

FLUJOS DE BARRO EN LA ZONA PREANDINA DE LA REGION METROPOLITANA: CARACTERISTICAS, CAUSAS, EFECTOS, RIESGOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS

ARTURO HAUSER Y.

Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10465, Santiago, Chile.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de los flujos de barro, que afectan periódicamente la zona preandina de Santiago y de los mecanismos que participan en su generación. Los flujos de barro ocurridos en los últimos 22 años fueron analizados a través de crónicas periodísticas y cálculos probabilísticos comprobándose una evidente relación genética con precipitaciones anormalmente intensas (más de 60 mm/24 horas). Considerando lo anterior, se concluye que la zona acusa un severo riesgo de flujos de barro y se proporcionan recomendaciones para atenuar y/o controlar sus efectos devastadores, especialmente en lo referente a obras civiles.

ABSTRACT

The results obtained in the study of mudflows periodically affecting the pre-Cordilleran zone of Santiago, as well as the mechanisms participating in their generation are presented. Mudflows occurred during the last 22 years, analyzed by means of newspaper chronicles and probabilistic calculus showed an evidently genetical relation with abnormal precipitations (more than 60 mm/24 hours). Considering the mentioned facts, it is concluded that this zone presents a severe mudflow risk, and recommendations are presented to diminish and/or control the devastating effects of these flows, especially in connection with civil works.

INTRODUCCION

Con cierta periodicidad se producen en la zona de la Precordillera y Cordillera de los Andes de la Región Metropolitana (Fig. 1), grandes flujos aluvionales, en conexión con precipitaciones extremadamente intensas; ocasionalmente éstas ocurren en los meses de verano. Estos fenómenos se manifiestan por violentas "corrientes de barro" en esteros y quebradas, que provocan cuantiosos daños en obras civiles como caminos, puentes, instalaciones mineras, obras de riego, telecomunicaciones, etc., acompañados frecuentemente por pérdida de vidas humanas. El término "mudflow" o flujo de barro es un término general utilizado para designar un

movimiento de remoción en masa de material terroso fino, con alto grado de fluidez debido a su elevado contenido de agua ($\sim 60\%$), normalmente asociado a precipitaciones intensas. Los depósitos de flujos de barro son macizos, carentes de estructuras sedimentarias, secos, suelen alcanzar resistencias similares a las de hormigones pobres ($120\text{-}150 \text{ kg/cm}^2$).

Al iniciarse el flujo de barro, la grava, el limo y la arcilla se combinan con el agua para formar un fluido denso. Las partículas mayores forman la fase dispersa del flujo y son controladas o dominadas por efectos gravitacionales, mientras que la frac-

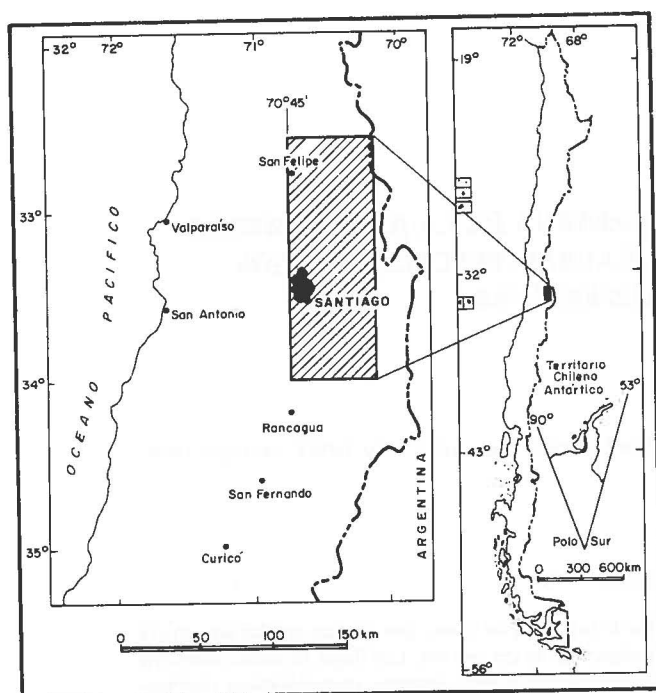


FIG. 1. Mapa de ubicación.

ción fina constituye la fase continua dominando en ella las fuerzas cohesivas. Los flujos de barro alcanzan densidades de hasta 2.000 kg/m^3 y viscosidad muy alta. Estas propiedades retardan el hundimiento y facilitan la movilización de bloques de gran tamaño, de hasta 200 toneladas (Waldron, 1975) con velocidades de hasta 5 m/seg. (Golubev, 1969).

Los flujos de barro pueden alcanzar grandes volúmenes. Un flujo que afectó a la ciudad de Los Angeles, USA en 1938, tuvo un volumen de $10 \times 10^6 \text{ m}^3$; otro ocurrido en Julio de 1921, en Alma-Ata (U.R.S.S.), cerca de $3,6 \times 10^6 \text{ m}^3$, (Golubev, 1969). Los flujos de barro ocurren típicamente en zonas ecuatoriales y templadas, asociados a lluvias intensas.

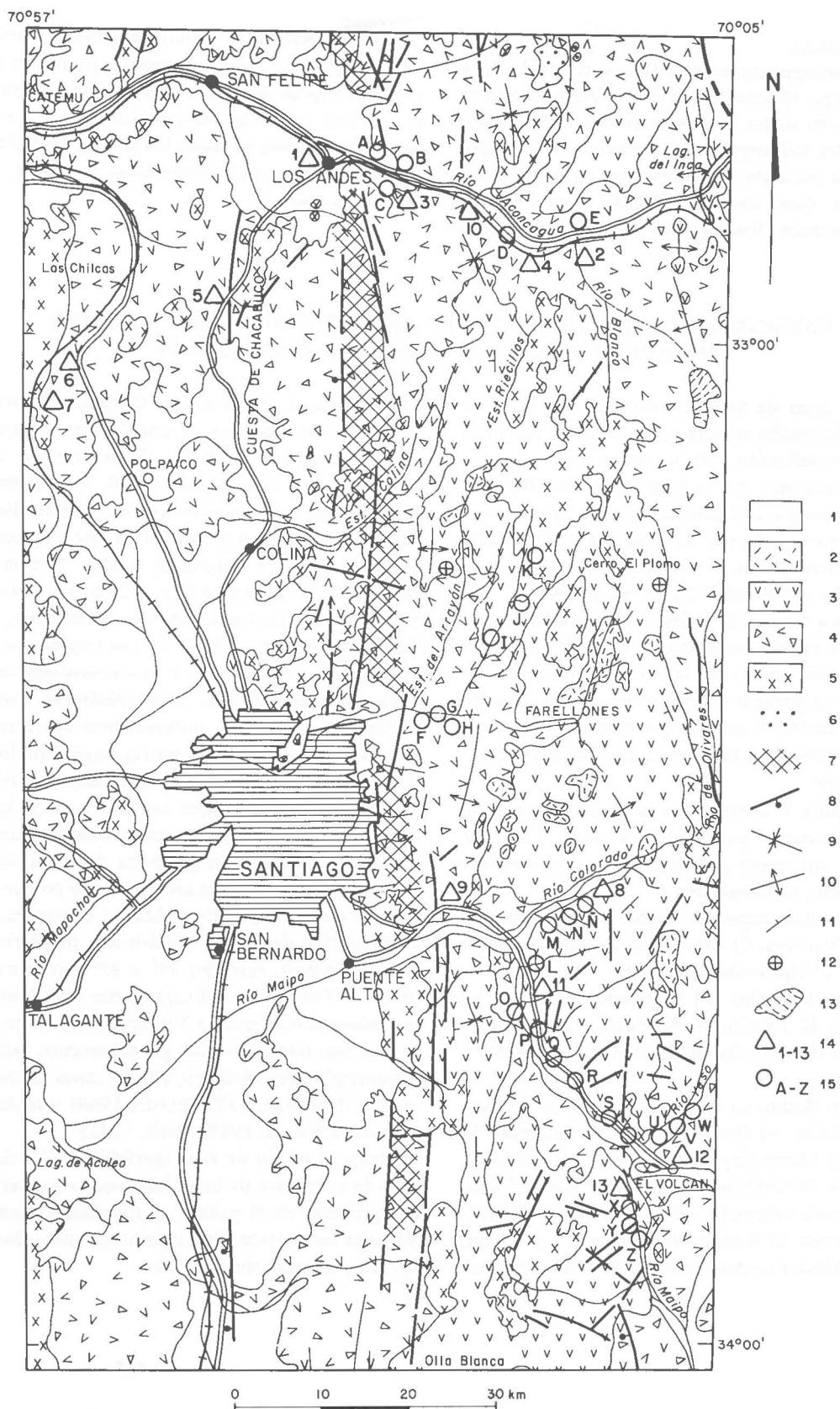
El término "flujo" comúnmente se asocia a un cierto contenido de agua, asumiendo que ésta es necesaria para inducir el movimiento; sin embargo, también se han detectado esporádicamente flujos detríticos secos, movilizados en ausencia casi total de agua.

El prevenir y disminuir los efectos de estos fenómenos es un problema de ingeniería, con notables implicancias económicas, sin desconocer que se trata de fenómenos naturales, que fueron y continuarán siendo procesos vitales y permanente en la evolución del paisaje. En la figura 2 se presenta el mapa geológico con las principales unidades que son elementos constitutivos del relieve en la zona del estudio. En esta zona alcanzan gran desarrollo los afloramientos de las formaciones Abanico y Farellones, intruidas por stocks miocénicos. En el área se ubica una notable zona de falla: la zona de Falla Pocuro (Carter y Aguirre, 1965) (Fig. 2); conforma el borde oriental del graben del Valle Central constituyendo un prominente lineamiento cercanamente norte-sur y desarrolla una franja de rocas fuertemente tectonizadas, de varias decenas de metros de ancho. Las rocas afectadas (brechas y andesitas), se observan intensamente microfracturadas y alteradas. Desde el punto de vista geotécnico integran terrenos de mala condición, propensos a inestabilidades en cortes y a fenómenos de expansión en fundaciones, atribuibles a su normalmente alto contenido de arcillas montmorilloníticas.

La condición orográfica de la región, con relieves montañosos que fluctúan entre los 2.500 y 3.200 m s.n.m., disectada por numerosos valles, junto a la presencia del margen oriental del Valle Central, son elementos moderadores del régimen climático local. Las precipitaciones y temperaturas aumentan en rigurosidad con el incremento de altitud y el avance hacia el este.

En términos generales, la zona presenta un régimen climático del tipo templado húmedo, seco en verano, de acuerdo con la clasificación de Koep-

FIG. 2. Marco Geológico de la zona estudio. 1: Holoceno y en parte Pleistoceno. Depósitos indiferenciados: fluviales glaciales, fluvio-glaciales, aluviones, etc.; 2: Plioceno. Formación Colorado-La Parva. Cuerpos volcánicos y subvolcánicos de tipo andesítico, riolítico y dacítico; 3: Mioceno. Formación Farellones. Rocas volcánicas andesíticas, con alternancias de sedimentos continentales; 4. Cretácico Superior-Oligoceno. Formación Abanico. Rocas volcánicas andesíticas y riolíticas, con alternancias de sedimentitas continentales; 5. Fini-Mioceno. Complejo intrusivo: granodiorita, monzogranito y monzonita cuarcífera; 6. Zona de alteración hidrotermal; 7. Zona de Falla Pocuro; 8. Falla indicando bloque hundido; 9. Sinclinal; 10. Anticlinal; 11. Inclinación estratos; 12. Estratos horizontales; 13. Ventisquero; 14. Estación Meteorológica; 15. Puntos en ejes de esteros y quebradas donde con frecuencia ocurren flujos de barro. Escala gráfica. (Adaptado de Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000, Serv. Nac. Geol. Miner., 1981; y Hoja Santiago, Thiele, 1960).



pen (Tabla 1).

Las precipitaciones más frecuentes en la zona son del tipo "frontal"; ocurren preferentemente en invierno, en virtud del desplazamiento del llamado Anticiclón Subtropical hacia el norte en esta época, y a la incursión de frentes polares hacia latitudes bajas. Con cierta periodicidad, suelen ocurrir precipitaciones denominadas "ciclónicas", por su

forma de gestación en o muy próximos al área de influencia y que, aunque escasas en promedio provocan precipitaciones más copiosas. Son justamente este tipo de lluvias las que ejercerían una notable influencia para producir los fenómenos del tipo flujo de barro, según mecanismos que serán descritos más adelante.

CARACTERISTICAS DE LOS DEPOSITOS ORIGINADOS POR FLUJOS DE BARRO EN LA ZONA ANDINA DE LA REGION METROPOLITANA

En la zona de Santiago, dos son los "ambientes" en los cuales se desarrollan flujos de barro: 1) esteros y quebradas; y 2) laderas de cerro con fuerte empinamiento. En el primer caso, los flujos se generan con mayor frecuencia en cauces estrechos, con potentes rellenos de material fragmentario (normalmente secos o efímeros) y de fuerte pendiente. En el segundo, los flujos de barro se forman en los flancos de valles, donde la acción combinada de fuerte pendiente y acentuada intemperización superficial, crean taludes inestables, susceptibles de experimentar remoción en masa, cuando factores externos (sismos, precipitaciones, deshielos, etc.) modifican su precaria condición de equilibrio natural.

La figura 2 proporciona la ubicación de algunas quebradas y esteros en los cuales, históricamente y con cierta periodicidad se producen flujos de barro. Corresponden a:

Hoya Río Aconcagua: A) Cajón de la Guirrana; B) Estero Chacayes; C) Estero Vilcuya; D) Quebrada Azules y E) Quebrada Maitencillo.

Hoya Río Mapocho: F) Quebrada Las Varas; G) Quebrada El Parrón; H) Quebrada Potrerillos; I) Quebrada Seca; J) Quebrada Maitén; K) Estero Piches.

Hoya Río Maipo: L) Quebrada Guayacán; M) Quebrada Vinilla; N) Quebrada Seca; Ñ) Quebrada El Sauce; O) Estero Coyanco; P) Quebrada Calchona; Q) Estero Melocotón; R) Quebrada San Alfonso; S) Quebrada Jaboncillo; T) Quebrada San Gabriel; U) Quebrada El Rodeo; V) Quebrada Los Lunes; W) Quebrada Los Arenales; X) Quebrada Rosales;

Y) Quebrada Los Loros y Z) Quebrada Colorada.

Según observaciones efectuadas en numerosos puntos del área afectada por flujos de barro, ocurridos durante el verano de 1980, los materiales que integran los depósitos por ellos desarrollados están constituidos por una mezcla de fragmentos heterogéneos, con diámetros medios fluctuantes entre 1 y 10 cm (media de 3-5 cm); ocasionalmente, suelen incorporar fracciones mayores, con diámetros de hasta 1,0-1,5 m. Los fragmentos son angulosos a subangulosos, y su composición es variada, predominando las rocas volcánicas y volcanoclásticas. Los clastos, normalmente, aparecen inmersos en una abundante matriz, cuya granulometría grada de arena muy gruesa a arcilla. Los depósitos originados por flujos de corrientes de barro son macizos y carentes de estratificación, siendo común, en superficie, la presencia de grietas de secamiento. Los depósitos así generados poseen afinidades litológicas, petrográficas y texturales con innumerables depósitos "laháricos", presentes en el Valle Central, entre los 34° y 39° Lat. sur (Cerrillos de Teno, Salto del Laja, cortes en la Carretera Panamericana frente a Victoria, etc.). Estos materiales han sido atribuidos, genéticamente, tanto a acciones glaciales (Brüggen, 1950), como glaciovolcánicas (MacPhail, 1973; Borde, 1966) y laháricas (Moreno y Varela, 1982; Abele, 1982).

Desde el punto de vista morfológico, los depósitos de corrientes de barro han dejado huellas que aún perduran en el paisaje, conformando extensas planicies subhorizontales, ocasionalmente, disectadas por pequeños ríos o esteros.

TABLA 1. PRECIPITACIONES MENSUALES Y ANUAL (mm) EN ALGUNAS ESTACIONES CLIMATOLOGICAS DE LA REGION METROPOLITANA (1931 - 1978)

Referencia: Oficina Meteorológica de Chile

	*	Altura m	TE	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Títil	7	578	Pv	0,2	11,2	3,4	25,0	76,5	70,5	66,4	83,6	11,5	8,6	6,1	—	363,0
Los Maitenes	8	1.140	Pv	1,7	13,8	8,7	43,0	99,7	81,3	94,5	108,1	30,1	20,4	19,3	0,8	522,3
La Obra	9	799	Pv	1,6	8,6	7,6	50,1	96,5	98,4	117,7	156,0	42,7	38,2	16,3	0,2	633,9
Queltehues	13	1.365	Pv	2,6	13,0	15,5	76,6	154,7	98,1	159,1	117,7	44,1	35,5	33,6	1,5	764,6
San José de Maipo	11	1.060	Cl	1,6	12,4	10,5	40,9	116,7	99,8	105,5	121,4	34,2	21,5	19,2	0,5	584,2
Quinta Normal		520	S	1,9	10,6	5,7	26,4	61,7	61,1	59,6	72,4	14,8	14,0	8,7	0,2	337,1
El Volcán	12	1.500	Pv	3,9	14,2	10,1	33,6	133,6	138,4	104,0	124,8	45,5	25,0	23,1	1,1	657,3
San Bernardo		573	Cl	2,4	10,2	5,6	29,5	77,4	67,5	60,6	92,2	16,1	15,7	11,7	—	388,9

* Ubicación de Estaciones en Fig. 2.

TE = Tipo de estación; Pv = Pluviométrica; Cl = Climatológica; S = Sinóptica de superficie.

FACTORES CONDICIONANTES

El análisis de una serie de factores propios de la zona del estudio, permiten establecer ciertas condiciones que participan en la generación de flujos de barro. De ellos, el climáticos (precipitaciones anormalmente intensas), junto a los geológicos y geotécnicos (naturaleza litológica y carácter geomecánico del terreno), parecen ejercer un control determinante y cada uno admite un análisis especial.

FACTORES CLIMATICOS

Notable es la interdependencia existente entre la generación de flujos de barro y precipitaciones anormalmente intensas en la zona; el agua caída, incorporada en la masa de suelo o rocas a nivel superficial (vía discontinuidades, zonas de alteración, fracturas, porosidad, fallas), provoca modificaciones substanciales en algunos parámetros críticos: expansibilidad, ángulo de fricción interna, cohesión, plasticidad; sin desconocer el hecho que precipitaciones de gran intensidad desarrollan reducidas infiltraciones, incrementando la capacidad de erosión y transporte del suelo y material fragmentario, superficial a través del vigoroso escurrimiento.

La dependencia descrita se comprueba confrontando, históricamente, las descripciones de daños inducidos en obras civiles (caminos, puentes, canales, ductos, postaciones, habitaciones) asociados a precipitaciones de gran intensidad. Intensidades iguales o superiores a 60 mm/24 horas parecen ser críticas, como se demostrará más adelante.

Pese a que los flujos de barro pueden producirse en cualquier época del año, aquéllos asociados con lluvias de verano alcanzan una gran importancia. La relación estacional debe atribuirse al hecho que, en los meses de verano, tanto los materiales rocosos fragmentados, como los suelos superficiales, suelen experimentar resquebrajamiento y resquebrajamiento por ausencia de lluvias. Este microfracturamiento superficial es propicio para generar flujos de barro asociados a lluvias repentinas y violentas. La tabla 2 resume los datos correspondientes a precipitaciones iguales o superiores a 60 mm/24 horas en el lapso 1931-1980.

Una limitación seria al estudio es la dificultad de obtener datos rigurosos respecto de intensida-

des de precipitaciones, debido a la ausencia de registros pluviográficos, que permitan determinar con exactitud, el tiempo que duraron las precipitaciones. En ausencia de ellos, la intensidad se determina normalmente recurriendo a los datos de simples pluviómetros, a partir de medidas cada 24 horas; ello evidentemente, resta exactitud al resultado, ya que las precipitaciones violentas se producen en lapsos menores que cinco horas.

Mención especial merecen las precipitaciones ocurridas el 21 y 22 de Febrero de 1980. Aun cuando corresponden a registros de intensidades bastante por debajo del límite de los 60 mm/24 horas, generaron importantes flujos de barro, que provocaron cuantiosos daños (humanos y materiales). Esta situación pone de relieve la extraordinaria incidencia que la intensidad de las precipitaciones de verano tienen en cuanto a generar flujos de barro de gran riesgo.

FACTORES LITOLOGICOS Y GEOTECNICOS

La observación de los flujos de barro en la región, permite asignar al factor litológico una participación relevante en su génesis. Los flujos parecieran adquirir importancia en zonas donde afloran depósitos volcánoclasticos de las formaciones Farellones, Abanico y Colimapu. Estos materiales muestran gran fracturamiento y/o alteración originando, en superficie, abundantes fragmentos menudos de rocas.

Cuando los procesos erosivos disectan estas secuencias alternantes, en zonas de relieve abrupto, los bancos de rocas volcánicas frágiles (andesitas, basaltos) se resquebrajan, formando bloques de diversos tamaños, los que, gradualmente se "hunden" en el sustrato más blando (areniscas, tobas y lutitas), movilizándose ladera abajo. Este material detrítico, bajo los efectos de agentes físicos, químicos y climáticos, al experimentar mayor fracturamiento superficial, se torna extraordinariamente sensible a ser incorporado a flujos de barro. El mecanismo aparece esquematizado en la figura 3.

La presencia en las rocas volcánicas de dichas formaciones, de minerales secundarios (ceolita, por ejemplo), contribuiría a acelerar las acciones normales de meteorización, ejerciendo notable influencia en ciertas propiedades geotécnicas: expansibili-

TABLA 2. PRECIPITACIONES CON $I_s \geq 60$ mm/24 HORAS EN 13 ESTACIONES EN TORNO DE LA ZONA ANDINA METROPOLITANA: 1931-1980.
CON INDICACION DE: MONTO pp. MAX. EN 24 HORAS, DIA Y MES QUE OCURRIO LA PP. MAX.

	Los Andes 1*	Río Blanco 2	Vilcuya 3	Riecillos 4	Chacabuco 5	Rungue 6	Títil 7	Los Maitenes 8	La Obra 9	Río Colorado 10	San José de Maipo 11	El Volcán 12	Los Queltehues 13
1931	---	---	---	102 3-7	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1933	---	---	---	95 11-6	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1934	---	---	---	97 25-5	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1941	---	---	---	102 24-4	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1944	---	78 7-8	---	---	---	---	71 8-8	77 8-8	80 21-6	82 18-6	69 21-6	90 2-6	---
1945	62 4-2	62 4-2	---	83 4-2	---	77 3-2	67 3-2	73 ---	---	74 1-8	73 4-2	---	63 4-2
1947	82 30-6	108 30-6	---	90 29-6	---	---	---	---	90 30-6	70 28-8	66 28-8	86 29-6	---
1948	---	80 7-5	---	86 17-7	---	---	70 18-7	---	70 13-6	76 18-7	---	---	88 12-7
1949	---	90 20-5	---	76 20-5	---	---	60 19-5	65 20-5	124 19-5	---	100 19-5	105 19-5	88 21-5
1950	---	---	---	---	---	---	68 6-4	---	80 6-4	---	---	---	---
1951	---	85 21-4	---	---	---	---	67 2-7	---	---	---	---	65 20-5	---
1952	---	---	---	---	---	---	---	59 20-6	---	---	60 13-5	10 20-6	---
1953	---	105 7-8	---	82 18-8	---	---	107 20-8	90 21-8	158 19-8	160 19-8	137 20-8	181 20-8	---
1958	---	---	---	83 14-6	---	65 1-6	---	---	96 14-6	73 14-5	---	---	---
1959	---	---	---	---	---	85 22-6	---	---	---	---	---	---	84 16-7
1962	---	---	---	97 25-6	---	135 24-6	78 24-6	---	70 23-6	81 24-6	---	---	108 24-6
1963	60 3-9	---	---	---	56 3-9	92 19-8	84 20-8	---	102 20-8	89 26-6	---	---	---
1965	---	---	58 10-8	75 16-8	---	94 9-8	---	---	---	---	---	123 14-8	---
1970	---	87 29-7	70 15-7	71 15-7	63 16-6	59 14-7	---	---	83 16-7	---	---	72 15-7	---
1980	---	---	13 22-2	13 22-2	---	---	---	10 22-2	---	---	---	---	---

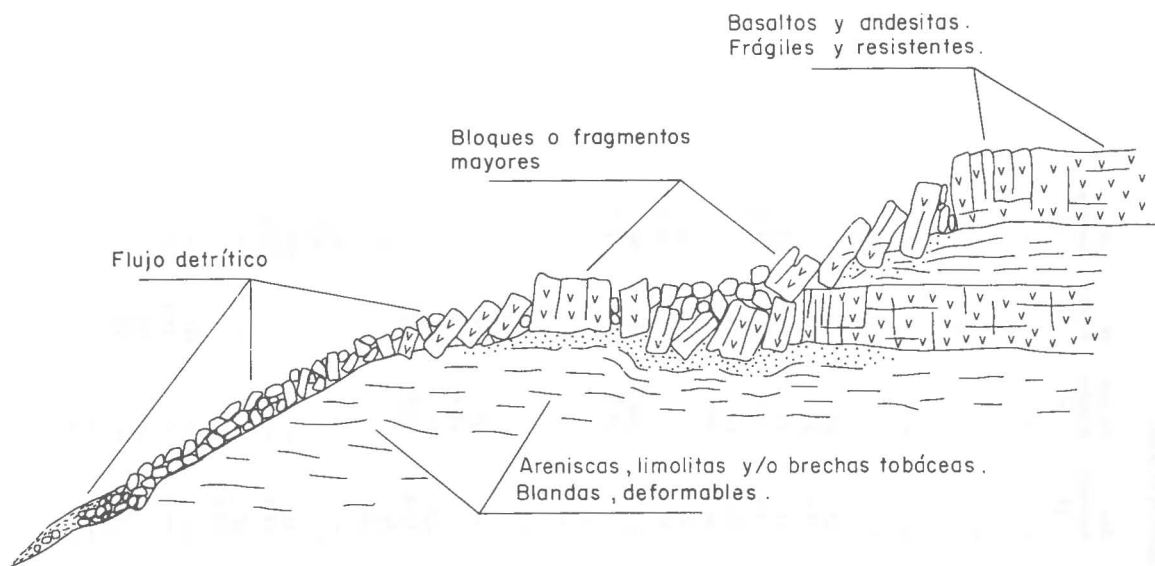


FIG. 3. Bosquejo de mecanismos generadores de flujos detríticos, a partir de secuencias volcanosedimentarias alternantes.

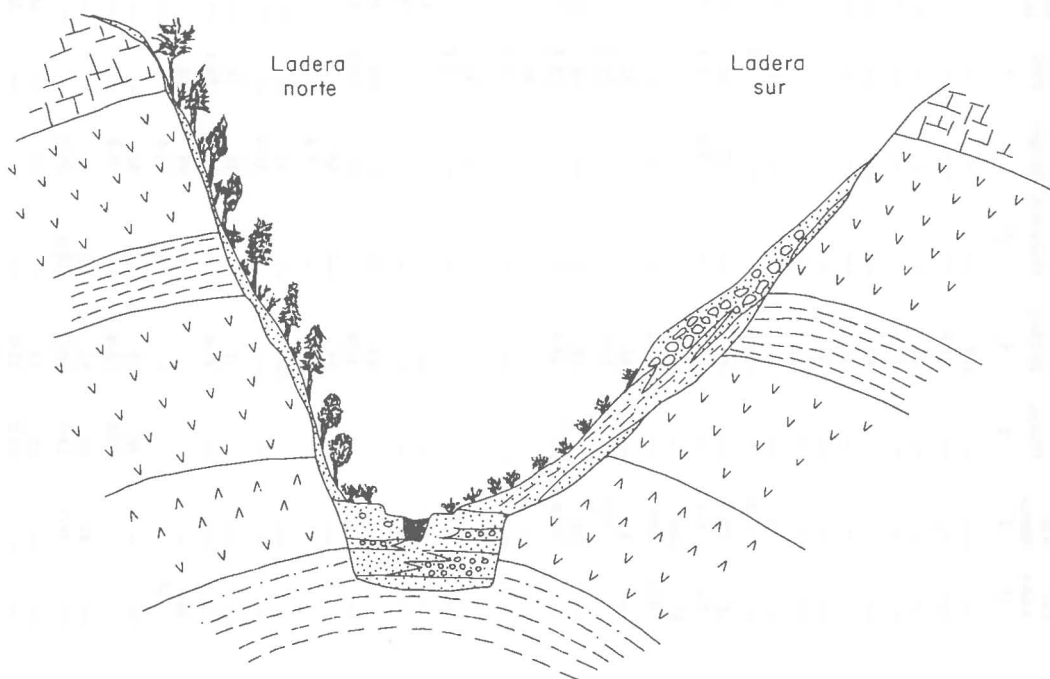


FIG. 4. Bosquejo de relaciones de asimetría de valles asociada a exposición solar.

dad, pérdida de resistencia, facilidad para incorporar agua, etc.

Múltiples son los sitios en los cuales las rocas de la Formación Abanico, adicionalmente, han sido afectadas por procesos hidrotermales, los cuales, además de provocar recristalización y formación de minerales secundarios (sericita, ceolita, clorita, etc.), generan un incremento en la porosidad y una substancial disminución en la resistencia final de la roca.

OTROS FACTORES

La pendiente local del terreno ejerce una decisiva influencia en cuanto a la generación de flujos de barro. De igual modo, terrenos sometidos a procesos irracionales de explotación del suelo y deforestación demuestran una alta sensibilidad a la erosión hídrica.

Notables son los ejemplos, en la Precordillera de Santiago, de zonas donde procesos irracionales de explotación del recurso vegetal y suelo, han contribuido a deteriorar el equilibrio preexistente.

Otro factor que ejerce influencia determinante en la generación de flujos de barro corresponde al hidrogeológico.

La común alternancia que se observa en las formaciones Farellones, Abanico y Colimapu, entre bancos permeables e impermeables, generan, con frecuencia, cierto tipo de acuífero que, al interceptar la superficie del terreno, se manifiestan como vertientes. Sus aguas, al derramarse sobre depósitos o materiales superficiales, inconsolidados, en niveles inferiores, modifican algunas de sus propiedades mecánicas contribuyendo a acelerar los pro-

cesos de remoción superficial.

A los factores condicionantes precedentemente descritos habría que agregar la incidencia de la exposición solar, derivada de la orientación de determinadas laderas. La observación resulta válida para laderas del valle orientadas según eje este-oeste.

Se ha observado que, en teoría general, dichos valles suelen presentar perfiles transversales relativamente asimétricos, da tal suerte que los flancos o costados sur poseen, comparativamente, pendientes menores y mayor desarrollo de cobertura de suelos (Fig. 4).

Esta particularidad debe ser atribuida al hecho que dichas laderas, en función de su orientación, experimentan los efectos de prolongadas exposiciones al sol en verano, junto a rigurosas acciones de heladas y deshielos en el invierno; ello se traduce en una acentuada participación de los agentes de desintegración mecánica y química. Las quebradas permanentes o temporales que disectan las laderas sur de los valles son, en términos comparativos, relativamente profundas y de corto desarrollo, dando lugar a amplios conos aluviales en la zona donde confluyen con sus valles tributarios. El escaso desarrollo que alcanza la cobertura vegetal, parece contribuir a restarle estabilidad.

Las laderas o flancos norte de los valles, en cambio, presentan pendientes pronunciadas, con menor desarrollo de suelos.

Finalmente importa destacar la influencia determinante ejercida por la fuerte pendiente local del terreno, la carencia de cobertura vegetal (por sobretalaje o explotación irracional para combustible en centros invernales), solicitaciones sísmicas, etc.

EVALUACION DE DAÑOS INDUCIDOS POR LLUVIAS ANORMALMENTE INTENSAS

La evidente relación existente entre lluvias de gran intensidad (≥ 60 mm/24 horas) y la generación de flujos de barro en la zona estudiada tiene respaldo en el análisis de crónicas periodísticas.

El método consiste en confrontar los daños inducidos por las lluvias, de acuerdo con las informaciones proporcionadas por dichas crónicas, correspondientes a eventos climáticos previamente seleccionados. Por considerarlo relevante para los fines del estudio, se eligieron sólo cinco eventos o períodos en que ocurrieron lluvias anormalmente

intensas y se analizaron los daños generados, sin desconocer que, históricamente, se han registrado múltiples fenómenos similares.

Los eventos considerados fueron extractados de la tabla 2 y corresponden a días en los cuales ocurrieron precipitaciones superiores a 60 mm/24 horas, con la excepción del 22 de Febrero de 1980, que admite un análisis particular. Las descripciones de los daños producidos por los flujos de barro fueron extractadas del diario "El Mercurio", correspondientes a ediciones de los días inmedia-

tamente posteriores a los eventos considerados.

Evento 1: 3-4 de Febrero de 1945

El diario "El Mercurio" consigna los efectos provocados por lluvias extremadamente intensas ocurridas los días 3 y 4 de Febrero. Según datos proporcionados por el Instituto Meteorológico de Quinta Normal, en un lapso de 785 minutos, esto es, en 13 horas y 5 minutos (entre las 1:25 A.M. y 2:30 P.M. del día 4 de Febrero de 1945) se midió un total de 81 m de agua caída, equivalentes a 6,2 mm/hora. Como consecuencia de ello, se produjeron numerosos "aludes de barro" en los valles de los ríos Colorado y Maipo, que obligaron a la paralización temporal de las centrales Maitenes y Queltehues, de Chilectra. En San José de Maipo, un flujo de barro destruyó el campamento veraniego de YMCA y en Colina, la crecida del estero del mismo nombre provocó la destrucción total de una plaza del lugar, anegando y destruyendo extensas zonas cultivadas.

Evento 2: 20 de Mayo de 1949

El Diario "El Mercurio" señala que: "Víctimas y cuantiosos daños ha causado temporal: la línea del Ferrocarril Trasandino quedó interrumpida en el km 42 por un derrumbe. También se cortó el camino internacional entre Planta Los Quilos y Salto El Soldado. El puente sobre el estero Jaboncillo, en el valle del río Maipo, fue arrasado interrumpiéndose, por esta causa, el camino entre las estaciones de San Alfonso y El Ingenio, lo que impide llegar a El Volcán y Central Queltehues".

Evento 3: 20-21 de Agosto de 1953

El Diario "El Mercurio" proporciona informaciones respecto de daños provocados por lluvias muy intensas ocurridas el día 21 de Agosto de 1953. Rodados de piedras y lodo cortaron el camino y vía férrea de Puente Alto a El Volcán y Central Queltehues; particular notoriedad alcanzaron dichos fenómenos en los sectores de Quebrada El Jaboncillo y Estación Caletones (Fig. 2). El camino a Central Maitenes de Chilectra, en el valle del río Colorado, se cortó en numerosos puntos como resultado de flujos de barro. Situación similar ocurrió en sectores del valle del río Aconcagua (Salto El Soldado, Quebrada Azules, Río Blanco, etc.) y del río Mapocho (cortes en el camino a la mina La Disputada).

Evento 4: 24 de Junio de 1962

El Diario "El Mercurio" señala que: "El domingo a las 19 horas, dos rodados sepultaron a varios obreros de la firma SIGDO-KOPPERS que trabajaban en el lugar denominado Pérez-Caldera de la mina La Disputada de Las Condes; a consecuencia del derrumbe resultó muerta una persona y 5 quedaron heridas de gravedad. El camino a la mina está totalmente interrumpido".

Evento 5: 22-23 de Febrero de 1980

El Diario "El Mercurio" de dichos días consigna detalles respecto de numerosos daños provocados por aludes de barro, como resultado de intensas lluvias ocurridas el día 22 de Febrero de 1980.

"Torrentes de agua, lodo, piedras y árboles arrasaron varias viviendas en torno del estero San Francisco, cerca de la localidad de San Esteban, al norte de Los Andes; se registraron 80 damnificados; el torrente en el sector habría alcanzado una velocidad de 60 km/hora. Aludes en el sector de Puntilla del Viento y Los Azules, en la ribera norte del río Aconcagua, provocaron cortes en el Camino Internacional a la República Argentina" (Foto 1).

Donde mayores daños provocó el fenómeno, fue al interior del valle del río Mapocho; allí, de acuerdo a datos consignados en "El Mercurio" del día 24 de Febrero, se produjeron 3 muertos, 4 desaparecidos y 580 damnificados; el camino que conduce a la mina Los Bronces de la Compañía Disputada de Las Condes se cortó en numerosos tramos; en sectores el camino fue literalmente "borrado" por el paso de grandes flujos de barro, algunos de los cuales habrían alcanzado en sus frentes, alturas de hasta 4 m (Foto 2).

El evento descrito produjo en las instalaciones mineras de la Compañía Disputada de Las Condes, al interior del río Mapocho, daños estimados en US \$ 500.000.

Simultáneamente, de acuerdo con observaciones del autor, se produjeron numerosos flujos en el valle de los ríos Maipo y Colorado, donde los caminos de acceso al embalse El Yeso y a las centrales Queltehues y Maitenes, se cortaron en numerosos puntos (Quebrada Cerezos, San Alfonso, Jaboncillo, etc.). Un flujo de gran magnitud bloqueó e inutilizó el portal del túnel de desviación entre los ríos Los Leones y Blanco, en la zona del mineral La Andina, de Codelco; otro en la Quebra-



Foto 1. Vehículo envuelto en un flujo de barro en la zona de Puntilla del Viento, en el valle del río Aconcagua, 10 km aguas arriba de Los Andes. Foto tomada el 22 de Febrero de 1980. (Próximo a sitio B de Fig. 2.)



Foto 2. Sector de Corral Quemado, en el camino de acceso a la mina Los Bronces de la Compañía Minera La Disputada de Las Condes en valle del río San Francisco. Vehículo destrozado y arrastrado por el flujo de barro, del 22 de Febrero de 1980. Quebrada Maitén. (Sitio J de Fig. 2.)

da Los Pinches provocó un gran derrame sobre un tranque de relave en las instalaciones mineras de la Compañía Disputada de Las Condes.

Es importante destacar que en la Planta Hidroeléctrica Maitenes de Chilectra, valle del río Colorado, se registraron 10 mm/24 horas el día 22 de Febrero de 1980, tabla 2; dicho monto, de acuerdo a una comunicación verbal del Ing. Jefe de Planta, se registró en un lapso de dos horas. Esta situación pone de manifiesto que en época de verano "Ip"* del tipo 5 mm/hora son suficientes para inducir daños en obras de ingeniería (canales, caminos, ductos), asociados a flujos de barro.

Confrontados los antecedentes que las crónicas periodísticas nos proporcionan respecto de pérdidas humanas y daños materiales derivados de cinco eventos de mal tiempo (entre 1945 y 1982) en la zona metropolitana, con aquéllos proporcionados por la tabla 2 surge una evidente relación "intensidad de precipitaciones-daño".

La mayoría de los eventos climáticos aquí analizados, así como otros cuyos detalles no fueron incluidos en el presente estudio, se desarrollaron,

preferentemente, en la temporada invernal:

Evento 2	20	Mayo	1949
Evento 3	20-21	Agosto	1953
Evento 4	24	Junio	1962

Particularmente notable, en cuanto a su intensidad, es el evento 3, con valores de $I_p > 130$ mm/24 horas, en cuatro estaciones del área metropolitana.

Desde el punto de vista práctico, en cuanto a los riesgos involucrados, aparentemente, los eventos que se desarrollan en verano (mes de Febrero) provocan, comparativamente, mayores daños materiales en obras de ingeniería, con montos e intensidades de precipitación muy por debajo de aquéllos registrados en invierno.

La evaluación de los registros históricos de los daños provocados por los flujos de barro en la zona objeto del estudio, junto con proporcionar una visión de la periodicidad de ocurrencia y sus devastadores efectos, proporciona una pauta respecto del riesgo potencial que dicho fenómenos envuelven.

EVALUACION DE RIESGO DE FLUJOS DE BARRO

Establecida la participación de la intensidad de precipitaciones en la generación de los flujos de barro, en la zona estudiada, resulta oportuno efectuar un cálculo probabilístico para evaluar el riesgo o frecuencia de ocurrencia de dichos fenómenos.

Ello se posibilita a través del análisis gráfico de frecuencia, a partir de una serie de intensidades máximas de precipitaciones en 24 horas, de acuerdo a valores registrados en alguna estación tipo. El análisis de frecuencia consiste en determinar la probabilidad de excedencia (o período de retorno) de cierto valor de un evento hidrológico (en nuestro caso, P_p max. en mm/24 horas).

Debido a la ausencia de registros rigurosos de intensidades de precipitación en 24 horas, se eligió la Estación Meteorológica de La Obra, en la cuenca del río Maipo. La estación, al disponer de registro para 22 años, en el período 1944-1970, y ubicarse adecuadamente en el área estudiada, proporciona datos confiables y representativos para el cálculo.

La tabla 3 proporciona un listado con el monto de precipitaciones máximas en 24 horas (tomado de Ramírez, 1974).

TABLA 3

Fecha	P_p max. en 24 horas (mm)
21 - 6 - 1944	80,0
01 - 8 - 1945	65,0
09 - 7 - 1946	62,0
30 - 6 - 1947	90,0
13 - 7 - 1948	70,0
19 - 5 - 1949	124,0
06 - 4 - 1950	80,0
19 - 5 - 1951	58,0
21 - 6 - 1952	57,5
19 - 8 - 1953	155,5
13 - 7 - 1954	55,0
08 - 6 - 1955	47,5
21 - 3 - 1956	60,0
19 - 5 - 1957	66,0
14 - 6 - 1958	96,0
14 - 5 - 1959	75,0
21 - 6 - 1960	63,0
01 - 9 - 1961	56,0
23 - 6 - 1962	70,0
20 - 8 - 1963	102,0
08 - 6 - 1964	64,0
16 - 7 - 1970	83,0

* I_p = intensidad de precipitaciones mm/horas.

Las principales características de la estadística son:

Valor medio	76,4 mm
Valor mayor	155,5 mm
Valor menor	47,5 mm

Los valores de la estadística son ordenados en forma decreciente en magnitud, asignando a cada uno de ellos un respectivo número de orden correlativo y asociando a cada valor un período de retorno (Pr) de acuerdo con la fórmula empírica de Weibull, in Ramírez (1974) (Tabla 4).

$$Pr = \frac{N + 1}{m}$$

Donde :

Pr	= Período de retorno en años
N	= Número de años de la estadística (= 22)
m	= Número de orden de la precipitación en la ordenación decreciente.

Los valores obtenidos pueden ser graficados en términos de "Pr" (período de retorno) *versus* "Pp máx." (precipitación máxima en 24 horas), en la figura 5 y probabilidad de excedencia (%) *versus* "Pp máx.", en la figura 6. Ambas proporcionan relaciones cercanamente lineales, que facilitan la extrapolación y ajuste correspondiente.

TABLA 4.

Evento m	Día	Mes	Año	Precipitación máxima (mm/24 hrs.)	Período de retorno (años)	Probabilidad (%)
1	19	-	8 - 1953	155,5	23,00	4
2	19	-	5 - 1949	124,0	11,50	9
3	20	-	8 - 1963	102,0	7,66	13
4	14	-	6 - 1958	96,0	5,75	17
5	30	-	6 - 1947	90,0	4,60	22
6	16	-	7 - 1970	83,0	3,83	26
7	6	-	4 - 1950	80,3	3,28	30
8	21	-	6 - 1944	80,0	2,87	35
9	14	-	5 - 1959	75,0	2,55	39
10	13	-	7 - 1948	70,1	2,30	43
11	23	-	6 - 1962	70,0	2,09	48
12	19	-	5 - 1957	66,0	1,91	52
13	1	-	8 - 1945	65,0	1,76	57
14	8	-	6 - 1964	64,0	1,64	61
15	21	-	6 - 1960	63,0	1,53	65
16	9	-	7 - 1946	62,0	1,43	70
17	21	-	3 - 1956	60,0	1,35	74
18	19	-	5 - 1951	58,6	1,27	79
19	21	-	6 - 1952	57,5	1,21	83
20	1	-	9 - 1961	56,0	1,55	87
21	13	-	7 - 1954	55,0	1,09	92
22	8	-	6 - 1955	47,5	1,04	96

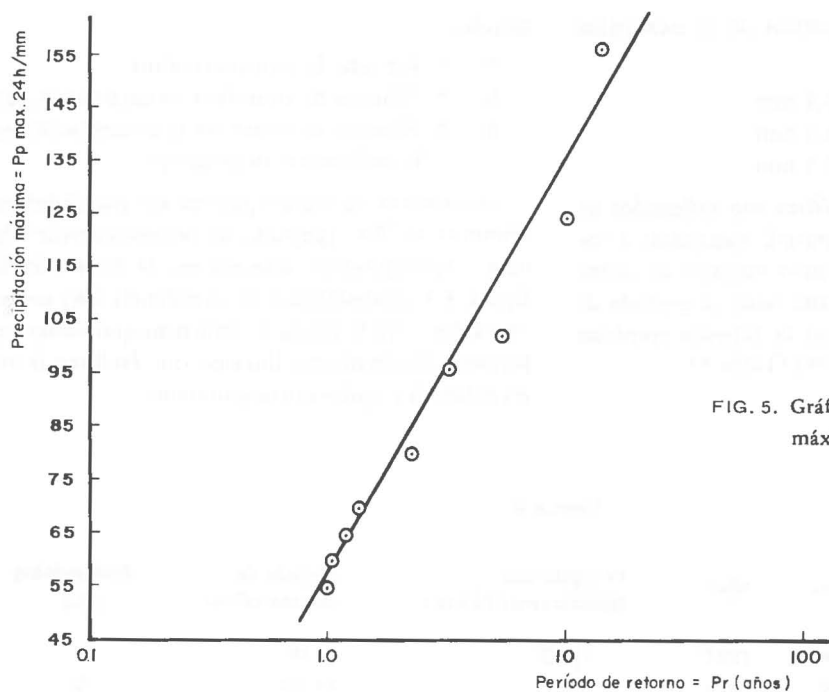


FIG. 5. Gráfico de relaciones: precipitación máxima *versus* período de retorno.

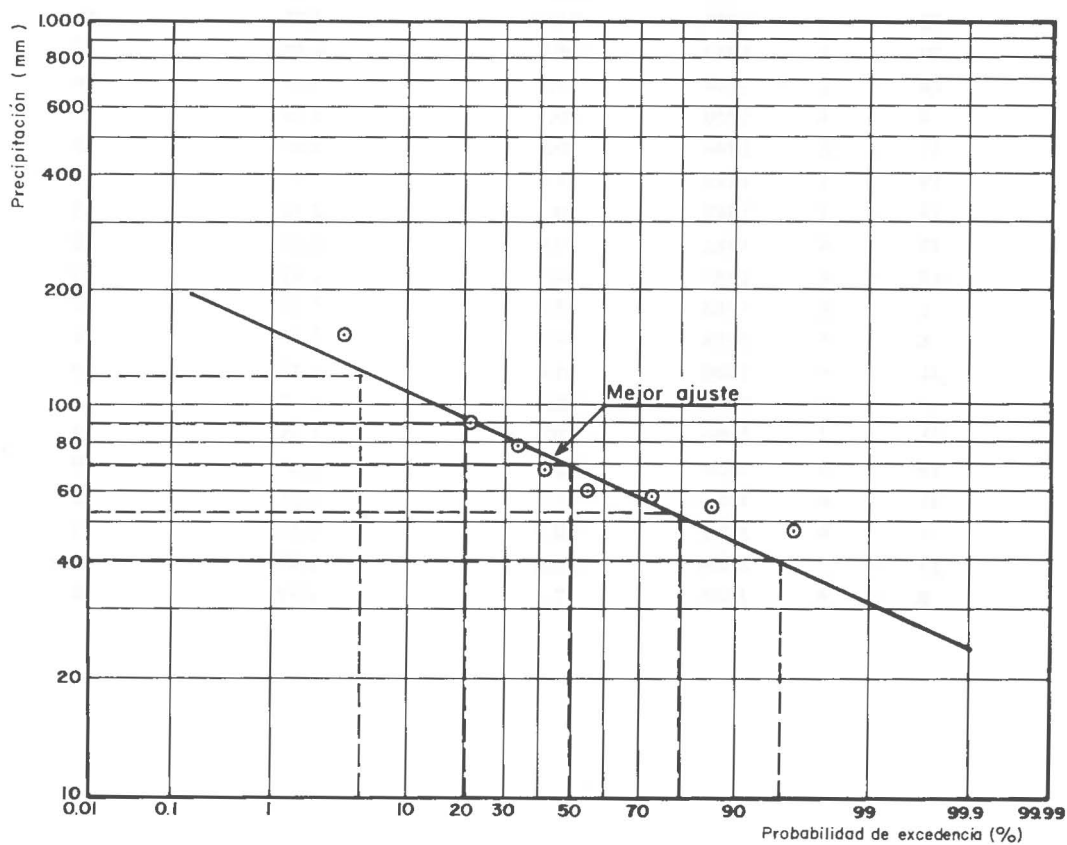


FIG. 6. Gráfico de relaciones: precipitaciones máximas en 24 horas *versus* probabilidad de excedencia; Estación La Obra.

Del gráfico de la figura 6 se desprende la tabla 5, que proporciona, para la Estación de la Obra, los montos de Pp máx. en 24 horas para probabilidades de 5, 20, 50, 80 y 95%.

TABLA 5

Probabilidad (%)	Monto Pp máx. 24 horas (mm)
5	120
20	90
50	69
80	54
95	40

Adicionalmente, Ramírez (1974) proporciona los siguientes valores para otras estaciones en la zona del estudio (Tabla 5).

TABLA 6.

PROBABILIDADES

Estación	5%	20%	50%	80%	95%
Riecillos	106*	82	63	49	39
Maitenes	93	69	50	36	27
San José de Maipo	123	92	68	50	36
El Volcán	147	112	84	62	47
Queltehues	126	98	72	52	36
Colorado	107	89	70	52	34
Río Blanco	127	90	55	36	21

*) Valores correspondientes a Pp max., en mm/24 horas.

MEDIDAS TENDIENTES A CONTRARRESTAR EL RIESGO Y LOS EFECTOS DE FLUJOS DE BARRO

Pese a que en nuestro país, en función de algunos de los factores condicionantes descritos, los flujos de barro se manifiestan con reiterada periodicidad, sus efectos nunca han sido adecuadamente analizados. Tal aseveración surge al comprobar que muchos de los daños producidos pudieron haber sido menores si, en la etapa de elaboración o diseño de algunas obras, se hubiesen incorporado determinados factores de riesgo.

El problema radica en que se trata de fenómenos cuya ocurrencia, en el tiempo, es relativamente espaciada, de tal forma que, rápidamente, sus efectos o consecuencias "pierden actualidad". Por tal motivo, el fenómeno no se considera como un factor de riesgo importante en el diseño de múlti-

El análisis de la tabla 6 establece que un 75% de las estaciones ubicadas en la zona del estudio, poseen Pp máx. ≥ 60 mm/24 horas para probabilidades de ocurrencia del 50%.

En estudios de este tipo, la probabilidad 50% es normalmente la que refleja mejor el comportamiento estadístico de los datos analizados. Para este caso, el valor de Pp máx. en 24 horas de 70 mm para la probabilidad 50%, sobrepasa el monto de 60 mm/24 horas, a partir del cual se generarían flujos de barro.

De las consideraciones precedentes, se deduce que, en la zona del estudio, existiría un riesgo severo para que se generen flujos de barro asociados a lluvias con intensidades ≥ 60 mm/24 horas.

ples obras civiles: caminos, puentes, alcantarillas, terraplenes, postaciones, canales desarrollos poblacionales, etc. La exclusión en el diseño de factores y dimensionamientos adecuados, compatibles con la posibilidad de enfrentar con éxito este riesgo, condicionan muchos de los destrozos en la obras detalladas.

Es importante señalar que, mediante la adopción de una serie de medidas prácticas, algunas de las cuales se describen a continuación, es posible atenuar o minimizar los efectos de los flujos de barro (en ningún caso evitarlos o prevenirlos totalmente).

La ingeniería cuenta, en nuestro país, a nivel de evaluación, diseño y construcción de proyectos ci-

viles, con la capacidad y herramientas técnicas para dimensionar y materializar obras capaces de resistir con éxito fenómenos como los que nos preocupan.

Evidentemente, en primer lugar, para enfrentar el problema, parece necesario asignarle al riesgo de flujo de barro, una adecuada significación, en concordancia con una periodicidad de ocurrencia relativamente alta; con ello, el riesgo quedará incorporado y eventualmente cubierto en el diseño de las obras.

Compañía Chilena de Electricidad, Chilectra, empresa que posee varias centrales hidroeléctricas en el valle del río Maipo y sus afluentes, cuya operación data desde 1923, ha debido enfrentar en múltiples oportunidades los efectos de devastadores flujos de barro, en relación con variadas obras civiles: canales, puentes, caminos, postaciones, etc. Especial mención merece el tratamiento de caminos de acceso e interiores de las centrales, que, normalmente, suelen incorporar badenes de mampostería para salvar tramos carreteros interceptando quebradas susceptibles de transportar flujos de barro (Foto 3). Estas obras han operado eficientemente en condiciones adversas, propias de flujos de barro de gran magnitud, garantizando un tránsito expedito. La experiencia indica que la incor-

poración de este tipo de estructura en proyectos viales andinos, a objeto de salvar ríos, esteros o quebradas intermitentes, eventualmente capaces de "conducir" flujos de barro, constituye una atrayente alternativa y admite ser ampliada a canales, ductos, etc.

El éxito operacional de los badenes, respecto de obras alternativas, radica en que éstos, normalmente, en función de la gran energía envuelta en los flujos de barro, no se constituyen en una barrera a su paso, sino que permiten su normal movilización, sin modificar mayormente su trayectoria a lo largo del eje del estero y/o quebradas intermitentes.

La construcción de los badenes exige la utilización de materiales a base de fragmentos "canteados" de rocas ígneas frescas, resistentes, las que pueden ser ubicadas a distancias de transporte adecuadas, respecto de la mayoría de las obras; aún cuando el trabajo exige cierta mano de obra especializada, ésta, suele existir a nivel local.

Otra forma de contrarrestar los efectos devastadores de los flujos de barro es la construcción de muros o diques gavionados, dispuesto transversalmente a los cursos. Estos forman verdaderas barreras provistas de pequeños vertederos para el derrame controlado de aguas, ("trampas de piedra");

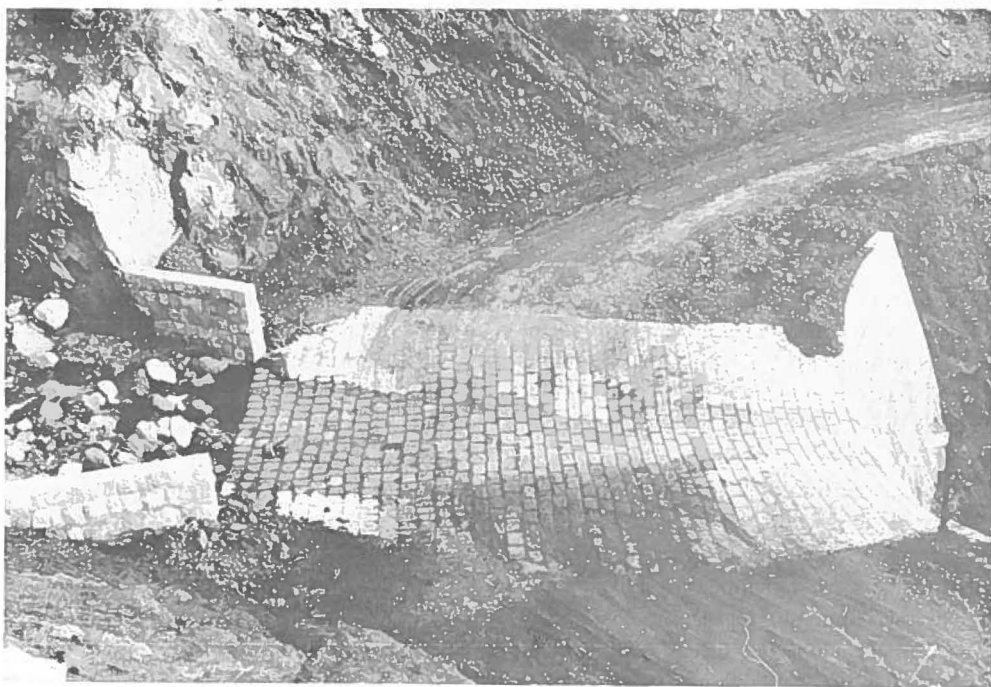


Foto 3. Badeñ de mampostería en camino de acceso a Central Hidroeléctrica "Los Maitenes", Quebrada Seca. (Sitio N de Fig. 2.)

su construcción condiciona la formación de pequeños embalses capaces de almacenar un importante volumen de los flujos.

Las barreras en referencia se construyen sobre la base de mallas metálicas especiales, en forma de verdaderos cajones rellenos con bolones o fragmentos rocosos locales, constituyendo estructuras armadas, semimonolíticas, flexibles y drenantes.

La base de los diques formados por los muros gavionados, requiere de periódicas labores de mantención, específicamente en lo concerniente a eliminar el material granular acumulado, como consecuencia de las avenidas.

La energía de los flujos se disipa significativamente al enfrentar los diques en razón de dos hechos:

- a. Acumulación parcial del material granular en la cubeta.
- b. Eliminación del agua a través del muro drenante.

La práctica ha demostrado que en lo que a puentes y alcantarillas se refiere, buenos resultados operacionales se han logrado en obras cuyo diseño incorpora conceptos constructivos que significan mínima alteración al perfil hidráulico natural. Estas obras se han comportado satisfactoriamente aún frente a aluviones de cierta magnitud.

A las medidas descritas deben agregarse, en la fase de diseño y/o dimensionamiento de las obras de ingeniería, aspectos conceptuales que dicen relación con: a) cuidadoso análisis de alternativas para la localización de obras: caminos, puentes, ductos, postaciones, canales; b) otorgar máxima preocupación al comportamiento de las trayectorias críticas de desborde para esteros, quebradas y ríos, tanto permanentes como efímeros; c) incorporar obras estructurales de defensa y/o protección; d) diseño que incorpore detallados análisis del comportamiento hidrológico de las hoyas comprometidas; e) evaluación del comportamiento ingenieril histórico de obras locales afines, frente a fenómenos aluvionales.

Además, existen otras medidas, igualmente efectivas. Entre ellas, la remoción periódica de todo el material correspondiente a fragmentos rocosos mayores desde el cauce de los cursos eventualmente susceptibles de movilizar flujos de barro. Estos constituyen verdaderas barreras u obstáculos al normal desplazamiento del flujo, provocando acumulaciones temporales; cuando los flujos logran

sobrepasarlos adquieren singular magnitud y poder destructor.

Por otro lado, los estribos de puentes o estructuras emplazadas en torno o en el eje de cursos o lechos de esteros o quebradas susceptibles de conducir flujos de barro, deben ser convenientemente protegidos mediante la colocación de enrocados tipo pedraplén y/o graviones.

Finalmente, resulta conveniente proceder a la rectificación y/o profundización de los cauces en la zona adyacente a obras tipo puentes, alcantarillas, etc., a objeto de tornar expedito el eventual desplazamiento de los flujos.

Cualquier acción que tienda a restablecer el normal desarrollo de la cobertura vegetal en terrenos natural o artificialmente deforestados, producirá un efecto beneficioso en cuanto a atenuar la generación y magnitud de flujos de barro; sus efectos dicen relación con: facilitar el desarrollo del horizonte orgánico del suelo; frenar el escurrimiento superficial; y facilitar la infiltración de aguas lluvias.

La información disponible respecto del comportamiento y distribución histórica de las corrientes de barro, a nivel local, regional o nacional en nuestro país, mediante la elaboración de mapas de riesgos, incorporando estos fenómenos, contribuirá a futuro a seleccionar áreas propensas a ser afectadas, posibilitando la adecuada planificación de múltiples obras civiles en términos de economía, operación y seguridad.

Muchas de las medidas descritas, necesariamente, significan costos adicionales para los proyectos. En ocasiones y por consideraciones económicas, son desechados, en detrimento de la operación y seguridad. La forma más racional de resolver efectivamente este dilema a que se ven enfrentados los proyectistas, consiste en otorgar a los fenómenos aluvionales una mayor atención a la luz de los daños materiales y humanos que producen. Normalmente, ocurre que sólo cuando se evalúan en términos económicos los efectos de flujos aluvionales, proyectistas, constructores, usuarios y autoridades toman real conciencia de la significación del problema. Es indispensable incentivarlos para que esta actitud perdure y se reafirme más allá de lamentaciones derivadas de tragedias puntuales que, rápidamente, con el transcurso del tiempo, suelen perder vigencia y olvidarse.

CONSIDERACIONES FINALES

Si como resultado del problema aquí planteado hacemos una generalización, comprobaríamos que, frente a los efectos de múltiples fenómenos geológicos, que con frecuencia afectan al país (sismos, crecidas, avalanchas, deslizamientos, erupciones volcánicas, flujos de barro, etc.) sólo reaccionamos después de la catástrofe. Esta reacción no es lo suficientemente enérgica y aleccionadora como para producir una modificación substancial en nuestros criterios y comportamientos.

En estas actitudes influyen tanto factores ancestrales como económicos. En la actualidad conocemos muy bien los mecanismos que controlan y participan de una cantidad de estos eventos geológicos. Pese al tiempo transcurrido y a la forma como ha evolucionado nuestro país, aún se prefiere correr riesgos antes que gastar sumas ínfimas para prevenir y/o minimizarlos. Ello significa confrontar, en la práctica, "acciones racionales" *versus* "esperar los acontecimientos".

Sólo en la medida que se incremente el conocimiento respecto de múltiples riesgos geológicos y del ambiente que participa en su generación y se

adopten, en el futuro, criterios racionales para planificar las obras civiles, será posible atenuar dichos riesgos, en beneficio de su economía, operación y seguridad.

Con frecuencia se reconoce que los efectos de variados eventos geológicos catastróficos pudieron haber sido minimizados si, oportunamente, se hubieran tomado ciertas medidas preventivas (que normalmente comprometen costos reducidos).

Lo expuesto pone en relieve la necesidad de dictar normas o pautas de planificación, diseño y construcción, en relación con la totalidad de los proyectos ingenieriles, aceptando que varios de los riesgos geológicos comprometidos pueden ser anticipados. Consecuentemente, no es necesario esperar que las catástrofes nos den las respuestas.

Las experiencias que al respecto se han obtenido en otros países, mediante una legislación adecuada y la elaboración de Cartas de Riesgos Geológicos, nos deberían incentivar a no seguir "aprendiendo" por la vía trágica, fruto de catástrofes, de nuestra audacia e imprevisión.

REFERENCIAS

- ABELE, G. 1982.** El lahar Tinguiririca: su significado entre los lahares chilenos. *Inform. Geogr. Chile*, No. 29, p. 21-34.
- ALMEIDA, E. A. 1961.** Pluviometría de las zonas del desierto y las estepas cálidas de Chile. Edit. Universitaria S. A., 167 p. Santiago.
- BORDE, J. 1966.** Les Andes de Santiago et leur avant-pays. Etude de Geomorphologie. These de Doctorat. Union Française d'Impression, 55 p. Paris.
- BRÜGGEN, J. 1950.** Fundamentos de la Geología de Chile. Inst. Geogr. Militar (Chile), 374 p. Santiago.
- GOLUBEV, G. 1969.** Avalanchas y corrientes de barro en Chile. *Inform. Geogr. Chile*, No. 17, p. 31-74.
- MACPHAIL, V. 1973.** The geomorphology of the Teno lahar, Central Chile. *Geogr. Rev.*, Vol. 63, p. 517-532.
- MORENO ROA, H.; VARELA, J. 1982.** Los depósitos de relleno de la Depresión Longitudinal de Chile, entre los ríos Bio-Bio y Toltén-Allipén. *In* Congr. Geol. Chileno, No. 3, Actas, Vol. 3, p. 203-222. Concepción.
- RAMIREZ, E. 1974.** Análisis probabilístico y estadísticas de precipitaciones máximas en 24 horas totales anuales. CORFO, Div. Rec. Hidráulicos, Publ. No. 236, p. 489.
- WALDRON, H. H. 1967.** Debris flows and erosion control problems caused by the ash eruption of Irazú volcano, Costa Rica. *US Geol. Surv., Bull.*, No. 1241-1, 37 p.