

I NFORMES

TÉCNICOS

MONITOREO DE LADERAS CON FINES DE EVALUACIÓN Y ALERTAMIENTO

Manuel J. Mendoza López
Leobardo Domínguez Morales
Ignacio Noriega Rioja
Enrique Guevara Ortiz

COORDINACIÓN
DE
INVESTIGACIÓN

Área de Ingeniería Estructural
y Geotecnia



CENAPRED
MÉXICO

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Miguel Ángel Osorio Chong
SECRETARIO DE GOBERNACIÓN

Luis Felipe Puente Espinosa
COORDINADOR NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL

Dr. Carlos M. Valdés González
DIRECTOR GENERAL DEL
CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

1ª edición, diciembre 2002
CI/IEG-15122002
Versión Electrónica 2014

© SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
Abraham González No. 48,
Col. Juárez, Del. Cuauhtémoc,
C. P. 06699, México, D. F.

© CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES
Av. Delfín Madrigal No. 665,
Col. Pedregal de Santo Domingo,
Del. Coyoacán, C. P. 04360, México, D. F.
Teléfonos:
(55) 54 24 61 00
(55) 56 06 98 37
Fax: (55) 56 06 16 08
e-mail: editor@cenapred.unam.mx
www.cenapred.gob.mx

Esta publicación forma parte de la Estrategia Nacional para la Mitigación del riesgo por Inestabilidad de Laderas MILADERA, en la que participan el CENAPRED, los Institutos de Geografía e Ingeniería de la UNAM, la Secretaría de comunicaciones y Transportes y el Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE).

© Autores:
Manuel J. Mendoza López, Leobardo Domínguez Morales,
Ignacio Noriega Rioja y Enrique Guevara Ortíz.

Revisores:
Sergio M. Alcocer Martínez de Castro, Esteban Ambriz Reyes,
Daniel Bitrán Bitrán, César Morquecho Zamarripa, Carlos
Gutiérrez Martínez y Carlos Reyes Salinas.

Edición:
Violeta Ramos Radilla

Portada:
D.G. Demetrio Vázquez y Susana González

ISBN: 970-628-632-2

Derechos reservados conforme a la ley
IMPRESO EN MÉXICO. PRINTED IN MEXICO

Distribución Nacional e Internacional:
Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

MONITOREO DE LADERAS CON FINES
DE EVALUACIÓN Y ALERTAMIENTO

Manuel J. Mendoza López

Leobardo Domínguez Morales

Ignacio Noriega Rioja

Enrique Guevara Ortiz

Coordinación de Investigación

Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia

CONTENIDO

RESUMEN	5
I INTRODUCCIÓN	7
1.1 Sobre la inestabilidad de laderas	7
1.2 Alcance y objetivos.....	8
II BREVE DESCRIPCIÓN DEL TIPO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS INESTABILIDADES EN LADERAS	9
2.1 Los tres tipos básicos de deslizamientos	9
2.2 Otros procesos de inestabilidad	10
2.3 Rasgos geológicos y geomorfológicos que propician inestabilidades	10
III FACTORES DESENCADENANTES DE INESTABILIDAD EN LADERAS DE INESTABILIDAD DE LADERAS	13
3.1 ¿Por qué ocurren los deslizamientos?	13
3.2 Lluvias intensas y prolongadas	13
3.2.1 Mecanismo de falla por lluvias.....	13
3.2.2 Condiciones hidrometeorológicas que provocaron una falla: El Caso de Teziutlán	15
3.2.3 Relación entre la inestabilidad de laderas y la intensidad de lluvia.....	17
3.3 Sismos intensos	19
3.4 Actividad volcánica	22
3.5 Acciones humanas	22
IV INSTRUMENTACIÓN ORIENTADA A REGISTRAR EFECTOS Y/O CAUSAS DE INESTABILIDAD DE LADERAS	23
4.1 Sobre la necesidad del monitoreo e inspección.....	23
4.2 Enfoque fenomenológico y enfoque explicativo.....	23
4.3 Requerimientos de una instrumentación geotécnica.....	23
V MONITOREO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASAS INESTABLES	25
5.1 Mediciones topográficas	25
5.2 Monitoreo del agrietamiento superficial.....	27
5.2.1 Uso de cinta y nivel	27
5.2.2 Uso de regletas deslizantes.....	29
5.2.3 Uso de dispositivos basados en alambres y poleas	29
5.2.4 Uso de dispositivos eléctricos y mecánicos.....	30
5.3 Monitoreo de los desplazamientos a profundidad.....	32
5.3.1 Inclinómetro	32
5.3.2 Dispositivo TDR de reflectometría	34
5.4 Control y evaluación del monitoreo de los desplazamientos.....	36
VI MEDICIONES PLUVIOMÉTRICAS Y PIEZOMÉTRICAS	37
6.1 Principios de la pluviometría	37
6.1.1 Aparatos de medición.....	37
6.2 Guías para eventualmente construir un pluviómetro.....	38

6.2.1	Medidor hecho con una botella de refresco	38
6.2.2	Medidor de vaso con soporte.....	39
6.3	Monitoreo de pluviómetros y posible automatización.....	39
6.3.1	Pluviógrafo RRG-1	40
6.3.2	Pluviógrafo RGR-122	40
6.3.3	Descripción de una estación pluviométrica del CENAPRED	41
6.3.4	Análisis de los registros de lluvias	43
6.4	Monitoreo de la presión del agua en el subsuelo.....	46
6.4.1	Sensores de succión	46
6.4.2	Piezómetros	49
6.5	Aplicaciones de mediciones de presión del agua y de precipitación	51
VII	ACELERÓMETROS Y FUENTES DE INFORMACIÓN SÍSMICA.....	55
7.1	Inestabilidad de laderas disparadas por sismos	55
7.2	La Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes	55
7.2.1	Base Mexicana de sismos fuertes	55
7.2.2	Comité directivo	56
7.2.3	Archivo estándar de aceleración.....	56
7.2.4	Estructura del sistema de acelerogramas en disco compacto	56
7.3	Disponibilidad del sistema	57
VIII	SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE MONITOREO Y ALERTAMIENTO.....	59
8.1	Técnicas de monitoreo	59
8.2	Sistemas automáticos de monitoreo	61
8.2.1	Sistema semiautomático	61
8.2.2	Sistema totalmente automático.....	61
8.3	Panel de expertos o un sistema experto inteligente, con fines de alertamiento.....	65
8.4	Otros tipos de sensores orientados a la automatización.....	67
IX	OBSERVACIONES FINALES.....	69
	ANEXO. SISTEMAS DE DETECCIÓN DE FLUJOS O AVALANCHAS DE DETRITOS EN	
	VOLCANES	71
	REFERENCIAS	77

RESUMEN

Los deslizamientos de laderas cobran vidas y propiedades en México, y en prácticamente todos los países del mundo. El monitoreo de laderas puede detectar manifestaciones tempranas de inestabilidad, con lo que es posible reducir los desastres asociados a la inestabilidad de esas laderas, esta es una de las funciones esenciales de la Protección Civil. Son tres fuentes naturales principales que pueden disparar un deslizamiento; éstas son las lluvias intensas, los sismos fuertes y los eventos volcánicos. La mitigación de los efectos de los deslizamientos se logra en gran medida si se miden las variables que causan las inestabilidades, tales como la precipitación y la presión en el agua del subsuelo; o bien, las manifestaciones francas de la inestabilidad, tales como los agrietamientos, desplazamientos y otros efectos. En este documento se presentan y describen esas técnicas de medición, revisando así mismo, los criterios que definen la potencialidad a la inestabilidad de una ladera, en función de esas variables medidas, tanto internas como externas al talud natural.

La tecnología actual nos proporciona sistemas de monitoreo en tiempo real para reducir el riesgo de deslizamientos activos; con ellos pueden detectarse indicaciones tempranas de movimiento rápido, que sería el que podría causar los desastres mayores. El monitoreo minuto a minuto o en tiempo real, permite generar una señal inmediata de alertamiento acerca de la actividad de un deslizamiento, potencialmente con ello salvando vidas y pertenencias. La descripción y posibilidades de estos sistemas de alertamiento son también expuestos en este documento. La información continua de sistemas de monitoreo en tiempo real también proporciona, por una parte, una mejor comprensión del comportamiento de los deslizamientos de laderas, permitiendo a los ingenieros establecer los umbrales de las variables internas y externas a partir de los cuales se producen las inestabilidades; y por la otra, crear diseños más efectivos para detener el movimiento de laderas.

I INTRODUCCIÓN

1.1 SOBRE LA INESTABILIDAD DE LADERAS

Los eventos naturales son inevitables; sin embargo, lo que sí puede evitarse o al menos reducirse considerablemente son los desastres, que eventualmente pueden resultar de esos eventos. La función esencial de la Protección Civil es reducir el número de víctimas humanas, de damnificados, de pérdida de propiedades, y daños a la infraestructura de una región, poblado o ciudad. El efecto de un evento natural se convierte en un desastre cuando se sobrepasa la capacidad de respuesta de la zona afectada, demandando la asistencia y la intervención externas inmediatas.

Con frecuencia la población de México, como también la de otros países, está expuesta a la ocurrencia de movimientos repentinos pendiente abajo de masas de suelos y rocas; genéricamente nos referimos a estos eventos como deslizamientos o inestabilidades de laderas o taludes naturales. Estas inestabilidades consisten en caídos o volcamientos, deslizamientos y flujos. Los primeros suceden al desprenderse o volcarse bloques o fragmentos rocosos, que caen con gran velocidad casi en caída libre. Los deslizamientos o fallas de talud ocurren cuando la masa más externa de una ladera, y hasta cierta profundidad, se corta, desliza y se mueve como una unidad pendiente abajo sobre una superficie de falla. Usualmente la masa fallada se mantiene sobre la superficie de deslizamiento; esta última sólo puede apreciarse en el extremo superior cerca de su corona, a través de lo que conocemos como escarpa principal. Los flujos de tierras y lodos se caracterizan porque la masa deslizante se rompe y disgrega conforme se mueve pendiente abajo, generando que fluya una masa viscosa que literalmente se vacía talud abajo de la ladera.

En la mayoría de los casos, las causas naturales que disparan o activan los deslizamientos son las lluvias intensas y prolongadas, los sismos fuertes y la actividad volcánica, o la combinación de ellas; para que ello ocurra, deben conjuntarse con características geológicas y geomorfológicas (pendiente, altura, agrietamiento, grado de alteración de las rocas, principalmente) proclives, así como propiedades mecánicas de los materiales propensas a la falla. Existen también causas provocadas por el hombre conocidas como antropogénicas; en efecto, cuando no se estudian y prevén las implicaciones de la ejecución de un corte, por ejemplo para la construcción de una carretera u otra obra, pueden inducirse fallas en laderas con volúmenes removidos muy diversos. Desde luego, todos estos deslizamientos son tanto más desastrosos en la medida que suceden en áreas pobladas y con mayor infraestructura.

La mayoría de los deslizamientos que han afectado a la población en México, está asociada a inestabilidades en suelos y rocas jóvenes suaves, provocadas por lluvias intensas y prolongadas. Así por ejemplo, el deslizamiento y flujo de suelos ocurrido en la Col. La Aurora de la ciudad de Teziutlán, Pue., el 5 de octubre de 1999, fue resultado de precipitaciones extraordinarias; se generó así lo que se calificó oficialmente como el desastre del decenio. El deslizamiento provocó de manera intempestiva la muy lamentable pérdida de 110 personas.

Es un hecho bien identificado que las zonas de más alto riesgo no sólo a los deslizamientos térricos, sino también a las inundaciones y otras calamidades, son donde usualmente se asienta la población de menores recursos. En ocasiones, el desarrollo de una comunidad se da en terrenos inclinados de propiedad irregular, con lo que se propician las fallas de talud, al deforestarse el terreno y al generarse flujos de aguas servidas al interior del talud. En otros casos, comunidades o poblados se asientan al pie del talud, haciéndolas vulnerables no sólo a la caída de materiales térricos o rocosos, sino al flujo de corrientes de agua e inundaciones.

Por fortuna, gran parte de los problemas de inestabilidad de laderas tienen antecedentes o manifestaciones que permiten señalar la posibilidad de un deslizamiento futuro. El desafío entonces es distinguir, por una parte, esos factores intrínsecos de los suelos y rocas que hacen propicia una inestabilidad; y por la otra, los factores externos, tales como una lluvia intensa, que hacen el resto para que suceda la falla de una ladera. Ambos factores son susceptibles de medirse, y al cuantificarse, dan elementos para juzgar acerca del riesgo, o no, de un deslizamiento.

En este documento se dan los elementos que permitirán:

- reconocer el tipo de inestabilidad de una ladera,
- detectar oportunamente un eventual problema de inestabilidad,
- observar y medir la evolución de una ladera potencialmente inestable,
- transmitir en tiempo real las señales de las variables registradas en la ladera,
- cuantificar los posibles factores externos desencadenantes de la inestabilidad, y
- comprender el mecanismo de falla de la ladera.

1.2 ALCANCE Y OBJETIVOS

Esta guía tiene como objetivo proporcionar los lineamientos ingenieriles que permitan prevenir los problemas asociados a la inestabilidad de laderas; para ello se exponen las técnicas actuales que se utilizan para el monitoreo de laderas con objeto de evaluar su comportamiento físico, y así estimar su posible riesgo de inestabilidad. Se presentan los medios para medir deformaciones y otras manifestaciones de inestabilidad en el terreno, tales como aceleraciones, vibraciones o sonido asociados con movimientos, así como la precipitación y presiones en el agua de la ladera. Adicionalmente, son expuestas las bases con que se cuenta para establecer un alertamiento temprano, ante un eventual e inminente deslizamiento de suelos o rocas, con base en un sistema de monitoreo en tiempo real.

Este es un campo importante en el que debe estar preparado el personal técnico que atiende actividades de Protección Civil de nuestro país, por lo que esta guía está dirigida a ellos, proporcionando los elementos necesarios para poder detectar, de manera oportuna, una ladera potencialmente inestable; este es un paso indispensable para mitigar el impacto de su falla.

Para clarificar el alcance y comprensión de esta guía, en el capítulo 2 se resumen brevemente los tipos y causas generales de deslizamientos. Adicionalmente, en el capítulo 3 se distinguen los factores desencadenantes de la inestabilidad de laderas. El capítulo 4 da cuenta de los lineamientos básicos que deben cumplirse al realizar trabajos de instrumentación de laderas. La descripción de los diversos equipos, dispositivos, e instrumentos para medir los desplazamientos de laderas, o los sonidos o vibraciones que éstos producen, se reúne en el capítulo 5. Lo referente a la medición y registro de la precipitación, así como a las condiciones de presión en el agua del subsuelo, se abordan en el capítulo 6. La descripción de las estaciones sísmicas y de las fuentes de información sobre sismos en México se presentan en el capítulo 7. El capítulo 8 trata lo concerniente a los sistemas de monitoreo en tiempo real, o minuto a minuto, y su aplicación a las técnicas de alertamiento temprano por una posible actividad de un deslizamiento, en el capítulo 9 se resumen algunas recomendaciones y comentarios finales. Por último incluye un anexo que describe el sistema de detección de flujos de avalanchas o de detritos en volcanes, el cual ha sido aplicado al caso del volcán Popocatepetl y que cuenta a la fecha con cuatro años de operación.

II BREVE DESCRIPCIÓN DEL TIPO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS INESTABILIDADES EN LADERAS

2.1 LOS TRES TIPOS BÁSICOS DE DESLIZAMIENTOS

Caídos o Derrumbes. Son movimientos abruptos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en pendientes abruptas y acantilados, Fig 2.1a, por lo que el movimiento es prácticamente de caída libre, rodando y rebotando; incluye:

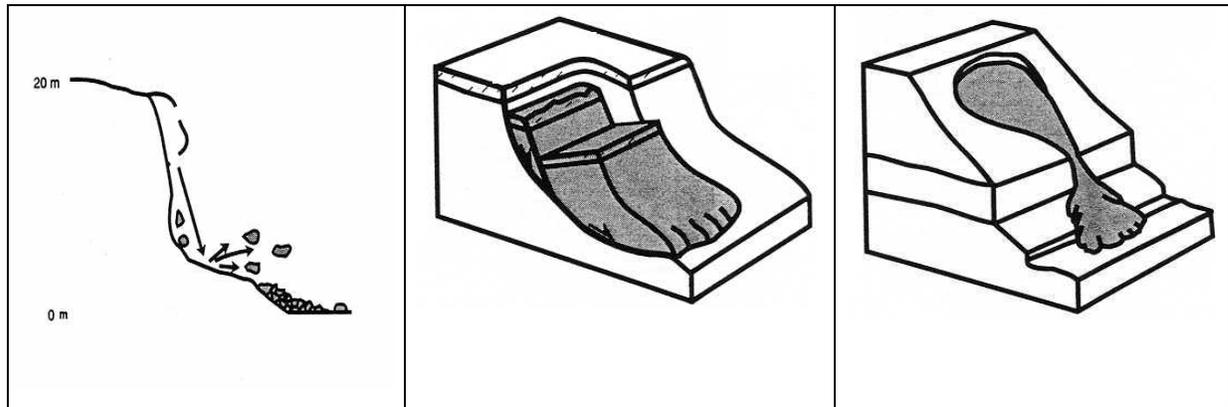
- **Desprendimientos.** Caída de suelos, producto de la erosión, o de bloques rocosos, atendiendo a discontinuidades estructurales (grietas, planos de estratificación, o fracturamiento) proclives a la inestabilidad.
- **Vuelcos o volteos.** Caída de bloques rocosos con giro hacia adelante y hacia afuera, propiciado por la presencia de discontinuidades estructurales (grietas de tensión, formaciones columnares, o diaclasas) que tienden a la vertical.

Deslizamientos. Son movimientos de una masa de materiales térreos pendiente abajo, sobre una o varias superficies de falla delimitadas por la masa estable o remanente de una ladera, Fig 2.1b. Por la forma de la superficie de falla, se distinguen:

- **Rotacionales.** Deslizamientos en los que su superficie principal de falla resulta cóncava hacia arriba (forma de cuchara o concha), definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelos y/o fragmentos de rocas con centro de giro por encima de su centro de gravedad. A menudo estos deslizamientos rotacionales ocurren en suelos arcillosos blandos, aunque también se presentan en formaciones de rocas blandas muy intemperizadas.
- **Translacionales.** Deslizamientos en los que la masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplaza hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie de falla más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Usualmente determinan deslizamientos someros en suelos granulares, o bien están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de diferente alteración o meteorización de las rocas.

Flujos. Son movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas pendiente abajo de una ladera, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla, Fig 2.1c. Los flujos pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos; pueden distinguirse:

- **Flujos de lodo.** Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.
- **Flujos de tierra o suelo.** Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de grava, arena y limo.
- **Flujos o avalancha de detritos.** Movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan suelos sueltos, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua atrapados, formando una masa viscosa o francamente fluida que fluye pendiente abajo.
- **Creep o flujo muy lento.** A diferencia de los casos anteriores, es un movimiento constante pero muy lento de suelos y rocas pendiente abajo, en el que no se define con precisión la superficie de falla.
- **Lahar.** Flujo de suelos o detritos que se origina en las laderas de un volcán, generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, o bien por rotura o desbordamiento de represas de agua.



a) Caídos o derrumbes

b) Deslizamientos

c) Flujos

Fig. 2.1 Tipos básicos de deslizamientos

2.2 OTROS PROCESOS DE INESTABILIDAD

Podrían reconocerse asimismo, los *desplazamientos laterales* que consisten en movimientos de masas térricas que ocurren en pendientes muy suaves, que dan como resultado desplazamientos casi horizontales. Con frecuencia son causados por licuación, donde los sedimentos sueltos y saturados (arenas y limos) se transforman en un estado fluido, por las vibraciones de un sismo.

2.3 RASGOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS QUE PROPICIAN INESTABILIDADES

Los suelos residuales representan el tipo predominante de materiales térreos en los que ocurren la mayor parte de las inestabilidades en laderas. Las fallas en laderas constituidas por suelos residuales ocurren frecuentemente durante periodos de lluvias intensas. Los suelos residuales son los productos de la alteración química, en el mismo sitio, de las rocas originales, y se desarrollan en zonas con clima más bien tropical, donde se conjuntan temperaturas altas y precipitaciones abundantes. Amplias zonas del territorio nacional están cubiertas con suelos residuales, destacando las localizadas en la vertiente del golfo de México y en las porciones sureste y sur de la vertiente del Pacífico; en ellas pueden distinguirse estos suelos de colores rojizos.

El grado de alteración y la extensión a la que la estructura original de la masa de roca se destruye o meteoriza varía con la profundidad. Se da lugar así a perfiles de alteración que comprenden materiales con propiedades mecánicas muy diferentes, Fig 2.2, desde aquéllas propias de la roca franca que se encuentra a profundidad, hasta las de suelo completamente intemperizado o alterado, o simplemente residual, que observamos en la superficie del terreno. No es de extrañarse entonces, que con frecuencia las superficies de deslizamiento en materiales residuales se ubiquen más bien cerca de la superficie del terreno, como ocurrió en el caso del deslizamiento y flujo en Teziutlán, Pue.

Las características principales de los materiales residuales son: a) usualmente muy heterogéneos, lo que los hace difíciles de muestrear y ensayar; b) se encuentran casi siempre en una condición no saturada, esto es que sus poros contienen no sólo agua sino también aire; y c) invariablemente tienen altas permeabilidades, lo que determina que sus propiedades sean particularmente sensibles y de una respuesta muy rápida a las influencias hidráulicas externas.

Sin embargo, debe advertirse que los deslizamientos no sólo ocurren en suelos residuales, sino que incluso suceden en formaciones rocosas, como resultado de una variedad de causas. Una acción que siempre será necesaria para evaluar la potencialidad a los deslizamientos en una zona, es examinar la historia de desastres en la misma, y desde luego conducir reconocimientos de campo para distinguir rasgos geomorfológicos que nos muestren los vestigios de posibles deslizamientos. Para lo primero, deberán revisarse documentos y registros geotécnicos y topográficos, fotografías aéreas, y de manera relevante, escuchar las descripciones de gente de la región o localidad. Para lo segundo, en el campo deberán distinguirse las características siguientes:

- Salientes, hendiduras y agrietamientos en la parte alta (corona) de una ladera; éstos son causados por deslizamientos previos, o son signo de deslizamientos futuros.
- Taludes con una superficie empinada o irregular, atestiguando los remanentes de depósitos de un deslizamiento; éstos tienen un potencial alto para convertirse en un flujo o avalancha de detritos.
- Depresiones; están frecuentemente cubiertas por acumulaciones de suelos, colectando agua superficial.
- Taludes con filtraciones de agua; éstas pueden estar influenciadas por agua proveniente del interior de la ladera, incluso resultado de fenómenos tales como tubificación y erosión interna.
- Taludes con bloques rocosos o muchos cantos rodados; ante pendientes fuertes y con echados favorables, tienen un alto potencial para generar caídos de roca.
- Vegetación; sus cambios bruscos pueden estar asociados a la presencia o ausencia de agua en la ladera, la que influye en las propiedades mecánicas del terreno; o bien, una discontinuidad tal como una grieta o falla que favorezca una inestabilidad. Adicionalmente, las inclinaciones de árboles, postes o cercas (en el sentido del movimiento) son evidencia inequívoca de movimiento talud abajo de una ladera.

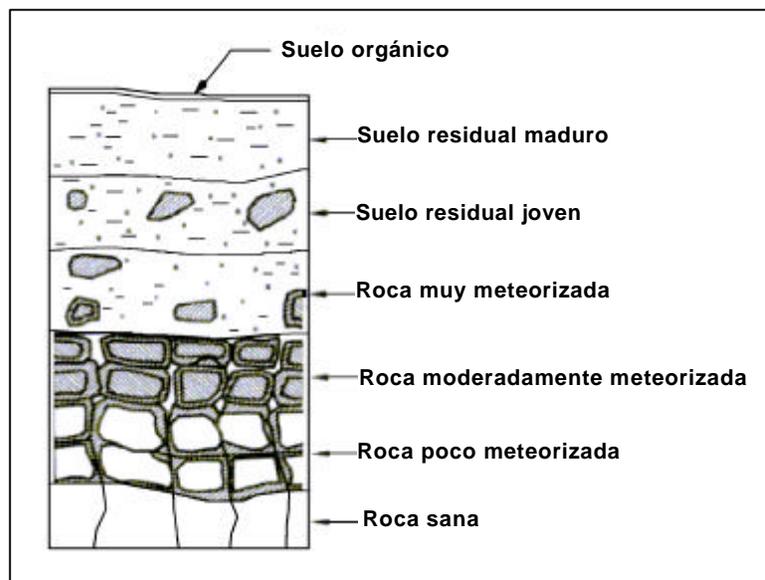


Fig. 2.2 Perfil de alteración de un suelo residual y de la roca basal

III FACTORES DESENCADENANTES DE INESTABILIDAD EN LADERAS

3.1 ¿POR QUÉ OCURREN LOS DESLIZAMIENTOS?

Deslizamiento de una ladera es un término general que se emplea para designar los movimientos talud abajo de materiales térreos, que resultan de los movimientos hacia abajo y hacia afuera de suelos, rocas y vegetación, bajo la influencia de la gravedad. Como ya se ha señalado, los materiales se pueden mover por derrumbe o caída, deslizamiento, flujo y desplazamiento lateral. Algunos deslizamientos son rápidos, ocurriendo en segundos, mientras que otros pueden tomar horas, semanas, meses, o aún lapsos mayores para que se desarrollen. Desde luego para la Protección Civil, fundamentalmente por lo que se refiere a la seguridad de las personas, son de particular preocupación los deslizamientos rápidos.

Aunque los deslizamientos usualmente suceden en taludes escarpados, también a menudo se presentan en laderas de poca pendiente. Los deslizamientos pueden ocurrir como fallas de laderas de cerros, cañadas, barrancas y riberas de ríos, lagunas o vasos de presas; de cortes y terraplenes de carreteras, minas a cielo abierto y bancos de materiales; y, fallas de taludes en terraplenes para presas, bordos y otras obras, así como en excavaciones para la construcción. Nuevamente, dentro del ámbito de la Protección Civil, interesan primordialmente las inestabilidades asociadas a las laderas.

Los deslizamientos pueden ser desencadenados tanto por cambios en el ambiente natural, como por actividades humanas. Las debilidades inherentes en las rocas y en los suelos frecuentemente se combinan con uno o más eventos desestabilizadores, tales como lluvias intensas, cambios en el nivel del agua dentro del terreno, actividad sísmica, actividad volcánica, y en menor proporción en nuestro medio, por el deshielo. Del cambio climático a largo plazo puede resultar el aumento en la precipitación, en la saturación del terreno y en el aumento del peso del suelo; y de manera más trascendente, en la elevación del nivel del agua, en el incremento de su presión, y en la consecuente reducción de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Los deslizamientos de tierra son primariamente ocasionados por fuerzas gravitacionales, y resultan de una falla por corte a lo largo de la frontera de la masa en movimiento, respecto a la masa estable; se alcanza un estado de falla cuando el esfuerzo cortante medio aplicado en la potencial superficie de deslizamiento, llega a ser igual a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo o roca, tal como se determina en ensayos de laboratorio o de campo.

Los sismos y los volcanes son también detonadores frecuentes de deslizamientos en países como el nuestro, en donde junto con estas manifestaciones casi cotidianas, se conjuntan rocas jóvenes de propiedades resistentes reducidas y perturbaciones al entorno natural por las actividades que realizan los humanos.

3.2 LLUVIAS INTENSAS Y PROLONGADAS

La mayoría de los deslizamientos que han impactado negativamente a la población en México, está asociada a inestabilidades en suelos y rocas suaves, provocadas por lluvias intensas y prolongadas. Un ejemplo que soporta esta aseveración es el caso de los deslizamientos en Teziutlán, Pue. de 1999, mismos que se exponen más adelante; antes se considera pertinente revisar el mecanismo que explica este tipo de falla en una ladera.

3.2.1 Mecanismo de falla por lluvias

Un factor externo perturbador como es la lluvia actúa principalmente sobre una ladera, reduciendo la resistencia al esfuerzo cortante del material que la constituye; ello mediante la generación de presión de poro, al acumularse el agua en el material térreo de la ladera. Adicionalmente, afectan la estabilidad cuando generan corrientes extraordinarias por el pie, que propician deslaves y cambios en la geometría de la ladera, así como aumento en los pesos volumétricos de los materiales.

En cada ladera ocurren fluctuaciones en los niveles del agua del terreno, de acuerdo con las variaciones estacionales y cambios climáticos a los que año con año está expuesta. Así, en la temporada de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, generándose incluso tensión o presión negativa en el agua contenida en los poros del suelo, lo que define temporalmente una resistencia cortante relativamente alta del material. Al ocurrir precipitaciones intensas y prolongadas esa succión se pierde e incluso se genera una presión positiva en el agua (también conocida como presión de poro); en la Fig. 3.1a se esquematiza el aumento del tirante de agua dentro del suelo de la ladera, que es lo que sucedería internamente ante lluvias intensas. Tal aumento de presión de poro va en detrimento de la resistencia del suelo, atendiendo al principio de los esfuerzos efectivos; en efecto, debe tenerse presente que cuando la presión de poro aumenta, el nivel de esfuerzos efectivos disminuye, y consecuentemente también se reduce la resistencia efectiva del suelo, dada la naturaleza friccionante de la resistencia; en la Fig. 3.1b aparece la trayectoria de esfuerzos efectivos al aumentar la presión de poro, hasta tocar la envolvente de resistencia.

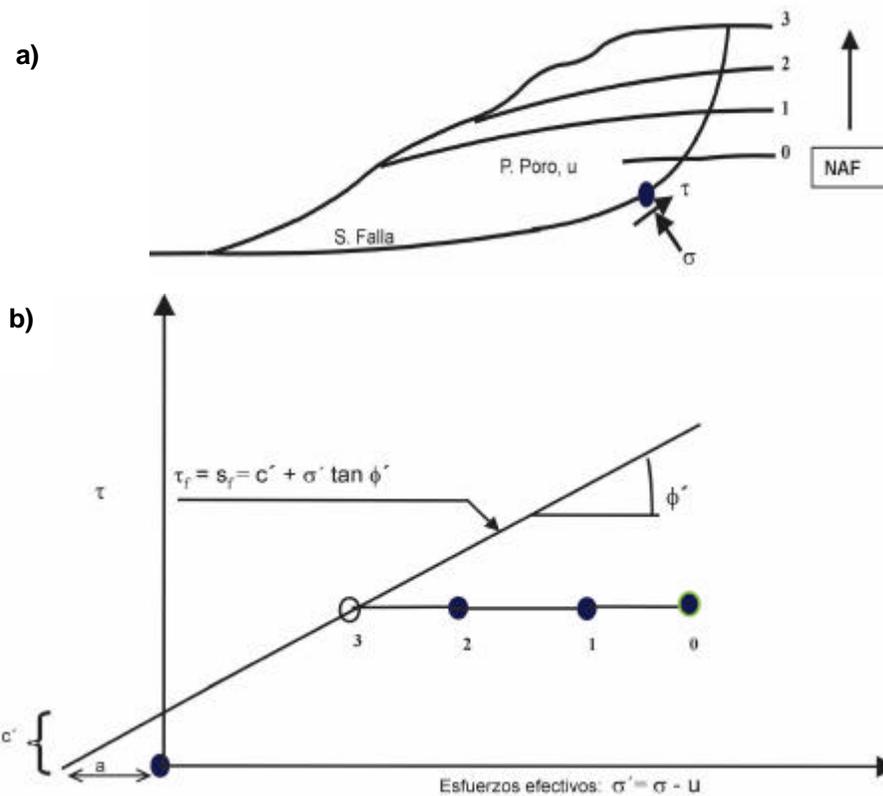


Fig. 3.1. Efectos de la presión del agua sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, atendiendo al nivel que alcanza el agua dentro de la ladera

El mecanismo antes descrito se ha documentado y medido en diversos ambientes geológicos (Brand, 1981; Alonso *et al.*, 1996; Faisal, 2000; Deutscher *et al.*, 2000), pero distinguiéndose como común detonador de inestabilidades a las lluvias severas. Se aprecia gran avance en diferentes países, destacando los asiáticos, en el estudio de la relación entre la inestabilidad de taludes y la ocurrencia de lluvias intensas; en particular, en lo referente a la evolución y pérdida de la succión y luego al aumento de la presión de poro en suelos residuales, ante lluvias fuertes. La información al respecto en nuestro país es muy reducida; sin duda deben emprenderse actividades de laboratorio y campo que la aporten, la cual es básica en la cuantificación de las condiciones de estabilidad en laderas. Estas acciones deben contemplarse dentro de un objetivo final orientado al alertamiento contra posibles deslizamientos. Ello exige el concurso de profesionales de diferentes disciplinas (geotecnia, hidrología, geología, geomorfología, geografía, meteorología y telecomunicaciones) poniendo en juego los medios y recursos tecnológicos más recientes.

3.2.2 Condiciones hidrometeorológicas que provocaron una falla: El caso de Teziutlán

La ciudad de Teziutlán está localizada a una altitud media de 1,880 msnm, y se ubica en la Sierra Norte del estado de Puebla; cuenta con una población aproximada de 120,000 habitantes. Con información proporcionada por la oficina en Teziutlán de la Comisión Nacional del Agua (CNA), se conoció que los registros de precipitación diaria en la zona fueron los que se indican gráficamente en la Fig. 3.2a; cabe destacar que las lluvias que cayeron los días 4 y 5 de octubre de 1999 alcanzaron columnas de agua equivalentes a 300 y a 360 mm, respectivamente; contrastan con la media mensual para el mes de octubre en esta región que es de 183 mm. Adicionalmente, puede distinguirse que en dos días consecutivos de la semana anterior, se tuvieron precipitaciones diarias de más de 100 mm. Se tiene así, como se muestra en la Fig. 3.2b, que la precipitación acumulada en el lapso de diez días alcanzó poco más de un metro. Esta columna acumulada de agua en diez días casi representó lo que llueve en esta región en un año, ya que la media anual es de 1,229 mm. Sin duda, debe considerarse que estas precipitaciones extraordinarias se ubican entre las más altas de este siglo, aunque los lugareños reseñan que ya habían sucedido lluvias muy intensas en 1995, al igual que hace algunos decenios, con ocurrencia de pequeños deslizamientos de tierras.

El día 5 de octubre de 1999 ocurrió un deslizamiento y flujo en la colonia “La Aurora” de Teziutlán, Fig. 3.3, en una ladera con apenas una inclinación de 23° (Mendoza y Noriega, 2000); coincidió con el máximo de la precipitación acumulada. Se generó una superficie de falla poco profunda; no obstante, se removieron aproximadamente 7,500 m³ en forma de un flujo de suelos, arrasando las viviendas asentadas en la colina y provocando la muerte a 110 personas. En la zona prevalecen materiales rocosos de origen volcánico, principalmente tobas y brechas, las que se aprecian con una cementación media. Se trata en general de rocas ígneas extrusivas del Cuaternario que pertenecen al Eje Neovolcánico Mexicano. Se aprecian también derrames basálticos provenientes de conos volcánicos ubicados al sur de la ciudad. De manera diferencial, estas rocas suaves dan origen a suelos residuales, resultado de la descomposición de esos productos rocosos jóvenes, debido al clima templado y húmedo que prevalece en esta región, con lluvias prácticamente todo el año.

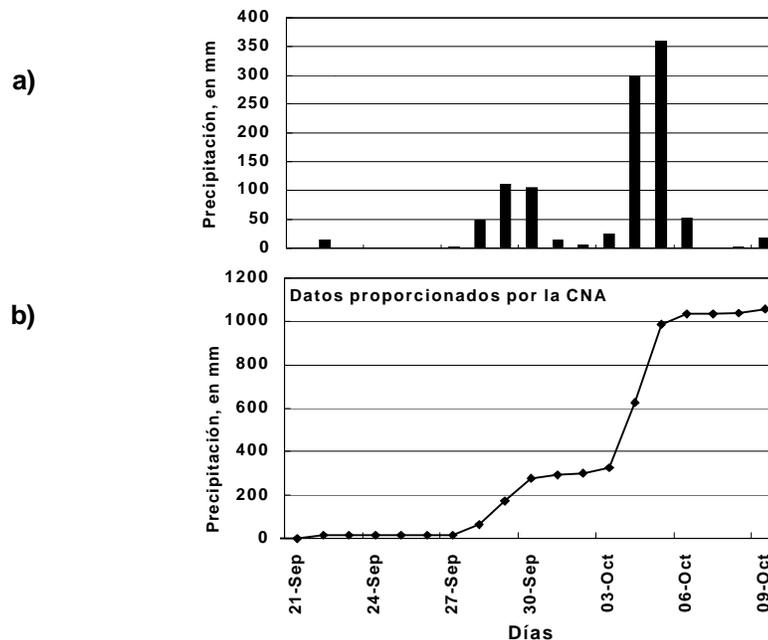


Fig. 3.2 Precipitación diaria y acumulada en Teziutlán, Pue., septiembre-octubre de 1999

Es claro que los cambios climáticos que están sucediendo en el mundo obligan a monitorear más de cerca su evolución, entre otras importantes razones, por sus consecuencias sobre las laderas naturales. Son estos factores ambientales externos los que desencadenan frecuentemente una inestabilidad de ladera. De acuerdo con información de la CNA, estas tormentas se originaron al formarse un "nudo" meteorológico que cubría la zona norte del estado de Puebla, y grandes extensiones de los estados de Hidalgo y Veracruz, y en menor proporción el estado de Tlaxcala. Tal "nudo" se debió a que ondas tropicales (frentes de humedad que surgen de los océanos) que venían unas tras otras desde el Este, chocaron y se fusionaron con una baja presión, convirtiéndose en una gran depresión tropical.

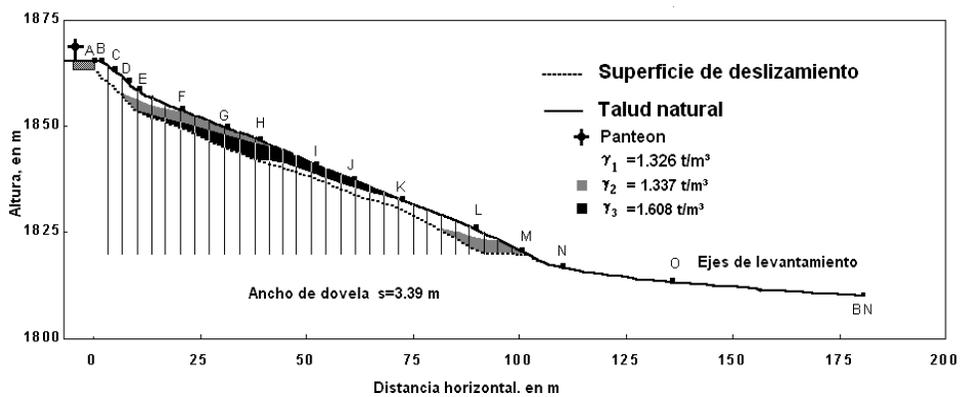
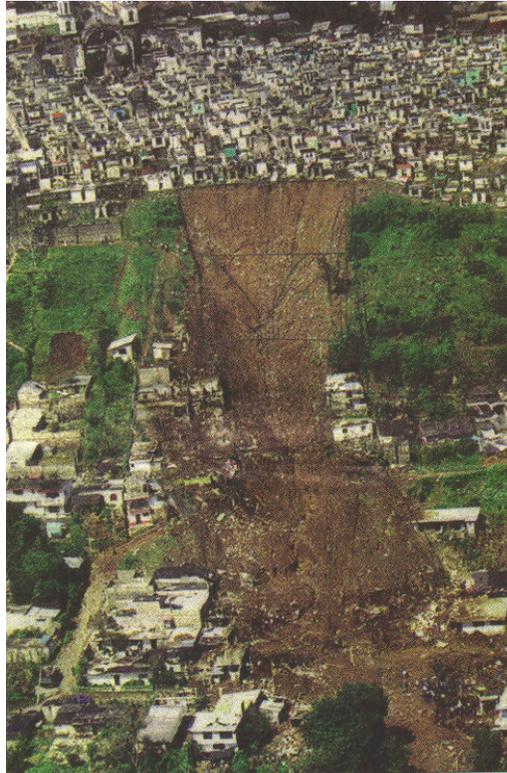


Fig. 3.3 Deslizamiento y flujo en la Col. "La Aurora", Teziutlán, Pue., el 5 de octubre de 1999

3.2.3 Relación entre la inestabilidad de laderas y la intensidad de lluvia

El caso-historia anterior podría ser de los pocos deslizamientos documentados en el país, para el que se cuenta con registro pluviométrico diario. Sin embargo, es de destacarse que sigue un patrón de comportamiento similar al de zonas con una estadística de centenas de deslizamientos a través de decenios, Fig. 3.4. En efecto, de la observación y registro de estos eventos en Hong Kong, uno de los sitios más estudiados del mundo dado su territorio tan sinuoso, han llegado a las conclusiones siguientes (Brand, 1985):

- Los deslizamientos en su gran mayoría son inducidos por lluvias cortas y localizadas de intensidad alta, y éstos ocurren prácticamente al mismo tiempo que el pico de la lluvia horaria.
- La lluvia antecedente no es un factor mayor en la ocurrencia de deslizamientos, excepto en casos de deslizamientos menores que tienen lugar bajo lluvias de relativamente baja intensidad. En estos casos, sólo la lluvia antecedente de unos cuantos días parece ser significativa.
- Una intensidad de lluvia de aproximadamente 70 mm/hora parece ser el valor de un umbral arriba del cual ocurren los deslizamientos. El número de deslizamientos y la severidad de sus consecuencias aumenta dramáticamente conforme crece la intensidad horaria respecto a este umbral.
- La lluvia de 24 horas generalmente refleja lluvias cortas de intensidad alta, y ésta puede por tanto usarse como un indicador de la probabilidad de deslizamientos. Una lluvia de 24 horas de menos de 100 mm es muy improbable que provoque un deslizamiento mayor.

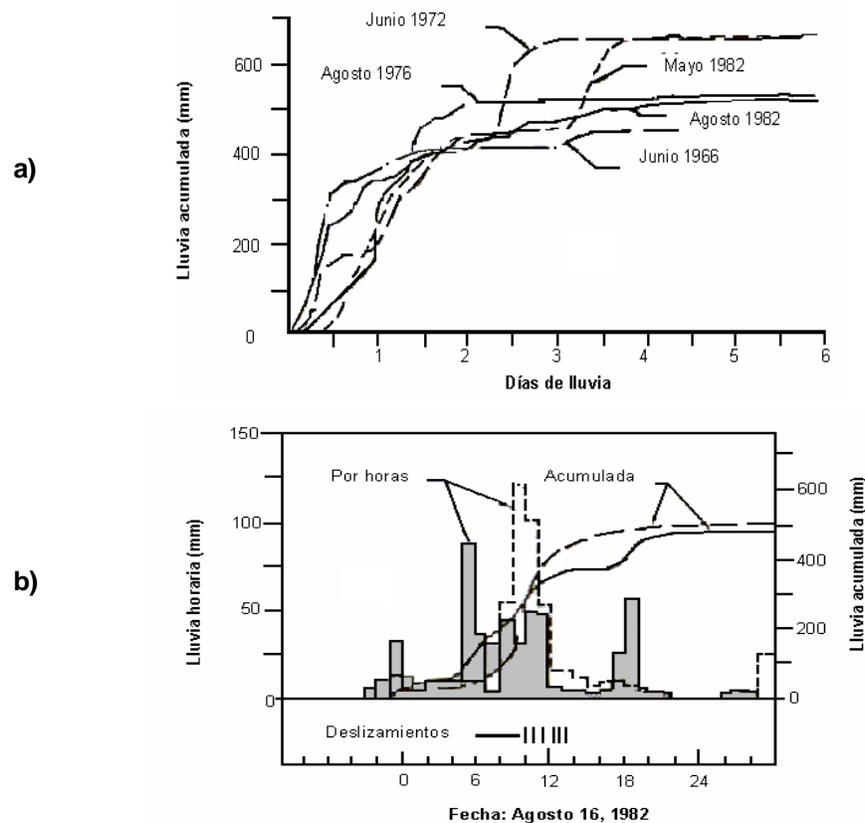


Fig. 3.4 a) Tormentas más severas en Hong Kong entre 1963 y 1983; y, b) Ocurrencia de deslizamientos en relación con las lluvias (Brand, 1985)

Los resultados del estudio de correlación lluvia-deslizamientos los han resumido en la Fig. 3.5. Muestran la frecuencia aproximada de deslizamientos en términos de las lluvias de 24 horas y de una hora. De hecho, esta simple información constituye en gran medida la base del sistema de alertamiento contra deslizamientos que utilizan en Hong Kong. Sin embargo, es claro que estos umbrales son distintos para otros sitios, con climas y ambientes geológicos diferentes; así por ejemplo, se relatan (Alonso y coautores, 1996) inestabilidades en terraplenes y laderas en el noreste de España, durante dos días de lluvias “extremadamente intensas”, con 122 y 56 mm.

		EFFECTO DEL DESLIZAMIENTO	FRECUENCIA		
Lluvia horaria (mm)	100	Desastroso	1 en 5 años	Lluvia diaria (mm)	300
	70	Severo	1 en 2 años		200
	40	Menor	3 en 1 año		100
	0	Ninguno	-----		0

Fig. 3.5 Relación aproximada entre intensidad de lluvia y deslizamientos de laderas en Hong Kong (Brand, 1985)

Así pues, no necesariamente deben considerarse aplicables los resultados observados en Hong Kong, a las condiciones particulares de cada sitio de interés en México; sin embargo, esa información da pautas de comportamiento y órdenes de magnitud de los umbrales de lluvia a partir de los cuales ocurren inestabilidades. La generación y acopio de datos similares en las diferentes regiones del país, nos permitiría establecer un sistema de alertamiento eficiente y barato en contra de los deslizamientos de laderas, aunque aquellos autores lo reconocen como más bien burdo. Cabe observar que prestan gran atención no sólo al registro de la precipitación diaria, sino a la precipitación horaria como variable significativa de la intensidad de lluvia asociada a los deslizamientos. Otro aspecto que destaca de su estudio es la gran cantidad de estaciones pluviométricas para cubrir una región relativamente pequeña, Fig. 3.6a; como se aprecia en la Fig. 3.6b, ello se justifica por las grandes variaciones en la intensidad de lluvia debidas a los accidentes topográficos, para un mismo evento, en lugares geográficos relativamente cercanos.

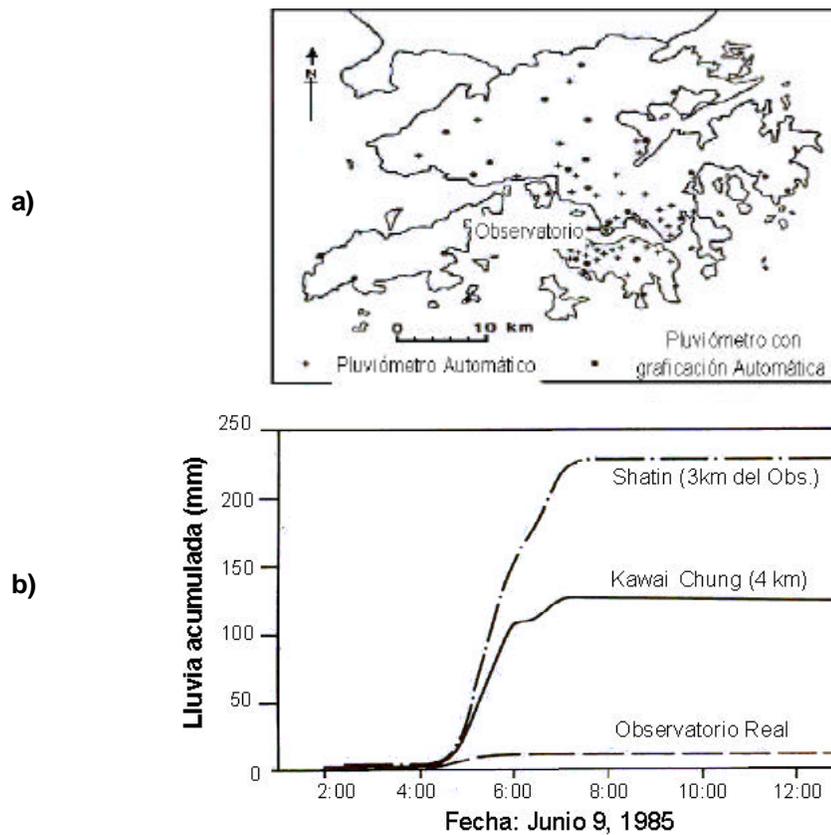


Fig. 3.6 Ubicación de estaciones pluviométricas en Hong Kong y variaciones en la precipitación a distancias pequeñas (Brand, 1985)

3.3 SISMOS INTENSOS

En la mayoría de los casos, las desencadenadoras de los deslizamientos catastróficos son las precipitaciones intensas, la actividad sísmica y la actividad volcánica, o la combinación de ellas. Schuster (1996) reconoce que de los 25 deslizamientos más catastróficos en el Siglo XX que ocurrieron en todo el mundo, diez fueron disparados por lluvias intensas; nueve por eventos sísmicos y tres por erupciones volcánicas. Esta estadística nos muestra la gran importancia de esta fuente detonadora de inestabilidades en laderas.

Un ejemplo reciente de este tipo de eventos es el sucedido en la ladera conocida como “Las Colinas” en Santa Tecla, Nueva San Salvador, El Salvador, Centro América (Mendoza y coautores, 2001). Fue disparado por el sismo del 13 de enero de 2001, de magnitud $M_w=7.6$ y distancia epicentral de 100 km. Ocurrió un deslizamiento y un flujo masivo de lodo arenolimoso, soterrando a una urbanización asentada al pie de la ladera, y provocando la muerte a aproximadamente 500 personas, Fig. 3.7. Las fuerzas inerciales debidas al sismo, aunadas a la disminución de la resistencia cortante de los suelos, determinaron esta falla de la ladera; tal reducción fue debida a la naturaleza granular de los suelos volcánicos muy sueltos de la ladera y del pie de ésta, que generaron alta presión dinámica en el agua de sus poros. Sin embargo, pudo reconocerse que se había propiciado una condición poco favorable para su estabilidad, por una parte por la obstrucción al libre drenaje en la parte baja de la ladera –lo que condujo a su saturación-; y por la otra, por la deforestación de su cima.



Fig. 3.7 *Deslizamiento y flujo de tierras en la ladera “Las Colinas”, Nueva San Salvador, El Salvador, C.A., ocurrido el 13 de enero de 2001*



Fig. 3.8 *Parte central de la escarpa principal y deforestación en su cima. Ladera "Las Colinas", Nueva San Salvador*

3.4 ACTIVIDAD VOLCÁNICA

Ante eventos volcánicos debe preverse la posibilidad de flujos o avalanchas de detritos, consistentes en movimientos masivos rápidos de mezclas de suelos y fragmentos de rocas, así como vegetación con aire y agua atrapados, que forman una masa viscosa o francamente fluida que fluye pendiente abajo, y que resulta muy destructiva. También es posible que se desarrolle un lahar, que se origina en el talud de un volcán por el deshielo repentino que puede provocar la actividad volcánica; o bien, por rotura o desbordamiento de represas de agua.

Un ejemplo dramático de una avalancha de detritos fue la provocada por la erupción del Nevado del Ruíz en 1985, estado de Tolima en Colombia. Cuatro poblados y villas fueron destruidos; el flujo en el valle del río Lagunillas mató a más de 20,000 personas en la ciudad de Armero. Se ha mencionado que esta cifra de fallecimientos fue muy grande porque los alertamientos del riesgo no fueron emitidos a la población; estas experiencias deben conocerse para no caer en situaciones similares ante una emergencia como esta.

Otro proceso disparado por un volcán fue el deslizamiento de rocas y avalancha de detritos que provocó la erupción del Monte Santa Elena, estado de Washington, EEUU en 1980. Ha sido el deslizamiento histórico más grande del mundo (volumen de aproximadamente $2.8 \times 10^9 \text{ m}^3$). A pesar de ese enorme deslizamiento, sólo perdieron la vida de 5 a 10 personas, gracias a que la población fue alertada y evacuada de la región. Se inició como un deslizamiento de rocas y se convirtió en una avalancha de detritos de 23 km de largo con velocidad media de 125 km/hora.

Dejan estos hechos varias reflexiones; entre ellas, la necesidad de reubicar a los pueblos que se localizan en valles cercanos a volcanes activos, e incluso en cañadas que son claramente los cauces por donde eventualmente fluirían esas avalanchas. Por otra parte, que pueden ser no catastróficos, o sí, dependiendo de si se cuenta, o no, con un monitoreo *ad-hoc* con fines de alertamiento.

3.5 ACCIONES HUMANAS

Las actividades humanas que agudizan o exacerban la ocurrencia de deslizamientos, están asociadas de manera preponderante a la deforestación en las laderas y en las cercanías de su corona y pie. Un ejemplo de esta coadyuvancia a la inestabilidad de una ladera por la deforestación, fue el caso del deslizamiento “Las Colinas” en El Salvador, expuesto en el inciso 3.3. Justo el área adyacente a la cima donde ocurrió el deslizamiento, se encontraba sin árboles o arbustos, como se puede apreciar en la Fig. 3.8.

Desde luego, cuando no son previstos los problemas en que se puede incurrir, o cuando las consideraciones ingenieriles no son las correctas, algunas acciones de construcción pueden provocar inestabilidades de laderas; entre aquellas pueden citarse: los cambios de pendiente o altura de la ladera, así como la excavación al pie del talud. También, la modificación del curso o el impedimento de las corrientes de agua, los cambios en la irrigación o el drenaje de aguas limpias o servidas hacia el talud o su vecindad; estas acciones pueden cambiar los niveles del agua del subsuelo e incluso provocar la saturación del terreno, entre otros.

IV INSTRUMENTACIÓN ORIENTADA A REGISTRAR EFECTOS Y/O CAUSAS DE INESTABILIDAD DE LADERAS

4.1 SOBRE LA NECESIDAD DEL MONITOREO E INSPECCIÓN

Dada la problemática que se ha descrito en capítulos anteriores, es necesario poder reconocer los deslizamientos potenciales en una etapa temprana, a través de investigaciones e inspecciones periódicas y así prevenir posibles desastres. Diversos instrumentos se han desarrollado para detectar los movimientos masivos de laderas, como los que se abordan en el siguiente capítulo, y de la presión en el agua del subsuelo, que se tratan en el capítulo 6. La instrumentación de laderas ha tenido mejoras recientes, y la aplicación creciente de la tecnología computacional ha podido desarrollar sistemas automáticos de medición y monitoreo de instrumentos. En algunos países han puesto en marcha estos sistemas avanzados, en los que los datos son procesados para predecir la ocurrencia de fallas, y están ligados a una alarma o sistema de precaución. Estos aspectos se abordan en el capítulo 8. La inspección de las laderas es el trabajo fundamental para la cabal comprensión del estado de los taludes, sobre todo en áreas con antecedentes de inestabilidades. La detección visual de la deformación de la ladera debe ser la principal preocupación, particularmente durante o después de condiciones climáticas inusuales, tales como lluvias intensas o un sismo. Para evaluar la potencialidad a los deslizamientos de una zona deben seguirse las acciones descritas en el inciso 3.1 de este documento. Deben ser puntos de inspección las manifestaciones de deformación de los taludes tales como agrietamientos, depresiones, expansiones, rotura de pavimentos o protecciones de talud. Merece especial atención el flujo de aguas en laderas; es importante inspeccionar las corrientes de agua en el hombro y al pie, los afloramientos y los sistemas de drenaje, notando su gasto y su variación. Deberá observarse el crecimiento de vegetación en la ladera, aparición de porciones sueltas y fragmentos rocosos caídos. Cuando se detecten síntomas de una falla de gran escala, es pertinente considerar el monitoreo del área usando instrumentos, así como tomar medidas de emergencia, en caso de considerarse necesario.

4.2 ENFOQUE FENOMENOLÓGICO Y ENFOQUE EXPLICATIVO

La instrumentación resulta una herramienta básica en la actividad geotécnica. Para el tema que aquí se trata, su objetivo más importante es el de monitorear el comportamiento de una ladera, a fin de juzgar su seguridad global. Además, permite avanzar en el estado actual del conocimiento, propiciando así mejores soluciones técnicas a las inestabilidades de laderas y a su prevención.

Para que a partir de la instrumentación se conozca realmente el comportamiento de una ladera u otra obra, y se deriven lecciones valiosas, es necesario que se coloquen instrumentos que midan no sólo los efectos, tales como desplazamientos, sino también las causas, a través de la medición de las variables internas o causales de dicho comportamiento. Cuando sólo se recurre a la medición de los efectos, tales como las mediciones topográficas, se adopta un enfoque meramente fenomenológico; es claro que con este planteamiento las respuestas serán parciales al no establecerse la relación entre las causas y los efectos (Dunnicliff, 1988). Entonces, una instrumentación completa requiere no sólo de medios para medir deformaciones o sonidos provocados por los deslizamientos o flujos, sino también registrar las variables causales, tales como las presiones de poro y las aceleraciones en el subsuelo; en este caso se estaría adoptando un enfoque explicativo. Debe reconocerse sin embargo, que para los fines de Protección Civil, el objetivo no es necesariamente explicar o caracterizar los fenómenos naturales, sino más bien aminorar los efectos, para lo que el énfasis estará sólo en la medición y registro de éstos; así, la mayor de las veces únicamente se justificarían enfoques fenomenológicos.

4.3 REQUERIMIENTOS DE UNA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

La instrumentación de una obra geotécnica requiere una planeación cuidadosa (Hanna, 1973; Kovari y Amstad, 1984), siempre enfocada a dar respuestas específicas a aspectos o preguntas específicas acerca de las variables explicativas y de sus efectos. De hecho, Peck (1969 y 1984) distingue a estas acciones como la regla simple y clave para una instrumentación exitosa. La identificación de tales cuestionamientos es por tanto un punto de partida ineludible para establecer las características de la instrumentación por colocar; esto es, si no se sabe qué y dónde medir, incluso sabiendo cómo, lo más probable es que efectivamente no se mida lo que debería medirse. Adicionalmente, la instrumentación debe adecuarse a las condiciones del sitio, al periodo de medición previsto, al rango de valores esperados, y a la precisión requerida en las mediciones. Otro lineamiento muy claro que debe respetarse es que los instrumentos más convenientes sean los más simples; esto es, que si es posible, deberán seleccionarse equipos o transductores mecánicos en vez de los eléctricos, por ejemplo; cuanto más complejos, su posibilidad de falla aumenta. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que esos sensores son de costo elevado, y que los recursos económicos son siempre restringidos; e incluso, usualmente los recursos humanos disponibles se presentan en proporción inversa al grado de sofisticación de los instrumentos.

La planeación de una instrumentación requiere conocimiento, buen juicio, comprensión de los problemas geotécnicos, paciencia e imaginación. Exige realizar un diagnóstico de cómo funciona una ladera y de cómo eventualmente pudiera fallar. Sólo así será posible seleccionar convenientemente las características y el tipo de instrumentos y definir en qué posición ubicarlos. En ello deberá también respetarse un principio básico de toda medición, en el sentido de buscar que la presencia del propio sensor no altere sensiblemente las variables que está midiendo; esto es, que el transductor no genere una discontinuidad o que se convierta en un agente perturbador dentro de una masa de suelo.

Un aspecto que es esencial para llevar a cabo un proyecto de instrumentación, es la participación comprometida y entusiasta de un grupo reducido de profesionales clave. Un proyecto de esta naturaleza resulta muy beneficiado si un grupo pequeño de ingenieros se involucra en todas las etapas del mismo, desde la planeación y el desarrollo del sistema hasta el análisis y la interpretación de los datos y su reporte, pasando por su calibración, integración, colocación, mantenimiento y monitoreo periódico. La atención a un sinnúmero de detalles durante el diseño y la instalación de los instrumentos es vital, esencial e indispensable.

V MONITOREO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASAS INESTABLES

5.1 MEDICIONES TOPOGRÁFICAS

Los métodos basados en la medición de referencias topográficas permiten conocer con exactitud la velocidad y la magnitud de los movimientos superficiales de una masa de suelo o roca. Estos métodos permiten monitorear una área que haya mostrado algunos indicios de inestabilidad, con lo cual se puede dar seguimiento a sus desplazamientos, teniendo como referencia bancos fijos ubicados fuera del área inestable; este es el procedimiento más directo para conocer, midiendo sus efectos, la evolución de un potencial deslizamiento. Las mediciones topográficas también nos permiten dar seguimiento a la formación y progresión de grietas que se generan en los hombros de laderas o taludes, y que comúnmente anteceden a las fallas.

El monitoreo topográfico se realiza por nivelación y colimación de referencias superficiales. Este método consiste básicamente en colocar referencias o bancos topográficos (testigos) a lo largo de ejes o líneas longitudinales y transversales dentro del área en movimiento, Fig. 5.1. Es recomendable que estos ejes se establezcan en las direcciones longitudinal (uno al menos por el posible eje del movimiento) y transversal (de ser posible varias líneas). Los puntos testigos del movimiento quedan referidos a bancos fijos (en planta y elevación) localizados en los extremos de esos ejes, fuera del área potencialmente inestable. La ubicación de estos ejes y la cantidad de los puntos de referencia dependen del tamaño del área en estudio y de la posición y cantidad del posible agrietamiento.

Al ubicar un tránsito en un banco extremo del eje y visar el del otro extremo, se establece una línea visual, o de colimación, a la cual se refieren los puntos testigos del movimiento; para esto último basta ir colocando en cada punto una regleta metálica graduada, lo que permitiría detectar desplazamientos laterales al milímetro. A su vez, la elevación de los puntos testigos del movimiento se establece mediante una nivelación o trabajo de altimetría, para lo que se usaría un nivel o el mismo tránsito, nuevamente referidos a los puntos extremos considerados fijos. Es deseable verificar esta última suposición, para lo que se deberá establecer otro punto de control más alejado de la zona inestable.

Una vez definidas la posición y la elevación iniciales de cada punto de referencia, se realizan posteriormente mediciones topográficas periódicas con el fin de conocer la evolución de sus movimientos. La periodicidad de esos levantamientos depende de la velocidad que desarrolle la inestabilidad; de hecho, este monitoreo de los movimientos constituye un medio para prevenir un desastre, ya que dependiendo de esa velocidad, es un medio idóneo para basar un alertamiento, e incluso una alarma generalizada para evacuar alguna zona poblada a la que impactaría esa inestabilidad; más adelante se proporcionan valores de velocidad de movimiento que podrían dar pautas para esos niveles de alertamiento.

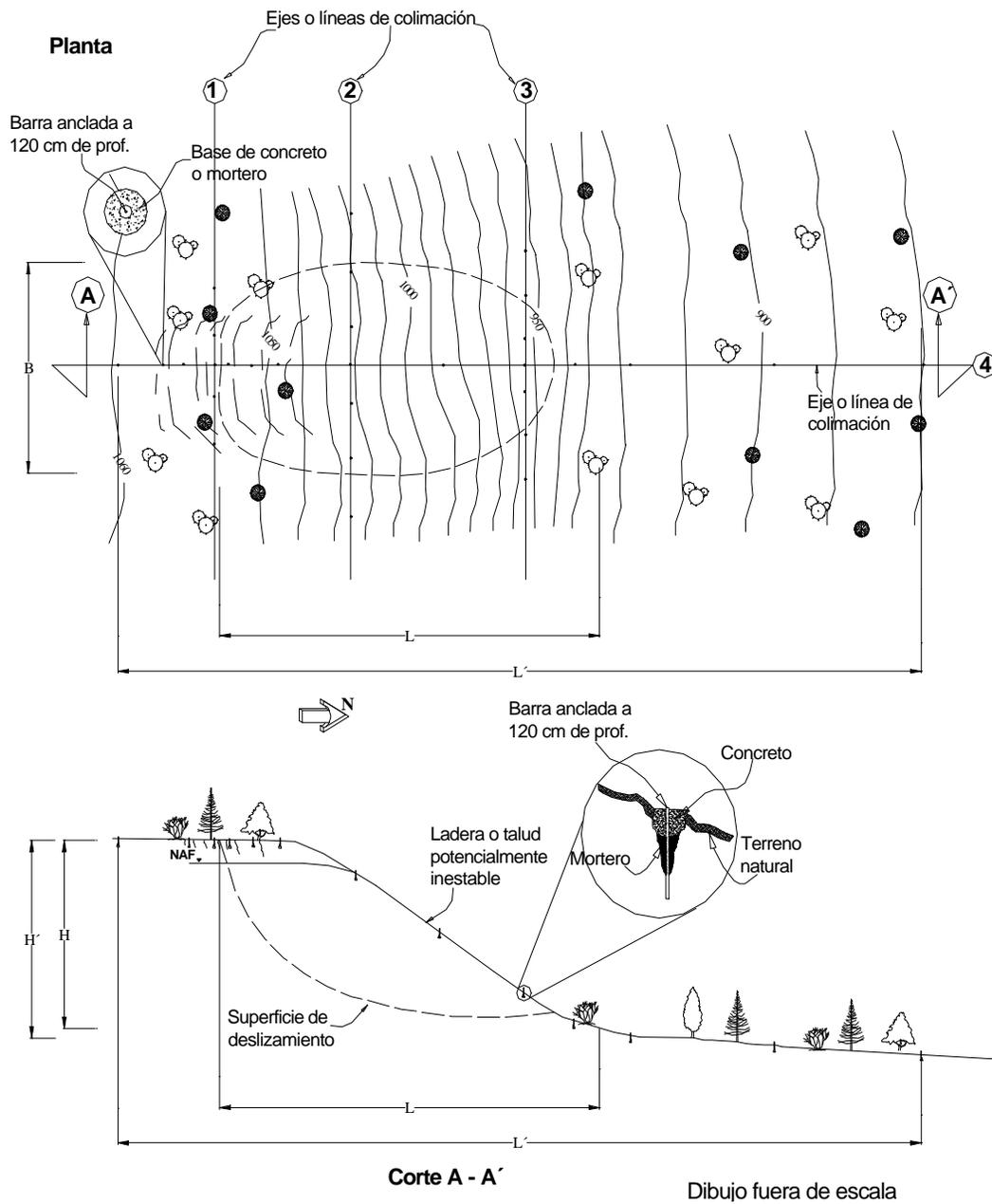


Fig. 5.1 Monitoreo topográfico de referencias superficiales mediante nivelación y colimación

Actualmente existen dispositivos tecnológicamente avanzados que permiten realizar mediciones topográficas con gran exactitud y a costos accesibles. Estos levantamientos requieren de especialistas en topografía, por lo que a nivel estatal de Protección Civil se debería contar con al menos una brigada de topografía, encargada de realizar las mediciones topográficas periódicas antes descritas. Habrá municipios con zonas con problemas de inestabilidad de laderas, que requerirían a esos especialistas, ya sea de su propio personal o de una empresa. El éxito del monitoreo depende en gran medida de la rapidez con que se logren establecer esas líneas de medición, una vez que una ladera exhiba los primeros síntomas de inestabilidad; ello exige una administración ágil y comprometida.

5.2 MONITOREO DEL AGRIETAMIENTO SUPERFICIAL

Generalmente los métodos topográficos son adecuados para el monitoreo superficial y generalizado del movimiento de una masa térrea. Sin embargo, cuando se requieren mediciones locales, tales como para conocer la evolución de un agrietamiento, se puede recurrir a éstas directamente, o bien con métodos mecánicos o eléctricos de instrumentación geotécnica, como los que se describen en los subincisos siguientes.

5.2.1 Uso de cinta y nivel

Este es quizás una de las técnicas de monitoreo más sencillas y de bajo costo que se utilizan para medir la magnitud de los movimientos locales y superficiales de una masa de suelo o roca; particularmente se utiliza para dar seguimiento con el tiempo a la abertura y desnivel que experimentan grietas que se generan en los hombros de laderas y/o taludes antes de su falla. Las grietas principales se orientan en dirección perpendicular al movimiento del área inestable, por lo que la atención de la medición debe centrarse en los componentes horizontal y vertical del desplazamiento, en dirección perpendicular a las grietas.

El método consiste en colocar puntos de referencia, de preferencia barras de metal ancladas en el terreno, en los que se pueda medir su separación, utilizando regletas graduadas o flexómetros, Fig. 5.2. La definición del componente vertical puede ayudarse con el uso de un nivel de albañil, o mediante un nivel de manguera. Así pues, las mediciones periódicas de la separación vertical y horizontal de los puntos de referencia, se comparan con la primera lectura, lo que permitirá conocer el desplazamiento progresivo de las masas en movimiento.

Las mediciones también se pueden realizar de manera directa midiendo la distancia entre los puntos de referencia con un flexómetro. La medición directa de la separación que sufren los puntos de referencia, a través del tiempo, proporciona los elementos suficientes para establecer si una ladera se está moviendo; y con ello establecer la potencialidad de un deslizamiento. De la misma manera, resulta factible medir directamente el desnivel y la separación entre las grietas, siempre y cuando la medición se realice en los mismos puntos de referencia, para conocer la evolución del movimiento de la ladera.

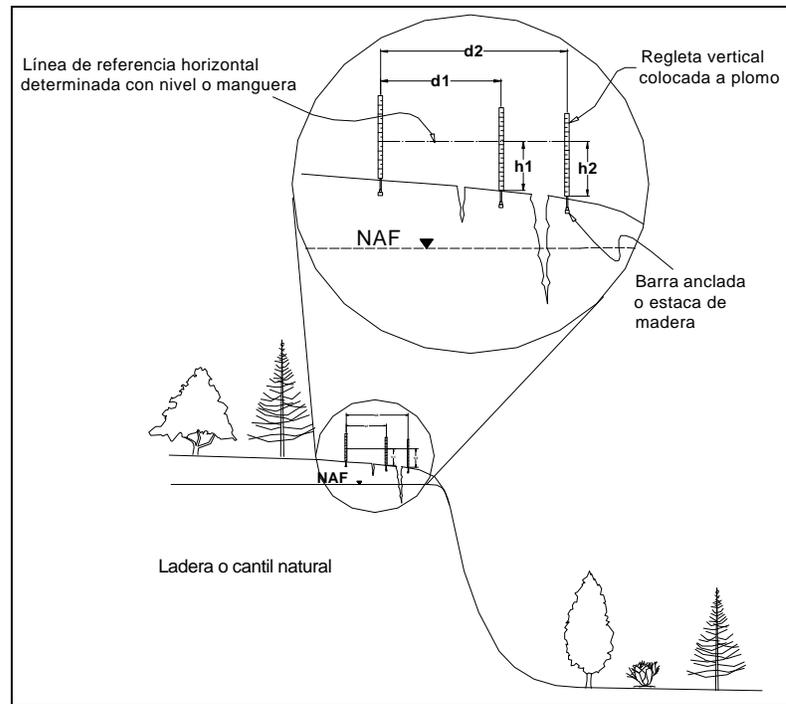


Fig. 5.2 Medición de la separación y desnivel entre masas en movimiento

Cabe señalar que las referencias superficiales deben colocarse de tal manera que queden firmemente ancladas al terreno natural, a una profundidad de 1 a 1.2 m, Fig. 5.3; ello para que los cambios estacionales de la capa más superficial no influyan en las mediciones, y para que las referencias no sean fácilmente movidas o robadas. Dependiendo del material donde se vayan a fijar, cabría utilizar un mortero de cemento para fijarlas. Se recomienda colocar puntos de referencia redundantes que permitan comparar resultados entre sí, y tener certeza sobre el movimiento real del terreno.

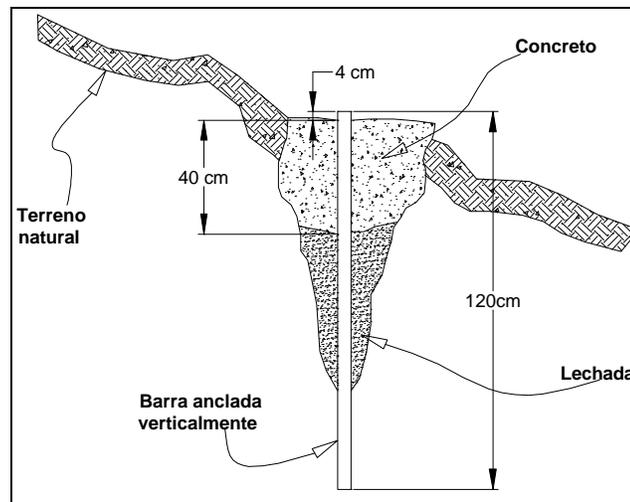


Fig. 5.3 Banco de referencia superficial

5.2.2 Uso de regletas deslizantes

El método consiste en colocar dos regletas de plástico transparentes, paralelas entre sí, fijadas a dos postes anclados a cada lado de una grieta, Fig. 5.4; de esta manera se puede definir la evolución de su abertura en la superficie, al medir los componentes vertical y horizontal del desplazamiento relativo. En una de las regletas se traza una malla reticular de 20 x 20 cm, subdividida milimétricamente si así se desea para mejorar la precisión de las mediciones. En la otra regleta se traza un cursor que se hace coincidir con el centro o cruce de los ejes principales de la malla, durante su colocación. Los movimientos subsiguientes del cursor indican el desplazamiento relativo del terreno con respecto a una lectura previa. El costo de instalación de estas regletas es relativamente bajo, y su operación es bastante sencilla por lo que se estima que no requiere personal especializado para la toma de lecturas.

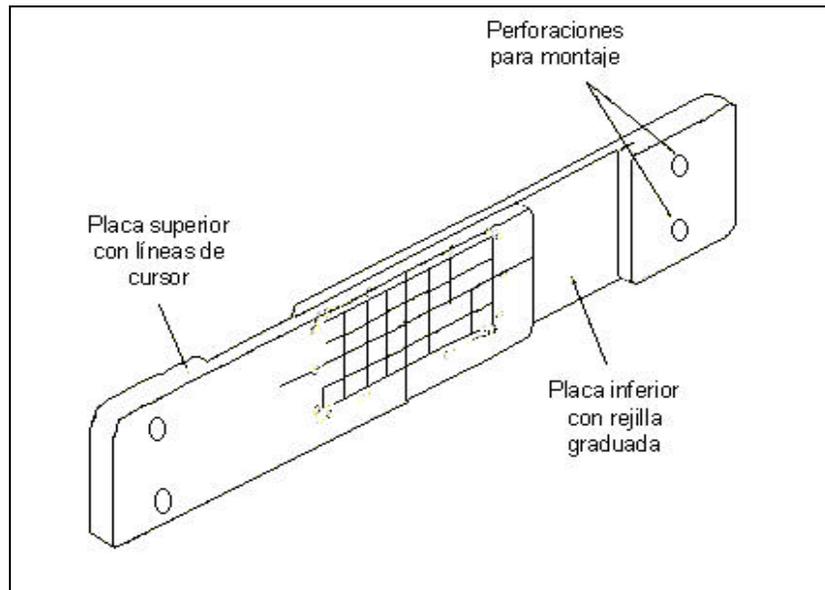


Fig. 5.4 Uso de regletas deslizantes para el monitoreo de grietas superficiales (Dunnicliff, 1993)

5.2.3 Uso de dispositivos basados en alambres y poleas

El monitoreo de la separación y progreso de grietas puede resultar bastante útil para definir si una ladera o talud se encuentra en un estado de falla inminente. Una técnica alternativa a los procedimientos antes descritos, consiste en colocar dispositivos basados en alambres y poleas que se pueden integrar a un sistema de alarma, el cual es activado cuando se alcanza un desplazamiento previamente establecido en una regleta graduada, Fig. 5.5. Resulta particularmente útil cuando la zona por monitorear es de difícil acceso, o se encuentra en zonas francamente peligrosas, y donde se requiere monitorear al avance de grietas de manera permanente.

Sólo se debe cuidar que el material con el que se construya el dispositivo sea resistente a las condiciones ambientales de la zona; y su mantenimiento debe estar orientado a mantener en óptimas condiciones el sistema de disparo y el sistema de alarma. Cabe mencionar que el esquema la Fig. 5.5 sólo tiene un carácter explicativo. Actualmente existen técnicas muy sofisticadas de comunicación a distancia que pueden integrarse a este sistema de monitoreo.

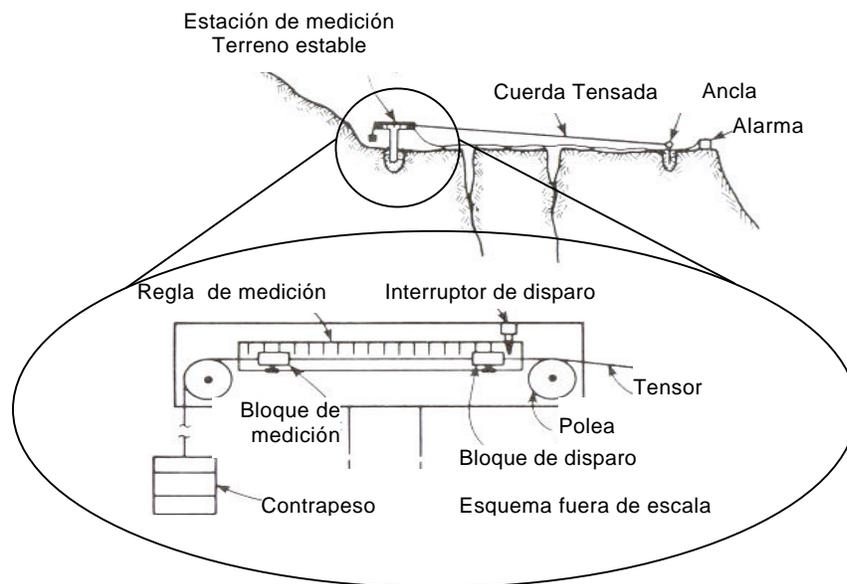


Fig. 5.5 Monitoreo de grietas en el hombro de laderas inestables mediante dispositivos basados en reglas, alambres y poleas (Dunnicliff, 1993)

5.2.4 Uso de dispositivos eléctricos y mecánicos

Una técnica refinada para el monitoreo superficial de grietas consiste en colocar dispositivos electromecánicos, que permitan medir los desplazamientos relativos entre masas en movimiento. La colocación de estos dispositivos resulta muy conveniente cuando la zona que se desea monitorear es de difícil acceso, y/o cuando se requiere establecer un monitoreo continuo y automático del movimiento del terreno para determinar la posibilidad de un deslizamiento en una ladera o talud. En la Fig. 5.6 se muestra una vista de la colocación de un extensómetro eléctrico, el cual se fija en un extremo a la masa estable, y en el otro extremo se coloca una extensión que se une a una barra anclada dentro de la masa en movimiento. De manera similar, en la Fig. 5.7 se presenta la colocación de un extensómetro, en el cual la medición se realiza a través de un deformímetro que es colocado y unido coaxialmente a una cuerda tensada, la cual a su vez se fija a la barra anclada del otro lado del agrietamiento.

La principal ventaja de estos dispositivos es que pueden incorporarse a un sistema de comunicación a distancia, con lo que pueden mantener comunicación continua con un sistema de registro alojado en una caseta de control u oficina remota.

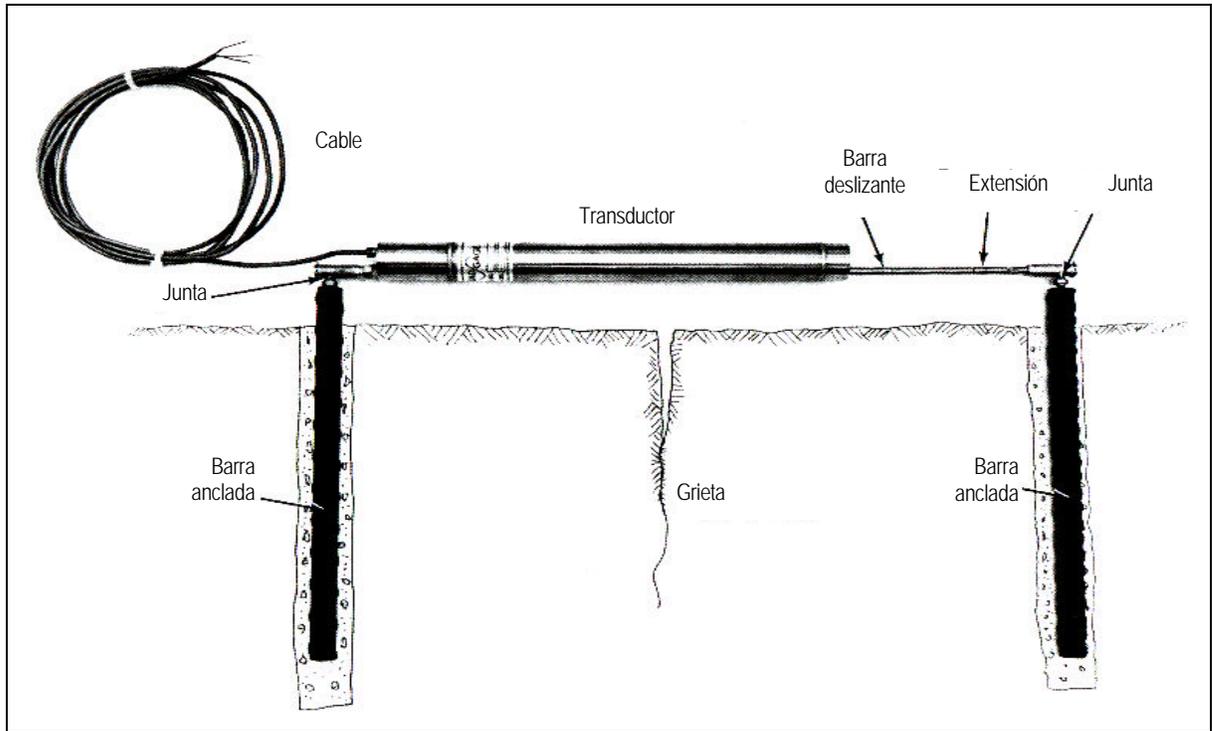


Fig. 5.6 Extensómetro eléctrico para el monitoreo de grietas (Dunnicliff, 1993)

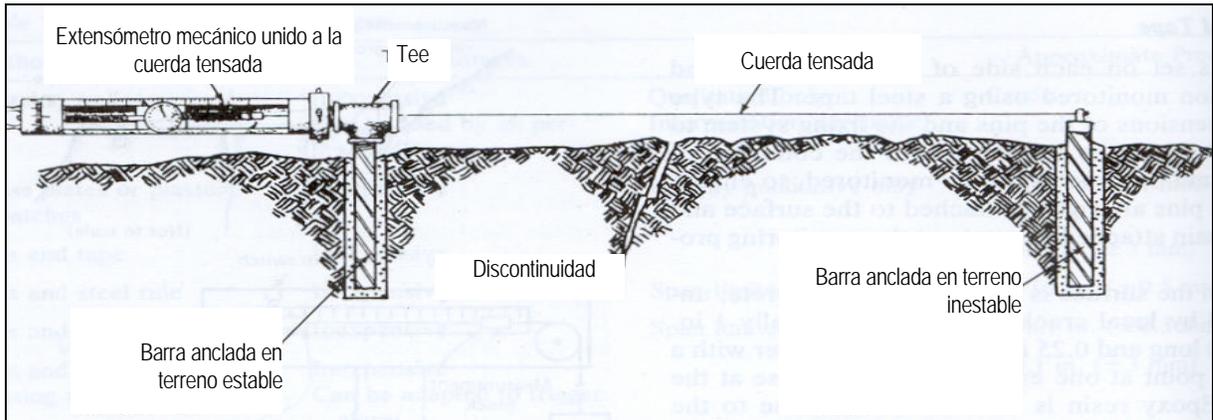


Fig. 5.7 Extensómetro electromecánico para el monitoreo de grietas (Dunnicliff, 1993)

5.3 MONITOREO DE LOS DESPLAZAMIENTOS A PROFUNDIDAD

El monitoreo de las deformaciones a profundidad en laderas inestables permite conocer, entre otros aspectos, la profundidad de la potencial superficie de falla de una ladera o talud, definida por el movimiento relativo de la masa deslizando con respecto a la masa estable remanente.

Para conocer el desplazamiento relativo a profundidad entre dos masas en movimiento, se requiere de la perforación de un pozo o sondeo, a lo largo del cual se instalan tubos que permiten guiar en su interior con cierta dirección a una sonda mecánica o eléctrica, la cual detecta las inclinaciones entre sus apoyos en un plano, respecto a un eje vertical. La profundidad de los puntos de medición se determina al acompañar la sonda con una cinta métrica, con la que se registra ésta respecto a la boca de la perforación. El movimiento lateral de los tubos testigos a través del tiempo, se determina tomando lecturas periódicas que pueden ser mensuales, semanales o diarias, si así lo requiere el problema. Al costo de la perforación se añade el de estos equipos que es relativamente alto, ya que requiere una sonda eléctrica hermética dotada con una longitud de cable suficiente, además de los tubos especiales que se describen más adelante.

5.3.1 Inclinómetro

Los inclinómetros se pueden utilizar prácticamente en cualquier tipo de terreno, desde suelos duros o firmes, hasta suelos blandos. Su utilización permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales del terreno respecto a un eje vertical. Esta técnica requiere la perforación de un pozo de 4" de diámetro, a lo largo del cual se instalan tubos de inclinómetro de 3" de diámetro, los cuales cuentan con cuatro guías por su interior diametralmente opuestas, y perpendiculares entre sí. Al introducir una sonda electrónicamente instrumentada, es posible registrar las inclinaciones a diferentes profundidades en el plano vertical por donde pasan las guías, tal como se muestra en la Fig. 5.8. Al interpretar las inclinaciones que se registran entre los apoyos de la sonda, los que conservan una separación constante, es posible definir la configuración que adquiere ese tubo a esa profundidad. Las diferencias entre las configuraciones que se registren en posteriores mediciones respecto a la inicial (usualmente no vertical), nos proporciona el desplazamiento lateral a la fecha, en el plano y a la profundidad correspondientes.

Para la toma de lecturas la sonda del inclinómetro se introduce en dos ocasiones, una por cada par de guías. En cada inmersión a lo largo de los tubos se realiza un barrido de lecturas que generalmente se hacen de abajo hacia arriba, y a cada 50 cm. En la mayoría de los casos los tubos de inclinómetro se fabrican de PVC y en tramos de 1.5 ó 3 m, Fig. 5.9, aunque en nuestro país también se usan de aluminio. Cada tramo se une con un cople de 20 a 30 cm de longitud, mediante una conexión rápida, o bien con remaches que se efectúan en el campo.

La profundidad a la que se registra una inclinación se determina haciendo acompañar a la sonda de inclinómetro con una cinta métrica metálica, o bien marcando esas distancias en el cable de soporte y de señales electrónicas. Desde luego, la profundidad a la que se instalen los tubos, debe ser suficiente para detectar la posición de la superficie potencial de falla. Durante la instalación de los tubos de inclinómetro se debe procurar que el fondo quede perfectamente fijo en la masa de suelo, lo que permitirá referenciar los movimientos laterales del terreno respecto a la base fija. Ello requiere a su vez que el terreno en el que se fije la base de los tubos sea estable.

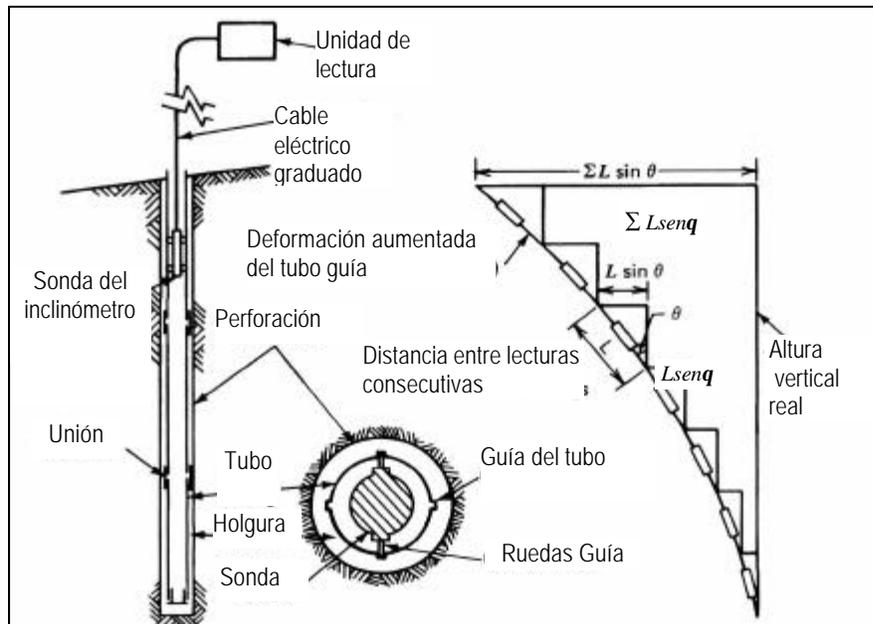


Fig. 5.8 Esquema de instalación e interpretación de mediciones con sonda de inclinómetro (Dunnicliff, 1993)

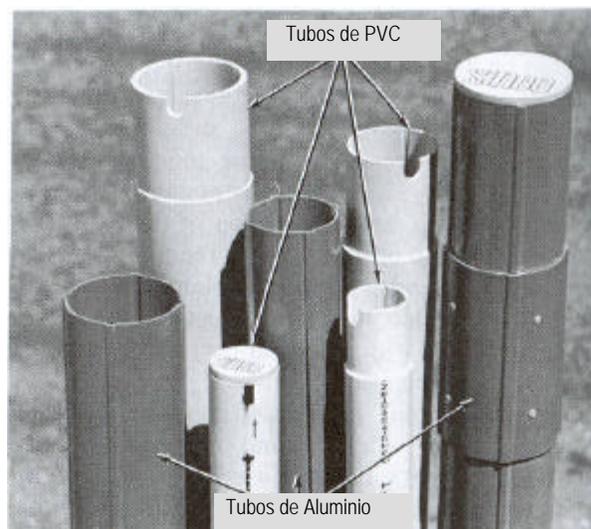


Fig. 5.9 Tubos de inclinómetro (Dunnicliff, 1993)

La sonda de inclinómetro en sí está constituida ya sea por un péndulo con pequeños extensómetros eléctricos (*strain gages*) pegados en su superficie; o bien, por un sensor de aceleración, o servo-acelerómetro, alojados en su interior. La sonda se construye usualmente en aluminio, y debe ser totalmente hermética ya que debe soportar la presión de agua del subsuelo. Los transductores o sensores de la sonda están diseñados especialmente para detectar la inclinación de la sonda, dentro de un intervalo, con respecto a un eje vertical; por ello siempre es recomendable que la

perforación y la colocación de los tubos de inclinómetro sean lo más cercano a la vertical. La sonda de inclinómetro cuenta con un sistema de medición digital en superficie, que consiste de un registrador portátil interconectado con el sensor a través de un cable eléctrico de uso rudo. El cable generalmente es fabricado con marcas exteriores a cada 50 cm que ayudan a conocer la profundidad del sensor en cada momento. Existen en el mercado diferentes equipos con intervalos diversos de medición de inclinación, y de precisión; en la Fig. 5.10 se presenta una vista de todo el conjunto de uno de ellos.

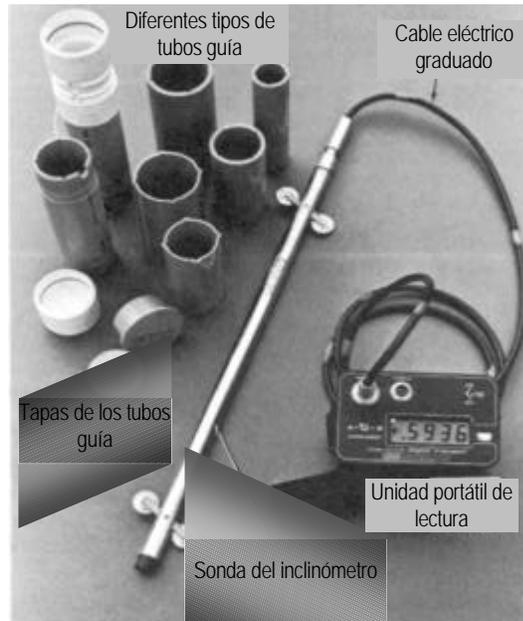


Fig. 5.10 Vista de un inclinómetro y su equipo de medición en superficie (Dunnicliff, 1993)

5.3.2 Dispositivo TDR de reflectometría

El TDR (por las siglas en inglés: Time Domain Reflectometry) es un dispositivo relativamente nuevo que se utiliza para monitorear los movimientos laterales a profundidad en laderas inestables. Su instalación requiere de la perforación de un pozo de 2 a 4" de diámetro, a lo largo del cual se inserta un cable coaxial, fijándolo a la base de la perforación por medio de un contrapeso y rellenando el pozo con una lechada pobre de suelo-cemento. El TDR se puede utilizar tanto en suelos duros o firmes, como en suelos blandos. Como en el caso del inclinómetro, el TDR permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales del terreno respecto a un eje vertical.

El principio básico de funcionamiento del TDR es similar al que se muestra en el esquema de la Fig. 5.11. Con el dispositivo marcado con la letra (a) se envía un pulso eléctrico a través del cable coaxial. Cuando el pulso encuentra un doblez o una discontinuidad en el cable, la señal es reflejada y graficada en la pantalla del dispositivo. De esta manera en la gráfica se muestra un pico que indica la profundidad de la discontinuidad o del doblez del cable coaxial. Este procedimiento resulta muy sencillo ya que sólo toma algunos minutos en hacer la conexión y el disparo, para que la graficación de resultados se muestre casi instantáneamente.

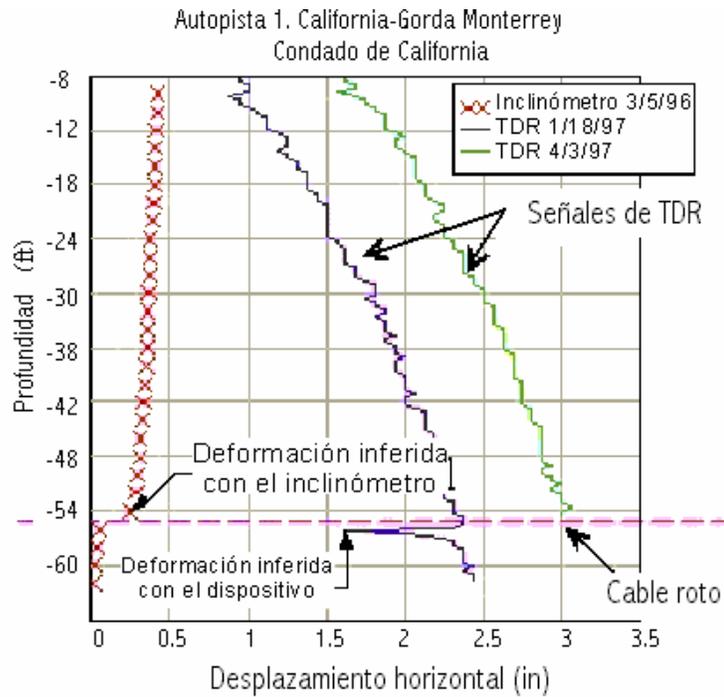
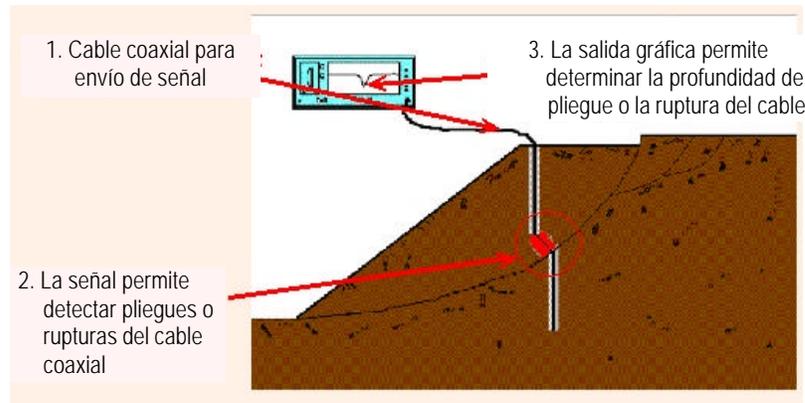


Fig. 5.11 Principio de funcionamiento del dispositivo TDR de reflectometría

La magnitud relativa del movimiento y su velocidad, así como la determinación de la profundidad de la zona donde ocurrió el doblez o la discontinuidad del cable, se pueden determinar de manera precisa con este dispositivo, independientemente de la longitud del cable, ya que el método permite monitorear distancias de hasta 15 km de longitud, según el fabricante. Entre sus virtudes más importantes destaca la posibilidad que tiene para detectar los movimientos laterales de la potencial superficie de falla, en el instante mismo en que se realizan las mediciones en

superficie. Tiene la posibilidad de implementarse a un sistema de comunicación a distancia para registrar las mediciones de manera remota. Por otra parte, la sencillez del método permite instalar varios de ellos en un área establecida, y monitorear todos los dispositivos desde una caseta donde se hacen concurrir todos los cables. Hasta donde conocen los autores, este procedimiento todavía no ha sido utilizado en México. A decir de sus fabricantes, el equipo es de relativo bajo costo.

5.4 CONTROL Y EVALUACIÓN DEL MONITOREO DE LOS DESPLAZAMIENTOS

El monitoreo deberá ejecutarse siguiendo ciertos lineamientos generales como los expresados a continuación:

- De considerarse necesario, las mediciones superficiales mediante instrumentos serían con extensómetros en la cima y en el pie de la ladera, y la definición de la profundidad de la superficie de falla mediante inclinómetro, en la parte central del eje longitudinal. En los casos donde el deslizamiento exceda los 150 m de ancho, se requerirá una segunda línea de medición, colocando en ella arreglos similares a los de aquella línea principal.
- La frecuencia de medición será una vez por semana durante un periodo ordinario, dos a tres veces por semana en una etapa precautoria, y mediciones diarias ante condición de falla inminente.
- La medición debe generalmente continuarse por alrededor de un año, una vez que la actividad de un deslizamiento se detenga. Debe reconfirmarse esta situación, para detectar posibles reactivación durante y después de la temporada de lluvias y huracanes.
- Los resultados del monitoreo son utilizados para evaluar el tamaño y la etapa del movimiento masivo que eventualmente conduciría a su falla. Los movimientos de los deslizamientos tienen un proceso que va desde su etapa temprana, donde se observa acumulación de movimiento, la etapa secundaria cuando se aprecian grietas y movimiento constante, y la etapa final cuando crecen las grietas en abertura y número, lo que conduciría claramente a la falla. Las medidas a tomar en cada etapa son también diferentes, de monitoreo creciente en la etapa temprana, hasta el cierre y evacuación de las zonas de alto riesgo.

VI MEDICIONES PLUVIOMÉTRICAS Y PIEZOMÉTRICAS

6.1 PRINCIPIOS DE LA PLUVIOMETRÍA

Como se ha expuesto en capítulos anteriores, de los factores naturales más importantes que ocasionan la inestabilidad de laderas son las lluvias intensas y prolongadas. La medición del régimen pluviométrico proporciona elementos para conocer las posibles causas de la inestabilidad de laderas de una manera temprana, y así reducir sus efectos.

La importancia de exponer los principios pluviométricos se debe a que la lámina de lluvia en una tormenta llega a tener variaciones importantes en distancias cortas, por lo que es necesario instalar una cantidad considerable de pluviómetros, posiblemente algunos automatizados y otros contruidos de manera austera con el material disponible.

6.1.1 Aparatos de medición

La precipitación pluvial se mide en términos de la altura de la lámina de agua, h_p , y se expresa comúnmente en milímetros. Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte superior, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia. Dichos aparatos se clasifican de acuerdo con la forma en que registran la precipitación en pluviómetros y pluviógrafos.

El pluviómetro consiste comúnmente en un recipiente cilíndrico de lámina de acero con aproximadamente 20 cm de diámetro y 60 cm de altura. La tapa del cilindro es un embudo receptor, el cual conduce el agua hacia una probeta de sección transversal diez veces menor que la de la tapa, como se ve en la Fig. 6.1.

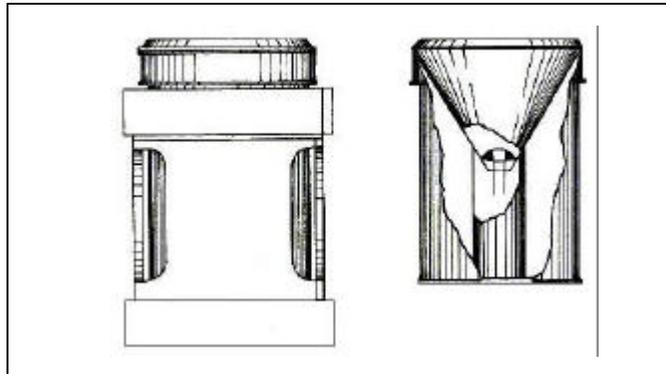


Fig. 6.1 Pluviómetro común

La forma del pluviómetro permite medir la altura de la lluvia en la probeta con una aproximación hasta décimos de milímetro, ya que cada centímetro medido en la probeta corresponde a un milímetro de altura de lluvia; para medirla se saca la probeta y se introduce una regla graduada, con la cual se toma la lectura; generalmente se acostumbra hacer una lectura cada 24 horas.

Cuando el equipo mencionado usa un registrador automático para medir constantemente la lámina en intervalos tan pequeños como un minuto de duración se llama pluviógrafo. Para ello, al equipo se le incorpora un sensor que convierte la intensidad o nivel de la lluvia en una señal medible. El pluviógrafo común lleva un registro de altura de lluvia contra tiempo, cuyo mecanismo está constituido por un embudo receptor que está ligado a un sistema de flotadores, los cuales originan el movimiento de una aguja sobre un papel registrador montado en un sistema de reloj, Fig. 6.2. Como el papel registrador tiene un cierto rango en cuanto a la altura de registro, una vez que la aguja llega al

borde superior automáticamente regresa al borde inferior y sigue registrando, tal como se aprecia en la Fig. 6.3. Utilizando el pluviógrafo se conoce la intensidad de precipitación, i , que se define como la altura de precipitación, h_p , entre el tiempo en que se origina, Δt .



Fig. 6.2 Pluviógrafo común con un sistema de reloj

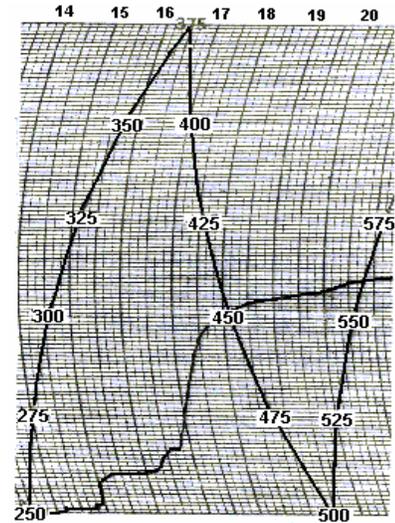


Fig. 6.3 Papel registrador con la Señal impresa del pluviógrafo

6.2 GUÍAS PARA EVENTUALMENTE CONSTRUIR UN PLUVIÓMETRO

Debido a que la variación de la precipitación pluvial en una tormenta llega a ser tan grande como 200 mm durante ocho horas en una distancia de 3 km (Brand, E. 1985), es necesario instrumentar con el mayor número de pluviómetros posibles las zonas con alto riesgo a la inestabilidad de laderas debido a lluvias intensas. Por tal motivo, se presentan a continuación propuestas para diseñar y construir equipo alternativo, con base en los principios de la pluviometría, utilizando el material que se tiene al alcance en aquellos lugares donde no se dispone de los recursos adecuados, y que los propios lugareños pueden realizar y monitorear.

6.2.1 Medidor hecho con una botella de refresco

Un pluviómetro puede construirse de manera muy simple y barata si se recurre a material incluso de desecho tal como una botella plástica de refresco de dos litros; su construcción es muy sencilla y se realiza de la forma siguiente:

- Cortar la botella de plástico en la zona que cambia de la forma de cilindro hueco a una de cono invertido.
- Invertir la parte superior de la botella y sellar el filo de la unión con cinta *masking tape*, esto ayuda a que el agua adentro del medidor no se evapore.
- Llenar el fondo de la botella con agua, justo hasta la parte alta del pie; este nivel se convertirá en el nivel cero de la lámina de lluvia en el medidor.
- Señalar una marca para la línea cero en mm; ello se puede hacer sobre una cinta o etiqueta pegada a la botella.

- Usar la regla para marcar la altura de la lámina de agua en mm, a partir de la línea cero. De esta forma el medidor de lluvia está listo para que se coloque en un lugar seguro, abierto a la lluvia y donde no sea golpeado ó maltratado. Para el caso podrá recurrirse al soporte descrito en el subinciso siguiente.

6.2.2 Medidor de vaso con soporte

Un vaso de vidrio o plástico con forma cilíndrica puede servir como pluviómetro portátil, para medir rápidamente la lámina de agua en cualquier lugar que así se desee; no es tan exacto como un equipo diseñado para este fin, pero si puede dar una lectura razonable. Para evitar que se lo lleve el viento se debe construir un soporte de alambre y fijarlo con clavos a una cerca o poste de madera, el vaciado es manual y debe hacerse cada vez que el nivel del agua llegue a la última línea de la escala. Para construirlo se necesita alambre, martillo, clavos, regla y cinta masking tape y seguir los pasos que a continuación se presentan:

- Con el alambre construir un soporte como el de la Fig. 6.4, de forma tal que entre justo el vaso.
- Poner agua al recipiente hasta la parte alta del pie y marcar la línea cero.
- Con la regla marcar a partir de la línea cero la escala en milímetros.
- Fijar con clavos el soporte sobre una cerca de madera e introducir el recipiente.

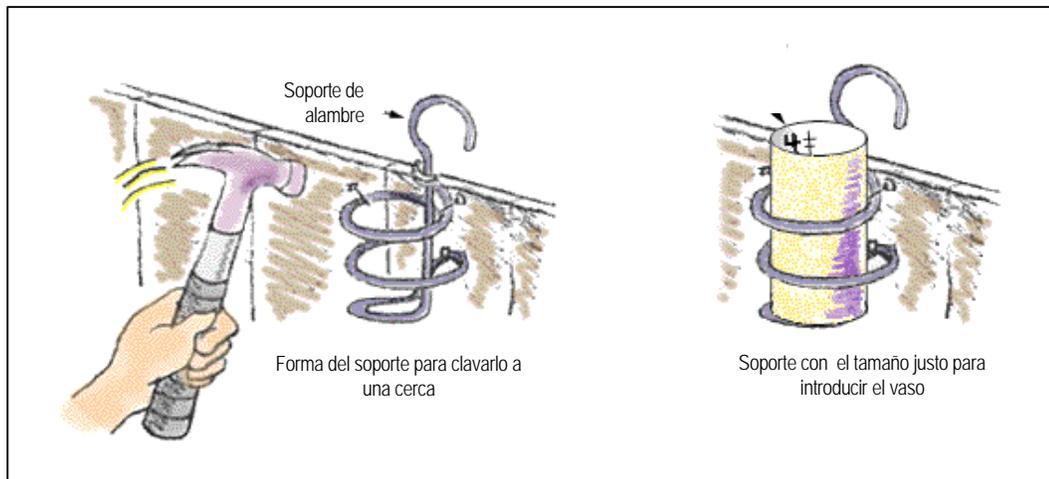


Fig. 6. 4 Esquema del medidor con soporte

6.3 MONITOREO DE PLUVIÓMETROS Y POSIBLE AUTOMATIZACIÓN

Para tener datos confiables del monitoreo se deben ubicar los equipos en lugares abiertos y seguros, de tal forma que no se volteen ni se rompan. Debe haber una persona que se encargue de llevar el control de la cantidad de agua que se capta, revisando periódicamente el nivel del agua del recipiente y tomando lecturas cada 12 ó 24 horas; la organización de los datos debe hacerse por semanas, meses y años.

Seguramente habrá lugares en los que se cuente con los recursos para adquirir pluviógrafos, incluso automatizados, que registren las lecturas y las vayan guardando en una memoria. De este tipo de pluviógrafos existen en el mercado una gran variedad con costos diferentes; a continuación se presentan algunas opciones.

6.3.1 Pluviógrafo RRG-1

Los datos de la lámina de lluvia pueden ser monitoreados desde el pluviómetro RRG-1 con una computadora laptop, conectándola directamente a la tarjeta analógica digital o a control remoto por teléfono ó radio módem.

El pluviógrafo RRG-1 incluye una memoria de datos, un recipiente como medidor de lluvia, soporte, caseta, base de aluminio y conexiones del hardware, ver Fig.6.5. La memoria de datos puede guardar registros de por lo menos 62 días de información de lluvia por horas. Los elementos electrónicos están en el interior de un vaso sellado, para cubrirlos y protegerlos contra relámpagos que inducen descargas de alto voltaje.

Para obtener mayor información al respecto puede consultarse la dirección electrónica siguiente: http://www.ftsinc.com/Sensor/recording_rain_gauge.htm.



Fig. 6.5 Pluviógrafo RRG-1

6.3.2 Pluviógrafo RGR-122

Con el pluviómetro RGR-122 se pueden monitorear los datos de los niveles de lluvia con distancias no mayores a 90 m. La transmisión de los datos se hace con ondas de radio, las cuales tienen la peculiaridad de que la información se envía del radio al recipiente sin tener una línea de vista o directa de comunicación. Dicho equipo guarda los datos de la lluvia diaria, anual y el total de 9 días, y tiene una alarma programable para alertar cuando se alcanza el umbral de lluvia establecido.

También tiene un recipiente que se vacía automáticamente cada vez que se llena, y un medidor interno de temperatura que guarda las lecturas extremas del día en una memoria, Fig. 6.6. Para mayor información sobre este equipo, consultar la pagina <http://www.bikeworld.com/oregon/rgr122.htm>.



Fig. 6.6 Fotografía del pluviógrafo RGR-122

6.3.3 Descripción de una estación pluviométrica del CENAPRED

A continuación se describe una de las estaciones pluviométricas que forman, junto con estaciones hidrométricas, el sistema de alerta hidrometeorológica de Acapulco, Guerrero, integrada por investigadores del CENAPRED.

Las estaciones de registro de precipitación fueron diseñadas para que trabajen de manera remota e inteligente, con un procesador que controla, mide y registra los datos de la precipitación y además los almacena temporalmente en una memoria. Una vez que los datos son recolectados, se guardan en un archivo para su proceso y análisis por las computadoras. Cada estación consta de un pluviómetro, un panel solar, una batería, una antena y un módulo electrónico de registro y control. El pluviómetro es del tipo balancín y está constituido por un sensor de precipitación, un circuito electrónico que almacena los datos proporcionados por el sensor y un contador electromecánico, Fig. 6.7.



Fig. 6.7 Pluviómetro del tipo balancín

El pluviómetro capta el agua en un recipiente cilíndrico y la conduce por un embudo a un balancín con dos vertedores; cuando el peso del agua que llena uno de los vertedores llega a una cierta cantidad, el balancín pierde el equilibrio provocando que se vierta el agua y quede en posición para que la capte el otro vertedor. Con cada movimiento del balancín se activa un interruptor que produce una señal, la cual queda gravada como pulso o cuenta en una tarjeta de control y registro; cada pulso representa una cierta cantidad de lámina de lluvia medida en milímetros. Los pluviómetros utilizados fueron calibrados para producir un balanceo o pulso cada 0.25 mm de lluvia; por tanto, para obtener la precipitación se suman los pulsos y se multiplican por 0.25 mm. El equipo cuenta con una batería, la celda solar y el circuito que regula la carga del voltaje; estos elementos son para garantizar el suministro de energía permanentemente y que ésta sea independiente de la línea comercial. Un esquema de los equipos y su instalación se muestra en la Fig. 6.8.

Una vez medida y registrada la precipitación acumulada y la intensidad de la lluvia, se envía la información por telemetría a un puesto central de registro. En este lugar se procesan los datos con base en los modelos de lluvia-escurrimiento, usados para estimar los gastos de agua esperados en las zonas vulnerables a inundaciones. Con dichos modelos se obtienen los niveles de precipitación que se comparan con el umbral establecido de lluvia. En el caso de que los niveles rebasen al umbral establecido se activan alarmas que ponen en marcha planes de emergencia preestablecidos, a fin de evitar daños por la posible ocurrencia de inundaciones.

De establecerse por regiones una relación entre historia de precipitación y ocurrencia de deslizamientos de suelos, este mismo sistema que está orientado en principio a alertar a las zonas bajas acerca de inundaciones, podría ser muy útil para prevenir a las zonas más altas y escarpadas de posibles movimientos de avalanchas de suelos y rocas, o de francos deslizamientos.

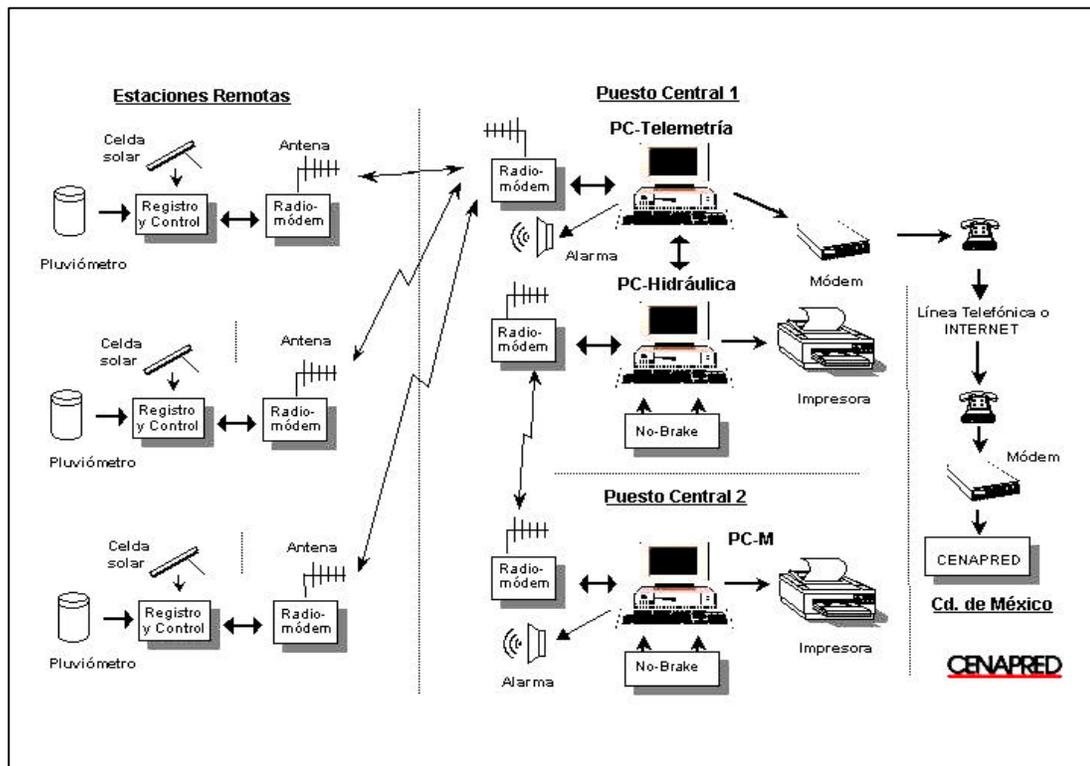


Fig. 6.8 Diagrama de bloques del sistema de medición y alertamiento

Cada estación se colocó en un sitio seleccionado con base en estudios hidrológicos y topográficos, así como para tener enlaces de telemetría; éstos requieren que haya línea visual entre los sitios que se van a comunicar, o sea que no haya obstáculos que interfirieran en la transmisión y recepción de datos. Para proteger el equipo, en algunos casos fue necesario construir casetas, donde los aparatos se instalaron en la azotea sobre bases de concreto, Fig. 6.9.

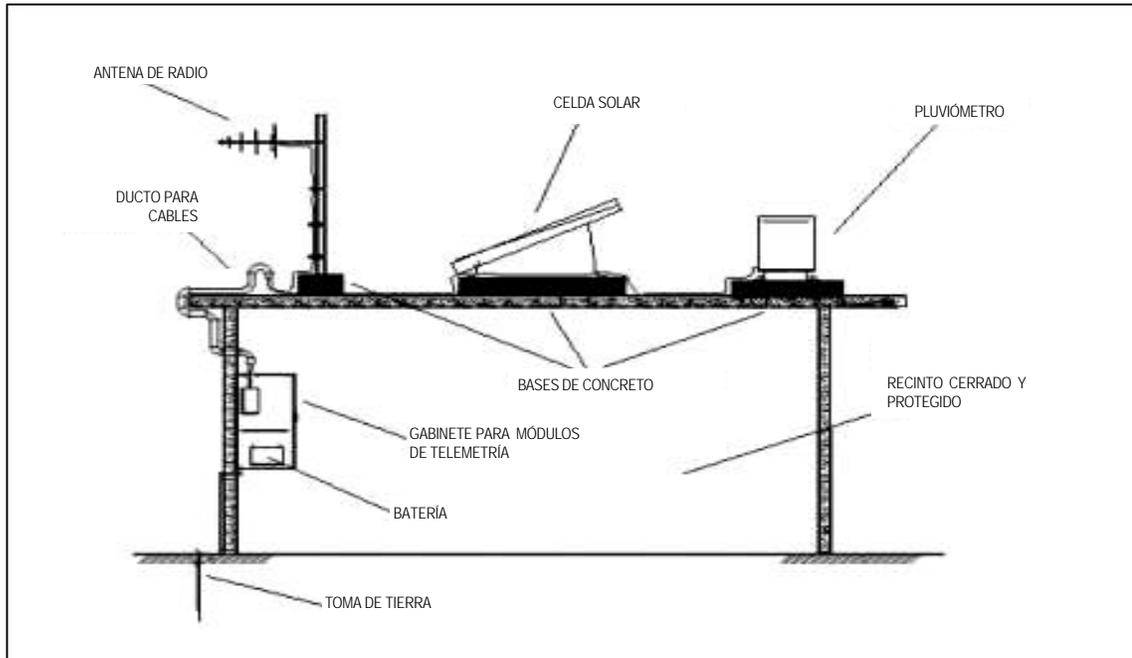


Fig. 6.9 Esquema de los equipos y su instalación

La estación pluviométrica descrita en los párrafos anteriores, esta construida en el CENAPRED para cubrir las necesidades y objetivos del mismo.

6.3.4 Análisis de los registros de lluvias

El hietograma es una gráfica que se genera a partir de los registros de pluviógrafos o de datos de pluviómetros que muestra cómo varía la lámina, h_p , de la lluvia para cierto intervalo de tiempo, Δt ; el área bajo el hietograma representa la intensidad de la lluvia. Para obtener el hietograma de una tormenta primero se debe definir lapso de tiempo para el cual se quiere realizar, que puede ser de 2, 4, 6 y 12 h; luego se calcula para cada intervalo la altura de lluvia registrada en ese lapso. Para calcular un hietograma se usan los registros de los pluviógrafos para intervalos menores a 12 h y los pluviómetros para iguales o mayores; en estos últimos se acostumbra generalmente hacer una lectura cada 24 y rara vez cada 12 h. En la Fig. 6.10 se presenta el registro de una tormenta que duró 12 horas, y en la Fig. 6.11, su hietograma construido con $\Delta t=2$ h.

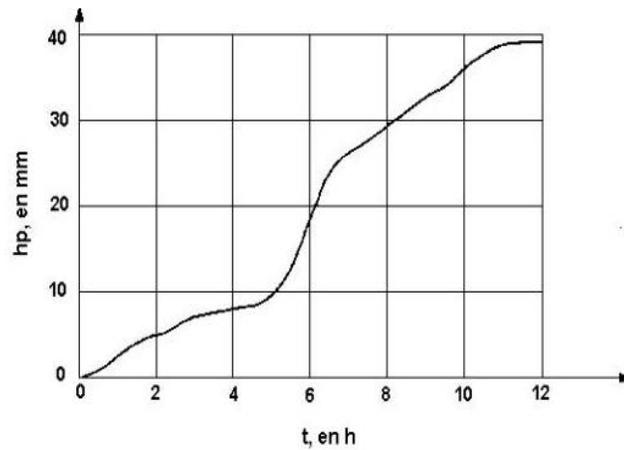


Fig. 6.10 Registro de una tormenta con duración de 12 horas

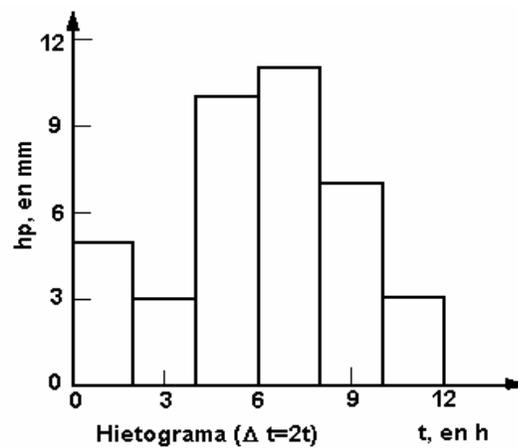


Fig. 6.11 Hietograma para lapsos de dos horas ($Dt = 2h$).

Para conocer la altura de precipitación media en una zona, en un periodo determinado de tiempo se tienen tres criterios; estos son:

a) *Promedio aritmético*.- Se suma la altura de lluvia registrada en un cierto tiempo de cada una de las estaciones localizadas dentro de la zona y se divide entre el número total de estaciones. La exactitud de este criterio es mayor conforme se tienen más estaciones; sin embargo, es el más impreciso y el único que no precisa la distribución de la precipitación, ya que ignora la ubicación de las estaciones.

b) *Método de Thiessen*.- En este método es necesario conocer la localización de las estaciones dentro de la zona en estudio, ya que para su aplicación se requiere delimitar la zona de influencia de cada una de ellas. Para determinar dicha zona primero se trazan triángulos que ligan las estaciones más próximas entre sí, ver las líneas punteadas de la Fig. 6.12; posteriormente se trazan líneas (bisectrices) que atraviesan perpendicularmente los lados de los triángulos en

su punto medio y se prolongan hasta que se intersecan entre sí, ver líneas continuas de la Fig. 6.12; la intercepción de dichas líneas forman polígonos, y cada uno de ellos contiene una estación.



Fig. 6.12 Diagrama que explica el método de Thiessen

Por lo tanto, la altura de precipitación media es:

$$hp_m = \frac{\sum_{i=1}^n hp_i A_i}{A} = \sum_{i=1}^n hp_i \frac{A_i}{A}$$

donde

A área total de la zona, en km²

A_i área total tributaria de la estación i, en km²

hp_i altura de precipitación registrada en la estación i, en mm

hp_m altura de precipitación media en la zona en estudio, en mm

n número de estaciones localizadas dentro de la zona

c) *Método de las isoyetas.*- Para usar este método se necesita un plano de curvas que unan puntos de igual precipitación, llamadas isoyetas, de las diferentes estaciones de la zona en estudio; desde luego, cuanto mayor sea el número de estaciones dentro de la zona en estudio, mayor será la aproximación con la cual se trace el plano de isoyetas.

Para calcular la altura de precipitación media en una determinada zona, se usa la ecuación anterior, pero en este caso A_i corresponde al área entre isoyetas, hpi es la altura de precipitación media entre dos isoyetas y n el número de áreas entre isoyetas.

6.4 MONITOREO DE LA PRESIÓN DEL AGUA EN EL SUBSUELO

Como se ha mencionado en el capítulo 3 de esta guía, las fluctuaciones en los niveles del agua dentro del terreno, provocadas por las variaciones estacionales y los cambios climáticos, generan diferentes estados de esfuerzos en la masa del suelo.

En tiempos de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, lo que provoca presión negativa en el agua contenida en sus poros, favoreciendo con ello el aumento de su resistencia cortante. La presión negativa, succión o presión mátrica en el agua contenida en los poros del subsuelo, se genera cuando el agua se adhiere y es atraída hacia las partículas del suelo. A esta presión negativa contribuyen a) el fenómeno de capilaridad que ocurre en los espacios “capilares” o “pequeños poros entre partículas” del suelo; y, b) el fenómeno de adsorción que se establece entre las partículas minerales cargadas eléctricamente, y el agua que las rodea. Los tensiómetros o sensores de succión son los instrumentos que se utilizan para medir las tensiones que se generan en el agua atrapada en los espacios capilares de una masa de suelo.

Con la llegada de las lluvias, la succión o presión negativa en el agua contenida en el subsuelo se pierde, e incluso se genera una presión positiva (presión de poro). Este aumento de la presión de poro reduce la resistencia del subsuelo favoreciendo la inestabilidad de las laderas. Ello se debe primordialmente a que la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos disminuye proporcionalmente con el aumento de la presión de poro, de acuerdo con el principio fundamental de los esfuerzos efectivos.

Por lo anterior, el monitoreo de la succión, y principalmente de la presión de poro, resultan indispensables para conocer la variación de la resistencia de los suelos en la potencial superficie de falla, y con ello prevenir la inestabilidad de las laderas. Existen diversos dispositivos de gran precisión que permiten medir las variaciones de la succión y de la presión de poro in-situ, para prácticamente cualquier tipo de terreno.

6.4.1 Sensores de succión

Un tensiómetro consiste de un tubo hermético con una punta de cerámica porosa en la base, un manómetro cerca de la tapa y una tapa-sello hermética, Fig. 6.13. Cuando el tensiómetro se llena con agua y se inserta en el suelo, el agua se puede mover dentro y fuera del tubo a través de los poros de la punta. Conforme se va secando el suelo y el agua se mueve hacia fuera del tensiómetro, se crea un vacío dentro del tubo que se mide en el manómetro ubicado en la superficie cerca de la tapa del tensiómetro. Cuando el vacío generado por el movimiento del agua hacia fuera del tensiómetro es igual a la succión del suelo, el agua deja de fluir, y en ese momento el manómetro mide la tensión o succión del suelo.



Fig. 6.13 Elementos que componen un tensiómetro
 (www.sdec-france.com/us/index.html)

Si el suelo continúa secándose, el agua seguirá moviéndose hacia afuera del tensiómetro hasta que alcance el nivel de vacío más alto. Cuando se agrega agua al suelo se lleva a cabo el proceso opuesto; el suelo ve reducida su succión y el agua es devuelta al tensiómetro a través de los poros de la punta de cerámica, hasta que el nivel de vacío se reduce a un valor igual al de la succión más baja, por lo que en este punto el movimiento del agua se detiene.

En la actualidad existe una amplia variedad de tensiómetros electrónicos de gran precisión, Fig. 6.14, cuyo principio de funcionamiento es exactamente igual al descrito anteriormente. Algunos de ellos tienen la virtud de contar con sensores electrónicos que permiten compensar las variaciones de presión por temperatura, obtener lecturas en forma digital, y se pueden interconectar a un sistema de monitoreo a distancia. Otro aspecto a tomar en cuenta en los tensiómetros electrónicos consiste en su fácil instalación, aun para profundidades mayores a 10 m.

En el mercado existen diferentes tipos de tensiómetros equipados con tramos de tubo flexible que, entre otras ventajas, les permite seguir los movimientos del terreno sin perder su precisión. En la Figura 6.15 se muestran diferentes modelos de tensiómetros equipados con tubo flexible. En la Fig. 6.16 se muestra el arreglo esquemático de un tensiómetro electrónico y las vistas de un tensiómetro con su dispositivo de medición digital.

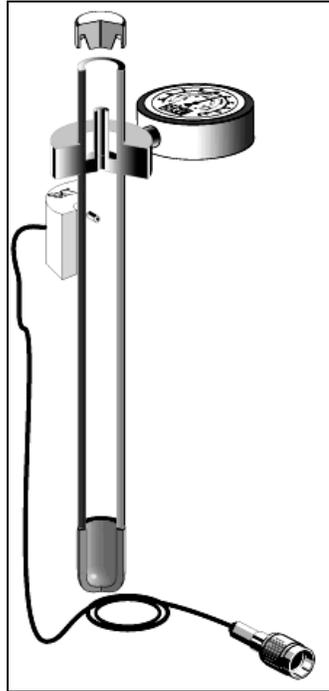


Fig. 6.14 Tensiómetro electrónico con manómetro
(www.sdec-france.com/as/index.html)

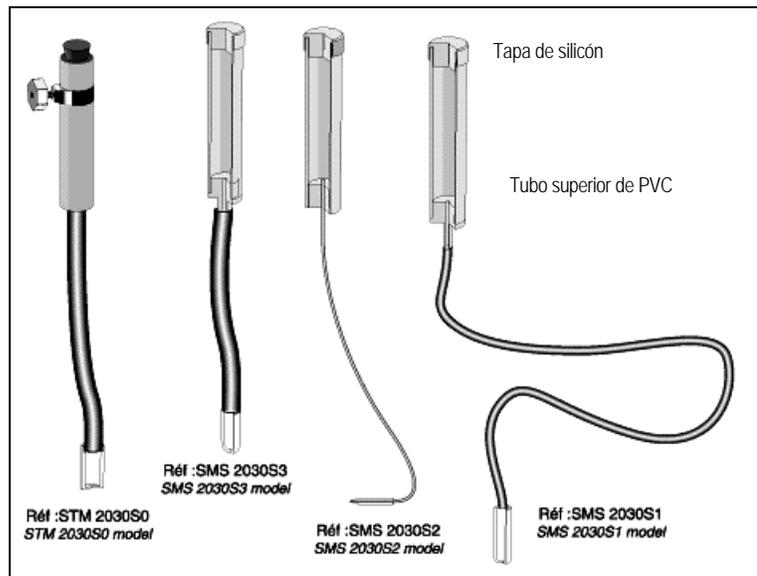


Fig. 6.15 Tensiómetros de cuerpo elástico y cabeza porosa de cerámica
(www.sdec-france.com/as/index.html)



Fig. 6.16 Tensiómetro electrónico y equipo portátil de medición
(www.sdec-france.com/as/index.html)

6.4.2 Piezómetros

En México y en la mayoría de los países del mundo a los equipos que permiten medir la presión de poro positiva in-situ, se les conoce como piezómetros. Al igual que los tensiómetros, los piezómetros son dispositivos que se instalan en el interior de la masa de suelo. Existen varios tipos de piezómetros, de entre los que pueden distinguirse tres grupos principales: de tubo abierto, neumáticos y electrónicos.

Los piezómetros generalmente se colocan dentro de un bulbo poroso confinado en su base y lateralmente por el propio suelo, y en su parte superior, mediante un sello formado artificialmente. Este método de instalación permite que los piezómetros sólo respondan a la presión del agua que se transmite al bulbo poroso en el que se aloja el dispositivo de medición, y no a presiones de agua correspondientes a otras elevaciones. El sello impide la comunicación del dispositivo con el agua que se puede acumular en la perforación realizada para su instalación.

Piezómetros de tubo abierto: Este tipo de piezómetros, conocidos también como piezómetros tipo Casagrande, consisten de un tubo de 1 a 2 pulgadas de diámetro, generalmente de PVC, conectado en uno de sus extremos a un elemento poroso; el cual puede ser un tramo de tubo multiperforado o un pequeño cilindro poroso de cerámica de escasos 10 cm de longitud. Este extremo del tubo se lleva al fondo de una perforación previamente realizada, y el otro extremo se deja al ras o ligeramente por arriba de la boca de la perforación, Fig. 6.17. Posteriormente se coloca un filtro de suelo granular en el espacio dejado entre el elemento poroso y las paredes del fondo de la perforación. La cantidad de material granular que se coloca entre el elemento poroso y las paredes de la perforación debe ser suficiente para cubrir el elemento poroso en toda su longitud, e incluso algunos centímetros arriba. Finalmente, para sellar el bulbo poroso y aislarlo del resto de la perforación, se aplica un sello con bentonita en el espacio ubicado entre el tubo y las paredes de la perforación. Este arreglo permite que el agua del subsuelo, alrededor del bulbo, fluya hacia el interior del tubo y ascienda hasta que se establezca a un nivel equivalente a la presión a la que está sujeta el agua del suelo a esa profundidad. De esta manera el piezómetro sólo responderá a la presión del agua que se transmite al bulbo, y no a presiones correspondientes a otras elevaciones. En la Fig. 6.18 se observa un dispositivo cuyo elemento poroso está resuelto con un material plástico, al igual que el tubo roscado.

La altura que alcanza el nivel de agua dentro del tubo piezométrico se determina introduciendo por el interior del tubo una sonda eléctrica u ohmímetro, cuyas terminales al hacer contacto con el agua cierran el circuito, generándose un salto brusco de la aguja del medidor. El dispositivo se hace acompañar con una cinta métrica para determinar la profundidad del nivel de agua dentro del tubo. La altura del nivel de agua, equivalente a la presión que tiene el agua del suelo *in-situ* (presión de poro) a la profundidad del bulbo, se determina fácilmente conociendo la profundidad a la que se colocó el bulbo durante su instalación. Así pues, la altura de agua será igual a la diferencia entre la profundidad del bulbo y la profundidad del nivel del agua dentro del tubo.

La principal desventaja de este tipo de piezómetros es su lenta respuesta a cambios de presión del agua, debido a la necesidad de que un volumen relativamente alto de agua entre o salga del elemento poroso, a fin de establecer el equilibrio mediante el correspondiente cambio en la altura de la columna de agua dentro del tubo.

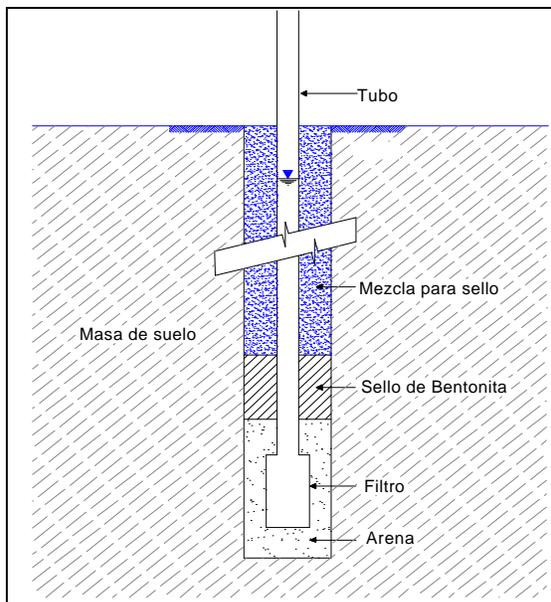


Fig. 6.17 Esquema de un piezómetro de tubo abierto tipo Casagrande, (Dunnicliff, 1993)



Fig. 6.18 Piezómetro de tubo abierto tipo Casagrande con punta porosa plástica (Dunnicliff, 1993)

Piezómetros neumáticos. A fin de hacer más rápida la respuesta de los piezómetros a los cambios de presión en el agua, se han desarrollado otros equipos que requieren flujos y cambios volumétricos mucho menores dentro del aparato. En la Fig. 6.19 se muestra el esquema de un sistema neumático, así como la vista de un sensor de este tipo desarrollado en México. Como ahí se distingue, una delgada lámina o diafragma flexible recibe la presión del agua provocando su deflexión, y con ello la obturación de dos orificios en el lado seco del diafragma. Aplicando una presión neumática controlada, por uno de esos orificios, la presión requerida para separar el diafragma es justamente la presión en el agua, lo que se constata al detectar cierto flujo de aire de retorno por el otro orificio.

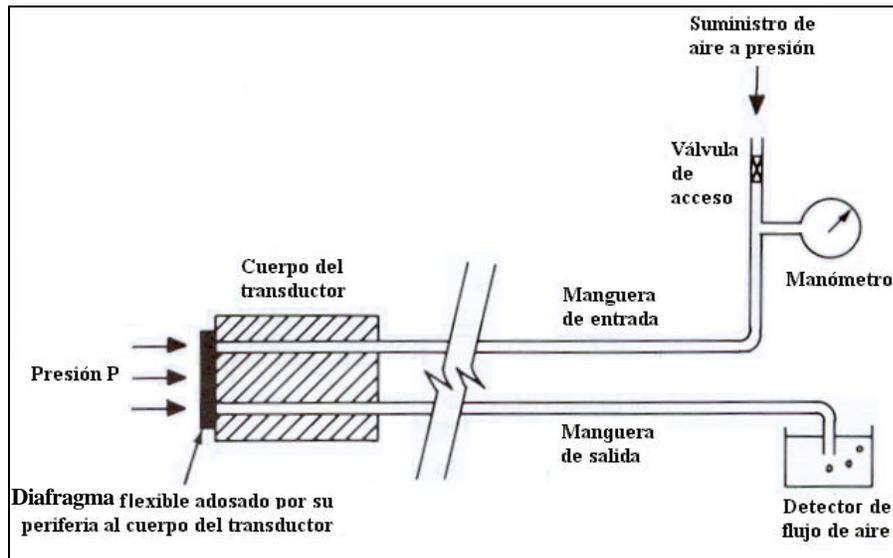


Fig. 6.19 Principio de medición de un piezómetro neumático, (Dunnicliff, 1993)

El sensor neumático va adosado a un elemento poroso que se aloja a la profundidad deseada, de manera similar a lo indicado para los piezómetros de tubo abierto. El sensor se conecta al sistema neumático de medición que se mantiene en la superficie del terreno, mediante mangueras plásticas a través de las que se conduce el aire a presión.

Piezómetros eléctricos: Este tipo de instrumentos guardan cierta similitud con los piezómetros neumáticos. Su diafragma es menos flexible, lo que determina que tengan una muy rápida respuesta a los cambios de presión en el agua, ya que los cambios volumétricos asociados son despreciables. En vez de los orificios para el sistema neumático, las deformaciones del propio diafragma funcionan como elemento de medición de la presión en el agua. Para ello se colocan o integran *strain gages* al diafragma, ya sea resistivos o de cuerda vibrante. Así pues, las deformaciones del diafragma están proporcionalmente relacionadas con los cambios de la presión que ejerce el agua sobre el diafragma, lo que se conoce mediante la respectiva calibración.

La señal de los *strain gages* se transmite a un equipo portátil de medición de microdeformaciones, la que se muestra digitalmente en pantalla. Desde luego la señal de estos sensores pueden ser monitoreados por un sistema automático de adquisición de datos, enviando incluso a distancia esa señal, como se describe en el capítulo 8. Como todos los piezómetros, los sensores electrónicos se colocan en el fondo de una perforación previamente realizada. El cable eléctrico con los conductores necesarios de excitación y respuesta se conducen hasta la superficie, donde se conectan a la unidad portátil de registro, o al sistema de registro.

6.5 APLICACIONES DE MEDICIONES DE PRESIÓN DEL AGUA Y DE PRECIPITACIÓN

Se muestra enseguida un par de casos en los que se han colocado los instrumentos antes descritos. En el primer caso-historia, el objetivo fue estudiar la variación de la precipitación pluvial y la succión en el terreno en una ladera en Malasia (Faisal, 2000). Las succiones fueron medidas con tensiómetros y bloques mátricos o de humedad, instalados a diferentes profundidades; y la precipitación, con un pluviómetro de cubeta automático. Se usaron estos bloques en virtud de que los tensiómetros sólo son capaces de medir valores de succión mátrica inferiores a 1 bar, en tanto que los bloques pueden medir más de 4 bars de presión negativa.

La Fig. 6.20 muestra el arreglo esquemático de la instrumentación de campo, así como un detalle en un sitio de colocación de tensiómetros. Para el monitoreo fue empleado un sistema automático de adquisición de datos (aspecto que se trata en el capítulo 8 de esta Guía), el cual permite un monitoreo prácticamente continuo y que resuelve los problemas de confiabilidad, accesibilidad y seguridad. La lectura de estos transductores fue registrada automáticamente con una periodicidad establecida (10 ó 30 minutos) atendiendo a la rapidez en el cambio de la succión medida. El sistema de adquisición de datos estaba soportado por una unidad de energía solar. La ladera estudiada forma parte de un corte en una autopista en Malasia, constituida por suelos residuales; en la Fig 6.21 se presenta su sección transversal y el arreglo de los sensores.

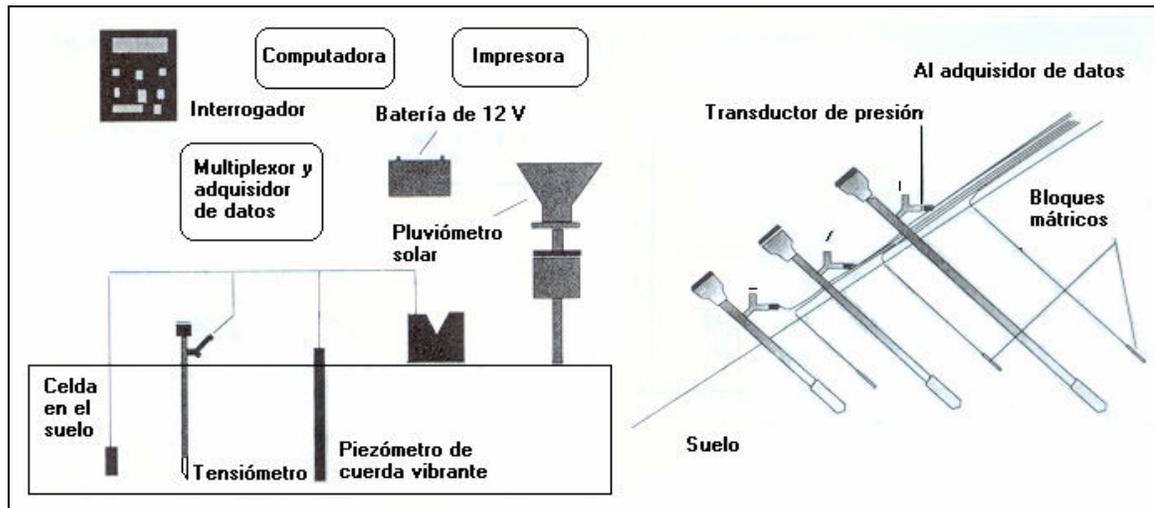


Fig. 6.20 Esquema de la instrumentación de una ladera en Malasia (Faisal, 2000)

La Fig. 6.22 da cuenta de las respuestas de los tensiómetros ubicados en la berma 4. Se distingue que las lecturas de succión para los sensores más superficiales son mayores que las de los relativamente más profundos. Además, la respuesta debida a la lluvia es menos pronunciada conforme aumenta la profundidad; así mismo, al ocurrir un cierto lapso sin lluvia, se aprecia un aumento de succión, y una reducción repentina con la ocurrencia de lluvias. Estos hechos muestran que antes de que se desarrolle presión positiva en el agua, que como se ha visto previamente provoca reducción de resistencia cortante de los suelos al punto de incluso provocar la falla de una ladera, la condición de inestabilidad se inicia con la reducción de la presión negativa o succión. En efecto, debe recordarse que el mecanismo de falla de una ladera comúnmente se inicia con la infiltración de agua de lluvia que causa una reducción de la succión mátrica en la zona de suelo no saturado; y con ello, una disminución de los esfuerzos efectivos.

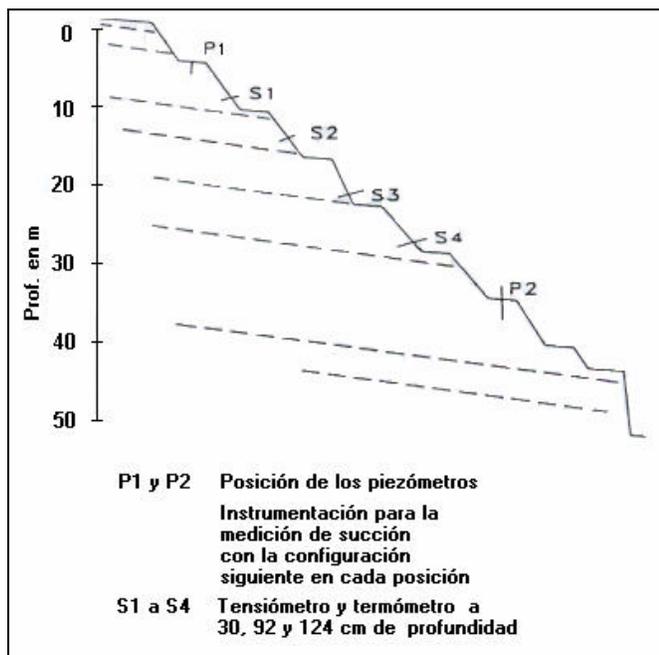


Fig. 6.21 Sección transversal del corte y arreglo de Instrumentos (Faisal, 2000)

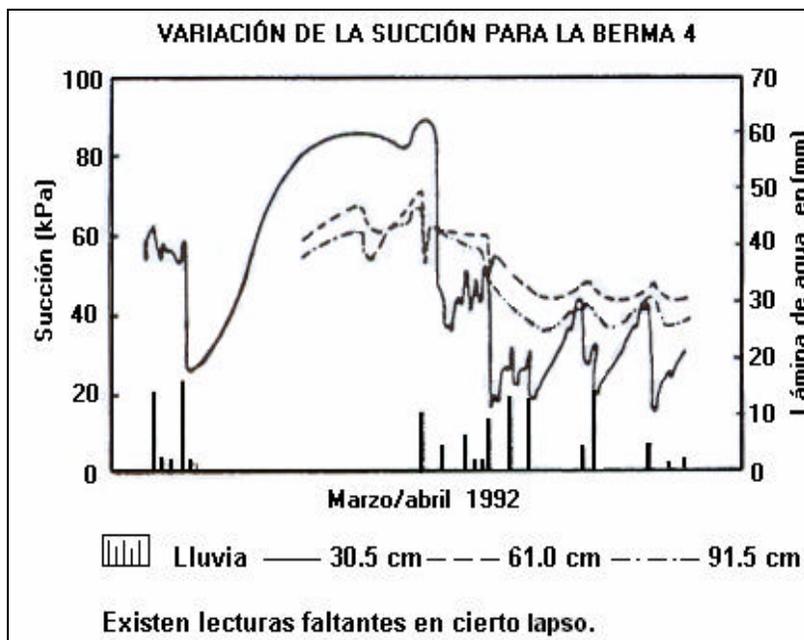


Fig. 6.22 Evolución de la succión mátrica en la berma 4, en el lapso de marzo-abril, 1992 (Faisal, 2000)

En efecto, las mediciones de succión en un segundo caso-historia ubicado en Singapur (Deutscher, 2000) muestran sin duda que el ascenso del nivel freático, resultado de la precipitación pluvial, provoca una disminución de la succión, tal como se muestra en la Fig. 6.23. Estos resultados nos indican también que existen periodos o tiempos clave que deben considerarse en el programa de monitoreo; éstos son:

- Al final de un periodo seco prolongado, cuando las presiones en el agua se encuentran en un mínimo (esto es, estabilidad de la ladera en un máximo).
- Siguiendo un evento o una serie de eventos de lluvias intensas, cuando la presión en el agua alcanza un máximo (o sea, estabilidad de la ladera en un mínimo).
- Durante un evento de lluvia significativa, cuando la distribución de la presión en el agua se encuentra en transición.

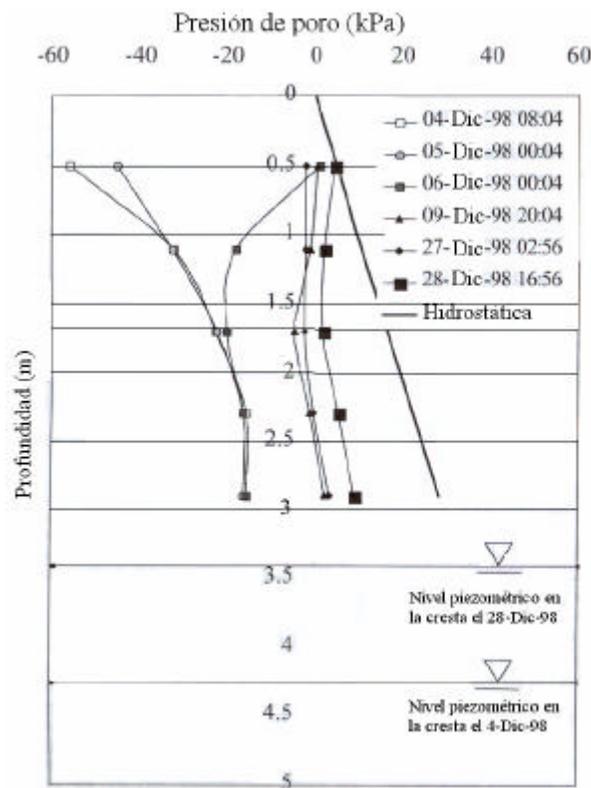


Fig. 6.23 Evolución de la presión en el agua del suelo de una ladera en Singapur (Deutscher, 2000)

VII ACELERÓMETROS Y FUENTES DE INFORMACIÓN SÍSMICA

7.1 INESTABILIDAD DE LADERAS DISPARADAS POR SISMOS

Se ha distinguido en el capítulo que los sismos intensos suelen ser desencadenadores de inestabilidad de laderas. Sus efectos pueden resultar desastrosos cuando se tienen núcleos habitacionales al pie o cerca de una ladera potencialmente inestable; tal fue el caso del flujo y deslizamiento de la ladera conocida como “Las Colinas” en Santa Tecla, Nueva San Salvador, El Salvador C.A., (Mendoza *et al*, 2001) donde se perdieron más de medio millar de vidas humanas al ocurrir el sismo del 11 de enero del 2001.

El monitoreo sísmico con fines de alertamiento ante flujos o deslizamientos de laderas no es factible. El tiempo que transcurre entre una acción sísmica severa, y una posible inestabilidad (que ocurre cerca de la aceleración máxima) imposibilita cualquier reacción de la población. Por ello, sólo puede orientarse la instrumentación sísmica de una región, en este orden de ideas, para analizar la estabilidad de laderas y evaluar el riesgo ante un escenario sísmico. Para realizar tal evaluación deberán considerarse no sólo los posibles registros recientes, sino también la sismicidad histórica de la región. De aquí surge la importancia de contar con información fidedigna de registros acelerográficos en nuestro país.

7.2 LA BASE MEXICANA DE DATOS DE SISMOS FUERTES

Con el objeto de facilitar la búsqueda de registros sísmicos a personas interesadas en estudiar e investigar los movimientos ocasionados por el fenómeno sísmico en el territorio mexicano, se ha reunido información acelerográfica en un disco compacto. Para localizar y obtener los datos en el disco se ha sistematizado un programa de computadora que maneja 13,545 registros, que corresponden a los ocurridos de 1962 a 1999.

La instrumentación sísmica se inició al instalar dos acelerógrafos en 1960, como resultado de la necesidad de estudiar el comportamiento destructivo del sismo de San Marcos en 1957 de $M_s=7.5$. Los dos acelerógrafos instalados en la ciudad de México, uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria, obtuvieron los primeros registros en el sismo de Acapulco en 1962. Posteriormente, con 110 instrumentos se registraron los sismos intensos del 19 y 21 de septiembre de 1985 de $M_s=8.1$ y $M_s=7.6$ respectivamente. Actualmente la red de acelerógrafos está integrada por 547 estaciones con 13,545 registros, localizadas en la franja costera del Pacífico, en la zona de subducción mexicana, en la región noreste del país y en ciudades como México, Guadalajara, Acapulco, Puebla y Oaxaca, entre otras.

7.2.1 Base Mexicana de sismos fuertes

Anteriormente la información acelerográfica era manejada de forma parcial e independiente por diferentes instituciones que operaban redes sísmicas, las publicaciones se hacían con diferente formato y estaban sólo al alcance de grupos reducidos de profesionales.

Considerando lo anterior y con el propósito de integrar las instituciones que manejan redes sísmicas, en 1991 se organizó el primer simposio sobre instrumentación sísmica de temblores fuertes que se celebró en la ciudad de México (CENAPRED, 1991), en el que se tuvo como principal conclusión establecer un vínculo entre las instituciones que manejan redes sísmicas. De esta manera en 1992 se formó mediante un acuerdo el grupo de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF) cuyo objetivo es operar, normalizar e integrar la información de las redes sísmicas.

La estructura del grupo de la BMDSF define cómo la parte medular la creación de cuatro bancos de información: el primero condensa todo lo referente a redes, estaciones y la instrumentación asociada, el segundo incluye los datos de los sismos registrados, el tercero integra la información referente a los acelerogramas y el cuarto contiene las series de tiempo-aceleración y procesadas en un formato común (ASA 2.0).

7.2.2 Comité directivo

El comité directivo es el responsable de coordinar las actividades de recolección, compilación, catalogación y difusión de la información que sobre sismos fuerte se registra en México por medio de una integración de una base nacional de datos. El comité está integrado por un representante de cada una de las siguientes instituciones: del Instituto de Ingeniería de la UNAM, de la Subgerencia de Comportamiento de Estructuras de la CFE, del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, de Fundación ICA, de CIRES de la Fundación Javier Barrios Sierra, del Centro Nacional de Prevención de Desastres de la Secretaría de Gobernación, de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, de la Red Inter-universitaria de Instrumentación Sísmica con sede en la Universidad Autónoma Metropolitana y del Servicio Sismológico Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México.

7.2.3 Archivo estándar de aceleración

El archivo estándar de aceleración (ASA) es parte de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF), con un diseño adoptado por la mayoría de las instituciones que operan redes de acelerógrafos en México. Es un archivo con carácter ASCII estándar que puede modificarse en cualquier procesador de textos y es auto-explicativo. Su estructura está integrada en dos partes, una el encabezado y otra para los datos numéricos de aceleración como son título, nombre del archivo, estación e instrumento, datos sobre el sismo, comentarios y datos de aceleración. Los 13,545 archivos de aceleración que comprenden la base de datos han sido convertidos de formato original al denominado estándar de aceleración (ASA 2.0).

7.2.4 Estructura del sistema de acelerogramas en disco compacto

Con la finalidad de difundir la información se ha diseñado un sistema por computadora para el manejo de la información acelerográfica, que facilita la búsqueda y obtención de acelerogramas producidos en México durante el período de 1960 a 1999. Dicha información se encuentra en un disco compacto. La ventaja del disco es su uso mundial en computadoras y la cantidad de datos que puede manejar y almacenar, Fig. 7.1. El sistema está estructurado en dos partes, la primera para presentar una reseña sobre la instrumentación sísmica e información estadística, bibliográfica en México y en general. La otra para el acceso y obtención de los 13,545 registros acelerográficos por medio de un mecanismo de búsqueda que usa los siguientes términos:

- *Sismo*.- busca los registros acelerográficos con la fecha (GMT), hora epicentral, magnitud del sismo y un evento sísmico del catalogo proporcionado.
- *Estación*.- obtiene registros a través de la ubicación por clave única, nombre de la estación, entidad federativa e institución ó coordenadas geográficas.
- *Acelerograma*.- facilita la localización de datos por clave del acelerograma, permitiendo el uso de caracteres comodín y/o aceleración máxima.
- *Combinación*.- se utiliza una mezcla de los parámetros mencionados anteriormente con el fin de localizar registros con características más precisas.

La búsqueda por cualquier término finaliza en una tabla de resultados, en la que se enlistan registros de aceleración que cumplen con las condiciones establecidas y que se les puede aplicar la opción de graficar, guardar ó imprimir.

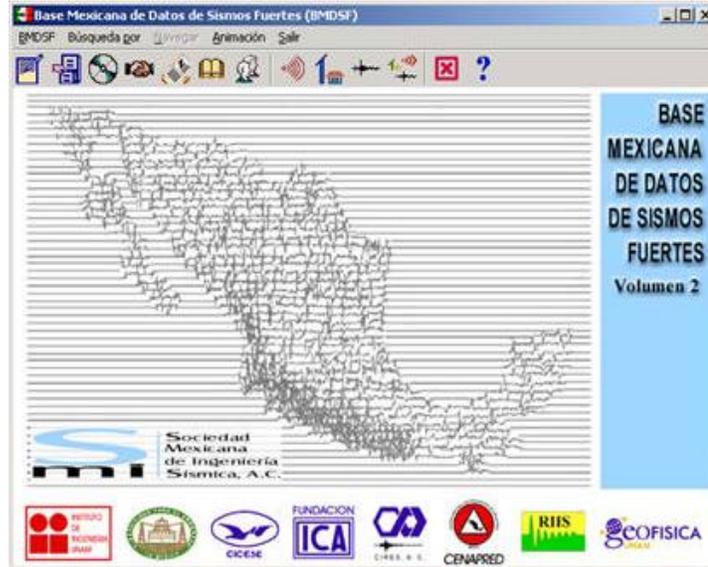


Fig. 7.1 Sistema de la base mexicana de datos de sismos fuertes, en su versión de disco compacto

7.3 DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA

La implementación del sistema de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes y los productos que de ella se derivan, ponen a disposición de investigadores, profesionistas, estudiantes e interesados en el tema, el acervo de registros sísmicos de temblores fuertes que se tiene en México. Todo ello con el objetivo fundamental de conocer más sobre la naturaleza del fenómeno para prever la forma de mitigar sus efectos.

La publicación del disco compacto es la etapa inicial de la difusión del sistema que en un futuro será necesario mejorar, con el uso de la red Internet.

Para adquirir el disco de la BMDSF dirigirse a la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica ubicada en Camino a Santa Teresa No.187 Despacho 12 C.P. 14020, México D. F. Tel./Fax. (55)-56-06-13-14 y (55)-56-06-23-23 ext. 34.

VIII SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE MONITOREO Y ALERTAMIENTO

8.1 TÉCNICAS DE MONITOREO

La inspección directa es la técnica básica para comprender el estado que guarda una ladera, a fin de detectar en una etapa temprana cualquier síntoma que refleje algún problema de inestabilidad; debe distinguirse tanto la inspección regular y periódica, como las inspecciones especiales efectuadas durante o después de condiciones inusuales o extraordinarias, tales como lluvias intensas o sismo. En capítulos previos se han expuesto los diversos instrumentos con los que se puede contar para detectar y cuantificar los movimientos masivos de las laderas, así como de la presión del agua dentro del suelo; el monitoreo de esa instrumentación permite tomar decisiones fundamentadas a fin de, tomando las providencias necesarias, evitar un desastre.

Derivadas de las inspecciones mencionadas, pueden distinguirse laderas que por su alto riesgo de inestabilidad, y por las implicaciones que pudiera causar su falla en la población, sea necesario adoptar un sistema semiautomático o francamente automático para su monitoreo. Los desarrollos tecnológicos actuales permiten no sólo medir las variables con las que se caracteriza una inestabilidad, lo que se realiza comúnmente de manera manual con equipo portátil, sino de hacerlo automática-mente e incluso transmitir esos datos a un sitio remoto. Sistemas avanzados de monitoreo están bajo desarrollo o en uso en algunos países, en los que los datos son procesados para predecir la ocurrencia de una falla, y están ligados a una alarma o sistema precautorio. Estos sistemas de monitoreo completamente automáticos tienen la capacidad de reunir y procesar de manera selectiva los datos. La fiabilidad de estos sistemas reside sin embargo, en la precisión de la predicción de falla o no, lo que exige estudios adicionales y mejoramiento en las técnicas de toma de decisiones de expertos automáticos bajo diversas condiciones de sitio.

El monitoreo primario consiste en la medición de los movimientos de la superficie con extensómetros, y de la profundidad de la superficie de deslizamiento mediante inclinómetros. Antes de optar por la instrumentación, no debe olvidarse la posibilidad de recurrir a mediciones topográficas, las que dan el tamaño y etapa del movimiento de los materiales de la ladera.

Los resultados del monitoreo se utilizan para evaluar el grado de avance del movimiento masivo. En general, los deslizamientos muestran varias etapas, desde su etapa temprana en la que se distingue una acumulación de movimiento; en la secundaria, cuando se observa la aparición de grietas y movimiento constante, y la etapa final cuando la expansión de grietas conduce claramente a la falla. Las medidas por adoptarse en cada etapa son también diferentes; de ir aumentando el monitoreo en la etapa temprana, a cerrar el acceso a esa zona, y a ordenar la evacuación de la población en la etapa final.

Es importante distinguir ciertas variables de control que permitan correlacionar los resultados del monitoreo con varias medidas por tomarse en el campo; la más usual es la velocidad del movimiento superficial, la cual debe ser evaluada junto con la ocurrencia de colapsos menores y la variación de los niveles piezométricos. En la Fig. 8.1 se presenta un esquema de la visión de Terzaghi (1950) al respecto. La evolución de la velocidad de deformación superficial, especialmente en la etapa final, ha sido usada en Japón (Saito, 1965) para predecir incluso la fecha probable de un deslizamiento que afecte al sistema troncal de ferrocarriles rápidos (Shinkansen); en la Fig. 8.2 se muestran los valores de la velocidad de deformación que conduce a la falla de una ladera. En la Tabla 8.1 se presentan valores de esta variable de control, la cual se emplea en los deslizamientos que afectan las autopistas japonesas; están basados en consideraciones teóricas y enfoques empíricos, por lo que son valores tentativos que deberán ajustarse y modificarse a la luz de estudios adicionales y más resultados de campo.

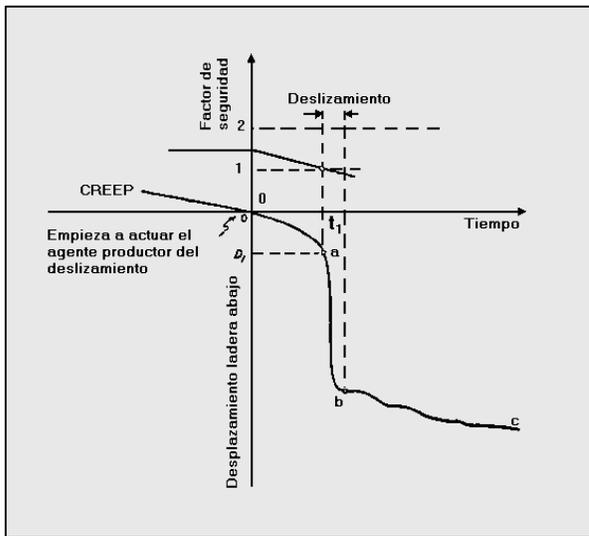


Fig. 8.1 Evolución de la deformación antes de la falla de una ladera (Terzaghi, 1950)

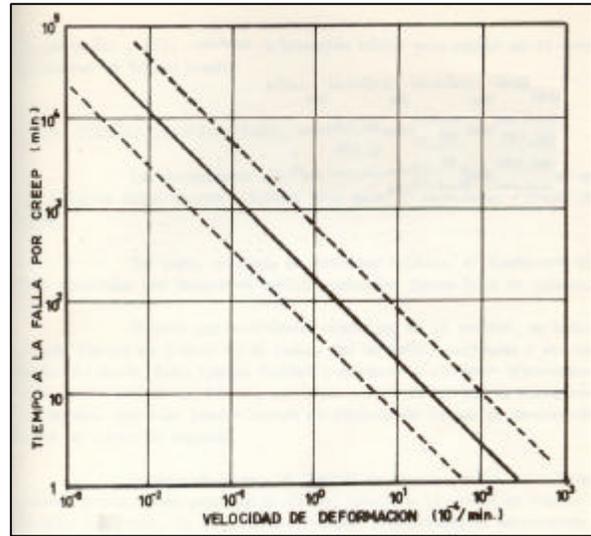


Fig. 8.2 Monitoreo de la velocidad de deformación que conduce a la falla de una ladera (Saito, 1965)

Tabla 8.1 Velocidad de movimientos de laderas y medidas por tomar

INSTRUMENTO	VARIABLE DE CONTROL	MEDIDAS POR TOMAR			
		Inspección, precaución y aumento de mediciones	Necesidad de mediciones de retroalimentación	Necesidad de emisión de avisos de alertamiento y cierre	Peligro estricto y máximo. Cierre al acceso
Extensómetro	Velocidad del desplazamiento en la superficie del terreno	Más de 10 mm en 30 días	De 5 a 50 mm en 5 días	De 10 a 100 mm en un día	Más de 100 mm en un día
Extensómetro en pozo					
Distanciómetro óptico					
Inclinómetro	Velocidad del desplazamiento en la superficie de deslizamiento	Más de 1 mm en diez días	De 5 a 50 mm en 5 días	—	—
Inclinómetro	Valor acumulado	De 10 a 50 mm en diez días	—	—	—

El arreglo de instrumentos debe ser tal que los extensómetros se posicionen en la corona y al pie del talud, y un inclinómetro a lo largo de la línea principal de medición (dirección longitudinal del deslizamiento). Si es que el ancho del deslizamiento excede los 150 m, se requerirá una línea secundaria de medición en la que se incluya un arreglo de instrumentos similar al de la línea principal.

La frecuencia con la que los instrumentos deben monitorearse depende de la velocidad con la que se desarrollen los movimientos en la ladera. Ante condiciones que pudiesen considerarse estacionarias, la medición sería una vez por semana; de dos a tres veces por semana ante un ligero aceleramiento en el que se declararía una etapa

precautoria. Ante un periodo de franco riesgo, procederían mediciones diarias, y de hecho continuas ante una predicción de inminente falla, ello desde luego si son automáticas para no exponer las brigadas encargadas del monitoreo.

8.2 SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE MONITOREO

Los sistemas con cierta automatización de monitoreo pueden clasificarse como (1) semiautomáticos, donde los datos de los sensores o transductores se colectan y almacenan en adquisidores de datos automáticamente en o cerca del sitio, y se “vacía” su información mediante computadoras portátiles; el análisis de los datos es conducido a posteriori por otro sistema; y (2) totalmente automáticos, los cuales integran un sistema en línea, conectando los sensores con las computadoras en la oficina o centro de control; esta transmisión a distancia se efectúa por cable, teléfono, o radio.

8.2.1 Sistema semiautomático

El sistema semiautomático se adopta en aquellos casos donde el análisis constante de los datos no siempre es necesario, dependiendo de la frecuencia de las mediciones o la estabilidad de la ladera o talud. Casi todos los transductores son capaces de integrarse a un sistema automático de monitoreo, aunque por lo mismo deben ser de tipo eléctrico; así, el medio sensible de extensómetros, piezómetros e inclinómetros debe estar basado ya sea en strain gages resistivos, o bien de cuerda vibrante (vibrating wire).

8.2.2 Sistema totalmente automático

Con un sistema totalmente automático es posible reconocer el estado del movimiento masivo fácilmente en una emergencia, monitoreándolo de manera segura a distancia, ahorrando tiempo y costo en su operación; desde luego, su costo inicial es mayor, al tenerse que agregar un sistema de transmisión que incluye modems y líneas telefónicas; o bien, radio transmisores y receptores, antena, etc. El sistema está compuesto fundamentalmente de sensores, comunicación entre los instrumentos y una caseta de campo, y otro enlace entre ésta y una oficina o centro de observación. En la caseta se hace propiamente el monitoreo, congregando los datos de los diversos sensores, y el centro efectúa el procesamiento de los datos y su análisis global. En la Fig. 8.3 se muestra el esquema de un sistema automático de monitoreo, adoptado en la prefectura de Oita en Japón.

La Fig. 8.4 muestra un ejemplo de un sistema de monitoreo automático usado en el sitio de construcción de una carretera en Japón. El sistema tuvo por objetivo establecer un sistema experto para predecir la ocurrencia de un posible deslizamiento en una ladera, introduciendo en el sistema el saber-cómo de expertos y bien entrenados ingenieros, a fin de formar una base inteligente. La confiabilidad del sistema para predecir el colapso fue estimado con base en los datos acumulados desde el inicio del corte, al inicio del movimiento y finalmente en su proceso hacia su colapso final. Los factores para el análisis del sistema son la deformación del talud, los niveles piezométricos subterráneos, la lluvia, etc.; de éstos, reconocen que la deformación es el factor más significativo. Este sistema experto exhibió una gran precisión al predecir el colapso, con una diferencia de 1 a 2 horas.

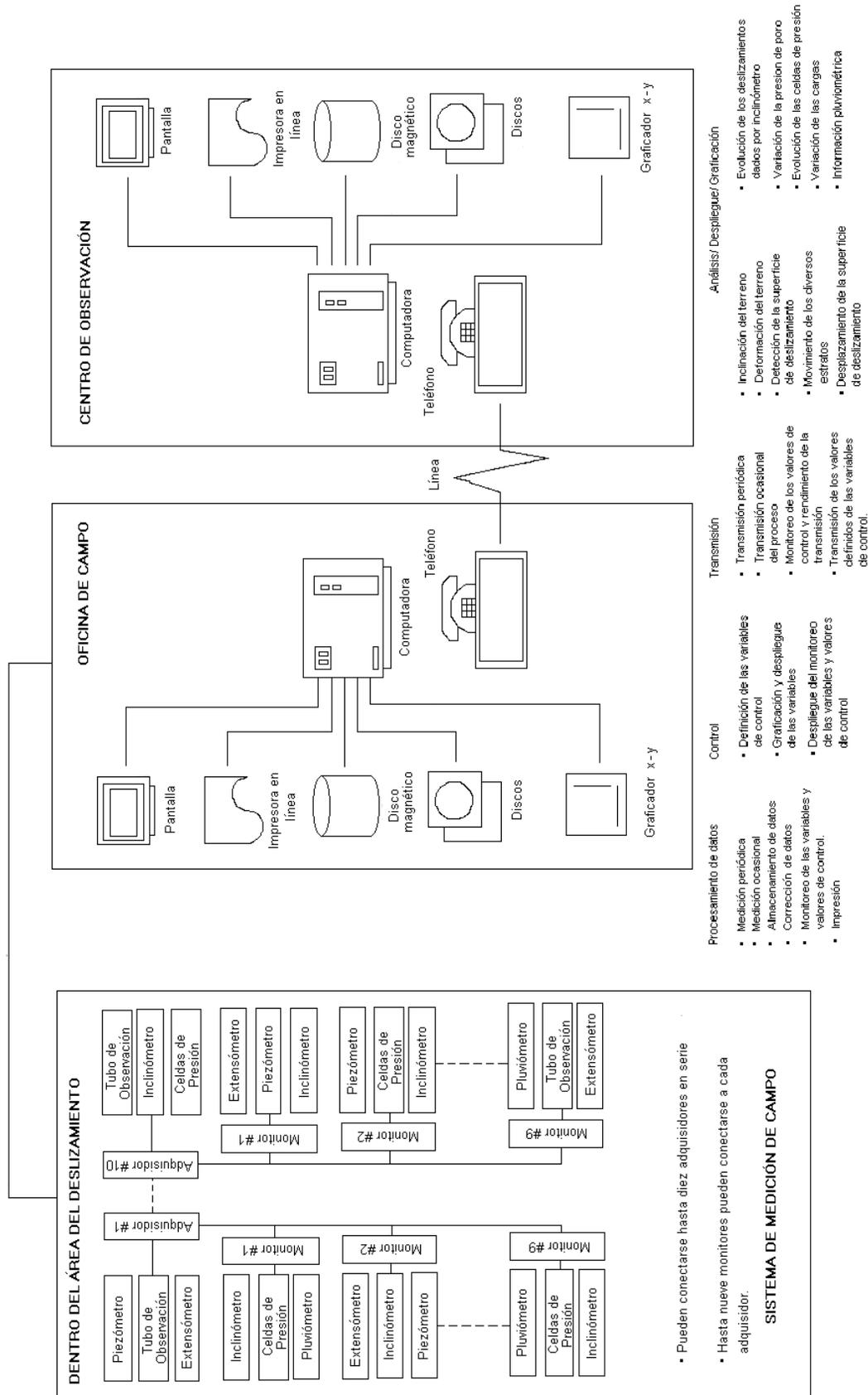


Fig. 8.3 Sistema de monitoreo de laderas en la prefectura de Oita, Japón

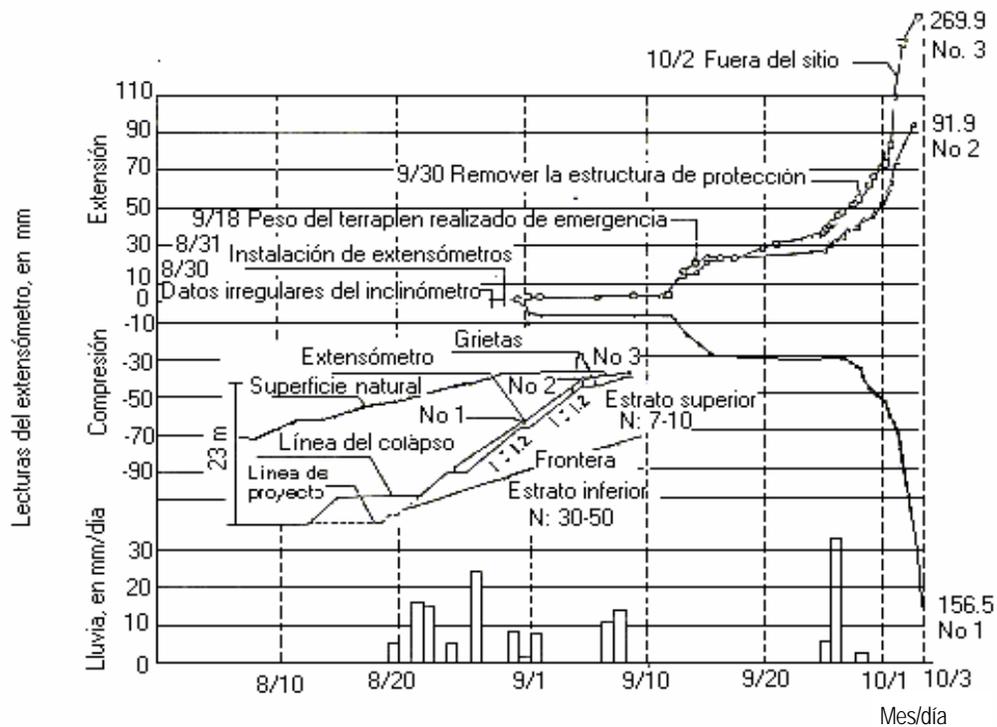


Fig. 8.4 Evolución de las lecturas de extensómetros y pluviómetros (Kimura y Takakura, 1989)

Una guía técnica para el monitoreo de laderas inestables se ha emitido en Francia (Durville *et al.*, 1993), en la que se describe el procedimiento general para la construcción de sistemas de monitoreo de fenómenos que van desde los flujos hasta los deslizamientos profundos; en la Fig. 8.5 se muestra un ejemplo de monitoreo automático de laderas peligrosas. Establece que el objetivo de estos sistemas es predecir la ocurrencia del fenómeno suficientemente antes de que suceda, para que se adopten las medidas necesarias para reducir los riesgos; para ello también reconoce que el nivel de seguridad alcanzado depende de la confiabilidad del sistema de monitoreo. No obstante, debe enfatizarse que la decisión final tiene que hacerla el administrador del sistema, a la luz de consideraciones ingenieriles.

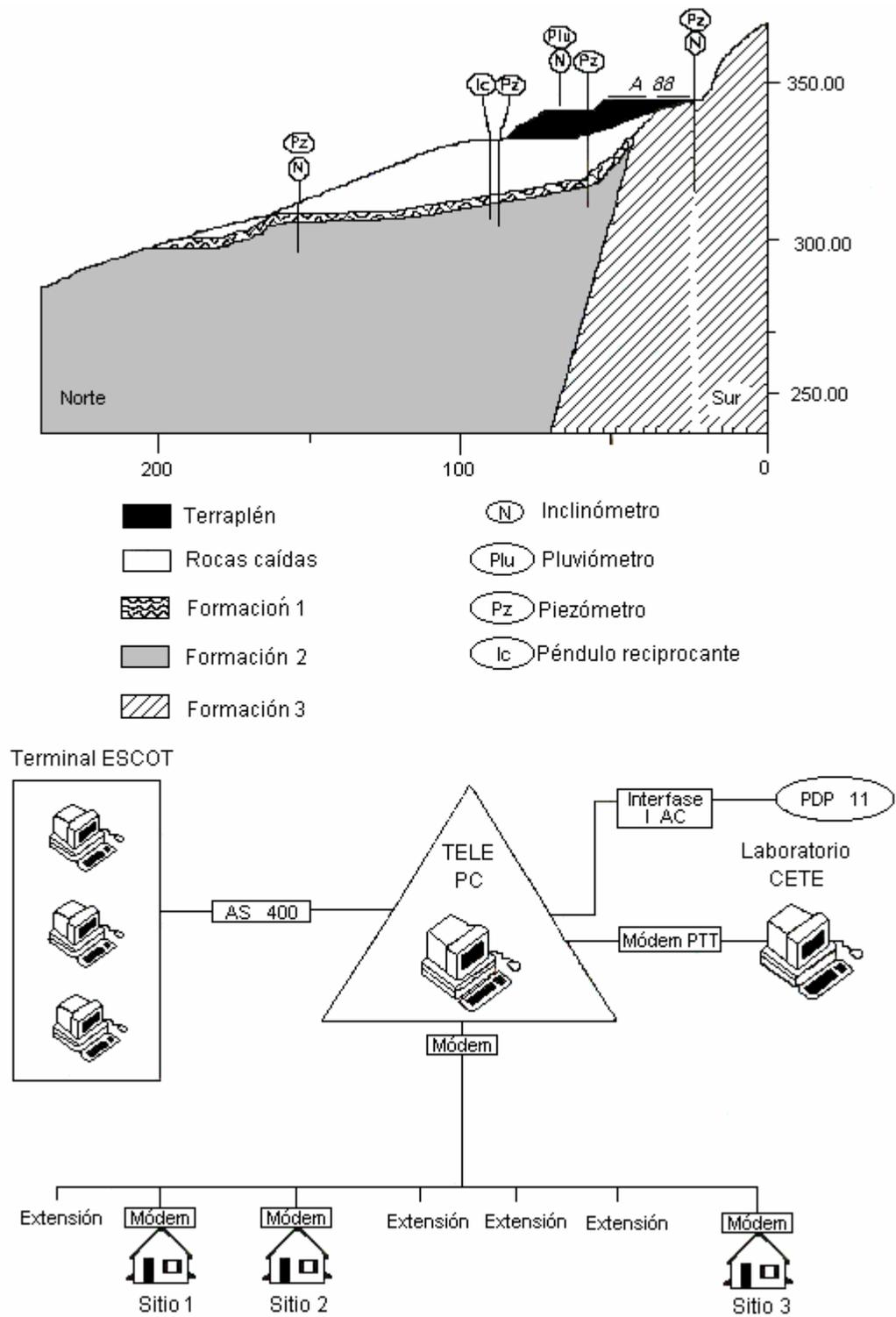


Fig. 8.5 Sistema de monitoreo de laderas en La Borne Romain, Francia

En los Estados Unidos de América se lleva a cabo el monitoreo en tiempo real de un número considerable de deslizamientos. Frecuentemente éstos se mueven lentamente, pero algunos tienen el potencial de colapsarse catastróficamente. Así, para ayudar a reducir el riesgo que poseen estas laderas, el U.S. Geological Service (USGS), en cooperación con otras agencias, actúa con prontitud para proveer el monitoreo continuo en tiempo real, para lo que recurre a sistemas desarrollados por esa misma institución para monitorear volcanes activos en áreas remotas. En nuestro país se ha ganado una gran experiencia con el monitoreo del volcán Popocatepetl, y sin duda, las técnicas ahí puestas en práctica podrían aplicarse para el monitoreo de laderas con alto riesgo a la población.

Los datos de una gran variedad de sensores instalados en los deslizamientos son transmitidos por radio a las computadoras del USGS. La detección inmediata de la actividad de deslizamientos que proporcionan los sistemas en tiempo real, pueden ser cruciales para salvar vidas y proteger la propiedad. Las observaciones de campo tradicionales no pueden detectar los cambios al momento en que suceden, aun cuando su monitoreo sea periódico. Además, los deslizamientos activos pueden ser peligrosos para trabajar sobre ellos, y los grandes movimientos ocurren frecuentemente durante tormentas cuando la visibilidad es pobre. En las áreas que el USGS monitorea remotamente, utiliza un arreglo como el mostrado en la Fig. 8.6; así registra movimientos del terreno, presiones de poro, precipitación, aceleraciones del terreno, etc, se transmiten a las computadoras del USGS a cada 10 minutos, bajo condiciones normales; sin embargo, esta información se transmite inmediatamente si se detectan fuertes vibraciones del terreno, como resultado del movimiento masivo del deslizamiento. El USGS opera un número considerable de monitoreos de deslizamientos en tiempo real, algunos incluso con acceso del público en general a los datos que se están monitoreando, a través de la Internet; se sugiere visitar para ello el sitio <http://landslides.usgs.gov/hwy50>.

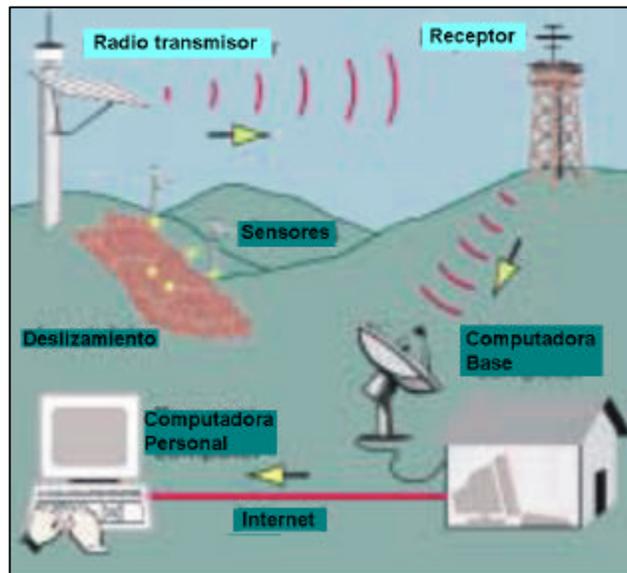


Fig. 8.6 Red del USGS para la transmisión en tiempo real de datos de deslizamientos de ladera

8.3 PANEL DE EXPERTOS O UN SISTEMA EXPERTO INTELIGENTE, CON FINES DE ALERTAMIENTO

Una vez que se tienen colocados en el campo los sensores que registran las variables más significativas ya descritas de los fenómenos, debe contarse con un profesional o un panel de ellos que interpreten los resultados; el campo de acción es primordialmente de los ingenieros geotécnicos. Un proyecto de instrumentación no concluye con la medición y menos con la instalación de aparatos; es menester analizarlos. Precisamente por no concluir este proceso, en ocasiones se cuestiona la valía de la instrumentación; en efecto, cuando no se analizan los datos, no se

aporta nada y con justificada razón la utilidad de la instrumentación queda en entredicho y su costo, recursos que podrían no ser despreciables, se torna en un gasto inútil.

Cabe advertir que una instrumentación geotécnica pertinente no garantiza una interpretación y toma de decisiones correctas; también es cierto que una instrumentación planeada e instalada inadecuadamente llevará a confusiones, e incluso podría convertirse en una herramienta peligrosa. De aquí que sea indispensable considerar dentro de un contexto general, sobre todo cuando se trata de implementar un sistema de alertamiento temprano, a los profesionales idóneos que aseguren el éxito en los rubros siguientes:

- Diseño, colocación, monitoreo y mantenimiento de la instrumentación, incluyendo la transmisión de datos a distancia, si ese es el caso,
- Análisis e interpretación de los datos registrados, y
- Toma de decisiones para los niveles de alertamiento a la población.

Un aspecto que es esencial para llevar a cabo un proyecto de instrumentación, es la participación comprometida y entusiasta de un grupo reducido de profesionales clave. Un proyecto de esta naturaleza resulta muy beneficiado si un grupo pequeño de ingenieros se involucra en todas las etapas del mismo, desde la planeación y el desarrollo del sistema hasta el análisis, interpretación de los datos y la toma de decisiones, pasando por su calibración, integración, colocación, mantenimiento y monitoreo periódico. La atención a un sinnúmero de detalles durante el diseño y la instalación de los instrumentos, es tan importante como conocer el qué y para qué se mide, no sólo el cómo.

El posible alertamiento ante una amenaza de deslizamiento masivo de suelos y rocas exige la toma de decisiones rápidas y pertinentes; la posibilidad de reunir a ese panel de expertos rápidamente es en general muy reducida. De aquí surge la conveniencia de recurrir a un sistema experto; éste es un intento tecnológico dentro de lo que podemos reconocer como inteligencia artificial. Puede definirse como un programa de computadora que usa conocimiento humano, a fin de resolver problemas o tomar decisiones en cada dominio específico; para este caso, tendría como tarea específica controlar un sistema de alertamiento, en función de las variables que se estarían registrando.

La base del conocimiento en un sistema experto reúne hechos (datos) y reglas que se usan como el fundamento para la toma de decisiones, todo ello a través de una computadora personal. La estructura del sistema contiene un intérprete que decide cómo aplicar las reglas, y un catalogador o secuenciador que decide el orden en que éstas se deben aplicar. Las dos primeras etapas para elaborar el programa consisten en el desarrollo de una base de conocimientos y en la organización de las reglas expertas; la Fig. 8.7 reúne el proceso de desarrollo de un programa experto. A fin de construir la base de conocimientos deben reconocerse para los casos que nos ocupan, las características y condiciones de caídos, deslizamientos y flujos de suelos y/o rocas; para cada uno de ellos, la metodología y tareas al respecto serían:

- Revisar literatura técnica actual sobre especificaciones estándar y planes de diseño para prevenir deslizamientos de laderas,
- Reunir conocimientos de expertos humanos acerca de monitoreo y actividades preventivas contra tales deslizamientos, y
- establecer reglas que conduzcan a desechar o a ir confirmando la alta probabilidad de un deslizamiento de suelos y/o rocas.

En todo este proceso debe reconocerse que la ocurrencia de cada uno de los tipos de inestabilidad de laderas está muy influenciada por las condiciones regionales, por lo que no hay reglas generales, y por tanto no deben extrapolarse de una zona a otra; ello requiere acopiar y desarrollar información por provincias geomorfológicas e hidrográficas con características similares.

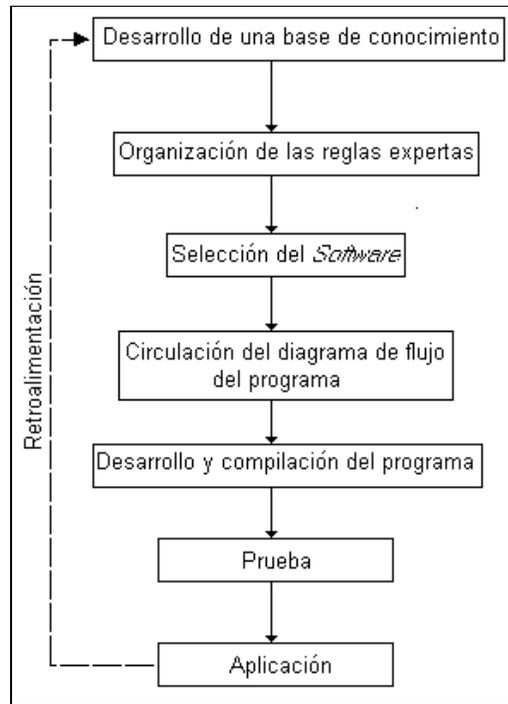


Fig. 8.7 Proceso de desarrollo de un programa experto

A manera de ejemplo, en los flujos o avalanchas de detritos en Taiwan (Lin, 2000) se reconoce que éstos ocurren en terrenos montañosos con depósitos sueltos o deleznales, y con fuertes lluvias; así pues, las reglas de un sistema experto para el alertamiento ante ese tipo de flujos seguiría el diagrama de flujo decisivo de la Fig 8.8.

La tarea siguiente dentro del esquema general es la selección del software experto. Puede recurrirse a los disponibles en el mercado, tal como el “KnowledgePro Windows”, el cual proporciona un ambiente flexible para la aplicación de un sistema experto desde una plataforma Windows; posee las capacidades de la programación orientada a objetos, cuando sirve a un comando, un hipertexto, una variable o a un conjunto de reglas del sistema experto.

8.4 OTROS TIPOS DE SENSORES ORIENTADOS A LA AUTOMATIZACIÓN

Podría asegurarse que se vive en la época de los sensores y la automatización. Dado el gran desarrollo e impulso que ha tenido la computación y las comunicaciones, el campo de la instrumentación, monitoreo y transmisión de datos relativos a la condición que guarda una ladera ha exhibido continuas aportaciones, varias de ellas ingeniosas. También es cierto que esos desarrollos tienen un costo mayor que las técnicas convencionales, aunque sin duda son preferibles en términos de la gran cantidad de información que se puede adquirir, incluso bajo condiciones peligrosas, en las que ya no podrían acceder la ladera los miembros de una brigada de monitoreo. Se han descrito en esta guía los equipos automatizados relativamente más usados; sin embargo, no se ha abundado en aquellos propuestos más recientemente. Sin pretender ser exhaustivos, se mencionan sólo algunos de éstos y su objetivo:

- Videocámara fija y sensores ultrasónicos para medir la velocidad superficial de flujos y avalanchas de detritos.
- Sismógrafos para registrar la vibración del terreno, a fin de estimar volúmenes y velocidades de descarga de avalanchas.
- Celdas de presión total para medir el esfuerzo en la base de una garganta, por la que potencialmente fluiría una masa térrea.

- Sistemas de geoposicionamiento integrados en masas potencialmente en movimiento, para su seguimiento a distancia.

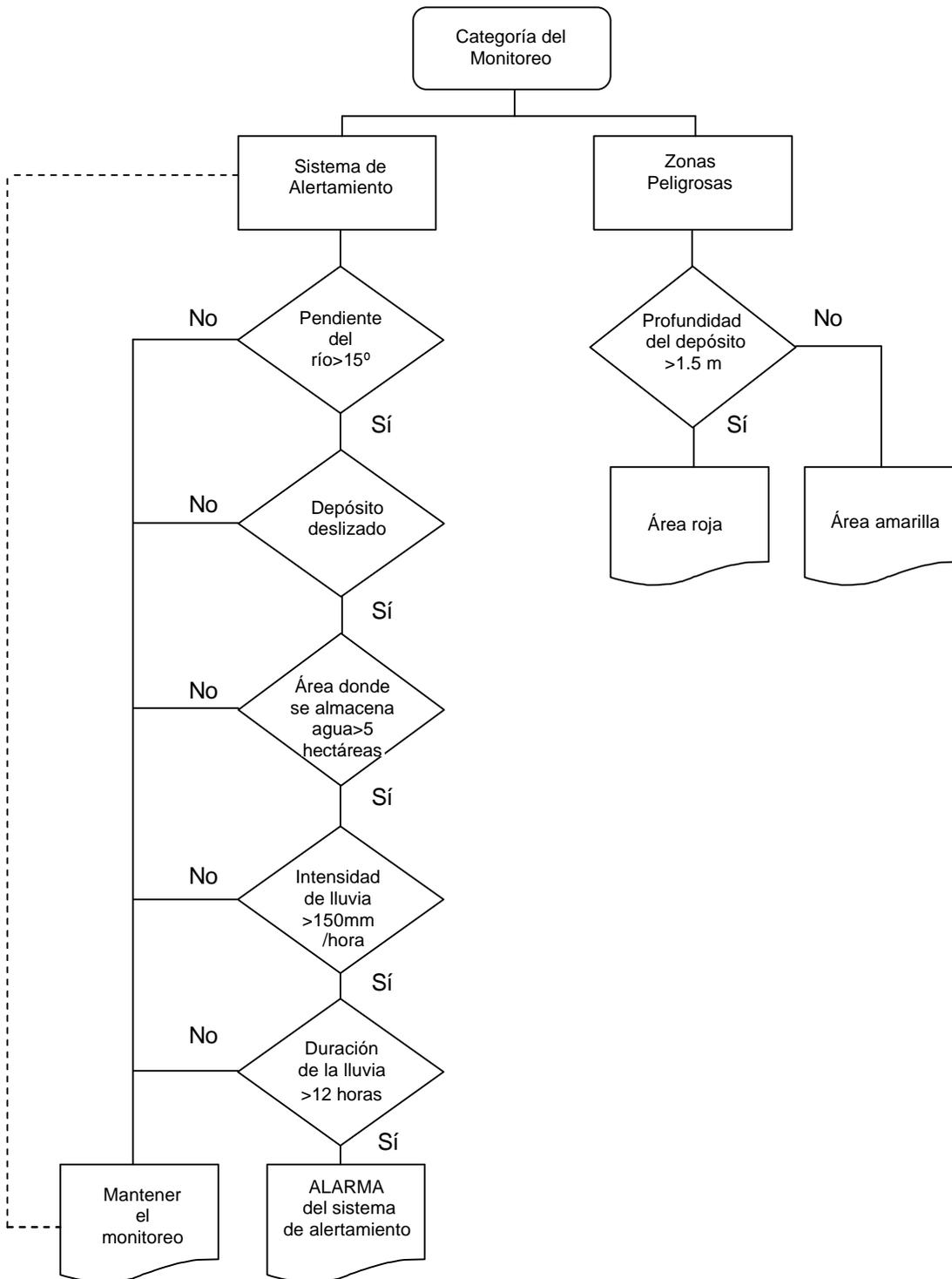


Fig. 8.8 Diagrama de flujo para la toma de decisiones ante avalanchas de detritos en Taiwan (Lin, 2000)

IX OBSERVACIONES FINALES

Muchos deslizamientos téreos se mantienen inactivos durante las temporadas de sequía, y sólo se mueven durante o después de periodos prolongados de infiltración de lluvias. El aumento en la presión en el agua del subsuelo reduce la resistencia global de los materiales de la ladera, y en ocasiones se inicia un movimiento descendente del talud, pero su velocidad y potencial destructivo pueden variar ampliamente. Algunos deslizamientos se mueven muy lentamente, desplazándose unos cuantos centímetros a la semana; otros se pueden transformar súbitamente en lodo o flujo de detritos que viajan a cientos de metros en cuestión de minutos, provocan la muerte a las personas y causan destrucción masiva.

El monitoreo de esas laderas puede determinar la velocidad de su movimiento, y puede también detectar manifestaciones tempranas de movimiento catastrófico. Si se recurre a sistemas automáticos de monitoreo en tiempo real, los ingenieros geotecnistas y otros especialistas de campos afines podrían anticipar posibles movimientos catastróficos; así pues, tales sistemas podrían concluir con un sistema de alertamiento a la población ante estos eventos.

En este documento se han dado los elementos y técnicas para poder instrumentar una ladera. Se ha enfatizado la necesidad de observar aquellas manifestaciones tempranas que apunten hacia una inestabilidad futura, y cómo medirlas, tanto con elementos más bien rústicos como sofisticados. Ello teniendo como objetivo proporcionar los medios técnicos para que las unidades de Protección Civil cuenten con los elementos de juicio que les permitan establecer las líneas de acción pertinentes.

Otras fuentes que pueden provocar inestabilidad de laderas son las erupciones volcánicas, aun cuando la actividad propia del volcán haya cesado. Por ello, es conveniente mantenerse alerta ante la posibilidad de un deslizamiento después de la actividad volcánica. En nuestro país se cuenta con la infraestructura para el monitoreo de volcanes como el Popocatepetl, y sin duda se tienen entonces los medios para alertar acerca de una eventual erupción; debe puntualizarse sin embargo, que una de las manifestaciones más desastrosas de una calamidad de estas, serían las avalanchas de detritos o de lahares, que directamente provocarían. Convendría revisar la posibilidad de añadir a estos sistemas de monitoreo, sensores que midiesen en laderas expresas algunas de las variables que se han descrito aquí.

Por lo que se refiere al alertamiento ante posibles inestabilidades de laderas ante eventos sísmicos, parece poco promisorio el panorama, dado el muy reducido lapso entre la ocurrencia de las aceleraciones máximas del terreno, y su efecto sobre las laderas. Ante esto, sólo resta insistir en la necesidad de no deforestar las laderas, y de respetar y propiciar el drenaje al pie de las mismas.

Se ha pretendido proporcionar no meramente un catálogo de aparatos, sino de explicar sus aplicaciones, comentando sus ventajas y limitaciones. La planeación de una instrumentación requiere conocimiento, buen juicio, comprensión de los problemas geotécnicos, paciencia e imaginación. Exige realizar un diagnóstico de cómo funciona una ladera y de cómo eventualmente pudiera fallar. Sólo así será posible seleccionar convenientemente las características y el tipo de instrumentos y definir en qué posición ubicarlos.



ANEXO

SISTEMA DE DETECCIÓN DE FLUJOS O DE AVALANCHAS DE DETRITOS EN VOLCANES

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) desarrolló un sistema para detección de flujos que monitorea la vibración del suelo generada por el paso de los materiales. El sistema está basado en una serie de estaciones de monitoreo acústico de flujo (AFM por sus siglas en inglés) instaladas en cañadas de volcanes, por donde se encauzarían los posibles flujos. Cada estación consiste de un geófono (o sismómetro) que detecta las vibraciones de la tierra al paso de un lahar, un adquisidor que acondiciona y registra la señal del geófono en formato digital y un sistema de transmisión de la información vía radio a un puesto central donde se encuentra a su vez, un sistema de alertamiento. Para darle autonomía al sistema y proveerlo de energía se utiliza un banco de baterías y un panel solar. En la Figura A.1 se muestra un esquema de una estación detectora de flujos.

Un monitor acústico de flujo AFM es básicamente un sismómetro con una mayor sensibilidad a altas frecuencias, a diferencia de los sismómetros empleados para registrar la actividad sísmica de un volcán, los cuales son de menor frecuencia. Un AFM tiene una respuesta en frecuencia de 10 a 200 Hz. Las vibraciones de la tierra producto de un lahar están predominantemente en el intervalo de 30 a 80 Hz.

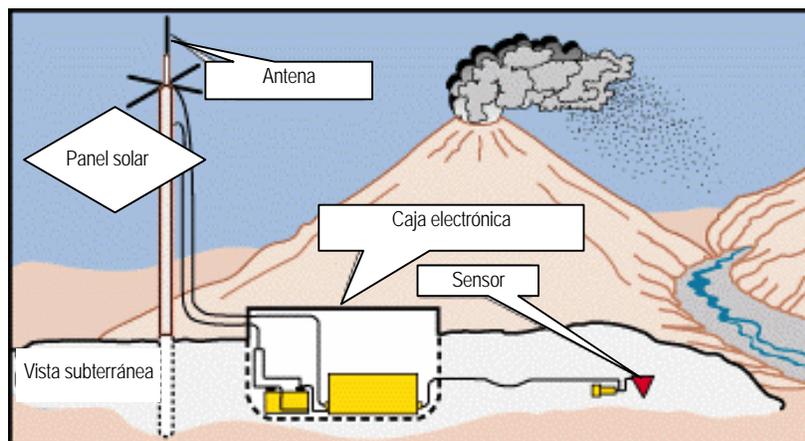


Fig. A.1. Sistema de detección de flujos (monitoreo acústico de flujos)

Cada segundo, el adquisidor hace un muestreo de la amplitud de la vibración detectada por el sensor y envía los datos a la estación central a intervalos regulares. Los datos ya digitales son procesados por una computadora, de modo que, cuando la amplitud de la vibración sobrepasa los umbrales previamente establecidos, se activa, en forma automática, una alarma.

SISTEMA INSTALADO EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Como un proyecto conjunto del CENAPRED y el USGS, a mediados de 1998 se instaló el sistema descrito para la detección de flujos en la ladera norte del volcán Popocatepetl. De acuerdo con diversos estudios de riesgo realizados, en esta ladera es posible que se generen lahares producidos, ya sea por una intensa precipitación pluvial durante la temporada de lluvia, o bien, por la fundición parcial del glaciar durante una erupción del volcán. En ambos casos podrían generarse flujos de agua, ceniza y rocas que escurrirían por los cauces naturales a lo largo de la barrancas de Tenenepanco y La Espinera, que los conducirían en poco tiempo hacia los poblados de Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos, Puebla.

El sistema consiste de 2 estaciones de medición localizadas en la parte alta del volcán (PFM1 y PFM2), una para cada una de las barrancas que descienden del glaciar, Fig. A.2. Una tercera estación se localiza en la confluencia de ambas barrancas aguas abajo (PFM3). Una estación repetidora, ubicada en el cerro Tlamacas (PFM4), recibe las señales y las envía por radio hacia el CENAPRED. La descripción y los datos de los equipos y estaciones instaladas se muestran en la Tabla A.1.

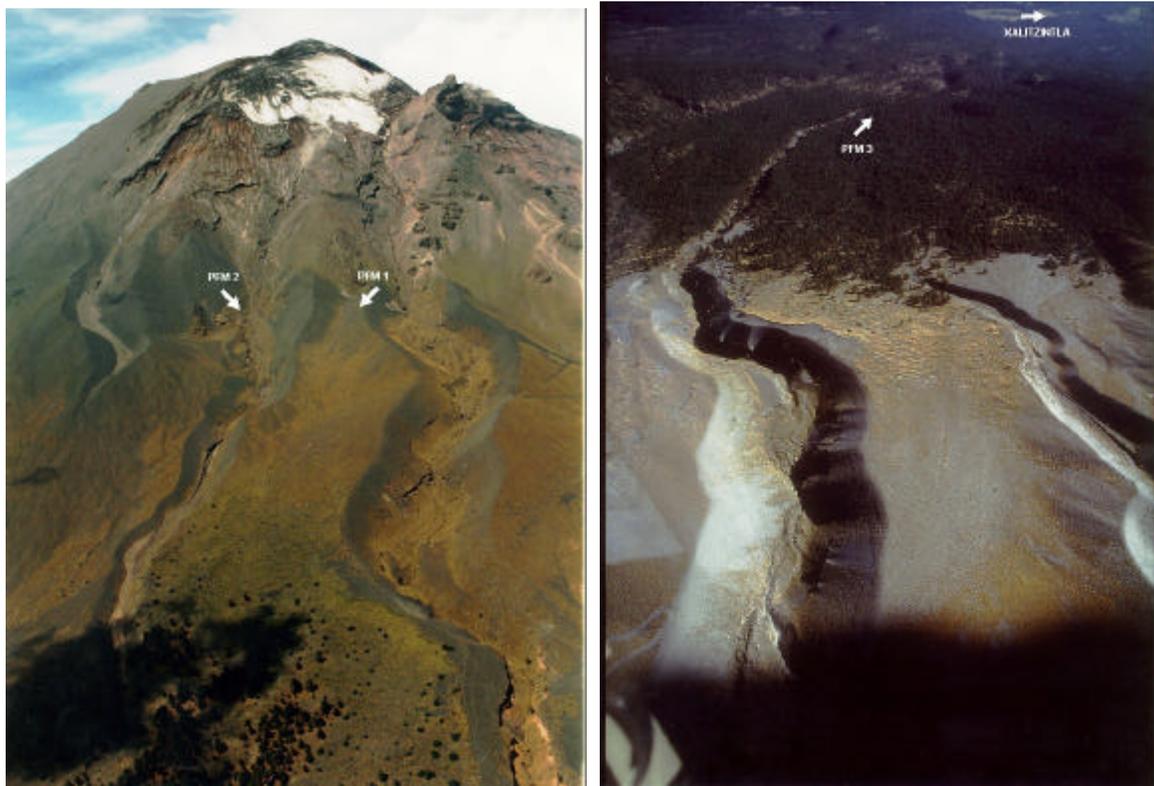


Fig. A.2. Ubicación de las estaciones detectoras de flujos en el volcán Popocatepetl

Como se muestra en la Figura A.3, cada estación consiste de un detector acústico de flujos, un medidor de precipitación (pluviómetro), así como de equipos de acondicionamiento y transmisión de datos por telemetría. Adicionalmente se instalaron celdas solares y baterías en flotación para proveer de energía a los equipos. En la Figura A.4 se muestran las estaciones detectoras de flujos instaladas en el volcán Popocatepetl.

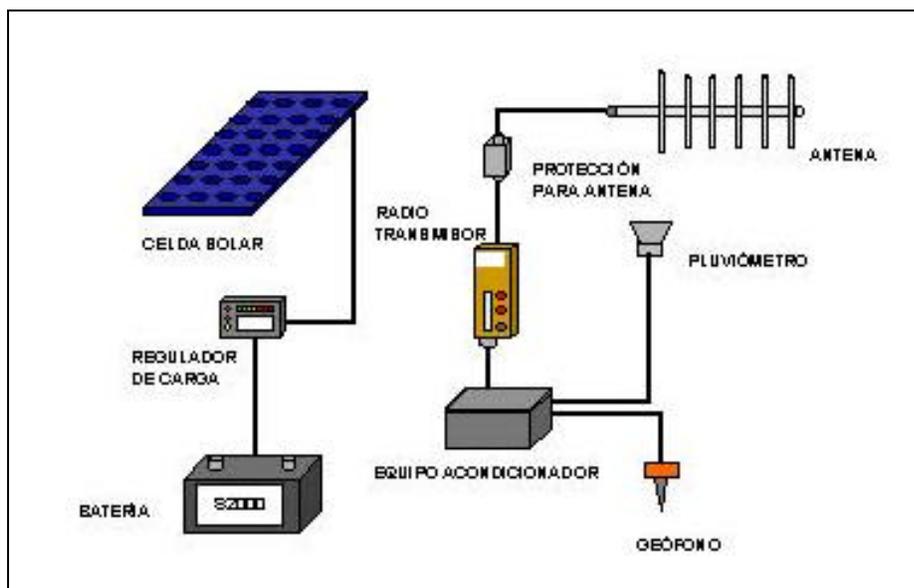


Fig. A.3. Componentes de las estaciones para detección de flujos instaladas en el volcán Popocatépetl

Tabla A.1. Datos de las estaciones para la detección de flujos en la ladera norte del volcán Popocatépetl

CLAVE	ESTACION	LOCALIZACIÓN	ALT. (m)	EQUIPO
PCR	CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres, México DF	2365	Estación central de registro y procesamiento de información
PFM1	CANARIO	Refugio del Canario, barranca Tenenepanco, ladera norte	4170	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM2 (nueva)	ZORZAL	Junto a la barranca La Espinera	3985	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM3	UNIÓN	Unión de las barrancas La Espinera y Tenenepanco	3693	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM4	TLAMACAS	Microondas cerro Tlamacas	3980	Repetidor de estaciones detectoras de flujo, pluviómetro



Fig. A.4. Aspectos de la instrumentación de las estaciones detectoras de flujos instaladas en el volcán Popocatépetl

Cada estación contiene una microcomputadora de campo programada para analizar en forma continua la amplitud, frecuencia y duración de la vibración del suelo registrada por el geófono. La información sobre la amplitud de salida del sensor, sin filtrar y en dos diferentes bandas de frecuencias, es enviada a intervalos regulares al puesto central ubicado en CENAPRED, donde otra computadora analiza y almacena la información. Cuando la amplitud de la vibración sobrepasa los umbrales previamente establecidos activa en forma automática una alarma. Adicionalmente a los datos del geófono, la computadora de campo recibe también información sobre la lluvia registrada por el pluviómetro y sobre el voltaje de la baterías.

Desde su instalación el sistema ha permitido detectar algunos flujos generados por actividad solar al derretirse nieve de las partes altas y, parcialmente, el glaciar. En ocasiones alguna estación llega a registrar falsas alarmas; sin embargo, contar con tres estaciones permite discriminar los flujos verdaderos. Los equipos en las partes altas y uno más abajo permiten estimar la velocidad del flujo.

Uno de los eventos mas grandes registrados en el volcán Popocatépetl en el actual periodo eruptivo sucedió el 22 de enero de 2001. Una explosión en el interior del cráter generó un flujo piroclástico que descendió por la barranca Tenenepanco y fue detectado por el sistema. En la Figura A.5 se muestra la gráfica obtenida y en la Figura A.6 se observa el flujo generado.

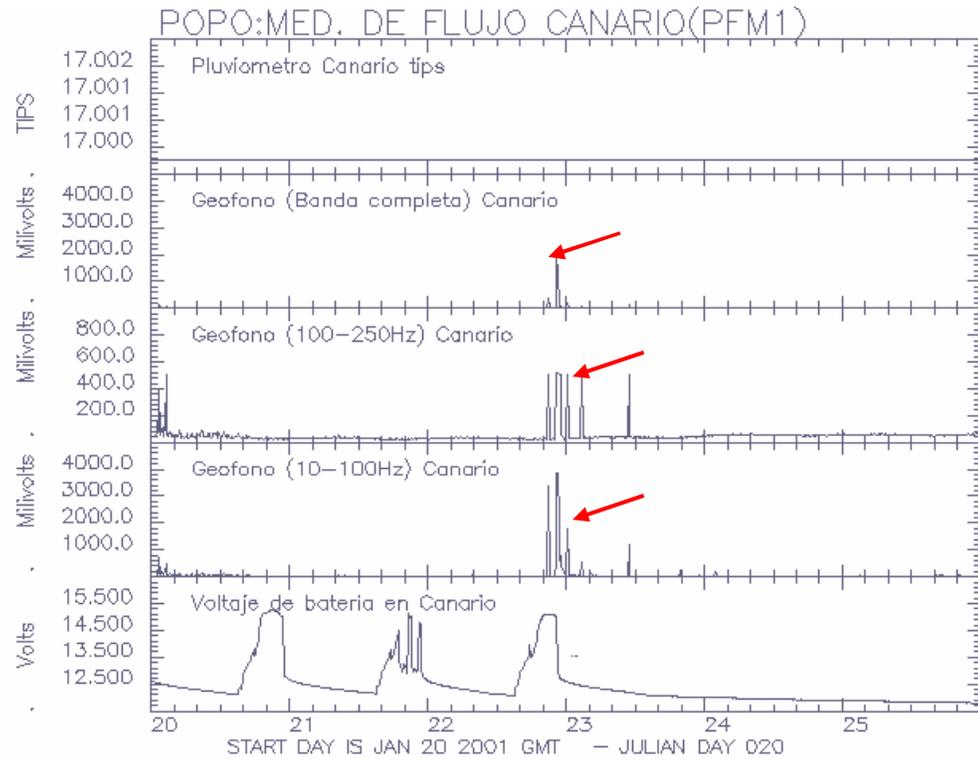


Fig. A.5. Gráfica obtenida por el sistema de detección de flujos del volcán Popocatépetl durante la erupción del 22 de enero de 2001



Fig. A.6. Flujo del día 22 de enero de 2001 y material arrastrado

REFERENCIAS

- Alcántara, L., Quaas R., Pérez, C., Javier, C., Flores, A., Mena, E., Espinosa, J. M., López, B., Cuellar, A., Camarillo, L., González, F., Guevara, E., Ramírez, M., Vidal, A., Ayala, M., Ramos, S., Macías, M. A. (2001), "La base mexicana de datos de sismos fuertes. Un sistema en CD-ROM para la obtención de acelerogramas de 1960 a 1999", 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Madrid, 861-700.
- Brand, E. (1985), "Predicting the performance of residual soil slopes", Proc, 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 5, 2541-2578.
- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1999), "Hidrología aplicada", Mc Graw Hill.
- Deutscher, M. S., Gasmó, J.M., Rahardjo, H., Leong, E.C. & Tang, S.K. (2000), "Field measurements of pore-water pressure profiles in residual soil slopes of the Bukit Timah Granite Formation, Singapore", Unsaturated Soils for Asia, Rahardo, Toll & Leong (eds), Balkema, 777-782
- Durville, J. L. *et al.* (1993) "Guide technique pour la surveillance des pentes instables", Ministère de l'équipement, du Logement et des Transports: (Fr-4)
- Dunnicliff J. (1993) "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Faisal, H. A. (2000) "Unsaturated tropical residual soils and rainfall induced slope failures in Malaysia", Unsaturated Soils for Asia, Rahardo, Toll & Leong (eds), Balkema, 41-52.
- Fuentes, O., Jiménez, M., Eslava, H., Quaas, R., Franco, M. A. y González, J. (2000), "Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Acapulco, Guerrero", Coordinación de Investigación, CENAPRED.
- Kimura, T. y Takakura, K. (1989) "Case study on the prediction of slope collapse", Japan Highway Public Corporation, Technical Report No. 97
- Lin, L. K. (2000) "Development of expert systems for mitigation of debris-flow hazards", *Proc. of the Second Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Taipei-Taiwan, Balkema, 425-429
- Mendoza, M. J. y Noriega, I., (2000) "Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Pue., provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999", *Memorias del XX Congreso Nacional de Mecánica de Suelos*, SMMS, Vol. 1, 49-58.
- Saito, M. (1965) "Forecasting the time of occurrence of a slope failure", *Proc. 6th ICSMFE*, Montreal
- Springall, R. (1970), "Hidrología; primera parte", *Series del Instituto de Ingeniería No. D-7*.
- Terzaghi, K. (1950) "Mechanism of landslides", *Application of Geology to Engineering Practice*, Berkeley Volume, The Geological Society of America

SEGOB
SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN



**SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

Av. Delfín Madrigal No.665,
Col. Pedregal de Sto. Domingo,
Del. Coyoacán,
México D.F., C.P. 04360

www.cenapred.gob.mx
www.proteccioncivil.gob.mx