

El uso de la mecánica de suelos en la investigación geomorfológica

FABIAN HOYOS¹
MICHEL HERMELIN¹

RESUMEN

La determinación de las propiedades físico-mecánicas de las formaciones superficiales permite refinar los criterios corrientes para definir las unidades geomorfológicas. En el caso de la cuenca del curso inferior del Río Grande, en la zona central de Antioquia, los valores de tales propiedades pueden ser agrupados consistentemente en conjuntos correlacionables con unidades geomorfológicas.

La principal fuente de los materiales de los depósitos de vertiente en la cuenca del curso inferior del Río Grande es una gruesa cubierta de saprolito derivado del Batolito Antioqueño. Este origen común permite además inferir una interpretación morfogenética con base en las diferencias entre las propiedades físico - mecánicas de tales depósitos.

ABSTRACT

Measurement of the physical-mechanical properties of surficial formations permit refinement of current criteria for differentiating geomorphic units. In the lower Río Grande basin of central Antioquia department, Colombia, these properties can be placed in groups that are consistently correlative with geomorphic units.

Main source slope deposit material in the lower Río Grande basin is a thick saprolitic blanket derived from the Antioqueño Batholith. This common origin permits inferring some morphogenetic interpretations based on differences in the physical mechanical properties of such deposits.

¹ INGEOMINAS Carrera 30 No. 51 - 59 Bogotá, D.E. 1.980

1 INTRODUCCION

La utilización de técnicas cuantitativas en geomorfología ha recibido un impulso grande en los últimos años tanto en Norteamérica como en Europa. La utilidad de tales técnicas, adecuadamente utilizadas, está fuera de toda duda. En este orden de ideas, el uso de los ensayos de rutina en la mecánica de suelos puede ser apropiado tanto en la diferenciación de las unidades geomorfológicas como en la definición de criterios que permitan reconstruir su historia morfo-genética y prever su evolución futura.

Leuzinger (1948), Avenard y Tricart (1960), Avenard (1962) y Bompart (1968), han planteado la posibilidad de la utilización de la mecánica de suelos en la investigación geomorfológica, particularmente en lo que Tricart ha llamado la geomorfología aplicada. En este artículo se pretende presentar la potencialidad del uso de las tales técnicas en la investigación geomorfológica básica.

El conjunto de ensayos diseñado para evaluar el comportamiento de las formaciones superficiales, suelos en el sentido que los ingenieros civiles le confieren a la palabra, (Terzaghi y Peck, 1948; Lambe, 1951), aunque parte de definiciones claras y unívocas, presenta una seria limitación: se realiza sobre muestras remoldeadas y aún en las ocasiones en las que se trata de llevarlo a cabo sobre muestras inalteradas, no se tienen en cuenta las condiciones del entorno natural del material insitu. Como es obvio, en estas condiciones los resultados de los ensayos se refieren estrictamente a materiales diferentes de aquellos con los que va a trabajar el ingeniero o a analizar el geólogo. Con todo, las determinaciones hechas en el laboratorio de mecánica de suelos tienen el valor de indicadores, i.e. magnitudes estadísticamente corre-

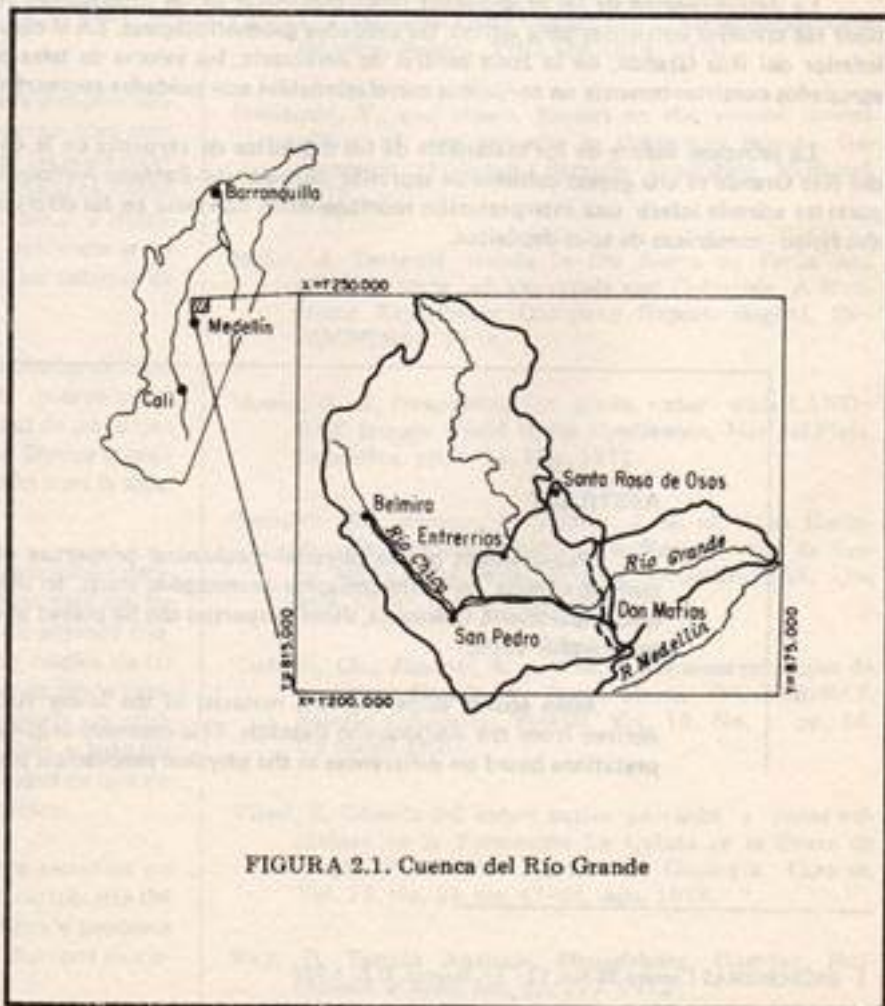
lacionables con los valores de las propiedades que se pretende medir, y como tales son utilizadas en este trabajo.

En las zonas tectónicamente activas del trópico húmedo, los movimientos de masa constituyen un elemento morfo-genético de primera importancia que apenas ahora comienza a recibir la atención que merece. (Thomas, 1974). Los autores plantean la hipótesis que los procesos que dan lugar a tales movimientos de masa y modifican el paisaje quedan registrados en las propie-

dades físico-mecánicas de los depósitos de vertiente, y en consecuencia las técnicas corrientes utilizadas en los laboratorios de mecánica de suelos pueden eventualmente servir no sólo para diferenciar las unidades geomorfológicas sino también para avanzar en su interpretación morfo-genética.

2 INTRODUCCION GEOMORFOLOGICA

La cuenca del curso inferior del Río Grande, en la zona central del Depart-



tamento de Antioquia, está separada del resto de la cuenca por una faja montañosa que corre en dirección norte-sur (Fig. 2.1).

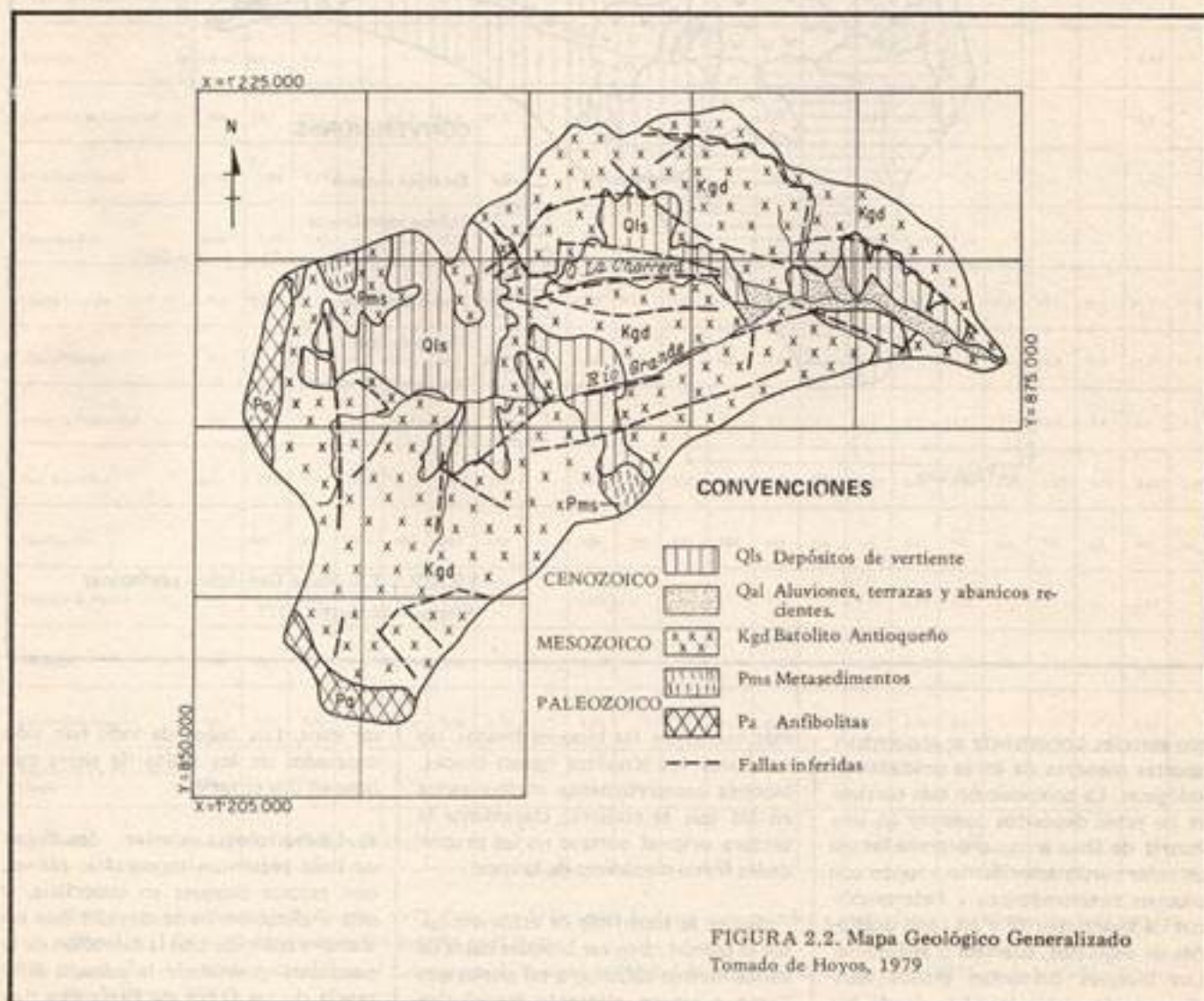
El río, que hasta allí trae una pendiente longitudinal, muy regular, del orden de 0,75‰, continúa su recorrido por un valle de paredes empinadas, con una pendiente longitudinal promedio de 5‰.

Las laderas tanto del valle mismo del Río Grande como las vertientes de su principal afluente, la Quebrada La Chorrera, han sido modeladas en el saprolito derivado del Batolito Antioqueño por grandes movimientos de masa que han dado origen a su vez a extensos depósitos de vertiente. (Fig. 2.2).

La extensión y características de

los depósitos de vertiente son unos de los rasgos más destacados de esta cuenca. (Fig. 2.3).

En dichos depósitos están comprendidos los de flujo de lodo y los de flujos de tierra, de espesor variable, hasta de varias decenas de metros. La fuente principal de los materiales que componen estos depósitos es el Batolito Antioqueño en razón de su predomi-



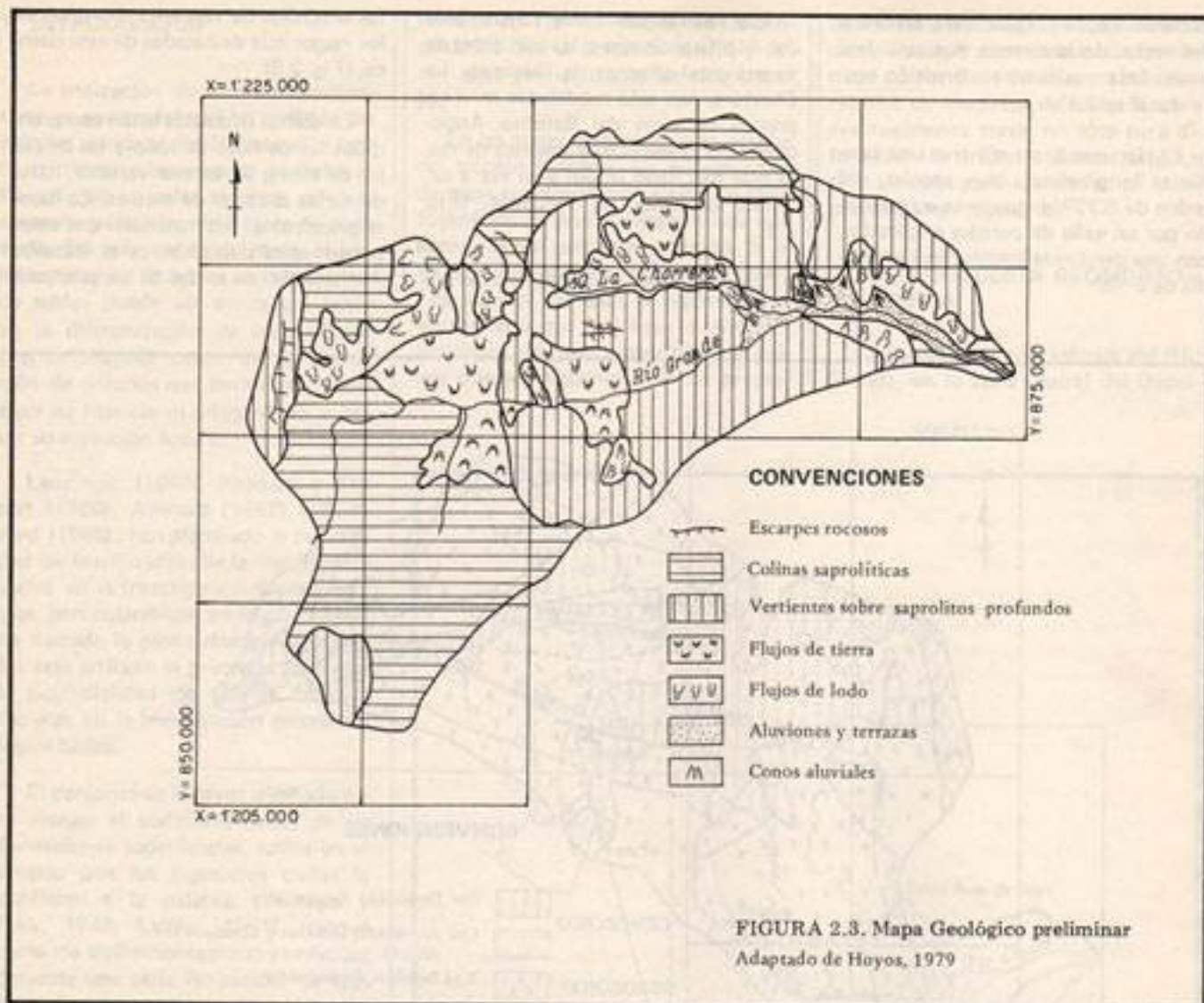


FIGURA 2.3. Mapa Geológico preliminar
Adaptado de Hoyos, 1979

no espacial. Localmente se encuentran aportes menores de otras unidades litológicas. La composición más corriente de estos depósitos consiste en una matriz de limo arenoso o arena limosa de color pardo amarillento a rojizo con bloques heterométricos y heteromórficos de cuarzdiorita y en raras ocasiones de esquistos, cuarcita o anfibolita. Los bloques presentan grados muy diversos de meteorización: siendo los

más corrientes los bloques frescos, no son raros los icnolitos (ghost blocks, bloques completamente meteorizados en los que se conserva claramente la textura original aunque no las propiedades físico-mecánicas de la roca).

Sobre la superficie de estos depósitos es común observar bloques hasta de varios metros cúbicos, a tal punto que llegan a ser un elemento diagnóstico

de ellos. Los flujos de lodo han sido separados de los flujos de tierra con base en dos criterios:

a) **La morfología exterior:** los flujos de lodo presentan topografías planas, con escasos bloques en superficie, y una inclinación hasta de 10° que no siempre coincide con la dirección de la pendiente general de la zona, a diferencia de los flujos de tierra que dan

TABLA 3.1.

CUENCA DEL CURSO INFERIOR DEL RIO GRANDE
PROPIEDADES FISICO MECANICAS Y CLASIFICACION DE LAS FORMACIONES SUPERFICIALES

Formación	Saprolita 1) Características		Saprolita de Metasedimentos 2)						Flujos de Tierra 2)					Flujos de Lodo 2)					Deslizamientos 2)			
	JC-I	JC-II	495	496 ^A	497	497 ^A		953	491	492	492 ^A	492 ^B	493	951	952	956	957	958	959	494	495	
Ángulo de Fricción Interna	Grados	0-30	27-33	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	18	-	12	-	-	-	-	14	
Cohesión	Kg/cm ²	0.5-1.5	0.5	-	-	0.60	-	-	-	-	-	-	-	0.64	-	1.38	-	-	-	-	0.50	
Contenido de Humedad	%	33.3	29.6	-	69.0	62.6	69.0	-	53.2	-	-	-	45.1	-	34.9	20.3	36.5	-	-	-	32.3	
Densidad Húmeda	g/cm ³	1.84	1.84	-	1.57	1.55	1.58	-	1.58	-	-	-	1.61	-	1.76	1.72	1.74	-	-	-	1.71	
Densidad Seca	g/cm ³	1.39	1.42	-	0.93	0.95	0.95	-	1.02	-	-	-	1.11	-	1.30	1.43	1.28	-	-	-	1.29	
Límite Líquido	%	31	37	53.1	34.8	57.5	61.2	-	52.0	51.9	51.0	53.8	51.8	55.4	37.5	39.7	42.1	46.9	48.5	35.0	44.4	28.5
Límite Plástico	%	28	28	44.7	44.8	50.2	51.8	-	33.8	38.2	39.0	44.4	42.8	37.3	34.1	33.4	28.0	34.0	39.9	25.9	31.8	25.7
Índice de Plasticidad	%	25	29	8.4	10.0	7.3	9.4	-	18.4	13.7	12.0	9.4	9.0	18.1	3.4	6.3	14.1	12.9	12.0	9.1	12.6	2.7
Peso Específico	g/cm ³	2.69	2.72	2.70	2.73	2.71	2.70	-	2.65	2.67	2.72	2.67	2.70	2.60	2.62	2.81	2.54	2.40	2.72	2.68	2.62	2.54
Clasificación		ML	MH	MH	MH	MH	MH	-	MH	MH	MH	MH	MH	MH	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML
Relación de Vacíos	%	0.95	0.90	-	1.97	1.99	1.90	-	1.60	-	-	-	1.43	-	1.02	0.97	1.03	-	-	-	-	1.03
Porosidad	%	0.49	0.47	-	0.66	0.66	0.66	-	0.62	-	-	-	0.59	-	0.50	0.49	0.51	-	-	-	-	0.51
Grado de Saturación	%	0.90	0.90	-	0.96	0.98	0.98	-	0.88	-	-	-	0.85	-	0.90	0.58	0.91	-	-	-	-	0.81
Resistencia a la Compresión Simple	Kg/cm ²	0.7-2.2	0.8-1.6	-	0.95	-	1.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Permeabilidad	cm/seg	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ a 10 ⁻⁶	1.9x10 ⁻⁷	3.2x10 ⁻⁷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6x10 ⁻⁶	-	-	-	-	-	-

1. Datos promedios tomados de Carrillo, 1973. Cada una de las series de datos corresponden a promedios de la referencia citada para las zonas 1, y II del perfil demeteorización descrito en el texto.
2. Resultados de análisis realizados en el Laboratorio de Control de Calidad de Materiales de las Empresas Públicas de Medellín. (Tomados de Hoyos, 1979).

lugar a una topografía rizada (boursouffure, hummocky topography) con una pendiente general del orden de 17° y abundantes bloques en superficie.

b) La litología, donde la diferencia radica en un menor contenido de bloques dentro de una matriz más limosa, densa y coherente, de color rojizo, normalmente, para los flujos de lodo; por el contrario, los flujos de tierra presentan un mayor contenido de bloques con predominio en la matriz de la fracción arena de color pardo amarillento o pardo oscuro, con mayor friabilidad.

En la clasificación unificada de Casagrande los flujos de lodo corresponden a limos de baja compresibilidad, ML, a diferencia de los flujos de tierra que están ubicados en los limos de alta compresibilidad, MH. Las características morfológicas y las propiedades físico-mecánicas de los depósitos de flujos de lodo y de flujos de tierra pueden explicarse por las diferencias en el contenido de agua del material original durante los procesos de transporte y sedimentación.

La forma regular de la superficie de los flujos de lodo y su pendiente moderada pueden corresponder a una masa semi-líquida, de material finogranular, procedente de la cubierta de regolito, con un contenido de agua superior a su límite líquido. Al suspenderse el aporte de agua y detenerse el movimiento tiene lugar un proceso de consolidación por expulsión de agua que origina las características de este depósito. Los flujos de tierra, por el contrario corresponden a un movimiento de tipo plástico, lo cual explica la morfología rizada y la menor densidad y coherencia del material emplazado.

3. LOS DATOS DE LA MECANICA DE SUELOS

El examen comparativo de las ca-

racterísticas físico-mecánicas del saprolito derivado del Batolito Antioqueño y de los metasedimentos (Tabla 3.1,

Figuras 3.1 y 3.2), permite lograr una primera aproximación al problema: los valores de cada una de las propiedades

TABLA 3.2

CUENCA DEL CURSO INFERIOR DEL RIO GRANDE

RESUMEN DEL ANALISIS DE VARIANZA DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LAS FORMACIONES SUPERFICIALES

PROPIEDAD	F ₍₁₎	α ₍₂₎
Peso específico	1.12	NS (3)
Densidad Seca	30.42	0.002
Relación de Vacíos	36.48	0.002
Densidad húmeda	73.80	0.002
Grado de saturación	0.92	NS (3)
Límite líquido	10.5	0.002
Límite plástico	7.74	0.01
Índice plástico	6.19	0.01

(1) Cociente de la varianza entre grupos y la varianza dentro de grupos

(2) Nivel de significación del resultado del análisis de varianza para una prueba bilateral

(3) NS: No significativo.

medidas, con excepción del peso específico y del grado de saturación, se agrupan en conjuntos homogéneos en estrecha correspondencia con las diferentes unidades geomorfológicas.

Un análisis de varianza (Miller y Khan, 1962; Krumbein y Graybill, 1965) de estos conjuntos, da resultados altamente significativos para todos ellos con excepción de los correspondientes a peso específico y grado de saturación (Tabla 3-2), lo cual es fácilmente explicable: no hay razón para encontrar variaciones entre el peso específico de los depósitos de vertiente y entre éstas y el saprolito del Batolito Antioqueño si su origen es común. Lo mismo ocurre con el grado de saturación. En este punto vale la pena anotar que el grado de saturación está determinado en gran medida tanto por factores climáticos y por las propiedades físicas de los horizontes más superficiales, como por eventuales discontinuidades internas, lo cual debe ser tenido en cuenta al manejar los datos de la mecánica de suelos.

4. LA INTERPRETACION GEOMORFOLOGICA DE LOS DATOS DE LA MECANICA DE SUELOS

Los datos presentados en el capítulo anterior se prestan para una triple utilización. Por una parte, al levantar el mapa geomorfológico, el tipo de depósito de vertiente encontrado es a veces difícil definir en el campo. En este caso, el empleo de los análisis de laboratorio pueden ayudar a definir la naturaleza de la unidad en cuestión, con base en la comparación de sus propiedades físico-mecánicas con las de unidades ya definidas y caracterizadas.

Por otra parte, y éste es lo más importante, las propiedades físico-mecánicas de las formaciones superficiales constituyen documentos que deben

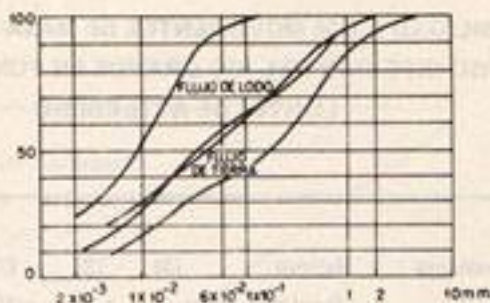


Fig. 3.1 a. Hoyos, 1979
Depósitos de Vertiente

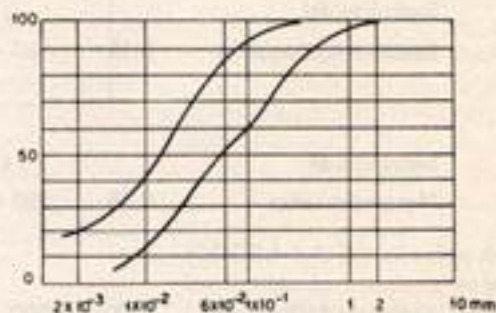


Fig. 3.1 b. Hoyos, 1979
SAPROLITO DE METASEDIMENTOS

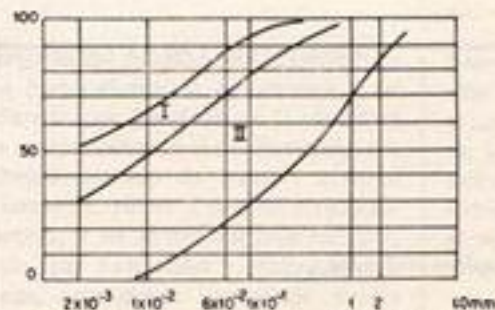


Fig. 3.1 c. Carrillo, 1973
Saprolito del Batolito Antioqueño

FIGURA. 3.1.— Gradaciones límites de las formaciones superficiales.

TABLA 4.1

SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE MASA EN LA CUENCA DEL
CURSO INFERIOR DEL RIO GRANDE EN FUNCION DE LOS
LIMITES DE ATTERBERG

FORMACION	Pendiente	Relieve local (m)	(3) n	(3) s	(3) w100	(3) Lw	(3) Lp	(3) W _n	(3) SMM
Saprolito del Batolito Antioqueño	0.15	(1) (2) 150 - 600	0.48	1.40	34.1	54	28.	31.	3
Saprolito de Metasedimentos	0.15	(1) (2) 150 - 300	0.65	0.96	68.1	56.4	45.1	63.4	1
Flujos de Tierra	0.30	600	0.59	1.11	53.2	51.8	42.8	45.1	2
Flujos de lodo	0.18	200	0.50	1.34	37.5	39.8	31.8	30.6	4

(1) En colinas saprolíticas

(2) En vertientes sobre saprolitos profundos

(3) n : porosidad

γ_s : Densidad seca

W100 : Contenido de humedad con saturación 100%

Lw : Límite líquido

Lp : Límite plástico

W_n : Contenido de humedad natural

SMM : Grado de susceptibilidad a los movimientos de masa (ordinal)

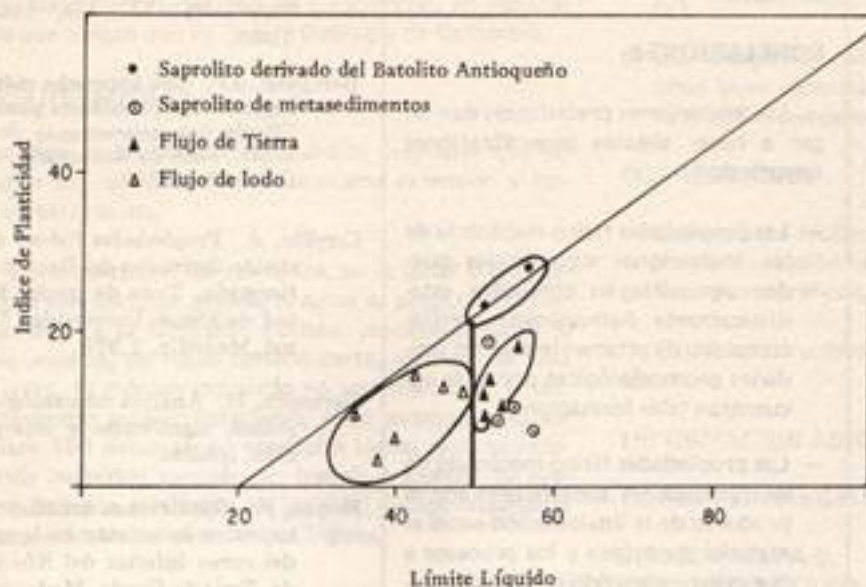


FIGURA 3.2. Distribución de los límites de Atterberg en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

interpretarse para inferir la historia morfogenética. Obviamente dicha interpretación de los datos de la mecánica de suelos debe tener en cuenta las bases geológicas y geomorfológicas del problema y complementarlas.

Finalmente, los datos anteriores permiten predecir el comportamiento de las formaciones superficiales ante los agentes internos y externos, aunque en forma apenas puramente indicativa en razón de las limitaciones ya anotadas de los métodos de laboratorio utilizados para determinarlos. En el presente caso, la evolución del sapolito

derivado del Batolito Antioqueño o de los metasedimentos no alcanza a ser aclarado por los datos de la mecánica de suelos, salvo en la confirmación del intenso proceso de erosión química (Hermelín, 1976) a que ha estado sometido, y en virtud del cual han perdido, por lixiviación y emigración de iones, un elevado porcentaje de sus componentes.

La porosidad del sapolito derivado del Batolito-Antioqueño se debe casi completamente a este proceso; en el caso de los metasedimentos, otro componente, la textura, aumenta considera-

blemente la porosidad. De la comparación entre los límites de Atterberg y la porosidad de ambas formaciones puede inferirse la mayor propensión del sapolito de metasedimentos a los movimientos de masa en comparación con el sapolito derivado del Batolito Antioqueño (Tablas 3.1 y 4.1).

El desencadenamiento de flujos de tierra tiene como efecto inmediato un aumento en la porosidad de las formaciones afectadas y, en esta medida, puede ser una etapa intermedia en la generación de flujos de lodo. El flujo plástico de grandes masas de suelo y roca

puede dar lugar a la topografía rizada característica de estos depósitos y explica satisfactoriamente el acarreo de los grandes bloques que se observan tanto en su interior como en su superficie.

Los flujos de lodo pueden haberse generado por una sobresaturación del saprolito original, o, lo que parece más lógico, a partir de depósitos originados en flujos de tierra. La ubicación frecuente de flujos de lodo más abajo de los flujos de tierra está a favor de esta hipótesis.

También debe considerarse la posibilidad de combinar una sobresaturación de la formación superficial con vibración de la masa producida por sismos, ya que la Cordillera Central no es precisamente una zona tectónicamente tranquila. El descenso tanto en la relación de vacíos como en la compresibilidad para los depósitos de flujo de lodo con respecto a los depósitos de flujo de tierra puede relacionarse con el mecanismo de emplazamiento propuesto:

- a) Aporte inicial de agua que pudo sobresaturar la formación superficial original.
- b) Puesta en movimiento de la masa semilíquida que constituye el flujo de lodo.
- c) Fin de desplazamiento del flujo de lodo por variación en las condiciones topográficas.
- d) Consolidación del depósito por expulsión de agua.

La estabilidad de los depósitos de tierra resulta menor que la de los producidos por flujos de lodo tanto por sus pendientes más empinadas como por la combinación más desfavorable de sus límites de Atterberg con respec-

to a su porosidad. De hecho, los depósitos de flujos de lodo han sido menos afectados por movimientos de masa que los correspondientes a los flujos de tierra.

CONCLUSIONES

Las anotaciones precedentes dan lugar a hacer algunas generalizaciones tentativas:

- Las propiedades físico-mecánicas de las formaciones superficiales pueden agruparse en conjuntos estadísticamente homogéneos correlacionables directamente con las unidades geomorfológicas donde se encuentran tales formaciones.
- Las propiedades físico-mecánicas de las formaciones superficiales son el producto de la interrelación entre el material de origen y los procesos a que estuvo sometido dicho material.
- Las técnicas corrientes de la mecánica de suelos pueden ser de utilidad en el análisis geomorfológico. Sin embargo las severas limitaciones que presentan hace que deban buscarse procedimientos que superen la simplicidad artificial de los métodos utilizados hasta ahora.

Los resultados de los ensayos de mecánica de suelos tal como están diseñados, pueden utilizarse sólo con carácter de indicadores.

REFERENCIAS CITADAS

Avenard, J.M. La Solifluxión, Travaux du Laboratoire de Géographie Physique du Centre de Géographie Appliquée de L'Université de Strasbourg, vol. 1, Strasbourg, 1960.

Avenard, J.M. y Tricart, J. Techniques de travail et idées de recherches: application de la mécanique des sols a L'etude des versants. Revue de Géomorphologie Dynamique. Strasbourg, 11, 1-3, 146-156, 1960.

Bompard, J.P. Une approche méthodologique des problèmes posés par l'étude des mouvements des versants. Tesis de doctorado, U. de Grenoble, 1968.

Carrillo, J. Propiedades físicas de los suelos derivados del Batolito Antioqueño, Tesis de grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional, Medellín, 1973.

Hermelin, M. Análisis mineralógico de suelos, significado e interpretación, inédito.

Hoyos, F. Condiciones actuales y potenciales de erosión en la cuenca del curso inferior del Río Grande, Tesis de Grado, Medellín, Facultad de Minas, Universidad Nacional, 1979.

Krumbein, W.C. y Graybill, F.A. An introduction to statistical models in geology New York, McGraw-Hill, 1965.

Lambe, T.W. Soil testing for Engineers. New York, John Wiley and Sons, 1951.

Leuzinger, V. Controversias geomorfológicas, No. 211, Río de Janeiro 1948.

Miller, R.L., y Kahn, J.S. Statistical analysis in geological sciences, New York, John Wiley and Sons, 1965.

Terzaghi, K. y Peck, R.B. Soil mechanics in engineering practice, New York, John Wiley and Sons, 1948

Thomas, M.F. Tropical Geomorphology, study of weathering and landform development in warm climates. London, Mac Millan, 331 p. 1974.