

Apreciaciones geotécnicas sobre el deslizamiento en la bocatoma Proyecto Guavio

Dentro de los proyectos de aprovechamiento hidroeléctrico que se construyen en el centro del país a cargo de la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá, el Proyecto Guavio constituye uno de los más ambiciosos por su magnitud e inversión.

En el sector de bocatoma, cuyas obras de explanación se iniciaron en marzo de 1982, se presentaron deslizamientos de magnitud y gravedad creciente entre el mes de julio de 1982 y el mes de julio de 1983; lo ocurrido el 28 de julio de este último año segó la vida a numerosas personas.

En el sitio de presa y sectores aledaños afloran rocas de edad Paleozóico Superior constituidas por mármoles y filitas; rocas de edad Cretáceo Inferior conformadas por areniscas, lutitas y calizas; depósitos cuaternarios constituidos por derrubios de pendiente y aluviones recientes. La relación estratigráfica entre rocas paleozóicas y cretáceas es discordante y está marcada por un paleosuelo.

La presencia del paleosuelo, el estado de fracturación de las rocas y demás rasgos estructurales de éstas, el grado de meteorización, el régimen de precipitación y el condicionamiento del flujo de agua a través de fracturas, se analizan en el presente trabajo para establecer los posibles mecanismos de falla y las causas de los movimientos.

Se destacan las experiencias y enseñanzas prácticas de este caso y la necesidad de asimilarlas, para reducir el riesgo de eventos similares en otros proyectos.

Geología

CARLOS ULLOA M.
Geólogo Ingeominas

PABLO CARO P.
Geólogo Ingeominas

CARLOS E. MOLANO C.
Ingeniero Ingeominas

Geotecnia

JUAN MONTERO O.
Geólogo Sociedad Colombiana de Geotecnia
Profesor Asistente U.N. - Sección Geotecnia - Depto. I.C.

ALVARO J. GONZALES G.
Ingeniero Sociedad Colombiana de Geotecnia
Profesor Asociado U.N. - Sección Geotecnia - Depto. I.C.

ROBERTO VILLARRAGA H.
Ingeniero Sociedad Colombiana de Geotecnia

Presentado por INGEOMINAS en el "Primer Seminario Latinoamericano de Presas y Embalses" - Tomo II - AGID, Bogotá, 1984

El Proyecto Hidroeléctrico del Guavio tiene un área de influencia de 450 km² y se encuentra ubicado en el flanco oriental de la Cordillera Oriental, en el sur-oriente de Cundinamarca, al E de los municipios de Ubalá y Gachalá (ver Figura 1).

El proyecto aprovecha las aguas del río Guavio y las desviaciones de los ríos Batatas y Chivor, para un caudal combinado medio total de 72 m³/seg y una caída bruta de 1.100 m (Figura 2). Mediante una presa de enrocado con núcleo, de 250 m de altura, se crea un embalse útil de 950 millones de metros cúbicos, con cota máxima de 1.630 m.s.n.m., del cual parte un túnel de carga de 15 km de longitud que lleva el agua a una central subterránea en donde se generan 1.600 MW y que descarga por medio de un túnel de 5 km nuevamente al río Guavio a la cota 460 m.s.n.m. La energía eléctrica generada por el proyecto se conduce a las subestaciones Torca en Bogotá y al Patio de conexiones de Chivor, por dos líneas de 230 KV con 85 y 25 km de longitud respectivamente.

Los autores de este trabajo agradecen al Gobierno Nacional la confianza depositada en ellos por haberseles encomendado el análisis de este caso y por la autorización de presentarlo en el Primer Seminario Latinoamericano sobre Presas y Embalses.

GEOLOGIA

Geomorfología

El valle del río Guavio en el sitio de bocatoma es encañonado en forma de V, estrecho y profundo, en general con pendientes topográficas que oscilan entre 30° y 90°. Las rocas del Paleozóico son más resistentes a la erosión que las del Cretáceo.

En dirección N se presenta un cordón montañoso, el cual en la cota 1.760, aproximadamente a 400 m del río Guavio, se bifurca en dos ramales pronunciados. Uno de ellos es atravesado por el túnel auxiliar y demarca el lineamiento de la quebrada Las Jotas, en dirección N-S mientras el otro se desvía 45° hacia el W, conformando el cerro donde se explotan las calizas del Tesoro. Ambos ramales rematan en escarpes pronunciados en el río Guavio.

Entre los dos ramales se presenta el área de deslizamiento como una zona deprimida de forma triangular con su base paralela al río Guavio, la cual

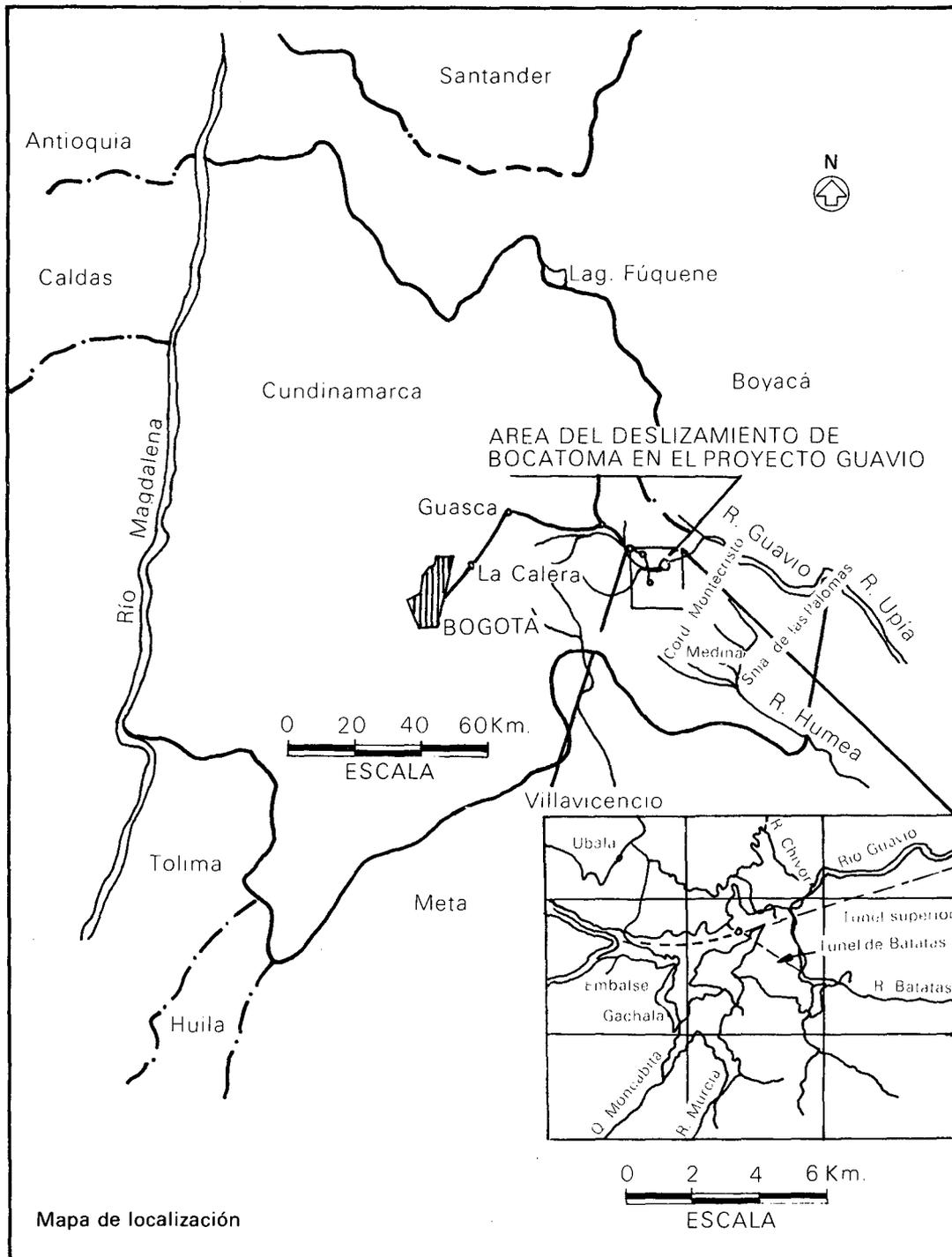


FIGURA 1.

se estrecha notablemente en la parte superior donde se observa un pronunciado escarpe. La forma de esta pequeña cuenca y el hecho de que las quebradas Las Jotas y Las Loras desciendan envolventemente sobre ella, facilitan notablemente la afluencia del agua de escorrentía sobre el área, lo mismo que el flujo del agua subterránea. Parte del agua de escorrentía tiene acceso hacia la masa rocosa a través de las fracturas comparativamente más abiertas y frecuentes en el Cretáceo. Se tiene conocimiento y se menciona en el informe de Vianini (Geomap), de que el incremento en el espesor de los depósitos de coluvión y la suavización de la pendiente hacia la parte baja del área del deslizamiento, están asociados con antiguos deslizamientos ocurridos en esta zona.

Estratigrafía

La secuencia estratigráfica en el sitio de presa y sectores aledaños está constituida por rocas de los grupos Farallones, Cáqueza y Depósitos Cuaternarios.

(Ver Tabla 1, Mapa 1).

Grupo Farallones (Pz)

De edad Paleozóico Superior, está constituido por mármoles de color gris, duros, en bancos de 0.3 a 0.8 m, afectados por disolución e intercálados con filitas de color verde a pardo en paquetes de 0.1 a 0.3 m. Esta secuencia presenta una morfología abrupta con pendientes empinadas hasta de 80° en algunos sectores. Aflora en el flanco derecho del deslizamiento desde la base de la ladera hasta la

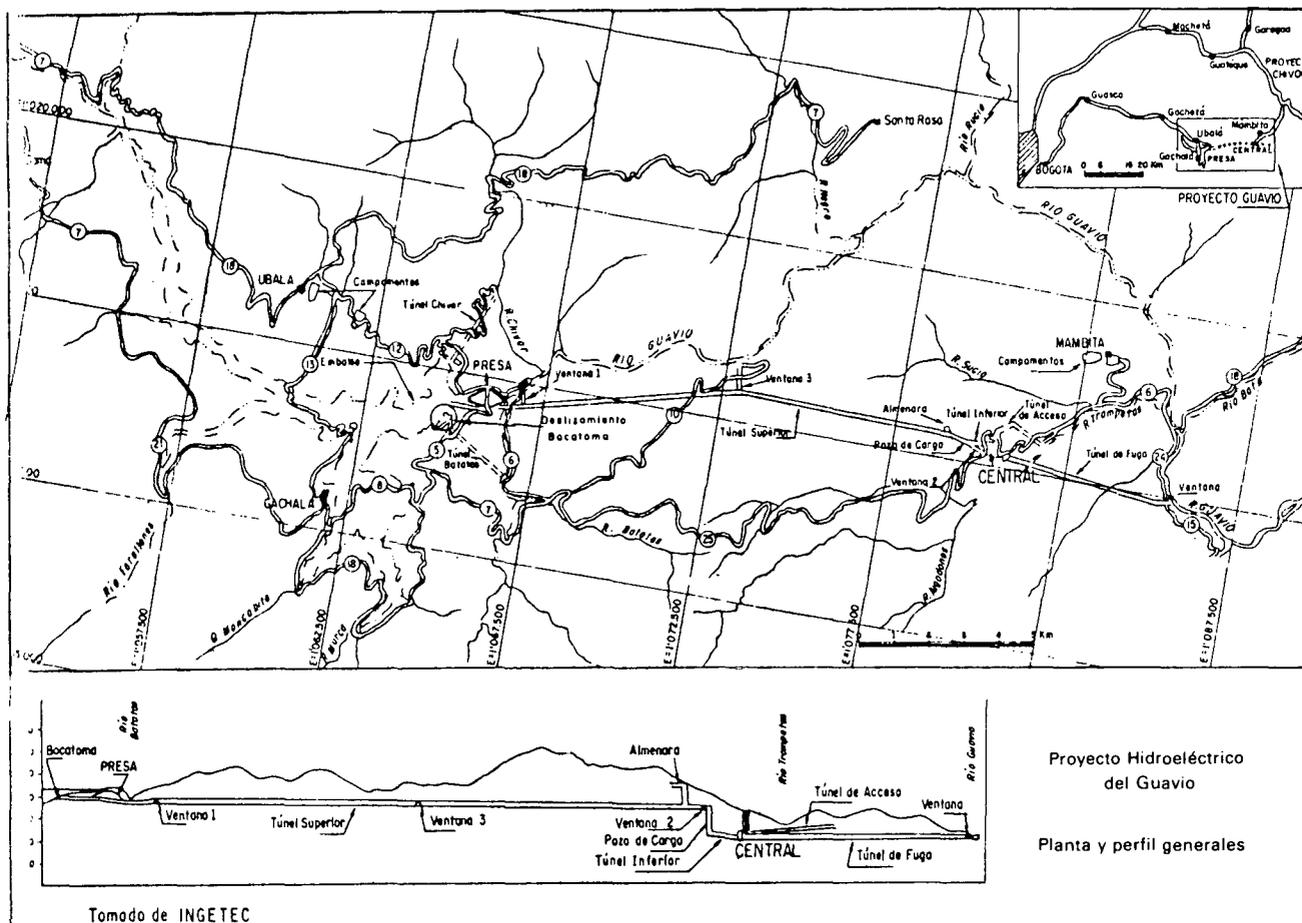


FIGURA 2.

TABLA I. Correlación litoestratigráfica

INGEOMINAS 1975		INGETEC 1980			
		Sector occidental		Grabén de Sta. Rosa	Sector Oriental
Grupo Cáqueza	Areniscas de Las Juntas Kiq	Formación Cáqueza	Superior	Kicil 2	
	Lutitas de Macanal Kilm		Media	Kicic	Kicm
	Calizas del Guavio		Inferior	Kicili	Kicil2 Kicic Kicli
Formación Batá	Jura Triásico	Formación Bata			
Grupo Farallones DCF		Carbonífero			Pzx Pzy
Grupo Quetame EOq		Cambrio Ordovícico			

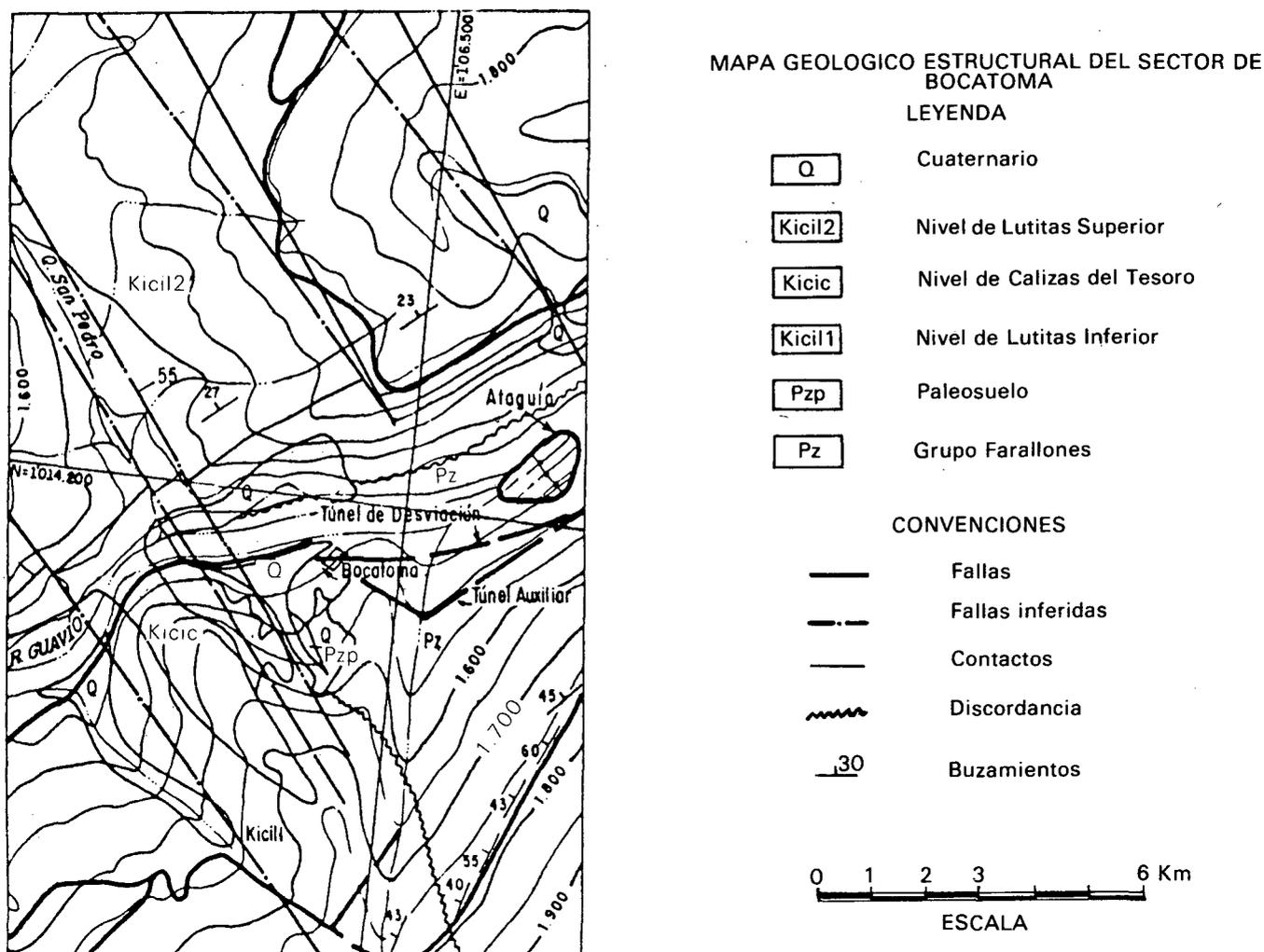


FIGURA 3.

hace parte de la ladera izquierda que bordea la zona de deslizamiento.

Nivel de Lutitas Superiores (Kicil 2): se observa en la parte superior del flanco derecho de la zona de deslizamientos, en el sector de la corona y en el flanco izquierdo. Está compuesto por lutitas negras con intercalaciones de areniscas de pocos metros de espesor.

Depósitos Cuaternarios (Q)

Se han clasificado de acuerdo con su origen en tres clases: Derrumbios de Pendiente (Qp), Flujos de Lodo (Qf) y Aluviones Recientes (Qal) (Ver Mapa 1). Los Derrumbios de Pendiente se han subdividido en Qp 1, Qp 2 y Qp 3, teniendo en cuenta el tamaño, forma y porcentaje de los guijos y bloques del depósito y la composición.

Derrumbios de Pendiente (Qp1): formados principalmente por el material de deslizamiento del 28 de julio de 1983. El depósito expuesto en forma de abanico está constituido por guijos, cantos y bloques hasta de 3 metros de diámetro, de caliza, arenisca piritosa y lutitas dentro de una matriz de limo y arcilla, la cual constituye un 40% (ver Mapa 1).

Derrumbios de Pendiente (Qp 2): se observan en los sectores oriental, occidental y sur del derrumbe con espesor promedio de 1.50 a 3.0 m, color marrón y constituidos por guijos angulares hasta de 0.4 m de

diámetro de caliza, limolita, lutita y filita dentro de una matriz limo-arcillosa. Los guijos pueden constituir un 40% y corresponden a depósitos existentes previamente al deslizamiento.

Derrumbios de Pendiente (Qp 3): localizados en las márgenes izquierda y derecha del río Guavio, conformados por bloques angulares de caliza en tamaños hasta de 3 m. de diámetro dentro de una matriz limo-arcillosa. Los bloques constituyen aproximadamente el 70% del depósito y su espesor varía entre 3 y 8 metros, con pendiente topográfica entre 30° y 40°.

Flujo de Lodo (Qf): material limo-arcilloso con guijos y bloques embebidos, transportados por la escorrentía superficial en la fase actual (año 1983) de los movimientos de la zona de estudio. Conforman el extremo superior del cono configurado por los Derrumbios de Pendiente Qp 1.

Aluvión (Qal): material granular grueso con matriz limo-arenosa que se encuentra en las orillas del río. En la zona del deslizamiento se encuentra bajo el Qp 1; aguas arriba y en la margen derecha se observan desplazamientos en las terrazas.

Tectónica

Los rasgos tectónicos generales del área del Proyecto Guavio, se encuentran cartografiados y descritos en los informes: Estudios Geológicos de las

Calizas del Guavio, Municipio de Gachalá, Cundinamarca; Mapa Geológico del Cuadrángulo K-11, (1969); Mapa Geológico del Cuadrángulo K-12, (1975) y Geología del Cuadrángulo K-12, Guatemala (1979). Los trabajos anteriores indican que el área del Proyecto Guavio se encuentra localizada tectónicamente en la zona central occidental del Anticlinorio de Farallones (Ulloa, C. y Rodríguez, E., 1979), la cual se caracteriza por presentar una serie de bloques levantados de rocas y paleozóicas, limitados por fallas de tipo inverso, con rumbo predominante NE-SW y la existencia de una discordancia angular entre paleozóicas y cretáceas.

Estructuras

Se han observado dos épocas principales del plegamiento de las rocas, uno pre-Cretáceo y otro Terciario-Cuaternario. Las estructuras pre-Cretáceas que se observan en el área del Proyecto Guavio corresponden a anticlinales amplios afectados en sus flancos por fallas de tipo inverso. Estas estructuras presentan su orientación regional NE-SW y estratos con inclinaciones variables entre 30° a verticales. (Ver Figura 3).

El sitio de presa se encuentra localizado en el flanco occidental del Anticlinal del Cobre, el cual es una estructura de carácter regional.

El área del deslizamiento de bocatoma se encuentra localizada en el flanco occidental de una estructura anticlinal muy suave, la cual afecta a rocas del Cretáceo.

Discordancia

Con posterioridad a la orogenia del Paleozóico Superior-Jurásico, se depositaron las rocas del Grupo Cáqueza Inferior, sobre una superficie irregular, lo cual hace que en algunos sectores la relación estratigráfica sea una discordancia angular y en otros (área de deslizamiento) una disconformidad o paraconformidad.

Diaclasas

Se reconocieron tres familias principales de diaclasas las cuales se describen más adelante. (Ver Análisis estructural).

Fallas

En el flanco occidental del anticlinal que afecta las rocas del Cretáceo se reconocieron fallas normales cuya orientación varía entre N 30°W y N 50°W y con inclinación entre 50° y 60° al NE. Estas fallas se caracterizan por su gran extensión y poco desplazamiento vertical, entre 30 y 80 m. (Ver Figura 3 Mapa 1).

Zona de esfuerzos

El flanco izquierdo del deslizamiento constituye una zona de esfuerzos, la cual se caracteriza por:

a) El nivel de lutitas inferiores, incompetente, se localiza entre niveles competentes de las filitas y mármoles del Grupo Farallones (parte inferior) y las calizas del Tesoro (parte superior). Esta situación estructural originó frecuentes replegamientos dentro del nivel lutítico. (Ver Mapa 1).

b) Ha sido afectado por el sistema de fallas de San Pedro, el cual se observa en el flanco izquierdo del deslizamiento, parte superior, con una orientación N 30° W y una inclinación de 50° a 60° al NE. En la zona de falla se presentan estrías de fricción con señales de oxidación.

Hidrogeología

En la zona del derrumbe es poco probable que se presente flujo subterráneo estacionario; obviamente se presentan condiciones naturales de humedad del suelo.

El flujo del agua subterránea se presenta preferencialmente a través de las fracturas y por esta causa se concentra en las zonas con mayor fracturación.

En condiciones naturales (en ausencia de grietas) el flujo subterráneo transiente ocasionado por infiltración directa es despreciable; la pendiente topográfica es bastante pronunciada y por lo tanto parece lo más frecuente una escorrentía directa igual a la precipitación sobre el área aferente al derrumbe, la cual es escasa (2 a 3 ha).

El mecanismo hidrogeológico más probable que incidió en el deslizamiento se describe a continuación: los controles topográficos en la zona del derrumbe muestran que desde meses anteriores esta masa se estaba moviendo, originando grietas en la parte superior. Al presentarse grietas en la superficie del terreno, así su pendiente topográfica sea muy pronunciada, la escorrentía sobre la ladera se infiltra fácilmente. Ante una precipitación bastante alta y de gran intensidad como la que se presentó del 7 al 22 de julio de 1983, la cabeza piezométrica originada por la infiltración a través de las grietas, tuvo tendencia a aumentar, y por lo tanto, disminuyó la resistencia al esfuerzo cortante de la masa que se deslizó.

Es importante anotar que en la parte superior del derrumbe, donde se originaron las grietas hay dos "canales" o flujos de agua que precisamente caen directamente sobre dichas grietas. (Ver Mapa 1).

GEOTECNIA

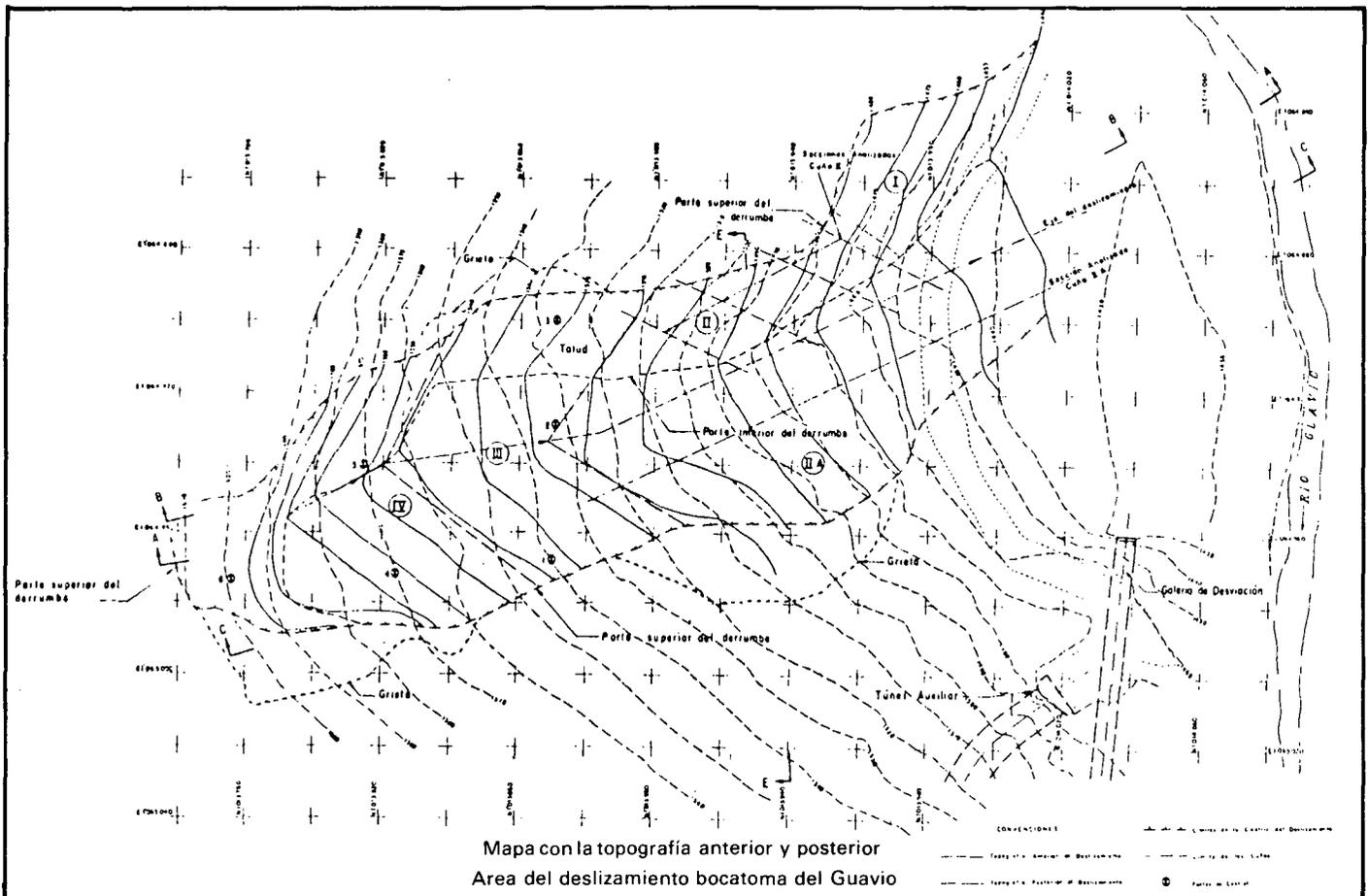
Introducción

En este capítulo se analizan los aspectos geológicos e hidrológicos que determinan los movimientos; se describen los estudios y análisis geotécnicos y se presentan y discuten los posibles mecanismos de falla y las causas probables de los sucesivos deslizamientos.

Metodología

Con base en el estudio de los antecedentes consultados y en las visitas a campo efectuadas al sitio de la bocatoma y áreas aledañas, se procedió en primer término a verificar y complementar la cartografía geológica existente, a tomar datos estructurales y a seleccionar muestras de roca para análisis petrográficos y ensayos de laboratorio.

Especial énfasis se dió a dos aspectos que se consideran de suma importancia: la descripción del perfil de meteorización y los estudios de las discontinuidades estructurales tales como planos



Mapa 2

de estratificación, diaclasas, fallas y zonas de esfuerzos.

De las superficies asumidas como planos de deslizamiento se tomaron muestras para ensayos de laboratorio posteriores. No fue posible obtener muestras en el número y la calidad deseables, debido a razones de riesgo y a la carencia de los medios más adecuados en el momento.

En el Instituto de Ensayos e Investigaciones de la Universidad Nacional se efectuaron ensayos de propiedades físicas y mecánicas.

Con base en el análisis de todos los datos obtenidos: precipitación y medida de desplazamientos de mojoneros, rasgos geológicos dominantes, resultados de los ensayos y análisis de laboratorio y de estabilidad, fue posible establecer un criterio sobre los mecanismos de falla y las causas de los deslizamientos.

La investigación permitió llegar a un diagnóstico suficientemente claro sobre el mecanismo de falla, su causa inmediata y algunas conclusiones de carácter práctico encaminadas a prevenir o disminuir el riesgo de catástrofes semejantes en el futuro.

Descripción física del deslizamiento

La zona afectada por movimientos ocupa una pequeña depresión entre dos accidentes topográficos pronunciados: el que atraviesa el túnel auxiliar y el que conforma las calizas del Tesoro que se explotan como fuente de materiales.

La parte superior del deslizamiento alcanza la cota 1.610 y la inferior a la cota 1.440 m; el ancho promedio de la zona movida es de 70 m alcanzando 85 m aproximadamente en su parte más amplia. Su extensión longitudinal es de 300 m aproximadamente desde la corona hasta la pata de la zona de flujo. Se estima que en total se desplazaron 95.000 m³. Se consideran en general dos cuerpos en movimiento (ver Mapa 2); uno superior (III y IV) que abarca la zona afectada por los desplazamientos masivos de roca y sus productos de alteración con materiales coluviales, el cual presenta escarpes pronunciados en la corona y los flancos y una geometría bien definida; y uno inferior (I y II) de morfología más suave e irregular ocupada por un extenso depósito coluvial preexistente, proveniente de la parte superior y que se extiende en forma de abanico hasta el río Guavio. Estos dos cuerpos colindan aproximadamente en la cota 1.510 m.

El espesor máximo promedio de la masa desplazada entre las cotas 1.580 y 1.520 tiene aproximadamente entre 18 y 20 m. Dentro del cuerpo superior del deslizamiento las superficies de falla están constituidas por tres elementos planares que conforman dos cuñas; en el flanco izquierdo, una zona de ruptura dentro de las lutitas del Cretáceo, y en el flanco derecho la discordancia Paleozóico-Cretáceo (III) y la estratificación de las rocas del Cretáceo (IV). La zona movida conforma masas de forma aproximadamente trapezoidal cuyo cuerpo remanente dejó escarpes planos. El contratista había colocado

TABLA II
Perfil de meteorización

Grado	Denominación	Descripción
1	Roca fresca y sana	Roca inalterada
2	Roca débilmente meteorizada	Bloques de roca con meteorización superficial
3	Roca moderadamente meteorizada	Bloques de roca alterada con un porcentaje bajo de suelo
4	Roca altamente meteorizada	Bloques de roca alterada con un porcentaje alto de suelo
5	Roca completamente meteorizada	Suelo con estructuras heredadas
6	Suelo residual	Suelo sin estructuras heredadas

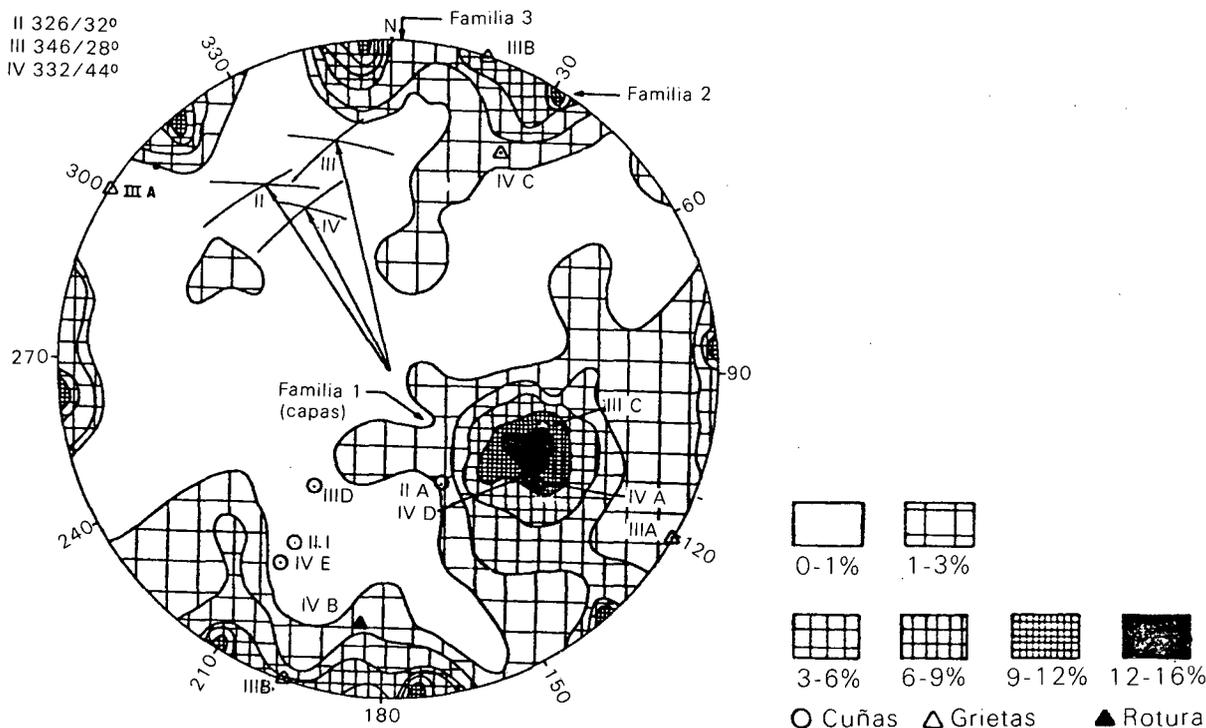


FIGURA 4. Frecuencia de discontinuidades del cretáceo.

6 puntos de control de desplazamientos horizontales en Abril de 1983. (Mapa N° 2).

Alteración

El fracturamiento de las rocas Cretáceas proporcionaron un acceso relativamente fácil de los agentes meteóricos los cuales originaron la alteración de la masa rocosa. Tomando como guía correlativa la descripción generalizada para el perfil de meteorización que aparece en la Tabla 2, se pudo establecer la siguiente zonificación del perfil de meteorización, para las rocas que afloran en la zona del deslizamiento: suelos residuales y rocas completamente meteorizadas, se presentan con un espesor muy delgado subyaciendo los coluviones, si bien, se desarrollan un poco mejor sobre las calizas de la parte superior. Las lutitas abarcadas dentro de las zonas de esfuerzos se pueden considerar como entre completamente meteorizadas y altamente meteorizadas.

La mayor parte de la masa rocosa afectada por los procesos de inestabilidad puede considerarse co-

mo una roca entre moderada y altamente meteorizada, tal como se deduce de la observación de los flancos, especialmente del flanco izquierdo y de los datos obtenidos de los sondeos manuales realizados por el contratista.

En la condición de roca moderadamente meteorizada se considera que los bloques de roca conservan alguna parte de su entramamiento mecánico inicial, por tal razón las discontinuidades estructurales juegan un papel muy importante en los procesos de deformación y falla a que puedan estar sujetos, así como también direccionan el flujo de agua.

Análisis estructural

Bajo esta denominación se consideran la influencia de la discordancia Paleozóico-Cretácea, de los planos de estratificación, fallas, diaclasas y de la zona de esfuerzos.

a. Discordancia: la superficie de discordancia es irregular, inclinada entre 35° y 48° en la dirección promedio de 290° de azimut y debajo de ésta se observan mármoles y filitas del Paleozóico.

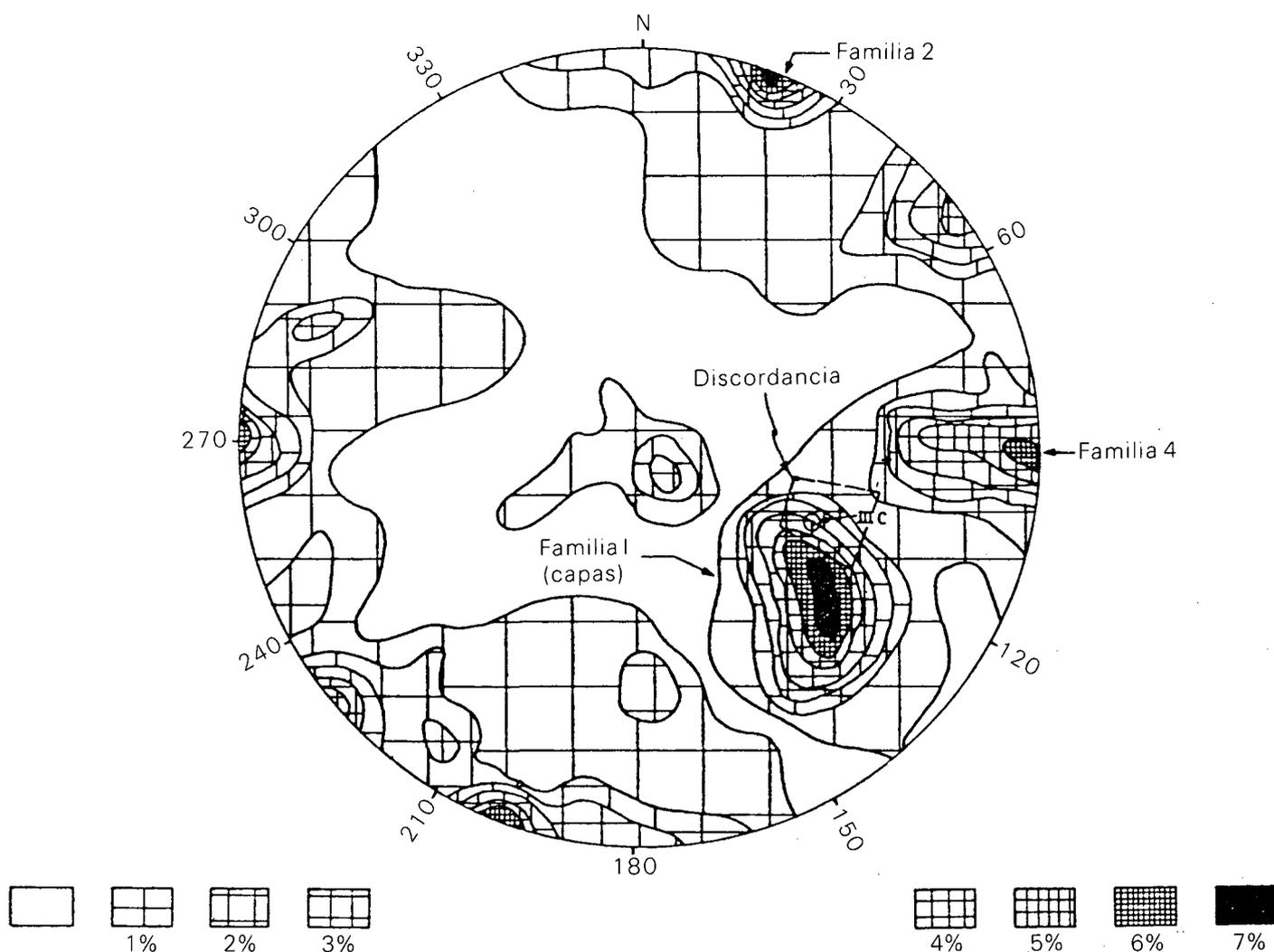


FIGURA 5. Frecuencia de discontinuidades del paleozoico.

b. Orientación de las capas: las capas del Cretáceo buzaban entre 40° y 60° con azimut variable entre 290° y 310° , las capas de lutitas tienen localmente buzamientos más suaves hasta de 35° , hecho que se relaciona con un notable plegamiento de esta unidad del Cretáceo.

Las capas del Paleozoico buzaban entre 35° y 75° y su azimut varía entre 260° y 275° .

En la parte inferior del cuerpo superior del deslizamiento las capas cretáceas y paleozoicas presentan una orientación prácticamente paraconcordante.

c. Diaclasas: para el estudio de diaclasas y otras discontinuidades se hicieron mediciones convencionales y se graficaron un total de 151 polos, de ellos 62 en el Cretáceo y 89 en el Paleozoico. Los datos de diaclasas aparecen en las Figuras 4 y 5.

En general se puede observar en el Cretáceo (Figura 4), la presencia de una familia de diaclasas orientadas normalmente a la estratificación (No. 2) y una familia con orientación E-W (No. 3), presumiblemente relacionada con una posible falla cuya existencia en la misma dirección sugiere el informe de Vianini-Entrecanales (1983). Las diaclasas de la familia No. 2 se inclinan más de 70° bien hacia el N o bien hacia el S. Las inclinadas al N se presentan por lo general planares y ligeramente abiertas, mientras que las inclinadas al S son por lo general planares y

lisas. En conjunto todas presentan apreciable persistencia.

Dentro del Paleozoico (Figura 5), se observa que la familia No. 2 del Cretáceo también está presente, igualmente en posición normal a los planos de estratificación y aparece una familia No. 4, con orientación N-S paralela al lineamiento de la quebrada Las Jotas con el cual se sugiere que está relacionada genéticamente.

Fallas: los lineamientos estructurales (o posibles fallas) en la zona del deslizamiento, aparentemente siguen un patrón regional que como se dijo en el capítulo de geología, pertenece al sistema de la Falla de San Pedro. Otros dos sistemas de fallas no llegaron a ser comprobados en los estudios del presente trabajo, sin embargo, informes anteriores del Proyecto Guavio, sugieren la presencia de una falla a lo largo de la quebrada Las Jotas, es decir paralela al deslizamiento y otra falla en posición E-W en la parte superior del deslizamiento. Existen sistemas de diaclasas muy claros en las direcciones antes mencionadas, las cuales se podrían relacionar con estas posibles fallas.

e. Zonas de esfuerzos: en el flanco izquierdo del deslizamiento, tal como se indicó, las rocas Cretáceas se presentan afectadas por micropliegues, estrías de fricción, intenso micro-cizallamiento y meteoriza-

ción avanzada. Este fenómeno puede observarse en varios sitios sobre el flanco izquierdo, tanto en la parte baja como a lo largo de una trocha recientemente construida en la parte alta del deslizamiento.

Flujo de agua

En el aparte de hidrogeología se esbozó el mecanismo hidrogeológico que posiblemente incidió en el deslizamiento. El flujo de agua está direccionado por las diaclasas y otras discontinuidades estructurales. A pesar del alto gradiente topográfico, es evidente que en periodos de intensa lluvia el agua llegue a acumularse entre la masa rocosa, la cual al no descargarse con facilidad alcanza a originar niveles piezométricos importantes que hacen iniciar la formación de grietas, lo que facilita mayor infiltración y acelera el proceso de deslizamiento por reducción de esfuerzos efectivos y ablandamiento.

Análisis de los deslizamientos

En los gráficos de los desplazamientos (Figura 6) se observa claramente que en los meses de mayo y junio de 1983, los mayores desplazamientos correspondieron a los puntos de control 4 y 5 colocados en la parte intermedia del talud; siguiendo los puntos 2 y 1 y luego el 6, mientras que el 3 permaneció relativamente quieto; esto permite suponer un proceso de apertura de grietas inicialmente en la parte central del talud, luego en la parte inferior y finalmente en la parte más alta. Después de la intensa precipitación del día 8 de julio los movimientos cambian y el punto 2, situado en la parte baja del talud, inicia un proceso de aceleración bastante fuerte; seguido de los puntos 1, 4 y 6 pero en menor proporción; durante esa lluvia se perdieron los puntos 3 y 5. A pesar de la gran intensidad de precipitación los movimientos pare-

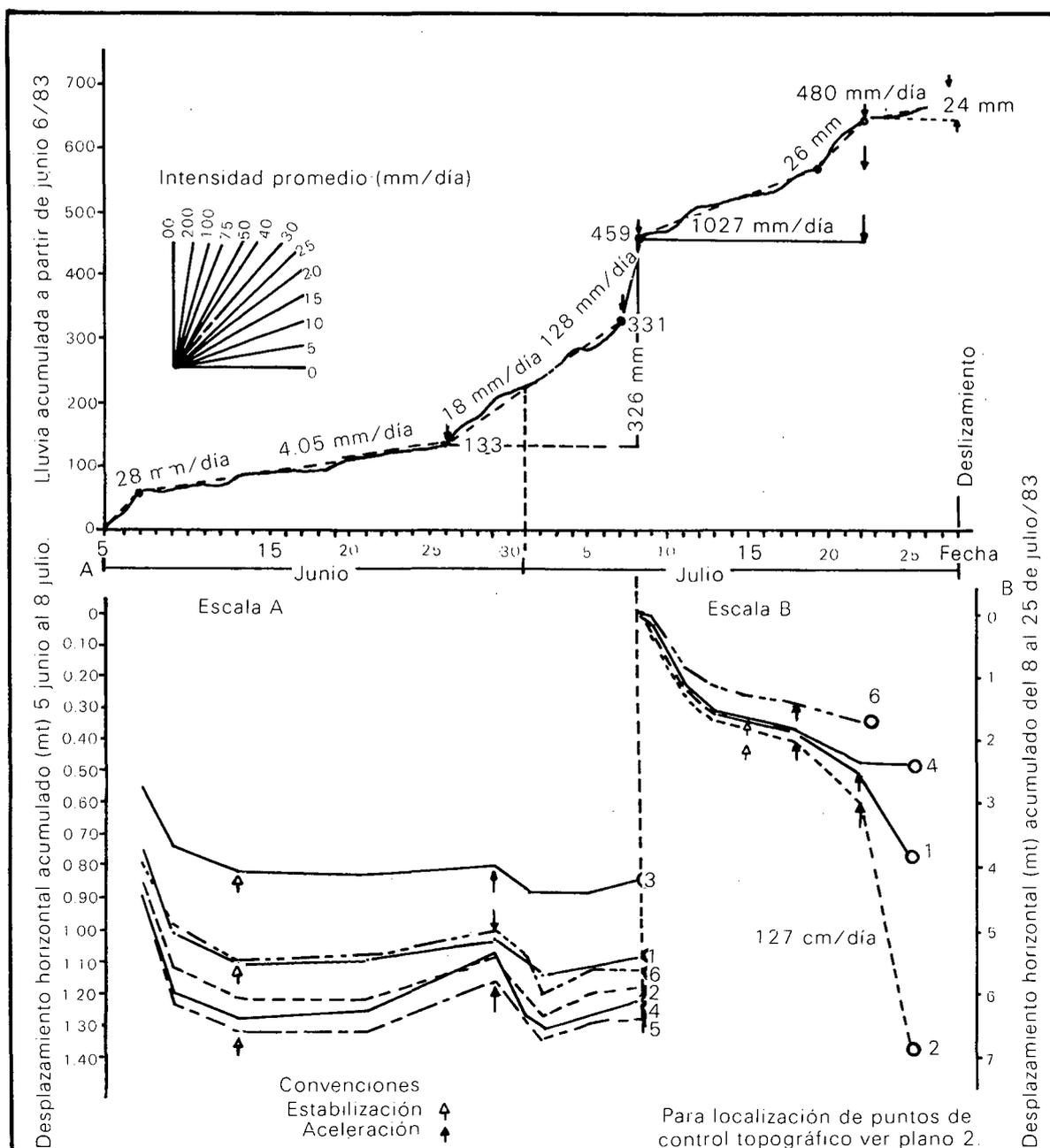
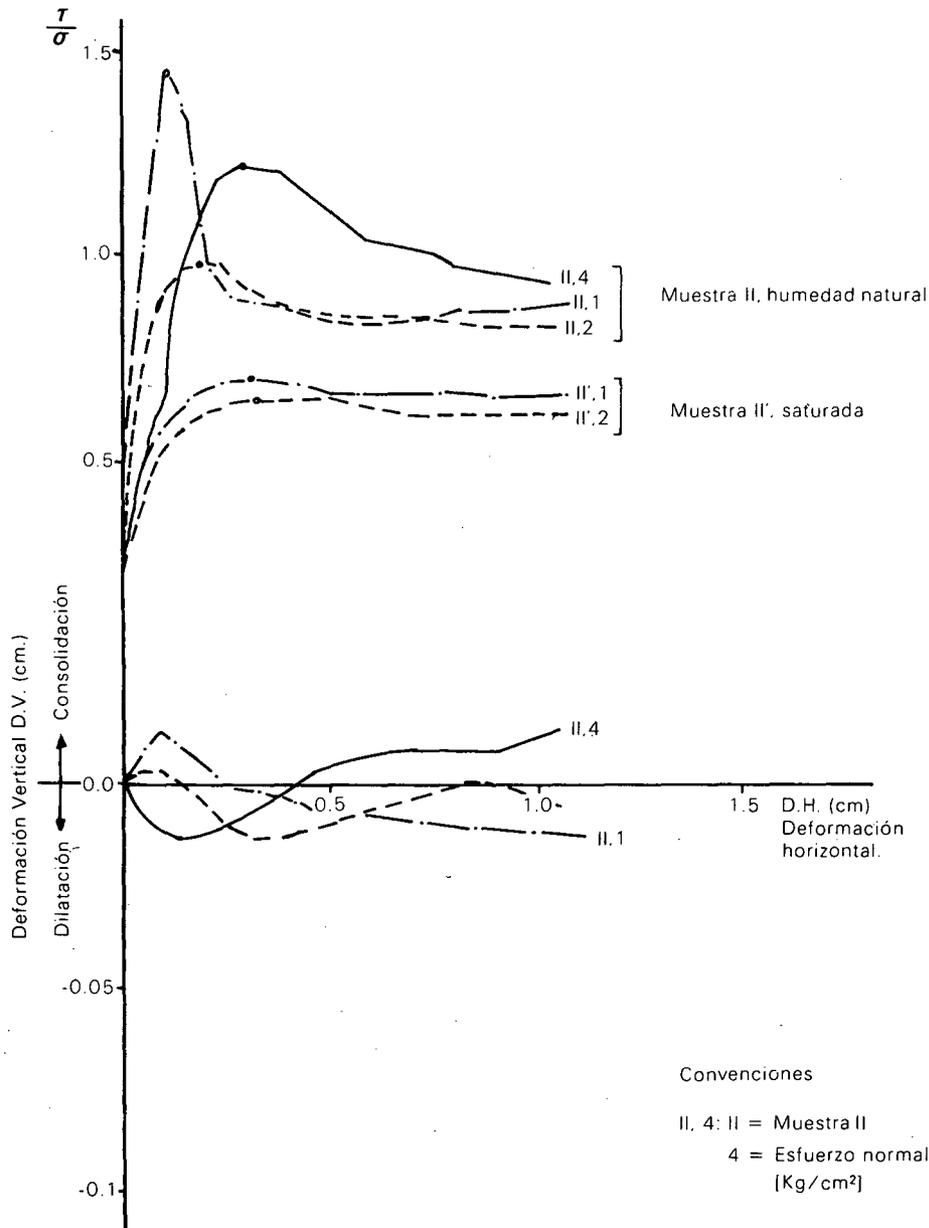


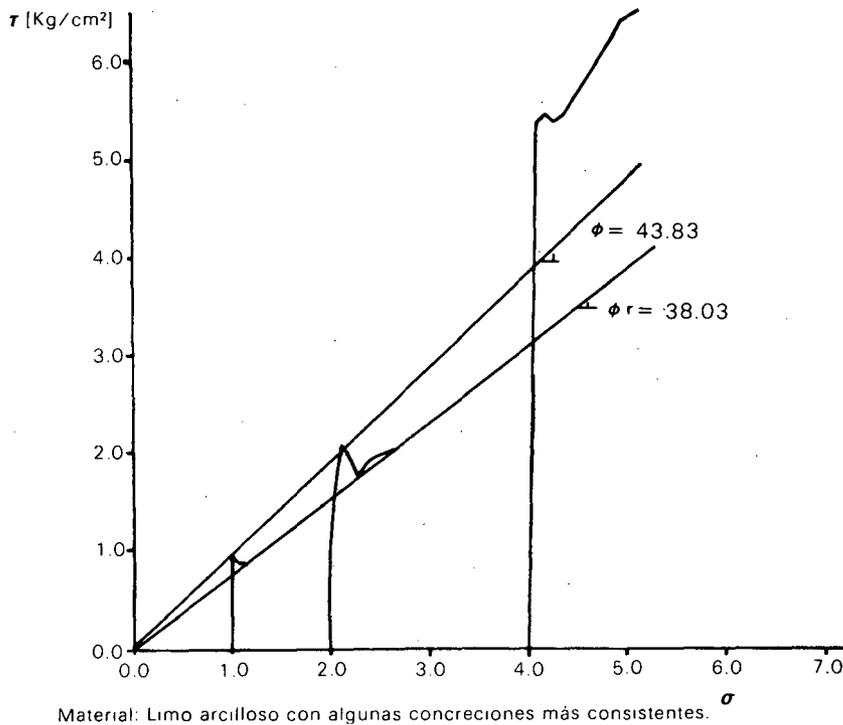
FIGURA 6. Deslizamiento Guavio — Correlación Lluvias — Desplazamientos.



Convenciones

II, 4: II = Muestra II
4 = Esfuerzo normal [Kg/cm²]

FIGURA 8. Guavio. Ensayo de corte directo. Muestra II. Lutita negra de la discordancia.



Material: Limo arcilloso con algunas concreciones más consistentes.

FIGURA 9. Guavio Muestra I - W Natural Ensayo de corte directo

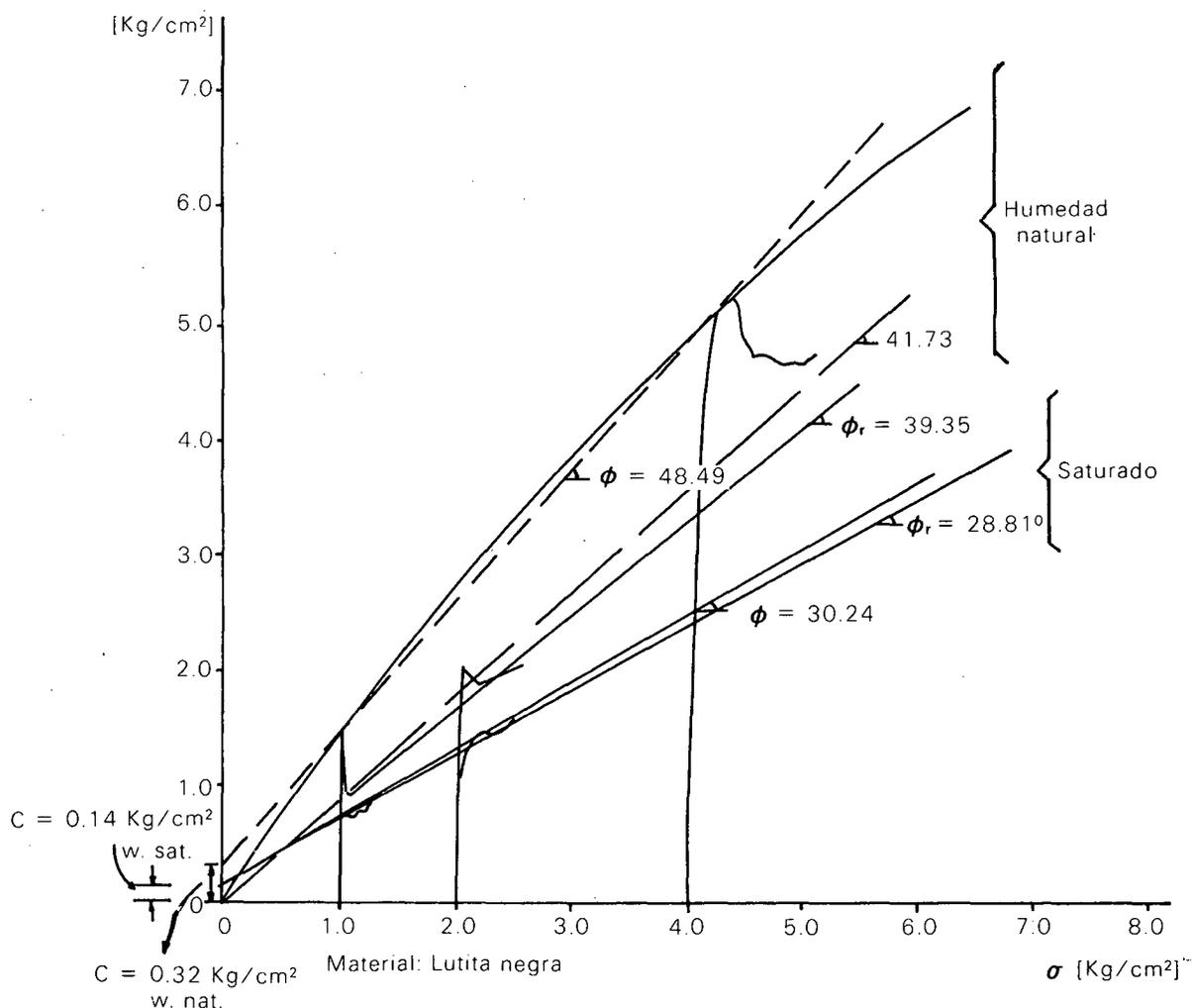


FIGURA 10. Ensayo de corte directo Guavio Muestra II

concavidad indicativa de que ese movimiento tendería a estabilizarse. Sin embargo, lluvias bastante fuertes del orden de 26 mm por día que ocurren entre el 19 y 22 de julio, ocasionan ya la aceleración máxima de los movimientos a pesar de que luego del 22 de julio la lluvia tan sólo alcanzó a 4.80 mm por día en promedio, y con 2 días secos el 22 y 23 de julio.

Todo esto parece indicar, que el efecto combinado de intensidades de lluvia de cierta magnitud hacia arriba, por períodos mayores de 2 días por lo menos, y la presencia de grietas dentro del deslizamiento llevaron a su colapso total. Es interesante anotar que aún cuando las condiciones de infiltración del talud iban variando por la expansión de las grietas, para lluvias menores de 25 mm/día, parece que no era factible un movimiento acelerado del talud.

Posible mecanismo de falla

Para el análisis del posible mecanismo de falla se conocen: a) las superficies aproximadas que quedaron después del deslizamiento, con base en el levantamiento topográfico llevado a cabo por INGETEC (Mapa 2). b) Hay una historia de los sucesos de los deslizamientos desde el inicio de la construcción de la bocatoma y c) existen los registros y análisis de lluvias y desplazamientos que tratamos en la parte anterior. La primera evidencia clara de los

levantamientos topográficos y la apreciación visual del deslizamiento, es que las superficies de falla son planas y no superficies curvas como se intuía en la forma inicial. En las fotografías disponibles además se pueden ver diferentes tonalidades que hacen inferir que los materiales constitutivos son diferentes. Además del análisis de los movimientos se deduce que se formaron grietas.

La presencia de planos como superficies de falla lleva a la conclusión inmediata que el deslizamiento está controlado por factores estructurales constituidos principalmente por las discontinuidades y las zonas de esfuerzos presentes en el área del deslizamiento. Estos planos, en conjunto con las grietas, cuyas evidencias ya han sido anotadas, llevan a la formación de bloques que, aunque no se puede asegurar que se movieron monolíticamente, si, por la forma de interacción de los planos, denotan claramente que se formaron cuñas especialmente en la parte superior del talud.

La historia de los deslizamientos, la dirección preferencial de la línea de interacción de los planos (o sea la línea de las cuñas, Figura 4), y las tonalidades de las fotos, llevan a la conclusión que hubo 3 movimientos sucesivos de material en el talud con las siguientes características:

- Inicialmente hubo deslizamientos en el flanco

izquierdo en septiembre de 1982 (I, II), luego el 28 de julio de 1983 el resto del flanco derecho en esta zona inferior (IIA) alrededor del medio día, la parte media del talud (Cuña III) que constituyen el primer deslizamiento catastrófico a las 6 p.m. y posteriormente se desprendió la parte superior del talud (Cuña IV), 2 1/2 horas después.

- En el Mapa 2 y en la Figura 11 se presentan las diferentes cuñas que se adoptan en los análisis posteriores. En la Figura 4 se indican los polos de los diferentes planos de las cuñas y las grietas de tensión adoptadas, los cuales se ve que coinciden aproximadamente con planos estructurales, a excepción del flanco izquierdo (zona de esfuerzos) el cual no es fácilmente discernible sino con el análisis tectónico regional.

- Es importante anotar que el plano derecho del bloque III corresponde a la superficie de la discontinuidad, mientras que todo el flanco izquierdo del deslizamiento corresponde a las zonas de esfuerzos; en la Cuña IV el flanco derecho corresponde a los planos de estratificación del Cretáceo y en la Cuña IIA este mismo flanco está en el Paleozóico

En conclusión, el mecanismo de falla más probable fue así: lo que se ha llamado zona II se deslizó en septiembre de 1982. Posteriormente en julio 28 de 1983, la falla de la zona II A en la parte inferior que probablemente la constituían depósitos coluviales antiguos sobre material rocoso paleozóico alterado, seguida de la falla más grande que fue la de la Cuña III y finalmente la de la Cuña IV, 2 1/2 horas después de la III. Es un caso típico de falla de rocas alteradas y es tal vez una de las pocas veces en que hay 2 cuñas en deslizamientos sucesivos.

Muestreos y ensayos

No se ha tenido noticia de que haya habido muestreo y ensayo previo a los de este informe en los materiales de deslizamiento y hubo gran dificultad en obtener muestras relativamente inalteradas para realizar algunos ensayos de corte directo, para obtener resistencias (así fueran relativas) de las diferentes superficies de deslizamiento. Se seleccionaron dos muestras; una en el flanco izquierdo, en el material alterado de la zona de esfuerzos y otra en el flanco derecho en una lutita negra (paleosuelo) que se encuentra en el plano de discordancia que constituyó uno de los principales de la Cuña III.

A esta muestras se les hicieron ensayos de corte directo consolidado drenado, tanto con humedad natural como totalmente inundada para la muestra

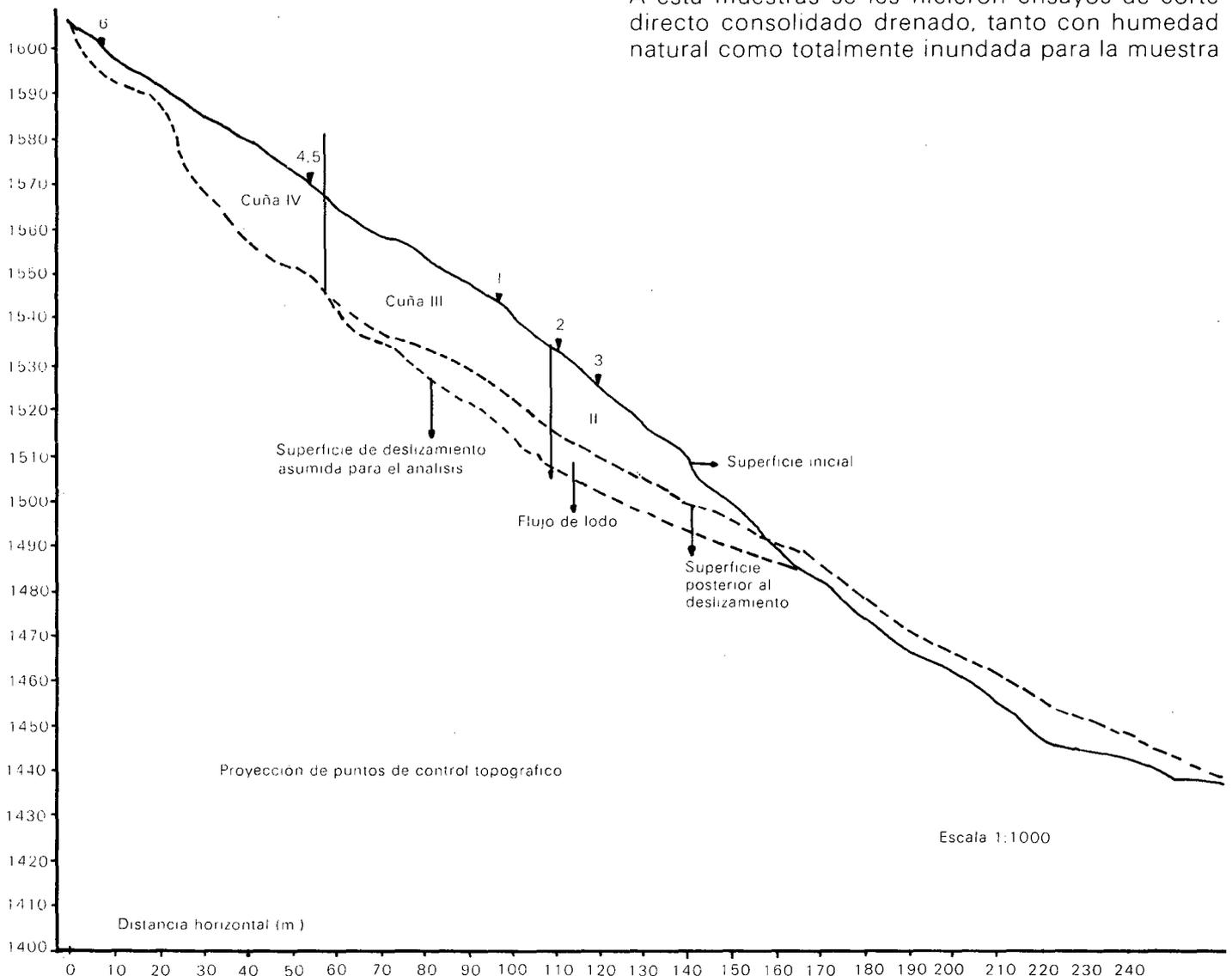


FIGURA 11. Deslizamiento Guavio. Perfil por el eje del deslizamiento.

de paleosuelo. La muestra I corresponde a la zona de esfuerzos (flanco izquierdo) y la muestra II corresponde a la lutita negra (flanco derecho). En la Figura 7 aparecen las curvas de esfuerzo de deformación del material I y en la Figura 8 las correspondientes del material II, mientras que las curvas de resistencia se muestran en las Figuras 9 y 10.

Las características geomecánicas indican que: a) se trata de materiales frágiles siendo mucho más frágil el material II (la lutita negra) con un $I_f = 40\%$, mientras que la muestra I tiene un $I_f = 10\%$. b) La resistencia pico se alcanza en una forma muy rápida y la muestra I (de menor fragilidad) es dilatante, mientras que la lutita (II) no lo es tanto, obviamente por sus características de litificación. Dado que la muestra I tenía un grado de saturación muy alto se presentan resistencias húmedas únicamente del material II y se aprecia claramente (Figura 10), que la resistencia se reduce del orden del 50% en relación a la muestra con la humedad natural, mientras que la fragilidad se vuelve nula, es decir, se vuelve un material dúctil. c) Las resistencias pico son bastante elevadas con ángulos de fricción de 40° a 50° para ambos materiales que se reduce rápidamente al saturarse al orden de 30° (ablandamiento). Los valores residuales son de 38° para el material I y 39° a 42° para el material I en estado natural. d) Se consideró además que los valores de resistencia del paleosuelo son similares a los que se podrían desarrollar en el plano de estratificación de lutitas cretácicas.

Análisis cinemático del movimiento

Con base en los planos de deslizamientos y grietas de tensión que ya mencionamos en los partes anteriores y que han sido correlacionados con los análisis de discontinuidades, es posible hallar las líneas de intersección de las cuñas con sus respectivos buzamientos. Se aprecia claramente que las Cuñas II y IV tienen más o menos el mismo azimut de buzamiento pero siendo más pendiente la IV, en cambio la Cuña III tiene una dirección más hacia el W y una pendiente menor que la IV pero mayor que la II (Figura 4). El hecho de que tanto las direcciones como las pendientes de las 3 cuñas sean diferentes, hacen que necesariamente se presenten desde el punto de vista cinemático, movimientos independientes de los tres bloques. La Cuña II no se sabe a ciencia cierta si fue una cuña como tal o dos deslizamientos de material que formaron esa cuña. De todas formas no es posible el movimiento simultáneo de las 3 cuñas para el colapso. La Cuña II que se supone constituida por material predominante del tipo I (es decir material alterado), que tiene un índice de fragilidad reducido, tuvo que presentar una falla con una velocidad escasa, además por encontrarse en sitios bajos la energía potencial también era baja. La Cuña III (encontrada inmediatamente hacia arriba de la Cuña II), ya tenía gran parte del plano del flanco derecho en el material II que era muy frágil, por lo cual el colapso tuvo que ser catastrófico por el paso rápido de la resistencia pico a la resistencia residual y, por encontrarse a una energía potencial mayor, obviamente la energía de

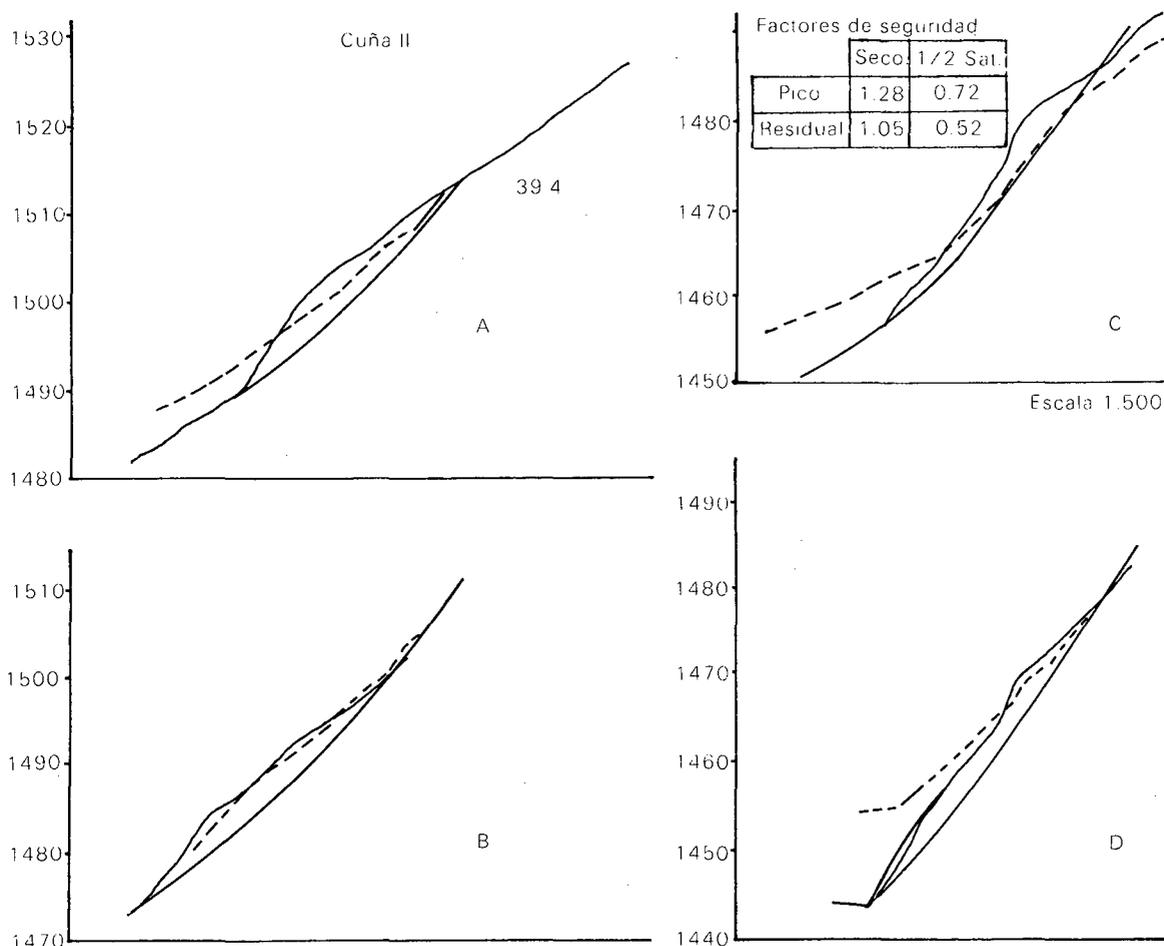


FIGURA 12.

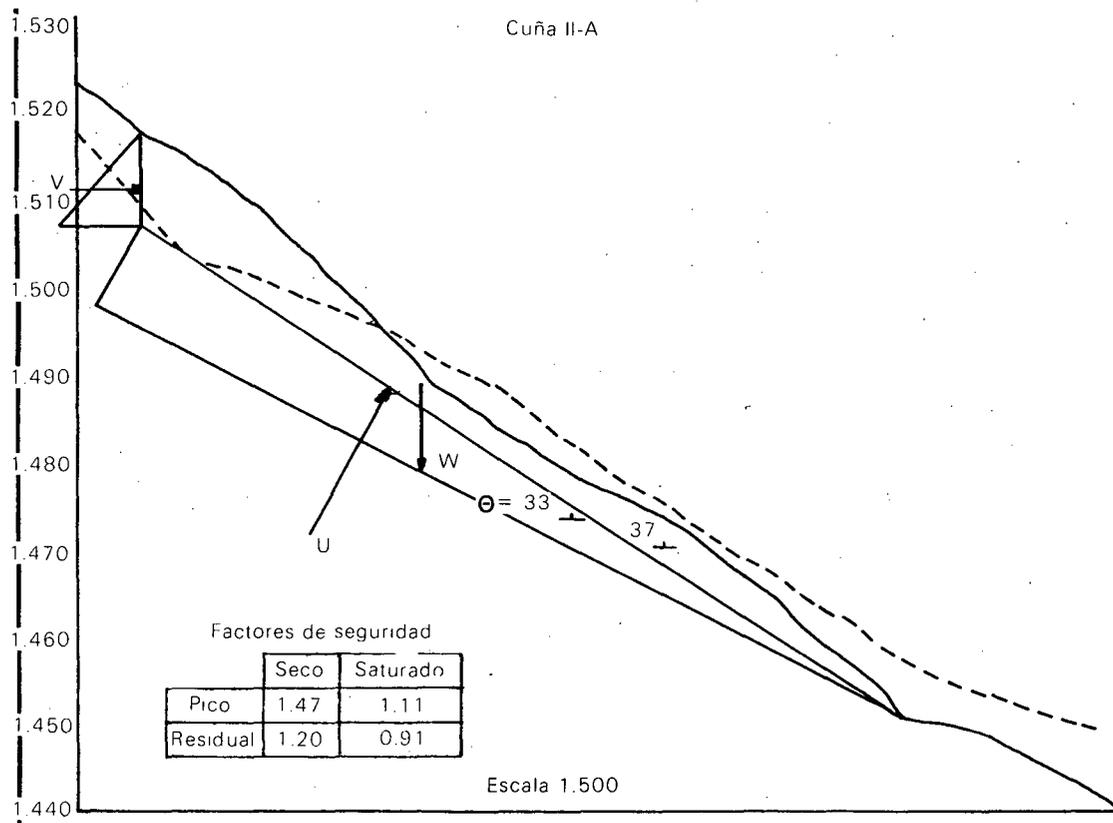


FIGURA 13. Cuña II-A

desplazamiento era mucho mayor. Finalmente en la Cuña IV hay restricción cinemática en el extremo inferior tal como se aprecia el perfil de la Figura 11, puesto que por tener una pendiente mayor que la III, se requiere que haya tanto rotura de la esquina inferior y posiblemente (tal como se aprecia en los Mapas 1 y 2) había puentes de roca intactos en la zona de esfuerzos que retardaron la falla, pero por lo mismo la hicieron aún más catastrófica con una fragilidad bastante alta y por encontrarse en la parte superior del deslizamiento fue la más violenta de todas.

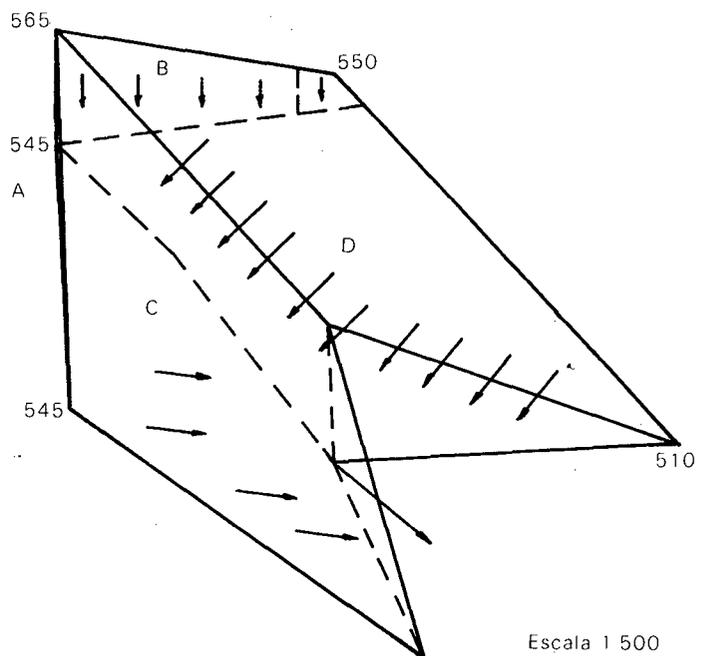
Esta evaluación cualitativa de la energía disponible debido a reducción de la energía elástica por fragilidad y la energía potencial de posición en relación al nivel del río, coinciden más o menos con los relatos de las personas sobrevivientes de la catástrofe.

Con base en el análisis cinemático anterior se produce el análisis estático que se presenta a continuación.

Análisis estático de los deslizamientos

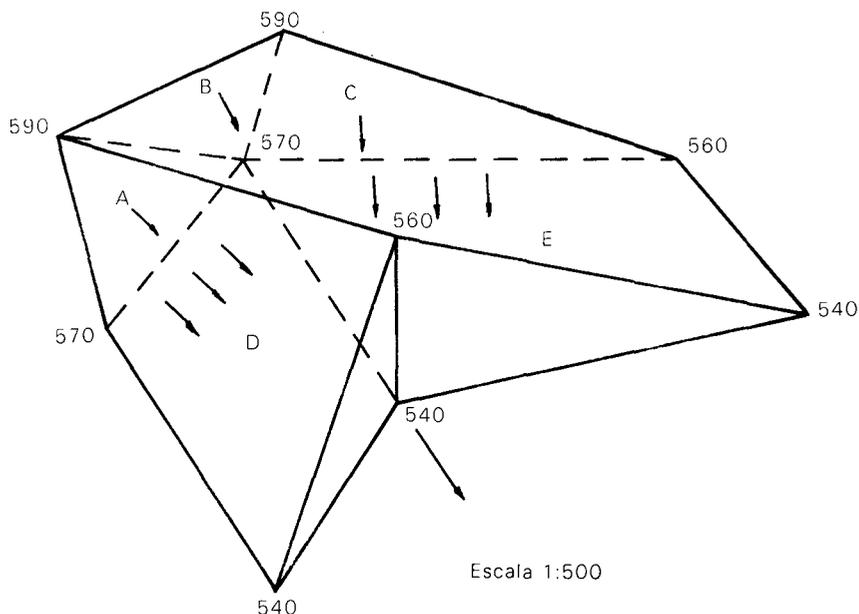
Los bloques de la parte II (Figuras 12 y 13) se analizaron de dos formas: como falla planar en material rocoso descompuesto o como falla curvilínea en un suelo ya que se encuentran materiales intermedios. En ambos casos y con un nivel de saturación relativamente bajo (con el nivel freático del orden de la mitad con respecto al plano crítico), se encuentran que con las resistencias del material I, los bloques II y IIA fallan. El II tiene un factor de seguridad más bajo que el bloque IIA que falló después, lo cual coincide con la secuencia de acontecimientos.

Para los movimientos III (Figura 14) y IV (Figura 15), se hicieron análisis tridimensionales de las diferentes cuñas teniendo en cuenta todas las fuerzas que actúan, pero el empuje hidrostático tan solo se



Factores de seguridad		
	Seco	Saturado
Pico	2.17	1.14
Residual	1.57	0.76

FIGURA 14. Cuña III



Factores de seguridad

	Seco	Saturado			
		Agua en A, B, C	Agua en A	Agua en A, C	
Pico (P)	1.53	0.69	0.81	0.75	
Residual (R)	1.0	0.42	0.52	0.47	
		Planos sobre los que se presenta tracción.	B, C	B	
		Esfuerzos de tracción [Kg/cm ²]	P	6.71	11.08
			R	17.18	23.45

FIGURA 15. Guavio. Cuña IV.

consideró en el 100%, es decir el nivel del agua coincidiendo con la superficie de terreno antes del deslizamiento. Para el caso del bloque III se encuentra que el factor de seguridad para la resistencia pico a humedad natural es del orden del 1.14. Sin embargo, para la resistencia pico ablandada se encuentra que el factor de seguridad es del orden de 0.8, es decir, que el estado tal vez de este bloque se encontraba en un punto intermedio entre los dos. Para el bloque IV, considerando los dos planos de tracción que se encuentran atrás y la resistencia pico con humedad natural, se encuentra que el factor de seguridad es alto 1.5, mientras que para material con presión de agua en todos los planos es de 0.7 para la misma resistencia pico. Sin considerar agua en las grietas el factor de seguridad aumenta a 0.81. Sin embargo en todos los casos de resistencia saturada (suponemos que toda esta zona se encontraba saturada por las grietas y la lluvia más los chorreaderos que venían de la cantera de arriba), resulta que el factor de seguridad siempre es menor que 1, lo cual no coincide con la evidencia que el deslizamiento se vino posteriormente al del bloque III. La explicación reside en que si uno considera un solo plano sin agua (el plano B que se encontraba arriba a la izquierda en donde se aprecian estratos de rocas recientemente rotos), se calcula que hay una fuerza no compensada que da como resultante un esfuerzo de tracción en el plano B del orden de 11 a 20 kg/cm², que pudo haber sido suficiente para vencer la resistencia a tracción de la

roca y retardar el movimiento mientras se generaba esta superficie de ruptura. Esto coincide ya con la evidencia mostrada.

No es fácil tener certeza absoluta y tal vez nunca se sabrá realmente cuáles fueron los parámetros de resistencia que se desarrollaron durante el deslizamiento. En realidad esto sucede en todos los deslizamientos, así se haga un análisis retrospectivo y en este caso estos parámetros no son fáciles de evaluar debido al carácter tridimensional de los bloques de falla, a la posición desconocida del nivel del agua, y a las presiones que no se sabe como se distribuían a lo largo de los planos. A pesar de ello, tanto los análisis cinemáticos y estáticos como los ensayos, si dan una idea del orden de esfuerzos que se estaban generando con el deslizamiento y los mecanismos de falla propuestos coinciden aproximadamente con la secuencia de acontecimientos que se presentaron durante el deslizamiento.

Posibles causas del deslizamiento

A este respecto acudimos a la filosofía del profesor Krynine modificada, la cual dice que hay que buscar: a) una causa real que está determinada por aquel conjunto de factores que ponen al talud al borde de la falla; b) una causa inmediata que constituye el factor detonante, es decir que "dispara" el movimiento; y c) posibles factores contribuyentes cuya incidencia tan solo puede acelerar o retardar el movimiento. También a este respecto vale la pena tener en cuenta el pensamien-

to del profesor Sowers quien sensatamente comenta: "en la mayoría de los casos existen simultáneamente varias causas y tratar de decidir cuál produjo finalmente la falla, no es solamente difícil sino inexacto. A menudo el factor que finalmente pone en movimiento una masa de tierra no es más que el disparador, puesto que ésta estaba a punto de fallar. Llamar al factor final la causa es lo mismo que decir que el fósforo que incendió la mecha del cartucho de dinamita que destruyó el edificio, es la causa de semejante desastre".

Con base en lo anterior se puede mencionar como causa real del deslizamiento las características físico-geológicas de la zona, que son la constitución del macizo en una zona de contacto entre dos formaciones discordantes con un tectonismo intenso ubicado en un área de alta precipitación y topografía abrupta.

La causa inmediata o detonante fue la intensidad excesiva de precipitación; la ocurrida el 8 de julio y la del 18 al 22, que era la última adición que aceleró el movimiento hasta su colapso. Los factores que aceleran o retardan el fenómeno pueden ser: la concentración de escorrentía en la parte superior debido a la exploración de las canteras, las detonaciones en esta misma cantera y por último, la construcción misma de la vía de acceso a la bocatoma, la cual dado que el fenómeno ocurrió un año después de su construcción no puede considerarse como factor determinante.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Entre el mes de julio de 1982, poco tiempo después de iniciadas las excavaciones en las vías de acceso de bocatoma en el Proyecto Guavio y el 28 de julio de 1983, se presentaron una serie de deslizamientos de magnitud y gravedad crecientes.
2. El día 28 de julio a las 6:30 p.m., se presentó un catastrófico deslizamiento que causó la muerte de varias personas; este movimiento estuvo antecedido el mismo día por movimientos menores. A las 9 p.m. ocurrió otro deslizamiento importante el cual también cobró vidas humanas.
3. Con base en análisis cinemáticos y estáticos, aunados a reconocimientos geotécnicos detallados y ensayos de laboratorio, el presente estudio permitió concluir que los movimientos mayores, precisamente los catastróficos, corresponden a deslizamientos sucesivos de cuñas de roca, de moderada a completamente meteorizada, con una porción pequeña de saprolito y material coluyial suprayacente.
4. En el sitio de bocatoma se encontraron condiciones geológicas particularmente susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos, entre las cuales es importante mencionar las siguientes:
 - a. Una zona angosta de rocas mecánicamente afectadas por esfuerzos tectónicos, sin aparente expresión superficial claramente definida.
 - b. Un patrón, de fracturas con características diferentes para el Cretáceo y Paleozóico, que favorece la infiltración de aguas a través de las rocas cretáceas.
 - c. Presencia de una importante interfase geomecánica consistente en la discordancia Paleozóico-Cretáceo y un delgado suelo antiguo que sella las rocas paleozóicas impidiendo parcialmente el paso del agua.

Estos factores aunados a la alta pendiente constituyen la causa real de los deslizamientos, es decir, el conjunto de características que lo hace posible.
5. La causa inmediata de los deslizamientos ocurridos el 28 de julio, es decir, el factor final y determinante que puso en movimiento las masas pétreas y térreas, los constituyó la infiltración abundante de aguas lluvias a través de fracturas en la roca, que al no ser evacuadas del cuerpo de la masa rocosa con la misma velocidad, originó presiones hidrostáticas excesivas, además del ablandamiento de la roca meteorizada dispuesta a lo largo de las discontinuidades.
6. Otros factores tales como las excavaciones de acceso a la bocatoma y el túnel auxiliar se consideran como factores contribuyentes pero no determinantes de los movimientos.
7. Con anterioridad a los deslizamientos del 28 de julio era difícil discernir los mecanismos de falla, así como el volumen de masas involucradas debido principalmente a dos factores:
 - a. La superficie que constituyó el flanco izquierdo del deslizamiento mayor fue generada en el proceso de falla y no se sabe a ciencia cierta cuando comenzó a formarse.
 - b. Los procedimientos de instrumentación que se emplearon no permiten detectar movimientos masivos como los que precedieron los deslizamientos trágicos.
8. En la zona del flanco izquierdo del deslizamiento estudiado, existe riesgo de que se presenten nuevos movimientos.
9. Los deslizamientos de la bocatoma en el Proyecto Guavio ocurridos en 1983, dejan algunas experiencias y enseñanzas prácticas que deben ser asimiladas para evitar la ocurrencia de eventos similares en el futuro.
 - a. En los estudios de obras de gran magnitud donde esté prevista la concentración de personas, será necesario hacer estudios más detallados de los deslizamientos, clasificándolos según su probabilidad de ocurrencia, magnitud y tipo de riesgo admisible, teniendo presente principalmente la incidencia sobre la seguridad de las personas.
 - b. Este tipo de estudios debe extenderse al sector de las carreteras y ferrocarriles que evidentemente presentan peligros semejantes.

- c. Los sistemas de instrumentación que se implanten deberán tener en cuenta, entre otros los siguientes criterios:
- Una simplicidad que no exceda las necesidades de medición, pero que provea de información suficiente y oportuna.
 - El mínimo riesgo para sus operarios.
 - Una interpretación cuidadosa y permanente de los datos manejados.
10. Paralelamente a la implantación de sistemas de instrumentación deben darse condiciones que garanticen su eficiencia, así como las de adopción de medidas preventivas para las catástrofes, tales como: personal entrenado para el control de situaciones de peligro, campañas educativas para usuarios y trabajadores, etc.
11. En el informe adicional de INGEOMINAS titulado "Evaluación general de la estabilidad en el sector del Proyecto Hidroeléctrico del Río Guavio", se presentan las principales zonas inestables, con un nivel de riesgo estimado, que deben ser tenidos en cuenta para evitar nuevos problemas. Dentro de estas zonas vale la pena destacar el sector del estribo derecho, que muestra el mayor riesgo potencial de deslizamiento de roca y suelo.
12. Para que los estudios relativos a los deslizamientos que afectan las obras civiles se lleven a cabo de manera más adecuada en nuestro país, es necesario que se fomenten y apoyen programas de investigación aplicada, encaminados a conocer mejor las características ambientales y sociales de estos fenómenos en nuestro medio. También se requiere que dentro de los objetivos de los Estudios Geotécnicos, se incluya la necesidad de producir, de manera sistemática, mapas de riesgo sísmico y geológico, para aquellos proyectos cuyas características lo justifiquen.

BIBLIOGRAFIA

1. Burgl, H., 1957. Bioestratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Bol. Geól. N° 2, pp. 113-185.
2. _____. 1960 b El Jurásico e infracrético del río Batá, Boyacá. Serv. Geól. Nal. (Bol. Geól. Vol. VI), pp. 169-211.
3. Cruz, J. y Camacho, R. 1971. Informe sobre las investigaciones geológicas mineras en el yacimiento de hierro de Ubalá, Cundinamarca. Ingeominas, Bogotá. Informe N° 1571 (Inédito).
4. Escovar, R., 1975. Geología y geoquímica de las minas de esmeraldas de Gachalá, Cundinamarca. Ingeominas. Informe N° 1684.
5. Garzón, A., 1975. Prospección geoquímica en suelos en Ubalá-Cueva Oscura y río Farallones, Región del Guavio. Ingeominas. Bogotá. Informe N° 1691.
6. Guerra, A., 1972. Estudios geológicos de las calizas del Guavio, municipios de Ubalá y Gachalá, Cundinamarca. Ingeominas. Bogotá. Informe N° 1615. (Inédito).
7. McAughlin, D. H., Jr. y Arce, M. 1969. Geology and mineral resources of the Zipaquirá area (Zona IV), Cordillera Oriental, Colombia. Inst. Nal. de Inv. Geól. Min., Ministerio de Minas y Petróleos.
8. _____. 1972. Recursos minerales de parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Meta. Inv. Min. Nal. Bogotá. Tomo IV.
9. Ordóñez, R., 1962. Yacimiento de cobre "La Colonia", Gachalá, Departamento de Cundinamarca. Informe N° 1381. Serv. Geól. Nal.
10. Quintero, R., y De La Espriella, R., 1958. Investigaciones mineras en la región del Guavio, Departamento de Cundinamarca. Informe N° 1265. Ser. Geól. Nal.
11. Renzoni, G., 1965. Geología del Cuadrángulo L-11 Villavicencio. Serv. Geól. Nal. e Inventario Minero Nacional.
12. Segovia, A., 1963. The Geology of Plancha L-12 (Peralonso-Medina), Pennsylvania State University.
13. Ulloa, C. y Rodríguez, E., 1979. Geología del Cuadrángulo K-12 Guateque. Bol. Geól. Ingeominas.
14. INGETEC, 1977. Geología sitio de Presa. Memorando de Diseño S-15.
- _____. 1977. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio. Evaluación de riesgos sísmicos. Memorando de Diseño S-14.
16. _____. 1978. Geología de la Cantera "Las Jotas". Memorando de Diseño S-19.
17. _____. 1980. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, geología e investigaciones del subsuelo. Volumen I de IV. Tomo 3 de 3.
18. _____. 1980. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, geología e investigaciones del subsuelo. Volumen I de IV. Tomo 2 de 3.
19. _____. 1980. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, geología e investigaciones del subsuelo. Volumen III de IV. Geología.
20. _____. 1980. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, geología e investigaciones del subsuelo. Tomo 1 de 3.
21. _____. 1980. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, geología e investigaciones del subsuelo. Volumen IV de IV. Planos.
22. _____. 1982. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio. Hidrología.
23. _____. 1983. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, estudio geomorfológico para la Cuenca del Río Guavio. Memorando de Diseño S-60.
24. _____. 1983. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, estudio geomorfológico para la Cuenca del Río Guavio. Anexo fotográfico.
25. _____. 1983. Proyecto Guavio. Informe de lluvias, Zona de Presa. Hidrología.
26. _____. 1983. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, zonas inestables, visita técnica de consultores.
27. _____. 1983. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, deslizamiento en el área de bocatoma. Informe de consultores.
28. _____. 1983. Guavio Hydroelectric Project, consulting board report N° 1.
29. _____. 1983. Guavio Hydroelectric Project, consulting board report N° 2.
30. Vianini-Entrecanales. 1983. Hydroelectric Project of the Guavio River — Geology of the bocatoma slide area.
31. Krynnie, D. P. y Judd, W. R., 1957. Principles of Engineering Geology and Geotechnics. Mc-Graw, Hill - 730 pp.
32. Sowers, G. F. y Sowers, G. B., 1972. Introducción a la Mecánica de Suelos y Cementaciones. Limusa-Wiley - 677 pp.
33. Hoek, E., y Bray J., 1974. Rock Slope Engineering — Institute of Mining and Metallurgy, London.