

(Ponencia presentada en el IV Seminario Nacional de Hidráulica, Medellín, febrero de 1980).

1. RESUMEN

La erosión y la sedimentación son fenómenos complejos que han afectado la corteza terrestre a todo lo largo de su historia. La suerte que han corrido muchos asentamientos humanos ha sido muchas veces consecuencia de ambos procesos: ocupación y explotación de fértiles llanuras aluviales, decadencia y desaparición de grandes cultivos a causa de la erosión y del consecuente empobrecimiento de los suelos, cegamientos de puertos y desaparición de estados organizados alrededor del comercio marítimo, son ejemplos válidos del papel que dichos fenómenos han jugado en la historia humana. En ellos intervienen como factores dominantes la litología, estructura, tectónica, relieve, clima y uso de la tierra y de las aguas. La combinación e interrelación de esos factores da como resultado diferentes tipos, grados y tasas de erosión y sedimentación correlativa. El comportamiento racional del hombre deberá estar condicionado por su conocimiento de tales procesos y de sus mecanismos, máxime en un país como Colombia donde los proyectos hidroeléctricos representan una contribución de primera categoría al desarrollo energético.

Las condiciones climáticas y geológicas del territorio colombiano, sometido a climas ecuatoriales influenciados en su mayoría por el relieve, producto a su vez de actividad tectónica reciente son muy peculiares. De ahí el peligro de querer aplicar aquí, sin el debido análisis, generalizaciones originadas en otras latitudes en cuanto al entendimiento de los procesos que ocurren en la superficie de la tierra. De ahí también la necesidad impostergable de estudiar sistemáticamente los procesos y mecanismos asociados tanto con la erosión como con la sedimentación en montañas tropicales. Los pasos tomados en ese sentido por algunas entidades nacionales constituyen un aporte muy valioso, tanto en el aspecto científico básico y aplicado como en el desarrollo de tecnologías apropiadas para las futuras necesidades del país.

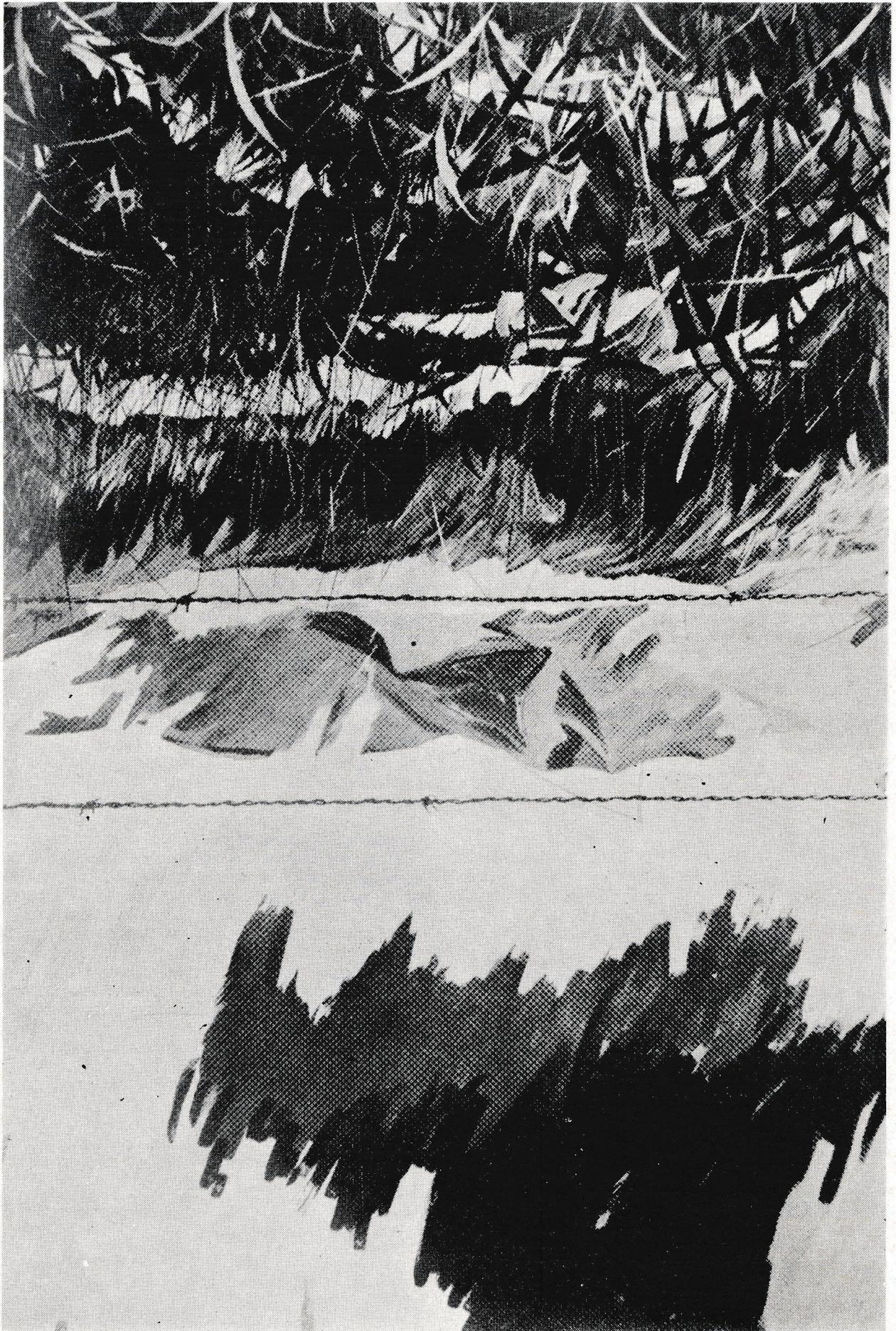
2. INTRODUCCION

Los siguientes planteamientos representan un punto de vista geológico acerca de los problemas de la erosión y sedimentación tal como ocurren en un país montañoso tropical como Colombia. Es una posición posiblemente diferente a la que comparten muchos ingenieros. No se trata sin embargo de un intento de polémica sino de reiterar el carácter complementario de los dos enfoques, entre los cuales es indispensable una completa síntesis.

La tesis central que se intenta presentar en este corto trabajo es que un país como Colombia presenta características muy peculiares, que deben ser tenidas en cuenta en la planeación, construcción y manejo de proyectos hidroeléctricos:

Particularidades de la erosión y de la sedimentación en Colombia

Michel Hermelin
Fabián Hoyos



- A. Climas distribuidos en función de alturas, con fuerte influencia de las montañas sobre la precipitación y la temperatura.
- B. Paleoclimas correspondientes a las variaciones del Cuaternario, que dejaron formas y depósitos que no se correlacionan con las condiciones actuales.
- C. Actividad tectónica reciente y activa en una gran proporción de nuestro territorio andino.

Las características mencionadas anteriormente y los procesos que generan deben ser estudiados cuidadosamente si no se quiere correr peligros innecesarios.

Es pertinente mencionar que la formación universitaria de nuestros geólogos y eventualmente de nuestros ingenieros puede no ser la más adecuada para ponerlos en condiciones de afrontar los aspectos peculiares de nuestro medio natural. En el caso de los geólogos, tanto los textos extranjeros utilizados como la orientación preferida por los profesores los inclinan muchas veces a menospreciar la importancia de la geomorfología, de la meteorización y de la geología del Cuaternario. En el caso del ingeniero, la búsqueda de un rigor matemático a veces injustificado en la interpretación del medio ambiente puede dificultar la evaluación de sus restricciones. De todas maneras, para ambos profesionales, la necesidad de un lenguaje común es fundamental.

¿Qué importancia presentan para el país procesos como la erosión y la sedimentación? Para mencionar sólo unos cuantos, deben ser tenidas en cuenta las siguientes actividades:

- a. Adecuación y recuperación de tierras cultivables o de terrenos para fines urbanos o industriales. Es inaceptable bajo cualquier punto de vista que en nuestro país, aún en fechas muy recientes, se hayan utilizado para construcciones industriales y urbanizaciones terrenos inundables localizados a orillas de ríos de reconocido régimen irregular.
- b. Recomendaciones o establecimiento de restricciones para el uso agrícola de tierras. La Federación Nacional de Cafeteros ha hecho estudios muy valiosos sobre la susceptibilidad de los suelos cafeteros a la erosión superficial, pero no se conoce la influencia del cambio en la tasa de evapotranspiración que supone el reemplazo de cafetales de sombrero por caturra sobre la estabilidad de las vertientes ante los movimientos de masa.
- c. Prospección y explotación de ciertos minerales. La búsqueda y obtención de oro aluvial en Colombia requieren el conocimiento de la meteorización, y luego del transporte y del depósito que caracterizan los ríos tropicales.
- d. Planeación y diseño de obras civiles. Decisiones acertadas acerca de la localización y características de obras civiles como un puente o una carretera sólo pueden tomarse después de haber medido tanto su factibilidad, a la luz de los procesos geológicos, como su impacto ambiental. Son desafortunadamente demasiado numerosos los casos de vías y otras obras localizadas en áreas propensas a fenómenos erosivos acelerados.

- e. Last but not least, la selección y manejo de cuencas fluviales para su aprovechamiento múltiple centrado en la producción hidroeléctrica, requiere tener muy en cuenta la importancia y tipo de los procesos de erosión y sedimentación. En este caso, las experiencias colombianas distan mucho de ser totalmente positivas. El nombre de Anchicayá evoca suficientes recuerdos.

Pero el panorama no es tan negativo como podría inferirse. Numerosos estudios importantes se han realizado y se llevan a cabo actualmente en el país por parte de entidades como la CVC, la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga y las Empresas Públicas de Medellín, para no citar sino a tres. Los autores no pretenden estar al tanto en este momento de todos esos estudios, muchos de ellos muy valiosos, pero que en su mayoría no han sido publicados. Se considerarán satisfechos si con este pequeño trabajo logran motivar a las personas encargadas de la investigación y del control de dos fenómenos geológicos de gran importancia para el futuro del país: la erosión y la sedimentación.

3. EL MARCO GEOLOGICO DE LA EROSION Y DE LA SEDIMENTACION

Antes de entrar a ubicar los procesos de la erosión y de la sedimentación dentro del contexto geológico, vale la pena echar un rápido vistazo sobre la evolución de la geología en los últimos 15 años. Gracias a una creciente sofisticación tecnológica, las ciencias de la tierra han realizado progresos impresionantes: microsondas electrónicas, perforaciones submarinas, viajes lunares, sensores remotos, etc. Una de las primeras consecuencias ha sido el nacimiento de la hipótesis de tectónica de placas, que ha producido cambios fundamentales en la interpretación geológica a nivel global. Por otra parte se ha desarrollado una inclinación a veces exagerada hacia la utilización de modelos matemáticos, particularmente en el campo de la geomorfología. Dicha inclinación, muy deseable en sí, no debe hacer perder de vista que un conocimiento previo y adecuado de los procesos del sistema estudiado es indispensable.

En cuanto al razonamiento geológico propiamente dicho, pueden notarse tendencias interesantes:

- La interpretación a menudo abusiva del principio de "uniformitarianismo" de Hutton (el presente es la clave del pasado) ha dado paulatinamente lugar a una posición más reflexiva: existieron procesos que no pueden volver a producirse, debido a cambios irreversibles en las condiciones del planeta.
- Han aparecido por otra parte conceptos nuevos: el de "umbral" por ejemplo, que fue descrito por primera vez en publicaciones europeas (Tricart, 1965), y fue retomado por Schumm (1977): repentinas modificaciones en un paisaje, en la capacidad erosiva de un río, etc., al llegar el aumento de los factores causantes a cierto límite, umbral, a partir del cual cambia drásticamente el tipo de procesos vigentes hasta entonces.

Los ambientes en los cuales se desarrollan los procesos de erosión y sedimentación pueden resumirse como sigue:

- Continental
- Costero
- Marino

La discusión siguiente se limitará al proceso de ellos, no sin mencionar antes que el conocimiento adquirido recientemente sobre los dos últimos ha permitido apreciar que los procesos correspondientes pueden ser de gran magnitud: corrientes de turbidez, corrientes laterales (Stow & Lovel, 1979).

Volviendo entonces al ambiente continental, no deberá perderse de vista que como fenómenos geomorfológicos, la erosión y la sedimentación estarán integradas dentro del conjunto de los fenómenos que afectan a la corteza terrestre. Estarán por lo tanto relacionados con factores tanto internos como externos:

- Factores internos: Litología
 - Estructura
 - Tectónica: { Relieve
Sismos
 - Volcanismo
- Factores externos: Clima: { Temperatura
Precipitación
- Organismos
- Acción humana

Dos factores, tectónica y clima, serán analizados más adelante con el detalle que justifica su importancia en Colombia. Para los otros, bastará con un corto comentario:

— Litología:

Se refiere a la composición química, mineralógica y textural de las rocas, que a su vez tiene influencia sobre su desagregación y descomposición por los procesos de meteorización.

— Estructura:

Se trata de la disposición de las unidades de roca en el espacio, sus orientaciones, sus plegamientos, sus fallas y fisuras.

— Tectónica:

Su primera consecuencia considerada es el levantamiento de grandes masas formando cordilleras, expuestas a los agentes erosivos. Pero la tectónica también se manifiesta a través de los movimientos sísmicos, cuyas consecuencias se discutirán más adelante, así como algunos fenómenos volcánicos.

— Clima:

La gran variedad de climas y de influencias paleoclimáticas observadas en Colombia también hacen necesaria una discusión más amplia.

— Organismos:

La abundancia de formaciones vegetales, relacionadas con los climas, da lugar a una compleja distribución de los factores de meteorización y de erosión. Se discutirán en conjunto con el análisis climático.

— Influencia Humana:

La influencia humana sobre el medio ambiente del territorio colombiano ha sido extremadamente fuerte (Hermelin, 1978): destrucción de la vegetación original de las vertientes, reemplazada muchas veces por cultivos inadecuados o por pastos; explotaciones mineras, etc. **Todo lo anterior ha desencadenado procesos acelerados de erosión, con consecuencias desastrosas para el país.**

Para terminar este capítulo, es deseable recordar la sucesión de eventos del mal llamado "ciclo erosivo":

- a) Meteorización: Física
Química
- b) Erosión: por escorrentía
por movimientos de masa
por hielo
por viento
- c) Transporte: agua
hielo
viento
- d) Depósito: de vertientes
fluviales
lacustres
marinos

En el próximo capítulo se analizará la importancia relativa de los diferentes tipos de eventos con especial referencia a las condiciones predominantes en Colombia.

4. LOS EFECTOS DEL CLIMA TROPICAL EN LAS MONTAÑAS

Colombia está situada en la cercanía del Ecuador. Sin embargo posee una verdadera colección de climas, debidos en primer lugar a la zonación vertical de las temperaturas y en segundo lugar al efecto pantalla de sus montañas, que impiden la libre circulación de las masas de aire cargadas de agua. A lo anterior hay que agregar la evapotranspiración, que devuelve agua a la atmósfera. El esquema de Holdridge (1963), adoptado al territorio colombiano por Espinal y Montenegro (1963) permite una visión general de la distribución de formaciones vegetales, a su vez muy relacionadas con la gran diversidad de climas de nuestro país. El cuadro siguiente permite apreciar su distribución.

A las consideraciones anteriores hay que agregar las consecuencias de los paleoclimas que afectaron nuestro territorio durante el Cuaternario. En la zona andina, los hielos permanentes, cuyo nivel inferior se encuentra a unos 4.800 m. sobre el nivel del mar, descendieron 1.000 metros como lo comprueban los depósitos glaciares producidos. Las zonas andinas localizadas a menor

FORMACIONES VEGETALES PRESENTADAS EN COLOMBIA
(Adaptado de Espinal y Montenegro, 1963)

<i>Formación vegetal</i>	<i>Temperatura Media (°C)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>	<i>Altura aprox. (m)</i>
Maleza desértica tropical	>24	125 - 250	<500
Monte espinoso tropical	>24	250 - 500	<500
Bosque muy seco tropical	>24	500 - 1.000	<500
Bosque seco tropical	>24	1.000 - 2.000	0 - 1.100
Bosque húmedo tropical	>24	1.000 - 2.000	0 - 1.000
Bosque muy húmedo tropical	>24	4.000 - 8.000	0 - 1.000
Bosque pluvial tropical	>24	>8.000	0 - 1.000
Monte espinoso subtropical	16 - 24	250 - 500	800 - 2.000
Bosque seco subtropical	<24	500 - 1.000	800 - 2.100
Bosque húmedo subtropical	17 - 24	1.000 - 2.000	900 - 2.100
Bosque muy húmedo subtropical	17 - 24	2.000 - 4.000	1.000 - 2.000
Bosque pluvial subtropical	17 - 24	4.000 - 8.000	1.000 - 2.000
Bosque seco montano bajo	12 - 18	500 - 1.000	2.000 - 3.000
Bosque húmedo montano bajo	TC* - 12	1.000 - 2.000	1.900 - 2.900
Bosque muy húmedo montano bajo	12 - 18	2.000 - 4.000	1.800 - 2.800
Bosque pluvial montano bajo	12 - 18	4.000 - 8.000	2.000 - 3.000
Bosque húmedo montano	6 - 12	500 - 1.000	3.000 - 4.000
Bosque muy húmedo montano	6 - 12	1.000 - 2.000	2.700 - 3.000
Bosque pluvial montano	6 - 12	2.000 - 4.000	3.000 - 4.000
Páramo pluvial subalpino	3 - 6	1.000 - 2.000	4.000 - 4.800**
Páramo subalpino	3 - 6	500 - 1.000	4.000 - 4.400?
Tundra pluvial alpina	0 - 3	500 - 1.000	4.400? - 4.800**
Nieves perpetuas	0	?	4.800**

TC* = Temperatura crítica o línea de escarcha.

** Esta altura corresponde en forma aproximada a la iniciación de las nieves permanentes.

altura sufrieron también descensos de temperatura y cambios menores de precipitación. Los trabajos de van der Hammen y de sus colaboradores basados en el uso de la palinología han permitido un conocimiento bastante completo de esos fenómenos (van der Hammen, 1978; Dueñas, 1978).

En la región del escudo amazónico, durante ese mismo período, existieron climas áridos, evidenciados por la presencia de dunas ahora recubiertas de vegetación. (Goosens, 1972) y por el tipo de sedimentos acumulados en la desembocadura del Amazonas. Todo lo anterior indica que un entendimiento cabal de la distribución de los fenómenos asociados a la erosión y a la sedimentación dista mucho de ser sencillo. Se han hecho varios intentos de sistematización de esos conocimientos a nivel general y local de la ocurrencia de los procesos geomorfológicos (Khobzi & Usselman, 1974; Hermelin, 1976; Lecarpentier et al, 1977) y de la meteorización química en particular (Hermelin, 1979). Con el fin de simplificar la discusión de las consecuencias de un ambiente tan complejo, se dividió el territorio colombiano en seis provincias morfogenéticas:

- hielos permanentes
- tundra andina
- páramos
- altiplanos
- vertientes
- tierras bajas

Para cada una de ellas se resumirán brevemente las ocurrencias de la meteorización y de la erosión.

4.1. *Hielos permanentes*

Parece existir una estabilización de su volumen en varias partes del país. En otros, como en la Sierra Nevada de Santa Marta, la tasa de disminución deducida a partir de fotografías aéreas tomadas en 1939 y en 1969 permite suponer que desaparecerán en menos de 50 años (Wood, 1970).

La meteorización de las rocas localizadas debajo del hielo puede ser alta, debido al proceso de hidrólisis y a la producción de grandes concentraciones de material disuelto en las aguas resultantes. La del hielo sobre las rocas subyacentes no parece ser importante. Sin embargo lo fue durante las épocas más frías del Cuaternario, como lo atestiguan los depósitos morrénicos. La importancia relativa de la meteorización física en el proceso de fracturación de las rocas queda por definir.

El área de las zonas glaciares de Colombia no es grande, pero su potencial como generadora de catástrofes como la que ocurrió el siglo pasado en la vertiente oriental del Nevado del Ruiz, demuestra la necesidad de estudiarlas detenidamente: en 1845 una enorme masa de hielo se desprendió del glaciar del Ruiz y precipitándose por el valle del río Lagunilla, arrastrando una gran cantidad de material disuelto, causó numerosas víctimas y daños considerables hasta desembocar en el río Magdalena. La velocidad fue tal que se

observaron trozos de hielo flotando en este último (Acosta, 1846, 1850). Sobre la causa inmediata de ese fenómeno se volverá más adelante.

4.2. *Desierto Andino*

Bajo ese nombre se designa una pequeña área localizada entre los hielos permanentes y el páramo, desprovista de suelos y de vegetación, donde afloran rocas frescas in situ, depósitos morrénicos, o depósitos piroclásticos, estos últimos en el vecindario de los volcanes. Su importancia es poca: puede suministrar en solución productos de meteorización química; la meteorización física tal vez tenga allí cierta eficiencia.

Aguaceros fuertes pueden producir un acarreo de materiales clásticos y lahares como en el descrito en el capítulo anterior, también encontrarán allí material acarreeable.

y Central a alturas que van de unos 2.000 a 2.700 metros.

Su vegetación primitiva fue boscosa; se caracterizan geológicamente por presentar espesos rellenos de sedimentos no consolidados (Sabana de Bogotá) depositados sobre rocas sedimentarias o también por rocas ígneas profundamente meteorizadas (Batolito Antioqueño).

En el último caso, existe un recubrimiento por capas de cenizas volcánicas, que en los sedimentos de la Sabana de Bogotá aparecen intercaladas dentro de las demás capas.

En los altiplanos y aun en pendientes con inclinación moderada, la presencia de las cenizas volcánicas desempeña un papel importante en la preservación del paisaje: al meteorizarse forman con la materia orgánica complejos arcillo-húmicos muy estables ante los agentes de erosión su-



4.3. *Páramos*

La mayoría de los páramos estuvieron afectados por los avances de los hielos durante las glaciaciones cuaternarias. En la actualidad están en su mayoría recubiertos de suelos orgánicos, a veces derivados de cenizas volcánicas. Están expuestos en la superficie a procesos edáficos de tipo podzólico que en profundidad se vuelven hidrolíticos. La erosión a la que están sometidos parece muy poca: ni la erosión ni los movimientos de masa parecen ser significativos. Muchas veces se encuentran allí restos glaciares procedentes de climas cuaternarios más fríos, que eventualmente podrían ser acarreados por ríos que los atraviesan.

4.4. *Altiplanos*

Son áreas relativamente planas o suavemente onduladas localizadas en las Cordilleras Oriental

perficial. Por otra parte, la gran permeabilidad causa un régimen de circulación de aguas que ha sido denominado hipodérmico, pues la presencia de arcillas densas, residuos de antiguos suelos, hace que ahí se detenga buena parte de la infiltración.

En cuanto a los movimientos de masa, muchos de los superficiales ocurren precisamente en el límite litológico mencionado anteriormente, a causa del cambio drástico en las propiedades físicas. En general, puede afirmarse que la mayoría de los movimientos de masa que ocurren en esas pendientes de suaves o moderadas son debidos al mal manejo de la tierra: obras civiles inadecuadamente diseñadas, sobrepastoreo, cultivos inadecuados, etc.

Los ríos, al atravesar los altiplanos, forman meandros en la mayoría de su recorrido y las llanuras inundables asociadas pueden ser de gran extensión. Fuera de la importancia que puede te-

ner la influencia humana ya mencionada, esta zona no debería contribuir significativamente a la producción de los sedimentos de las cuencas fluviales colombianas.

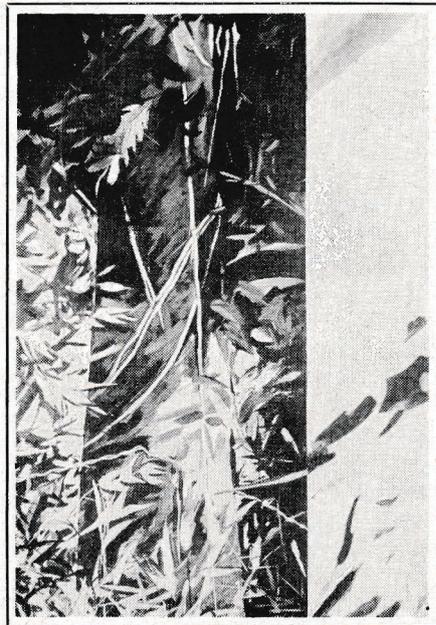
4.5. Vertientes Andinas

Aunque su denominación geográfica tradicional ha sido la de "vertientes boscosas", la deforestación intensiva iniciada a fines del siglo pasado ha afectado profundamente la configuración de esta zona. La tasa de la meteorización química es allí a menudo inferior a la de la erosión. La presencia de las cenizas volcánicas en las laderas ha sido corta en la inmensa mayoría de los casos. La erosión superficial ocurre no sólo en las áreas ocupadas ahora por cultivos limpios: también se da en áreas aún recubiertas de bosque original (i. e. vertiente chocoana de la Cordillera Occi-

pueden observarse laderas con muy poco regolito o aún consistentes en roca fresca.

No debe por otra parte perderse de vista que una vez que aflora esta última, el proceso de meteorización química tiende a volverse muy lento: la presencia de un suelo y una humedad permanente parecen ser indispensables para dicho proceso. La importancia relativa de los procesos de movimiento de masa en el trópico húmedo justificaría un tratamiento amplio del tema. Sin embargo el espacio disponible sólo permite considerar brevemente sus causas principales:

— Cambios de vegetación, que a su vez pueden ser causados por variaciones climáticas naturales; también muy a menudo los cambios son producidos directamente por el hombre: se ha mencionado ya el peligro potencial de reemplazar los cafetales tradicionales por cultivos de caturra. Por otra parte, en muchas de



dental). Efectivamente, debido a la alta temperatura promedio, hay muy poca asimilación de la materia orgánica procedente de las plantas por parte del suelo: debajo de la hojarasca aparece un perfil trunco, arcilloso en parte. La erosión se produce allí debajo de la hojarasca, en forma laminar (Pérez, C., comunicación verbal; Ruxton, 1971).

Además, esta zona es definitivamente la más expuesta a la erosión por movimientos de masa. Al respecto, merece observarse la relación que existe en el trópico húmedo entre la meteorización química y la erosión, principalmente la producida por movimientos de masa: en áreas planas o suavemente onduladas, la tasa de la meteorización será superior a la de la erosión, formándose una capa de regolito que puede llegar a tener hasta unos 100 metros de espesor (Feininger, 1971). En vertientes con inclinación pronunciada, aumenta la eficacia relativa de la erosión y

nuestras vertientes, la sustitución de los bosques originales por potreros ha creado un desequilibrio cuya magnitud puede apreciarse al considerar los numerosos deslizamientos que suelen ocurrir en áreas cubiertas de pastos después de lluvias prolongadas.

- Otra causa natural es la excavación que producen los ríos. Cabe señalar que la tasa de hundimiento de los lechos de las corrientes tropicales aún es motivo de muchas discusiones. La consecuencia normal de dicho hundimiento es la rectificación natural de la pendiente, produciéndose movimientos de masa.
- La importancia de los sismos en el desencadenamiento de múltiples movimientos de masa en áreas tropicales será discutida más adelante.
- También deben mencionarse los desequilibrios causados en forma directa por la actividad

humana: construcción de carreteras, urbanizaciones, etc.

En la gran mayoría de los casos, los movimientos de masa se inician en condiciones de humedad abundante, natural o artificial: cualquiera que sea el tipo de movimiento o el espesor del material afectado, la presencia de agua es casi siempre el común denominador.

4.6. *Tierras bajas*

Colombia posee prácticamente toda la gama de climas tropicales cálidos, desde las llanuras del Atrato con precipitaciones que alcanzan 10.000 mm al año hasta la zona semi-desértica de La Guajira, que recibe menos de 500 mm. En las áreas planas más húmedas, la erosión es prácticamente nula, limitándose a la excavación lateral en las orillas de los ríos. En las zonas más secas, el recubrimiento vegetal insuficiente da lugar a erosión superficial: de impacto, difusa y concentrada.

4.7. *Significado de la influencia climática*

Con base en las consideraciones anteriores, pueden sacarse las siguientes conclusiones:

- En un país montañoso tropical como Colombia, los climas constituyen un sistema complejo, con una disposición vertical en cuanto a la temperatura, con precipitaciones muchas veces influenciadas por el relieve.
- Cada una de las zonas climáticas tiene asociada una cierta formación vegetal, que a su vez presenta una susceptibilidad peculiar ante los fenómenos erosivos.
- A la anterior hay que agregar las herencias que han dejado los climas diferentes al actual que reinaron durante el Cuaternario.
- La influencia humana ha sido fuerte y sus efectos han contribuido generalmente a aumentar la erosión.
- El tipo predominante de erosión es el causado por movimientos de masa: parece ser mucho más importante que la erosión superficial. Los demás procesos no desempeñan papel significativo.

5. LOS EFECTOS DE LA TECTONICA Y DEL VOLCANISMO

5.1. *Montañas jóvenes*

El levantamiento relativamente reciente de las cordilleras colombianas tiene como efecto la existencia de grandes desniveles que le confieren al sistema erosivo su energía potencial. Evidencia del levantamiento rápido la presentan los altiplanos, que con rocas muy susceptibles a la erosión (sedimentos no consolidados, rocas profundamente meteorizadas) conservan superficies prácticamente intactas en las que a veces aún pueden apreciarse suelos tropicales profundos que se formaron probablemente cerca del nivel del mar (Llanos de Cuivá, Santa Rosa de Osos, Departamento de Antioquia).

El perfil longitudinal de los ríos que drenan las cordilleras es por lo tanto bastante pendiente y la producción correspondiente de sedimentos alta. No debe olvidarse que para una cuenca como la del Amazonas, el 90% de los sedimentos transportados provienen del 10% del área de la cuenca (Zona Andina) (Gibbs, 1967).

5.2. *Sismos*

Los terremotos suficientemente intensos pueden producir efectos erosivos bastante severos:

Deslizamientos: tanto en Nueva Guinea (Simonet, 1971) como en el Darién Panameño (Garwood et al, 1979) se ha podido observar cómo extensas áreas de bosques localizados sobre una topografía de colinas o montañas han sido afectadas por deslizamientos de tierra: buena parte de la cubierta meteorizada y de la vegetación son arrastradas pendiente abajo.

En zonas cercanas al epicentro, hasta el 30% de la superficie ha sido removida. La cantidad de sedimentos producida por ese proceso puede ser enorme, y su efecto sobre un embalse situado río abajo es fácil de imaginar. El efecto anterior, aunque en menor escala, fue observado en Colombia en el área de Bahía Solano, con motivo de un terremoto ocurrido en 1971.

Otro fenómeno relacionado con sismos es el de licuefacción, que puede afectar formaciones geológicas no consolidadas: fue observada en varias áreas localizadas cerca del epicentro del terremoto de Tumaco de diciembre de 1979.

También deben mencionarse los flujos de lodo que se originan al desprenderse por efecto de terremotos enormes masas de hielo de los casquetes glaciares de las más altas montañas tropicales. Un fenómeno de ese tipo ocurrió en el Perú (Huaraz) durante la pasada década, creándose súbitamente una enorme creciente originada en las lagunas altas, que le costó la vida a decenas de miles de personas. No se sabe si un fenómeno similar ocurrido a partir del Nevado del Ruiz a mediados del siglo pasado fue causado por sismo o por actividad volcánica.

5.3. *Volcanismo*

Una erupción volcánica puede significar grandes modificaciones en la superficie de la zona afectada: fuera de los flujos de lava o de "nubes ardientes", que destruyen o recubren lo que encuentren a su paso, deben tenerse en cuenta los efectos producidos por las erupciones de fragmentos volcánicos cuyo tamaño puede ser desde microscópico hasta llegar a varios metros de diámetro. Al recubrir extensiones que en el caso de los materiales finos son muy grandes, crean unas condiciones muy propicias para la erosión: material suelto expuesto a la intemperie en lugar de suelo y vegetación, el cual por efecto de las abundantes lluvias que suelen acompañar las erupciones volcánicas es arrastrado rápidamente hacia las corrientes, formándose a menudo lahares, enormes flujos de lodo con consecuencias generalmente desastrosas.

Cuando a cierta distancia de las fuentes volcánicas el material depositado llega a formar un suelo (i. e. colinas alrededor de la Sabana de Bogotá, Oriente Antioqueño), la naturaleza de las arcillas formadas y su combinación con los complejos orgánicos resultan en un material con una estabilidad bastante alta ante los fenómenos erosivos superficiales. Por otra parte, la diferencia de permeabilidad resultante que ocurre en el límite inferior de la capa de ceniza causa una circulación de aguas infiltradas de tipo "hipodérmico". Dicho límite es también el asiento de movimientos de masa superficiales, que ocurren en caso de mal manejo de las tierras.

6. ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LOS RÍOS TROPICALES

Para algunos autores (Ruxton, 1967; Thomas, 1974), las diferencias entre los distintos sistemas morfogenéticos (i. e. responsables de la elaboración del paisaje) son mínimas en las cadenas de montañas recientes. Sin embargo, existen características peculiares de los ríos del trópico que vale la pena comentar.

- El régimen hídrico de los ríos tropicales no tiene equivalente en los climas templados, en los cuales el caudal está relacionado en gran parte con los fenómenos de hielo-deshielo. Las variaciones estacionarias son aparentemente menos drásticas en las montañas del trópico húmedo.
- Los textos más conocidos (i. e. Tricart, 1974) analizan detalladamente el comportamiento de los ríos tropicales en áreas planas, generalmente localizadas sobre escudos: la falta de material aluvial grueso inhibe la erosión ascendente, y aparecen cascadas y raudales en las áreas donde el río atraviesa rocas más resistentes a la abrasión. En las regiones montañosas del trópico húmedo, la situación es bastante diferente, ya que los movimientos de masa comunes en las pendientes suministran un material detrítico mucho más heterométrico (Campuzano & Caballero, 1976).
- La importancia de la meteorización química conlleva una disolución considerable de las rocas, particularmente por el fenómeno de hidrólisis: la cantidad de iones disueltos en las aguas fluviales es pues bastante alta.

Con el fin de ilustrar muy esquemáticamente esta corta discusión, pueden describirse algunos rasgos de dos ríos colombianos: el Atrato y el Sinú.

El río Atrato nace en las pendientes abruptas de la Cordillera Occidental y recibe, además de los procedentes de esta última, aportes de sus tributarios nacidos en la Cordillera del Baudó y de las colinas del Darién. Como se ha mencionado antes, sus sedimentos se originan tanto por movimientos de masa como por la erosión superficial que ocurre debajo de la hojarasca. La tasa de relleno de la cuenca del Atrato parece muy alta: el examen de su curso aguas abajo de Quibdó, muestra una llanura aluvial extensa, donde el río, bordeado por sus diques naturales forma unos

meandros de gran tamaño. A lado y lado, enormes ciénagas sirven de regulador del caudal a la vez que son colmadas por sedimentos procedentes tanto de los afluentes del Atrato como del río mismo en época de creciente: en fotos aéreas de la Ciénaga de Unguía, por ejemplo, pueden apreciarse los dos deltas que corresponden a las dos fuentes de sedimentos ya mencionadas. Por otra parte, el delta del río es muy extenso; la comparación de mapas levantados hace aproximadamente un siglo cuando se iniciaron los estudios de posibles vías para el canal interoceánico con fotos aéreas recientes permiten apreciar el crecimiento de dicho delta, cuyos brazos, al crecer en dirección oriental, terminarán aislando la parte sur del golfo de Urabá (Bahía Colombia): éste parece ser el origen de las ciénagas localizadas a lado y lado del río. Esta cuenca, por muchas de sus particularidades, merecería una serie de estudios más detallados que permitirían sin duda obtener informaciones valiosas acerca de los ríos de zonas muy húmedas.

El río Sinú nace en un área de alta pluviosidad (bosque pluvial-premontano, de 4.000 a 8.000 mm de precipitación anual) y atraviesa áreas cada vez más secas hasta llegar, hacia la mitad de su curso, a la zona de bosque seco tropical (1.000 a 2.000 mm de precipitación).

El origen de las numerosas ciénagas localizadas en la parte media e inferior del curso del Sinú aún no se ha estudiado: sin embargo su papel de regulador del curso del río ha disminuido bastante debido a la deforestación intensa realizada en gran parte de la cuenca; el río Sinú era, a principios del siglo, navegable en buena parte de su recorrido. La intensificación del desmonte de la cuenca, iniciado a fines del siglo pasado, ha traído como consecuencia la transformación del río, en épocas de estío, en una serie de charcos totalmente aislados por enormes bancos de arena. Otra consecuencia ha sido el crecimiento de un delta en la desembocadura, debido a la enorme cantidad de materiales que acarrea el río.

La construcción de una hidroeléctrica en la zona de Urrá obliga a unos estudios que en la actualidad se están realizando y que ojalá redunden en un mejor manejo de las tierras de la cuenca.

7. CONCLUSIONES

Los autores esperan haber revisado, aunque en forma muy general, las características peculiares que para los fenómenos de erosión predominan en un país como Colombia, localizado en buena parte en montañas tropicales. Si bien es cierto que varias entidades colombianas han realizado estudios sobre la ocurrencia de dichos procesos, mucho queda por hacer.

En primer lugar, el estudio de una cuenca fluvial para llevar a cabo su manejo integrado: de ninguna manera puede limitarse al área del vaso de una represa, si no se quiere correr riesgos innecesarios.

En segundo lugar, es importante estudiar detalladamente los diferentes tipos de movimientos

de masa y sus ocurrencias en función de su entorno natural. Los costos que representan anualmente para el país estos fenómenos justifican ampliamente esta investigación.

En tercer lugar, el establecimiento de una red sísmica densa es totalmente necesaria para que el país cuente con un conocimiento un poco más refinado de las áreas más propensas a terremotos.

Finalmente, el estudio de los casquetes glaciares y la observación sistemática de los volcanes actualmente inactivos permitirán garantizar la seguridad de amplias regiones localizadas en su vecindario.

El mejor lugar para estudiar la tasa de producción de los sedimentos es el vaso de las represas artificiales. El país no debe dejar escapar la excelente oportunidad que tiene de iniciar dicho estudio con el fin de obtener informaciones que son completamente indispensables para proseguir inteligentemente el programa propuesto de generación hidroeléctrica.

8. BIBLIOGRAFIA

- ACOSTA, J., 1846. "Relation de l'éruption boueuse sortie du Volcan Ruiz et de la catastrophe de Lagunilla dans la République de la Nouvelle Grenade". *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, París, T. 2, pp. 709-710.
- ACOSTA, J., 1850. Sur les montagnes de Ruiz et de Tolima (Nouvelle Grenade) et les éruptions boueuses de la Magdalena (Dos cartas a Elie de Beaumont) *Bulletin de la Société Géologique de France*, París, pp. 489-496.
- CAMPUZANO, J. & CABALLERO, H., 1976. Ríos trezados en Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (Medellín, Universidad Nacional) N° 1, pp. 99-125.
- CRICKMAY, C. H., 1974. *The work of the river*. London: The McMillan Press Ltd., 271 p.
- DUEÑAS, H., 1978. Registro Palinológico de los tres últimos períodos glaciales en la Sabana de Bogotá, Cordillera Oriental, Andes Colombianos, *Resúmenes, II Congreso Colombiano de Geología*, p. 49.
- FEININGER, T., 1971. Chemical weathering and glacial erosion of crystalline rocks and the origin of till, in "Geological Survey Research", 1971, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 750 C, C. 65 - C 81.
- GARWOOD, N. C., JANOS, D. P. & BROKAW, N° 1979. Earthquakes - caused landslides: a major disturbance to Tropical forests. *Science*, v. 205, N° 4410, pp. 997-999.
- GIBBS, R., 1967. The Geochemistry of the Amazon River System: Part I: the factors that control salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 78, pp. 1203-1232.
- GOOSENS, D., 1972. *Physiography and soils of the Llanos Orientales, Colombia*. Enschede, Holanda: Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC). 198 p.
- HERMELIN, M., 1976. Bases para el Estudio Geomorfológico de Antioquia, Medellín: *Boletín de Ciencias de la Tierra* (Universidad Nacional) N° 1, pp. 49-76.
- HERMELIN, M., 1978. La Geología Ambiental: una necesidad para Colombia. *Ponencia para el II Congreso Ibero-Americano del Medio Ambiente* - Bogotá: INGEOMINAS, 16 p.
- HERMELIN, M., 1979. Classification of silicates based their susceptibility to weathering in the humid tropics. Abstract - International Seminar on Lateritisation Processes IGCP Project 120) Trivandrum, India.
- KHOBZI, J. & USSELMANN, P., 1974. Problèmes de Géomorphologie en Colombie. *Rep. Géog. Phys & Géol. Dyn.*, V. 15, N° 1-2, pp. 193-206.
- LECARPENTIER, C., KHOBZI, J., PEREZ, P. A. & OSTER, R., 1977. La erosión de tierras en Colombia, con mapa de procesos dinámicos. Bogotá, INDERENA, 56 p.
- RUXTON, B. P., 1971. Slopewash under nature primary rainforest in Northern Papua in: J. N. Jennings & J. A. Mabbutt, Editors: *Landform Studies from Australia and New Guinea*. Canberra: Australian National University Press, pp. 85-94.
- SCHUMM, S. A., 1977. *The fluvial System*. New York: John Wiley and Sons, 338 p.
- SIMONETT, D. S., 1971. Landslide distribution and Earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains, New Guinea, statistical Analysis, pp. 64-84. in J. N. Jennings & J. A. Mabbutt, Editors: *Landform Studies from Australia and New Guinea*. Canberra: Australian National University Press, 434 p.
- STOW, D. A. V. & LOVEL, J. P. B., 1979. Contourites: their recognition in modern and ancient sediments. *Earth Science Review*. v. 14, N° 3, p. 251.
- THOMAS, M. F., 1974. *Tropical Geomorphology: a study of weathering and landform development in the warm climates*. London: MacMillan, 332 p.
- TRICART, J. & CAILLEUX, A., 1965. *Traité de Géomorphologie*, Tome 1: Introduction a la Géomorphologie Climatologique, París, Sedes, 306 p.
- TRICART, J. 1974. *Le modelé des régions chaudes, forêts et savanes*. París, Sedes, 345 p.
- VAN DER HAMMEN, T. 1978. Stratigraphy and environments of the upper Quaternary of the El Abra corridor and rock shelters (Colombia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology & Palaeoecology*, v. 25, pp. 111-162.
- WOOD, V. A., 1970. Recent glacier fluctuations in the Sierra Nevada de Santa Marta. Colombia. *Geol. Rev.*, v. 60, pp. 374-392.