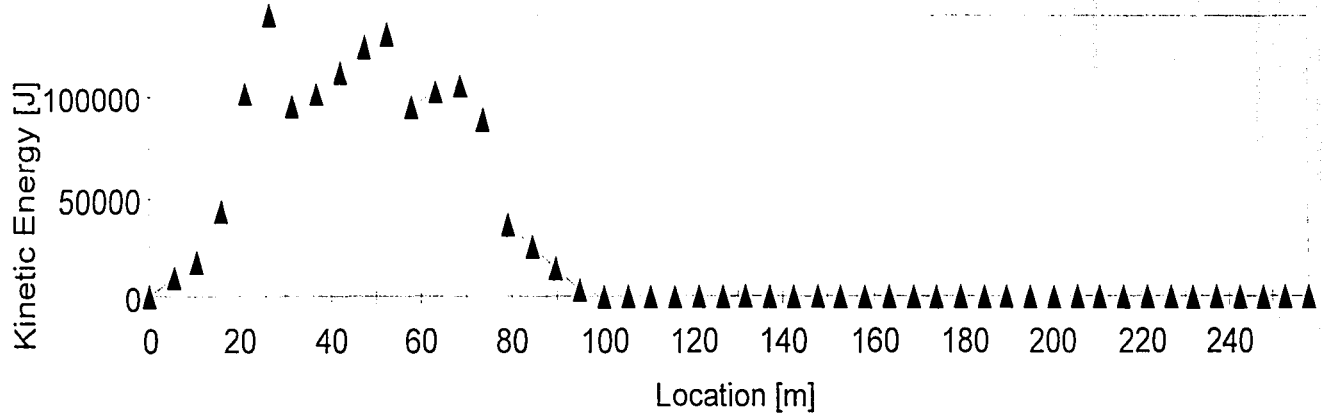
TESIS CON
MATERIA DE ORIGEN

Velocity Envelope

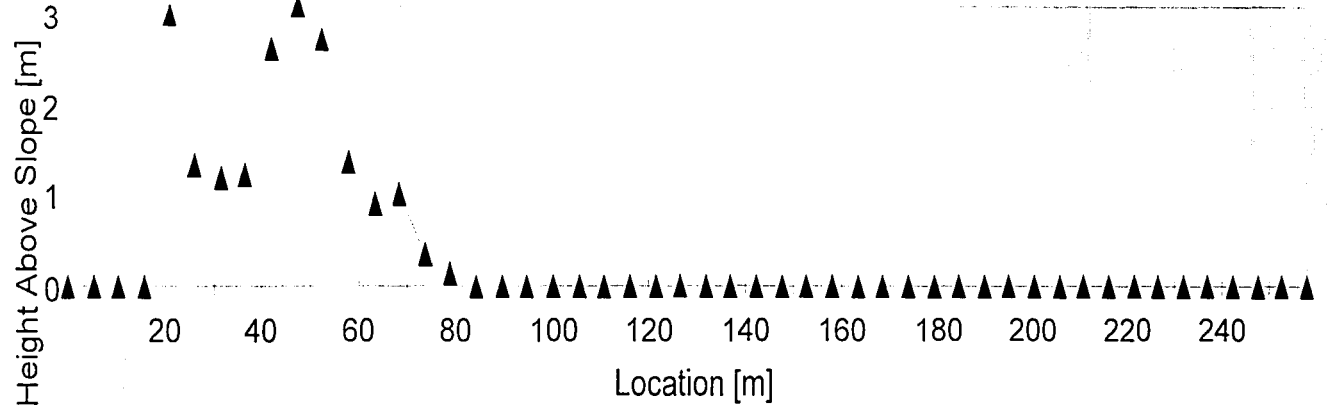


TESIS CON
FOLIA DE ORIGEN

Kinetic Energy Envelope



Bounce Height Envelope



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI.5.- SOLUCIONES GEOTÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Una vez que se conocen los tipos de falla que se pueden presentar en las laderas del Tenayo y se ha realizado un análisis de estabilidad, se está en condiciones de proponer soluciones de mitigación de riesgo.

De la misma manera en que se realizaron análisis de estabilidad representativos, se da la solución geotécnica de bloques representativos, pero las soluciones que se plantean son generales y se pueden aplicar a los bloques cuyas características sean similares a los descritos en una solución particular.

Los principales tipos de falla se engloban en los siguientes casos particulares:

- Falla del bloque rocoso por erosión o pérdida de apoyo al pie.
- Falla por erosión de la cobertura de suelo o roca que sobreyace a bloques previamente afallados.
- Falla por volteo de bloques tabulares o columnares.
- Falla por cabeceo lateral de bloques previamente afallados o que han sido moldeados con el tiempo y que presentan condiciones de apoyo particularmente precarias.
- Falla por rodamiento de bloques redondeados, subredondeados o tabulares, que estén ya separados de la masa estable o bien apenas unidos por planos de debilidad.
- Falla por desprendimiento de bloques que están en cantiliver en zonas de fuerte pendiente (70-90°) y con los planos de pseudoestratificación casi horizontales que sirven como planos de desprendimiento.
- Falla por deslizamiento de bloques, donde la fractura tiene un echado favorable al deslizamiento o que están apoyados sobre cobertura de suelo.
- Falla por arrastre de material detrítico, que en caso de precipitación intensa puede descender a gran velocidad en una matriz de suelo arcilloso y gravillas.

Soluciones geotécnicas

El objetivo principal de un estudio de estabilidad de taludes o laderas es el de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo. Generalmente los beneficios más importantes desde el punto de vista de reducción de amenazas y riesgos es la prevención. Las medidas de prevención requieren políticas de Estado y la participación y colaboración de las comunidades. Sin embargo, la eliminación total de los problemas no es posible mediante métodos preventivos en todos los casos y se requiere establecer medidas de control para la estabilización de taludes susceptibles a presentar algún tipo de falla.

Estabilización.

Los sistemas de estabilización se pueden clasificar en cinco categorías principales:

1. *Conformación del talud o ladera.* Son sistemas que tienden a lograr un equilibrio de masas, reduciendo las fuerzas que producen el movimiento.

Metodos:

- a) Remoción de materiales en la cabeza del talud.
- b) Abatimiento de la pendiente.
- c) Terraceo de la superficie.

2. *Recubrimiento de la superficie.* Métodos que tratan de impedir la infiltración o la ocurrencia de fenómenos superficiales de erosión, o refuerzan el suelo mas subsuperficial.

Métodos:

- a) Conformación de la superficie.
- b) Sellado de grietas superficiales
- c) Sellado de juntas y discontinuidades.
- d) Cobertura vegetal, árboles, arbustos y pasto.

3. *Control del agua superficial y subterránea.* Son sistemas tendientes a controlar el agua y sus efectos, disminuyendo fuerzas que producen movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes.

- a) Canales superficiales para control de escorrentía.
- b) Subdrenes de zanja.
- c) Subdrenes horizontales de penetración.

4. *Estructuras de contención.* Son métodos en los cuales se van inducir fuerzas externas al movimiento aumentando las fuerzas resistentes, sin disminuir las actuantes.

- a) Relleno o berma de roca o suelo en la base del deslizamiento.
- b) Muros de contención convencionales (mampostería), de tierra armada.
- c) Anclajes o pernos.
- d) Pantallas ancladas.

5. *Mejoramiento del suelo.* Estos métodos aumentan la resistencia del suelo e incluyen procesos físicos y químicos que aumentan la cohesión y/o fricción de la mezcla suelo-producto estabilizante. Muchos de estos métodos tienen una aplicación limitada.

- a) Inyecciones o uso de químicos.
- b) Congelación.
- c) Electro-osmosis.

Métodos de estructuras de control de movimientos (caídos).

Un método efectivo de minimizar la amenaza de caídos de roca es permitir que ellas ocurran pero controlarlas adecuadamente, utilizando sistemas de control en el pie del talud, tales como trincheras, barreras y mallas. Un detalle común a estos métodos es el de sus características de absorción de energía, bien parando el caído en una cierta distancia o desviándolo de la zona que se está protegiendo. Los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de estas estructuras son:

trayectoria de las rocas, velocidad, energía de impacto, volumen total de acumulación.

Los tipos de estructuras de control de caídos son:

a) *Bermas en el talud*. Son terrazas que se construyen al pie del talud y en las que se espera se acumulen los bloques. Los caídos tienden a saltar en las bermas, pero el diseño de bermas anchas puede ser muy útil para ciertos casos de caída, especialmente los residuos de roca.

b) *Trincheras*. Una trinchera o excavación en el pie del talud puede impedir que la roca siga su trayectoria y representa una solución efectiva cuando existe espacio adecuado para su construcción y el material a excavar no es muy duro. El ancho y profundidad de las trincheras está relacionado con la altura y la pendiente del talud. En los taludes de pendiente superior a 75° , los bloques tienden a permanecer muy cerca de la superficie del talud y para pendientes de 55 a 75° tienden a saltar y rotar, requiriéndose una mayor dimensión de la trinchera. Para pendientes de 40 a 55° los bloques tienden a rodar y se requiere de una pared vertical junto a la trinchera para que los bloques no traten de salirse.

c) *Barreras*. Las barreras pueden ser de roca, suelo, tierra armada, muros de concreto, pilotes, gaviones, bloques de concreto o cercas. La barrera generalmente produce un espacio o trinchera en el pie del talud que impide el paso del caído. La idea de esta solución es que se absorba la energía cinética con que llegan los bloques. Se pueden emplear soluciones alternativas como muros de llantas apiladas, recubiertos con madera o un geotextil, que absorben mucha energía dada la deformación que pueden tener.

Conviene señalar antes que las soluciones que se planteen no provienen de un análisis de estabilidad para cada bloque, tarea por cierto laboriosa, sino de un análisis particular o tipo, de la observación en campo de las condiciones de apoyo y de la experiencia obtenida en un proyecto similar. En general todas las soluciones están referidas a los bloques que se marcaron en el proceso de mapeo y caracterización de bloques, contenidos en las fichas. Los criterios que se usan para las soluciones de mitigación son básicamente dos: o bien se detiene el bloque en su lugar y se impide que inicie su movimiento o se le espera abajo mediante un medio control de caídos. Las soluciones que se plantean toman como base el primer criterio.

Soluciones de mitigación y procedimientos constructivos

Las soluciones de mitigación para asegurar la estabilidad de los bloques consistirán en la mayor parte de los casos (SEGEOMET, 2001; Abramson, 2002) en realizar reposición de roca al pie de bloques erosionados que han perdido apoyo, así como construcción de muros de mampostería que tendrán la doble función de reposición y contención por apuntalamiento al pie de los bloques, complementada con junteo y calafateo parcial o total de grietas y fracturas erosionadas para evitar la progresiva erosión, empujes de agua y desarrollo de vegetación arborácea; en el relleno de las grietas y fracturas para lograr que los bloques estén en contacto oponiendo una mayor resistencia lateral al corte y tengan una mejor trabazón y trabajo de conjunto; en otros casos se recurre al uso de cables de acero colocados en los bloques para evitar cabeceo y asegurar su estabilidad.

- ✓ Reposición de roca: se recomienda la construcción de muros de mampostería (utilizando bloques de piedra sana, junteados con mortero cemento-arena 1:5, con acabado aparente en una cara y pendientes variables, desde vertical hasta 1:1 según las condiciones y espacio de apoyo) que deberán tener la doble función de reposición

y contención por apuntalamiento de los bloques que han perdido apoyo al pie.

- ✓ Calafateo: esto consiste en rellenar fracturas y grietas para evitar la erosión, los empujes de agua y el crecimiento de vegetación arbórea. Se recomienda calafatear, total o parcialmente, sólo aquellas fracturas cuya orientación resulta desfavorable para el bloque ante la presencia de estos fenómenos. Para el calafateo de grietas menores de 20 cm se recomienda usar mortero denso trabajable con una relación cemento-arena de 1:5, dejando tubos metálicos de 1" de diámetro y de longitud variable según extensión de la grieta para posterior inyección de mortero fluido $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ para posterior relleno de grieta. En el caso de grietas o separaciones entre bloques mayores de 20 cm se recomienda calafatear mediante mampostería de roca sana hacia el interior de la grieta, junteada con mortero cemento-arena 1:5, dejando ventanas de 20 a 30 cm a cada 1 a 2 m para posterior sellado mediante concreto pobre $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$.
- ✓ Junteo de grietas, fracturas y bloques: esto se recomienda para bloques que están separados y que actúan independientemente. Al juntarlos con mamposteo se logra que tengan una mejor trabazón, desarrollen una resistencia lateral al corte y que no trabajen independientemente sino monolíticamente.
- ✓ Cableado de acero: en bloques que pueden fallar por volteo, por cabeceo o por desprendimiento, se puede utilizar cables de torón de acero de 1" con separación variable de 1 a 3 m según tamaño de bloque, sujetos a la cara del bloque con anclas de varilla No. 6 (3/4") con ojillo terminal. Las perforaciones para los extremos del cable se deberán hacer en roca firme, de 2" de diámetro y 35-50 cm de longitud y con anclas de 1", con ojillo terminal para sujeción. Tensado del cable y amarre con "perros" en los extremos de sujeción.
- ✓ Malla de alambre de triple torsión galvanizado: en zonas donde el fracturamiento es intenso y se genera abundante material de arrastre y caída (Zona II), se recomienda la malla para confinar a todos los bloques. La malla se fijará en la cara del talud con anclas

cortas de varilla de acero y crucetas de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, con 40 cm de longitud mínima en roca, con un patrón de 1.5 x 1.5 como máximo y perimetralmente se fijará con cables de torón de acero de $\frac{1}{2}$ " fijados con anclas de $\frac{3}{4}$ " y 50 cm de longitud en roca firme, con gancho terminal o cruceta en superficie. La malla se doblará sobre el cable para hacer un traslape de por lo menos 40 cm, cosiéndola con alambre galvanizado.

- ✓ Retirar bloques: cuando existan condiciones propicias para ello, se deberán retirar los bloques inestables, ya sea lazándolos o encadenándolos de manera segura y después jalándolos hacia una zona de baja pendiente o terraza en que descansen y no tengan posibilidad de rodar o volcar. Cuando exista un bloque que puede ser retirado pero que está en una saliente y con peligro de caer si no se jala adecuadamente se puede envolver con una malla de alambre de triple torsión galvanizado, fijarlo mediante anclas cortas, y proceder a demolerlo manualmente. Se debe utilizar un medio de contención en caso de que algún fragmento se llegase a desprender, como hamacas, redes, muros secos (con rocas del lugar apiladas) o cualquier otro tipo de contención (por ejemplo barreras de llantas) para evitar daños a personas e infraestructura en general.
- ✓ Muro seco o de gaviones: este método se recomienda para contener el flujo de detritos que se presenta en la zona II y en general para contener bloques de la zona II o IV. Se pueden apilar bloques de la roca existente en el sitio y unirlos mediante mamposteo o bien confinarlos con una malla de acero de triple torsión. Aquí se pueden ensayar soluciones alternativas y menos costosas como un muro de llantas. El muro deberá tener por lo menos 3 m de alto y su ubicación para la zona II es en la cota 2330, y para la zona IV (donde es menos factible dado el pequeño espacio que existe entre los bloques y las viviendas) en la cota 2370.

Todos los trabajos deberán iniciar con la limpieza de basura, desyerbe y retiro de árboles y tocones (raíces), así como retiro de trozos de roca en zona aledaña en una franja de 2m alrededor del bloque. Se pueden emplear productos químicos para matar raíces y evitar la germinación. Esto se debe hacer tanto en la parte superior de los bloques como en las fracturas y grietas laterales. Esta misma actividad se aplicará aunque no solo en bloques críticos sino en todos los casos donde haya taludes de roca en las zonas habitadas, asegurando también la cancelación de fugas de agua y de drenajes que viertan agua sobre las caras de los taludes y construyendo bordillos en las vialidades, encauzando apropiadamente el agua con lavaderos, cajas y bajantes de mampostería o de concreto fuera de la zona de taludes. Se utilizarán palas, picos, machetes, desorilladoras, tijeras de podar, motosierras, cables, cuerdas y todo lo necesario para realizar en forma segura y eficiente los trabajos. Amacice enérgico retirando capa de suelo y fragmentos de roca sueltos o semisueltos en la corona de bloques o taludes y en las caras de los mismos utilizando barretas metálicas, picos, palas y /o chiflón de agua a presión. Una vez que se ha limpiado alrededor de un bloque se ve la continuidad de las fracturas y se puede estimar el volumen real de mampostería que habrá de utilizarse.

En el caso de bloques pequeños que están apoyados sobre otros más grandes se podrán retirar manualmente, tomando las medidas de seguridad correspondientes; si los bloques son más grandes se puede recurrir al uso de cables, lazando el bloque en forma segura y en varias direcciones y jalándolo con gatos o tirfors hasta un lugar donde pueda descansar en condiciones estables. Se debe tener cuidado de no mover un bloque del cual dependa la estabilidad de otros bloques, pues al retirarlo se puede provocar un alud de rocas que ponga en peligro la vida de los trabajadores o de otras personas. Demolición de bloque de roca utilizando productos químicos expansores o mediante martillo hidráulico manual, controlando mediante barreras al pie, contenciones

o redes el producto demolido para evitar su disgregación fuera de la zona de demolición.

Una vez descubiertas y limpias las fracturas, grietas y oquedades mas importantes, se procederá a su calafateo (sellado) hasta una profundidad del orden de 2.5 veces el ancho de la grieta, usando mortero cemento-arena en proporción 1:5. Si las grietas son muy grandes de tal forma que pueda acceder una persona hasta el fondo de la misma, entonces podrán sellarse con mampostería. Si no es posible realizar el relleno en su totalidad, se dejarán ahogados tubos de drenaje con inclinación descendente del fondo de la grieta al labio exterior de la misma para liberar presiones hidráulicas.

En oquedades al pie de bloques se procederá a construir mampostería para reposición de roca, restituyendo el apoyo perdido. De preferencia la mampostería se terminará al paño del labio superior de la oquedad y con pendiente variable en la cara expuesta, según el espacio disponible, pudiendo ser desde vertical hasta 1:1 o mayor. En grupos de bloques esta mampostería podrá hacerse sellando bloques considerados clave para que exista unión entre ellos y una buena trabazón. En huecos muy grandes podrá tomarse la decisión de hacer una reposición parcial (muretes) solo al pie del mismo para darle un adecuado apoyo, sin tener que recurrir al relleno de toda la cavidad. Se utilizarán fragmentos de la propia roca dacítica existente en el sitio para la fabricación de la mampostería y mortero agua-cemento-arena con proporción de cemento:arena de 1:5 para la cementación de los bloques. En algunos casos de reposición en grietas pequeñas podrá usarse solo mortero haciendo calafateo y dejando embebidos tubos de 1" con cuerda en el exterior para acoplar una "uña" y proceder a la inyección de mezcla fluida que permita rellenar zonas no accesibles.

En bloques con posibilidades de falla por volteo o desprendimiento en los que existen condiciones propicias para apoyar un muro de

mampostería al pie se recomienda su construcción. Dependiendo del tamaño del muro este podrá ser celular o masivo y también podrá ser de concreto si se prefiere. El aspecto mas importante es garantizar en todos los casos un adecuado desplante del muro en roca, evitando cimentarlo en materiales térreos; por tal motivo, deberá excavarse el suelo hasta llegar a roca y perfilar con martillo neumático escalones para asegurar una superficie discontinua y un adecuado apoyo (se puede hacer un escarificado de roca al pie con cincel o martelina para lograr una buena adherencia del mortero o concreto). Los muros tendrán la doble función de contener y apuntalar, evitando el cabeceo del bloque. De preferencia la base deberá ser del orden de la mitad de la altura o cuando menos de 1/3 de la misma y la corona de 30 cm mínimo. La mampostería se fabricará con fragmentos de la propia roca dacítica existente en el sitio y mortero agua-cemento-arena con proporción de cemento:arena de 1:5 para la cementación de los bloques.

Hay casos en los que el fracturamiento del bloque es muy frecuente (zona II) y se requiere el uso de malla de triple torsión para confinar a todos los bloques. La malla se fijará en la cara del bloque con anclas cortas de varilla de acero y crucetas de ½" de diámetro con 35 cm de longitud mínima en roca, con patrón de 1.5 x 1.5 m máximo y perimetralmente se fijará con cables de torón de acero de ½" fijados con anclas de ¾" y 50 cm mínimo de longitud en roca con un gancho terminal o cruceta en superficie. La malla se doblara sobre el cable para hacer un traslape de por lo menos 35 cm cosiéndola con alambre del mismo tipo galvanizado.

Para algunos bloques que se encuentran a gran altura en cantiliver y prácticamente colgados de la cara del talud o para aquellos donde el muro no asegura la estabilidad del mismo y debe evitarse el cabeceo de la parte superior, se recomienda el uso de cables de torón de acero de ¾" y de 1" de diámetro, los cuales deben amarrar al bloque y fijarse en bloques laterales que no tengan posibilidad de movimiento, de tal forma

que debe elegirse cuidadosamente este sitio de fijación en el cual se perforarán orificios de 1 7/8" a 2 1/4" de diámetro y 50 cm de longitud o mas (de 1 m hasta 3 m si es necesario) si se observa que hay fracturas superficiales que hagan que se salga el fragmento donde quedo alojada el ancla; en estos orificios se colocarán anclas de 3/4" y de preferencia de 1" de diámetro cementadas con mortero $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$ provistas de un gancho o un ojal para introducir el cable y haciendo un dobléz en el mismo fijarlo con una abrazadera o "perro" en uno de los extremos, mientras que en el otro extremo se jalará con un tirfor hasta eliminar cualquier juego entre la cara del bloque y el cable y se fijará con otra abrazadera. En la cara del bloque se colocarán por lo menos dos anclas cortas de 35 cm de longitud en roca también provistas de gancho u ojal para guiar el cable.

Todos estos trabajos son clasificados como de alto riesgo por efectuarse en lugares acantilados donde siempre existirá el peligro de perder el equilibrio, resbalar o bien pueden ocurrir desprendimientos de fragmentos de roca, por lo que el personal deberá estar capacitado para llevarlos al cabo y equipado con equipo de seguridad tal como casco, arneses de alpinista que le sujeten tronco y piernas, columpios y andamios adecuados. Por otro lado también deberá preverse evitar que la basura, vegetación y fragmentos y bloques de roca que son desprendidos durante los trabajos se proyecten ladera abajo o hacia las viviendas, por lo que se utilizarán mamparas, hamacas, redes, muros secos (apilamiento de piedras) o cualquier tipo de contención para evitar daños a personas, viviendas e infraestructura.

VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El cerro del Tenayo ha sufrido un intenso proceso de urbanización que conlleva un riesgo dadas sus condiciones topográficas, geológicas, estructurales y de comportamiento mecánico de los macizos rocosos.

Los principales peligros que ponen en riesgo la vida de las personas así como la infraestructura construida en las laderas del cerro el Tenayo son: caída de rocas, volteo de rocas, deslizamiento de rocas y flujo de detritos. El mapa de zonificación de riesgo geotécnico delimita áreas de alto, medio y bajo riesgo cuya utilidad inmediata es para programar un plan de mitigación de riesgo, que deberá iniciar en las zonas más afectadas, para evitar la urbanización en zonas donde aún no se construye y que son de alto riesgo (como las áreas de la zona I y IV) y para regular el uso de tierra.

Se recomienda:

- Evitar más construcciones en las laderas del Cerro del Tenayo.
- Poner señalamientos claros respecto al peligro potencial, sobre todo en las zonas escolares de la zona IV.
- Evitar la quema de basura en zonas donde crece vegetación no arbórea.
- No verter agua de las viviendas de la corona del talud hacia abajo para evitar filtraciones y empujes hidrostáticos.
- Limitar el tránsito de vehículos pesados en los caminos construidos en zonas de ladera.
- Programar un plan preliminar de mitigación de riesgo que involucre a las autoridades y a la comunidad para evaluar la posibilidad de colaborar conjuntamente en los trabajos.
- Evaluar el interior de las viviendas para detectar macizos rocosos inestables y dar recomendaciones para evitar potenciales daños.
- Dar pláticas, cursos y repartir información entre los habitantes de la zona acerca del riesgo existente, para tomar medidas preventivas y evitar inducir algún tipo de falla por causas antrópicas.

BIBLIOGRAFÍA

Abramson Lee W., Lee Thomas. S., Sharma Sunil., Boyce Glenn., 2002. Slope Stability and Stabilization Methods, Editado por John Wiley and Sons Inc.

Barton, N.R., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics. 10, p 1-54.

Campa-Uranga, M.F., 1965. Breve análisis petrográfico de la Sierra de Guadalupe: Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 61 p.

Comisión Federal de Electricidad., 1993. Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección C: Estructuras, Tomo I, Criterios de Diseño, Capítulo III, Diseño por Sismo.

Demant, Alan., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 2, num. 2, p. 172-187.

Farmer, I.W., 1968. Engineering properties of rocks, E & F.N Spon Limited, Londres.

García Palomo, Armando., 2002. Vulcanismo y Geología Estructural de la Región de Apan, Edos. de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México, tesis doctoral, 181p.

Giani, G.P., 1992. Rock slope stability analysis. Editorial Balkema, Rotterdam.

Hoek, Evert., Bray, Jonh W., 1996. Rock Slope Engineering, Institution of Mining and Metallurgy, tercera edición.

Hutchinson, J.N., 1988. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, Vol. I, editado por Christophe Bonnard.

Juárez Badillo, E., Rico Rodríguez, A., 1990. Mecánica de suelos, tomos I y II, Editorial Limusa, decimatercera reimpresión.

Leroueil, S., Locat, J., Seve, G., Picarrelli, L., Faure, M.R., 2001. Slopes and mass movements, Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook, editado por R. Kerry Rowe, Kluwer Academic Publishers.

Lozano Barraza, Luis., 1968. Geología de la Sierra de Guadalupe, México, D.F. Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 39 p.

Lugo Hubp, José., Salinas Montes, Araceli., 1996. Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 13, num. 2, p. 240-251.

Matías Ramírez, G., Lugo Hubp, J., 2000. Estudios geológicos ambientales para prevenir desastres en cuencas hidrogeológicas, Resúmenes Del Simposio Internacional De Riesgos Geológicos y Ambientales en la Ciudad De México, p. 110.

Mooser, F., 1975. Historia geológica de la Cuenca de México, Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo, editado por el D.D.F, México.

Ordóñez, Ezequiel., 1895. Las rocas eruptivas del suroeste de la cuenca de México: Instituto Geológico de México, Boletín 2, 46 p.

Patton, F.D., 1966. Multiple modes of shear failure in rock. Procedimientos del Primer Congreso Internacional de Mecánica de Rocas, Lisboa, Vol I.

Puig, Juan B., 1970. Geología aplicada a la ingeniería y fotointerpretación, Editorial Lito Juventud, México.

Pusch, R., 1995. Rock Mechanics on a Geological Base, Editorial Elsevier Science B.V.

Salinas Montes, Araceli., 1994. Geomorfología de la sierra de Guadalupe y riesgos naturales: UNAM, Facultad de filosofía y letras, tesis profesional, 102p.

SEGEOMET, Servicio Geológico Metropolitano., 2001. Proyecto "Evaluación de los peligros geológicos existentes en los sitios San Juan y Candelaria Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero".

Twiss, Robert J., Moores, Eldridge M., 1992. Structural Geology, W. H. Freeman and Company, primera edición.

Wheeler, Russell L., Dixon, Jeanette M., 1980. Intensity of systematic joints: methods and application. Geology, v. 8, p 230-233.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO A

Muestreo de Fracturamiento

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

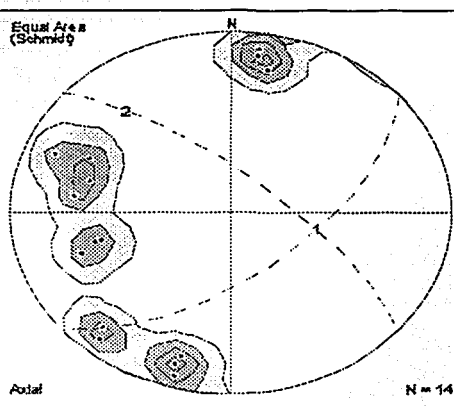
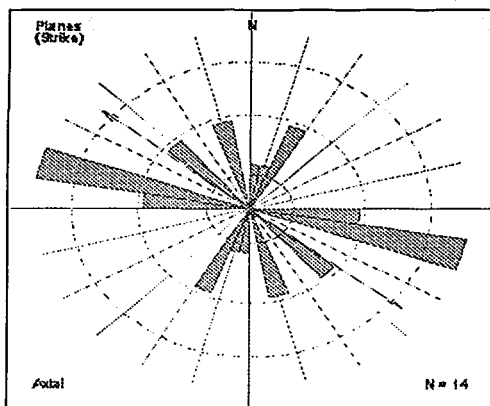
Estación 1.	Zona: II	
Coordenadas:	483201	2160456
Método usado:	Cuerda	
Longitud:	8 m	

Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
S 50° E	80° NE	Continua	3	70	Rugosa	Arcilloso
S 48° E	74° NE	Continua	15	130	Rugosa	Arcilloso
S 73° E	76° NE	Continua	5	35	Rugosa	Arcilloso
S 74° E	83° NE	Discontinua	32	70	Rugosa	Arcilloso
S 74° E	71° NE	Discontinua	15	100	Rugosa	Arcilloso
S 15° E	50° NE	Discontinua	0.5	35	Rugosa	Rafes, arcilla
S 19° E	60° NE	Continua	3	-	Rugosa	Aluvi3n
			10.47	73.3	JRC: 6	

S 15° W	55° SE	Continua	3	300	Pulida	Arcilloso
S 25° W	59° SE	Discontinua	1	160	Rugosa	Arcilloso
S 22° W	74° SE	Continua	2	340	Rugosa	Arcilloso
S 7° W	60° SE	Continua	15	-	Rugosa	Arcilloso
			5.25	266.6	JRC: 4	

N 82° W	76° SW	Continua	13	230	Pulida	Vegetaci3n, arc
N 82° W	80° SW	Discontinua	3	60	Pulida	Arcilloso
N 78° W	69° SW	Discontinua	2	-	Rugosa	Arcilloso
			6	145	JRC: 4	

Seudoestratificaci3n: N 26° E 15° NW	
Densidad de fracturamiento:	1.75



Muestreo de Fracturamiento

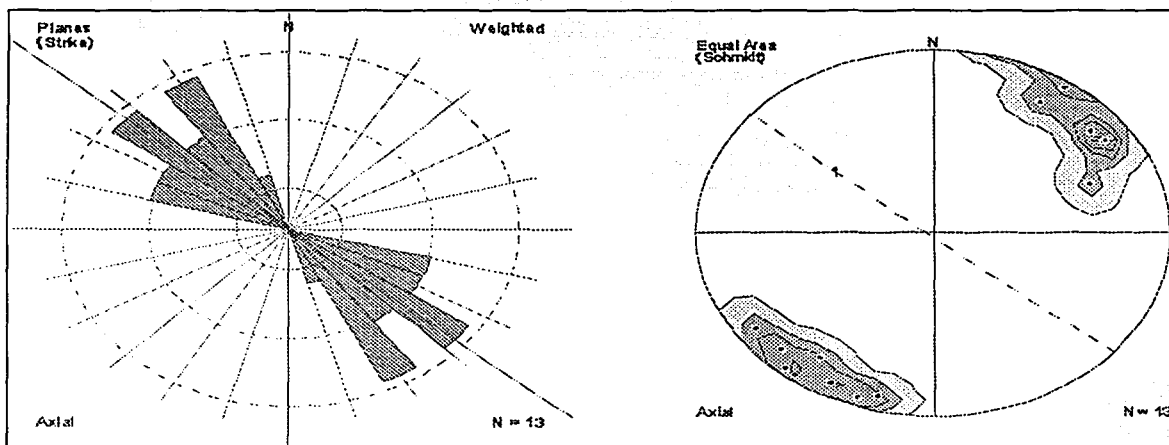
Estación 2.	Zona: IV	
Coordenadas:	482888	2160572
Método usado:	Cuerda	
Longitud:	8 m	

Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
S 75° E	81° NE	Continua	0.3	160	Pulida	Arcilloso
S 55° E	72° NE	Continua	0.5	170	Pulida	Arcilloso
S 45° E	79° NE	Discontinua	2	20	Pulida	Arcilloso
S 35° E	80° NE	Discontinua	1	105	Pulida	Arcilloso
S 50° E	86° NE	Continua	3	125	Pulida	Arcilla, aluvión
S 62° E	82° NE	Continua	3	220	Pulida	Arcilloso
S 70° E	85° NE	Discontinua	-	-	Pulida	-
			1.40	133.3	JRC: 2	

N 35° W	76° SW	Discontinua	0.3	60	Pulida	-
N 53° W	73° SW	Continua	0.5	15	Pulida	Arcilloso
N 55° W	86° SW	Discontinua	1	310	Pulida	Arcilloso
N 22° W	60° SW	Continua	1	215	Pulida	Arcilloso
N 35° W	77° SW	Continua	-	140	Pulida	Arcilloso
N 40° W	75° SW	Continua	-	-	Pulida	-
			0.46	148	JRC: 2	

Seudoestratificación: N 26° E 15° NW
Densidad de fracturamiento: 1.625

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Muestreo de Fracturamiento

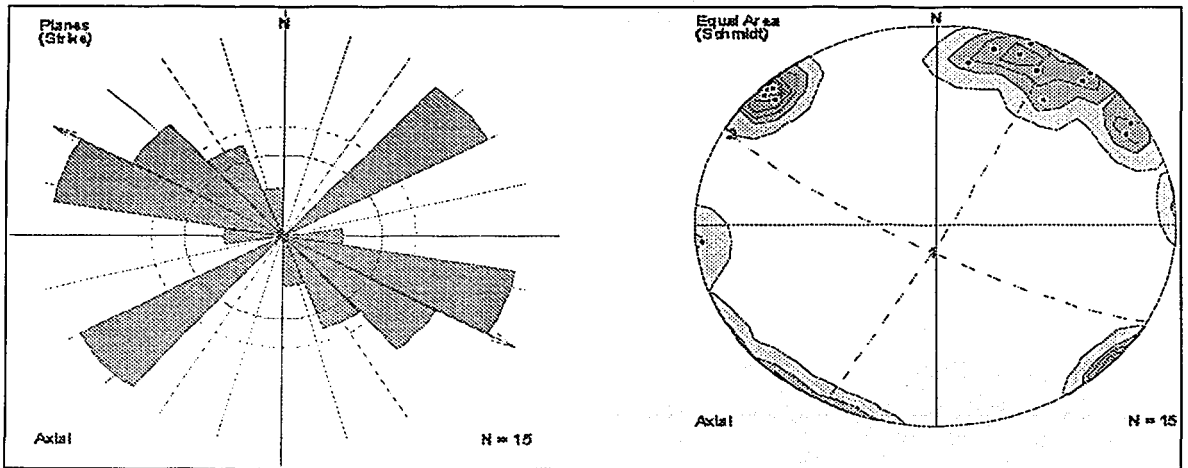
Estación 3.	Zona: II	
Coordenadas:	483282	2160414
Método usado:	Círculo	
Radio:	1 m	

Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
N 55° W	65° SW	Continua	0.5	9	Rugosa	Arcilloso
N 30° W	80° SW	Continua	0.3	11	Rugosa	Arcilloso
N 32° W	85° SW	Continua	0.3	8	Rugosa	Arcilloso
N 68° W	81° SW	Continua	0.3	10	Rugosa	Arcilloso
N 75° W	80° SW	Continua	0.3	15	Rugosa	Arcilloso
N 50° W	83° SW	Continua	0.3	20	Rugosa	Arcilloso
N 50° W	90°	Continua	0.3	10	Rugosa	Arcilloso
N 81° W	71° SW	Continua	0.5	20	Rugosa	Arcilloso
N 62° W	76° SW	Continua	0.5	20	Rugosa	Arcilloso
N 67° W	88° SW	Continua	0.1	15	Rugosa	Arcilloso
			0.35	13.8	JRC: 4	

S 5° E	87° NE	Continua	0.5			Arcilloso
S 43° W	81° SE	Continua	1.0	35	Rugosa	Arcilloso
S 44° W	87° SE	Continua	1.0	30	Rugosa	Arcilloso
S 45° W	86° SE	Continua	0.5	40	Rugosa	Arcilloso
S 42° W	86° SE	Continua	2.0	-	Rugosa	Arcilloso
			1.1	35	JRC: 4	

Seudoestratificación: S 40° E 18° SW	
Densidad de fracturamiento:	4.77

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



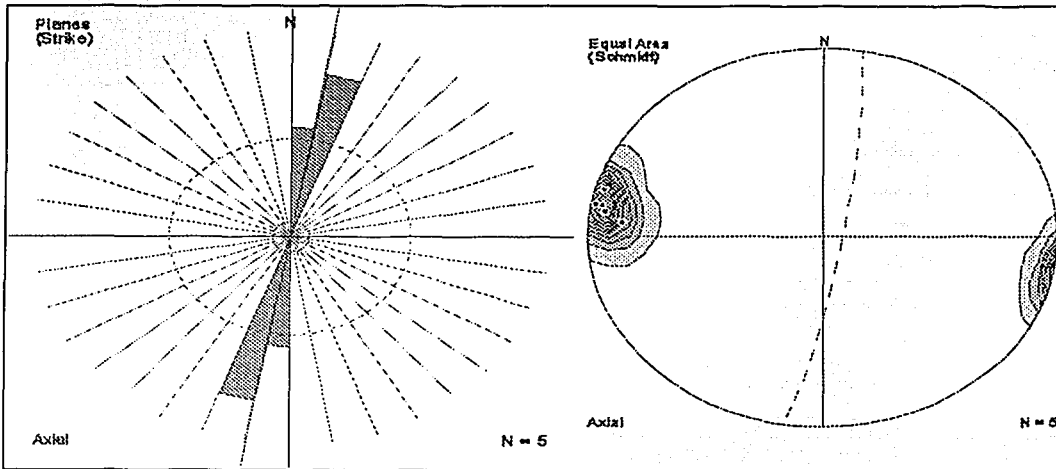
Muestreo de Fracturamiento

Estación 4.	Zona: II	
Coordenadas:	483093	2160115
Método usado:	Cuerda	
Longitud:	6 m	
Rumbo	Echado	Extensión
S 8° W	83° SE	Continua
S 5° W	75° SE	Continua
S 10° W	85° SE	Continua
S 10° W	88° SE	Continua
S 15° W	86° SE	Continua

Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
5 - 10	100	Pulida	Arcilloso
2	10	Pulida	Arcilloso
1	150	Pulida	-
1	150	Pulida	Arcilloso
1		Pulida	Arcilloso
2	102.5	JRC: 2	

Seudoestratificación: N 76° E 39° NW
Densidad de fracturamiento: 0.83

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



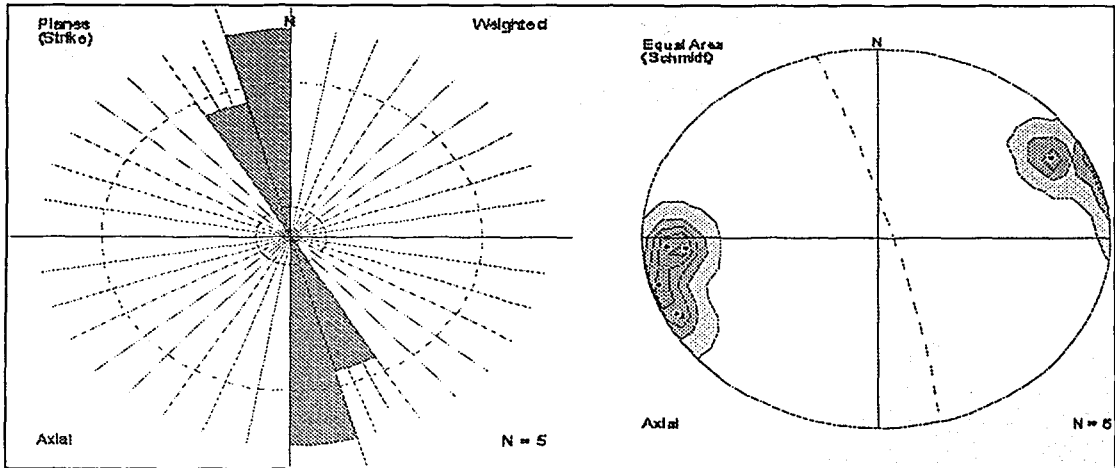
Muestreo de Fracturamiento

Estación 5.	Zona: II	
Coordenadas:	483119	2160128
Método usado:	Círculo	
Radio:	1.5 m	

Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
S 30° E	74° SW	Continua	0.3	50	Pulida	-
S 3° E	79° NE	Continua	1	50	Pulida	-
S 4° E	71° NE	Continua	20	100	Pulida	-
S 25° E	84° NE	Continua	5	50	Pulida	-
S 15° E	86° NE	Continua	4	-	Pulida	Arcilloso
			6	50	JRC:2	

Seudoestratificación: N 70° E 32° NW	
Densidad de fracturamiento:	0.7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



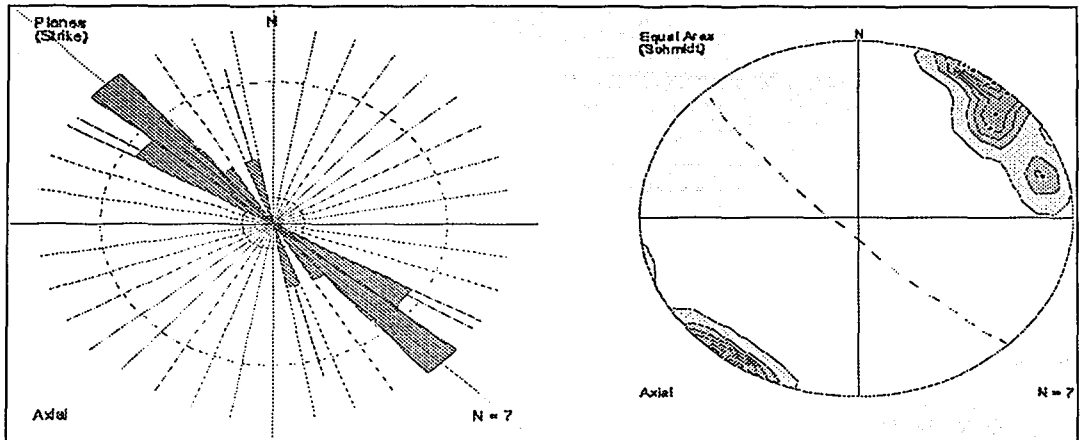
Muestreo de Fracturamiento

Estación 6:	Zona: II	
Coordenadas:	483120	2160129
Método usado:	Cuerda	
Longitud:	6 m	

Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
N 60° W	89° SW	Continua	1	100	Rugosa	Arcilloso
N 57° W	89° SW	Continua	5	80	Rugosa	Arcilloso
N 50° W	89° SW	Continua	0.3	150	Rugosa	-
N 45° W	89° SW	Continua	5	100	Pulida	Arc, vegetación
N 39° W	69° SW	Continua	4	100	Rugosa	Arcilloso
N 15° W	78° SW	Continua	0.2	50	Rugosa	-
N 42° W	76° SW	Continua	0.2	-	Rugosa	-
			2.3	96.6	JRC: 4	

Seudoestratificación:	N 75° E 48° NW
Densidad de fracturamiento:	1.2

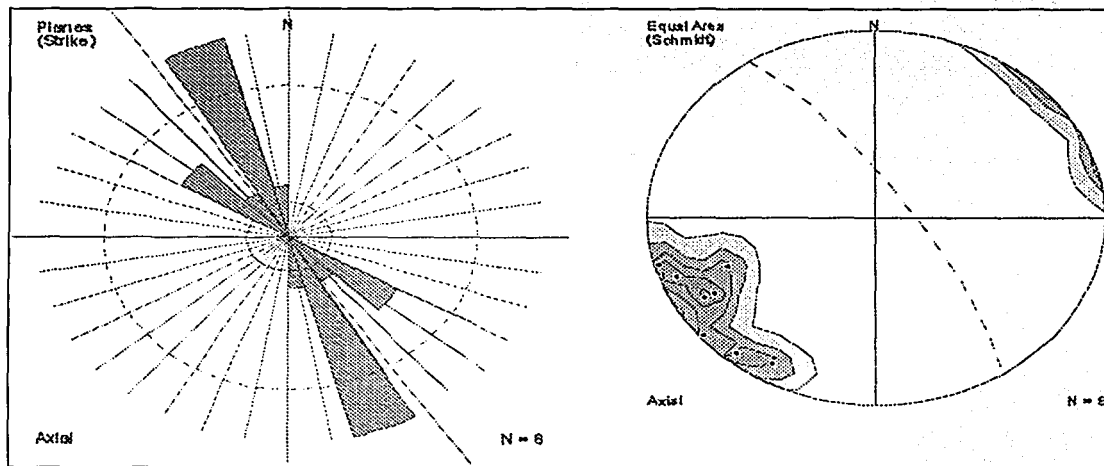
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Muestreo de Fracturamiento

Estación 7.	Zona: II					
Coordenadas:	483150	2160190				
Método usado:	Cuerda					
Longitud:	6 m					
Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
S°15 E	88° NE	Continua	4	70	Rugosa	Arcilloso
S 20° E	82° NE	Continua	1	40	Rugosa	Arcilloso
S 30° E	75° NE	Continua	0.5	130	Rugosa	Arcilloso
S 50° E	84° NE	Continua	1	80	Rugosa	Arcilloso
S 22° E	59° NE	Continua	5	50	Rugosa	Arcilloso
S 30° E	70° NE	Continua	0.1	140	Rugosa	Arcilloso
S 40° E	88° NE	Continua	4	90	Rugosa	Arcilloso
S 60° E	79° NE	Continua	3 - 20	-	Rugosa	Arcilloso
			2.35	85	JRC: 8	

Seudoestratificación: N 54° E 60° SE	
Densidad de fracturamiento:	1.35



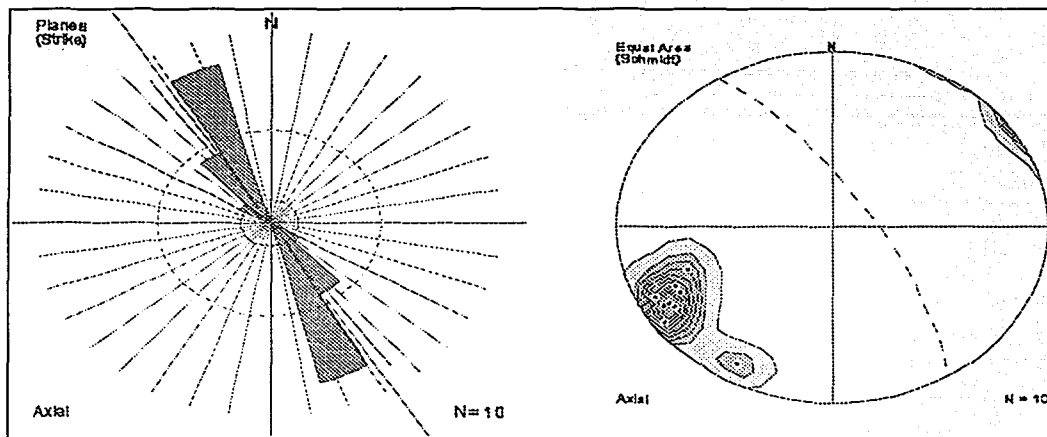
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Muestreo de Fracturamiento

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Estación 8.	Zona: II					
Coordenadas:	483140	2160189				
Método usado:	Círculo					
Radio:	2 m					
Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
S 35° E	84° NE	Continua	5	50	Rugosa	Arcilloso
S 26° E	80° NE	Continua	1	50	Rugosa	Arcilloso
S 60° E	79° NE	Continua	0.5	40	Rugosa	Arcilloso
S 32° E	75° NE	Continua	3	20	Rugosa	Arcilloso
S 30° E	79° NE	Continua	0.2	60	Rugosa	Arc, vegetación
S 30° E	76° NE	Continua	10	50	Rugosa	Arc, vegetación
S 25° E	69° NE	Continua	5	100	Rugosa	Arc, vegetación
S 35° E	84° NE	Continua	1	10	Rugosa	Arcilloso
S 28° E	69° NE	Continua	1	15	Rugosa	Arc, vegetación
S 20° E	61° NE	Continua	1	-	Rugosa	Arcilloso
			2.7	44	JRC: 8	

Seudoestratificación: N 57° E 27° NW	
Densidad de fracturamiento:	0.8



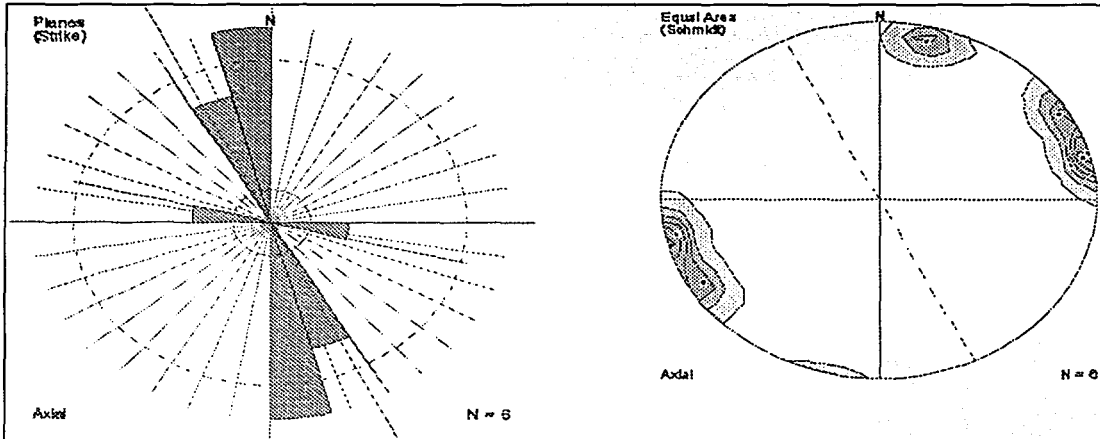
Muestreo de Fracturamiento

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Estación 9.	Zona:	II
Coordenadas:	483189	2160234
Método usado:	Círculo	
Radio:	1 m	

Rumbo	Echado	Extensión	Apertura	Espaciamiento	Superficie	Relleno
S 30° E	85° SW	Continua	1	25	Rugosa	Arcilloso
S 15° E	89° SW	Continua	0.5	20	Rugosa	Arcilloso
S 14° E	86° SW	Continua	0.2	20	Rugosa	Arcilloso
S 76° E	81° SW	Continua	1	25	Rugosa	Arcilloso
S 12° E	84° NE	Continua	3	25	Rugosa	Arcilloso
S 30° E	82° NE	Continua	1	-	Rugosa	Arcilloso
			1.2	23	JRC: 6	

Seudoestratificación: N 20° E 10° NW
Densidad de fracturamiento: 2



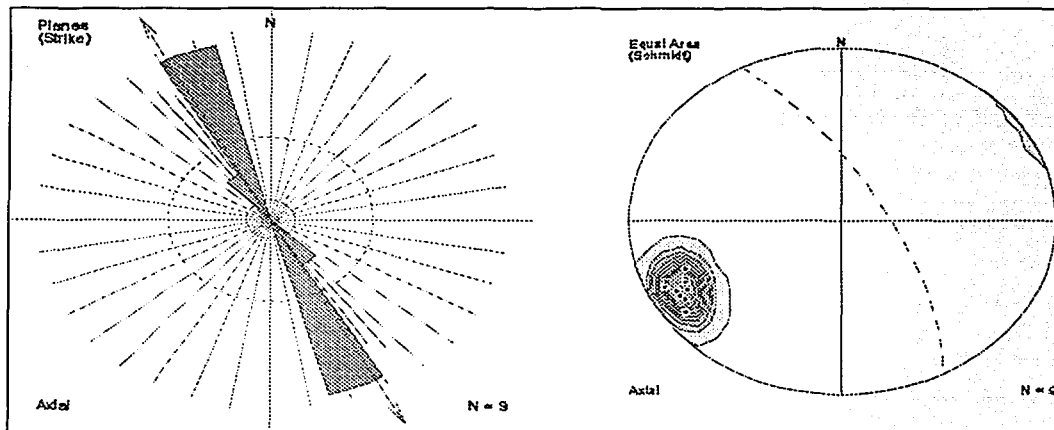
Muestreo de Fracturamiento

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Estación 10.	Zona:	
Coordenadas:	483201	2160152
Método usado:	Círculo	
Radio:	1 m	

Rumbo	Echado	Extensión	Apertura (cm)	Espaciamiento (cm)	Superficie	Relleno
S 32° E	75° NE	Continua	0.3	15	Rugosa	Arc, microbrecha
S 25° E	80° NE	Continua	0.5	10	Rugosa	Arc, microbrecha
S 28° E	76° NE	Continua	0.1	15	Rugosa	Arc, microbrecha
S 36° E	79° NE	Continua	0.1	20	Rugosa	Arc, microbrecha
S 25° E	69° NE	Continua	0.1	10	Rugosa	Arc, microbrecha
S 30° E	76° NE	Continua	0.1	20	Rugosa	Arc, microbrecha
S 29° E	71° NE	Continua	0.1	15	Rugosa	Arc, microbrecha
S 26° E	70° NE	Continua	0.1	15	Rugosa	Arc, microbrecha
S 21° E	67° NE	Continua	0.1	-	Rugosa	Arc, microbrecha
			0.16	13.5	JRC: 4	

Seudoestratificación: N 30° E 22° NW
Densidad de fracturamiento: 2.9



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO B

Ficha para bloques
Z-1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482378		2159934	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
3	2.5	2.5	Cúbicas

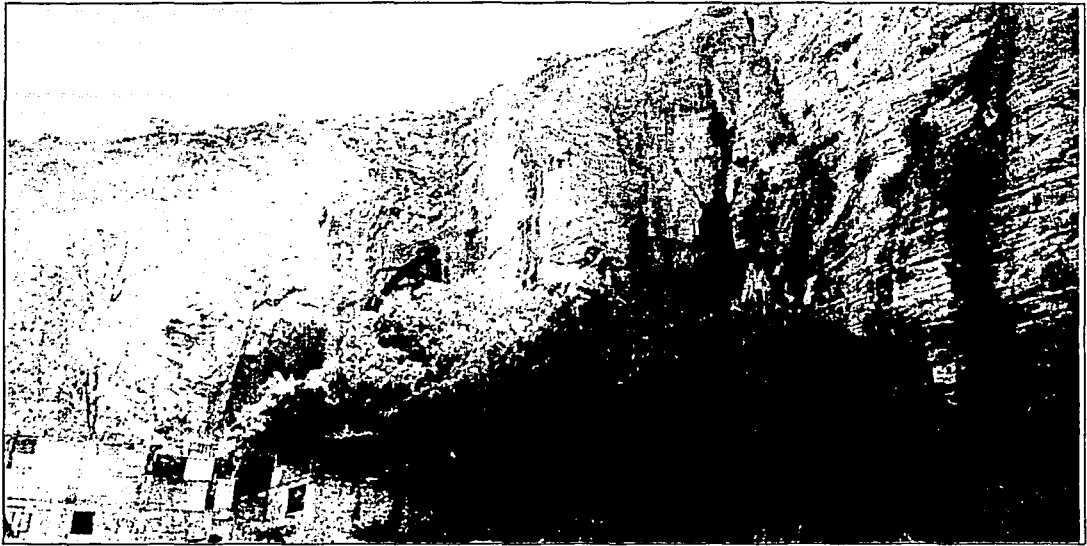
Observaciones: Se aprecia un talud muy imtemperezado (es fácil desprender bloques con la mano) el cual presenta grandes fracturas continuas. Algunas de ellas se cortan perpendicularmente y junto con el plano de seudoestratificación definen bloques en cantiliver los cuales caen por desprendimiento. Esta zona en general presenta cortes en el talud, se tiene un grado avanzado de imtemperezismo, y los bloques que se definen a partir de los tres sistemas de fractura son de gran tamaño. En la foto anexa se aprecia que las viviendas están al pie de un talud vertical que presenta caída y desprendimiento de bloques. Se aprecian problemas de infiltración asociados al fracturamiento.

Mec. Pot. De Falla.

Caída y desprendimiento de rocas



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ficha para bloques
Z-1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482550		2160053	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
0.5	0.5	0.6	Cúbica

Observaciones: Se trata de varios bloques que están en las salientes del talud pero que pueden desprenderse fácilmente.
La cercanía con las casas para este tipo de taludes con bloques pequeños que constantemente se desprenden aumenta el riesgo de que los habitantes sufran un accidente.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



Ficha para bloques
Z-1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

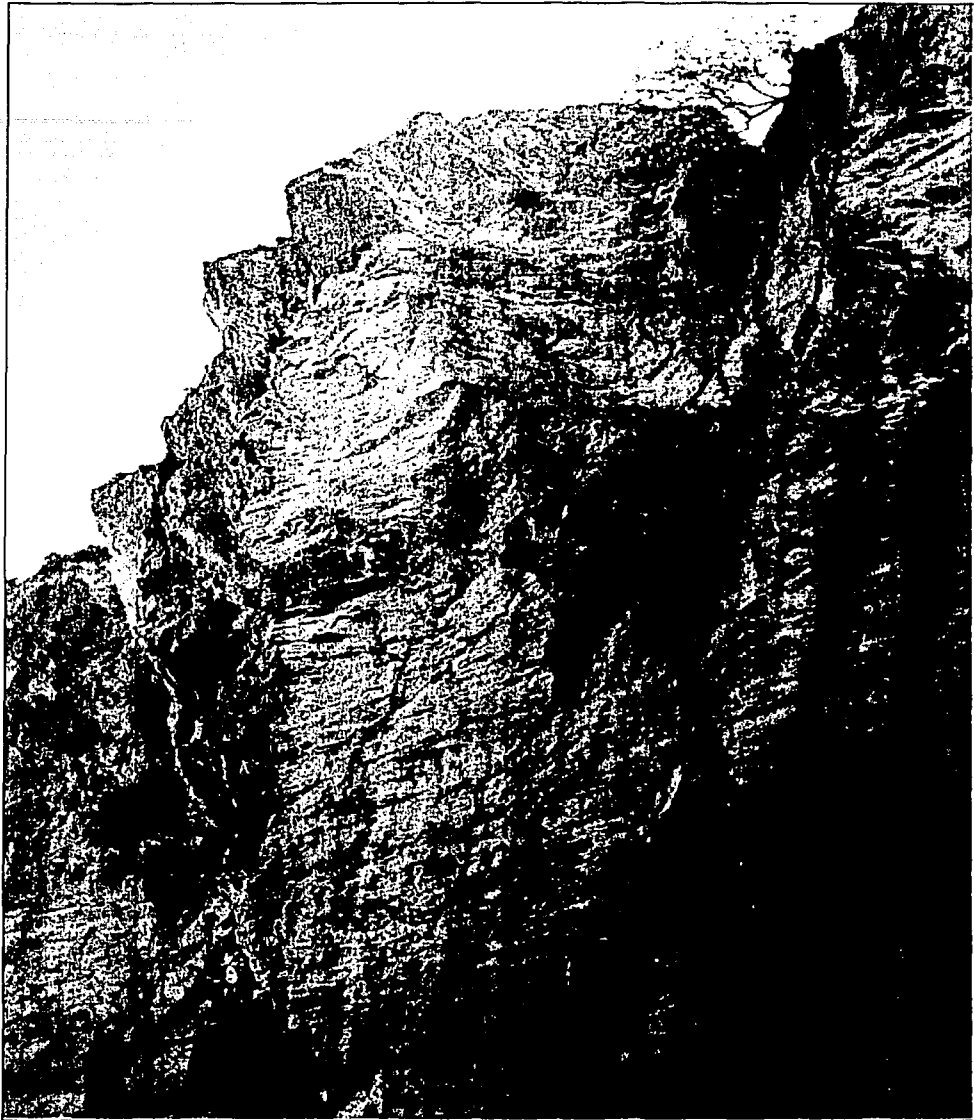
Coordenadas en UTM			
482378		2159934	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
4	3	7	Cónica

Observaciones: Este talud presenta una situación crítica. La fractura que delimita al macizo potencialmente inestable se acuña hacia abajo; la apertura en la parte superior es de 20-25 cm mientras que en la parte inferior es de apenas unos milímetros. En algún momento la fractura tenía la misma apertura en toda su extensión pero al saturarse de agua se generó un empuje hidrostático que relajó al macizo rocoso llevándolo a esa posición de "equilibrio". Ahora es difícil que se sature la fractura pero el escurrimiento que erosiona las paredes de la fractura y le disminuye la resistencia así como el empuje sísmico son factores que ocasionarían la falla del talud.
El peligro geotécnico es muy alto pero no existen viviendas al pie del talud. Se recomienda evitar la construcción al pie y en la corona del talud.

Mec. Pot. De Falla.
Volteo



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ficha para bloques

Z-1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482550		2160053	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
0.8	0.6	1	Irregular

Observaciones: Se aprecia un pequeño bloque en la saliente del talud que está arriba de la casa y que podría caer ya sea por empujes hidrostáticos o sísmicos. Se aprecia que los bloques se desprenden a través de los planos de pseudostratificación, dejando a los bloques superiores en cantiliver. Se ha hecho reposición de roca por medio de un muro de mampostería que sirve de apoyo a una parte de los bloques del talud. En la corona de este talud existen bloques y una saliente con una fractura a favor del deslizamiento.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ficha para bloques
Z-1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482550		2160015	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
3	1	8	Tabular

Observaciones: Talud vertical con sobrecarga de casas en la parte superior, muy cercanas al plano de fractura que se aprecia en la foto. El material de la parte superior se desprende continuamente, variando el tamaño de arena a gravas. Detrás del bloque tabular delimitado por la fractura existe material brechado. El plano de pseudostratificación (N 35° W 19° NE) sirve como plano de desprendimiento, lo que deja a algunos bloques en cantiliver.

Mec. Pot. De Falla.

Deslizamiento



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483267		2160406	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2.8	2	3	Tabulares

Observaciones: Conjunto de bloques tabulares, intemperizados, seudoestratificados.
Las aperturas entre bloques llegan a ser de más de 50 cm.
Existe relleno arcilloso y vegetación en la parte trasera del conjunto.
Los bloques se encuentran sobrepuestos y apoyados entre sí semejando losas y columnas.
Si la base se inestabiliza todo el conjunto también, provocando un derrumbe de rocas.
Aquí un sismo es un factor importante de inestabilidad.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas.



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483282		2160408	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
3	2	6	Tab, subred.

Observaciones: Se trata de un conjunto de bloques de diferentes formas y tamaños los cuales se encuentran apoyados uno sobre otro, recostados contra el talud. Los bloques están fractutados, intemperizados, existe algo de vegetación creciendo entre las fracturas. A la izquierda de la fotografía se aprecia una zona en que se reduce la superficie de apoyo a unos 30 cm, y que está formada por trozos de roca. Dichos trozos están intemperizados, no presentan ninguna unión entre sí y las raíces crecen entre las fracturas. Si se inestabiliza esta parte de la estructura columnar rocosa todo el conjunto también. El conjunto puede presentar movimientos de cabeceo lateral ante empujes sísmicos lo que ocasionaría la inestabilidad.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483061		2160101	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
3	2	3.5	Tabular

Observaciones: Conjunto de grandes bloques tabulares con aristas redondeadas, intemperizados, erosionados, presentan seudoestratificación.
Las aperturas entre los bloques son de más de 20 cm, rellenas de arcilla y vegetación; existen raíces creciendo entre las fracturas.
Debido al pequeño cambio de la seudoestratificación se aprecia que los bloques ya han presentado algún movimiento. En caso de que se produzca la falla los bloques podrían fragmentarse a través de los planos de seudoestratificación. Pueden presentar movimientos de cabeceo lateral.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas.



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483182		2160209	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2.5	1	1.5	Tabular

Observaciones: Se trata de un par de bloques sobrepuestos y apoyados sobre roca. Se encuentran intemperizados, y pseudoestratificados. Están ubicados en una zona de fuerte pendiente (45° - 70°). Se aprecia que el bloque de arriba (cuyas medidas se dan) descansa parte de su peso en el bloque de abajo aumentando la resistencia en la fractura, pero la otra componente del peso está en la dirección del deslizamiento. La ondulación que tiene la fractura en que descansan ambos bloques ocasiona una trabazón con el macizo que sirve de apoyo.

Mec. Pot. De Falla.

Deslizamiento de rocas



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483241		2160253	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
-	-	-	Tabulares

Observaciones: Zona en la cual existen fracturas casi verticales, algunas de ellas se acuñan, y que delimitan bloques tabulares de hasta 3 metros de alto.
También se encuentran algunos bloques subredondeados de varios tamaños.
En la parte superior existen raíces de arbustos y que crecen a través de las fracturas.
Los abundantes depósitos de talud muestran el continuo proceso de disgregación que afecta al macizo rocoso. Aquí el peligro geotécnico es alto.

Mec. Pot. De Falla.

Volteo de rocas



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483241		2160253	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
1.5	1	2.5	Tabular

Observaciones: Conjunto de bloques tabulares, pseudoestratificados, fracturados, que están recargados uno detrás de otro formando una estructura tipo dominó.

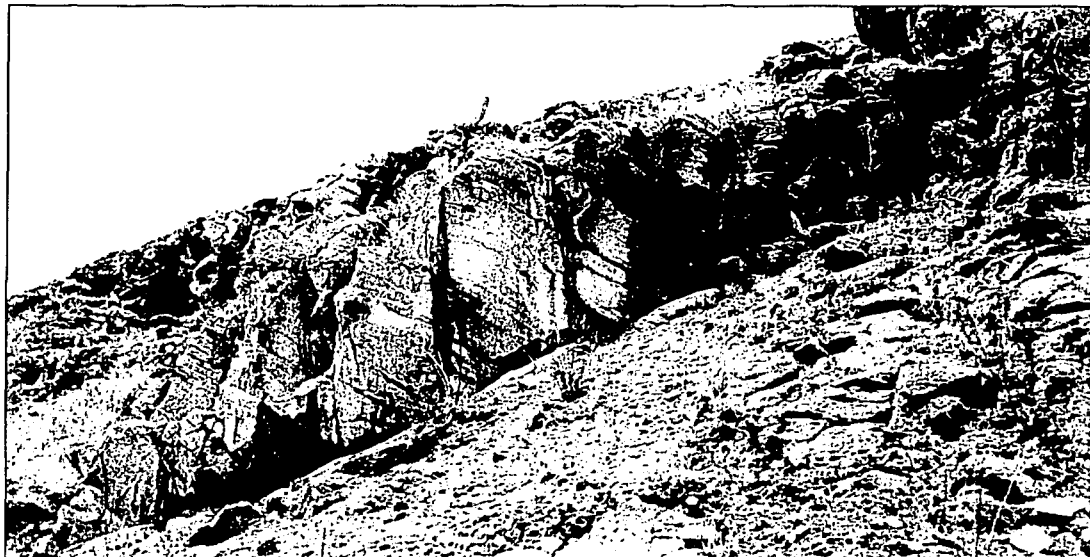
Se aprecia un basculamiento de unos cuantos grados con respecto al valor de pseudoestratificación del piso lo que es señal de que pudo tratarse de un antiguo deslizamiento.

La estabilidad del conjunto depende de unos cuantos bloques del frente pero como se aprecia en la foto anexa existe un trozo de roca que sirve como cuña y es el que genera la trabazón entre los bloques.

Aparte de que puede fallar el frente de la estructura los bloques pueden presentar movimientos de cabeceo. Abajo se tienen fuertes pendientes y el fracturamiento de los bloques puede disgregarlos en caso de que se presente la falla.

Mec. Pot. De Falla.

Volteo de rocas





Ficha para bloques
Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483175		2160153	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2.5	2	5	Tabular

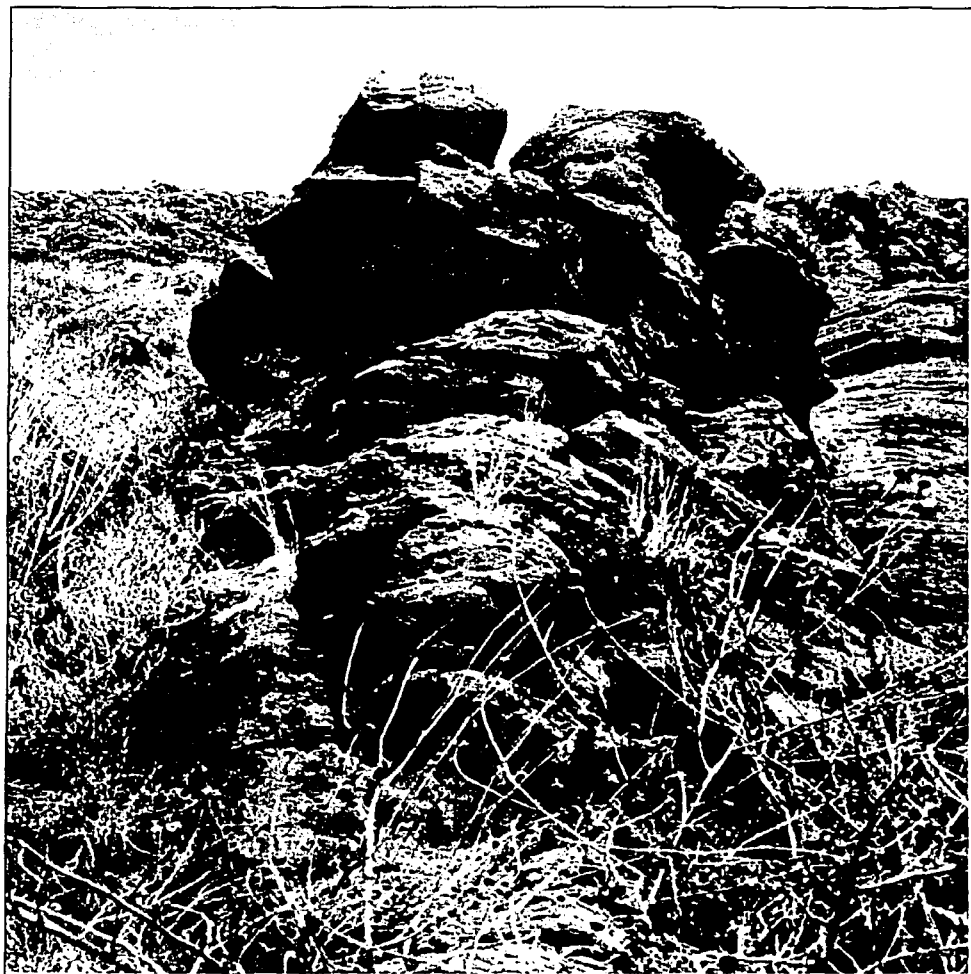
Observaciones: Se trata de un conjunto de bloques fracturados, intemperizados, apoyados sobre bloques más pequeños de los cuales depende la estabilidad del conjunto. Los bloques están recargados contra el talud pero pueden presentar movimientos de cabeceo.
A unos metros se encuentran las viviendas.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas.



TESIS CON
PALA



Ficha para bloques
Z-2

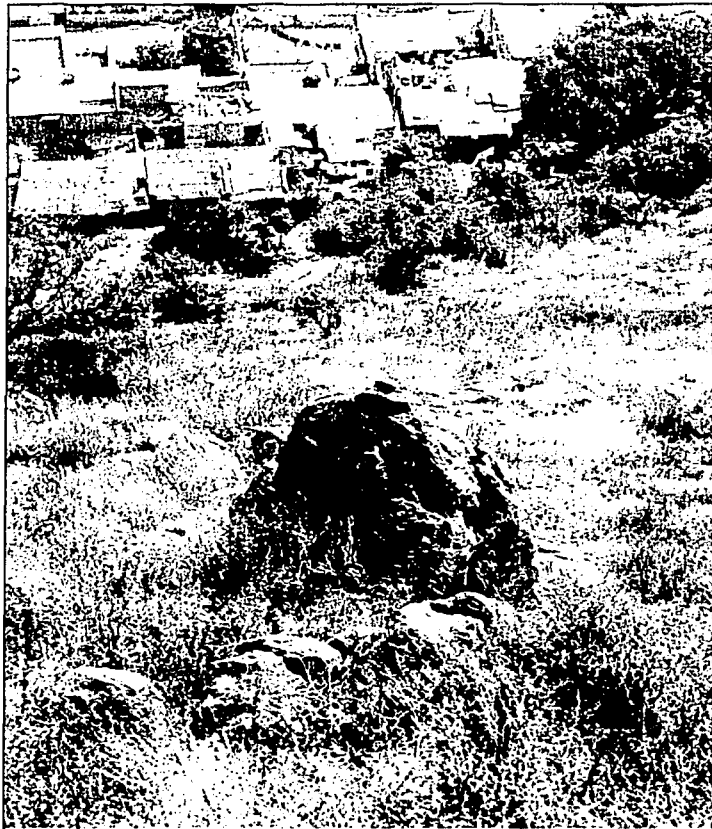
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483152		2160162	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
1.2	0.6	1.2	Tabular

Observaciones: Conjunto de bloques intemperizados, fracturados, seudoestratificados.
Se encuentran en una zona con pendientes de 35-40°. Se aprecia que al pie de la ladera las viviendas tienen techos de lámina siendo muy vulnerables ante el rodamiento de los bloques.
Fuertes precipitaciones y sismos pueden activar el rodamiento de las rocas.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



Ficha para bloques
Z-2

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Coordenadas en UTM			
483068		2160114	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
1.2	0.8	1.5	Redondeada

Observaciones: Conjunto de bloques intemperizados, seudoestratificados, con abundante vegetación creciendo en las fracturas y entre los bloques.
La forma de los bloques, sus condiciones de apoyo, la pendiente, la cercanía de las viviendas son factores importantes que aumentan el riesgo.
La base es una cobertura de suelo por lo que es fácilmente erosionable. Una precipitación intensa o un sismo son factores importantes que detonarían el rodamiento de los bloques.

Mec. Pot. De Falla.
Caída de rocas



Ficha para bloques
Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483150		2160137	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
1.3	1	1	Subredondeada

Observaciones: Bloque intemperizado, pseudoestratificado, se encuentra en una zona de fuerte pendiente.
La forma redondeada del bloque puede llevarlo mas lejos pendiente abajo en caso de rodar por lo que el peligro de este tipo de bloques es alto.
Las casas que se encuentran al pie de este talud están construidas con techos de lámina lo que las hace más vulnerables.

Mec. Pot. De Falla.

Caida de rocas



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483091		2160052	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2.5	2	4	Tabular

Observaciones: Se trata de un conjunto de bloques interperizados, con vegetación creciendo entre las fracturas, presentan pseudoestratificación. Los bloques se encuentran fracturados y acuñados entre sí. El conjunto descansa sobre bloques más pequeños ($0.5 \times 0.3 \times 0.4 \text{ m}^3$) los cuales están hacinados en la base; se aprecia el crecimiento de raíces en la base del conjunto. Estos bloques pueden falla por cabeceo hacia la parte libre, o bien por pérdida de apoyo en el frente lo que propiciaría la inestabilidad del conjunto.

Mec. Pot. De Falla.

Deslizamiento y caída de rocas.



Ficha para bloques
Z-2

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Coordenadas en UTM			
483120		2160128	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2.3	1.8	1.5	Subredondeada

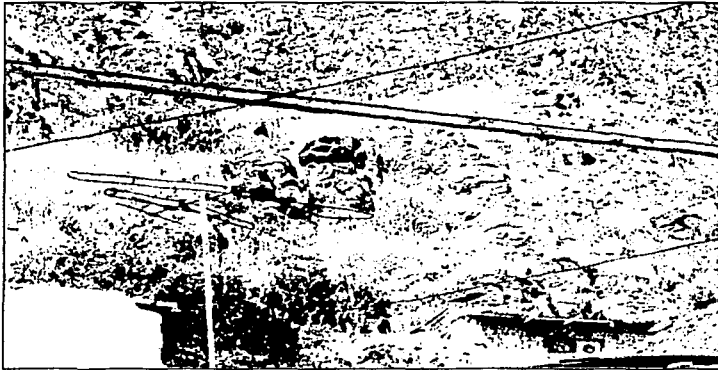
Observaciones: Se observa un bloque fracturado, intemperizado, que está apoyado en una superficie que buza hacia dentro del talud. A los lados el bloque no cuenta con ningún apoyo por lo que se pueden presentar movimientos de cabeceo ante la presencia de empujes sísmicos.

Se puede apreciar el fracturamiento sistemático casi vertical que existe en esta zona.

Los planos de pseudostratificación sirven como planos de debilidad dejando en ocasiones algunos bloques en cantiliver, como sucede con el bloque que está junto a la persona de la fotografía.

El riesgo aquí es alto dada la pendiente, que llega a alcanzar valores de 70°, el intenso fracturamiento, la condición potencialmente inestable de varios bloques y la cercanía de las casas -algunas con techos de lámina lo que hace más vulnerable la condición en que viven las personas-.

Mec. Pot. De Falla.
Caída de rocas



Ficha para bloques
Z-2

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Coordenadas en UTM			
483100		2159940	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
0.4	0.3	0.4	Irregular

Observaciones: Se trata de dos trozos de roca , intemperizados, pseudoestratificados.
Es zona de escurrimiento y hay vegetación creciendo entre las fracturas.
Las rocas han perdido su apoyo y se encuentran en cantiliver; están fracturados en la parte trasera y están unidas al talud por pequeños puentes de roca, por la cohesión y la rugosidad de la fractura. Aunque el tamaño de los bloques es pequeño (en comparación con los de otras zonas) el riesgo se incrementa dada la ubicación de las viviendas al pie del talud rocoso.

Mec. Pot. De Falla.

Caída y desprendimiento de rocas



Ficha para bloques
Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483100		2159950	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
1.5	0.4	3	Tabular

Observaciones: Bloque alargado, redondeado en el frente, intemperizado, pseudoestratificado. Hay vegetación creciendo entre las fracturas.
El bloque presenta una fractura con echado de 45° la cual sirve como plano potencial de deslizamiento. La fractura tiene 3 cm de apertura.
El agua en las fracturas ocasiona un empuje hidrostático desfavorable.
Abajo a la izquierda se aprecia el detalle de un bloque que descansa sobre un muro de mampostería.
El área de afectación abarca a la vivienda que está al pie de este talud.

Mec. Pot. De Falla.

Deslizamiento de bloques



Ficha para bloques

Z-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483100		2160100	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
0.7	0.5	0.6	Subredondeada

Observaciones: Roca intemperizada, masiva, presenta seudoestratificación y en general pocas fracturas.
Por su forma presenta el riesgo de rodar en esta zona que tiene pendientes de 40-50°.
Una precipitación considerable puede provocar el rodamiento de la roca.

Mec. Pot. De Falla.

Caida de rocas.



Ficha para bloques
Z-3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483320		2160463	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
1.5	1.5	1.5	Subredondeado

Observaciones: Bloque fracturado, pseudoestratificado, intemperizado. Descansa sobre una superficie a favor del deslizamiento. En caso de rodar el bloque podría disgregarse.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



Ficha para bloques
Z-3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483321		2160412	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
-	-	-	Cúbica, tab, subr

Observaciones: Zona de bloques intemperizados, seudoestratificados, fracturados, con vegetación creciendo entre las fracturas. Al pie existe una terraza con una pendiente muy suave por lo que no hay mucho peligro de que rueden los bloques en caso de caer, pero la erosión progresiva y el arrastre los van acercando a zonas donde el cambio de pendiente puede propiciar el rodamiento de los bloques.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



Ficha para bloques
Z-3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
483100		2160618	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
0.7	0.6	0.7	Subredond.

Observaciones: Se trata de un conjunto de rocas, subredondeadas, intemperizadas.
Están en una zona con pendientes de 20°-30°.
Estos bloques pueden rodar en caso de que se erosione su base o ante un empuje sísmico.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas.



Ficha para bloques

Z-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482711		2160369	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
-	-	-	-

Observaciones: Talud casi vertical, intemperizado, con vegetación creciendo entre las fracturas.
Se aprecian algunos bloques a punto de desprenderse así como algunos bloques que pueden deslizar.
La construcción que se ve en la foto es una escuela por lo que es común que haya niños a los alrededores. No hay señalizaciones ni obras de mitigación.

Mec. Pot. De Falla.

Caída y deslizamiento de rocas



Ficha para bloques

Z-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
-			
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2	1.5	4	Tabular

Observaciones: Se trata de un bloque fracturado, intemperizado, con escasa vegetación.
Es atravesado por una fractura con echado de 50° , y aberturas de 30 cm.
La rugosidad que presenta en la discontinuidad contribuye a aumentar la resistencia al corte.

Mec. Pot. De Falla.

Deslizamiento y caída de rocas.



Ficha para bloques
Z-4

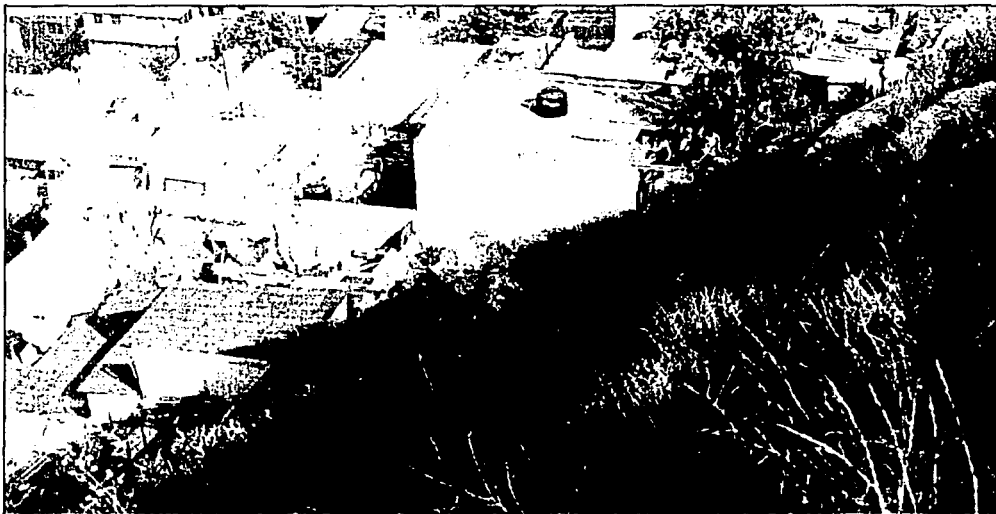
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482920		2160553	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2	1.5	1.8	Subredondeada

Observaciones: Bloque intemperizado, fracturado, se encuentra apoyado sobre trozos de roca más pequeños, potencialmente inestables. A escasos metros están las viviendas, algunas con techos de lámina lo que hace más vulnerable la condición de las personas que las habitan.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



Ficha para bloques

Z-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482773		2160320	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
-	-	-	-

Observaciones: Se trata de un talud rocoso fracturado, intemperizado, presenta pseudoestratificación, con vegetación creciendo entre las fracturas.
En la foto anexa se aprecia un detalle del talud rocoso.
Los bloques están delimitados por los planos de pseudoestratificación y por un fracturamiento vertical.
Las fracturas tienen aperturas de hasta 3 cm.
Un sismo o la saturación de las fracturas con el consecuente empuje hidrostático son factores que provocarían la falla.

Mec. Pot. De Falla.

Caída y deslizamiento de rocas.





TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ficha para bloques

Z-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482800		2160387	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
0.6	0.5	0.6	Subredon.

Observaciones: Se trata de pequeños trozos de roca. subredondeados e irregulares, en una zona de fuerte pendiente. Los bloques están pseudoestratificados e intemperizados. Es zona de escurrimiento y hay abundante vegetación.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas



Ficha para bloques

Z-4

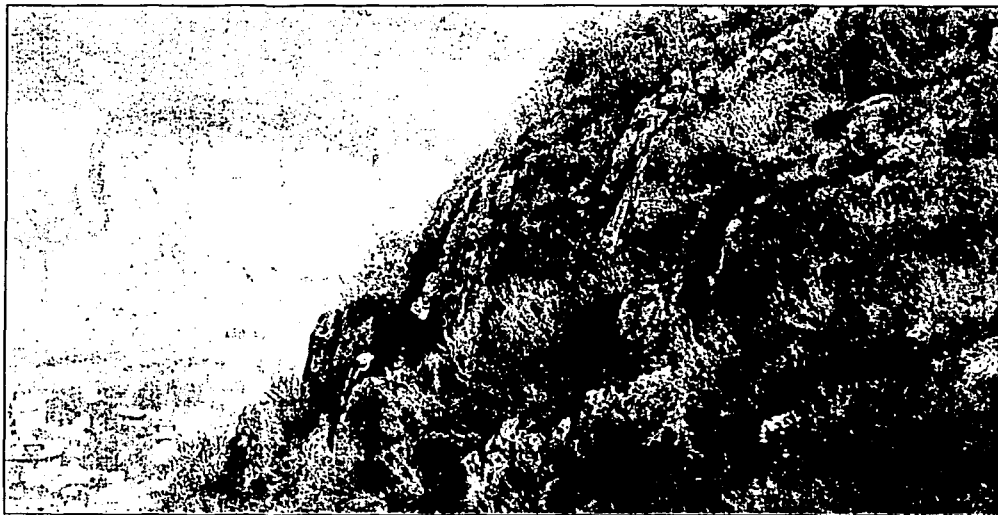
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482930		2160530	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2	1	3.5	Tabular

Observaciones: Se trata de varios bloques de forma tabular, en una zona de fuerte pendiente. Presentan seudoestratificación, intemperismo y un patrón de fracturamiento casi vertical. En un bloque de abajo se aprecia una fractura casi vertical y acunada, con una separación de 5 cm en la parte superior y de unos cuantos milímetros en la parte inferior. Esto quizá se haya debido al empuje hidrostático en el momento de saturación de la fractura lo que ocasionó el relajamiento del bloque hasta alcanzar esa condición.

Mec. Pot. De Falla.

Volteo de rocas



Ficha para bloques

Z-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482730		2160250	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
1.6	0.4	1.5	Tabular

Observaciones: Bloque tabular, intemperizado, seudoestratificado.

Descansa sobre roca y suelo arcilloso pero una parte del bloque se encuentra sin apoyo.

El centro de masa del bloque cae dentro de la superficie de apoyo, pero se aprecia que la base se ha ido erosionando. Este bloque falló por volteo pero no inició su rodamiento puesto que se apoyó sobre una cara; con el tiempo se ha ido redondeando y la base de apoyo es cada vez menor, lo que puede propiciar un segundo proceso de falla que sería el de erosión y rodamiento.

El terreno presenta pendientes de 30°.

Mec. Pot. De Falla.

Caida de rocas



Ficha para bloques

Z-4

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Coordenadas en UTM			
482720	2160222		
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
4	3	2	Tabular

Observaciones: Bloque tabular, en algunas partes redondeado, intemperizado, presenta pseudoestratificación. Se encuentra apoyado en una zona con pendientes de 30°. Dada la forma y el peso del bloque, se encuentra bien apoyado aunque la base puede erosionarse con una fuerte precipitación y el bloque podría perder apoyo. Aun cuando es tabular el rodamiento se produce en la longitud más corta, lo que aumenta su alcance horizontal de trayectoria.

Mec. Pot. De Falla.	
Caída de rocas	



Ficha para bloques

Z-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482930		2160480	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
2.2	1.8	3	Tabular

Observaciones: Se trata de un bloque intemperizado, fracturado y pseudoestratificado. Se encuentra apoyado sobre roca. Tiene fracturas con separaciones hasta de 30 cm. La fractura vertical que lo delimita tiene un echado de 80° , por lo que se encuentra ligeramente recostado en el macizo de atrás; además, la componente del peso cae sobre la base. De cualquier modo la rápida erosión de la base y su pérdida de resistencia, así como el empuje sísmico son factores que pueden provocar la falla por volteo en esta zona de fuerte pendiente.

Mec. Pot. De Falla.

Volteo de rocas



Ficha para bloques

Z-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Coordenadas en UTM			
482800		2160370	
Dimensiones (m)			
Largo	Ancho	Altura	Forma
0.6	0.5	0.6	Redondeada

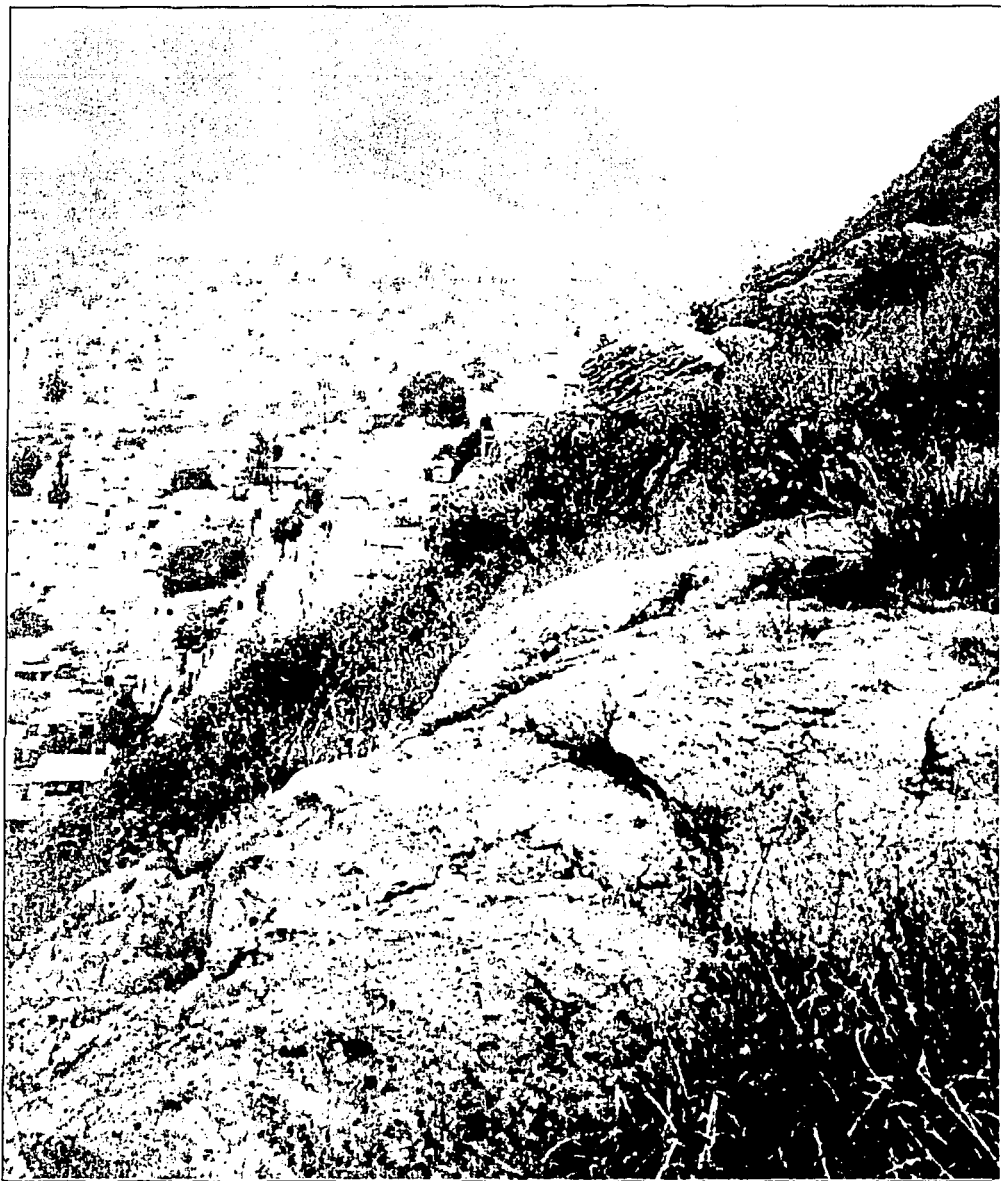
Observaciones: Roca intemperizada, masiva, presenta seudoestratificación y en general pocas fracturas. Por su forma presenta el riesgo de rodar en esta zona que tiene pendientes mayores a 40°. Una precipitación considerable o un sismo pueden provocar el rodamiento de la roca. La foto anexa muestra un aspecto de la trayectoria que seguiría el bloque en caso de rodar.

Mec. Pot. De Falla.

Caída de rocas

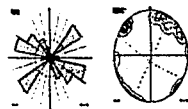
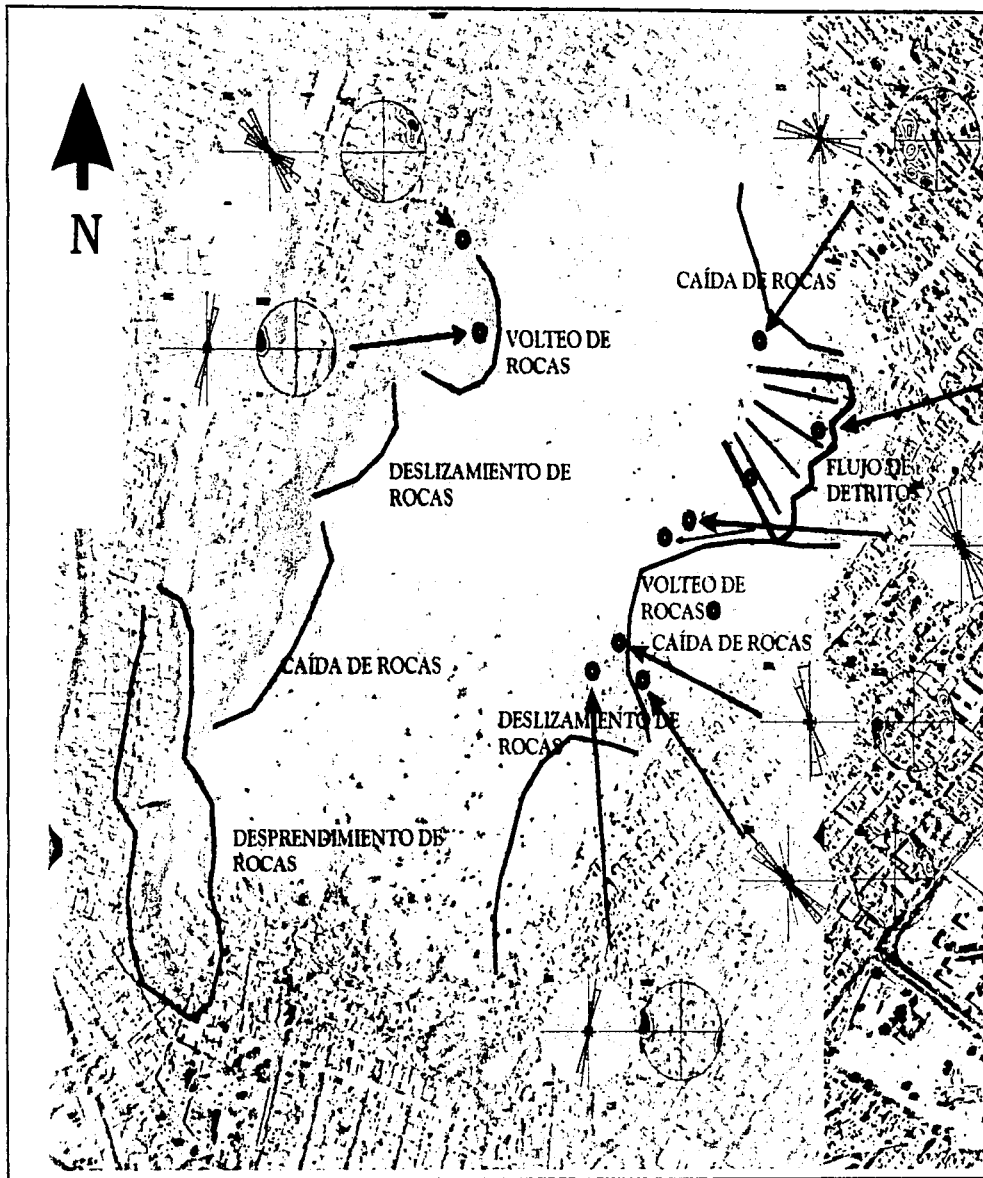


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



ANEXO C

PELIGROS
GEOTÉCNICOS
ASOCIADOS AL
FRACTURAMIENTO
CERRO
"EL TENAYO".



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

U N A M
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL
"ESTUDIO DE ESTABILIDAD
DE TALUDES Y EVALUACIÓN
DEL RIESGO GEOTÉCNICO
EN EL CERRO DEL TENAYO,
EDO. DE MÉXICO."

FIG. ELABORÓ:
VÍCTOR CARLOS VALERIO.



ZONA IV

ZONA III

ZONA II

ZONA I

MAPA DE
ZONIFICACIÓN
DE RIESGO
GEOTÉCNICO.
CERRO
"EL TENAYO".

NIVEL DE RIESGO



ZONA DE ALTO RIESGO



ZONA DE MEDIANO
RIESGO



ZONA DE BAJO RIESGO

U N A M
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL
"ESTUDIO DE ESTABILIDAD
DE TALUDES Y EVALUACIÓN
DEL RIESGO GEOTÉCNICO
EN EL CERRO DEL TENAYO,
EDO. DE MÉXICO."

ELABORÓ:
VÍCTOR CARLOS VALERIO.
CON APOYO DEL SERVICIO
GEOLÓGICO METROPOLITANO.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN