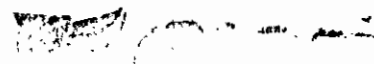




**CONGRESO LATINOAMERICANO DE CIENCIA
DO SOLO. SOLO SUELO-96**

SP-BRASIL, Agosto 4-8 de 1996



REPUBLICA DE COLOMBIA Y
SECRETARÍA

DEGRADACION DE TIERRAS EN REGIONES HUMEDAS ¹. E. Amézquita², C.J. Escobar³; ¹ Congreso Latinoamericano de Ciencia do Sôlo. Solo Suelo-96. SP, Brasil, Agosto 4-8 de 1996; ²CIAT, Programa Trópico Bajo, A.A. 6713, Cali, Colombia, E-mail: E.Amezquita@cgnet.com; ³ CORPOICA, Centro de Investigaciones de Macagual, A.A. 337, Florencia, Caquetá, Colombia.

Palabras llave: Deforestación, Compactación, Erosión, Infiltración

RESUMEN

En el presente trabajo se discuten, con base en resultados experimentales obtenidos en el Centro de Investigaciones, Macagual (Caquetá, Colombia, Región Amazónica), los principales procesos degradativos que se presentan en los suelos de las Regiones Húmedas Tropicales, cuando el bosque natural es intervenido por el hombre y las tierras sometidas a uso, utilizando tecnologías modernas. Los resultados muestran que los procesos degradativos dominantes son la erosión y la compactación, los cuales se aceleran notablemente por el uso y manejo de los suelos, causando cambios negativos en las propiedades físicas que tienen que ver con los factores de crecimiento de las plantas. Este comportamiento previene sobre el tipo de uso que se debe dar a esas tierras y sobre la necesidad de desarrollar tecnologías aptas para el manejo de suelos frágiles de fácil degradación para asegurar su sostenibilidad futura.

SUMMARY

This paper present and discuss the main degradative processes and their associated physical characteristics occurring in humid tropical areas, when the forest is subjected to human intervention, taking as an example, the results of research obtained in Macagual (Amazonia, Caquetá, Colombia). The dominant degradative processes are: erosion and compaction, both of them causing negative changes in the soil physical factors that regulate plant growth. Results call the attention on the need to develop technologies for sustainability of the properties of this soils, so that agricultural sustainability can be reached.

1. Introducción

La degradación de los recursos suelo y agua y la polución ambiental, se perciben como los mayores problemas para el uso de las tierras en el trópico (Lal, 1994). Vastas áreas de tierra han sido degradadas, algunas en forma irreversible, por un amplio rango de procesos degradativos: erosión acelerada, desertificación, compactación, endurecimiento de los suelos, acidificación, disminución en el contenido de materia orgánica y en la biodiversidad y caída de la fertilidad del suelo. Se estima que en el trópico se han degradado 915 millones de hectáreas por erosión hídrica, 474 millones de hectáreas por erosión eólica, 50 millones por degradación física y 213 millones por degradación química. Estas cifras muestran la magnitud del problema que se debe enfrentar para la rehabilitación de áreas rehabilitables y previenen sobre la necesidad del desarrollo de prácticas agrícolas no degradativas, para un desarrollo sostenible Amazónico (Toledo, 1994).

Aproximadamente las tres cuartas partes (482 millones de hectáreas) de las 673 millones de hectáreas que conforman las tierras del bosque lluvioso tropical y del bosque tropical estacional en América Tropical están localizados en la cuenca Amazónica (Sánchez, 1987; Cochrane y Sánchez, 1982) y son susceptibles a degradación si previamente no se tiene el conocimiento suficiente para evitarlo.

La principal causa asociada con la degradación de tierras en Latinoamérica es la deforestación para 1985, la velocidad de deforestación anual del trópico húmedo en América Latina era de 2.5-2.8 millones de hectáreas por año (Melillo et al., 1985), en la Amazonia de 1.2 millones de hectáreas por año, y estaba asociada con agricultura de subsistencia y establecimiento de pastos y ganadería (Hecht, 1982). Ultimamente ha disminuído gracias a la falta de los incentivos que en décadas pasadas tenían quienes deforestaban (Fujisaka et al., 1996).

Dentro de la cuenca amazónica, se han identificado tres subregiones climáticas: Bosque lluvioso tropical (171 millones de hectáreas) y más de 9 meses de estación lluviosa, Bosque estacional semi-siempre verde (274 millones de hectáreas) y 8-9 meses de estación lluviosa, Sabanas (37 millones de hectáreas) y 6-8 meses de estación lluviosa. Esta división no incluye los llanos de Colombia ni de Venezuela, ni los cerrados de Brasil (Cochrane & Sánchez, 1982). De las 482 millones de hectáreas el 23% lo constituyen tierras mal drenadas y el 77% tierras calificadas como bien drenadas por presentar diferentes grados de pendientes. Dentro de éstas el 50% del área lo constituyen tierras con pendientes entre 0-8%, 21% tierras con pendientes entre 8 y 30% y 6% con pendientes superiores al 30%. La alta frecuencia de las precipitaciones, asociada a la inestabilidad del suelo, hace que aún a bajas pendientes (0-8%) se presenten problemas de erosión hídrica.

Dentro del área Amazónica Cochrane y Sánchez (1982) estimaron que existen 220 millones de hectáreas de oxisoles y 141 millones de ultisoles. Los oxisoles ocurren en tierras altas y son bien drenados. Los ultisoles en tierras altas y en tierras mal drenadas. Ambos grupos de suelos, son muy susceptibles a degradación por uso inapropiado de tierras y de maquinaria agrícola.

El principal desafío que actualmente demanda la atención de los especialistas en suelos a nivel mundial y tropical y de otros especialistas en ciencias biológicas, es el de cómo asegurar la sostenibilidad agropecuaria en áreas que son intervenidas por el hombre, debido a la incapacidad de éste para mantener el equilibrio entre las resistencias del suelo y las fuerzas degradativas actuantes una vez se tala el bosque. Bajo condiciones naturales tanto la vegetación como las características del suelo se mantenían en equilibrio dinámico con las condiciones climáticas, intervenido el bosque se pierde ese equilibrio y los suelos quedan sujetos a degradación.

En el presente artículo se analizan los principales procesos degradativos que se han observado en suelos de la Amazonia Colombiana (piedemonte del Caquetá), lugar donde los autores han estado realizando investigaciones relacionadas con el tema. El Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC(1993), ha adelantado estudios sobre el comportamiento del clima y de los

suelos en la región Amazónica Colombiana con fines de ordenamiento territorial. Smyth y Cassel (1995), presentan un buen resumen de las investigaciones realizadas en Yurimaguas sobre el comportamiento de suelos de trópico húmedo como respuesta a las acciones de manejo. Tanaka y Sakuma (1984) presentan los resultados obtenidos en su estudio sobre la condición agroecológica de oxisoles y ultisoles de la Amazonia.

2. Degradación y procesos degradativos

La degradación es la reducción o pérdida de una o más características productivas de suelo causadas por intervención humana (Amézquita, 1994). Riquier (1982), la define como el proceso reductor de la capacidad de producción actual o potencial del suelo. Para la FAO (1983) es el proceso complejo que ocasiona la caída de la capacidad productiva del suelo. Lal y Stewart (1990) distinguen tres tipos de degradación del suelo: física, química y biológica, y afirman que ella es inducida por factores y procesos tales como: uso inapropiado de la tierra, deforestación y simplificación de ecosistemas.

En los agroecosistemas de trópico húmedo, es muy difícil o casi imposible el desarrollo de actividades agropecuarias de tipomoderno sin causar deterioro en los suelos, debido a la fragilidad del ecosistema y a las limitaciones en las propiedades físicas y de fertilidad de éstos. Actualmente y de forma casi generalizada, se pudiera afirmar que dentro del trópico húmedo está ocurriendo la siguiente secuencia que conlleva a empobrecimiento: colonización → deforestación → degradación → pobreza (social y ambiental).

Con el fin de ilustrar los conceptos de productividad, sostenibilidad, mejoramiento e insostenibilidad agropecuaria, se ha elaborado la Figura 1, la cual se explica a continuación: la productividad natural del suelo es usualmente baja, pero es susceptible de mejorarse por labranza, aplicación de enmiendas y fertilización hasta alcanzar un tope máximo de producción, el cual generalmente no puede mantenerse (sostenerse) a través del tiempo (abcisas), por producirse cambios negativos en las propiedades del suelo (degradación) que conducen a insostenibilidad.

Los suelos difieren enormemente en su susceptibilidad a mejoramiento o degradación. En algunos suelos como en el caso del (a), es posible subir rápidamente los niveles de productividad, pero también aceleradamente disminuye su capacidad productiva; en otros, como en el (b) la sostenibilidad dura por más tiempo, pero posteriormente se llega a insostenibilidad; en otros, como en el suelo (c) se alcanza el mejoramiento a través del tiempo, permaneciendo esa sostenibilidad por largo tiempo si se maneja adecuadamente el suelo. La clave de "manejo adecuado" en los tres casos hipotetizados, radica en la comprensión y detección de las propiedades más sensibles a las acciones de uso y en el desarrollo de prácticas para controlarlas.

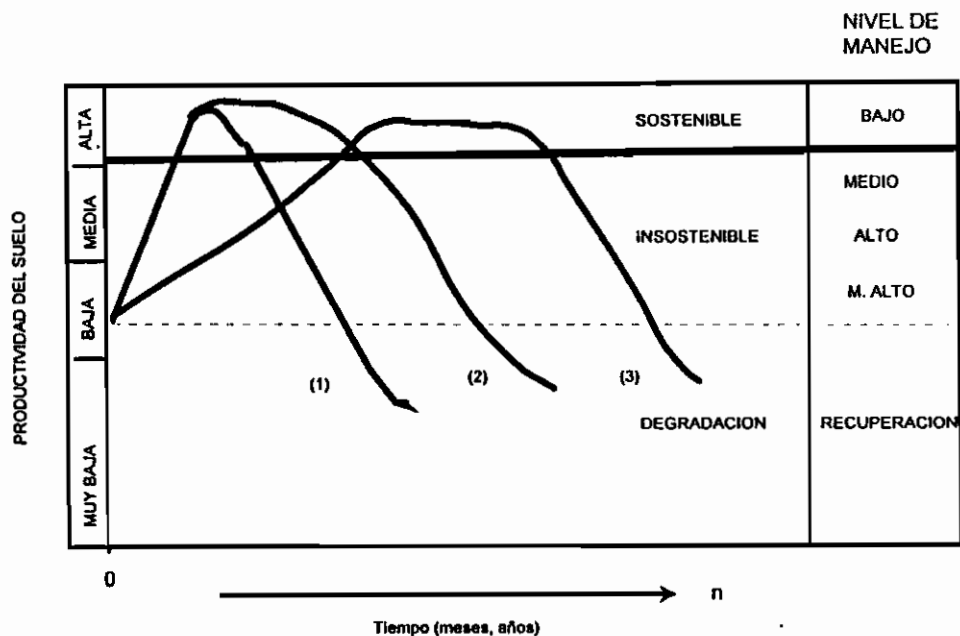


Fig. 1. Representación hipotética de la productividad, sostenibilidad y del nivel de manejo de suelos.

Para cada nivel de productividad y de insostenibilidad hay un nivel de manejo de suelos (parte derecha de la gráfica). Entre mayor sea la capacidad productiva del suelo por mejoramiento, el nivel de manejo es menor, pero a medida que se tiende hacia insostenibilidad el costo y los requerimientos de manejo son mayores y muchísimo mayores, si es necesario rehabilitarlos.

Lal (1994, Figura 2) presenta los principales procesos degradativos de las tierras en el Trópico, junto con las propiedades que más afectan los procesos, las cuales sugiere que se usen como indicadores de éstos. Sin embargo, el principal factor de degradación de los suelos en las regiones tropicales húmedas, es la deforestación, la cual causa la erosión de la biodiversidad vegetal y animal y la erosión de los suelos. El IGAC (1993), hace una buena revisión de los procesos degradativos que ocurren en parte de la Amazonia Colombiana.

2.1. Deforestación

La deforestación del bosque húmedo tropical trae como consecuencia la pérdida de grandes cantidades de materia orgánica. Sánchez (1976), informa que la biomasa total de un bosque tropical varía entre 100 y 400 toneladas por hectárea de materia seca que se fracciona aproximadamente de la siguiente manera: 75% de biomasa procedente de troncos y ramas, 15 a 20% de raíces, 4 a 6% de hojas y 1 a 2% de mantillo (litter). Toda esta biomasa es susceptible de descomposición, de almacenamiento en la parte superior del suelo y de pérdidas por agentes erosivos. Desafortunadamente la investigación ha demostrado que las pérdidas predominan sobre la acumulación.

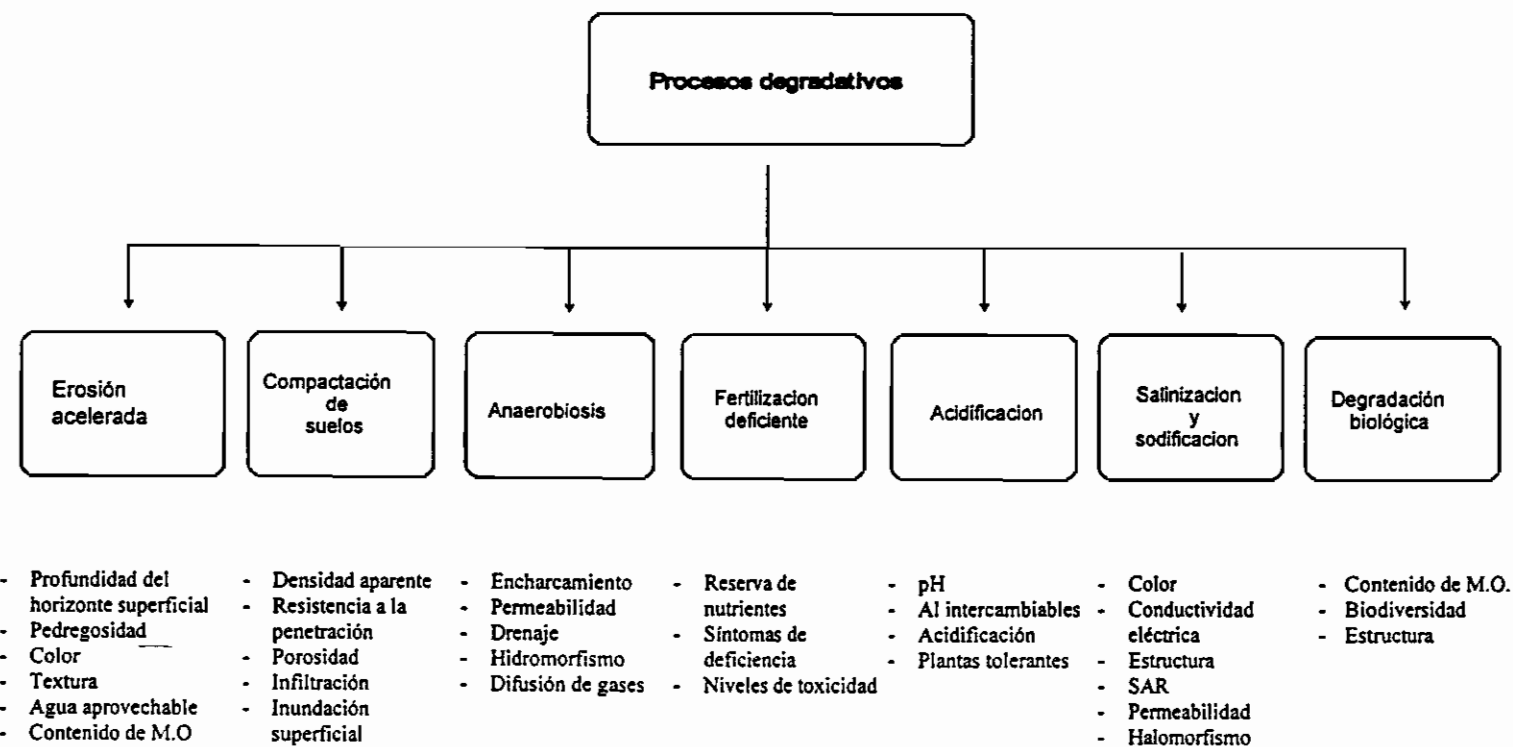


Fig. 2. Procesos degradativos de suelos y características asociadas.

Dos factores propician o favorecen la erosión después de la deforestación:

- La pérdida de la cobertura vegetal que permite que la totalidad de la precipitación llegue al suelo, superando la capacidad máxima de infiltración que tenía el suelo bajo bosque natural, lo cual incrementa notablemente el volumen de escorrentía bajo el nuevo uso.
- La energía cinética actuante, ya no es amortizada o anulada por la vegetación e impacta directamente la superficie del suelo.

El problema se agrava cuando después de la deforestación se hace labranza. La labranza convencional genera tres problemas fundamentales: a) corta la continuidad del espacio poroso drenable (macroporos) que existían antes de la deforestación; b) expone el suelo y en muchas ocasiones el subsuelo a la acción agresiva de las lluvias y, c) la intensidad de preparación hace vulnerable al suelo a disminución en su estabilidad estructural porque propicia la pérdida de materia orgánica al fraccionarla por la acción de las rastras de discos y aumentar su superficie específica, lo cual proporciona un mayor ataque de organismos descomponedores. La intensidad con que ocurren los problemas mencionados anteriormente, hace al suelo más o menos susceptible a la degradación.

En el ámbito de la investigación sobre la influencia de la materia orgánica en la disminución de la capacidad productiva de los suelos tropicales del trópico húmedo, se ha dado mucho énfasis a la parte química, determinando no la materia orgánica húmica real del suelo, sino determinando el carbono orgánico y luego convirtiendo éste a materia orgánica al multiplicar por un factor. Realmente en el suelo donde existen tantos compuestos químicos orgánicos, es difícil que el uso de un factor promedio satisfaga la necesidad de conocimiento. También se han hecho determinaciones de las fracciones activas (ácidos húmicos, fúlvicos y otras sustancias), con el ánimo de determinar cuál o cuáles son más determinantes de la fertilidad del suelo; este camino posiblemente va a conducir a nuevos hallazgos sobre el comportamiento químico de la materia orgánica.

El IGAC (1993), ha hecho interesantes estudios sobre la naturaleza y composición del humus, evolución de la materia orgánica bajo diferentes tipos de cobertura vegetal, distribución y actividad de los microorganismos, análisis sobre la actividad de hongos formadores de micorrizas de vesículo-arbusculares y características edafofaunísticas.

Desde el punto de vista físico, la materia orgánica del suelo ocurre en tres estados: sin descomponer, en diferentes grados de descomposición y en forma de humus. Física, química y biológicamente, las tres son muy importantes. La materia orgánica sin descomponer, físicamente actúa como mulch sobre el suelo, entonces impide el impacto directo de las gotas de agua lluvia, defendiendo la estructura del suelo y evitando por lo tanto el sellamiento de la superficie del suelo, que posteriormente pudiera causar problemas de infiltración y escorrentía. Ayuda además a conservar el agua aprovechable al evitar en parte la evaporación directa. Biológicamente, la materia orgánica en descomposición está cumpliendo su ciclo natural de

reposición y reciclaje de elementos nutritivos, a través de una actividad microbiana que está mejorando la condición física del suelo. Químicamente, el humus formado como producto final de la descomposición de la materia orgánica al poseer alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), mejora enormemente la retención de nutrientes para las plantas.

Dentro del conocimiento del comportamiento de la materia orgánica se debe dar más énfasis del que hasta ahora se ha dado a: la influencia de las fracciones sin descomponer y en descomposición; desarrollar metodologías de muestreo y de evaluación sobre las cantidades de materia orgánica que aportan los diferentes sistemas de producción, desde los que usan el suelo más intensivamente hasta los que lo usan casi en su estado natural.

La degradación por deforestación ocurre con diferente intensidad bajo dos presiones de uso: a) agricultura de bajos insumos y, b) agricultura mecanizada.

a) Agricultura de bajos insumos

Bajo condiciones naturales, los suelos tropicales han sido capaces de suplir los requerimientos nutricionales de la vegetación existente que ha evolucionado sobre ellos, gracias a los procesos de reciclaje de nutrientes y micorrización y han sido capaces de acumular la materia orgánica sobre ellos porque ha existido un desequilibrio entre la cantidad de biomasa aportada y la velocidad de descomposición. Al intervenir el bosque por deforestación y extracción, el hombre cambia el proceso dinámico: formación de biomasa-aporte de residuos-descomposición-acumulación y sólo deja actuando el proceso de descomposición, el cual continúa hasta dejar en niveles muy bajos la materia orgánica, produciéndose así un proceso de disminución de la capacidad de suministro de nutrientes que conlleva a una disminución en los rendimientos de los cultivos y a cambios negativos en las características físicas y biológicas del suelo, asociadas a la pérdida de materia orgánica, las cuales disminuyen las cualidades iniciales del suelo, causando degradación. El programa de tumba y quema del ICRAF ha dado grandes pasos en el entendimiento de estos procesos.

b) Agricultura mecanizada comercial

Los principales problemas de degradación, especialmente de las propiedades físicas del suelo, ocurren cuando se introduce al campo maquinaria agrícola. Es por lo tanto un problema de áreas mecanizables. La degradación prácticamente se inicia con el proceso de deforestación. La introducción de bulldozers para deforestación trae como consecuencias:

- a) Presión por peso, por lo tanto compactación.
- b) Sellamiento superficial por deslizamiento de llantas y arrastre de árboles.
- c) Desplazamiento de la capa de materia orgánica acumulada superficialmente en diferentes estados de descomposición.
- d) Sellamiento subsuperficial por raspado de las cuchillas.
- e) Calcinación del suelo en las líneas de quema del material talado.
- f) Distribución desuniforme de la materia orgánica sobre el área tanto en cantidad como

en calidad.

g) Afloramiento del subsuelo por raspado profundo y por destocoñado.

Posteriormente, la introducción de arados y rastras causan otra serie de cambios negativos que se manifiestan con el tiempo en degradación integral del suelo y en insostenibilidad. A continuación se discuten los resultados de algunas pruebas y ensayos realizados en la Amazonía colombiana, orientados al entendimiento de los mecanismos involucrados en los principales procesos degradativos.

2.2. Compactación , adensamiento y propiedades relacionadas

La compactación es una propiedad del suelo compleja, de difícil descripción y medición. La compactación reduce el volumen de macroporos (>0.05 mm), causando restricciones en el movimiento de agua y en el intercambio de gases y de calor entre el suelo y la atmósfera, impidiendo el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes.

Trabajos como el de Pinzón y Amézquita (1991) y Escobar e Ioriatti (1992), han reconocido que en los suelos intervenidos del Piedemonte Amazónico (Caquetá), se ha desarrollado el proceso de compactación en los Ultisoles del lomerío y en los Inceptisoles y Entisoles del paisaje aluvial, en razón a las fuerzas externas causadas por el tráfico animal (bovinos - equinos, etc) en las pasturas y a fuerzas internas de contracción y expansión del material arcilloso como resultado de los ciclos de secado y humedecimiento de los suelos.

Dicho proceso ha conducido a la formación de un pseudogley de superficie (A3g), en la base del horizonte A o en la zona de contacto con el horizonte B (AB-BA) y originado una capa compacta no mayor de 10 cm de espesor, donde ocurren procesos de destrucción de hematita y formación de goetita por las condiciones reductoras. Este proceso es común en los suelos intervenidos y no se manifiesta en los suelos bajo bosque natural. Es evidente que el desarrollo de esta capa compacta produce una disminución en el espacio poroso entre el horizonte superficial y los subsuperficiales y consecuentemente ofrece resistencia al flujo del agua a través del perfil y causa aumentos en el porcentaje de agua de escorrentía, la cual se incrementa significativamente de 5% bajo bosque a 40% en suelo desnudo.

El mencionado proceso está relacionado con las siguientes características y propiedades de los suelos :

2.2.1. Textura

Las fracciones limo y arcilla representan más del 70% de la granulometría en cinco de seis suelos estudiados (Cuadro 1). En los primeros cuatro suelos se presenta gradiente textural en los primeros 30 cm del perfil indicando discontinuidad de partículas. Aparentemente la utilización de los suelos bajo pastura no ha alterado la distribución textural. El elevado porcentaje del limo en estos suelos indica que son poco intemperizados. Este elevado

porcentaje de limo principalmente en los suelos del lomerío hace que sean distintos a los Ultisoles y Alfisoles originados de limonitas en diversas regiones del Brasil. Con excepción de los suelos de terraza, la participación de las fracciones más gruesas en el comportamiento físico es poca. Los valores de resistencia a la penetración y de densidad aparente en general, presentan la tendencia a aumentar con la profundidad en los Ultisoles (Cuadro 3) lo cual es acorde con el aumento en el contenido de arcilla a través del perfil.

2.2.2. Estructura y estabilidad estructural

La estructura en los horizontes superficiales de los Ultisoles bajo bosque se presenta en bloques subangulares de grado débil a moderado. El horizonte argílico (Bt) presenta bloques subangulares de grado moderado a fuerte y tiende a ser maciza en el contacto con el horizonte C. En cuanto a los suelos bajo *B. decumbens* y *H. aturensis* en los horizontes superficiales (0-5 cm), el tipo de estructura es el mismo que bajo bosque, pero los agregados son más grandes, pasando a una estructura maciza en el segundo subhorizonte (5-15 cm); reflejando la susceptibilidad de los agregados a la deformación, debido a altos valores en el límite líquido (<50, Cuadro 10) y a la presión por pisoteo a que es sometido el suelo por el tráfico de ganado. En el horizonte argílico no hay alteración de la estructura porque la presión producida por el pisoteo no alcanza a llegar a esas profundidades.

Cuadro 1. Composición granulométrica de tres unidades de suelo bajo diferentes usos y coberturas.

| Geomorfología | Suelo | Vegetación | Prof. (cm) | Fracciones % | | | Clase Textural |
|---------------|------------|---------------------|---------------|--------------|------|---------|-------------------|
| | | | | Arena | Limo | Arcilla | |
| Lomerío | Ultisol | Bosque natural | 0-5 | 27 | 40 | 33 | FAr |
| | | | 5-15 | 24 | 38 | 38 | FAr |
| | | | 15-30 | 21 | 36 | 43 | Ar |
| Lomerío | Ultisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 9 | 44 | 47 | ArL |
| | | | 5-15 | 7 | 39 | 54 | Ar |
| | | | 15-30 | 8 | 37 | 55 | Ar |
| Lomerío | Ultisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 19 | 47 | 34 | FArL |
| | | | 5-15 | 14 | 50 | 36 | FArL |
| | | | 15-30 | 20 | 41 | 39 | FArL |
| Terraza | Inceptisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 31 | 32 | 37 | FAr |
| | | | 5-15 | 21 | 33 | 46 | Ar |
| | | | 15-30 | 31 | 29 | 40 | FAr |
| Terraza | Inceptisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 49 | 30 | 21 | FArA |
| | | | 5-15 | 53 | 25 | 22 | FArA |
| | | | 15-30 | 50 | 24 | 26 | FArA |
| Vega | Entisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 5 | 60 | 35 | FArL |
| | | | 5-15 | 8 | 62 | 30 | FArL |
| | | | 15-30 | 4 | 73 | 23 | FL |

Aparentemente el régimen perúdicico de la región interactuando con un material de origen fino rico en limo, bajos porcentajes de materia orgánica (1.5-3%) y altas concentraciones de óxidos de hierro y aluminio, no ha favorecido el desarrollo de una estructura estable y es por eso que al sufrir el suelo un manejo intensivo se ha tornado compacto e impermeable. Evidencias de este hecho puede comprobarse por la presencia de moteados en los perfiles, las cuales indican condiciones de reducción, disminución en las tasas de infiltración e incremento de los valores de densidad aparente.

En el Cuadro 2, se presenta el diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados estables al agua bajo diferente condición de uso y tipo de suelo. Este osciló entre 1.9 y 3.2 mm y entre 1.5 a 2.6 mm cuando se analizaron en los mismos suelos para las épocas de sequía y de lluvia respectivamente. Se observa que el DMP de los agregados es mayor bajo *B. decumbens* que bajo las demás coberturas, lo que demostraría la influencia de la gramínea en la estructuración del suelo. Los valores del estado de agregación fueron mayores en los Ultisoles en la época seca. En general, los suelos presentan tendencia a incrementar su estabilidad con la profundidad, lo que correlaciona con los incrementos de arcilla, aunque la materia orgánica, tanto por cantidad como por calidad también influye sobre la génesis de la estructura. La estabilidad más baja la presentan los suelos con los mayores valores de arena y de limo. De manera general se aceptan como suelos de baja estabilidad de agregación a aquellos cuyo DMP es inferior a 0.5 mm. A juzgar por este valor, los suelos tienen buena estabilidad estructural en relación al método de determinación (Yoder), pero realmente son incapaces de resistir las fuerzas degradativas a las cuales están sometidos "in situ".

Cuadro 2. Estabilidad estructural en tres unidades de suelo y bajo diferentes usos y coberturas.

| Geomorfología | Suelo | Vegetación | Prof. (cm) | Estado de Agregación | | | |
|---------------|------------|---------------------|---------------|----------------------|-----------|----------------|-----------|
| | | | | Epoca seca | | Epoca lluviosa | |
| | | | | % | DPM mm | % | DPM mm |
| Lomerío | Ultisol | Bosque natural | 0-5 | 82 | 2.8 | 46 | 1.5 |
| | | | 5-15 | 83 | 3.2 | 52 | 1.7 |
| | | | 15-30 | 86 | 2.5 | 55 | 1.6 |
| Lomerío | Ultisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 68 | 2.8 | 39 | 2.0 |
| | | | 5-15 | - | - | - | - |
| | | | 15-30 | 85 | 3.2 | 99 | 3.3 |
| Lomerío | Ultisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 82 | 3.1 | 63 | 2.3 |
| | | | 5-15 | 77 | 2.9 | 95 | 3.5 |
| | | | 15-30 | 87 | 2.9 | 90 | 3.7 |
| Terraza | Inceptisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 73 | 3.3 | 44 | 1.8 |
| | | | 5-15 | - | - | - | - |
| | | | 15-30 | 99 | 2.9 | 68 | 2.1 |
| Terraza | Inceptisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 68 | 2.9 | 65 | 2.6 |
| | | | 5-15 | 57 | 1.9 | 54 | 2.3 |
| | | | 15-30 | 70 | 2.4 | 46 | 1.5 |
| Vega | Entisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 64 | 2.5 | 43 | 1.8 |
| | | | 5-15 | 62 | 2.3 | 47 | 1.6 |
| | | | 15-30 | - | - | - | - |

2.2.3. Densidad aparente

Los valores de densidad aparente generalmente aumentan con la profundidad en todos los suelos, independiente de la posición geomorfológica (Cuadro 3). En los Ultisoles los valores en los horizontes inferiores reflejan un material arcilloso poco poroso, originándose ahí restricciones en el drenaje. La limonita, material de origen de estos suelos, es extremadamente compacta cuando se compara con limonitas y arcillolitas de las diversas regiones Brasileñas, incluyendo la Amazonia.

Grohmann y Queiroz (1966) concluyeron de sus trabajos que en los Oxisoles, la compactación artificial causó problemas en el desarrollo de las raíces de arroz, cuando los valores de densidad aparente fueron mayores de 1.42 g/cm^3 partiendo de 0.98 g/cm^3 , en tanto que en los Ultisoles los problemas se presentaron cuando se obtuvieron valores de 1.38 g/cm^3 habiéndose iniciado con 1.32 g/cm^3 , lo cual demuestra la diferencia tan grande entre los dos grupos de suelos en su respuesta a manejo físico.

2.2.4. Resistencia a la Penetración.

El Cuadro 3 muestra que la compactación del suelo, medida como resistencia a la penetración, es mayor entre 5 cm y 15 cm en los suelos con *H. aturensis* y disminuyó en suelos con *B. decumbens*. En el suelo bajo bosque, la resistencia a la penetración fue baja. Por otra parte, el esfuerzo a la penetración fue mayor en la terraza y en el lomerío, especialmente cuando estaba presente la especie *H. aturensis*. La tendencia de aumento con la profundidad es indicativa de la discontinuidad del espacio poroso del suelo, la cual necesariamente causa trastornos en los procesos de contacto ion-raíz y en el desarrollo de las raíces.

2.2.5. Infiltración.

Esta propiedad del suelo resultó afectada por las acciones de manejo bajo pasturas (Cuadro 4), como consecuencia de la reducción en el porcentaje de macroporos respecto a los valores determinados para el bosque natural, tal como se mencionaba en el Cuadro 2. En el suelo bajo bosque la infiltración fue de 7.0 cm/hora; por el contrario, en el lomerío y en la terraza con la especie *H. aturensis* la infiltración fue muy baja ($< 0.8 \text{ cm/hora}$); sin embargo, en estas posiciones geomorfológicas la introducción de *B. decumbens* mejoró notablemente la tasa de infiltración, lo cual se puede asociarse a valores de densidad aparente más bajos, mejor estructura, mejor distribución de la macroporosidad y a protección contra el sellamiento superficial.

Al confrontar el conjunto de valores de infiltración básica con los reportados por Moura y Buol (1972), citados por Ioriatte (1988) para un Oxisol del Pará (Amazonía brasileña), bajo bosque natural (62 cm/h) y después de la quema de la vegetación (12 cm/h) se puede catalogar que, inclusive la infiltración en el Ultisol bajo bosque (7 cm/h), estaría en una categoría de baja y cualquier perturbación por simple que fuera, puede afectar seriamente esta propiedad.

Cuadro 3. Densidad aparente y resistencia a la penetración de tres suelos bajo diferentes usos y coberturas.

| Geomorfología | Suelo | Vegetación | Prof. (cm) | Métodos | | Esfuerzo de penetración kg. cm ⁻² |
|---------------|------------|---------------------|------------|-------------------|------|---|
| | | | | Terrón parafinado | Hoyo | |
| Lomerío | Ultisol | Bosque natural | 0-5 | 1.10 | 1.10 | 2.1 |
| | | | 5-15 | 1.22 | 1.30 | 3.3 |
| | | | 15-30 | 1.30 | 1.28 | 3.4 |
| Lomerío | Ultisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 1.40 | 1.47 | 8.3 |
| | | | 5-15 | 1.53 | 1.62 | 12.9 |
| | | | 15-30 | 1.30 | 1.53 | 5.5 |
| Lomerío | Ultisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 1.00 | 1.08 | 7.2 |
| | | | 5-15 | 1.30 | 1.56 | 9.7 |
| | | | 15-30 | 1.20 | 1.42 | 5.1 |
| Terraza | Inceptisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 1.60 | 1.39 | 11.7 |
| | | | 5-15 | 1.63 | 1.70 | 13.8 |
| | | | 15-30 | 1.43 | 1.48 | 5.5 |
| Terraza | Inceptisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 1.00 | 1.18 | 6.6 |
| | | | 5-15 | 1.40 | 1.53 | 7.6 |
| | | | 15-30 | 1.50 | 1.41 | 5.0 |
| Vega | Entisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 1.00 | 1.20 | 3.4 |
| | | | 5-15 | 1.20 | 1.26 | 3.6 |
| | | | 15-30 | 1.20 | 1.19 | 3.8 |

Cuadro 4. Variación de la infiltración básica en tres suelos bajo los diferentes usos y coberturas.

| Geomorfológica | Suelo | Vegetación | Infiltración (cm/hora) |
|----------------|--------------|---------------------|------------------------|
| Lomerío | (Ultisol) | Bosque natural | 7.0 |
| Lomerío | (Ultisol) | <i>H. aturensis</i> | 0.8 |
| Lomerío | (Ultisol) | <i>B. decumbens</i> | 6.0 |
| Terraza | (Inceptisol) | <i>H. aturensis</i> | 0.0 |
| Terraza | (Inceptisol) | <i>B. decumbens</i> | 3.5 |
| Vega | (Entisol) | <i>H. aturensis</i> | 5.0 |

2.2.6. Porosidad.

Los valores de porosidad (Cuadro 5) muestran que para las mismas condiciones (suelo-profundidad-vegetación) los parámetros evaluados presentaron fluctuaciones importantes entre las épocas de mínima y máximas precipitaciones. Es decir, la porosidad del suelo tiene la capacidad de fluctuar dentro de ciertos valores por efecto de sequía o exceso de humedad. Si se considera para los suelos del lomerío (Ultisoles), que los valores de porosidad bajo bosque

corresponden al estado original, se puede observar que los suelos bajo pastura (*H. aturensis* y *B. decumbens*) sufrieron una gran disminución en la macroporosidad, la cual excedió los límites mínimos de la fluctuación época seca - época lluviosa y no pudo retornar a su "estado original" demostrándose consecuentemente que ha sufrido degradación.

Cuadro 5. Distribución de la porosidad de tres suelos bajo diferentes usos y coberturas.

| Geomorfología | Suelo | Vegetación | Prof. (cm) | Epoca seca | | Epoca húmeda | |
|---------------|------------|---------------------|---------------|-------------|-------|--------------|-------|
| | | | | Macro | Micro | Macro | Micro |
| | | | | -----%----- | | | |
| Lomerío | Ultisol | Bosque natural | 0-5 | 23 | 33 | 26 | 34 |
| | | | 5-15 | 21 | 25 | 18 | 33 |
| | | | 15-30 | 18 | 31 | 17 | 35 |
| Lomerío | Ultisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 11 | 25 | 17 | 40 |
| | | | 5-15 | 12 | 23 | 11 | 25 |
| | | | 15-30 | 07 | 27 | 14 | 34 |
| Lomerío | Ultisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 18 | 37 | 17 | 37 |
| | | | 5-15 | 14 | 26 | 16 | 30 |
| | | | 15-30 | 17 | 29 | 19 | 31 |
| Terraza | Inceptisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 15 | 22 | 13 | 47 |
| | | | 5-15 | 10 | 16 | 18 | 32 |
| | | | 15-30 | 12 | 23 | 15 | 36 |
| Terraza | Inceptisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 29 | 20 | 24 | 33 |
| | | | 5-15 | 21 | 16 | 21 | 24 |
| | | | 15-30 | 20 | 19 | 20 | 30 |
| Vega | Entisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 22 | 26 | 15 | 41 |
| | | | 5-15 | 15 | 30 | 16 | 31 |
| | | | 15-30 | 18 | 32 | 15 | 35 |

2.2.7. Profundidad efectiva

En general, los suelos son demasiado superficiales (0-25 cm) en todos los casos y bajo las distintas cubiertas vegetales. Este factor limitante es acentuado por la compactación y por niveles freáticos superficiales en los suelos aluviales y en lomerío por la alta saturación del aluminio (> del 50%) que actúa como barrera química afectando el desarrollo radicular.

2.3. Erosión hídrica y propiedades relacionadas

En el paisaje del Piedemonte Amazónico se registran fenómenos de sedimentación fluvial en las llanuras aluviales y eventos de tipo erosional en todas las unidades de suelo. Estos procesos son el resultado tanto de la geodinámica interna como de la externa. El entorno tropical -cálido - húmedo hace que la naturaleza de la región sea bastante frágil, ya que en ella confluyen eventos y mecanismos degradativos relacionados con la alta erosividad de las lluvias, la

transformación del bosque natural en pasturas y las limitaciones de los suelos en términos conservacionistas. La erosión hídrica se puede subdividir en erosión pluvial y erosión fluvial para esta región.

2.3.1. Erosión por lluvia

La precipitación es uno de los agentes más activos responsables de la erosión de los suelos. En el Piedemonte Amazónico, el régimen de precipitación es monomodal y a nivel macroclimático esta influido por las variaciones térmicas de los hemisferios Norte y Sur (ciclos astronómicos). Las mayores precipitaciones coinciden con el solsticio de invierno del hemisferio Sur, en tanto que las menores coinciden con el solsticio de verano. En los equinoccios de otoño y primavera las precipitaciones son moderadas.

En el Centro de Investigaciones de Macagual, desde 1977, se vienen adelantando investigaciones en parcelas de escorrentía, con el fin de evaluar la influencia de las precipitaciones en las pérdidas de suelo bajo diferentes condiciones de uso, que van desde suelo desnudo hasta suelo bajo bosque natural. Algunos de los resultados se muestran a continuación.

Análisis de erosividad de las lluvias

El potencial erosivo de la precipitación resulta del producto de la intensidad (mm/h) por la energía cinética (J) que, según Wischmeier (1958), es el mejor estimador del daño o perturbación que puede ocasionar el impacto de las gotas de lluvia al dispersar los agregados y/o partículas de la superficie del suelo. Navas y Perea (1983) en el Piedemonte Amazónico del Caquetá, utilizando información de 274 eventos pluviales, determinaron el grado de asociación ($r = 0.77$) entre la erosividad de las lluvias y el peso de las partículas de arena desplazadas de los cilindros de Ellyson. El valor de la correlación muestra que no hubo mucha afinidad entre los parámetros comparados, lo cual empieza a sugerir que la USLE no se adapta bien a las condiciones climáticas de la zona respecto al potencial erosivo de las lluvias.

Para esa misma región, Escobar, Amézquita y Navas (1993) y López (1995), han estado estudiando el comportamiento de la energía cinética de las lluvias para varias intensidades. El Cuadro 6 muestra la variación de los valores de R correspondientes al cálculo de este parámetro a partir de EI_5 hasta EI_{∞} con incremento cada 5 minutos, con el fin de poder establecer qué valor de R correlacionaba mejor con las pérdidas reales de suelo. Se encontró correlación baja entre el EI para cualquier lapso de tiempo y la pérdida de suelo determinada experimentalmente, lo cual demuestra que los procesos de erosión en esta zona son más determinados por otras características de la lluvia que por el producto de la Energía x la Intensidad (EI).

Cuadro 6. Índices medios anuales de la erosividad en el Centro de Investigaciones Macagual, Piedemonte Amazónico - Caquetá (Colombia).

| AÑO | R5 | R10 | R15 | R20 | R25 | R30 | R35 | R40 | R45 | R50 | R55 | R60 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1977 | 6578 | 5398 | 4720 | 4145 | 3709 | 3440 | 3189 | 2969 | 2773 | 2575 | 2443 | 2290 |
| 1978 | 5245 | 4216 | 3636 | 3203 | 2843 | 2594 | 2385 | 2213 | 2080 | 1942 | 1831 | 1717 |
| 1979 | 5172 | 4253 | 3823 | 3456 | 3192 | 2955 | 2735 | 2533 | 2324 | 2167 | 2045 | 1937 |
| 1980 | 7843 | 6709 | 6134 | 5724 | 5355 | 5066 | 4806 | 4579 | 4302 | 4117 | 3949 | 3786 |
| 1981 | 3763 | 3062 | 2768 | 2402 | 2170 | 1986 | 1839 | 1702 | 1619 | 1486 | 1398 | 1302 |
| 1982 | 4790 | 3770 | 3399 | 2987 | 2708 | 2465 | 2274 | 2104 | 1966 | 1964 | 1859 | 1758 |
| 1983 | 5580 | 4531 | 3926 | 3528 | 3212 | 2928 | 2705 | 2503 | 2336 | 2216 | 2120 | 2009 |
| 1984 | 4517 | 3503 | 3086 | 2753 | 2501 | 2282 | 2086 | 1945 | 1809 | 1691 | 1608 | 1511 |
| 1985 | 5528 | 4041 | 3609 | 3212 | 3029 | 2763 | 2563 | 2349 | 2190 | 2063 | 1950 | 1883 |
| 1986 | 4266 | 3278 | 2902 | 2555 | 2325 | 2123 | 1960 | 1824 | 1700 | 1594 | 1593 | 1492 |
| 1987 | 4676 | 3439 | 2928 | 2580 | 2311 | 2137 | 1925 | 1779 | 1674 | 1545 | 1462 | 1392 |
| 1988 | 4668 | 3649 | 3258 | 2876 | 2580 | 2376 | 2175 | 2029 | 1908 | 1802 | 1710 | 1608 |
| 1989 | 5069 | 3932 | 3474 | 3161 | 2851 | 2605 | 2400 | 2181 | 2032 | 1901 | 1809 | 1701 |
| 1990 | 6773 | 5392 | 5575 | 4380 | 3940 | 3492 | 3173 | 2848 | 2633 | 2453 | 2289 | 2153 |
| 1991 | 4807 | 3930 | 3484 | 3047 | 2777 | 2517 | 2313 | 2120 | 1978 | 1845 | 1738 | 1654 |
| 1992 | 4979 | 3761 | 3222 | 2854 | 2526 | 2278 | 2073 | 1892 | 1693 | 1556 | 1493 | 1430 |
| X | 5266 | 4179 | 3747 | 3304 | 3002 | 2750 | 2538 | 2348 | 2189 | 2057 | 1956 | 1851 |

Los datos obtenidos con intervalos cada 5 minutos tienen un promedio multianual de erosividad que varía desde $EI_{60}=1851 \text{ Tm.cm ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ hasta $EI_5=5266 \text{ Tm.cm ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Los datos así calculados califican como alto a extremadamente alto el potencial erosivo de las lluvias y muestran la tendencia a la disminución del factor R a medida que se incrementa el tiempo de intensidad máxima para su cálculo. El valor clásico planteado por Wischmeier y Smith (1958) como (EI_{30}), fue de $2750 \text{ Tm.cm ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, considerado como un valor muy alto.

La erosividad, independiente de la intensidad con que se calcule, guarda una relación directa con los volúmenes mensuales de precipitación, es decir que los años de mayores volúmenes de lluvia generan mayores valores de R. Ese comportamiento se observa tanto para períodos anuales como mensuales. También guarda correlación con la intensidad de los aguaceros, a mayor intensidad, mayor energía cinética, en tanto que, los aguaceros de mayor duración y menor volumen de lluvia generan energías más bajas. Esto afecta el valor R anual, ya que no es la duración de los aguaceros sino la intensidad y el volumen total de la precipitación lo que la hace variar.

Cabe destacar que los aguaceros menores de 25mm que son el 80% del total y que aportan el 36.8% del volumen de la lluvia anual contribuyen apenas con el 7 al 14% del potencial erosivo, en contraste con los aguaceros mayores de 200 mm que son el 0.1% del total, aportan el 0.8% del volumen total de lluvia y contribuyen con el 16 al 21% del valor de la erosividad, lo que demuestra que ésta depende en gran medida de la intensidad de la lluvia y del volumen total de los aguaceros.

Pérdida de suelo

Los resultados sobre transporte de sedimentos por aguas de escorrentía en ocho manejos evaluados, durante el período 1977 a 1989 en el Centro de Investigaciones de Macagual se consignan en el Cuadro 7. Los valores promedios anuales son los siguientes: bajo bosque natural se pierde 0.281 ton/ha de suelo y 135 mm de lluvia por escorrentía; en suelo bajo rastrojo 0.327 ton/ha y 187 mm, en suelo bajo mulch 1 ton/ha y 281 mm, en suelo desnudo 153 ton/ha y 1.176 mm, en pastura con *B. decumbens* bajo corte 1 ton/ha, en pastura de *B. decumbens* con una carga de 2 UG/ha 13.4 ton/ha y 351 mm, con una carga de 1.5 UG/ha 7.6 ton/ha y 239 mm y con una carga de 1 UG/ha 8.2 ton/ha y 276 mm. En general, las máximas pérdidas se presentan en los meses de abril a julio (> 60%). La composición mineralógica de los sedimentos se presenta en la Cuadro 8 y está conformada por caolinita, cuarzo y mica. La pérdida de la fracción coloidal mineral aunada a la pérdida de la fracción orgánica (Cuadro 7) está causando el empobrecimiento acumulativo del suelo.

En las unidades experimentales, en donde la acción directa de la energía cinética de las lluvias ha sido disipada o neutralizada por las coberturas (hojarasca del bosque, rastrojo y mulch) y aún se presenta dispersión, se puede afirmar que ésta es electroquímica. En superficie (0-6 cm) se desarrolla una densidad de carga media, pero suficiente para propiciar la dispersión, con la consiguiente migración de coloides.

Cuadro 7. Capacidad de transporte de sedimentos por las aguas de escorrentías en un Ultisol con ocho manejos en el CI Macagual, Piedemonte Amazónico. Período 1978 - 1992.

| Manejo | Pendiente % | P. Suelo ton.ha ⁻¹ | Escorrentía (mm) | M.O. % |
|------------------------------|----------------|----------------------------------|---------------------|-----------|
| Bosque | 39 | 0,281 | 135 | 24.6 |
| Rastrojo | 16 | 0,327 | 187 | - |
| Suelo + mulch | 24 | 1,000 | 281 | 10.1 |
| Suelo desnudo | 24 | 153,000 | 1176 | 1.9 |
| <i>B. decumbens</i> (corte) | 39 | 1,000 | | |
| <i>B. decumbens</i> (2UG/ha) | 20 | 13.300 | 351 | |
| (1.5 UG/ha) | 18 | 7.600 | 239 | |
| (1 UG/ha) | 22 | 8.200 | 276 | |

Cuadro 8. Composición mineralógica de los sedimentos en suspensión.

| Manejo | Minerales en la fracción arcilla | | |
|---------------|----------------------------------|--------|------|
| | Caolinita | Cuarzo | Mica |
| | -----% | | |
| Bosque | 34 | 61 | 5 |
| Suelo + mulch | 56 | 35 | 9 |
| Suelo desnudo | 57 | 33 | 10 |

Al encontrarse el suelo disperso y al humedecerse por efecto de la lluvia, las fracciones coloidales se ponen en movimiento por acción de la escorrentía, perdiéndose en relación directa a ésta.

En el suelo desnudo el tamaño de los materiales arrastrados por escorrentía (Cuadro 9) estuvo conformado por agregados > 4 mm, hasta partículas coloidales, estando su diámetro medio ponderado (DMP) en el rango de 1.9 a 2.4 mm. Este transporte de materiales por las aguas de escorrentía indica que, aunque el estado de agregación de los Ultisoles es alto (Cuadro 2), cuando se encuentran desprovistos de vegetación protectora, la energía de la precipitación y la escorrentía resultante tienen la capacidad para movilizar tanto los agregados como los microagregados. Bajo condiciones de menor erosividad, se podrían catalogar los índices de agregación como una barrera anti-erosiva eficiente, pero para las condiciones imperantes resultan poco significativos. La composición mineralógica de la fracción coloidal fue similar a la de los manejos citados anteriormente. En esta unidad (suelo desnudo) experimental, la dispersión fue principalmente mecánica (99%) por efecto de la energía cinética de las lluvias.

Con respecto a los valores de aguas de escorrentía, se nota que hay una disminución muy importante en la "aceptancia de lluvias" respecto al suelo bajo bosque natural (Cuadro 7), lo que indica que hay una disminución en la porosidad responsable del drenaje interno de los suelos, macroporos (> 60 mm) y mesoporos (60 a 0.2 mm). Esto significa que la intervención humana causa degradación en el sistema suelo, por manejo inapropiado y hay que implementar prácticas que propicien una mayor infiltración de agua en el suelo, con el fin de reducir el fenómeno de la erosión.

Cuadro 9. Diámetro y porcentaje (%) de agregados transportados por escorrentía bajo suelo desnudo.

| Diámetro | % |
|------------|-----------------|
| > 4 mm | 7 |
| 4 - 2 mm | 30 |
| 2 - 1 mm | 30 |
| 1 - 250 µm | 26 |
| < 250 µm | 7 |
| DMP * | 1.9 mm a 2.4 mm |

* DMP = Diámetro Medio Ponderado

2.3.2. Modelo predictivo de pérdidas de suelo

Con la ecuación universal "USLE" no fue posible predecir las pérdidas de suelo, aún haciendo modificaciones por intensidad, por lo tanto, se desarrolló un modelo matemático fundamentado en los resultados de las pérdidas reales de suelo que se presentaron en las parcelas experimentales. El modelo creado debía de cumplir con las expectativas de predecir con un alto grado de confiabilidad las pérdidas de suelo.

Predicción de la precipitación en función de la duración de los eventos

En el trabajo de López (1995) se encontró que existe una altísima dependencia entre la escorrentía total causada del aguacero y las pérdidas de suelo, también una correlación muy alta entre la precipitación total y la escorrentía y en menor proporción entre la precipitación total del evento de lluvia (aguacero) y la pérdida de suelo. Los modelos se encaminaron a ajustar estas variables de mayor influencia para predecir las pérdidas potenciales de suelo a partir de datos experimentales.

Luego de efectuado el análisis se encontró un modelo que predice las pérdidas de suelo en función de la escorrentía y la precipitación. Como es difícil medir en una estación climatológica la escorrentía de un evento de lluvia, se generó un modelo que predice la escorrentía en función de la precipitación y que sirve de base para calcular la pérdida potencial de suelo en función de la escorrentía. El modelo generado contempla 2 etapas, así:

Etapa I:

Modelo de predicción de escorrentía en función de la precipitación

$$E = e^{(0.08728979P - 0.000607431P^2)}$$

$$R^2 = 0.95$$

$$C.V. = 22.78 \%$$

Donde: E= Escorrentía (mm)
P= Precipitación total del evento (mm)

Luego de estimada la escorrentía se pasa a la etapa II donde se predice las pérdidas de suelo en función de la escorrentía obtenida en la etapa I.

Etapa II:

Modelo de predicción de pérdida de suelo en función de la escorrentía

$$A = e^{(0.87584787 E - 0.0318347 E^2 + 0.0003850555 E^3)}$$

$$R^2 = 0.98$$

$$C.V. = 16\%$$

Donde: A= Pérdida de suelo
E= Escorrentía (mm)
P= Precipitación total del evento (mm)

Limitaciones del modelo

- Predice la pérdida de suelo bajo condiciones de suelo desnudo
- La pendiente típica para la pérdida unitaria básica es del 24%

- No predice pérdida de suelo en donde los eventos de lluvia superan los 107 mm.
- Si el evento supera este valor se recomienda dividirlo en mitades iguales para el cálculo.
- La predicción la ejecuta para aguaceros individuales o suma de estos que no superen los 107 mm.

Adicional al modelo anterior se generó un modelo alternativo en donde se predice la pérdida de suelo directamente de los niveles de precipitación sin que haya la necesidad de hacer un cálculo intermedio como la escorrentía.

Modelo de predicción de pérdida de suelo en función de la precipitación

Este modelo predice directamente la pérdida de suelo, en función de los volúmenes de lluvia aportados (kg/ha).

$$A = e^{(0.36933040P - 0.0057616P^2 + 0.00002885431P^3)}$$

$$R^2 = 0.95***$$

$$C.V. = 24.00$$

Donde: A = Pérdida de suelo (kg/ha)
P = Precipitación (mm)

Este modelo es de carácter exponencial parabólico y tiene las mismas limitaciones que se mencionaron anteriormente.

2.4. Erosión fluvial.

En los suelos aluviales del Piedemonte del Caquetá, el modelado del paisaje es de tipo torrencial debido a las crecidas súbitas y violentas de los ríos. De otra parte, la deforestación indiscriminada de los márgenes de las corrientes, los materiales geológicos no consolidados, las amplias fluctuaciones de los caudales a través del año, la dinámica de los meandros, el flujo de aguas sub-superficiales, los procesos de secado y humedecimiento del suelo, la ausencia de rocosidad en los lecho de los ríos y la acción de la gravedad, son entre otros los principales causantes de una erosión fluvial acelerada en las áreas de vegas.

Se han adelantado algunos estudios en el Centro de Investigaciones "Macagual", en áreas bajo pasturas degradadas, en la zona de confluencia de la quebrada "Mochilero" con el río "Bodoquero", cuyo caudal oscila entre 12 m³/s en el verano y 900 m³/s en el invierno, el fenómeno se presenta como erosión lateral en la orilla externa del río, siendo la pérdida de materiales edáficos del orden de 6 ton/m²; mientras que en la orilla interna actúa el proceso de la sedimentación, con una magnitud similar a la pérdida de suelo, pero los materiales depositados son de tipo grava, arena y limo y en varios años no es posible desarrollar ningún tipo de agricultura, lo que en cierta forma tipifica la desertificación de estas zonas aluviales. Paralelamente en la zona interfluvial, ocurre la erosión en surcos, los cuales se encuentran en promedio a distancias menores de 30 metros entre sí y con profundidades que oscilan alrededor de 2 m, ocupando áreas entre 400 m² y 1500 m². La

pérdida de material edáfico por efecto del agua subsuperficial, puede alcanzar valores superiores a las 80 tm/surco.año. Las anteriores cifras señalan que el proceso está ocurriendo de una forma muy acelerada y destructiva.

2.5. Remoción en masa y características derivadas

El paisaje de lomerío que es parte del relieve amazónico, en su mayoría es disimétrico y ha venido siendo afectado no sólo por procesos globales de disección, sino también, que hay evidencias generalizadas de movimientos masivos (deslizamientos y solifluxión) que generan "resaltos" u hombros sobre la pendiente. Aún cuando la remoción en masa ocurre en cualquier condición climática, se ha comprobado que ésta es más frecuente en áreas montañosas o colinadas bajo ambientes húmedos, porque aunque se considera a la gravedad como el principal mecanismo para que ocurra el movimiento de materiales, el agua es un agente indispensable.

Con base en los conceptos anteriores, la consistencia del suelo resulta ser la propiedad más asociada con la modalidad de movimientos en masa y en consecuencia, los valores de consistencia de los suelos estudiados expresados por los límites líquido, plástico e índice de plasticidad se presentan en el Cuadro 10. Tales valores, ayudan a caracterizar tanto el comportamiento físico del suelo como los procesos derivados del mismo.

Los límites líquidos en suelos de lomerío, terraza, y vega bajo *H. aturensis* son mayores de 50, lo cual significa que la película de agua se hace tan gruesa que la cohesión decrece y la fricción disminuye debido al efecto flotante lo que trae como resultado la disminución de la presión intergranular, además el exceso de agua hace aumentar el peso del material y la masa del suelo puede fluir bajo la acción de la fuerza de la gravedad a lo largo de la pendiente, inclusive en áreas relativamente planas.

El índice de plasticidad correlaciona, en consecuencia y en forma predominante con el porcentaje de arcilla de los Ultisoles. Los valores encontrados pueden caracterizarse como medianos para los horizontes superficiales y transicionales con excepción del Ultisol bajo *B. decumbens* (FarA). Debe destacarse su variación en función más del límite líquido que del límite plástico. Estos valores guardan una estrecha relación con el porcentaje de arcillas y su actividad. A pesar de dominar la arcilla caolinita en estos suelos, se presentan algunos contenidos de materiales interestratificados e integrados, los cuales afectan significativamente la interacción del agua con el suelo.

3. Conclusiones

Aun cuando se ha avanzado en el conocimiento del gran potencial degradativo que tienen los suelos presentes en el bosque húmedo tropical, se debe incrementar el conocimiento en la determinación de qué propiedades físicas, químicas y/o biológicas son las más sensibles a los cambios que produce las diferentes intensidades de uso y de manejo de los suelos bajo intervención humana, para poder determinar los límites críticos de estas propiedades y desarrollar técnicas para manejarlos sosteniblemente.

Cuadro 10. Límites de consistencia de tres suelos bajo diferentes usos y coberturas.

| Geomorfología | Suelo | Vegetación | Prof. (cm) | Límite Líquido | Límite Plástico | Índice Plasticidad |
|---------------|------------|---------------------|---------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| Lomerío | Ultisol | Bosque natural | 0-5 | 40 | 22 | 18 |
| | | | 5-15 | 38 | 21 | 17 |
| | | | 15-30 | 42 | 23 | 19 |
| Lomerío | Ultisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 51 | 31 | 20 |
| | | | 5-15 | 53 | 31 | 22 |
| | | | 15-30 | 53 | 31 | 22 |
| Lomerío | Ultisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 46 | 27 | 19 |
| | | | 5-15 | 43 | 24 | 19 |
| | | | 15-30 | 48 | 25 | 23 |
| Terraza | Inceptisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 51 | 33 | 18 |
| | | | 5-15 | 50 | 31 | 19 |
| | | | 15-30 | 46 | 28 | 18 |
| Terraza | Inceptisol | <i>B. decumbens</i> | 0-5 | 40 | 30 | 10 |
| | | | 5-15 | 34 | 28 | 16 |
| | | | 15-30 | 37 | 25 | 12 |
| Vega | Entisol | <i>H. aturensis</i> | 0-5 | 64 | 41 | 23 |
| | | | 5-15 | 56 | 33 | 23 |
| | | | 15-30 | 48 | 29 | 19 |

4. Bibliografía

AMEZQUITA, E. 1994. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. In: Silva, F. (ed), Fertilidad de Suelos, diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de Ciencia del Suelo. Santafé de Bogotá, Colombia. pp. 137-154.

COCHRANE, T.T. y P.A. SANCHEZ. 1982. Land resources, soil and their management in the Amazon region: a state of knowledge report. In: S.B. Hecht (ed.) Agriculture and land use research. CIAT, Cali, Colombia. pp. 137-209.

ESCOBAR, C.J., E. AMEZQUITA y J. NAVAS. 1993. Pérdida de suelo y agua por erosión bajo diferentes manejos en el ultisol del Piedemonte Amazónico (Caquetá - Colombia). Suelos Ecuatoriales, Revista Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 23 (1, 2): 180 - 184.

- ESCOBAR, C.J., J. NAVAS y E. AMEZQUITA. 1993. Evaluación del potencial erosivo de la lluvia en el Centro de Investigaciones "Macagual" Piedemonte Amazónico (Caquetá - Colombia). *Suelos Ecuatoriales, Revista Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*. 23(1, 2):185-188.
- ESCOBAR, C.J y J. NAVAS. 1993. Algunos parámetros climáticos y edáficos relacionados con el manejo y conservación de los Ultisoles del Piedemonte Amazónico en el departamento del Caquetá - Colombia. *Construir la Región. CIFISAM*, pp. 277 -299.
- ESCOBAR, C.J y J. IORIATTI. 1992. Características morfológicas y físicas de un Ultisol del Piedemonte Amazónico (Caquetá- Colombia). *Revista ICA*. 27 (2): 127-140.
- ESCOBAR, C.J y J. IORIATTI. 1992. Mineralogía, micromorfología y génesis. *Revista. ICA*. 27 (2): 141-153.
- ESCOBAR, C.J y J. IORIATTI. 1991. Distribución de la materia orgánica y del carbono -13 natural en un Ultisol del Piedemonte Amazónico. *Pasturas Tropicales. CIAT*. 13(2):27-30.
- FAO. 1983. Guidelines for the control of soil degradation. UNFSF and FAO. Rome.
- FUJISAKA, S., W. BELL, N. THOMAS, L. HURTADO y E. CRAWFORD. (forthcoming). Slash-and-Burn Agriculture, conversion to pasture and deforestation in two Brazilian Amazon Colonies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier Science Publisher. B.V. Amsterdam.
- GROHMANN, F y N. J.P. QUEIROZ. 1966. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. *Bragantia Campinas*, 25(38): 421-431.
- HECHT, S.B. 1982. Agroforestry in the Amazon Basin: practice, theory and limits of a promising land use. In: S.B.HECHT (ed), *Amazonia: Agriculture and Land Use Research*. CIAT, Cali, Colombia. pp. 331-371.
- INSTITUTO COLOMBIANO AGUSTIN CODAZZI, IGAC.1993. Aspectos ambientales para el ordenamiento territorial del occidente del departamento del Caquetá. Tomos I y II. *Estudios de la Amazonia Colombiana*, IGAC, Santafé de Bogotá.
- LAL, R. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soils and water resources in the tropics. *SMSS Technical Monograph*. No. 21. USDA, Soil conservation service, Ohio State University.
- LAL, R., B.A. STEWART. 1990. Soil degradation. *Adv. in Soil Sci.* vol II. Springer -

Verlag, New York INC. United States of America.

- LOPEZ, G. 1995. Evaluación y predicción de la pérdida de suelos en el Piedemonte Amazónico Colombiano. Tesis, M. Sc. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 212 p.
- MELILLO, J.M., C.A. PALM, R.A. HOUGHTON, G.W. WOODWELL y N. MYERS. 1985. A comparison of two recent estimates of disturbance in tropical forest. *Environmental Conservation*. 12:37-40.
- NAVAS, J. y J. PEREA. 1983. Erosión por salpique. Informe de progreso, CI Macagual, Florencia Caquetá (Colombia).
- PINZON, A y E. AMEZQUITA. 1991. Compactación de suelos por el pisoteo de animales en pastoreo en el Piedemonte Amazónico de Colombia. *Pasturas Tropicales*, CIAT. 13(2):21-26.
- RESTREPO, H., E. AMEZQUITA y J. NAVAS. 1991. Dinámica del proceso de erosión en algunos suelos del Piedemonte Llanero. *Suelos Ecuatoriales. Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*. 21(1): 81-85.
- RESTREPO, H. y J. NAVAS. 1982. Conservación de suelos de la Orinoquia: la erosión física y química al establecimiento de praderas con diferentes niveles de labranza. *Suelos Ecuatoriales. Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*. 12(2):146-160.
- RIQUIER, J. 1982. A world assessment of soil degradation. *Nature and resources*, 18(2):18-21.
- SANCHEZ, P.A. 1987. Management of acid soils in the humid tropics of Latin America. pp. 63-107. In: P.A. Sanchez, E.R. Stoner and E. Pushparajah (eds). *Management of acid tropical soils for sustainable agriculture*. International Board for Soil Research and Management, Bangkok, Thailand.
- SMYTH, T. J y D. K. CASSEL. 1995. Synthesis of long-term Soil Management Research on ultisols and oxisols in the Amazon. In: R. Lal y B.A. Stewart (eds.). *Soil Management basis for sustainability and environmental quality*. Adv. in Soil Sci. Lewis Publishers. pp. 13-60.
- TANAKA, A y T. SAKUMA. 1984. Agro-ecological condition of the oxisol-ultisol area the amazon river system. Faculty of Agriculture. Hokkaido University, Sapporo 060 Japan, 101 p.
- TOLEDO, J.M. 1994. El desarrollo sostenible amazónico en una economía de mercado: un análisis crítico. In: Memoria del Seminario Taller "Biodiversidad y desarrollo

sostenible de la amazonía en una economía de mercado". Lima, Perú. p. 1-41.

WISCHMEIER, W.H y D. SMITH. 1958. Rainfall energy and its relationship with soil loss. Trans. Amer. Geophysical Union . 39 (2): 285-291.

_____. 1978. Prediction rainfall erosion losses. A guide to Consevation planinig. USDA.