

RIESGOS GEOLOGICOS ASOCIADOS A LAS AVENIDAS
Y SU PREVISION

EDUARDO ALONSO PÉREZ DE AGREDA
Departamento de Ingeniería del
Terreno.
Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos.
Universidad Politécnica de Cataluña.

RIESGOS GEOLOGICOS ASOCIADOS A LAS AVENIDAS Y SU PREVISION

Eduardo Alonso. Departamento de Ingenieria del Terreno
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Barcelona.

RESUMEN

En esta comunicaci3n se describen procedimientos de previsi3n de deslizamientos del terreno asociados a las avenidas. Dos son las causas b3sicas que desencadenan estos fen3menos: la elevaci3n de niveles piezom3tricos hasta valores excepcionales como consecuencia de lluvias internas y las erosiones de pie en laderas inmediatas a cursos de agua. La metodolog3a de la previsi3n pasa por diversas actuaciones escalonadas: la identificaci3n de zonas de riesgo en la que se utilizan criterios hist3ricos, geol3gicos, geomorfol3gicos y, a escala m3s reducida, la instrumentaci3n de campo y la implantaci3n propiamente dicha de m3todos de previsi3n y control en perfiles o zonas de riesgo elevado. Existen procedimientos de previsi3n que hacen uso de las medidas de desplazamiento a lo largo del tiempo; otros pueden desarrollarse a partir de medidas de presi3n intersticial e incluso se conocen relaciones directas entre par3metros relacionados con la precipitaci3n y los riesgos de deslizamientos. En el art3culo se describen estos procedimientos y se ilustran con algunos ejemplos.

INTRODUCCION En la prevenci3n de movimientos asociados a avenidas tienen tanta o m3s importancia los aspectos metodol3gicos del plan que se adopte que los propios sistemas o instrumentos a utilizar. Esta consideraci3n, que ha estado presente en la redacci3n de este art3culo, conduce a una cierta filosof3a en el enfoque de estos problemas, que tienden a ser uno a uno, casos particulares dentro de una ampl3sima variedad de situaciones geol3gicas y de procedimientos disponibles. En la actualidad (Enero de 1986) ni los m3todos de previsi3n ni los sistemas disponibles gozan de una aceptaci3n generalizada. Son escasos los taludes o laderas en los que se han dispuesto sistemas de control y no existen criterios definidos sobre los mejores procedimientos. Por el contrario es un campo donde se investiga activamente. Testimonio de todo ello son una serie de memorias de congresos recientes donde se abordan estos problemas: 3rd International Symposium on Landslides (Toronto, 1984); Mouvements de Terrains, Colloque de Caen, 1984; International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention (Tsukuba, 1985) y otros libros, monograf3as y "estados del arte": Wilson y Mikkelsen (1978), Bhandari (1984), La Rochelle y Marsal (1981), Hanna (1985), Pilot (1984) y los Boletines de la Asociaci3n Internacional de Geolog3a del Ingeniero (IAEG). En todas estas referencias existen descripciones de instrumentos y casos reales diversos que se juzgan de gran inter3s para completar la informaci3n, forzosamente limitada, que se ofrece en este art3culo.

Dos fen3menos con repercusi3n directa en la estabilidad de laderas est3n relacionados con los periodos de avenidas: la elevaci3n de niveles piezom3tricos y la erosi3n de pie. En muchos casos ambas acciones se producen sobre laderas naturales que disponen de un escaso margen de seguridad como consecuencia de la propia evoluci3n geomorfol3gica de los valles, que hasta alcanzar perfiles de equilibrio est3n inmersos en procesos permanentes de reajuste. Los cambios sin embargo se producen espor3dicamente y son precisamente los grandes temporales y las grandes riadas asociadas,

los desencadenantes de estos movimientos. La Tabla 1, donde se han reunido importantes fenómenos de inestabilidad en Cataluña asociados a episodios de lluvia, ilustra esta afirmación.

IDENTIFICACION DE ZONAS DE RIESGO En el último decenio la identificación de terrenos inestables y su representación cartográfica mediante mapas de riesgo ha recibido una considerable atención en muchos países tanto por parte de organismos públicos como de Universidades y Centros de Investigación. Varnes (1983) ha definido unos principios de zonificación:

- a) El conocimiento de acontecimientos pasados y presentes son claves para estimar futuros problemas de inestabilidad.
- b) Las condiciones que desencadenan la rotura, los procesos y mecanismos de inestabilidad y los efectos que ocasionan los cambios de condiciones del talud se conocen o se pueden estimar.
- c) Se puede llevar a cabo una graduación del riesgo.

Los numerosísimos métodos de estimación de riesgos que se han utilizado participan en grado variable de las condiciones anteriores. En muchos casos, lógicamente, las condiciones geológicas y geomorfológicas locales y ello condiciona decisivamente la técnica cartográfica utilizada. Con mucha frecuencia también, se han propuesto criterios semiautomáticos, susceptibles de cuantificación, que conducen a una zonificación y clasificación en niveles de riesgo de un área determinada. Por ejemplo Kawakami y Saito (1984) eligen los cinco aspectos siguientes para cartografiar riesgos a escala 1/25.000 (a partir de una cuadrícula de 250 m de lado): Densidad de valles (número de valles que cruzan los cuatro lados de una cuadrícula), altitud, ángulo de talud, formación geológica y estructura (existencia de anticlinal, sinclinal o falla). A cada uno de estos conceptos les asignan pesos que reflejan las condiciones de estabilidad de una cuenca concreta. Otro método empírico, quizá excesivamente simple, es el propuesto por Stevenson (1977): Asigna una puntuación a un conjunto de factores (Tabla 2) y define riesgo final de inestabilidad mediante el producto de tres términos

$$R = (P + 2W) (S + 2C) U \quad (1)$$

donde las asociaciones de sumandos reconocen una cierta correlación entre factores. Indica el autor que valores de R superiores a 60 son propios de rotura y que el rango 50-60 debe ser tratado como una indicación de posible inestabilidad. Sin embargo son los valores relativos los verdaderamente significativos. Iniciativas de cartografía de riesgo de gran envergadura se han llevado a cabo en diferentes países y especialmente en Francia (mapas ZERMOS- "zones exposées aux risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol"), Humbert (1977); Italia, (Carrara y Merenda, 1976); Checoslovaquia, (Mahr y Malgot, 1978) y Estados Unidos (un conjunto de ejemplos de utilización de metodologías diversas aparece en la interesante publicación de Robinson y Spieker, 1978). En España Rodríguez Ortiz y otros (1978) han desarrollado mapas de riesgo de la región de Jaén-Granada a escala 1:1.000.000 y 1:100.000. El criterio básico de subdivisión cartográfica es en este caso el litológico asociado a una intensidad observada de movimientos del terreno. Los autores indican para cada subdivisión litológica el tipo de movimiento esperado, ángulos máximos estables y el riesgo medio. Otros trabajos de clasificación han sido llevados a cabo por Hinojosa y León (1978). Tanto el IGME como el MOPU han publicado mapas de riesgo a escalas 1:5.000, 1:25.000, 1:100.000 y

TABLA 1. MOVIMIENTOS DE LADERAS RELACIONADOS CON EPISODIOS LLUVIOSOS
(Corominas, 1987)

FECHA	LUGAR	OBSERVACIONES
Enero 1881	Puigcerçós (P.Jussá)	Necesario abandonar el pueblo
Octubre 1907	Espui (P.Jussá)	Obtura Flamicell
	La Coma (Solsonés)	1 muerto
	Llavorsí (P.Sobirà)	Obtura N.Pallaresa
	Boren (P.Sobirà)	
Octubre 1937	Bono (Alta Ribagorça)	Obtura N.Ribagorçana
	Torre d'Amargós (P.Jussá)	Obtura Barranc Gros
Octubre 1940	Rupit (Osona)	2 muertos
	Vernet (Conflent)	
	Prats de Molló (Vallespir)	Obtura el Tec
Febrero 1944	Ullastrell (V.Occidental)	
Octubre 1957	Pobla d'Arenós (Alt Millars)	Agrieta viviendas
Septiembre 1962	Castellbisbal (V.Occidental)	Carretera cortada
	Sta.Ma. Barbera (V.Occid.)	
Agosto 1963	Senet (Alta Ribagorça)	Obtura N.Ribagorçana
Octubre 1970	Vernet (Conflent)	
Septiembre 1971	El Papiol (Baix Llobregat)	Agrieta viviendas
Septiembre 1976	Castellfollit de la Roca (Garrotxa)	Viviendas en peligro
Noviembre 1982	Caregue (P.Sobirà)	Corta carretera y canal
	Cabdella (P.Jussá)	Arrasa viviendas 3 muertos
	Llavorsí (P.Sobirà)	Corta conducción de agua
	La Guingueta (P.Sobirà)	Intercepta carretera y aísla vivienda
	Pont de Bar (Alt Urgell)	Corta carretera y agrieta viv-
	Gósol (Berguedá)	
	La Coma (Solsonés)	Afecta viviendas
Noviembre 1983	El Papiol (Baix Llobregat)	Agrieta viviendas

TABLA 2. PUNTUACION ESTABLECIDA POR STEVENSON (1977) PARA DEFINIR RIESGOS DE INESTABILIDAD

FACTOR CONTRIBUYENTE	PUNTUACION
P FACTOR ARCILLA. Utiliza el rango de valores de Indices de Plasticidad (PI) disponibles para la unidad geológica involucrada en el deslizamiento	
PI en el tercio inferior	1
PI en el tercio medio	2
PI en el tercio superior	3
W FACTOR AGUA. Posición anual más alta de la superficie piezométrica con relación al plano de rotura típico	
Por debajo del plano	1
Entre el plano y la altura media del deslizamiento	2
Por encima de la altura media del deslizamiento	3
S ANGULO DE TALUD. Utiliza el rango de valores apropiado a la geología local.	
Dentro del tercio inferior	1
Dentro del tercio medio	2
Dentro del tercio superior	3
C COMPLEJIDAD DEL TALUD	
Talud simple	1
Rotura antigua, en parte borrada por la erosión	2
Rotura nueva, estable pero no erosionada	3
U USO DEL TERRENO	
Bosques	1
Terreno colonizado con precauciones especiales	1,25
Terreno colonizado sin precauciones especiales	1,50

1:200.000.

En el área del Pirineo y Prepirineo catalán, Corominas (1986a) efectúa una cartografía de riesgos geológicos a escala 1:50.000 que, además de la delimitación de áreas inundables, zonas con problemas de drenaje, erosión y hundimientos, considera la estabilidad natural de las laderas. Los criterios utilizados para su elaboración se basan en el tipo de movimientos, sus dimensiones, el grado de actividad, características morfológicas circundantes, la litología interesada y su disposición estructural. Los resultados se presentan mediante una zonación de áreas con distinto grado de riesgo, a la que se superponen los símbolos correspondientes al tipo de fenómeno que interviene.

Corominas (1986b) ha descrito también los criterios a utilizar para identificar sobre el terreno taludes inestables. Aunque la aplicación de criterios generales y el uso de técnicas cuantitativas son una ayuda para la localización de zonas inestables, nada sustituye sin embargo la intervención de técnicos expertos conocedores en detalle de la geología local.

Se ha señalado que la elevación de niveles piezométricos y la erosión de pie son causas inmediatas de inestabilidad asociadas a las avenidas. Alonso (1985) intentó valorar el peso relativo de ambos fenómenos sobre el factor de seguridad al deslizamientos a través del análisis de taludes simplificados. Allí se llegaba a la conclusión de que en los casos analizados un aumento medio de la presión intersticial de 1 m. de agua es 2-3 veces más peligroso que una sobreexcavación de 1 m. en el pie del talud. Se da la circunstancia, sin embargo, de que los niveles de agua en el terreno alcanzan con cierta frecuencia sus niveles máximos (no es necesario para ello una riada excepcional). Sin embargo las erosiones de pie tienen muy probablemente un periodo mayor de recurrencia. Son menos probables. Pero crean cambios irreversibles y acumulados en el sentido de la inestabilidad creciente. Con esta perspectiva, las zonas erosionadas en fondos de valle corresponden a áreas de alto riesgo de deslizamiento con independencia de otros factores. A esta conclusión llegaron Locat et al (1984) al estudiar una amplia cuenca (354 movimientos) situada en arcillas sensitivas de Quebec. La experiencia de recientes avenidas en el Pirineo y Prepirineo donde existen de tramos de río con fuerte actividad erosiva, confirma cualitativamente sus conclusiones. Las zonas erosionadas son por otra parte fácilmente identificables por foto aérea (cambios de color, mayores pendientes) lo que proporciona un simple criterio cartográfico que puede ser de utilidad sobre todo en relación con el efecto de avenidas.

El Papel de la Instrumentación. Con independencia de los métodos de control que se describen en el apartado siguiente, la instrumentación de taludes inestables se ha convertido en un método indispensable para identificar los movimientos del terreno. Por "identificación" se entiende el conocimiento de la evolución de presiones intersticiales en diferentes puntos del talud, el conocimiento del mecanismo de inestabilidad incluyendo la posición de las superficies de deslizamiento y la extensión y velocidad de los movimientos en superficie y en profundidad. Es decir todos aquellos datos que permitan una representación conceptual del fenómeno, de acuerdo con el conocimiento geotécnico actual. Este conocimiento es previo y necesario a la implantación de un sistema de control. Por otra parte la instrumentación de taludes es útil al menos para (Pilot, 1984):

- a) Conocer las condiciones de seguridad de todo tipo de estructuras construidas sobre terrenos de estabilidad dudosa.

- b) Conocer el comportamiento de todo tipo de obras construidas sobre terrenos potencialmente inestables. Dada la complejidad geológica y geotécnica de estos movimientos hoy se acepta que la instrumentación es una parte integral de la construcción.
- c) Proporcionar datos necesarios para el progreso del conocimiento en el que juega un papel fundamental la comparación entre predicciones de los modelos y comportamiento real.
- d) Establecer las causas de los movimientos y su evolución como paso previo a las tareas de prevención y corrección en su caso.

En la Tabla 3 se han indicado los tipos de instrumentos generalmente utilizados en la instrumentación de taludes, las variables que miden en cada caso y algunas observaciones sobre su utilización y precisión.

Conviene señalar que las descripciones cualitativas o semicuantitativas que son la base de la cartografía de riesgos no son suficientes ni siquiera para detectar la existencia de movimientos capaces de dañar estructuras en obras. Se necesita la precisión de instrumentos de medida. Un caso interesante es el descrito por Corte et al (1984). Las pilas del Viaducto de Charmaix, de acceso al Tunel de Frejus (lado francés) fueron cimentadas, en su mayor parte, sobre zapatas en las laderas de un torrente. Las laderas estaban formadas por derrubios de espesor variable (15-40m.) sobre una formación esquistosa carbonífera. El torrente se había fijado mediante obras en el cauce. En ausencia de signos visibles de inestabilidad en las laderas y en estructuras vecinas, aquellas se aceptaron como estables. Años después, la comprobación de la existencia de daños y anomalías en la estructura permitió la detección, mediante inclinometría, de procesos de deslizamiento, en ambas laderas, con velocidades de 10 mm/año. El reconocimiento convencional e incluso la observación topográfica durante varios años es insuficiente para captar algunos procesos activos de deslizamiento. La precisión de los equipos de medida debe ser pues acorde con la magnitud y velocidad de los movimientos.

MÉTODOS DE PREVISIÓN Y CONTROL

Aspectos Preliminares. Los movimientos de ladera en suelos y roca presentan una gran variedad, por muchos conceptos, y se han propuesto para encarar su estudio un buen número de clasificaciones. Entre ellas se pueden citar las de Terzaghi (1950) que atiende a los procesos que desencadenan la inestabilidad, las de Skempton y Hutchinson (1969) y Varnes (1978) de carácter más morfológico, la de Rib y Ta Liang (1978) que se centra en la descripción de las masas deslizadas y de sus alrededores y, en España, las contribuciones de García Yagüe (1967), inspiradas en la clasificación de Varnes. Un aspecto que abordan algunas clasificaciones (Varnes) es la velocidad de los movimientos. Este es un dato clave para diseñar un sistema de previsión y control.

En la Fig.1 (Morgenstern, 1985) se propone una clasificación de los movimientos del terreno atendiendo a su velocidad de acuerdo con la escala propuesta por Varnes (1978). Reconociendo que el daño potencial es función directa del área involucrada (para la que existen medios de cuantificación) y la velocidad del movimiento, se centra en esta última, la distinción entre categorías, muy en paralelo con una clasificación de intensidad sísmica. Las seis categorías hacen referencia a la respuesta humana posible y se describen de la siguiente forma:

TABLA 3. METODOS DE AUSCULTACION UTILIZADOS EN TALUDES

PRINCIPIO DE MEDIDA/EQUIPO	IDEA SOBRE EL ERROR GLOBAL EN LA MEDIDA DE LOS MOVIMIENTOS
<p>MOVIMIENTOS DE SUPERFICIE</p> <p>Fotogrametría aérea Fotogrametría terrestre</p> <p>Topografía: Triangulación Trilateración Triangulateración</p> <p>Distanciómetro de superficie: Base pequeña (grietas) (<1 m) Base media (1-5 m) Base larga (hilo invar) (1-59 m)</p> <p>Clinómetros: Electrolíticos Servoacelerómetro</p>	<p>Error + 10 cm Error + 1-2 cm</p> <p>Errores en el rango de los mm</p> <p>Superioridad de la triangulateración</p> <p>Error ≈ 0.1 mm Error ≈ 0.1 a 0.5 mm Error 0.1 a 0.5 mm</p> <p>Error 0.1 - 10 seg. de arco Error ≈ 5 seg.</p>
<p>MOVIMIENTOS EN PROFUNDIDAD</p> <p>Detectores de la posición de la superficie de rotura.</p> <p>Inclinómetros (servoacelerómetros) (fijos, móviles)</p> <p>Péndulo inverso</p> <p>Extensómetros: Varillas Micrómetro deslizante Magnético</p>	<p>Error en superficie en el orden del mm</p> <p>Error en el orden del mm</p> <p>Error 0.01 - 0.1 mm Error entre puntos de medida: micras Error ≈ 0.02 mm</p>
<p>PRESION INTERSTICIAL</p> <p>Medidas aisladas</p> <p>Piezómetros: Hidráulico doble tubo Neumático De cuerda vibrante De galga extensométrica</p> <p>Medida continua (Massarsch, Piezofor, Patton, Kovari)</p> <p>EMISION ACUSTICA</p>	

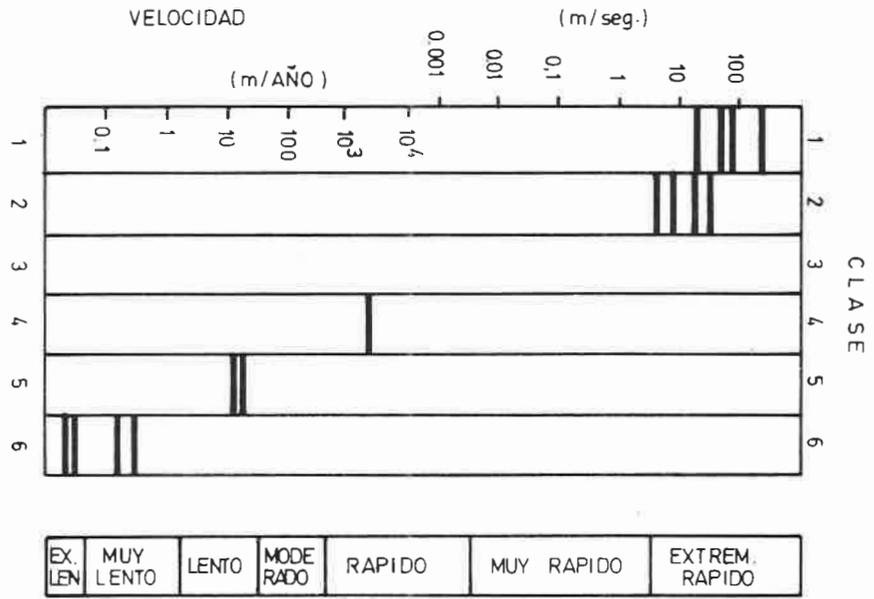


Fig. 1.- Clasificación de los movimientos del terreno (Morgenstern).

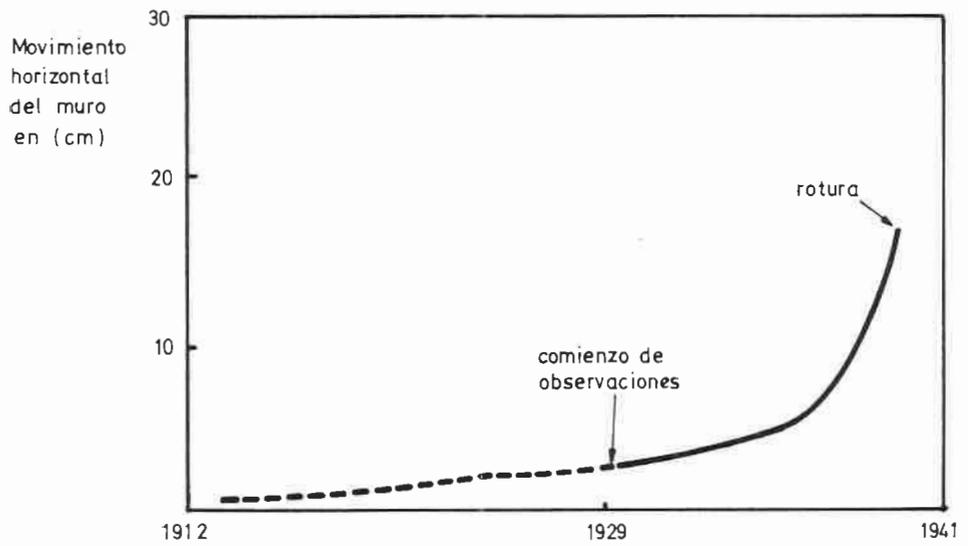


Fig. 2.- Desplazamientos previos a la rotura observados en el desmante de Kendal Green, Skempton (1964).

- 1) No hay respuesta posible; catástrofe de la mayor violencia.
- 2) Se pierden algunas vidas; velocidad demasiado grande como para permitir que todas las personas escapen.
- 3) Huida posible; equipos y estructuras destruidas.
- 4) Estructuras temporales o poco sensibles a movimientos se mantienen sobre o en frente de la masa en movimiento y otras destruidas.
- 5) Se pueden realizar trabajos de reparación durante el movimiento
- 6) Se mantienen las estructuras permanentes.

Las barras del dibujo se refieren a casos reales. El desastre de Vaiont está incluido en la categoría 1. Una enorme cantidad de movimientos, que dañan cualquier obra de infraestructura están dentro de la denominada categoría 6. Parece lógico pensar que el sistema de prevención y control debe estar condicionado por la velocidad esperable de los movimientos. Una clase de procedimientos de control utiliza la medida en el tiempo de los movimientos. Sin embargo esta metodología tendría poco sentido si el movimiento esperable es muy rápido y se puede desencadenar sin previo aviso (en cuanto a movimientos se refiere). Este es el caso de los deslizamientos que se producen en las empinadas laderas de Hong Kong, recubiertas de suelos residuales de alteración de granitos y rocas volcánicas. Allí se buscan predominantemente correlaciones directas entre intensidad de lluvias y movimientos. Este es un caso repetido en otras áreas de clima tropical y subtropical donde predominan los suelos residuales propensos a originar rápidos flujos de barro y detritus. Se han desarrollado sistemas de previsión a partir de la observación de movimientos, de presiones intersticiales y de la intensidad de las precipitaciones. En cualquier caso estos métodos deben aplicarse en zonas donde una previa cartografía de riesgo detecte riesgos elevados. Típicamente la instrumentación necesaria para medir desplazamientos y presiones intersticiales debe situarse en perfiles tipo donde se reconozca un riesgo de inestabilidad alto o bien ésta sea ya un hecho.

Métodos basados en la observación de movimientos. Excepto en casos como los señalados (coladas rápidas), las roturas de taludes tanto en suelos como en rocas suelen venir precedidas de movimientos premonitorios. Por otra parte, los movimientos suelen tener un carácter acelerado hasta el desenlace final. Las Figuras 2 y 3 ilustran estas afirmaciones. Skempton y Hutchinson (1969) sugieren incluso que el movimiento acumulado previo a la rotura tiende a ser mayor cuanto más importante es el deslizamiento (en términos del volumen de la masa deslizada).

La medida continua de movimientos (o de variables relacionadas con los movimientos: ángulos, deformaciones) en superficie o en profundidad proporciona pues datos susceptibles de integrarse en un sistema de alarma. Existen variantes dentro de este grupo:

a) Extrapolación de las curvas desplazamiento-tiempo hasta una situación aceptada como de rotura.

Este fue el procedimiento descrito por Voight y Kennedy (1979) para intentar predecir la rotura de un deslizamiento en una mina de pórfidos cupríferos a cielo abierto (minas de Chuquicamata, Chile). En la zona del deslizamiento se medían la apertura de grietas mediante extensómetros, desplazamientos en puntos localizados, inclinómetros, etc. Se podían dibujar gráficos como los de la Figura 4 a partir de observaciones. Se aproximaron diversas funciones

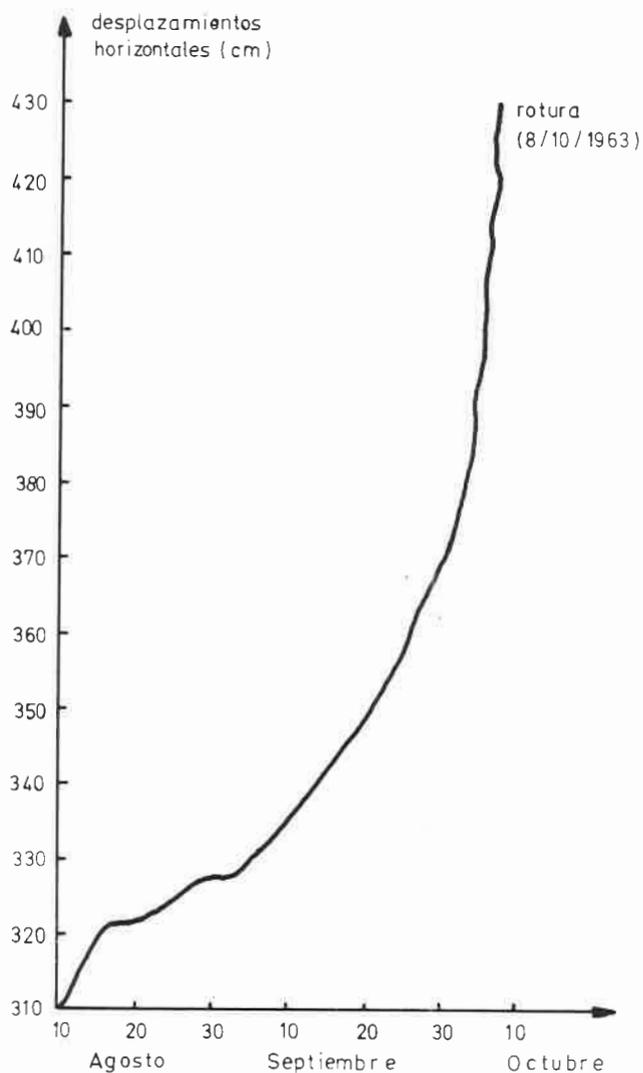


Fig. 3.- Movimientos previos a la rotura de Vaiont (Panet y Rotheval, 1976).

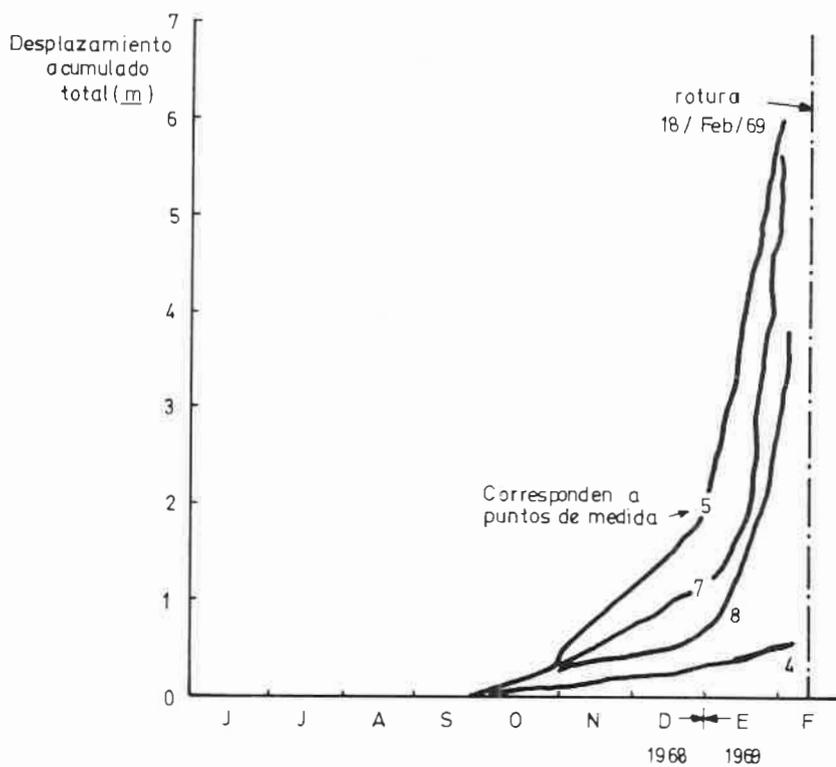


Fig. 4.- Desplazamientos acumulados en algunos puntos de medida. Deslizamiento de la mina de Chuquicamata (Chile). (Voight y Kennedy, 1979).

de regresión a los datos (de tipo cuadrático, cúbico, logarítmico, exponencial y potencial) y se aceptaba como momento de rotura aquel que señalaba un desplazamiento de 6 m. Este análisis se hacía también incrementalmente (cuando se modificaba ostensiblemente la relación desplazamiento-tiempo). Diferentes puntos de medida conducían a diferentes predicciones. Bajo la filosofía de que "si lo peor puede suceder, sucederá" las curvas de aproximación de tipo exponencial son probablemente las más adecuadas. De hecho, en este deslizamiento la rotura tuvo lugar en la fecha más temprana de todas las predichas. El máximo desplazamiento final observado (8 m) que considerablemente mayor que los 2-4 m previos a la catástrofe de Vaiont -que afectó a una masa extraordinariamente mayor- lo que hace arriesgado proponer como criterio de rotura un desplazamiento acumulado que guarde relación con el volumen del deslizamiento.

Blondeau et al (1983) analizando los movimientos reactivados en una ladera inestable por la construcción de un terraplén, sugieren relaciones hiperbólicas entre ángulos acumulados en clinómetros e inclinómetros y tiempo. La posición de la asíntota en este caso señala la rotura.

b) Establecimiento de umbrales de alarma a partir de movimientos incrementales.

A partir de una medida continua de movimientos y de un criterio de alarma se han instalado sistemas de prevención que, lógicamente, pueden activarse varias veces a lo largo de la historia de los movimientos del talud. Los grados de automatización de estos procedimientos son variables. Haugen y Isaac (1984) citan el uso intensivo de inclinómetros, leídos cada 4 horas para detectar condiciones de rotura en excavaciones a cielo abierto en arenas bituminosas. Fijan en 3 mm de movimiento el criterio de deslizamiento incipiente. El método requiere una rápida interpretación de resultados. Discuten estos autores las posibilidades de desarrollar un sistema automático de prevención que ha de basarse en una medida cuasi-continua de la deformación a lo largo de sondeos (dadas las pequeñas magnitudes de los desplazamientos previos a la rotura en este caso, se descartan métodos de control de superficie por su escasa precisión). Equipos capaces de este tipo de medidas se encuentran aún en fase de desarrollo. Delmas y Rodriguez (1984) describen un sistema de alarma a distancia basado en las deformaciones detectadas por un péndulo inverso instalado en un deslizamiento (el anclaje se sitúa en profundidad por debajo de la superficie de deslizamiento, que debe ser conocida). El programa de seguimiento de los movimientos establece la alarma cuando se detectan movimientos de 1 cm. La ladera inestable estaba en este caso constituida por margas y calizas del Keuper recubiertas por derrubios. Pincent (1977) ha descrito un sistema óptico capaz de detectar la inclinación de un dispositivo de alerta, basado en tres niveles situados a 120.

Prácticamente a partir de cualquier transductor de desplazamiento o inclinación pueden idearse dispositivos de alarma. Bhandari (1984) describe sistemas de alarma a distancia utilizados especialmente en macizos rocosos, que se basan en la medida de desplazamientos de bloques o grietas mediante transductores de desplazamiento.

Algunos fabricantes comercializan sistemas automatizados de detección de movimientos y su correspondiente dispositivo automatizado de interpretación de lecturas y de establecimiento de alerta.

Común a todos estos procedimientos es la necesidad de fijar un umbral de alarma que suele hacerse mediante consideraciones empíricas.

c) Análisis de las velocidades de fluencia previas a la rotura.

En una serie de artículos que comienzan en el año 1961, Saito (Saito y

Uezawa, 1961; Saito, 1965, 1969, 1980, Saito y Yamada, 1973) ha propuesto a partir de datos experimentales de laboratorio la relación empírica siguiente entre la velocidad de deformación de fluencia secundaria, $\dot{\epsilon}$ y el tiempo de rotura t_r :

$$\log t_r = 2.33 - 0.916 \log_{10} \dot{\epsilon} \pm 0.59 \quad (2)$$

donde $\dot{\epsilon}$ está expresado en 10^{-4} min^{-1} y t_r en minutos. La expresión (2) admite una forma más sencilla si se acepta que el coeficiente 0.916 de la ecuación (2) es la unidad:

$$t_r \cdot \dot{\epsilon} = \text{constante} = 214 \quad (3)$$

Es decir, el tiempo hasta rotura es inversamente proporcional a la velocidad de deformación de fluencia secundaria (aquella velocidad de deformación constante que precede al último estado acelerado de deformación -denominada fluencia "terciaria"- previo a la rotura). El tiempo anterior debe contarse a partir del comienzo de la deformación secundaria, es decir a partir del momento en que la deformación aumenta linealmente con el tiempo. En la práctica Saito ha utilizado la relación (2) y (3) a partir de medidas de extensómetros colocados a ambos lados de grietas o bien a partir de medidas de desplazamiento, suponiendo una longitud base de referencia a fin de calcular deformaciones. Esta dificultad para establecer la deformación es probablemente el aspecto más criticable de su propuesta. Sin embargo en una evaluación más reciente de su fórmula (Saito, 1969, 1980, Saito y Yamada, 1973) propone extender la misma idea a la velocidad de deformación de fluencia terciaria de forma que se cumpla "instantáneamente" en el tiempo t , es decir:

$$\log (t_r - t) = \log (a) - \log \dot{\epsilon} \quad (4)$$

donde $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación en el tiempo t y a una constante. La ecuación (4) se puede escribir también

$$\Delta l = A \log \frac{t_r - t_0}{t_r - t} \quad (5)$$

donde Δl es el desplazamiento, t_0 el tiempo de desplazamiento cero y A una constante. La curva de desplazamiento previo a la rotura se puede analizar con ayuda de la ecuación (5) y deducir de forma continua el tiempo de rotura. En la Fig.5 aparece una predicción de este tipo para el desplazamiento de Takabayama (Saito y Yamada, 1973). Con este planteamiento se evita la dificultad de interpretar el concepto de deformación en un deslizamiento pero la predicción ahora se hace con poco tiempo pues la fluencia terciaria precede inmediatamente a la ruptura.

Analizando las medidas de desplazamiento en función del tiempo de un talud experimental llevado hasta rotura mediante lluvia artificial, Fukuzono y Terashima (1985) encuentran que en los últimos estadios de deformación previos a la rotura, la aceleración es proporcional a la velocidad elevada a una potencia, α , próxima a 2. Esta relación puede integrarse de manera que la velocidad instantánea, v , en el tiempo t , esté dada por:

$$v = [a (\alpha - 1)^{\frac{1}{1-\alpha}} (t_f - t)^{\frac{1}{1-\alpha}}] \quad (6)$$

Si $\alpha = 2$

$$\frac{v}{t_f - t} = \text{constante} \quad (7)$$

donde t_f es el tiempo hasta rotura. Esta relación similar a la propuesta por Saito (ecuación 3) puede de nuevo utilizarse para predecir la rotura en los momentos cercanos a ella (En los casos analizados por los autores citados la predicción basada en fluencia terciaria es fiable cuando faltan horas o todo lo más algún día para el colapso). La experiencia es sin embargo aún escasa con estos modelos de predicción.

Métodos basados en la observación de presiones intersticiales

Numerosas observaciones de movimientos de taludes y de presiones intersticiales en piezómetros demuestran en multitud de terrenos y morfologías la existencia de fuertes correlaciones entre ambos. La existencia de esta correlación fue ya utilizada por Terzaghi (1950) para proponer medidas de drenaje que estabilizaran una ladera que amenazaba a una central hidroeléctrica. Gráficos que relacionen la velocidad de movimiento con el nivel piezométrico se pueden construir a partir de observaciones de campo y son útiles tanto para diseñar las medidas de drenaje estabilizadoras como para concebir un sistema de alarma. En la Fig.6 se ha representado esta relación para una ladera de materiales coluvionales situados sobre arcilla margosa, alterada en el valle del río Martino (Este de Italia) (Bertini et al, 1984). Este gráfico parece mostrar la existencia de un umbral de presión intersticial por encima del cual los movimientos se incrementan rápidamente.

Si se conoce la geometría del deslizamiento (y eso puede ser determinado por la adecuada instrumentación) es posible, mediante las técnicas convencionales de análisis por equilibrio llímite trasladar las variaciones de nivel piezométrico a variaciones en el coeficiente de seguridad. De esta manera, el coeficiente de seguridad puede "explicar" las velocidades del movimiento (Pouget et al, 1985) (Fig.7) y convertirse a su vez en una variable de control. Este caso tiende también a mostrar un valor umbral de F (~ 1.2) por encima del cual la estabilidad del talud esté garantizada. En definitiva, la medida de presiones intersticiales, unido a una utilización inmediata de las mismas -mediante el cálculo del coeficiente de seguridad- permite establecer un método de previsión de deslizamientos.

Investigando la respuesta de piezómetros a lo largo de varios años en diversas regiones de Suecia, Svenson y Salfors (1984) encuentran que las fluctuaciones de nivel tienen una fuerte correlación en regiones bastante extensas (distancias de 30-40 Km). Ello permite concentrar las medidas continuas y a largo plazo en pocos puntos y extender estas variaciones a puntos próximos mediante el simple procedimiento de escalado que indican estos mismos autores (éste es también un buen procedimiento para decidir, cuando se proyecta un desmonte, el nivel piezométrico de diseño). Es necesario sin embargo disponer de medidas continuas en un número significativo de puntos. Muchos sondeos realizados en el curso de investigaciones concretas y posteriormente abandonados podrían tener esta utilidad en un posible plan de previsión de deslizamientos en áreas de riesgo elevado.

Métodos basados en la correlación directa con lluvias

Especialmente en áreas propensas a movimientos rápidos o que no exhiban síntomas previos de movimientos (como pueden ser las coladas y flujos de

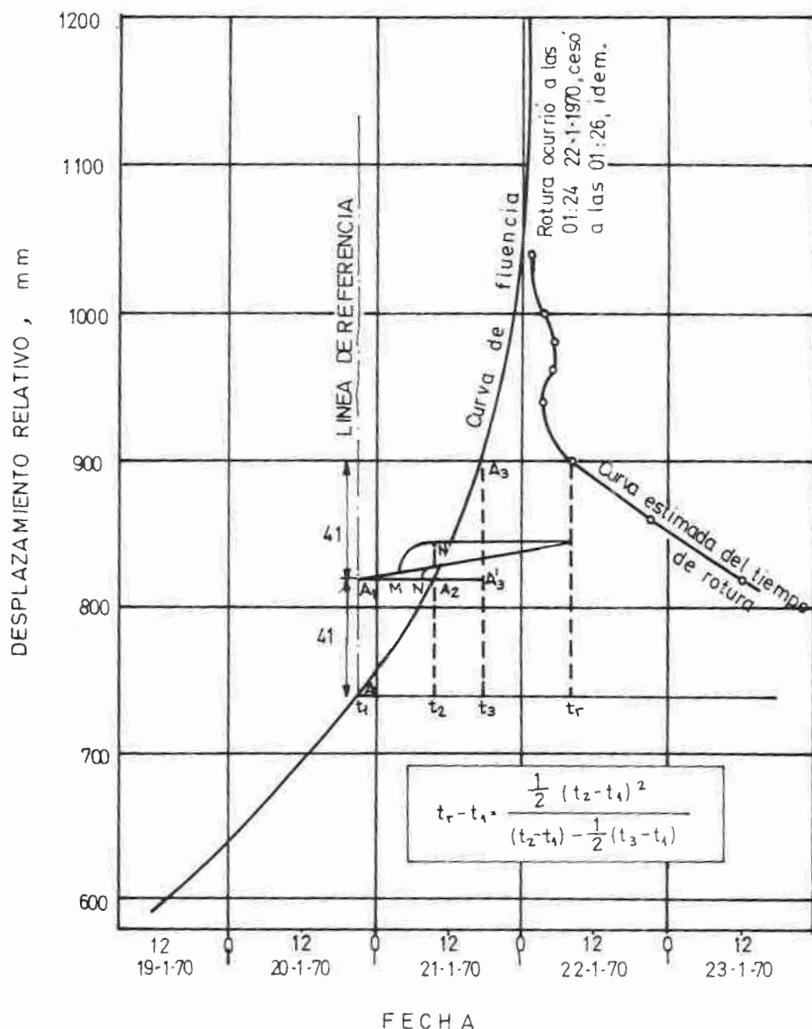


Fig. 5.- Predicción del momento de rotura a partir del análisis de fluencia terciaria (Saito y Yamada, 1973).

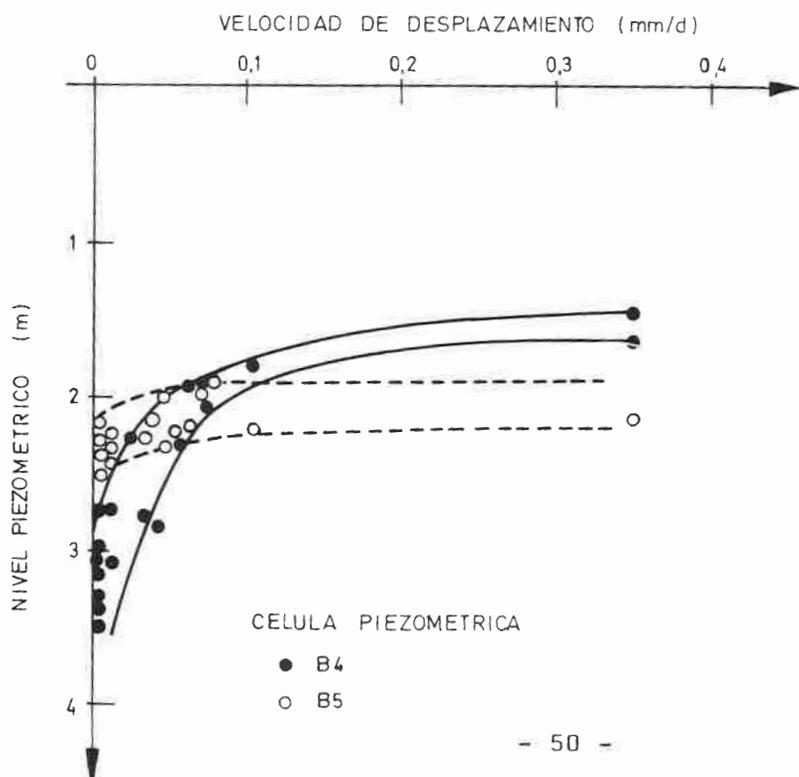


Fig. 6.- Relación entre velocidad de desplazamiento y nivel piezométrico. (Bertini et al, 1984).

detritos y barro), las correlaciones directas con lluvias pueden proporcionar un criterio aceptable de previsión. En áreas geográficas de fuertes pendientes, suelos propensos a estos movimientos y régimen de lluvias caracterizados por periodos de intensidades extremas se han desarrollado especialmente estos métodos. Japón y el territorio de Hong-Kong son dos ejemplos sobresalientes.

En general los criterios de peligrosidad se basan en dos tipos de variables relacionadas con un pluviograma: alguna medida de la lluvia acumulada y la intensidad "instantánea". La Fig.8 representa la correlación establecida por Lumb (1975) entre intensidad de lluvia y ocurrencia de deslizamientos en Hong-Kong. En esta figura se ha basado hasta ahora el plan de emergencia inducida por deslizamientos en aquel territorio. Sin embargo, a raíz de la instalación de más de 40 estaciones de recogida continua de la intensidad de lluvia (cada 5 minutos) se ha modificado alguna conclusión implícita en la Fig.8. (Brand et al, 1984) en el sentido de que la lluvia acumulada precedente no es un factor importante en el desencadenamiento de roturas. Solo una lluvia acumulada de unos pocos días parece ser significativa. Se concluye además que:

- "La mayoría de los deslizamientos están inducidos por aguaceros localizados de corta duración y gran intensidad y estos deslizamientos se producen aproximadamente al mismo tiempo que el pico de intensidad de lluvias".
- "Una intensidad de lluvia de 70 mm/hora parece ser el umbral por encima del cual se producen deslizamientos. El número de deslizamientos y su severidad se incrementa dramáticamente cuando la intensidad horaria se incrementa por encima de este nivel".
- "La intensidad diaria refleja generalmente los aguaceros de corta duración y gran intensidad y por ello puede ser usada como un indicador de la probabilidad de deslizamientos. Una lluvia horaria de menos de 100 mm difícilmente puede ocasionar un deslizamiento de grandes proporciones".

Estos criterios son difícilmente extrapolables, al menos en su vertiente cuantitativa a otras zonas (la intensidad media anual en Hong-Kong es de 2225 mm y son comunes aguaceros de más de 250 mm en 24 horas e intensidades horarias de más de 50 mm). Por otra parte los deslizamientos tienen lugar en suelos residuales de granito y rocas volcánicas que son suelos no saturados de permeabilidad relativamente elevada.

En Japón son frecuentes las coladas rápidas en formaciones alteradas de rocas terciarias y volcánicas. Abundan por otra parte los rios de fuerte pendiente y los regimenes de lluvias están muy afectados por los tifones. También aquí se proponen criterios que combinen la lluvia acumulada hasta una hora antes de producirse la colada con intensidades máximas horarias (Yano y Senoo, 1985; ver Fig.9). En el eje de abscisas se representa la lluvia antecedente efectiva que se calcula de acuerdo con las indicaciones de la Fig.9. Gráficos como el de esta figura dividen el espacio intensidad horaria - lluvia acumulada en regiones de peligrosidad variable. Estos gráficos deben establecerse para áreas concretas donde predomine una cierta homogeneidad en las condiciones que controlan los deslizamientos (litología, permeabilidad, topografía, etc.). Sólo es posible realizar este tipo de estudios si se poseen datos pluviométricos continuos durante periodos extensos en los que se hayan documentado un buen número de fenómenos de inestabilidad. A partir de este tipo de gráficos los autores citados proponen el establecimiento de planes de alarma y evacuación cuando la "trayectoria" de una determinada lluvia cruce unos umbrales de riesgo definidos de antemano en función de la información existente (Fig.10).

En una zona más próxima, que guarda una similitud más alta, en terrenos y clima, con las condiciones que pueden prevalecer en regiones mediterraneas,

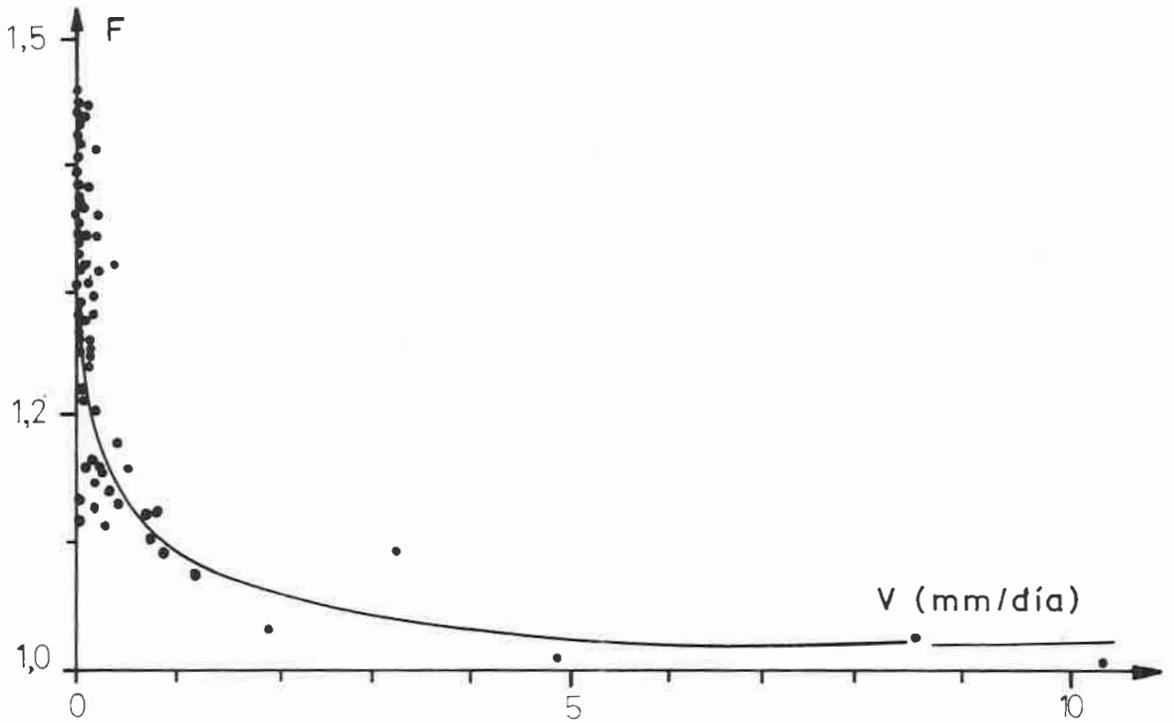


Fig. 7.- Relación entre velocidad de desplazamiento y coeficiente de seguridad obtenida por Pouget et al. (1985).

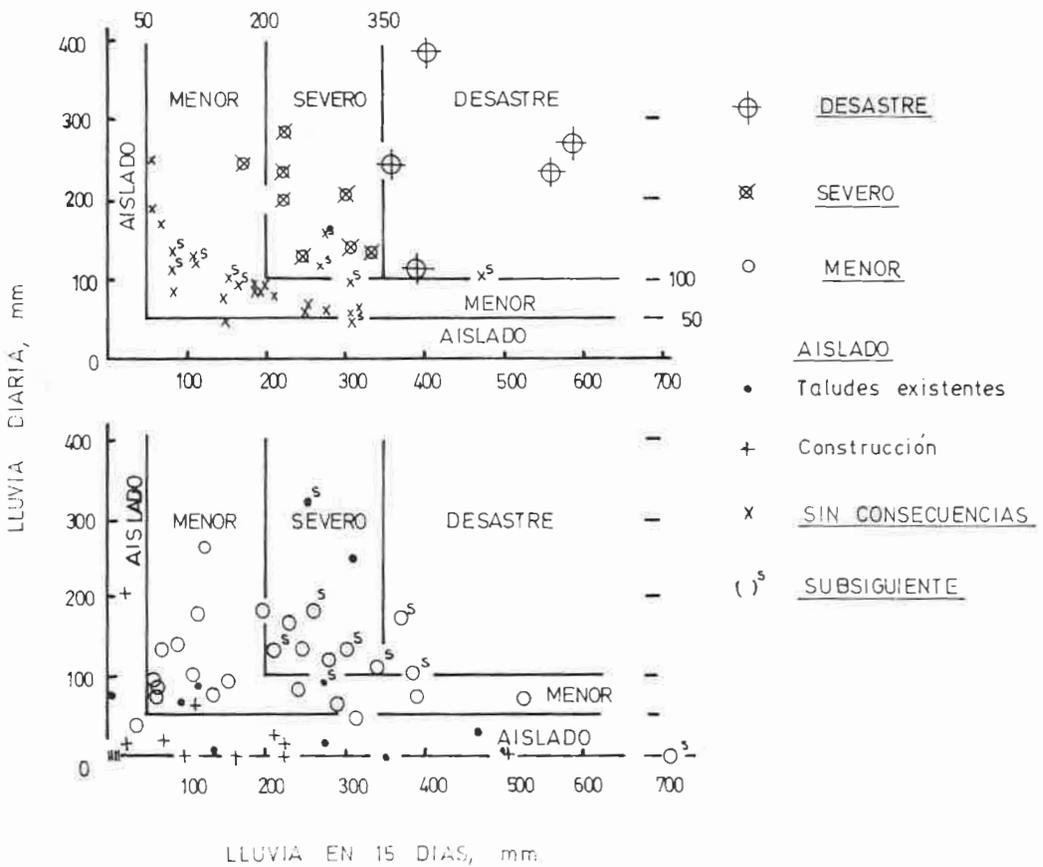


Fig. 8.- Correlación propuesta por Lumb (1975) entre lluvia y Deslizamientos en Hong-Kong.

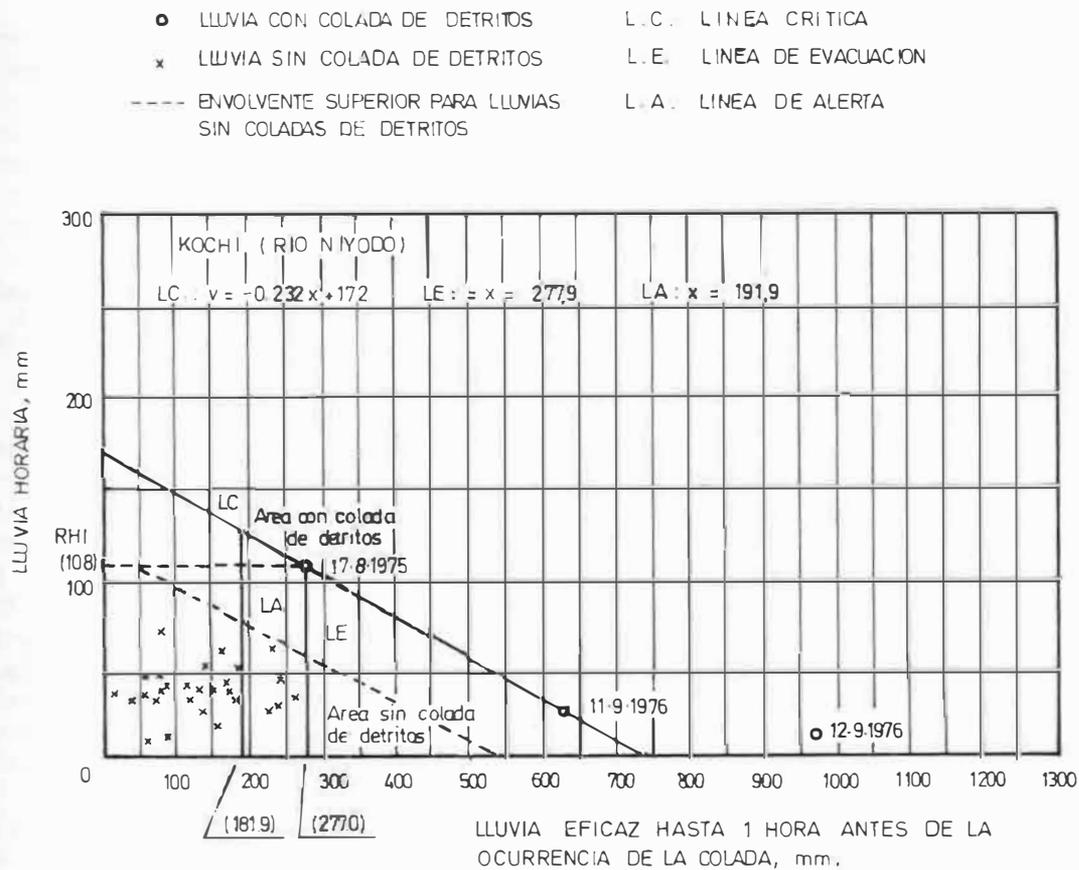


Fig. 9.- Relación entre la lluvia horaria y la lluvia eficaz (2 días) que originan coladas. Prefectura de Kochi-Río Nyodo. (1a "lluvia eficaz" es la lluvia acumulada teniendo en cuenta el efecto de la lluvia precedente. Ver Yano y Senoo, 1985).

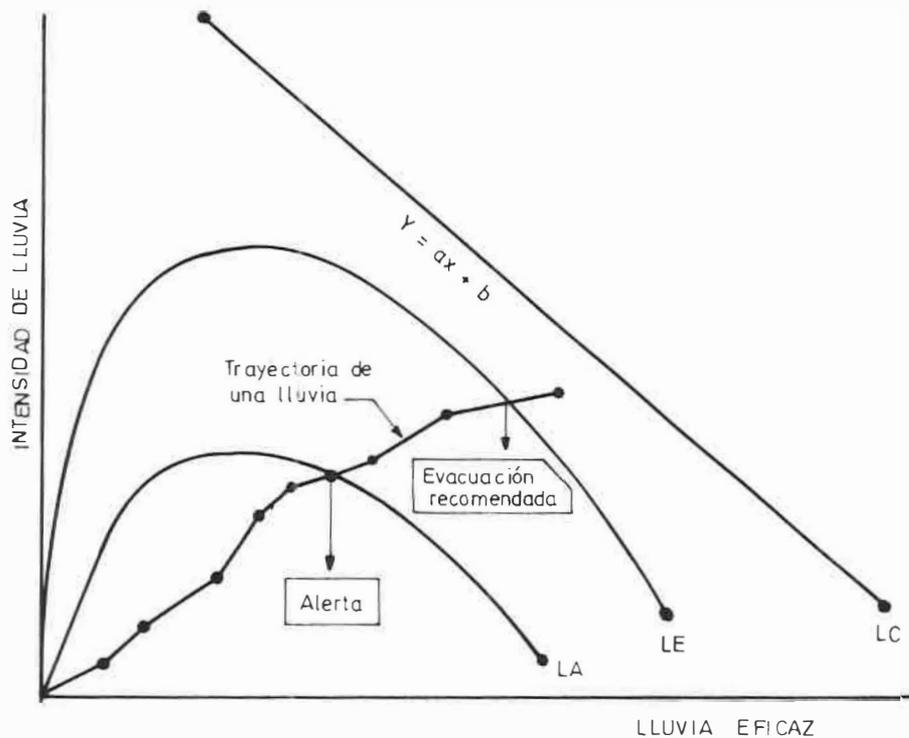


Fig. 10.- Ilustración del método de alerta y evacuación propuesto por Yano y Senoo, 1985.

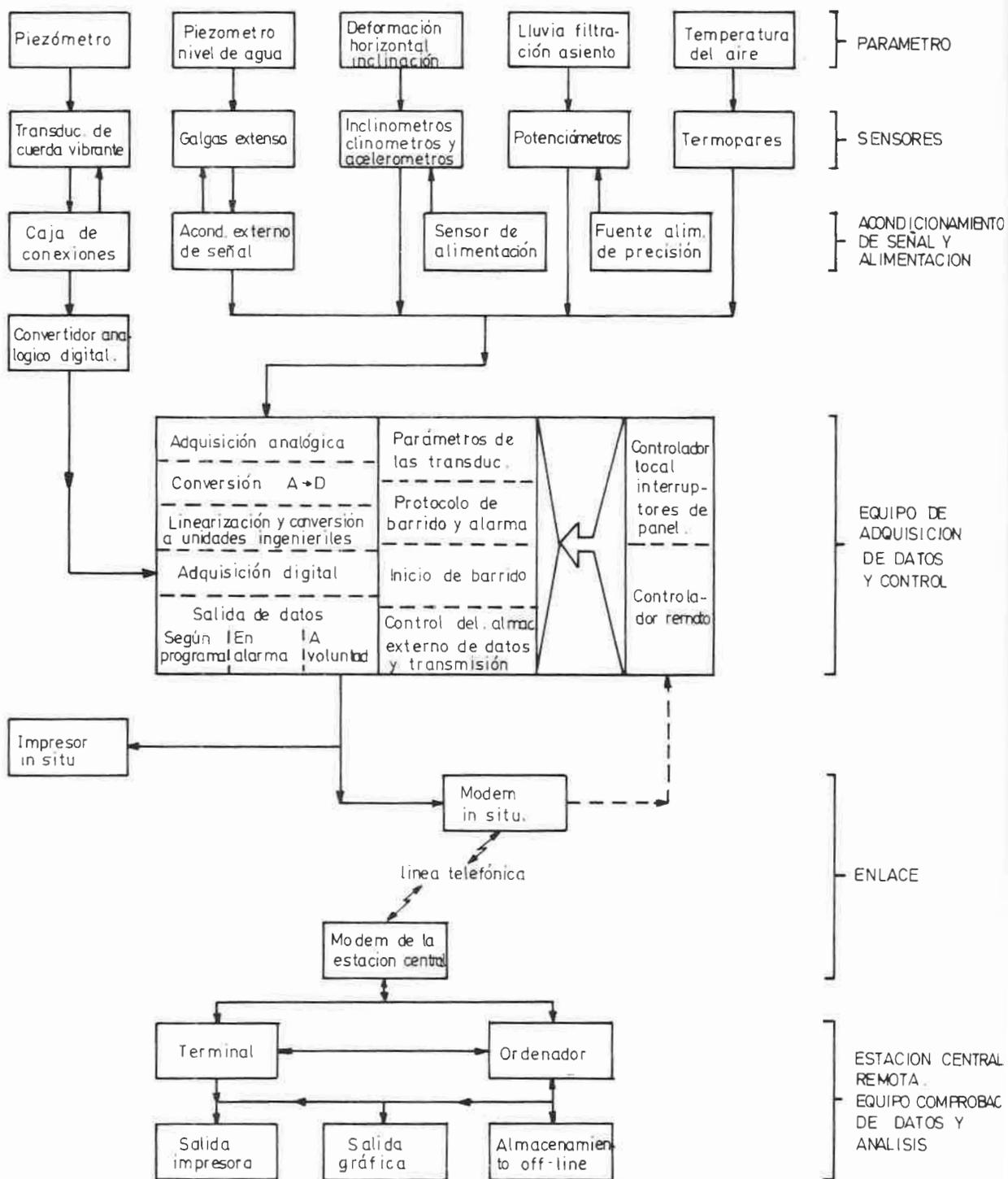


Fig. 11.- Sistema de instrumentación remota (Green y Roberts, 1983).

Menneroud (1983) ha llevado a cabo un estudio sobre la relación pluviosidad-deslizamientos (alrededores de la ciudad de Niza). Utiliza la curva de lluvia acumulada para encontrar algunas correlaciones entre las modificaciones de niveles piezométricos y algunos parámetros que se pueden deducir de aquella.

- La intensidad mínima que eleva los niveles piezométricos de las laderas es de 5 mm/día. Lluvias superiores a 20 mm/día tampoco se traducen en incrementos adicionales de niveles piezométricos (el exceso se transforma en escorrentía).
- Se necesitan cantidades de lluvia acumuladas superiores a 300 mm para ocasionar deslizamientos.
- Son necesarios unos dos meses sin lluvia para anular los efectos de lluvias anteriores.

Las metodologías de previsión basadas en correlaciones con la aparición de lluvias tienden lógicamente a tener un carácter local. Los ejemplos citados pueden servir sin embargo para establecer bases metodológicas en otros estudios de esta índole que puedan iniciarse. Es de destacar la necesidad de disponer de registros continuos o quasicontinuos de lluvia, de una información precisa de los momentos de aparición de deslizamientos y de los mecanismos de rotura en cada caso. Esta información debe estar disponible durante un número de años estadísticamente significativo a fin de extraer conclusiones fiables. Estudios así se pueden justificar en zonas reconocidamente inestables delimitadas a partir de una cartografía de riesgo como las mencionadas en la primera parte de este artículo.

Sistemas de adquisición y transmisión de datos. En muchas de las referencias citadas se describen sistemas de alarma a partir de alguno de los criterios expuestos. Desde esquemas simples (un extensómetro de desplazamiento como accionador de una alarma sónica) hasta los más complejos (recogida de datos mediante conversores analógico-digital y su tratamiento en ordenador) existen tantas configuraciones como casos concretos. Estos sistemas distan sin embargo de ser comunes aunque es previsible su incremento en zonas de alto riesgo. En España los sistemas de alarma de fenómenos de inestabilidad son prácticamente inexistentes (Román, 1982, describe un sencillo detector visual de movimientos en un desmonte de la autopista del Mediterráneo).

Uno de los sistemas más completos y complejos de medida remota de instrumentos en conexión con la estabilidad de taludes es el descrito por Green y Roberts (1983). La instalación proyectada funciona automáticamente y es interrogada mediante línea telefónica por un ordenador situado a 4000 km de distancia. En la Fig.11 se indica un esquema del sistema utilizado. Los autores no indican sin embargo que se utilizaran criterios concretos de alarma. Por otra parte son de destacar las innumerables dificultades de orden práctico que plantean estos sistemas de instrumentación de acceso remoto.

AGRADECIMIENTOS

Los comentarios y revisión hecha por el profesor J. Corominas han contribuido a mejorar la versión original de este trabajo.

REFERENCIAS

Alonso, E. (1985) "Inestabilidad de laderas en avenidas". Memorias del Curso de Avenidas. Cálculo, Laminación y Previsión Public. de la ETSICCP Barcelona, 46 p.

- Bertini, T., F.Cugusi, B.D'Elia, M.Rossi-Doria (1984) "Climatic conditions and Slow Movements of Colluvial Covers in Central Italy" Proc. Int.Conf.on Landslides. Vol.I, 367-376
- Bhandari, R.K. (1984) "Simple and Economical Instrumentation and Warning Systems for Landslides and other Mass Movements". State-of-the-Art Lecture Proc. IV Int.Symp. on Landslides, Toronto, Vol.1, 251-274.
- Blondeau, F., P.Morin and P.Pouget (1983) "Comportement d'un remblai construit jusqu'a la rupture". Rapport de Recherche LCPC n.106, 43 p., Paris.
- Brand, E.W., J.Premchitt and H.B.Phillipson (1984) "Relationship between Rainfall and Landslides in Hong Kong" Proc. 4th Int.Symp. on Landslides, Toronto, Vol.I, 377-384
- Carrara, A. and L.Merenda (1976) "Landslide Inventory in Northern Calabria, Southern Italy". Bull.Geol.Soc.Am.,Vol.87, N.8, 1153-1162
- Corominas, J.(coord)(1986a) "Memoria de la cartografia de riscos geologics a les comarques de muntanya de Catalunya" Servei d'acció comarcal. Conselleria de Política Territorial i Obres Públiques. Generalitat. En prensa.
- Corominas, J. (1986b) "Identificación de taludes inestables". Jornadas sobre investigación aplicada en Ingeniería Geológica. E.T.S.Ing.Caminos. Univ.de Cantabria. 27 p.
- Corominas, J. (1987) Comunicación Personal.
- Corte, J.F., J.Perrin, R.Bargillat et P.Garnier (1984) "Analyse des mouvements de terrain par inclinometrie. Le cas des versants de la vallee du Charmaix (Savoie)". Mouvements de Terrains. Colloque de Caen. Doc.BRGM, n.83, 345-352
- Delmas, Ph. and J.P.Rodriguez (1984) "Surveillance d'un site de glissement. Systeme d'alarme a distance". Proc. 4th Int.Symp.on Landslides. Toronto, Vol.2, 523-528
- Fukuzono, T. and H.Terashima (1985) "Experimental study of slope failure in cohesive soils caused by rainfall". Proc. of the Int.Symp. on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention. Tsukuba, 347-350
- Garcia Yagüe, A. (1967) "Contribución para la clasificación de los movimientos del terreno". Bol.26, SGOP, Madrid.
- Green, G.E. and D.A.Roberts (1983) "Remote Monitoring of a Coal Waste Embankement" en "Field Measurements in Geomechanics". K.Kovavi ed Balkema, Vol.1, 671-682
- Hanna, T.H. (1985) "Field instrumentation in geotechnical engineering". Trans Tech Publications.
- Haugen, M.A. and B.A. Isaac (1984) "Continuous Slope Movement Monitoring at an Oil Sands Mine".Proc. 4th Int.Symp.on Landslides, Toronto Vol.2, 529-534

- Hinojosa, J.A. and C.León (1978) "Unstable Soil Mapping in Spain". Proc 3rd Int.Congr. IAEG, Sec.I, Vol.2, 217-227
- Humbert, M. (1977) "La cartographie ZERMOS. Modalités d'establissement des Cartes des zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol". Bull. BRGM, Sec.III, N.1-2, 5-8.
- Kawakami, H. and Y.Saito (1984) "Landslide Risk Mapping by a Quantification Method". Proc.Int.Symp. on Landslides, Toronto, Vol.2, 535-540
- La Rochelle, P. and R.J.Marsal (1981) "Slope stability" General Report Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.4, 484-487
- Locat, J., D.Demers, J.Lebuis and P.Rissmann (1984) "Prediction des Glissements de Terrain; Application aux Argiles Sensibles, Riviere Chacoura, Québec, Canada".Proc. 4th Int.Symp.on Landslides, Vol.2, 549-556
- Lumb, P. (1975) "Slope failures in Hong Kong" Qtly.Inl.Eng.Geol.Vol.8, 31-65
- Mahr, T. and J.Malgot (1978) "Zoning maps for regional and urban development based on slope stability" Proc.Third Int.Congr. I.A.E.G., Sec.I, Vol.1, 124-137
- Menneroud, J.P. (1983) "Relations entre la pluviosité et le déclenchement des mouvements de terrain". Bull.Liaison Lab.P. et Ch., n.124, 89-100
- Morgenstern, N.R. (1985) "Geotechnical aspects of environmental control" Proc. 11th Int.Conf.on S.M. and F.E., S.Francisco, Vol.1, 155-186
- Panet, M. et J.P.Rotheval (1976) "Stabilité des masses rocheuses" en "La mécanique des Roches appliquée aux ouvrages de génie civil" Document de Formation Continue de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris
- Pilot, G. (1984) "Instrumentation and Warning Systems for Research and Complex Slope Stability Problems". State-of-the-Art Lecture Proc. IVth Int.Symp. on Landslides, Toronto, Vol.1, 275-305
- Pincet, B. (1977) "Surveillance des glissements de terrain" Revue Francaise de Geotechnique" Vol.1, 93-104
- Pouget, P., G.Cartier and G.Pilot (1985) "Comportement des remblais construits sur un versant instable". Proc.11th ICSMFE, S.Francisco Vol.4, 2345-2348
- Rib, H.T. and T.Liang (1978) "Recognition and Identification" Ch 3 in "Landslides Analysis and Control" R.L.Schuster and R.J.Krizek, eds, TRB Spec Rep. 176, 34-79
- Robinson, G.D. and A.M.Spieker eds. (1978) "Nature to be commanded" Geological Survey Prof.Paper 950, Washington, U.S.Gov.Printing Office.
- Rodriguez Ortiz, J.M., J.A.Hinojosa and C.Prieto (1978) "Regional Studies on Mass Movements in Spain" Proc. 3rd Int.Congr. IAEG, Sec.I, Vol.1, 267-277.
- Roman, F. (1982) "Diseño auscultación e instrumentación de un talud de

- desmorte de autopista (Benicasim) frente a rotura por una junta de estratificación" Memorias del 7. Simp. Nacional Obras de Superficie en Mecánica de Rocas, Madrid, Tomo 1 Com.2-11 (7 P.)
- Saito, M. and H.Uezawa (1961) "Failure of Soil Due to Creep". Proc. 5th ICSMFE, Paris, Vol.I, 315-318
- Saito, M. (1965) "Forecasting the Time of Occurrence of a Slope Failure" Proc. 6th ICSMFE, Montreal, Vol.2, 537-541
- Saito, M. (1969) "Forecasting Time of Slope Failure by Tertiary Creep" Proc. 7th ICSMFE, Mexico Vol.2, 677-683
- Saito, M. and Yamada (1973) "Forecasting and result in case of landslide at Takabayama". Proc. 8th. ICSMFE, Moscú, Vol.43, 325-327
- Saito, M. (1980) "Semi-logarithmic representation for forecasting slope failure" Proc. Int.Symp. on Landslides, New Delhi, Vol.1, 321-324
- Skempton, A.W. and M.Hutchinson (1969) "Stability of natural slopes and embankment foundations". State-of-the-Art Report. Proc. 7th Int.Conf.Soil Mech.Found.Engng.Mexico 291-340
- Skempton, A.W. (1964) "Long term stability of clay slopes" Geotechnique Vol.14, N.2, 75-102
- Stevenson, P.C. (1977) "An Empirical Method for the Evaluation of Relative Landslide Risk". Int.Ass.Engng.Geol.Bull., Vol.16, 69-72
- Svenson, C. and G.B.Sallfors (1984) "Prediction of Maximum Groundwater Pressure". Proc. 4th Int.Symp.on Landslides, Toronto, Vol.I, 437-440
- Terzaghi, K. (1950) "Mechanisms of Landslides". Engineering Geology (Berkey) Vol.The Geol.Soc. of Am. También en "From Theory to Practice in Soil Mechanics" Wiley, 1960.
- Varnes, D.J. (1983) "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". Natural Hazards 3, Published by UNESCO. 63.
- Varnes, D.J. (1978) "Slope Movements Types and Processes". Ch.2 in "Landslides Analysis and Control". R.L.Schuster and R.J.Krizek eds. TRB Spec Rep. 176, 11-33
- Voight, B. and B.A.Kennedy (1979) "Slope failure of 1967-1969 Chuquicamata Mine Chile" en "Rock Slides and Avalanches", Vol.2, Ed. por B.Voight, Elsevier.
- Wilson, S.D. and P.E. Mikkelsen (1978) "Field instrumentation" Ch.5 in "Landslides Analysis and Control" Ed.by R.L.Schuster and R.J.Krizek. T.R.B. Special Report 176.
- Yano, K. and K.Senoo (1985) "How to set standard rainfalls for debris flow warning and evacuation" Proc. Int.Symp. on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, 451-456